

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL

ANDRÉIA VANESSA FINIMUNDI

**IMPACTO DA TEMPERATURA E TEMPO DO PROCESSO DE PÓS-CURA DA
FASE POLIMÉRICA DE LONAS DE FREIO APLICADAS EM VEÍCULOS
COMERCIAIS VIA COZIMENTO EM FORNOS CONTÍNUOS**

Farroupilha

2020

ANDRÉIA VANESSA FINIMUNDI

**IMPACTO DA TEMPERATURA E TEMPO DO PROCESSO DE PÓS-CURA DA
FASE POLIMÉRICA DE LONAS DE FREIO APLICADAS EM VEÍCULOS
COMERCIAIS VIA COZIMENTO EM FORNOS CONTÍNUOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais para a obtenção do grau de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Tecnologia e Engenharia de Materiais

Linha de Pesquisa: Desenvolvimento de Processo

Orientador: Prof^a. Dr^a. Daniela Lupinacci Villanova

FARROUPILHA

2020

ANDRÉIA VANESSA FINIMUNDI

**IMPACTO DA TEMPERATURA E TEMPO DO PROCESSO DE PÓS-CURA DA
FASE POLIMÉRICA DE LONAS DE FREIO APLICADAS EM VEÍCULOS
COMERCIAIS VIA COZIMENTO EM FORNOS CONTÍNUOS**

Trabalho Final apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA

Dra. Jaíne Webber
Instituição FRAS-LE S.A.

Profa. Dra. Lisiane Trevisan
Instituto Federal do Rio Grande do Sul - *Campus* Farroupilha

Profa. Dra. Eveline Bischoff
Instituto Federal do Rio Grande do Sul - *Campus* Farroupilha

Orientadora: Profa. Dra. Daniela Lupinacci Villanova
Instituto Federal do Rio Grande do Sul - *Campus* Farroupilha

Apresentado e aprovado em: 28 de Agosto de 2020.

Local da defesa: IFRS - *Campus* Farroupilha

AGRADECIMENTOS

À professora Daniela Lupinacci Villanova pela orientação e acompanhamento durante a realização deste trabalho.

Ao Norton Henandez Wille pela orientação, apoio e incentivo na realização deste estudo junto à empresa.

À empresa Fras-le S.A. pela disponibilidade dos recursos, fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Aos meus colegas da Fras-le, em especial ao Daniel Matté e Micael Muller, pelo apoio na fabricação das amostras e testes de processo, além do incentivo e auxílio na compreensão dos resultados.

À equipe do Laboratório Piloto, Químico e Físico da Fras-le, pelos ensaios caracterização das amostras.

Ao Instituto Federal.

À minha família pelo incentivo durante este período.

E por fim, porém não menos importante, a Deus.

RESUMO

No sistema de freio de veículos comerciais, a lona de freio é responsável por promover o controle de movimento a partir do atrito gerado entre lona e tambor. Qualquer mudança de processo ou matéria-prima que compõe a lona de freio requer uma série de ensaios e avaliações, a fim de manter a qualidade do produto. Dentre as etapas do processo de fabricação dos materiais de atrito, o processo de pós-cura é fundamental para a obtenção das características mecânicas e físicas ideais para cada aplicação. Contribuindo para otimização do fluxo produtivo de lonas de freio aplicadas em veículos comerciais, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência dos parâmetros temperatura e tempo do processo de pós-cura, realizado em fornos contínuos, e do percentual de resina fenólica presente no material de atrito estudado. Para avaliar o impacto das variáveis analisadas nas propriedades das lonas de freio, o produto foi caracterizado quanto à dureza Gogan, dilatação e crescimento, massa específica, resistência à flexão e extração por acetona, dentre outras propriedades mecânicas simulando aquecimento durante aplicação. Analisando os resultados, foi possível evidenciar que existe uma forte relação da temperatura de processo e do percentual de resina fenólica utilizado na formulação com as características avaliadas. O tempo gera impacto no produto, porém de forma menos perceptível. Os valores de dilatação e crescimento obtidos nos testes, indicaram que é possível desenvolver novos materiais com o processo de pós-cura otimizado, combinado com o percentual de resina fenólica utilizada. Nos ensaios de extração por acetona, todas as amostras tenderam a valores similares para os testes com maior tempo e temperatura de pós-cura, indicando que, com estes parâmetros, se obtém valores otimizados de cura, independente do percentual de resina fenólica utilizado. Nas simulações de aquecimento durante aplicação (ciclagem térmica), foi possível identificar que as características mecânicas como resistência à flexão, resistência ao impacto, resistência à compressão e resistência ao cisalhamento não sofreram variações significativas causadas pelo processo de pós-cura. As propriedades dureza Gogan, massa específica, dilatação e crescimento sofreram alterações nos primeiros ciclos de aquecimento, estabilizando após o 4º ciclo.

Palavras-chave: Pós-cura, material de fricção, resina fenólica, processo.

ABSTRACT

In the commercial vehicle brake system, the brake lining is responsible for promoting motion control from the friction generated between the lining and drum. Any change of process or raw material that composes the brake lining requires a series of tests and trials to maintain product quality. Among the manufacturing process stages of friction materials, the post-curing process is critical to achieving the correct mechanical and physical characteristics for each application. Contributing to optimizing the flow of brake linings applied in commercial vehicles, this work aims to evaluate the influence of temperature and time parameters of the post-curing process, performed in a continuous oven, and the percentage of phenolic resin present in the friction material studied. To evaluate the impact of the variables analyzed in the properties of brake linings, the product was characterized in terms of Gogan hardness, swell and growth, specific gravity, flexural strength and acetone extraction, among other mechanical properties simulating heating during application. The analysis of the evaluated characteristics shows that there is a strong relationship between the process temperature and the percentage of phenolic resin used in the formulation. Time affects the product, but less noticeably. The swell and growth values obtained in the tests indicate that it is possible to develop new materials with the optimized post-curing process, combined with the percentage of phenolic resin used. In the acetone extraction test, all evaluated samples tended to similar values for the tests with longer time and post-curing temperature, indicating that, with these parameters, optimized curing values are obtained, regardless of the percentage of phenolic resin used. In the simulations of heating during the application (thermal cycling), it was possible to identify that the mechanical characteristics like flexural, impact resistance, compressibility and shear resistance did not suffer significant variations caused by the post-curing process. The properties of Gogan hardness, density, swell and growth changed in the first heating cycles, stabilizing after the 4th cycle.

Key words: *Post-curing, friction material, phenolic resin, process.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de freio a tambor.	13
Figura 2. Sistema de freio hidráulico com freio de estacionamento.	22
Figura 3. Esquema de freio a disco (a) e freio a tambor (b).	23
Figura 4. Macro etapas do processo produtivo de materiais de fricção.	27
Figura 5. Tipos de misturadores.	28
Figura 6. Estado de equilíbrio das propriedades mecânicas de um polímero termorrígido em função da conversão.	32
Figura 7. Estágios de cura em polímeros termorrígidos: (a) indução, (b) gelificação, (c) vitrificação, (d) cura completa.	33
Figura 8. Reações de formação de resina fenólicas novolaca.	35
Figura 9. Estrutura da resina fenólica novolaca termorrígida após a cura com HTMA.	36
Figura 10. Lonas de freio para aplicação em veículos comerciais.	38
Figura 11. Divisão de etapas para avaliação do impacto do processo de pós-cura em forno contínuo e percentual de resina presente em lonas de freio.	39
Figura 12. Durômetro modelo 911.	42
Figura 13. Sistema de medição de massa específica.	43
Figura 14. (a) Amostra com material removido para realização do ensaio e (b) aparelho Soxhlet para avaliação de extração por acetona.	44
Figura 15. (a) Pontos de medição da peça para análise de dilatação e crescimento e (b) estufa e relógio comparador.	45
Figura 16.(a) Máquina universal de ensaio e (b) corpo de prova posicionado para realização de teste.	46
Figura 17. Equipamento para ensaio de resistência ao impacto.	47
Figura 18. (a) Dimensões do corpo de prova para ensaio de resistência ao impacto e (b) posicionamento do corpo de prova no equipamento.	48
Figura 19. (a) Máquina universal de ensaio e (b) corpo de prova posicionado para realização de teste.	49
Figura 20. (a) Dimensões corpo de prova e (b) dispositivo para realização do ensaio de resistência ao cisalhamento interno.	50

Figura 21. Analisador termogravimétrico.....	51
Figura 22. Variação da massa específica em função do teor de resina, tempo e temperatura de processamento.	52
Figura 23. Variação da dureza em função do teor de resina, tempo e temperatura de processamento.....	53
Figura 24. Variação da resistência à flexão em função do teor de resina, tempo e temperatura de processamento.	54
Figura 25. Dados de extração por acetona em função do teor de resina, tempo e temperatura de processamento.	55
Figura 26. Variação da (a) dilatação e (b) crescimento em função do teor de resina, tempo e temperatura de processamento.....	56
Figura 27. Pareto dos efeitos padronizados para características (a) dilatação e (b) crescimento.....	57
Figura 28. Variação da massa específica em função do número de ciclos de aquecimento.....	58
Figura 29. Variação da dureza em função do número de ciclos de aquecimento	59
Figura 30. Variação da resistência à flexão em função do número de ciclos de aquecimento.....	60
Figura 31. Variação da resistência ao impacto em função do número de ciclos de aquecimento.....	61
Figura 32. Variação da resistência à compressão em função do número de ciclos de aquecimento.....	61
Figura 33. Variação da resistência ao cisalhamento em função do número de ciclos de aquecimento.....	62
Figura 34. Variação da dilatação (a) e crescimento (b) em função do número de ciclos de aquecimento.....	63
Figura 35. Análise termogravimétrica em função do número de ciclos de aquecimento.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades dos materiais de atrito.....	31
Tabela 2. Parâmetros utilizados no processo de pós-cura.....	39
Tabela 3. Parâmetros utilizados na preparação de amostras da segunda avaliação.	40
Tabela 4. Ciclos definidos para avaliações do impacto na aplicação do processo de pós-cura realizado em forno contínuo.....	41
Tabela 5. Propriedades analisadas nas amostras.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CCC	<i>Carbon Carbon Composites</i>
CMC	<i>Ceramic-Matrix Composites</i>
DFMEA	<i>Design Failure Mode and Effect Analysis</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i>
g	Gramas
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
GC	Gogan
°C	Graus Celsius
°C/min	Graus Celsius por minuto
HTMA	Hexametilenotetramina
h	Horas
IN	<i>Inches</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
J	Joule
M _E	Massa específica
M ₃	Massa do balão mais a massa do extrato
M ₂	Massa do balão vazio
M ₁	Massa inicial do corpo de prova
MÁGUA	Massa na água
M _{AR}	Massa no ar
MMC	<i>Metal-Matrix Composites</i>
mg	Miligrama

