

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO EXPERIMENTAL DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE CASCA DE ARROZ  
EM MATERIAIS DE FRICÇÃO DE FREIOS

por

Gustavo da Silva Gehlen

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 2020

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

## CIP - Catalogação na Publicação

Gehlen, Gustavo da Silva  
ESTUDO EXPERIMENTAL DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE  
CASCA DE ARROZ EM MATERIAIS DE FRICÇÃO DE FREIOS /  
Gustavo da Silva Gehlen. -- 2020.  
27 f.  
Orientador: Patric Daniel Neis.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2020.

1. Tribologia. 2. Materiais de fricção. 3. Fibras  
naturais. 4. Casca de arroz. I. Neis, Patric Daniel,  
orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os  
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Gustavo da Silva Gehlen

ESTUDO EXPERIMENTAL DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE CASCA DE ARROZ  
EM MATERIAIS DE FRICÇÃO DE FREIOS

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  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mario Roland Sobczyk Sobrinho  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Patric Daniel Neis

Comissão de Avaliação:

Prof. Heraldo José de Amorim

Prof. Ney Francisco Ferreira

Prof. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, novembro de 2020

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, especialmente aos meus pais, Janice e Paulo, por todo suporte e carinho, não só durante o TCC, mas ao longo de toda a graduação.

Agradeço muito a minha namorada, Luiza, por todo apoio, carinho, compreensão e companheirismo durante todo esse período ímpar, ainda mais devido a situação da COVID-19. Me ajudando imensamente nas semanas dos ensaios experimentais, mas também durante toda a minha jornada na universidade.

Agradeço a todo o Laboratório de Tribologia (Latrib), que tornou possível esse estudo tribológico, especialmente ao colega MSc. Jean Poletto, por todo apoio e assessoria nos ensaios experimentais e processamento de dados.

Agradeço ao Laboratório de Materiais Poliméricos (LaPol), especialmente ao professor Sandro Amico, por todo apoio na fabricação dos compósitos.

Agradeço ao professor Patric Daniel Neis, por toda mentoria ao longo dos mais de 3 anos de iniciação científica no Labtrib.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2020

## ESTUDO EXPERIMENTAL DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE CASCA DE ARROZ EM MATERIAIS DE FRICÇÃO DE FREIOS

**Gehlen, Gustavo da Silva**  
gehlengus@hotmail.com

**Resumo.** Na indústria automobilística, as crescentes preocupações ecológicas promovem a busca pela fabricação de materiais de fricção com reduzido impacto ambiental. Em razão disso, o presente trabalho tem o objetivo de avaliar o potencial de utilização de casca de arroz em formulações de materiais de fricção. Para isso, foram desenvolvidos três materiais de fricção: um sem adição de casca de arroz (representando um material de fricção convencional) e outros dois com diferentes quantidades (6% e 12%) de casca de arroz. As amostras foram avaliadas em testes que contemplam altas temperaturas (até 550 °C). O desempenho das amostras foi avaliado em termos de desgaste e atrito, parâmetros mensurados durante os testes. Em temperaturas de até 300 °C ambas as formulações com casca de arroz se apresentaram adequadas, pois exibiram comportamento similar à formulação de referência. No entanto, em temperaturas de até 550 °C, as formulações com casca de arroz não apresentaram desempenho tribológico satisfatório pois apresentaram maior sensibilidade à temperatura. Com base nos valores dos índices de performance, a formulação com 6% de casca de arroz teve o desempenho mais próximo da formulação de referência. Portanto, conclui-se que a utilização de quantidades moderadas de casca de arroz (abaixo de 12%) possuem potencial relevante de aplicação.

**Palavras-chave:** materiais de fricção, fibras naturais, casca de arroz, cobre

### **Experimental study of the potential of using rice husk in brake friction materials**

**Abstract.** In the automobile industry, growing ecological concerns promote the search for the manufacture of friction materials with reduced environmental impact. As a result, the present work aims to evaluate the potential of using rice husk in friction material formulations. For this, three friction materials were developed: one without the addition of rice husks (representing a conventional friction material) and two others with different amounts (6% and 12%) of rice husks. The samples were evaluated in tests that contemplate high temperatures (up to 550 °C). The performance of the samples was evaluated in terms of wear and friction, parameters measured during the tests. At temperatures up to 300 °C, both rice husk formulations were adequate, as they exhibited behavior similar to the reference formulation. However, at temperatures up to 550 °C, rice husk formulations did not show satisfactory tribological performance as they showed greater sensitivity to temperature. Based on the values of the performance indexes, the formulation with 6% rice husk performed the closest to the reference formulation. Therefore, it is concluded that the use of moderate amounts of rice husk (below 12%) has relevant potential for application.

**Keywords:** friction materials, natural fibers, rice husk, copper

## NOMENCLATURA

### Símbolos

$\mu$  Coeficiente de atrito

### Abreviaturas e acrômimos

NAO	<i>Non-asbestos organic</i>
SM	<i>Semi-metallic</i>
LM	<i>Low-metallic</i>
CoF	Coeficiente de atrito
MF	Materiais de fricção
CA	Casca de arroz
TGA	Análise termogravimétrica
DTG	Derivada termogravimétrica

**SUMÁRIO**

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO</b> .....	2
2.1. <b>Materiais de fricção</b> .....	2
2.2. <b>Cobre</b> .....	3
2.3. <b>Casca de arroz (CA)</b> .....	3
2.4. <b>Procedimentos experimentais para a avaliação de materiais de fricção</b> ...4	
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	4
3.1. <b>Desenvolvimento dos materiais de fricção</b> .....	4
3.2. <b>Equipamentos utilizados</b> .....	6
3.3. <b>Procedimento experimental</b> .....	6
<b>4. RESULTADOS</b> .....	8
4.1. <b>Resultados de TGA, desgaste, <i>fade</i>, <i>recovery</i> e sensibilidade</b> .....	8
4.2. <b>Resultados de <math>P_{idx\_abs}</math> e <math>P_{idx\_rel}</math></b> .....	13
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	15
<b>6. REFERÊNCIAS</b> .....	16
<b>7. APÊNDICE</b> .....	18

## 1. INTRODUÇÃO

O freio automotivo é um sistema mecânico que converte energia cinética em energia térmica por fricção, oriunda do contato entre um material de fricção com a superfície do rotor (disco ou tambor) (SINGARAVELU et al., 2019). Os materiais de fricção (MF) devem possuir características versáteis, como atrito estável, baixa taxa de desgaste e alta estabilidade térmica (SINGH et al., 2017; BLAU, 2001). Como tais características não podem ser obtidas com um único elemento em sua formulação, os MF são uma mistura de diversos ingredientes, resultando em compósitos multifásicos com geralmente mais de 10 elementos distintos (LU, 2006; ARANGANATHAN; BIJWE, 2016). Esses elementos são classificados de acordo com a sua função, como fibras, aglutinantes, modificadores de atrito (lubrificantes e atritantes) e preenchimentos inertes ou funcionais (BIJWE, 1997). Uma das características peculiares das formulações de MF é o efeito sinérgico ou antagonístico de um elemento quando combinado com os demais. Isso faz com que o processo de formulação de MF seja extremamente complexo (ARANGANATHAN; BIJWE, 2016), sendo muitas vezes realizado por tentativa e erro (YUN et al., 2010).

Nos últimos anos, a utilização de materiais sintéticos ou metálicos tornou-se um assunto de grande preocupação devido ao aumento da consciência ambiental em termos de segurança, sustentabilidade e manutenção do equilíbrio ecológico (CHAUDHARY; AHMAD, 2020). Em razão disso, elementos que antes eram muito utilizados em MF devido à suas excelentes propriedades, como amianto e cobre, estão sendo substituídos por outros elementos não nocivos [MAHALE et al., 2019]. O uso de amianto é proibido no Brasil e em outros 66 países, incluindo Alemanha e Japão, devido à sua natureza carcinogênica (SINGARAVELU et al., 2019), enquanto que o uso de cobre foi reduzido e está prestes a ser banido em 2025 nos Estados Unidos, por causa da sua natureza prejudicial à vida aquática (MAHALE et al., 2019; SINGARAVELU et al., 2015). Em razão da toxicidade de alguns elementos tradicionais e da crescente conscientização ambiental, o interesse em elementos naturais aumentou nos últimos anos, surgindo como uma alternativa para a elaboração de MF devido à sua não toxicidade e por apresentarem boas propriedades, tais como: baixa densidade, biodegradáveis, baixo custo, boas propriedades mecânicas e abundância (SINGH et al., 2020).

Lee e Filip (2013) estudaram materiais de freio automotivo sustentáveis contendo fibras de cânhamo como uma substituição às fibras sintéticas de Kevlar. Quando comparado com a amostra comercial contendo cobre e Kevlar, a adição de fibra de cânhamo levou a um aumento do coeficiente de atrito, porém ela aumentou o desgaste e acarretou uma maior sensibilidade à temperatura. Apesar disso, os autores relatam que todas as amostras foram aprovadas no procedimento SAE J2430 de avaliação da eficácia do freio. Singh et al. (2020) estudaram fibras de abacaxi em MF e também compararam com fibras de Kevlar, onde foi concluído que a amostra com 5% em peso de fibra de abacaxi exibiu propriedades tribológicas comparáveis a 5% em peso da fibra de Kevlar. Os autores também relatam que uma maior concentração de fibras de abacaxi (15%) apresentou maior desgaste e maior sensibilidade à temperatura. Matejka et al. (2013) e Yun et al. (2010) avaliaram fibra de juta e fibras naturais em MF, respectivamente, e obtiveram desempenho tribológico satisfatório, comprovando o potencial de aplicação de tais fibras naturais. Apesar disso, de forma semelhante à Lee e Filip (2013) e Singh et al. (2020), apresentaram o mesmo ponto negativo: a grande deterioração sofrida em temperaturas mais elevadas (300-350 °C) e uma queda no coeficiente de atrito. Isso se deve ao fato de que as fibras naturais são compostas majoritariamente por celulose, hemicelulose, lignina e pectina, que possuem baixa temperatura de processamento, inferior à 200 °C (NIRMAL et al., 2015).

Dentre os elementos naturais, a casca de arroz (CA) se destaca devido à sua natureza abrasiva e boas propriedades mecânicas. Além disso, apresenta um alto teor de cinzas (20-25%), que são

compostas majoritariamente por sílica, o que representa grande potencial em manter suas propriedades de atrito em altas temperaturas. Com relação à CA, existem poucos estudos a respeito do seu comportamento tribológico, como por exemplo Kumar et al. (2019) e Majhi et al. (2012) que estudaram compósitos com resina epóxi e Chand et al. (2010) que estudaram compósitos de policloreto de vinila, onde todos relatam uma melhora na resistência ao desgaste. Apesar disso, apenas Mutlu (2009) e Primaningtyas et al. (2019) estudaram a adição de casca de arroz em MF. Ambos constataram que a CA exibiu boas propriedades tribológicas e que pode ser usada em pastilhas de freio. Porém, os estudos desses pesquisadores não avaliaram altas temperaturas e os compósitos desenvolvidos foram muito simplificados quando comparados com os MF desenvolvidos neste estudo ou disponíveis comercialmente.