mm	Milímetros
mm/min	Milímetros por minuto
mm ²	Milímetro quadrado
min	Minutos
N/mm ²	Newton por milímetro quadrado
NBR	<i>Nitrile Butadene Rubber</i>
NBR	Norma técnica
pH	Parâmetro de alcalinidade e acidez
%	Percentual
%E	Percentual extração por acetona
PMC	<i>Polymer-Matrix Composites</i>
kgf	Quilograma força
KJ/m ²	Quilojoules por metro quadrado
Km/h	Quilômetros por hora
RPM	Rotação por minuto
PT-100	Sensor de temperatura através de platina
SBR	<i>Styrene Butadiene Rubber</i>
SAE	<i>Society of Automobile Engineers</i>
Ti	Temperatura inicial
Tf	Temperatura final
TGA	<i>Thermal gravimetric analysis</i>
tf	Toneladas força

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa e problema	15
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Objetivo geral	16
1.2.2	Objetivos específicos	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Materiais Compósitos	17
2.2	Material de Atrito	20
2.2.1	Histórico	20
2.2.2	Sistemas de freio	21
2.2.3	Componentes dos materiais de atrito	23
2.2.3.1	Aglomerantes	24
2.2.3.2	Fibras	25
2.2.3.3	Cargas	26
2.2.3.4	Modificadores de atrito	26
2.2.4	Processo produtivo	27
2.2.4.1	Processo de mistura	27
2.2.4.2	Processo de conformação	28
2.2.4.3	Processo de pós-cura	29
2.2.4.4	Processo de beneficiamento	30
2.2.5	Propriedades dos materiais de atrito	31
2.3	Cura em Polímeros Termorrígidos	32
2.3.1	Resina Fenólica	34
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	37
3.1	Materiais e Processo Produtivo	37
3.2	Caracterização das lonas de freio	41
3.2.1	Dureza Gogan	41
3.2.2	Massa específica	42
3.2.3	Extração por acetona	43
3.2.4	Dilatação e crescimento	44
3.2.5	Resistência à Flexão	46
3.2.6	Resistência ao impacto	47
3.2.7	Resistência à compressão	48
3.2.8	Resistência ao cisalhamento interno	49
3.2.9	Análise termogravimétrica (TGA)	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1	Avaliação 1	52
4.2	Avaliação 2	58

	12
5 CONCLUSÕES.....	66
5.1 Contribuição do trabalho.....	67
5.2 Possibilidades de trabalhos futuros.....	68
REFERÊNCIAS.....	69

1 INTRODUÇÃO

Buscando manter-se competitivo no mercado e com desafios cada vez maiores, as engenharias das organizações realizam inúmeras pesquisas com objetivo de desenvolvimento e otimização de produto e processo, sempre considerando as especificações do produto, restrições impostas pelo processo, questões ambientais, econômicas e de segurança. Seguindo esta tendência, o setor automotivo precisa acompanhar as frequentes transformações e avanços que ocorrem neste mercado.

A evolução constante dos veículos, expondo o conjunto de freio a esforços cada vez maiores, os requisitos qualidade e desempenho cada vez mais elevados e a forte concorrência do mercado, exigem projetos de produtos e processos com amplas análises nos aspectos de segurança, durabilidade, eficiência, custos, entre outros. No sistema de freio de automóveis ou veículos comerciais, o material de atrito é o agente responsável pelo controle de movimentos. No sistema a tambor (Figura 1), a lona de freio é o componente que efetivamente promove o controle da velocidade do veículo, a partir do atrito gerado com o tambor. O conjunto de lona e tambor possui a função de converter o excesso de energia cinética do veículo em calor, através da fricção, liberando-o para o ambiente, possibilitando a frenagem e sua consequente desaceleração (Artmann, 2008, p. 20; Chiaronil, 2014, p. 16; Limpert, 1999, p. 11-19; Muller, 2017, p. 15; Nicholson, 1995, p 1-8; Rocha, Alberton, Oliveira, 2014, p 2-3; Silva, 2013, p. 15-18).

Figura 1. Sistema de freio a tambor.



Extraído de: Fras-le (2019).

As lonas de freio devem atender uma série de requisitos como resistência ao desgaste, coeficiente de atrito controlado, estabilidade em altas temperaturas, a fim de garantir a qualidade e segurança durante o processo de frenagem. Buscando atender esta série de requisitos, este produto pertence à classe dos materiais compósitos, ou seja, formadas a partir de dois ou mais materiais, apresentando uma fase contínua (matriz) e outra dispersa (reforço), com objetivo de formar outro material com aplicação e propriedades mais adequadas do que os seus materiais constituintes. Materiais de atrito usualmente pertencem à classe de compósitos de matriz polimérica, utilizando como matriz resinas fenólicas e borracha. São elas responsáveis por manter unidos os demais componentes, mantendo a integridade estrutural das lonas de freio sob cargas térmicas ou mecânicas (Artmann, 2008, p. 20-29; Muller, 2017, p. 30-31; eCycle, 2019; Menetrier, 2006, p. 3-10; Matté, 2016, p. 20-22; Bijwe, 1987, 378-396; Hentati et al, 2014, p. 699–709; Satapathy e Bijwe, 2006, p. 1557-1567; Silva; 2013, p. 20).

A definição dos processos de fabricação de lonas de freio e seus controles são tão importantes quanto à correta escolha das matérias-primas utilizadas nos materiais. Segundo Nicholson (1995, p 1-8) o processo de fabricação afeta significativamente as propriedades físicas, mecânicas e tribológicas do produto final, ou seja, possui relevância equivalente às matérias-primas, influenciando diretamente o desempenho do produto acabado.

O processo de pós-cura é uma das etapas mais relevantes, responsável por finalizar a cura da resina fenólica, garantindo estabilidade dimensional e térmica, além de atendimento às demais características desejáveis do material. Caso aconteçam problemas nos processos de cura, a estrutura poderá se romper durante o uso do freio e os demais componentes poderão se desprender, ocorrendo quebra do material, ou oscilações dimensionais na lona, que irão acarretar em travamentos do sistema. O pós-cura e seus parâmetros, tempo e temperatura, têm forte interferência em características mecânicas e físicas do produto (Menetrier, 2006, p. 10-13; Muller, 2017, p. 20-25; Hentati et al, 2014, p. 699-709).

Segundo Amaral (2018, p. 17) o sistema de freio pode ser sujeito a falhas quando submetido a temperaturas elevadas, por exemplo, como as que podem ser verificadas em veículos comerciais da linha pesada em descidas de serra. Isso pode acontecer muitas vezes quando há negligência humana, seja no excesso de carga

ou no mau uso do freio motor. O estudo e entendimento dos fenômenos térmicos presentes nesses sistemas se tornam fundamentais para garantir maior segurança no transporte de cargas e pessoas e possibilitar a evolução do setor automotivo (Amaral, 2018, p. 17).

1.1 Justificativa e problema

Atualmente utilizam-se fornos estacionários para a realização do processo de pós-cura de lonas de freio aplicados em veículos. Esta etapa é realizada por bateladas, necessitando de tempos elevados de processamento e maior energia para garantir a temperatura de maneira uniforme no interior do equipamento, além de exigir grandes quantidades de estoque intermediário na linha de produção. Os fornos contínuos mostram-se como uma alternativa a estes equipamentos, apresentando melhor distribuição de calor interno, garantindo que a peça receba aquecimento de forma uniforme, possibilitando melhor homogeneidade de cura na peça, redução nos tempos de processamento e, conseqüente, redução nos custos produtivos. A realização do processo de forma contínua também permite redução dos estoques intermediários. Aliado ao desenvolvimento de novos processos de pós-cura se faz necessário o conhecimento da influência dos parâmetros de tempo e temperatura, bem como do percentual de resina fenólica presente na formulação, no desempenho do produto acabado. A partir desta análise, é possível desenvolver materiais e processos mais otimizados e com melhor eficiência, além de possibilitar redução de custos relacionados à produção. Dessa forma, conhecer o impacto dos parâmetros de pós-cura e do percentual de resina fenólica presente nos materiais de atrito, bem como suas interações, é de grande importância para a indústria de lonas de freio aplicadas em veículos comerciais.

1.2 Objetivos

Através deste trabalho, buscou-se entender a relação do desempenho dos materiais de atrito com o processo de pós-cura em forno contínuo e o percentual de resina fenólica utilizado no material, com foco em possibilitar melhorias de eficiência na frenagem e o desenvolvimento de materiais com processos otimizados.

1.2.1 Objetivo geral

Investigar a influência do percentual de resina fenólica e dos parâmetros tempo e temperatura utilizados no processo de pós-cura, realizados em fornos contínuos, nas propriedades físicas, mecânicas e químicas de materiais de fricção aplicados em lonas de freio de veículos comerciais.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos do estudo têm-se:

- Analisar a influência do percentual de resina fenólica em características físicas, mecânicas e químicas de material de atrito;
- Analisar o impacto físico, mecânico e químico em lonas de freio causado por mudanças nos parâmetros temperatura e tempo utilizados no processo de pós-cura;
- Avaliar a influência do percentual de resina fenólica, dos parâmetros tempo e temperatura na estabilidade dimensional e térmica de lonas de freio;
- Analisar impacto dos parâmetros de pós-cura realizados em forno contínuo no nível de cura de resina fenólica presente em materiais de atrito de lonas de freio;
- Analisar a influência da exposição em temperatura (ciclagem térmica) nas propriedades física, mecânica, química e estabilidade dimensional de lonas de freio processadas em forno contínuo;
- Avaliar as interações entre os parâmetros de processo de pós-cura com o percentual de resina fenólica que compõe o material, a partir do impacto destas nas características física, mecânica, química e estabilidade dimensional do material de atrito;
- Analisar combinações de parâmetros de processo de pós-cura, realizados em forno contínuo, que permitam maior estabilidade dimensional e térmica e melhor desempenho mecânico ao material de atrito.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais Compósitos

Muitas aplicações exigem características que não podem ser atendidas por materiais convencionais como ligas metálicas, cerâmicos e materiais poliméricos. Para atendimento destas exigências, materiais compósitos são amplamente estudados e desenvolvidos para diferentes produtos (Callister, 1999 p. 422-424).

Materiais compósitos, ou simplesmente compósitos, podem ser considerados como materiais multifásicos, obtidos pela mistura física de, ao menos, dois constituintes de diferentes classes, obtendo assim um terceiro material com propriedades e características diferentes de seus constituintes originais e mais adequadas para a aplicação. Outra característica é que suas fases constituintes devem ser quimicamente diferentes, adequadamente arranjadas ou distribuídas e separadas por uma interface, sendo insolúveis entre si, além de apresentarem características não observadas em nenhum de seus componentes constituintes (Callister, 2000, p.422; Casaril, 2009, p. 6-7; Maxwell, 2020, p. 20).

Materiais compósitos em sua maioria são constituídos a partir de dois elementos, sendo um denominado matriz (fase contínua) e o outro reforço ou carga (fase dispersa). Partindo-se do exemplo de um compósito constituído por dois materiais distintos, ambos mantêm as suas propriedades individualmente, mas, quando misturados, apresentam um comportamento muito distinto do apresentado quando não misturados (Callister, 1999 p. 422-424; Casaril, 2009, p. 6-7; Maxwell, 2020, p. 20; Ventura, 2009, p. 12-15).

As propriedades e desempenho dos compósitos são dependentes tanto das características do reforço quanto da matriz (quantidade, tamanho, forma e distribuição). Nos materiais compósitos, as propriedades mecânicas seguem o Princípio da Aditividade, onde se estabelece que as propriedades no novo material, formado a partir da adição à matriz de uma ou mais fases dispersas, serão intermediárias entre as propriedades dos componentes constituintes. De acordo com a aplicação, são utilizadas diferentes combinações de matriz/reforço. Os reforços utilizados podem ser particulados (partículas grandes ou dispersas), fibrosos (fibras longas ou curtas), estruturais (laminados) e nanopartículas, as quais geram uma

nova classe de materiais denominada de nanocompósitos (Casaril, 2009, p. 10; Maxwell, 2020, p. 21-29). Os compósitos são classificados de acordo com sua matriz, podendo ser:

- Compósitos de matriz polimérica (PMC – *Polymer-Matrix Composites*): geralmente constituídos por uma resina polimérica como fase matriz e fibras como reforço. Este grupo é dividido em dois: termoplásticos ou termorrígidos, dependendo do modo como estão ligados química e estruturalmente. Termoplásticos costumam ser descritos como polímeros lineares, nos quais as cadeias não têm ligações cruzadas. Em função desta configuração, apresentam a vantagem de fundir durante o aquecimento, onde as ligações secundárias se rompem tornando-os um líquido viscoso, voltando a endurecer após seu resfriamento, ou seja, são processos reversíveis, que podem ser repetidos por um determinado número de vezes. Os termorrígidos, ou termofixos, são mais empregados como matrizes em compósitos e são produzidos pela mistura de uma resina e um agente de cura. O polímero resultante costuma ter um maior número de ligações cruzadas, que se formam durante a polimerização da resina líquida com o agente de cura. Os termorrígidos se tornam duros quando submetidos ao calor, ou seja, sofrem reações químicas que modificam sua estrutura molecular de forma irreversível, se tornando mais rígido e não voltam a fundir quando submetidos um novo aquecimento, proporcionando boa estabilidade dimensional. Quando reaquecido, as ligações secundárias adicionais se rompem e a rigidez do polímero diminui, mas as ligações cruzadas impedem o fluxo viscoso, de modo que o polímero não pode ser trabalhado a quente. Termorrígidos mais amplamente utilizados são resinas epóxis, resinas poliéster e resinas fenólicas (Callister, 1999, p. 437-445, Maxwell, 2020, p. 22-23; Ventura, 2009, p. 12-15).

- Compósitos de matriz cerâmica (CMC – *Ceramic-Matrix Composites*): Os principais tipos de compósitos de matriz cerâmica são classificados de acordo com o tipo de reforço usado, sendo fibras contínuas, fibras descontínuas e reforçados por particulados. Fibras contínuas comumente utilizadas nos compósitos de matriz cerâmica são as de carbetto de silício (SiC) e óxidos de alumínio (Al_2O_3). Para fibras descontínuas e particulados é utilizado o carbetto de silício (SiC). Estes compósitos são resistentes à oxidação, à deterioração sob elevadas temperaturas, apresentam resistência a fratura e a choques térmicos (Callister, 1999, p. 437-445; Ventura, 2009, p. 14).

- Compósitos de matriz metálica (MMC – *Metal-Matrix Composites*): Utilizam como matriz um metal dúctil nos quais o reforço pode melhorar a rigidez específica, a resistência específica, a resistência à abrasão, a fluência, a condutividade térmica e a estabilidade dimensional, podendo ser utilizados em temperaturas de serviço mais elevadas que seus respectivos metais de base. Estes compósitos possuem uso restrito, pois apresentam custos muito mais elevados quando comparados a compósitos poliméricos, além de apresentar maior custo de fabricação para alto desempenho e menor ductilidade e tenacidade em relação aos metais. Suas principais vantagens são temperatura de operação mais elevadas, não são inflamáveis, maior resistência ao desgaste e apresentam maior resistência à degradação por fluidos orgânicos. São utilizadas como matriz as superligas de magnésio, titânio e cobre. Os reforços podem ser na forma de particulados, de fibras contínuas ou descontínuas e de *whiskers* (monocristais muito finos que possuem razão comprimento/diâmetro extremamente grandes) (Callister, 1999, p. 437-445; Udall, Stevens, 1988, p. 99).

- Compósitos carbono-carbono (CCC – *Carbon Carbon Composites*): São compósitos com matriz de carbono reforçado com fibras de carbono. São materiais avançados e promissores, relativamente caros. Suas propriedades incluem altos módulos e limites de resistência à tração quando expostos a elevadas temperaturas (acima de 2000°C), resistência à fluência, resistência ao choque térmico, valores altos de tenacidade à fratura, baixo coeficiente de expansão térmica e condutividade térmica alta, porém apresentam propensão à oxidação em altas temperaturas. São empregados em motores de foguetes, materiais de atrito em aeronaves e automóveis de alto desempenho, moldes de prensagem a quente e também componentes de turbinas de motores em veículos espaciais (Cairo, 1998, p. 1; Callister, 1999 p. 437-445).

- Compósitos híbridos: São produzidos a partir da utilização de dois ou mais tipos de fibras em uma única matriz. Utilizam combinações de vários tipos de fibras, como fibras e particulados ou ainda com mais de um tipo de fibra ou de particulado no mesmo material, porém o sistema mais comum é de fibras de carbono e fibras de vidro incorporadas por uma resina polimérica. Os compósitos híbridos podem apresentar melhor combinação de propriedades que os compósitos compostos apenas de um único tipo de fibra. Resende, Oliveira e Mulinari (2011, p. 14-18)

identificaram em estudos realizados com compósitos híbridos de polipropileno reforçados com fibras de vidro e fibras provenientes da coroa do abacaxi propriedades mecânicas intermediárias quando comparadas aos demais reforços, sendo que este apresentou maior rigidez e maior módulo de elasticidade nos ensaios. Segundo Ventura (2013, p. 15-16), armadura de aço reforçadas com fibras híbridas apresentam maior resistência à oxidação e baixo peso. Além disso, há o interesse em substituição ou redução de uso de fibras sintéticas por fibras naturais em função da crescente preocupação com a preservação do meio ambiente e utilização de matérias-primas renováveis, sendo o uso de compósitos híbridos uma alternativa. As principais aplicações são componentes estruturais de baixo peso para transportes aéreos, aquáticos e terrestres, além de artigos esportivos e componentes ortopédicos (Callister, 1999, p. 437-445; Resende, Oliveira, Mulinari, 2011, p 14-18; Fontes, 2013, p. 26).

2.2 Material de Atrito

2.2.1 Histórico

Os primeiros sistemas de freio eram extremamente rústicos, utilizados em carros primitivos como carroças, que eram lentos e com baixa geração de calor. Estes sistemas eram constituídos por um dispositivo simples, com uma alavanca com pivotagem e uma sapata de madeira na extremidade junto à roda, proporcionando a frenagem. Com a evolução dos veículos, introdução do pneu de borracha e aumento das velocidades, surgiram os freios à cinta, nos quais uma cinta confeccionada em couro era montada ao redor de uma roda fixada no centro do eixo traseiro, porém havia uma rápida degradação térmica e consequente perda das características de atrito (Nicholson, 1995, p. 1-3).