As crescentes preocupações ecológicas e a proibição iminente do cobre tornam obrigatório a procura de um substituto eficiente para os MF (MAHALE et al., 2019). A CA se apresenta como um resíduo agroindustrial abundante e natural, com potencial para aplicações tribológicas devido à sua natureza abrasiva. Além disso, possui alto teor de cinzas, o que pode contornar a grande degradação térmica sofrida por fibras naturais após 250 °C. Em razão dessa complicação, as avaliações encontradas na literatura são limitadas, não reproduzindo de forma adequada as aplicações de freio automotivo que podem chegar a mais de 500 °C.

Nesse contexto, o presente trabalho tem o objetivo de avaliar três materiais de fricção desenvolvidos com diferentes percentuais de CA (0%, 6% e 12%) em um procedimento de teste de frenagem padronizado que contemple altas temperaturas (até 550 °C). O material sem CA tem o objetivo de simular um material de fricção típico comercial. O procedimento de ensaio normatizado adotado foi o AK Master (SAE J2522) e os testes experimentais de frenagem foram conduzidos no tribômetro do Laboratório de Tribologia (LATRIB) da UFRGS.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO**

### **2.1. Materiais de fricção**

O principal aspecto de segurança em um veículo é o sistema de freio, que deve reduzir a velocidade de forma confiável sob condições variadas (BIJWE, 1997). A maioria desses sistemas trabalha com um par tribológico, onde há o material de fricção, pastilha ou lona, e o rotor, disco ou tambor (BARROS, 2018). Durante uma frenagem, o material de fricção é pressionado contra o rotor, onde a energia cinética do veículo é convertida em calor na interface de deslizamento do par tribológico. Essa energia térmica é dissipada por condução pelo rotor e por convecção e radiação para o ambiente. Para freios a disco, a faixa de temperatura geralmente varia de 100 a 250 °C, mas pode facilmente passar de 370 °C, enquanto que em lonas de freio a temperatura é mais baixa, raramente passando de 300 °C (BIJWE, 1997). Devido à importância de uma frenagem, o material de fricção deve atender requisitos de desempenho, confiabilidade e conforto. Os principais requisitos são: apresentar coeficiente de atrito estável e alto o suficiente em diferentes condições, baixa taxa de desgaste e baixo nível de ruído e vibrações (NEIS et al., 2016; BLAU, 2001; ERIKSSON et al., 2002).

Materiais de fricção são compósitos multifásicos complexos, sendo geralmente uma combinação de mais de 10 elementos (LU, 2006; ARANGANATHAN; BIJWE, 2016), podendo alcançar até 30 elementos diferentes em uma única formulação (LEE; FILIP, 2013). Conforme Bijwe (1997), esses elementos podem ser classificados em 4 categorias:

- Fibras de reforço: são responsáveis pela resistência mecânica do compósito, além de influenciarem nas propriedades térmicas e no atrito; podem ser de origem metálica, mineral ou natural.

- Aglutinantes: têm a finalidade de unir os demais elementos que compõe a matriz; a resina fenólica, que é um polímero termofixo, é amplamente utilizada por apresentar estabilidade térmica e elevada temperatura de degradação;
- Modificadores de atrito: podem ser tanto atritantes (que aumentam o coeficiente de atrito), como lubrificantes (diminuem e estabilizam o coeficiente de atrito); alumina e grafite são exemplos de modificadores amplamente utilizados como abrasivo e lubrificante, respectivamente.
- Preenchimento: auxiliam na capacidade de fabricação e redução de custo, sem alterar de forma considerável o comportamento tribológico; barita e carbonato de cálcio são exemplos de agentes de preenchimento;

Os MF comerciais podem ser classificados em três classes: *semi-metallic* (SM), *low-metallic* (LM) e *non-asbestos organic* (NAO), sendo todos considerados orgânicos pois possuem matriz polimérica (YUN et al., 2010). O termo NAO se refere a MF sem amianto que são desprovidos de fibras metálicas ferrosas, sendo predominantemente orgânico, contendo, por exemplo, fibras minerais, borracha e grafite. Já os materiais SM usam majoritariamente fibras metálicas ferrosas, enquanto que os LM são uma composição intermediária entre fibras ferrosas e não ferrosas.

## 2.2. Cobre

O cobre é um ingrediente multifuncional e quase indispensável dos materiais de fricção (BIJWE, 1997). Ele não só fornece integridade estrutural, mas também permite dissipar o calor de fricção de forma eficiente, melhorando a resistência em altas temperaturas (MAHALE et al., 2019; KUMAR; BIJWE, 2011; MAHALE et al., 2019). O filme formado no disco influencia no desempenho dos MF (BARROS, 2018) e a formação desse filme é mais difícil de ocorrer quando o cobre é removido da formulação, além de geralmente acarretar um aumento na taxa de desgaste do material de fricção (STRAFFELINI et al., 2015). Em razão disso, o cobre tem sido usado em materiais para freios há décadas (BARROS, 2018). No entanto, o impacto ambiental do cobre nos MF não foi abordado até os anos recentes (LEE; FILIP, 2013).

Segundo Straffelini et al. (2015), a principal fonte de emissão de elementos metálicos em áreas urbanas é o tráfego de veículos, onde o desgaste dos MF presentes nos sistemas de freio dos veículos é o principal emissor de cobre (DAVIS et al., 2001). Conforme Lee e Filip (2013), os detritos dos MF acabam nos cursos d'água, onde representam uma ameaça aos organismos aquáticos e podem desestabilizar ecossistemas inteiros (MAHALE et al., 2019; ENGBERG, 1995). Mais especificamente, o cobre nos meios aquáticos prejudica o olfato do salmão-prateado (*Oncorhynchus kisutch*), tornando-o vulnerável a predadores e incapaz de encontrar seus riachos de desova, o que pode levar a extinção da espécie (BPP, 2020).

No ano de 2010, alguns estados dos Estados Unidos aprovaram leis que limitam o uso de cobre em MF, estabelecendo um limite de até 0,5% para os próximos anos. Em razão disso, a tendência global dos fabricantes de MF é reduzir o uso de cobre e encontrar um substituto adequado, onde estima-se que, a partir de 2025, materiais de fricção do tipo NAO sem cobre serão dominantes no mercado americano (BARROS, 2018). De acordo com Mahale et al. (2019), pesquisadores já estudaram fibras orgânicas, lubrificantes sólidos e diferentes metais como substitutos para o cobre, porém não foi alcançado muito sucesso.

## 2.3. Casca de arroz (CA)

O Brasil é o maior produtor de arroz fora do continente asiático, sendo que a produção está localizada, principalmente, no estado do Rio Grande do Sul, que é o maior produtor nacional com 70,4% da produção (MAPA, 2019). A CA é o subproduto mais expressivo do processo de

beneficiamento do arroz e seu volume representa cerca de 22% da massa do arroz em casca. Essa casca pode ser considerada uma matéria-prima de baixo custo, de difícil reaproveitamento e de baixas propriedades nutritivas (FERNANDES et al., 2015). Em função do seu elevado poder calorífico, a CA é hoje considerada uma biomassa. A composição da CA varia conforme a variedade plantada, o clima e as condições do solo, além da localização geográfica. Ao ser queimada, a CA apresenta de 15 a 25% de cinzas, sendo esta composta majoritariamente (80-90%) de sílica. Os seus principais componentes orgânicos são a celulose ( $\approx 43,5\%$ ), a hemicelulose ( $\approx 22\%$ ) e a lignina ( $\approx 17\%$ ) (FERNANDES et al., 2015). Considerando a classificação de MF previamente apresentada, a CA pode ser classificada como modificadora de atrito, devido à sua natureza abrasiva, e também como uma fibra de reforço.

#### **2.4. Procedimentos experimentais para a avaliação de materiais de fricção**

O coeficiente de atrito (CoF) é considerado a característica mais importante dos MF. Esse coeficiente é sensível às condições de operação, sendo o aumento da temperatura o parâmetro mais influente (KCHAOU et al., 2019). Geralmente, os estudos de MF são focados em dois fenômenos. O fenômeno de *fade* corresponde à perda de eficácia de frenagem em temperaturas elevadas, observado através de uma diminuição no CoF. Já o fenômeno denominado de *recovery*, representa a recuperação do nível de atrito do material, em condições de temperaturas mais baixas, após este ter sido exposto à temperaturas mais altas, como nas etapas de avaliação do fenômeno de *fade*. (KCHAOU et al., 2019).

A tendência de globalização na indústria automotiva exige a definição adequada de procedimentos de teste aplicáveis para avaliação e comparação de diferentes MF. Além disso, devido à ampla gama de MF e às diferentes condições de contorno a qual o sistema de freio é submetido, é necessário avaliar esses materiais em testes que contemplem diferentes condições de carregamento, velocidade de deslizamento, temperatura e pressão de contato. Um procedimento para avaliar MF de freios é o AK Master (SAE J2522), muito utilizado no meio industrial, contendo duas etapas para avaliar *fade* e três para *recovery*.

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1. Desenvolvimento dos materiais de fricção**

Foram desenvolvidas três formulações de MF, todas incluindo 88% (em peso) da sua composição com os mesmos elementos. Os 12% restantes foram atribuídos aos elementos da classe modificadores de atrito. A formulação denominada 0CA foi baseada nos MF comerciais e será considerada como a formulação de referência neste trabalho. A formulação 0CA contém 6% de alumina e 6% de cobre e não possui adição de casca de arroz. A formulação denominada 6CA possui 6% de casca de arroz e 6% de alumina. Já a formulação 12CA possui o maior percentual de casca de arroz, 12% em peso, e não possui cobre ou alumina. A Tabela 1 apresenta em detalhe as formulações desenvolvidas.

Tabela 1 – Formulações dos materiais de fricção desenvolvidos, em percentual de peso.