Em 1897, Herbert Froad desenvolveu a primeira lona de freio formada por cintas de cabelo e algodão umedecido em betume para agregar fibras e permitir melhor conformação dimensional, porém, ainda com limitações térmicas. Essa deficiência foi logo percebida por Froad, que em 1908, introduziu a primeira geração de material de fricção, a partir de tecidos trançados de amianto. A resistência à temperatura, flexibilidade, propriedades de atrito e compatibilidade com resinas e outros ligantes, permitiram que a fibra de amianto fosse escolhida na maioria das

aplicações, em especial para lonas de freio do sistema lona/tambor destinados a veículos pesados. A utilização de resinas deu origem às misturas secas, possibilitando formulações com uma série de outros componentes (Nicholson, 1995, p. 1-3).

Devido às características cancerígenas do amianto, na década de 70, muitos países proibiram seu uso em produtos, impondo a necessidade de desenvolvimento de novas matérias-primas para sua substituição. A partir desta proibição, a indústria de materiais de fricção testemunhou o surgimento de uma nova geração de materiais, utilizando como alternativas fibras de vidro, fibras minerais, orgânicas e metálicas. Atualmente os novos desenvolvimentos de materiais de fricção buscam a tecnologia de materiais “asbestos-free”, em função dos malefícios do amianto citado acima. Desta forma, as lonas de freio para tambor são diferenciadas por materiais ainda fabricados com fibras de amianto dos materiais *asbestos-free* (Casaril, 2009, p. 13-14; Capelozzi, 2001, p. 206-217; Chan, Stachowiak, 2004, p. 956-958; Nicholson, 1995, p. 1-3).

2.2.2 Sistemas de freio

O sistema de freio é responsável pela redução da velocidade ou parada total do veículo, por manter a velocidade de um veículo durante uma descida, além de manter o veículo parado, sendo constituído por diversos componentes. Por possuir influência direta na segurança veicular, o conjunto de freio é um item crítico do projeto e possui uma importância muito grande em qualquer veículo. No projeto de um sistema de freio devem ser analisados aspectos como segurança, eficiência, durabilidade, entre outros. Este sistema pode ser dividido em quatro subsistemas: fonte de energia, aplicação, transmissão e rodas ou freios primários.

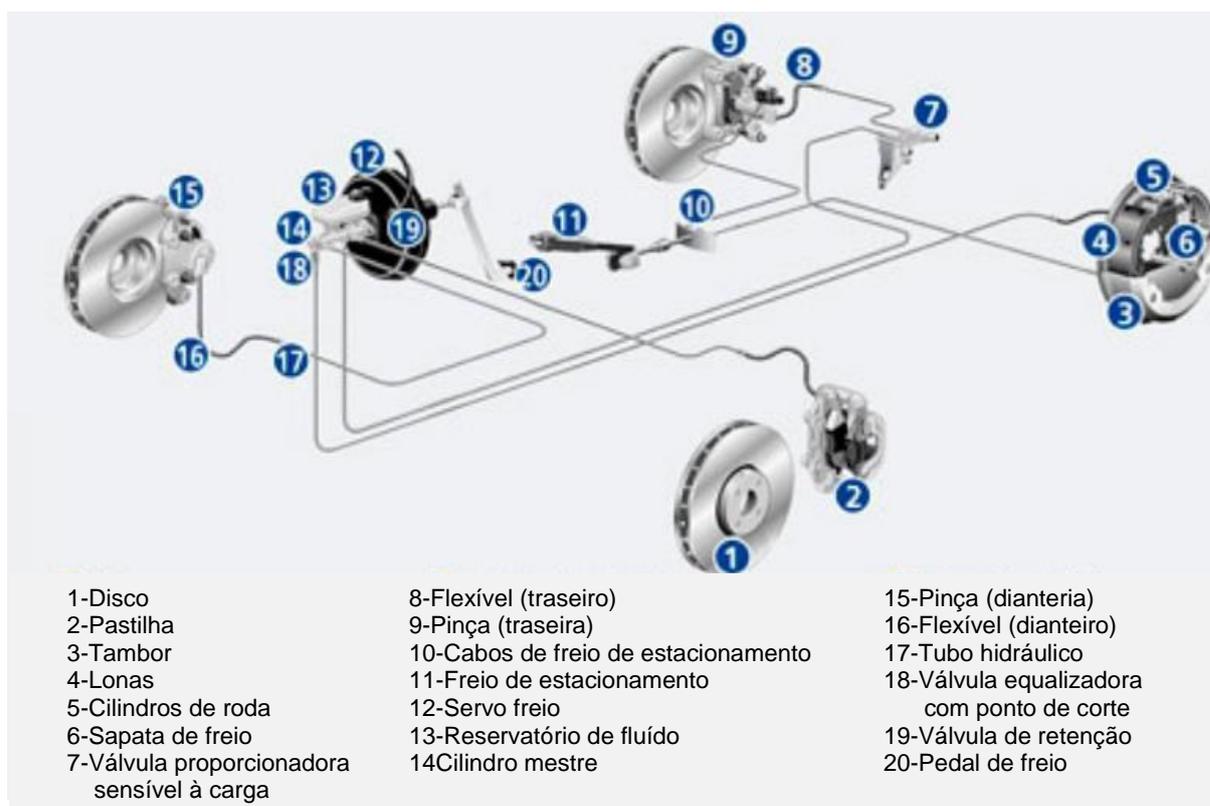
- Fonte de energia: responsável por produzir, estocar e disponibilizar a energia necessária para o funcionamento do sistema, basicamente constituído pelo pedal de freio, da alavanca de freio traseiro e pelo “power brake”.

- Sistema de aplicação: constituído pelo cilindro mestre e válvula de combinação e é responsável pela modulação do nível de frenagem a ser aplicado.

- Sistema de transmissão: responsável por transportar a energia do subsistema de aplicação às rodas, que possui componentes como a mangueira de freio e o cabo de freio de estacionamento.

- Rodas ou freio primários: são responsáveis diretos pela oposição ao movimento do veículo, formada pelos discos e tambores de freio das rodas dianteiras e traseiras respectivamente (Amaral, 2018, p. 19-20; Brezolin, 2007, p.4-5; Lamb, 2008, p. 4-9). A Figura 2 apresenta um sistema de freio hidráulico com freio de estacionamento.

Figura 2. Sistema de freio hidráulico com freio de estacionamento.

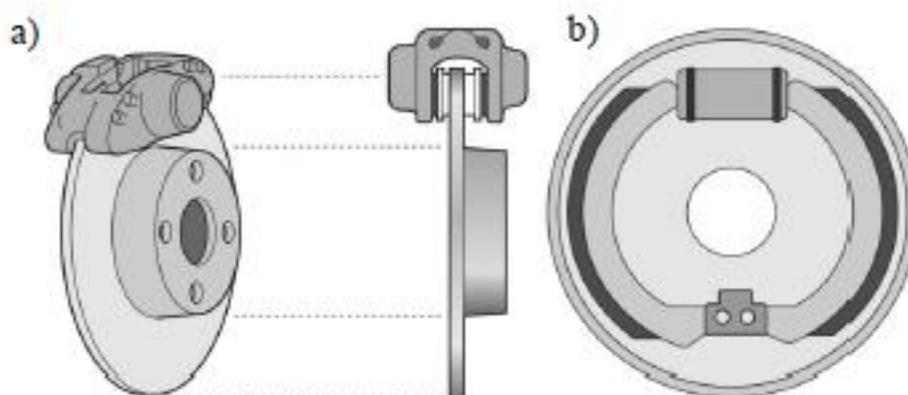


Extraído de: Vilanova (2015, p. 1).

Os veículos atualmente possuem, em sua maioria, freios a disco nas rodas dianteiras (Figura 3a) e freios a tambor nas rodas traseiras (Figura 3b). Nos sistemas de freio a disco são utilizados um disco de metal com diâmetro menor do que o da roda do veículo, preso a este e girando com a mesma velocidade de rotação. Duas pastilhas de freio (elementos planos de material de atrito) são fixadas em relação ao eixo do veículo, de forma a se movimentarem no sentido perpendicular às faces do disco de freio. Estas são pressionadas contra o disco, provocando o atrito e conseqüente redução da velocidade do veículo (Amaral, 2018, p. 20-24; Brezolin, 2007, p. 7; Finimundi, 2009, p. 37-39).

Nos freios a tambor, diferente dos freios a disco, em que os elementos atritantes são pressionados axialmente contra o rotor, o elemento atritante, neste caso chamados de lonas, são deslocados radialmente. Neste tipo de freio, sapatas ou lonas de freio são empurradas contra o tambor de freio em uma direção radial. Na montagem do sistema as sapatas são colocadas por dentro do tambor de freio, a roda do veículo é fixada ao tambor e este conjunto é montado sobre o eixo. Quando o eixo gira, faz com que gire o conjunto formado pela roda e tambor, enquanto se mantém fixo o conjunto formado pelo suporte e sapatas. Este conjunto não gira, é solidário ao chassi. Para se aplicar o freio, um dispositivo especial faz o compressor das sapatas empurrá-las para fora, contra o tambor de freio. O atrito que surge diminui a rotação da roda (Amaral, 2018, p. 20-24; Brezolin, 2007, p. 7; Finimundi, 2009, p. 37-39).

Figura 3. Esquema de freio a disco (a) e freio a tambor (b).



Extraído de: Amaral (2018, p. 20).

2.2.3 Componentes dos materiais de atrito

Materiais de atrito são utilizados nos sistemas de freio de automóveis e veículos pesados para promover o controle de seus movimentos. Desta forma, devem ser projetados de modo a garantir uma força de atrito estável para uma ampla gama de pressões do pedal, velocidade do veículo, umidade, temperatura, entre outros fatores. Devido à esta série de requisitos, materiais compósitos são

desenvolvidos para este tipo de aplicação (Bijwe, 1987, p. 380-383; Callister, 1999 p. 422-424, Matté, 2016, p. 20; Menetrier, 2006, p. 4-5; Ventura, 2009, p. 12-15;).

Os materiais de atrito mais comuns são constituídos basicamente de materiais compósitos de matriz polimérica (PMC), em função de seu baixo custo, os quais utilizam como matriz resinas fenólicas com ou sem adição de borrachas, fibras de reforço e materiais particulados para regular o nível de atrito e a taxa de desgaste. Contudo, há aplicações especiais em que a demanda térmica é muito alta, sendo necessária a utilização de compósitos de matriz cerâmicas (CMC) ou matriz carbono-carbono (CCC) (Bijwe, 1987, p. 380-383; Callister, 1999 p. 422-424, Matté, 2016, p. 20; Menetrier, 2006, p. 4-5; Ventura, 2009, p. 12-15;).

Os materiais de atrito são formados pela compactação a quente de diferentes pós, com variadas granulometrias e formas, incluindo diferentes aditivos, contando normalmente com mais de 15 matérias-primas diferentes em sua composição. Nestes são utilizadas todas as classes de materiais, tais como cerâmicos, metálicos e poliméricos. Em termos de funcionalidade, as matérias-primas utilizadas em materiais de fricção são divididas tradicionalmente em 4 grupos: aglomerantes ou ligantes, fibras de reforço, cargas e modificadores de atrito (atritantes e lubrificantes) O tipo e a quantidade de cada matéria-prima dependem das características desejadas para o produto, pois cada um apresenta variada funcionalidade no desempenho do material compósito. O papel de cada matéria-prima no material de atrito é um tema amplamente estudado e novas alternativas são constantemente desenvolvidas para atingir o melhor desempenho durante a frenagem. (Artmann, 2008, p. 21; Menetrier, 2006, p. 6; Matté, 2016, p. 20; Satapathy, Bijwe, 2006, p. 1557-1558).

2.2.3.1 Aglomerantes

Os aglomerantes, também chamados de ligantes, possuem a função de matriz no material de fricção, ou seja, mantêm unidos os demais componentes do material de atrito, buscando manter a integridade estrutural destes sob carga térmica ou mecânica. Resinas fenólicas termorrígidas são amplamente utilizadas devido à sua estabilidade térmica e dimensional, muitas vezes com adição de aditivos que podem ser borrachas ou algum tipo de polímero, a fim de melhorar as propriedades de amortecimento. Após o processo de pós-cura, apresentam alta rigidez,

resistência mecânica e estabilidade dimensional (Muller, 2017, p. 17-19; Lamb, 2008, p. 12-14).

Em serviço, durante a conversão de energia cinética em calor no momento da frenagem, podem ocorrer picos de temperatura. Conforme estudos realizados por Chiaroni (2014, p. 58-65), é possível verificar temperaturas chegando a 375,64°C na superfície da lona e a 774,94°C no tambor em caso de frenagem em declive após 200 segundos, a uma velocidade inicial de 60 km/h em inclinação de pista de 10%, um caso extremo e com longo tempo de frenagem. Neste caso, a principal função do ligante é garantir a estabilidade estrutural ao material, quando submetidos a estes esforços. A resina fenólica, juntamente com fibras de reforço oferecem a resistência mecânica necessária, além de conferir ao produto alta resistência ao desgaste quando submetido a situações de abrasão, combinados com longos períodos de tempo em temperaturas elevadas (Casaril, 2009, p. 16-19; Chiaroni, 2014, p. 58-65; Eriksson, 2000, p. 13-14; Lamb, 2008, p. 12-14; Muller, 2017, p. 17-19; Nicholson 1995, p.167-186).

2.2.3.2 Fibras

As fibras de reforço proporcionam resistência mecânica ao compósito. São normalmente utilizadas fibras de vidro, acrílica, de celulose e aramida, além de fibras cerâmicas e metálicas, normalmente picadas com pequeno comprimento. As fibras apresentam importantes propriedades mecânicas, tais como dureza, resistência à ruptura, recuperação de tensões impostas e alongação à ruptura. Antes da proibição de uso, o amianto era a matéria-prima mais utilizada como fibra estrutural (Casaril, 2009, p. 16-19; Muller, 2017, p. 17-19).

A geometria e quantidade das fibras utilizadas no material de atrito apresentam influência na resistência à ruptura e rigidez do material compósito. Zangiacomi e Bittecourt (2006, p. 57-60) realizaram estudos em material de atrito utilizado em pastilhas de freio, nos quais comprovaram a influência em certas características de acordo com variações de fibras distintas na composição. Assim, a escolha do tipo de fibra a ser utilizado se dá de acordo com as especificações necessárias para o produto. Por exemplo, a fibra aramida possui elevada resistência ao impacto e ao calor, transferindo estas características ao material. Já fibras de vidro conferem elevada resistência à tração e suportam altas temperaturas,

promovendo condução de calor. (Casaril, 2009, p. 16-19; Zangiacomi, Bitencourt, 2006, p. 57-60).

2.2.3.3 Cargas

As cargas (ou agentes de enchimento) são utilizadas para reduzir o custo e/ou alterar as propriedades físicas e de processamento do material de atrito. Podem ser definidas como materiais sólidos não solúveis, com estabilidade mecânica e térmica, dureza inferior aos materiais abrasivos, para que não haja influência ou interferências nas características proporcionadas pelos modificadores de atrito. São utilizados diferentes minerais, como carbonato de cálcio, vermiculita, mica, sulfato de bário e caulim. Podem também ser utilizados elastômeros com objetivo de redução da rigidez dos materiais de fricção. Estes normalmente são elaborados em compostos intermediários a base de borracha e outras matérias-primas, pré-homogeneizadas separadamente e adicionadas à composição final posteriormente. Podem ser utilizados elastômeros SBR (*Styrene Butadiene Rubber*), NBR (*Nitrile Butadene Rubber*), borracha natural além de reciclados de pneumáticos em grânulos (Casaril, 2009, p. 16-19; Eriksson, 2000, p. 13-14; Lamb, 2008, p. 12-14; Muller, 2017, p. 17-19; Nicholson, 1995, p.167-186).

2.2.3.4 Modificadores de atrito

Os modificadores de atrito são utilizados para garantir as propriedades de atrito estáveis além de controlar as taxas de desgaste do sistema (lona e tambor). São divididos em duas categorias: lubrificantes e abrasivos.

Como lubrificantes são utilizados os grafites, talcos e sulfetos metálicos. Estes têm a função de estabilizar o coeficiente de atrito, principalmente em temperatura elevada, além de favorecer mecanismos tribológicos, ou seja, esta lubrificação reduz o desgaste. Apresentam baixa dureza e estrutura lamelar (Casaril, 2009, p. 16-19; Eriksson, 2000, p. 13-14; Lamb, 2008, p. 12-14; Muller, 2017, p. 17-19; Nicholson 1995, p.167-186).

Já os abrasivos ou atritantes têm por objetivo oferecer uma melhor superfície de fricção, removendo óxidos de ferro e outras películas indesejadas do tambor. Estes garantem um incremento no nível de atrito dos compósitos. São tipicamente utilizados como abrasivo partículas de óxido de alumínio, óxido de magnésio, óxido e carbeto de silício, os quais possuem alta dureza e fragilidade. (Casaril, 2009, p.

16-19; Eriksson, 2000, p. 13-14; Lamb, 2008, p. 12-14; Muller, 2017, p. 17-19; Nicholson 1995, p.167-186).

2.2.4 Processo produtivo

O fluxo produtivo de materiais de fricção envolve quatro etapas macro, sendo elas a mistura, conformação, pós-cura e beneficiamento, conforme indicado na Figura 4.

Figura 4. Macro etapas do processo produtivo de materiais de fricção.



Extraído de: o autor

Estudos conduzidos por Aleksendric, Senatore (2012, p, 2781-2789) e Cai *et al* (2015, p. 3-9) comprovaram que o processo de produção deve ser definido conforme a formulação do material, de acordo com sua composição, tendo o tipo e percentual de resina fenólica utilizada grande impacto na definição destes parâmetros. Durante as etapas de produção, os parâmetros devem ser rigorosamente monitorados e controlados, pois afetam significativamente o desempenho do material de atrito (Xiao, Zhu, 2010, p. 222-224; Zhai, Warrior, Long, 2005, p. 5457-5465). Baklouti *et al* (2012, p. 550-558), constataram que o processo produtivo de lonas de freio aplicados em veículos pesados teve efeitos diferentes sobre a morfologia do material, na distribuição e orientação das partículas utilizadas no composto, impactando na capacidade de frenagem do produto.

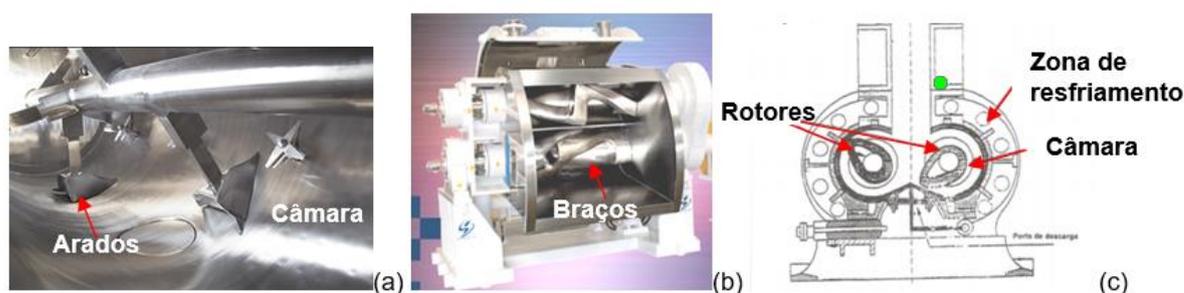
2.2.4.1 Processo de mistura

O processo de mistura tem a função de homogeneizar as matérias-primas. Neste, os componentes já devidamente dosados são adicionados em misturadores de acordo com etapas específicas, devendo ser monitorados o tempo e a temperatura, além da rotação dos rotores e da pressão exercida no material dentro da câmara de mistura. Os tempos de mistura variam normalmente entre 10 e 15 minutos, porém estes são definidos de acordo com os tipos de matéria-prima

utilizados para a ideal homogeneização. Este processo pode ser dividido em mistura seca, utilizando apenas matérias-primas em pó, e úmida, que utiliza solventes e resina líquida (Nicholson, 1995, p.9-19).