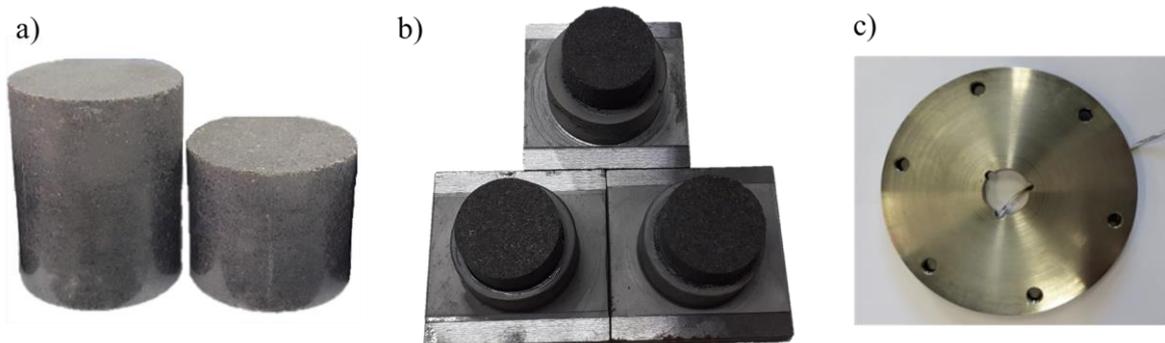
	Aglutinante	Lubrificante	Fibra		Preenchimento		Atritante		
	Resina fenólica	Grafite	Lã de aço	Fibra de vidro	Barita	Carbonato de cálcio	Casca de arroz	Alumina	Cobre em pó
<b>12CA</b>	35	5	2	5	15	26	12	0	0
<b>6CA</b>	35	5	2	5	15	26	6	6	0
<b>0CA</b>	35	5	2	5	15	26	0	6	6

Todas as matérias-primas adquiridas para o desenvolvimento dos MF estão disponíveis comercialmente. A CA foi fornecida pela empresa Rampinelli Alimentos, sem custo, pois trata-se de um resíduo do processo industrial. A fibra de vidro, oriunda de um *roving*, foi fornecida pelo Laboratório de Polímeros da UFRGS. As demais matérias-primas foram adquiridas no Mercado Livre.

Todas as matérias-primas foram misturadas e trituradas em um liquidificador, até a mistura final apresentar um aspecto homogêneo. Todas formulações passaram pelo mesmo tempo no liquidificador, 5min. A fabricação dos compósitos se deu por compressão a quente (170 bar a 190 °C), utilizando uma embutidora manual EF 30 Fortel. A Figura A1 do Apêndice A apresenta tanto a embutidora como o liquidificador utilizado. O resultado do processo de compressão a quente é um compósito cilíndrico de 30 mm de diâmetro, como é exibido na Figura 1-a. Foram fabricadas três amostras para cada formulação. Após a fabricação dos compósitos, todos eles foram submetidos a um tratamento de pós cura a 160 °C por 4 horas em uma estufa. Por último, os compósitos foram usinados até um diâmetro de 18 mm e altura de 12 mm e colados em suportes metálicos, para possibilitar os ensaios tribológicos, conforme é apresentado na Figura 1-b.

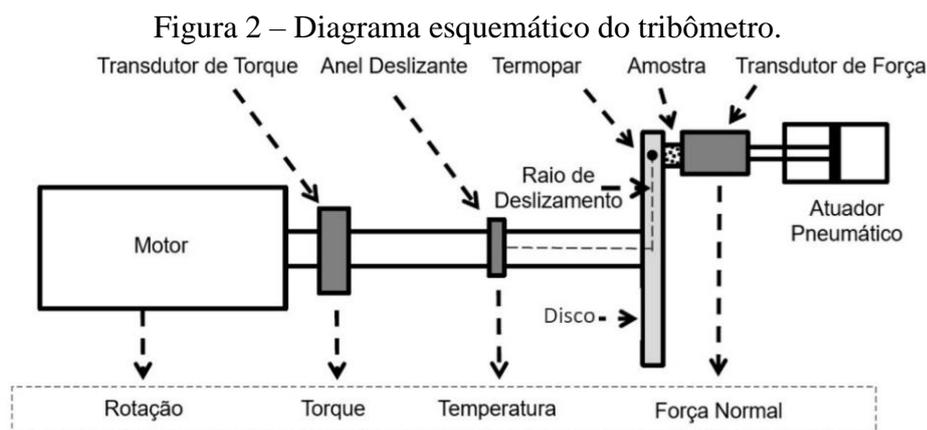
O disco utilizado nos experimentos é feito de ferro fundido cinzento, mesmo material utilizado em rotores de sistemas de freio, com diâmetro de 159 mm e espessura de 12 mm (Figura 1-c,d). Com o objetivo de controlar a temperatura do disco, um termopar tipo K foi embutido a uma profundidade de 1,5 mm abaixo da superfície do disco. O termopar foi colocado no centro da pista de atrito. Antes de cada conjunto de operações de frenagem, a superfície do disco foi lixada com uma sequência de lixas com diferentes tamanhos de grão (100, 180, 240, 400, 600, 1200, 1500), controlando a condição inicial da superfície do disco.

Figura 1 – Corpos de prova e disco utilizados nos ensaios: (a) foto dos compósitos após a compressão a quente, (b) foto dos corpos de prova nos suportes metálicos, (c) foto do disco de ferro fundido cinzento.



### 3.2. Equipamentos utilizados

Os experimentos foram realizados em um tribômetro (Fig. 2), com configuração de pino sobre disco, que permite a reprodução de condições operacionais (velocidade de deslizamento, pressão de contato e temperatura) encontradas em sistemas de freios automotivos (NEIS, 2012). Além disso, um sistema de aquecimento por indução é acoplado ao equipamento para controlar a temperatura inicial do disco antes de cada operação de frenagem. Detalhes do tribômetro podem ser encontrados em (NEIS, 2012; NEIS et al., 2011).



Fonte: adaptado de Neis *et al.* (2017).

No tribômetro, o coeficiente de atrito ( $\mu$ ) é calculado por medida indireta, conforme a Equação 1.

$$\mu = \frac{T}{F_N \times R} \quad (1)$$

Onde  $T$  é o torque medido no eixo da máquina (Nm),  $F_N$  é a força normal (N) e  $R$  é o raio de deslizamento (m). Pavlak *et al.* (2017) calcularam a repetibilidade e incertezas dos instrumentos utilizados no tribômetro do LATRIB. Os resultados são mostrados na Tabela B1 do Apêndice B. O desgaste dos corpos de prova foi avaliado por meio da perda de altura, subtraindo-se a altura de cada corpo de prova antes e depois de cada teste. Um micrômetro externo digital 0-30 mm Mitutoyo foi utilizado para as medições de altura. A investigação da decomposição térmica dos compósitos foi realizada através de uma análise termogravimétrica (TGA) em um aparelho TGA Q50 (TA Instruments), sob atmosfera de ar sintético, entre 40-900 °C e a uma taxa de aquecimento de 20 °C/min.

### 3.3. Procedimento experimental

Os ensaios realizados foram baseados no procedimento AK Master (SAE J2522) para lonas de freio, que é um ensaio amplamente utilizado na indústria para caracterizar MF (SAE, 2003). Esse procedimento possui várias etapas, conforme é apresentado na Tabela C1 do Apêndice C, onde destacam-se as etapas de *fade*, de *recovery* e de sensibilidade. Como o presente trabalho busca uma avaliação do desempenho do material em altas temperaturas, foram adicionadas ao final do procedimento padrão AK Master: uma etapa extra, contendo testes de caracterização, de *fade* (até 550 °C) e de *recovery*. Para cada formulação, o procedimento descrito foi repetido três vezes, uma vez em cada amostra fabricada.

Para avaliar os resultados dos ensaios foram considerados parâmetros que possibilitam um melhor entendimento do comportamento tribológico de cada formulação, bem como a comparação dos resultados entre as diferentes formulações. Esses parâmetros procuram quantificar os requisitos considerados relevantes para materiais de fricção: nível (*Performance*  $\mu$ ) e estabilidade (*%Fade*, *%Recovery*,  $\Delta\mu PS$  e  $\Delta\mu SS$ ) do CoF, bem como nível de desgaste ( $\Delta W$ ).

O parâmetro denominado *Performance*  $\mu$  apresenta uma caracterização genérica do coeficiente de atrito de cada formulação. Ela é obtida através da média dos coeficientes de atrito das aplicações realizadas nas seguintes condições: pressão de acionamento do sistema hidráulico de 15 bar, velocidade de frenagem de 80 a 30 km/h, e temperatura inicial de 80 °C.

As etapas de *fade* consistem em aplicações de frenagens de curta duração e com temperatura crescente, buscando exigir termicamente o material. O parâmetro percentual de *fade* (*%Fade*), calculado pela Equação 2 (KCHAOU et al., 2019) descreve o quanto o atrito do material é afetado pelo aumento da temperatura. Quanto menor o valor de *%Fade*, melhor o desempenho tribológico da amostra.

$$\% \text{ Fade} = \frac{\text{Performance } \mu - \text{Fade } \mu}{\text{Performance } \mu} \times 100 \quad (2)$$

Onde *Fade*  $\mu$  é o menor CoF apresentado pelo material durante o teste de fade.

As etapas denominadas *recovery* são realizadas após as etapas em que o material é submetido a altas temperaturas. Nessa etapa, avalia-se a capacidade do material de recuperar o CoF ao nível característico, descrito pelo *Performance*  $\mu$ . O parâmetro *%Recovery*, calculado pela Equação 3 (KCHAOU et al., 2019), descreve essa relação. Quanto maior o valor de *%Recovery*, melhor o desempenho tribológico.

$$\% \text{ Recovery} = \frac{\text{Recovery } \mu}{\text{Performance } \mu} \times 100 \quad (3)$$

Onde *Recovery*  $\mu$  é o CoF médio da etapa de *Recovery*.

Os MF também devem apresentar estabilidade no CoF frente a alterações de velocidade e pressão. Para essa avaliação, são considerados os parâmetros denominados  $\Delta\mu PS$  e  $\Delta\mu SS$ , as quais são obtidas nas etapas de sensibilidade à velocidade e pressão. A sensibilidade do atrito do material à pressão pode ser obtida através da Equação 4. Já a sensibilidade à velocidade é calculada pela Equação 5.

$$\Delta\mu PS = \frac{\Delta\mu 1 + \Delta\mu 2 + \Delta\mu 3 + \Delta\mu 4 + \Delta\mu 5}{5} \quad (4)$$

Onde  $\Delta\mu PS$  é a sensibilidade a pressão e  $\Delta\mu 1$  a  $\Delta\mu 5$  é a variação do atrito, calculada pela razão entre o menor CoF e o maior CoF, nas 5 etapas que variam pressão do procedimento AK Master. O valor de  $\Delta\mu PS$  varia de 0 a 1, sendo que, quanto mais próximo de 1, menos sensível à pressão é o material.

$$\Delta\mu SS = \frac{\mu_{\min}(\mu 1, \mu 2, \mu 3, \mu 4, \mu 5)}{\mu_{\max}(\mu 1, \mu 2, \mu 3, \mu 4, \mu 5)} \quad (5)$$

Onde  $\Delta\mu SS$  é a sensibilidade à velocidade,  $\mu_{\min}$  é o menor CoF médio entre as 5 velocidades diferentes e  $\mu_{\max}$  é o maior CoF médio entre as 5 velocidades. O valor de  $\Delta\mu SS$  varia de 0 a 1, sendo que, quanto mais próximo de 1, menos sensível à velocidade é o material. Por fim, o nível

de desgaste mensurado é atribuído ao parâmetro  $\Delta W$ . Neste caso, quanto menor o nível de desgaste melhor.