O tipo de misturador dependerá da mistura que será produzida. As misturas secas utilizam misturadores com arados/pás e intensificadores em alta rotação (Figura 5a) para homogeneização dos pós. Já as misturas úmidas utilizam misturador de braços duplos tipo Sigma (Figura 5b) ou misturador interno de rotores tipo Banbury de ação tangencial (Figura 5c), para que ocorra a incorporação dos materiais úmidos no restante das matérias-primas a partir do cisalhamento destes com o interior do equipamento (Nicholson, 1995, p.9-19).

Figura 5. Tipos de misturadores.



Extraído de: Semco (2020) e Oliveira (2010, p.6)

2.2.4.2 Processo de conformação

A conformação de lonas de freio aplicadas em veículos comerciais normalmente se divide em 2 etapas, sendo elas a conformação a frio e a quente, ambas realizadas em prensas hidráulicas.

Na conformação a frio o material homogeneizado é dosado, de acordo com a peça a ser produzida, e posteriormente é adicionado a um molde onde irá sofrer determinada pressão, para redução de volume e promoção de estabilidade estrutural, em temperatura ambiente. O material pré-compactado é então enviado para o processo de conformação a quente. Nesta etapa tem início o processo de reações químicas do material, pois este sofre ciclos de pressão e degasagem com tempos determinados, associados à temperatura (Nicholson, 1995 p. 27-51).

Durante o ciclo de conformação a quente, uma das transformações do material ocorre na resina fenólica. Inicialmente, a resina fenólica que possui a forma de pó, recebe temperatura e inicia o primeiro estágio do processo de cura. Esta se funde e passa para o estado líquido, preenchendo todos os vazios existentes entre os materiais particulados e a fibra. No decorrer das reações químicas, a resina líquida passa do estado líquido para estado gel (estágio gel), aglomerando os demais materiais. Por fim, quando finalizadas as ligações cruzadas, a rede/estrutura tridimensional formada torna a resina fenólica um material sólido e rígido. Desta forma, é muito importante o controle do tempo, temperatura e pressão durante a conformação a quente (Nicholson, 1995 p. 27-51; Muller, 2017, p. 21-22; Zangiacomi, Bitencourt, 2006, p. 56-57).

2.2.4.3 Processo de pós-cura

O processo de pós-cura pode ser realizado em fornos contínuos (com processamento peça a peça) ou estacionários (processo realizado em bateladas), nos quais as peças são processadas sem pressão e ficam expostas a temperaturas entre 150 e 260 °C por tempos que variam de 30 minutos a 15 horas. Logo, esta operação tem como parâmetros de controle tempo e temperatura de exposição e são definidos de acordo com o material (Nicholson, 1995, p. 80-90).

Outro fator importante no processamento de pós-cura é o fluxo de ar aquecido, pois este entra em contato com material promovendo, por convecção, a transferência térmica e estabilização da peça. Desta forma, este fluxo de ar deve ser extremamente uniforme, para garantir o correto processamento do material e para que não haja zonas frias dentro do equipamento (Nicholson, 1995, p. 80-90).

A etapa de pós-cura apresenta elevada importância, pois possui influência em diversas características do produto acabado, sendo nesta etapa que ocorre a finalização das ligações cruzadas na resina fenólica utilizada. A relação tempo e temperatura no processo de pós-cura e o percentual de resina utilizado na formulação deve ser cuidadosamente definida, pois apresenta grande impacto nas propriedades físicas e mecânicas do produto acabado. (Nicholson, 1995, p. 80-90; Muller, 2017, p. 21-22; Gardziella, Pilato, Knop, 2000, p.361-365).

O processo de pós-cura deve ter os controles adequados para os parâmetros tempo e temperatura, a fim de garantir as características necessárias ao material,

além de evitar falhas como bolhas e trincas no interior da peça. Wolfrum e Ehrenstein (1999, p. 3177-3183) comprovaram uma redução nas tensões de fratura com o aumento na temperatura de pós-cura em materiais com diferentes sistemas de resina fenólica. Em outras avaliações de materiais com diferentes bases de resinas, o pós-cura foi considerado como um processo realizado apenas para alívio de tensões residuais resultantes do processo de conformação a quente, além de garantir uma uniformidade na cura e reduzir a expansão térmica durante serviço (Bijwe, *et al*, 2005, p. 1070-1077; Kim, Kim, Jang, 2003, p. 204-208).

Estudos realizados por Hentati *et al* (2014, p. 702-708) nos quais foi mantida a mesma base de formulação e alterado o tempo de processo de pós-cura em escala laboratorial em pastilhas de freio, evidenciaram que a redução do tempo não afetou a microestrutura do material de atrito. Porém houve maior condutividade térmica, propriedades mecânicas de superfície heterogêneas, maiores níveis de atrito e menor resistência ao desgaste.

Ertan e Yavuz (2010, p. 1526-1532), buscando os parâmetros ótimos de processo, identificaram que houve uma pequena redução na resistência ao desgaste e um impacto negativo no coeficiente de atrito quando o material foi exposto a altos tempos de pós-cura. Ho, Lin e Ju (2005, p.863-868), constataram em suas pesquisas com materiais de atrito um aumento de espessura e uma redução de peso e densidade além da geração de defeitos nas peças avaliadas após o processo de pós-cura, quando comparadas com o processo de conformação a quente. Muller (2017, p. 54-64) e Matté (2014, p. 54-69) em estudos de processamento de pós-cura de materiais de atrito realizados em fornos contínuos, identificaram resultados de produto acabado similares aos obtidos em fornos estacionários (batelada), além de possibilidade de otimização no parâmetro tempo, reduzindo este consideravelmente quando comparados ambos os processos.

2.2.4.4 Processo de beneficiamento

A etapa de beneficiamento no fluxo produtivo de materiais de atrito tem por objetivo garantir as características físicas do produto, promover sua geometria de acordo com as especificações dimensionais e de acabamentos. Este processo consiste nas operações de corte, retíficas interna e externa, furação para ancoragem dos materiais nos reforços metálicos, confecção do indicador de desgaste, além de

pintura, identificação e embalagem do produto finalizado. Esta etapa também deve ser controlada, pois deve garantir ao produto geometrias equivalentes às do sistema de freio para promover a correta frenagem e assentamento do material (Canali, 2002, p. 9; Muller, 2017, p. 24).

2.2.5 Propriedades dos materiais de atrito

Materiais de atrito são submetidos a altas demandas mecânicas e térmicas durante o uso em sistemas de freio de carros, caminhões, ônibus, trens, aviões, entre outros. Estas demandas exigem determinadas características físicas, químicas e mecânicas de acordo com a aplicação do produto. A avaliação do atendimento destas características segue métodos baseados em institutos nacionais (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas) e internacionais (ISO – *International Organization for Standardization*, ASTM – *American Society for Testing and Materials* e SAE – *Society of Automobile Engineers*), além de normas e métodos desenvolvidos pelo fabricante ou pelo usuário final (Artmann, 2008, p 24; Menetrier, 2006, p. 13-14; Muller, 2017, p. 24-25).

As propriedades dos materiais de atrito são definidas de acordo com aplicação do produto. A Tabela 1 apresenta as principais características avaliadas nos materiais de fricção.

Tabela 1. Propriedades dos materiais de atrito.

Propriedades Físicas	Propriedades Mecânicas
Massa específica	Dureza
Condutividade Térmica	Compressibilidade
Calor específico	Resistência ao impacto
Dilatação	Resistência à tração
Crescimento	Resistência à compressão
	Resistência à flexão
	Resistência ao cisalhamento
	Rigidez

Extraído de: Artmann (2008, p.24).

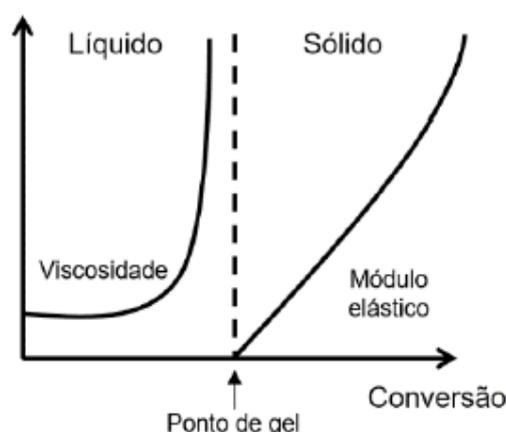
Além das propriedades citadas na Tabela 1, também são analisados nível de ruído, corrosão, vibração, processabilidade, impacto ambiental, odor, desgaste e coeficiente de atrito (Muller, 2017, p. 24-25).

2.3 Cura em Polímeros Termorrígidos

Os polímeros termorrígidos, após o processo de cura, não podem ser fundidos ou remoldados novamente. O processo de cura dos termorrígidos é complexo e envolve diversas etapas, passando por duas estruturas de transição durante a formação da rede polimérica: gelificação e vitrificação (transição vítrea), indicando o comportamento viscoelástico (Artmann, 2008, p 25-38; Matté, 2016, p. 24-25).