Buscando uma única métrica que possa avaliar o conjunto de parâmetros de desempenho dos MF, propõe-se um índice de performance ( $P_{idx}$ ) para cada formulação. Neste estudo foram calculados dois tipos de  $P_{idx}$ : um relativo ( $P_{idx\_rel}$ ), o qual fornece uma relação entre o desempenho do material estudado e o desempenho de um material de referência (formulação 0CA), e um absoluto ( $P_{idx\_abs}$ ), o qual compara todas as formulações entre si.  $P_{idx\_rel}$  igual a 1 significa que o desempenho do material analisado é igual à referência, podendo ser melhor, caso superior a 1. É obtido através da Equação 6.

$$P_{idx\_rel} = \frac{\frac{Desgaste_{referência}}{Desgaste_{amostra}} + \frac{Performance_{\mu_{amostra}}}{Performance_{\mu_{referência}}} + \mu S}{3} \quad (6)$$

Onde  $P_{idx\_rel}$  é o índice de performance relativo, os parâmetros com subscrito *amostra* são os parâmetros da amostra estudada, os parâmetros com subscrito *referência* correspondem aos resultados do material de referência e  $\mu S$  é o parâmetro de sensibilidade, calculado conforme a Equação 7.

$$\mu S = \frac{\frac{\%Fade_{referência}}{\%Fade_{amostra}} + \frac{\%Recovery_{amostra}}{\%Recovery_{referência}} + \frac{\Delta\mu PS_{amostra}}{\Delta\mu PS_{referência}} + \frac{\Delta\mu SS_{amostra}}{\Delta\mu SS_{referência}}}{4} \quad (7)$$

Os parâmetros com subscrito *amostra* correspondem ao material estudado e os parâmetros com subscrito *referência* são os valores do material utilizado como referência (material 0CA, no caso do presente estudo). Com relação ao  $P_{idx\_abs}$ , o valor varia de 0 a 5, onde 5 é o desempenho teórico e ideal e 0 o pior desempenho, sendo calculado conforme a Equação 8.

$$P_{idx\_abs} = \frac{Desgasteminimo}{Desgastemostra} + \frac{(100 - \%Fade_{amostra})}{100} + \frac{\%Recovery_{amostra}}{100} + \Delta\mu PS_{amostra} + \Delta\mu SS_{amostra} \quad (8)$$

Onde  $P_{idx\_abs}$  é o índice de performance absoluto, os parâmetros com subscrito *amostra* são os parâmetros do material estudado e  $Desgasteminimo$  é o menor valor de desgaste entre as três formulações.

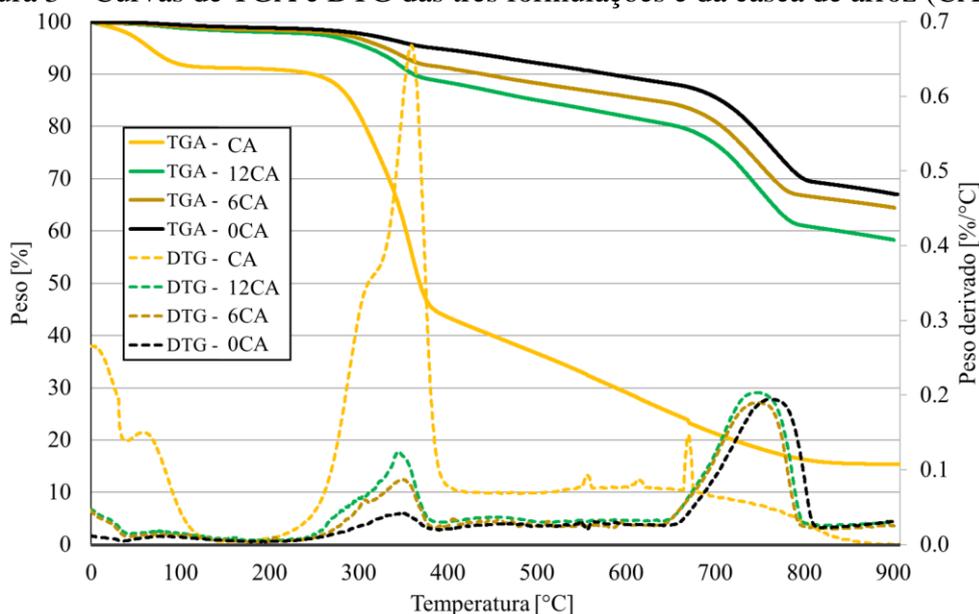
## 4. RESULTADOS

### 4.1. Resultados de TGA, desgaste, *fade*, *recovery* e sensibilidade

A Figura 3 apresenta as curvas da análise termogravimétrica (TGA) e derivada termogravimétrica (DTG) das três formulações e da casca de arroz em função da temperatura. A DTG representa a velocidade dos processos de decomposição/oxidação. Com relação à casca de arroz, percebe-se uma perda de massa de aproximadamente 10% na faixa dos 100 °C, o que está associado à perda de água adsorvida. Entre 250 °C e 400 °C, a CA sofre uma perda de 45% de massa, que corresponde a faixa de degradação das fibras lignocelulósicas, sendo um comportamento esperado para fibras naturais, estando de acordo com os resultados encontrados por Fernandes et al. (2015). O efeito da presença de CA sobre os compósitos é perceptível nessa região do gráfico, sendo que o material 12CA, com maior percentual de CA, foi o que mais sofreu redução de massa nessa faixa de temperatura (250 °C – 400 °C). O processo de degradação prosseguiu até estabilizar em 15% da massa original a partir da temperatura de 800 °C, correspondendo às cinzas da CA. Com relação aos compósitos, as três formulações

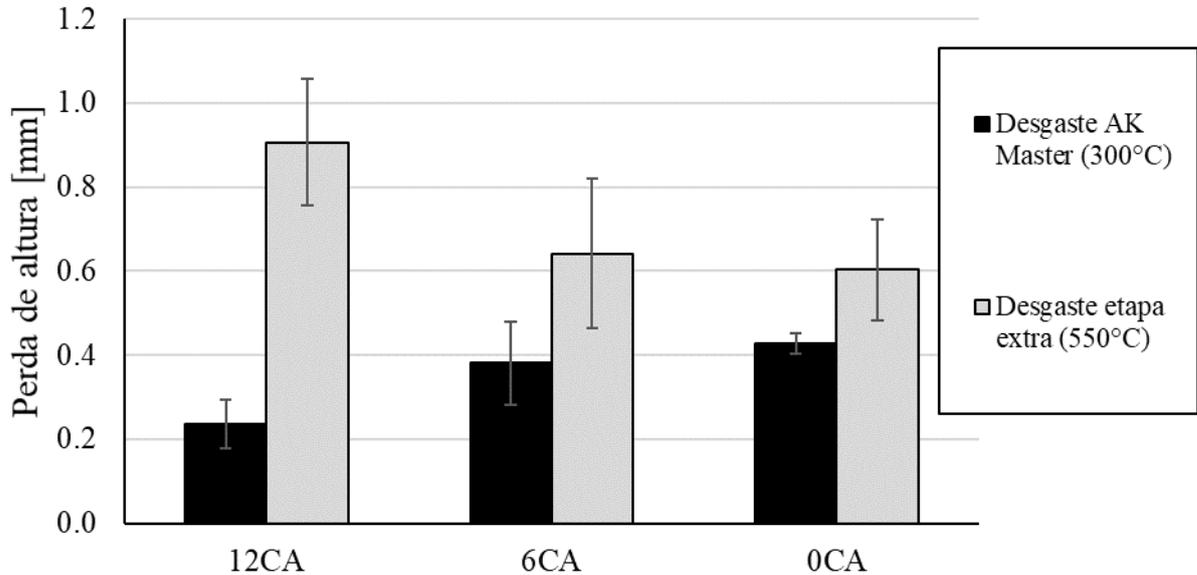
começam a perder massa após 300 °C, o que está associado a perda de resina e fibra natural (YUN et al., 2010). O segundo ponto de perda de massa mais expressivo é após 700 °C, conforme mostram os picos das curvas DTG, que corresponde à faixa de degradação térmica do carbonato de cálcio, presente nas três formulações (LI et al., 2017). De um modo geral, os compósitos apresentaram o mesmo comportamento e boa resistência à temperatura, pois mantiveram aproximadamente 80% da sua massa até 650 °C, que é uma temperatura superior às encontradas em frenagens.

Figura 3 – Curvas de TGA e DTG das três formulações e da casca de arroz (CA).



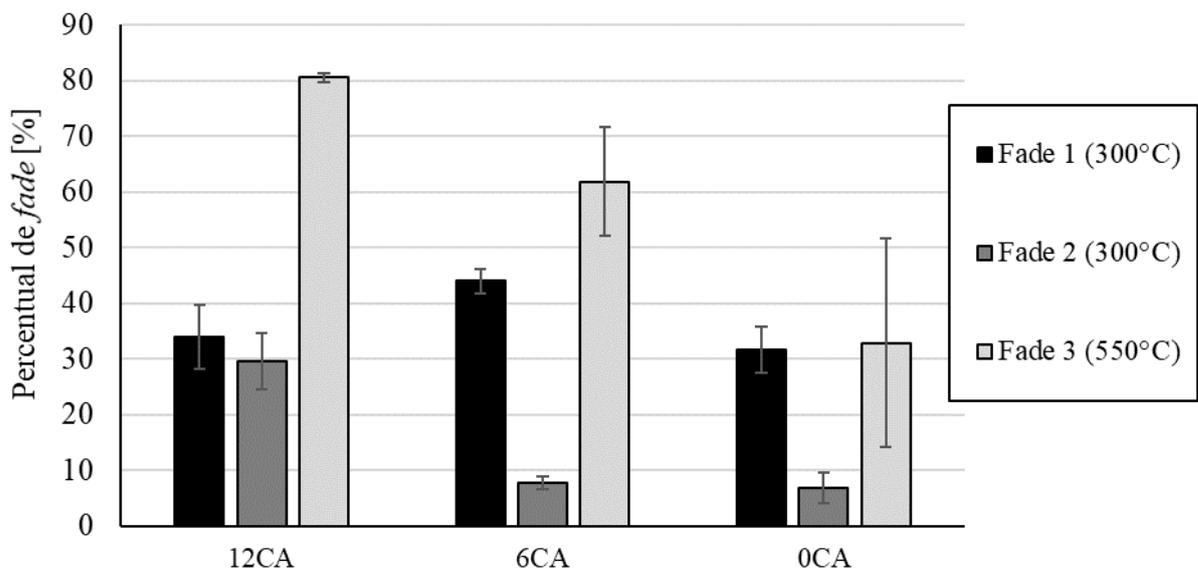
A Figura 4 apresenta os resultados de desgaste médio para cada formulação, separados entre desgaste do AK Master (padrão) e da etapa extra. Considerando o AK Master + etapa extra, a formulação com maior percentual de casca de arroz (12CA) apresentou o maior desgaste total, perdendo 1,14 mm de altura. As demais formulações desgastaram pouco mais de 1 mm. Apesar disso, levando em consideração apenas o procedimento padrão (temperatura de até 300 °C), a amostra 12CA apresentou a melhor resistência ao desgaste. Para a etapa extra, como a formulação 12CA possui a maior concentração de casca de arroz, possui mais elementos naturais que começam a se degradar fortemente após 300 °C, levando ao maior desgaste nesta etapa dentre as três formulações, perdendo 0,91 mm. Comparando as formulações 6CA e 0CA entre si, percebe-se que o desgaste é muito semelhante, apresentando uma ligeira diferença com a adição de CA. Em razão disso, pode-se dizer que a adição de CA em um percentual de 12% acarreta em diferenças significativas, resultando em uma maior resistência ao desgaste em temperaturas de até 300 °C e uma menor resistência em temperaturas de até 550 °C. O desgaste das formulações em perda de massa pode ser verificado na Figura D1 do Apêndice D.

Figura 4 – Desgaste médio, em perda de altura das amostras, para cada formulação.



Com relação à estabilidade do atrito frente às variações de temperatura, a Figura 5 exibe os valores médios de  $\%Fade$  para cada uma das três etapas de *fade* para as três formulações desenvolvidas, calculado conforme a Eq. (2). Neste gráfico e nos seguintes, a barra de erros representa a variação (em desvio padrão) entre todas as três repetições de cada formulação. Para todas as formulações o  $\%Fade$  médio no *fade 2* foi o menor, destacando-se as formulações 6CA e 0CA. Tratando do *fade 3*, a faixa de temperatura superior acarretou em valores de  $\%Fade$  mais elevados para os compósitos com casca de arroz em relação à amostra de referência. Percebe-se que o aumento da concentração de CA acarreta em uma maior sensibilidade à temperatura quando se ultrapassa os 300 °C (*fade 3*). Conforme discutido anteriormente, a predominante quantidade de matéria orgânica presente na casca de arroz sofre grande degradação térmica após 300 °C, resultando em um maior efeito de *fade*.

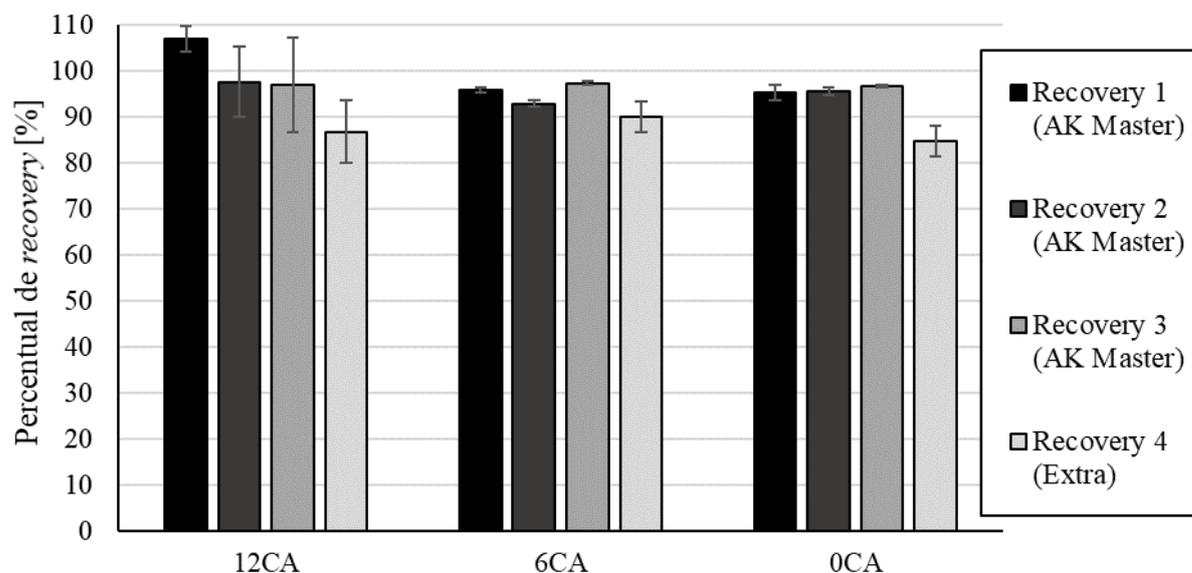
Figura 5 – Valores médios de  $\%Fade$  para as três formulações (menor  $\%Fade$ , melhor).



A Figura 6 apresenta os valores médios de  $\%Recovery$  para cada uma das formulações, calculado pela Eq. (3). Considerando os resultados das primeiras três etapas de *recovery*, todas

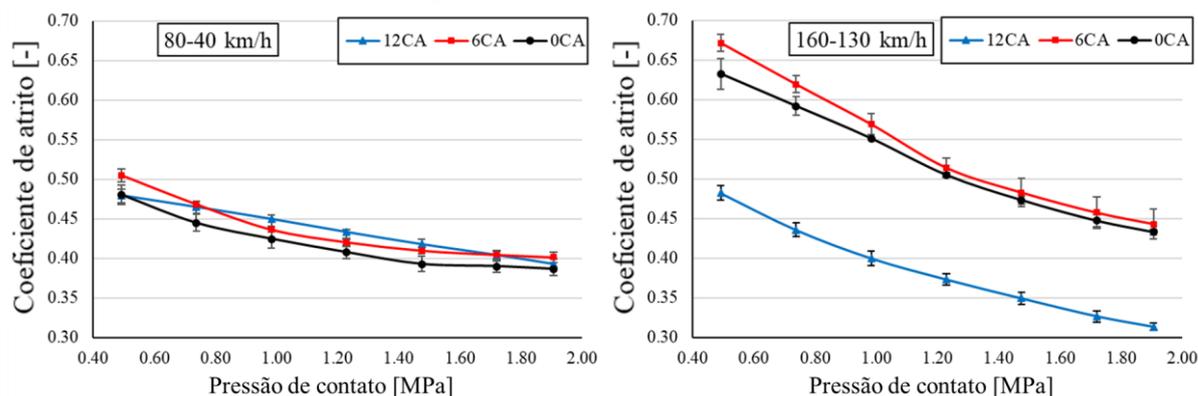
as formulações apresentaram  $\%Recovery$  superior à 90%. Para as três formulações, o menor valor de  $\%Recovery$  foi obtido no *recovery 4*, que ocorre após o *fade 3*. Assim, este resultado indica que as temperaturas de até 550 °C do *fade 3* causaram um efeito mais duradouro no CoF. Apesar disso, as formulações com CA apresentaram desempenho tribológico aceitável, pois obtiveram valores de  $\%Recovery$  similares aos valores da formulação de referência (0CA).

Figura 6 – Valores médios de  $\%Recovery$  para as formulações (maior  $\%Recovery$ , melhor).



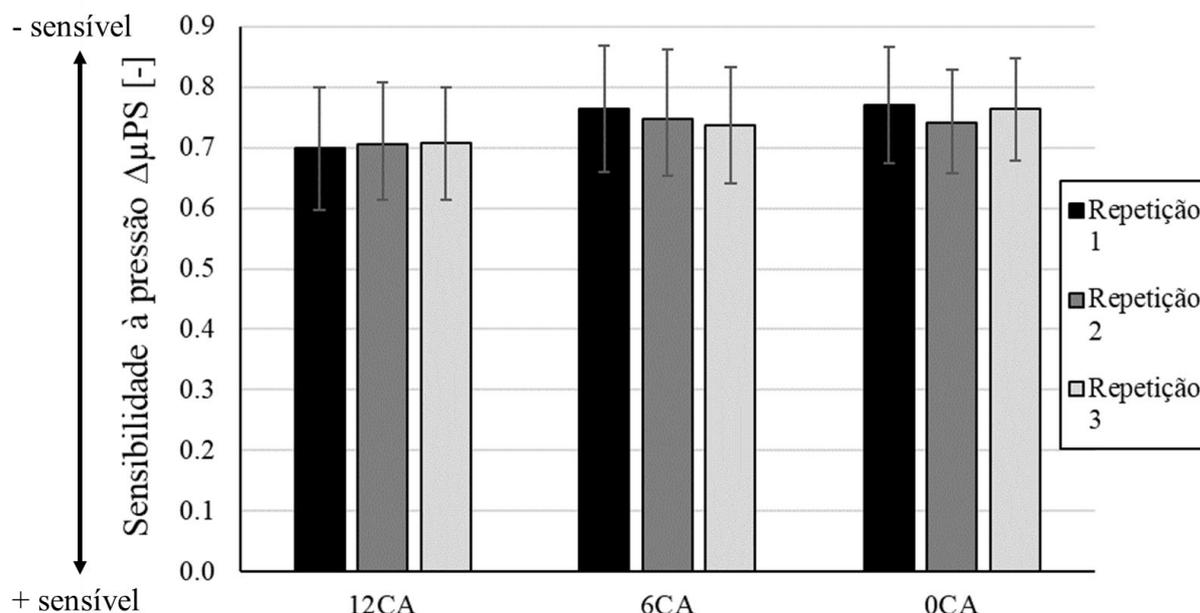
Com relação à avaliação da sensibilidade à pressão, a Figura 7 apresenta os gráficos do coeficiente de atrito médio de cada formulação em função da pressão de contato para 2 situações típicas de frenagem: 80 a 40 e 160 a 130 km/h. Percebe-se que o aumento da pressão de contato leva à uma queda no CoF, o que é um comportamento em MF já relatado na literatura, como em Satapathy e Bijwe (2006). Isso pode estar associado ao fato de que, conforme a pressão de contato aumenta, as asperezas de contato são quebradas e geram detritos, que por sua vez são acumulados e compactados no disco, formando um tribofilme. Esse tribofilme tem ação lubrificante, causando uma queda no CoF (XIAO et al., 2016). Já em faixas de pressão mais baixas, é difícil que ocorra a formação de um tribofilme adequado na interface, mantendo um CoF maior (AHMADIJOKANI et al., 2019). Em baixa velocidade as formulações apresentaram comportamento semelhante, porém, em alta velocidade, a formulação 12CA distinguiu-se das demais formulações, exibindo valores mais baixos de CoF.

Figura 7 – Gráficos do CoF médio de cada formulação em função da pressão de contato para as velocidades de: (esquerda) 80 a 40 km/h e (direita) 160 a 130 km/h.