Na gelificação ocorre a transição de um estado líquido para um estado de borracha. Próximo ao ponto de gel, o líquido passa a se comportar como um gel em função das ligações covalentes que se formam em uma rede reticulada insolúvel em qualquer solvente e, neste ponto, a viscosidade e a taxa de cisalhamento que eram constantes, cresce exponencialmente, tendendo ao infinito (Figura 6). O aumento da viscosidade da formulação delimita seu processamento, fazendo com que o processo de cura continue lentamente. (Abreu et al, 2007, p. 1-2; Matté, 2016, p. 24-25).

Figura 6. Estado de equilíbrio das propriedades mecânicas de um polímero termorrígido em função da conversão.

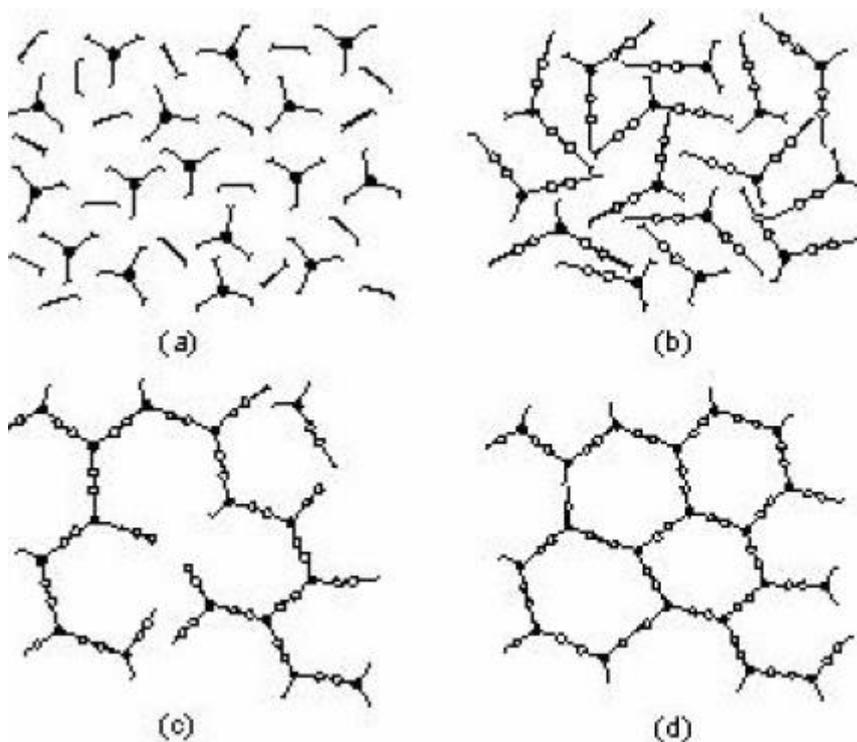


Extraído de: Matte (2017, p. 24).

Na vitrificação há a conversão do líquido ou gel para um estado vítreo, causada pela redução da mobilidade em função da formação de ligações covalentes entre cadeias poliméricas. Nesta etapa ocorre um aumento das ligações cruzadas e o material solidifica, dificultando a continuação de reação e polimerização (cura), e as reações químicas cessam, permitindo apenas fenômenos de difusão.

O aumento de ligações cruzadas provoca um aumento na temperatura de transição vítrea e nas propriedades mecânicas do material. De maneira ilustrativa, é possível demonstrar o processo de cura por meio da Figura 7, representado por: (a) início da cura a partir de monômeros, (b) crescimento linear e início da reação de cura até atingir o ponto de gel, (c) aumento no número de ligações cruzadas caracterizando a vitrificação, (d) a quantidade de ligações cruzadas chegam próximo ao máximo possível, caracterizando cura completa (Abreu et al, 2007, p. 1-2; Artmann, 2008, p 25-38; Matté, 2016, p. 24-25; Gardziella, Pilato, Knop, 2000, p.66-68).

Figura 7. Estágios de cura em polímeros termorrígidos: (a) indução, (b) gelificação, (c) vitrificação, (d) cura completa.



Adaptado de: ABREU et al. (2007, p. 2).

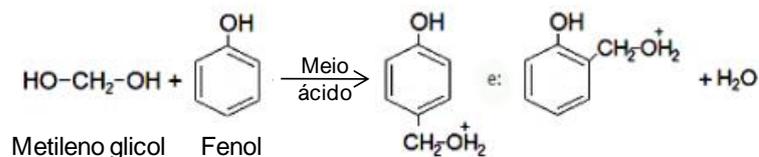
2.3.1 Resina Fenólica

Resinas fenólicas são polímeros termofixos ou termorrígidos, patenteadas pela primeira vez no ano de 1899, e são considerados os primeiros materiais poliméricos sintéticos. Apresentam diversas aplicações como adesivos para compensados, matrizes de compósitos para a indústria aeroespacial, automobilística e naval, espumas de isolamento térmico e acústicos, entre outras. São resinas produzidas a partir de reações químicas em etapas entre fenol (álcool aromático derivado do benzeno), ou um derivado do fenol, e um aldeído, em especial o formaldeído, com a eliminação de água. As estruturas obtidas irão depender da razão molar entre os dois componentes, do pH da reação, do tipo de catalisador e da temperatura da síntese (Santos, Calado, Peçanha, 2007, p 1-2; Artmann, 2008, p 25-38; Matté, 2016 p. 25-27).

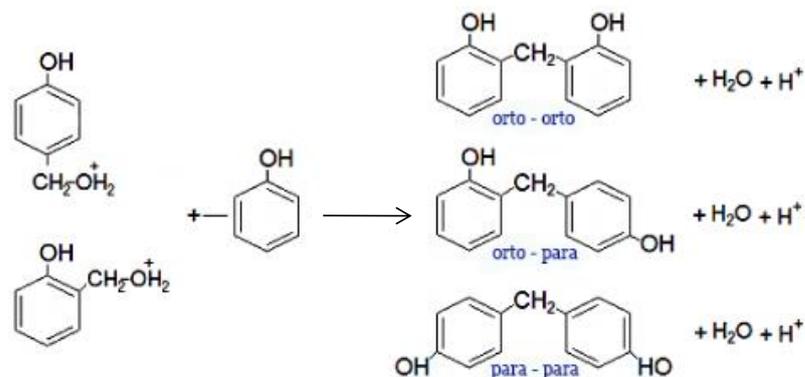
As resinas fenólicas apresentam importantes propriedades mecânicas e químicas, tendo excelente estabilidade térmica, resistindo a chamas e altas temperaturas, que geram pouca fumaça e baixa emissão de gases tóxicos quando comparadas com outras resinas termorrígidas como poliésteres e epoxídicas. As resinas fenólicas se dividem em dois tipos: Novolaca e Resóis, sendo ambas curadas em temperaturas que variam de 130 a 170 °C, dependendo do tipo de agente de cura utilizado. Resinas fenólicas tipo novolaca são produzidas por catalisador ácido e com razão molar formadeído/fenol menor que 0,9. Já resinas fenólicas do tipo resóis são preparadas em catalisador alcalino e com razão molar formaldeído/fenol maior que 0,9 (Santos, Calado, Peçanha, 2007, p 1-2; Artmann, 2008, p 25-38; Matté, 2016 p. 25-27).

As resinas fenólicas tipo novolaca são obtidas pela reação de metileno glicol com um fenol, em meio ácido e com ligeiro excesso de fenol. Em meio ácido, o grupo metilol reage rapidamente com fenol e perde moléculas de água para produzir novolaca (Figura 8).

Figura 8. Reações de formação de resina fenólicas novolaca.



A reação continua em excesso de fenol



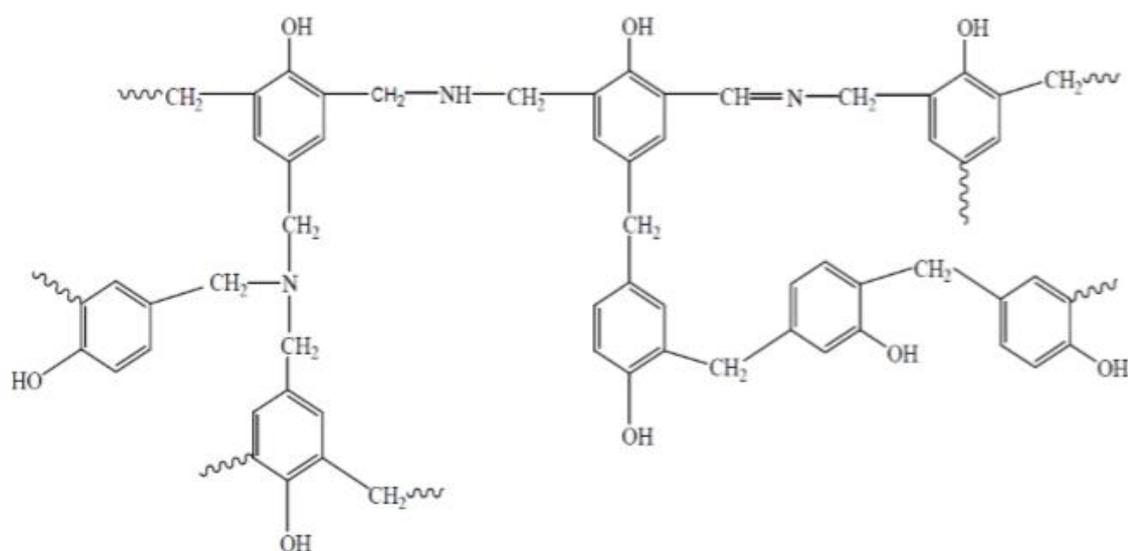
Extraído de: CTB (2020, p.1).

Para que ocorra o processo de reticulação em temperatura entre 140 e 160°C das resinas fenólicas novolacas, torna-se necessária a adição de um co-reagente, normalmente hexametilenotetramina (HTMA). Nestas condições, alta resistência mecânica, elevada estabilidade térmica são obtidas. Devido a estas características, a indústria de material de fricção comumente utiliza resina fenólica tipo novolaca, com adição do agente de cura HMTA durante o processo de moagem de resina, em temperatura controlada (Artmann, 2008, p 25-38; Borges, Pereira, 2006, p. 1-2; CTB, 2020, p. 1; Gardziella, Pilato, Knop, 2000, p.1129-1147; Matté, 2016 p. 25-27, Zangiocomi, Bittencourt, 2006, p. 56).