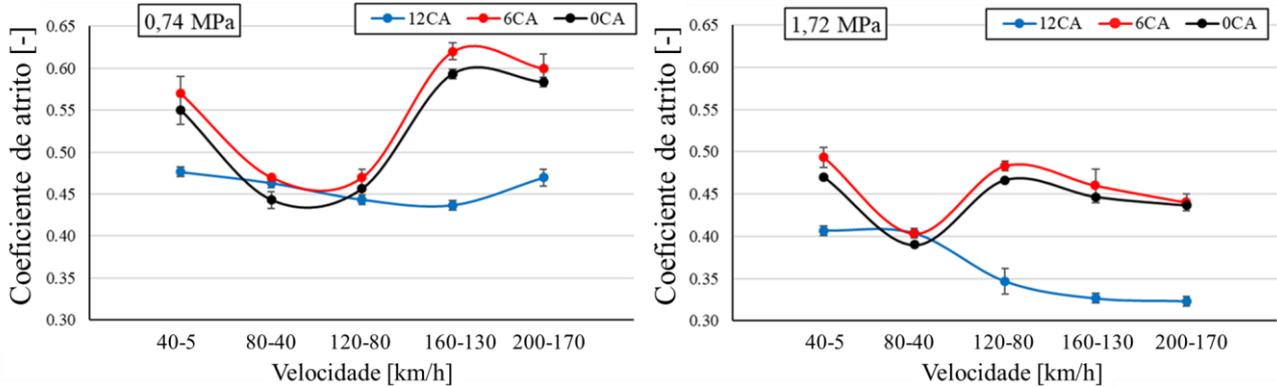
Na Figura 8 são exibidos os resultados da sensibilidade à pressão de todas as formulações, calculados conforme a Eq. (4). Considerando a faixa de desvio, as três formulações apresentaram resultados similares. A formulação 12CA apresentou na média os menores valores de  $\Delta\mu_{PS}$  e logo a maior sensibilidade à pressão, enquanto que as demais formulações exibiram médias semelhantes.

Figura 8 – Resultados de sensibilidade à pressão para cada repetição das três formulações (mais próximo de 1, menor a sensibilidade e melhor o desempenho).



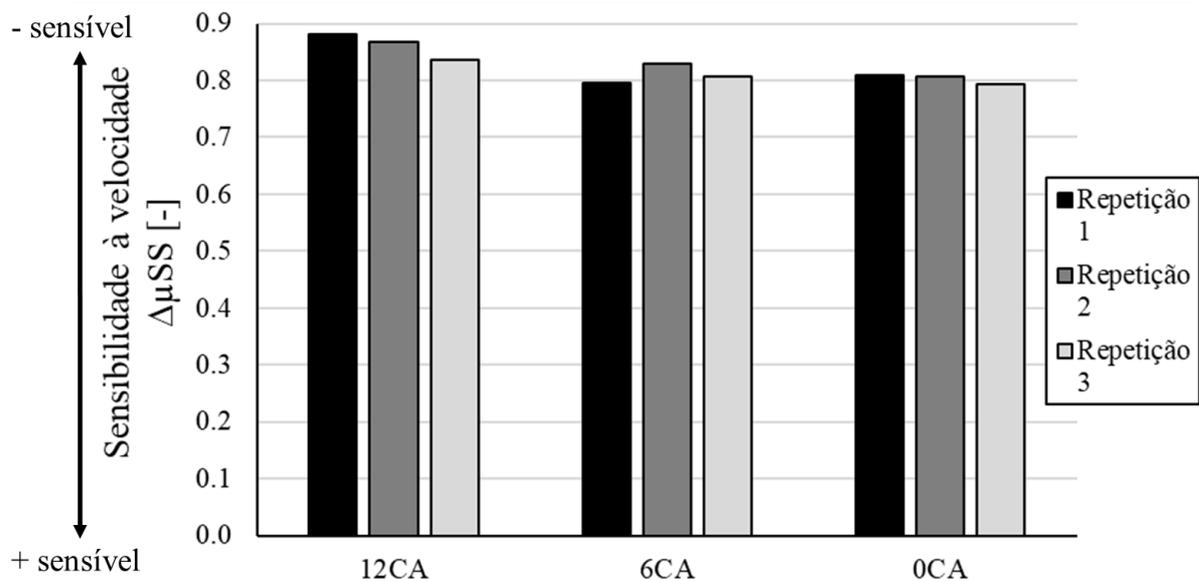
Para analisar a sensibilidade à velocidade, a Figura 9 apresenta os gráficos de coeficiente de atrito médio de cada formulação em função da velocidade de frenagem para 2 pressões de contato: 0,74 e 1,72 MPa. Esses valores de pressão foram escolhidos pois representam os extremos dentro da faixa de pressão do procedimento. Para as formulações 6CA e 0CA nota-se um comportamento similar em ambas pressões: conforme a velocidade aumenta, o CoF primeiro diminuiu e depois aumenta. Esse aumento de CoF com velocidade difere do que é comumente relatado na literatura, onde o aumento da velocidade acarreta em um grande aumento da temperatura, gerando um efeito de *fade*, diminuindo o CoF (ARANGANATHAN et al., 2016; ARANGANATHAN; BIJWE, 2016; AHMADIJOKANI et al., 2019). Durante os ensaios a temperatura alcançada não excedeu 150 °C, mantendo-se em uma faixa reduzida, não se enquadrando no cenário de queda do CoF, como descrito anteriormente. Uma hipótese para o comportamento do CoF apresentado pelos compósitos é uma alteração no tribofilme presente na interface, onde as asperezas podem desempenhar um papel importante (LIEW; NIRMAL, 2013). Devido à importância do tribofilme no desempenho do par tribológico (BARROS, 2018), é necessário avaliá-lo detalhadamente em futuras análises. Adicionalmente, percebe-se que a formulação 12CA possui comportamento distinto com relação às formulações 0CA e 6CA. A formulação 12 CA apresentou menores variações no CoF em velocidades mais baixas e não exibiu aumento significativo do CoF em velocidades mais elevadas, como relatado para as amostras 0CA e 6CA. É possível concluir que a formulação 12CA apresentou menores valores de CoF que as demais nas faixas de velocidade analisadas.

Figura 9 – Gráficos do CoF médio de cada formulação em função da velocidade para as pressões de contato de: (esquerda) 0,74 MPa e (direita) 1,72 MPa.



Na Figura 10 são exibidos os resultados da sensibilidade à velocidade de todas as formulações, calculados conforme a Eq. (5). A formulação 12CA apresentou uma ligeira melhora na sensibilidade à variação de velocidade, enquanto que as demais formulações (6CA e 0CA) exibiram comportamento semelhante entre si.

Figura 10 – Resultados de sensibilidade à velocidade para cada repetição das três formulações (mais próximo de 1, menor a sensibilidade e melhor o desempenho).



#### 4.2. Resultados de $P_{idx\_abs}$ e $P_{idx\_rel}$

As Tabelas 2 e 3 apresentam os resultados de  $P_{idx\_rel}$  e  $P_{idx\_abs}$  para o procedimento padrão (AK Master) e para a etapa extra, calculados conforme as Equações 6 e 8, respectivamente. Convém lembrar que os resultados da etapa extra na Tabela 3 se referem apenas aos testes de *fade* e *recovery* adicionais, por isso não contemplam análise de sensibilidade à pressão e velocidade. O valor máximo de  $P_{idx\_abs}$  é 5 (máximo de 1 para cada um dos 5 parâmetros), sendo que, quanto maior, melhor o desempenho do material. Como na etapa extra não foram feitos testes de sensibilidade, então os valores de  $P_{idx\_abs}$  são menores. Com relação ao  $P_{idx\_rel}$ , os valores ficam em torno de 1, sendo que, quanto mais próximo de 1, mais semelhante é o desempenho do material analisado em relação à formulação de referência (0CA). Nas tabelas

também estão exibidos os valores de cada parâmetro utilizados no cálculo de  $P_{idx\_abs}$ , em uma escala de 0 a 1, sendo que 1 é o melhor desempenho.

Considerando apenas o procedimento padrão, a formulação 12CA apresentou os maiores valores de  $P_{idx\_abs}$  e  $P_{idx\_rel}$ , mostrando o melhor desempenho. A formulação 6CA teve valores inferiores à 12CA, porém teve  $P_{idx\_abs}$  igual à formulação 0CA e  $P_{idx\_rel}$  ligeiramente superior. Com base nos resultados de  $P_{idx\_abs}$  e  $P_{idx\_rel}$ , pode-se dizer que as formulações com CA são adequadas em temperaturas de até 300 °C, pois tiveram desempenho próximo ou melhor ao da formulação de referência (0CA). Analisando os resultados apenas da etapa extra (elevadas temperaturas), a formulação 0CA se destaca como o melhor material. Percebe-se que o aumento da quantidade de CA prejudica o desempenho do material, sendo que a formulação 12CA apresentou os valores mais baixos de  $P_{idx\_abs}$  e  $P_{idx\_rel}$ . Analisando a influência do percentual de CA, percebe-se que o aumento da quantidade de CA nos compósitos resulta em uma melhor resistência ao desgaste em baixas temperaturas e menor sensibilidade à velocidade. No entanto, a utilização de CA também acarreta em maior sensibilidade à temperatura ( $\%Fade$ ) e à pressão. Detalhes dos resultados de  $Performance \mu$  e da etapa de sensibilidade à temperatura e pressão podem ser visualizados nas Figuras D2-D5 no Apêndice D.

Tabela 2 – Resultados de  $P_{idx\_abs}$  e  $P_{idx\_rel}$  de todas as formulações, junto dos valores dos parâmetros utilizados nos cálculos, para apenas o procedimento padrão (AK Master).

**AK Master (até 300°C)**

	Desgaste	$\%Fade$	$\%Recovery$	$\Delta\mu PS$	$\Delta\mu SS$	<b>Pidx_abs</b>	<b>Pidx_rel</b>
<b>12CA</b>	1,00	0,68	1,00	0,70	0,86	<b>4,24</b>	<b>1,25</b>
<b>6CA</b>	0,61	0,74	0,95	0,75	0,81	<b>3,86</b>	<b>1,02</b>
<b>0CA</b>	0,53	0,81	0,96	0,76	0,80	<b>3,86</b>	<b>1,00</b>

Tabela 3 – Resultados de  $P_{idx\_abs}$  e  $P_{idx\_rel}$  de todas as formulações, junto dos valores dos parâmetros utilizados nos cálculos, para apenas a etapa extra.

**Extra (até 550°C)**

	Desgaste	$\%Fade$	$\%Recovery$	<b>Pidx_abs</b>	<b>Pidx_rel</b>
<b>12CA</b>	0,66	0,19	0,87	<b>1,72</b>	<b>0,77</b>
<b>6CA</b>	0,94	0,38	0,90	<b>2,22</b>	<b>0,91</b>
<b>0CA</b>	1,00	0,67	0,85	<b>2,52</b>	<b>1,00</b>

A Tabela 4 exibe os valores de  $P_{idx\_abs}$  e  $P_{idx\_rel}$  considerando todo o experimento realizado (procedimento padrão AK Master + etapa extra), onde o valor de  $P_{idx\_abs}$  é a soma dos valores calculados individualmente para o procedimento padrão e a etapa extra, podendo atingir no máximo 8. Apesar de ter o melhor desempenho em temperaturas de até 300 °C entre as três formulações, a formulação 12CA apresentou o pior desempenho total, tanto no  $P_{idx\_abs}$ , como em  $P_{idx\_rel}$ . De um modo geral, a formulação 6CA apresentou o desempenho tribológico mais semelhante ao da formulação de referência com cobre (0CA), apresentando-se notoriamente inferior apenas no  $fade$  de 550 °C. Com base nos resultados de  $P_{idx\_abs}$  e  $P_{idx\_rel}$ , pode-se tomar a formulação 6CA como base para trabalhos futuros, em busca de um material de fricção que utilize a CA e possua desempenho similar ao de um material convencional.

O presente trabalho teve como foco apenas o desempenho tribológico das formulações desenvolvidas, através de estudos de laboratório. Para poder indicar os materiais avaliados como possíveis materiais de fricção para serem empregados em aplicações reais, os mesmos

teriam que ser submetidos a testes de obtenção de propriedades mecânicas (como resistência ao cisalhamento e ensaio charpy). Do ponto de vista tribológico, testes adicionais e mais aprofundados devem ser realizados, além de ensaios comparativos com um material convencional, de uso comercial. Por fim, uma conclusão final sobre a usabilidade da CA em materiais de fricção só pode ser feita após testes de frenagem realizados em um veículo.

Tabela 4 – Resultados de  $P_{idx\_abs}$  e  $P_{idx\_rel}$  considerando todo o procedimento realizado, para as três formulações.

	<b>Pidx_abs</b>	<b>Pidx_rel</b>
<b>12CA</b>	5,96	0,91
<b>6CA</b>	6,08	0,97
<b>0CA</b>	6,38	1,00

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar três MF desenvolvidos: dois com adição de casca de arroz e um sem adição (representando um material de fricção típico comercial), em testes que contemplaram altas temperaturas (até 550 °C). Com base nos resultados pode-se concluir que:

- Em temperaturas de até 300 °C, as formulações com CA apresentaram desempenho tribológico semelhante à formulação de referência com cobre (0CA), sinalizando o potencial da CA como um substituto para o cobre. Com base nos valores de  $P_{idx\_abs}$ , a formulação 12CA teve o melhor desempenho.
- Em temperaturas de até 550 °C, ambas as formulações com CA não exibiram desempenho tribológico satisfatório, se mostrando inferior à formulação de referência.
- Com base nos valores de  $P_{idx\_abs}$  para todo o experimento, o ranking das formulações, de melhor para pior, é o seguinte: 0CA > 6CA > 12CA.
- A formulação 6CA apresentou o desempenho tribológico mais próximo ao da formulação de referência. Além disso, os resultados foram satisfatórios, indicando o maior potencial do uso de quantidades moderadas de casca de arroz em materiais de fricção.
- O aumento da quantidade de CA resulta em uma maior resistência ao desgaste em baixas temperaturas e menor sensibilidade à velocidade, porém também torna o material mais sensível à pressão e à temperatura. Devido à baixa temperatura de processamento dos elementos orgânicos presentes em grande quantidade na CA, a principal distinção da formulação 0CA para as 6CA e 12CA ocorre nas avaliações com temperaturas mais altas.

Desse modo, percebe-se que o desempenho de um MF com CA está relacionado tanto com o percentual de CA, como com a temperatura de operação. Um percentual superior a 6% acarreta em alterações consideráveis no desempenho tribológico do material e temperaturas de até 550 °C causam um efeito de *fade* acentuado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMADIJOKANI, F.; ALAEI, Y.; SHOJAEI, A.; ARJMAND, M.; YAN, N. Frictional behavior of resin-based brake composites: Effect of carbon fibre reinforcement. **Wear**, [s. l.], v. 420, p. 108-115, 2019.
- ARANGANATHAN, N.; BIJWE, J. Development of copper-free eco-friendly brake-friction material using novel ingredients. **Wear**, [s. l.], v. 352, p. 79-91, 2016.
- ARANGANATHAN, N.; MAHALE, V.; BIJWE, J. Effects of aramid fiber concentration on the friction and wear characteristics of non-asbestos organic friction composites using standardized braking tests. **Wear**, [s. l.], v. 354, p. 69-77, 2016.
- BARROS, L. Y. **Estudo da influência do cobre no desempenho tribológico de pastilhas de freio automotivo**. 2018, 11 f. Tese (Mestrado em engenharia mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- BIJWE, J. Composites as friction materials: Recent developments in non-asbestos fiber reinforced friction materials—a review. **Polymer composites**, v. 18, n. 3, p. 378-396, 1997.
- BLAU, P. J. **Compositions, Functions, and Testing of Friction Brake Materials and Their Additives; TOPICAL**. Oak Ridge National Lab., 2001.
- BRAKE PAD PARTNERSHIP (BPP). **Award-Winning Legislation to Eliminate Copper in Automobile Brake Pads to Benefit Clean Water and Wildlife**. 2020. Disponível em: <<https://suscon.org/project/brake-pad-partnership/>>. Acesso em: set 2020.
- CHAND, N.; SHARMA, P.; FAHIM, M. Tribology of maleic anhydride modified rice-husk filled polyvinylchloride. **Wear**, [s. l.], v. 269, n. 11-12, p. 847-853, 2010.
- CHAUDHARY, V.; AHMAD, F. A review on plant fiber reinforced thermoset polymers for structural and frictional composites. **Polymer Testing**, [s. l.], p. 106792, 2020.
- DAVIS, A. P.; SHOKOUHIAN, M.; NI, S. Loading estimates of lead, copper, cadmium, and zinc in urban runoff from specific sources. **Chemosphere**, [s. l.], v. 44, n. 5, p. 997-1009, 2001.
- DRAVA, G.; LEARDI, R.; PORTESANI, A.; SALES, E. Application of chemometrics to the production of friction materials: Analysis of previous data and search of new formulations. **Chemometrics and intelligent laboratory systems**, [s. l.], v. 32, n. 2, p. 245-255, 1996.
- ENGBERG, C. C. **The regulation and manufacture of brake pads: the feasibility of reformulation to reduce the copper load to the San Francisco Bay**. The Plant, 1995.
- ERIKSSON, M.; BERGMAN, F.; JACOBSON, S.. On the nature of tribological contact in automotive brakes. **Wear**, [s. l.], v. 252, n. 1-2, p. 26-36, 2002.
- FERNANDES, I.J.; SANTOS, E.C; OLIVEIRA, R. Caracterização do resíduo industrial casca de arroz com vistas a sua utilização como biomassa. **6º Fórum Internacional de Resíduos Sólidos**, 2015.
- KCHAOU, M.; SELLAMI, A.; FAJOU, J.; KUS, R.; ELLEUCH, R.; JACQUEMIN, F. Tribological performance characterization of brake friction materials: What test? What coefficient of friction?. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, [s. l.], v. 233, n. 1, p. 214-226, 2019.
- KUMAR, M.; BIJWE, J. Non-asbestos organic (NAO) friction composites: role of copper; its shape and amount. **Wear**, [s. l.], v. 270, n. 3-4, p. 269-280, 2011.
- KUMAR, S.; MER, K.K.S.; GANGIL, B.; PATEL, V.K. Synergy of rice-husk filler on physico-mechanical and tribological properties of hybrid Bauhinia-vahlhii/sisal fiber reinforced epoxy composites. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 2, p. 2070-2082, 2019.
- LEE, P. W.; FILIP, P. Friction and wear of Cu-free and Sb-free environmental friendly automotive brake materials. **Wear**, [s. l.], v. 302, n. 1-2, p. 1404-1413, 2013.
- LI, X.G.; LV, Y.; MA, B.G.; WANG, W.Q.; JIAN, S.W. Decomposition kinetic characteristics of calcium carbonate containing organic acids by TGA. **Arabian Journal of Chemistry**, [s. l.], v. 10, p. S2534-S2538, 2017.

- LIEW, K. W.; NIRMAL, U. Frictional performance evaluation of newly designed brake pad materials. **Materials & Design**, [s. l.], v. 48, p. 25-33, 2013.
- LU, Y. A combinatorial approach for automotive friction materials: effects of ingredients on friction performance. **Composites Science and Technology**, v. 66, n. 3-4, p. 591-598, 2006.
- MAHALE, V.; BIJWE, J.; SINHA, S. A step towards replacing copper in brake-pads by using stainless steel swarf. **Wear**, [s. l.], v. 424, p. 133-142, 2019.
- MAHALE, V.; BIJWE, J.; SINHA, S. Efforts towards green friction materials. **Tribology International**, [s. l.], v. 136, p. 196-206, 2019.
- MAJHI, S.; SAMANTARAI, S. P.; ACHARYA, S. K. Tribological behavior of modified rice husk filled epoxy composite. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, [s. l.], v. 3, n. 6, p. 180-184, 2012.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Brasil projeções do agronegócio 2019/2020 a 2029/2030**. Disponível em: <[https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/projecoes-do-agronegocio\\_2019\\_20-a-2029\\_30.pdf](https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/projecoes-do-agronegocio_2019_20-a-2029_30.pdf)>. Acesso em: 20 set. 2020.
- MATEJKA, Vlastimil et al. Jute fibers and powderized hazelnut shells as natural fillers in non-asbestos organic non-metallic friction composites. **Materials & Design**, [s. l.], v. 51, p. 847-853, 2013.
- MUTLU, I. Investigation of tribological properties of brake pads by using Rice Straw and Rice Husk Dust. **Journal of Applied sciences**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 377-381, 2009.
- NEIS, P. D. **Projeto e construção de um tribômetro com controle independente da temperatura do disco**. 2012, 11 f. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- NEIS, P. D.; FERREIRA, N. F.; LORINI, F. J. Contribution to perform high temperature tests (fading) on a laboratory-scale tribometer. **Wear**, [s. l.], v. 271, n. 9-10, p. 2660-2664, 2011.
- NEIS, P. D.; FERREIRA, N. F.; POLETTO, J. C. A comparative analysis of original and aftermarket brake pads sold in the Brazilian market. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, [s. l.], v. 38, n. 7, p. 1935-1945, 2016.
- NEIS, P.D.; FERREIRA, N.F.; POLETTO, J.C.; SUKUMARAN, J.; ANDÓ, M.; ZHANG, Y. Tribological behavior of polyamide-6 plastics and their potential use in industrial applications. **Wear**, [s. l.], v.376–377, Part B, p.1391-1398, 2017.
- NIRMAL, U.; HASHIM, J.; AHMAD, M.M.H.M. A review on tribological performance of natural fibre polymeric composites. **Tribology International**, [s. l.], v. 83, p. 77-104, 2015.
- PRIMANINGTYAS, W. E.; SAKURA, R. R.; SUHANI; SYAFIL, I.; ADHYAKSA, A.A.G.A.D. Asbestos-free Brake Pad Using Composite Polymer Strengthened with Rice Husk Powder. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2019. p. 012015.
- PAVLAK, R.P.; NEIS, P.D.; POLETTO, J.C.; BARROS, L.Y.; FERREIRA, N.F. Wear, friction and NVH characterization using a laboratory-scale tribometer. **13th SAE Brasil International Brake Colloquium & Engineering Display**, 2017.
- SAE International. J2522: Surface vehicle recommended practice Dynamometer global brake effectiveness (AK Master). [s. l.], 2003.
- SATAPATHY, B. K.; BIJWE, J. Composite friction materials based on organic fibres: Sensitivity of friction and wear to operating variables. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, v. 37, n. 10, p. 1557-1567, 2006.
- SINGARAVELU, D. L.; VIJAY, R.; FILIP, P. Influence of various cashew friction dusts on the fade and recovery characteristics of non-asbestos copper free brake friction composites. **Wear**, [s. l.], v. 426, p. 1129-1141, 2019.

SINGARAVELU, D. L.; VIJAY, R.; RAHUL, M. **Influence of crab shell on tribological characterization of eco-friendly products based non asbestos brake friction materials.** SAE Technical Paper, 2015.

SINGH, T.; PATNAIK, A.; CHAUHAN, R.; RISHIRAJ, A. Assessment of braking performance of lapinus–wollastonite fibre reinforced friction composite materials. **Journal of King Saud University-Engineering Sciences**, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 183-190, 2017.

SINGH, T.; PRUNCU, C. I.; GANGIL, B. SINGH, V.; FEKETE, G. Comparative performance assessment of pineapple and Kevlar fibers based friction composites. **Journal of materials research and technology**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 1491-1499, 2020.

STRAFFELINI, G.; CIUDIN, R.; CIOTTI, A.; GIALANELLA, S. Present knowledge and perspectives on the role of copper in brake materials and related environmental issues: A critical assessment. **Environmental Pollution**, [s. l.], v. 207, p. 211-219, 2015.

XIAO, X.; YIN, Y.; BAO, J.; LU, L.; FENF, X. Review on the friction and wear of brake materials. **Advances in Mechanical Engineering**, [s. l.], v. 8, n. 5, p. 1687814016647300, 2016.

YUN, R.; FILIP, P.; LU, Y. Performance and evaluation of eco-friendly brake friction materials. **Tribology International**, [s. l.], v. 43, n. 11, 2010.

## APÊNDICE A

Figura A1 – Equipamentos utilizados na fabricação dos materiais de fricção



## APÊNDICE B

Tabela B1 - Incertezas de medidas do tribômetro.

<b>Sistema de Força</b>			
Sensor HBM UOC 1KN	Classe = 0,2	FE = 1000 N	Incerteza = ± 2 N
Condicionador HBM Clip AE 301	Classe = 0,1	FE = 1000 N	Incerteza = ± 1 N
Aquisição dSpace ds1104	resol. = 4.8mV / 1v1	FE = 1000 N	Incerteza = ± 0,49 N
			<b>Incerteza total = ± 2,29 N</b>
<b>Sistema de Torque</b>			
Sensor HBM T10F 200 N.m	Classe = 0,1	FE = 200 Nm	Incerteza = ± 0,2 Nm
Condicionador HBM Clip MP60	Classe = 0,05	FE = 35 Nm	Incerteza = ± 0,02 Nm
Aquisição dSpace ds1104	resol. = 4.8mV / 1v1	FE = 35 Nm	Incerteza = ± 0,02 Nm
			<b>Incerteza total = ± 0,20 Nm</b>
<b>Raio de Deslize</b>			
Paquímetro digital	Acur. = ± 0,02 mm	Truncam. = ± 0,01 mm	<b>Incerteza total = ± 0,02 mm</b>

## APÊNDICE C

Tabela C1 – Etapas do procedimento tribológico adotado.

	Etapa	Número de aplicações	Velocidade de frenagem [km/h]	Temperatura [°C]	Pressão de aplicação [bar]
A K M a s t e r	Caracterização a verde	30	80 - 30	80	15
	Assentamento	64	80 - 30	80	7,5 - 25
	Valor característico	6	80 - 30	80	15
	<b>Sensibilidade a velocidade e pressão</b>	35	40-5 / 80-40 / 120-80 160-130 / 200-170	80	10 - 40
	Valor característico	6	80 -30	80	15
	Frio	1	40 - 5	40	15
	Valor característico	18	80 - 30	80	15
	<b>Fade 1</b>	15	100 - 5	100 - 300	[--]
	<b>Recovery 1</b>	18	80 - 30	80	15
	<b>Sensibilidade a temperatura e pressão</b>	19	80 - 30	100 - 300	10 - 40
	<b>Recovery 2</b>	18	80 - 30	80	15
	<b>Fade 2</b>	15	100 - 5	100 - 300	[--]
	<b>Recovery 3</b>	18	80 - 30	80	15
Adicional	Valor característico	40	80 - 30	80	15
	<b>Fade 3</b>	15	100 - 5	100 - 550	[--]
	<b>Recovery 4</b>	18	80 - 30	80	15

## APÊNDICE D

Figura D1 – Desgaste médio, em perda de massa, para cada formulação.

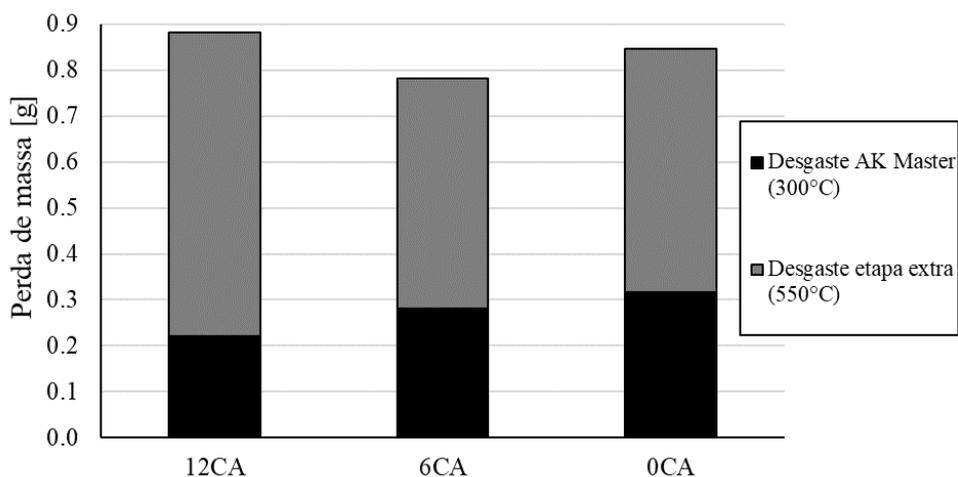


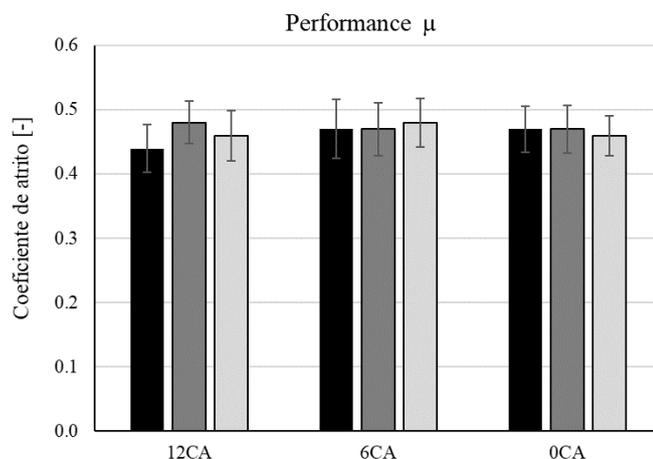
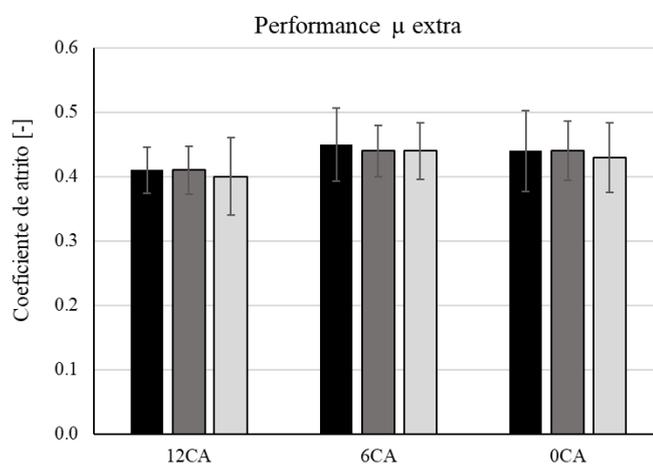
Figura D2 – Valores médios de *Performance*  $\mu$  das etapas do procedimento padrão.Figura D3 – Valores médios de *Performance*  $\mu$  da etapa extra

Figura D4 – Gráficos do CoF médio em função da pressão para diferentes temperaturas.

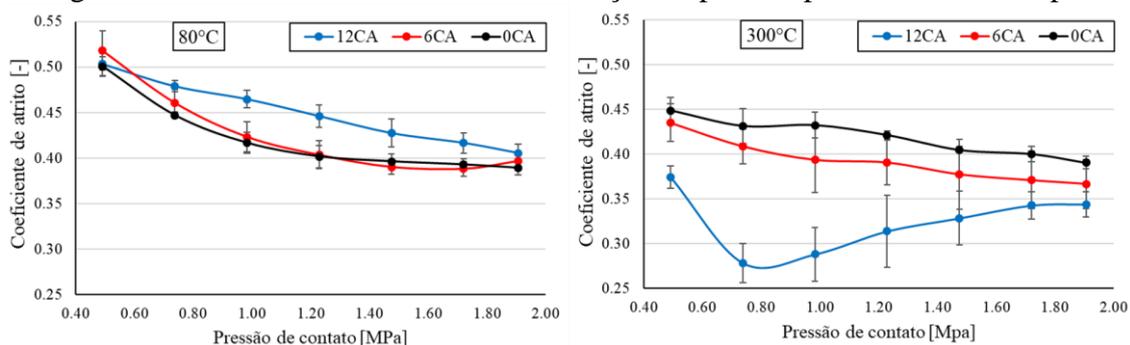


Figura D5 – Gráficos do CoF médio de em função da temperatura para diferentes pressões.