A reação exotérmica entre o fenol-formaldeído (polímero) e o hexametilenotetramina (HMTA), fornecedor de pontes metilênicas e que inclui em sua estrutura átomo de nitrogênio, é responsável pela formação da estrutura reticulada, formando o material termorrígido e definindo as propriedades de resina fenólica (Figura 9). A reação de cura da resina novolaca com HMTA ocorre em dois estágios, sendo que no primeiro ocorre a formação de compostos intermediários, como benzilamina e benzoxazinas, e no segundo estágio são identificadas reações

de decomposição, oxidação e reações dos intermediários com outros compostos (Artmann, 2008, p 25-38; Gardziella, Pilato, Knop, 2000, p.66-67; Scaldalferri, 2015, p. 6).

Figura 9. Estrutura da resina fenólica novolaca termorrígida após a cura com HTMA.



Extraído de: Scaldalferri (2015, p. 6)

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental realizado neste trabalho visou analisar a influência do processo de pós-cura em forno contínuo e do percentual de resina fenólica tipo novolaca presente no material de atrito aplicado em lonas de freio de veículos comerciais (caminhões). Este capítulo tem por objetivo apresentar a descrição de produção das amostras e dos métodos experimentais utilizados para as caracterizações das propriedades físicas, mecânicas e químicas, as quais seguiram normas e especificações vigentes para materiais de atrito.

3.1 Materiais e Processo Produtivo

Para realização deste estudo, foram fabricadas amostras com um material base, utilizado na produção de lonas de freio aplicados em veículos comerciais (caminhões).

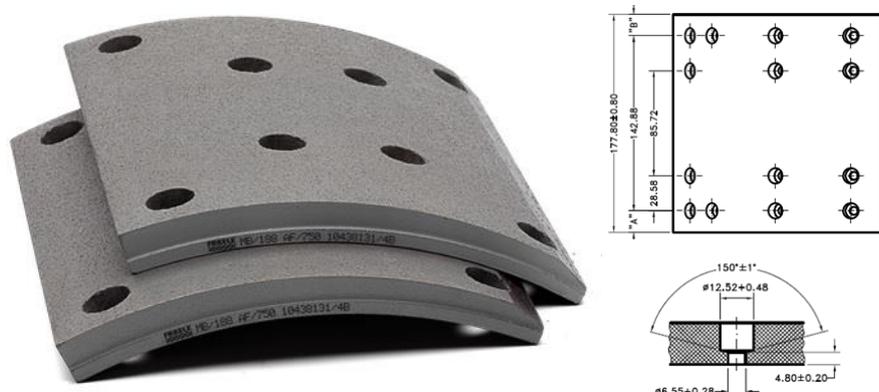
As matérias-primas do material base foram dosadas de acordo com as quantidades definidas para realização dos testes, em balanças de plataforma marca Alfa, com resolução de 50g. Após, foram homogeneizados em um misturador de arados da marca Semco, tendo como controle número de etapas, sequenciamento de adição e tempos de mistura. O material preparado foi inicialmente conformado a frio (pré-prensado), para conferir ao pó compactação suficiente para manter a integridade da pré-forma a ser utilizada na segunda conformação, realizada a quente. Ambas as conformações foram realizadas em prensas hidráulicas de 120 e 600 tf, respectivamente, nas quais os parâmetros de controle foram pressão manométrica, tempo de prensagem, número de ventilações e temperatura, no caso da conformação a quente.

O processo de pós-cura foi realizado em forno contínuo, controlando-se o tempo e temperatura de exposição das amostras. A temperatura interna do forno foi controlada a partir do uso do sensor de temperatura PT-100, que realizava leituras em 3 zonas de monitoramento do equipamento.

Após a finalização da cura, as amostras passaram pelas etapas de beneficiamento, sendo elas: corte, retíficas interna e externa, furação e preparação

do indicador de desgaste. O processo de beneficiamento definiu a geometria do material a ser utilizado, conforme Figura 10, sem alterar suas propriedades.

Figura 10. Lonas de freio para aplicação em veículos comerciais.



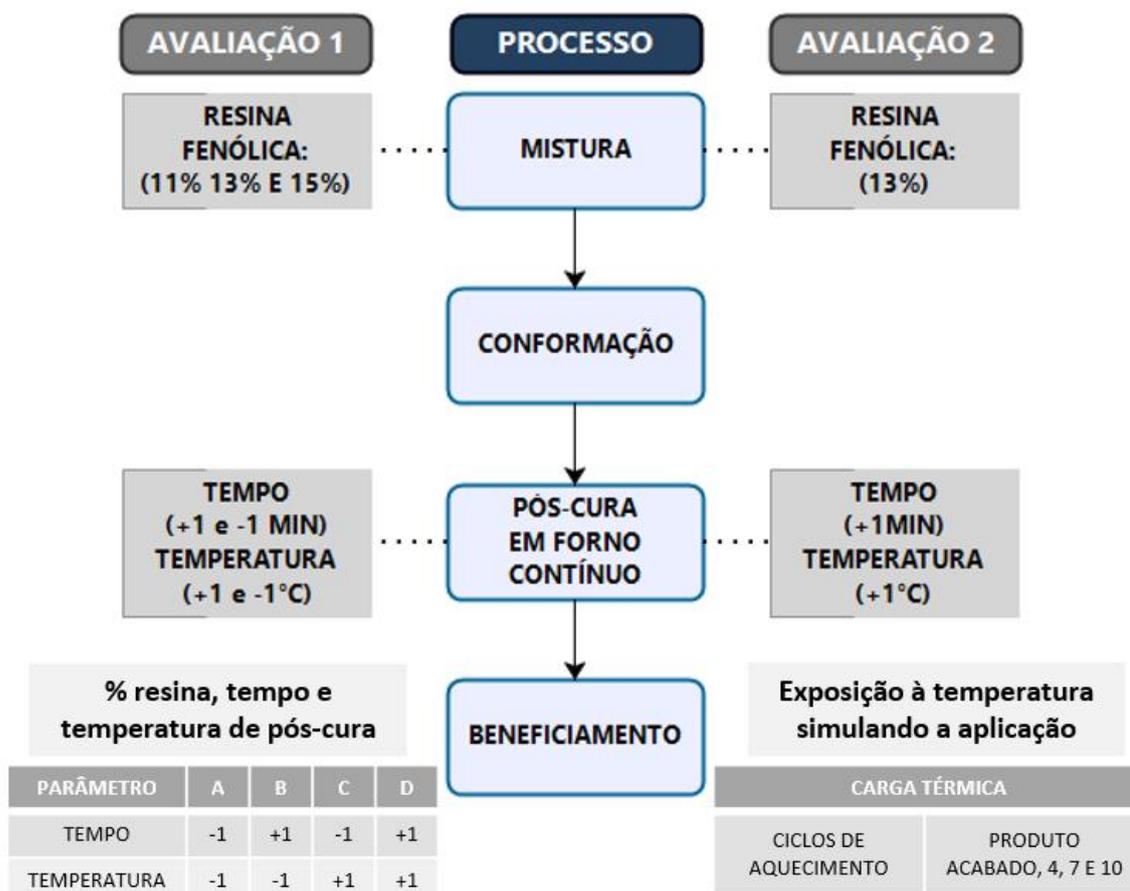
Extraído de: Fras-le 2019.

Para uma melhor compreensão do impacto dos parâmetros de processo utilizados na operação de pós-cura e do percentual de resina fenólica presente em materiais de atrito, o estudo foi realizado em 2 etapas de avaliação, conforme indicado na Figura 11. Em ambas as avaliações, o processo produtivo seguiu o mesmo fluxo de operações e foram utilizados os mesmos equipamentos. Os parâmetros de tempo e temperatura são representados pelos códigos -1, que representa tempo e temperatura inferiores, e +1, o qual representa tempo e temperatura superiores utilizados nos testes. Por se tratar de segredo industrial, os parâmetros não podem ser especificados.

A primeira avaliação teve por objetivo compreender o impacto dos parâmetros temperatura e tempo utilizados no processo de pós-cura e do percentual de resina fenólica presente em lonas de freio aplicados em veículos comerciais, bem como a interação entre estes. Para esta primeira etapa, foram produzidas formulações do material base com diferentes percentuais em massa de resina fenólica em sua composição, sendo elas: 11, 13 e 15%. Com a modificação no percentual de resina fenólica, as cargas minerais da composição foram reajustadas de forma a não afetar significativamente o volume total do material. A descrição dos parâmetros de pós-

cura e combinações utilizados nas amostras produzidas com diferentes percentuais de resina fenólica seguiram os dados da Tabela 2.

Figura 11. Divisão de etapas para avaliação do impacto do processo de pós-cura em forno contínuo e percentual de resina presente em lonas de freio.



Extraído de: o autor.

Tabela 2. Parâmetros utilizados no processo de pós-cura.

PROCESSO/ PARÂMETRO	A	B	C	D
Tempo (Min)	-1	+1	-1	+1
Temperatura (°C)	-1	-1	+1	+1

Extraído de: o autor.

A segunda avaliação teve por objetivo compreender o impacto do processo de pós-cura realizado em forno contínuo no desempenho de lonas de freio quando estas expostas ao calor excessivo durante aplicação.

Como o objetivo foi identificar possíveis variações do produto, em características físicas e mecânicas, em função da carga térmica durante o uso (ciclagem térmica) as amostras da segunda etapa foram preparadas em apenas uma das condições analisadas na primeira avaliação. Estas foram preparadas com 13% de resina fenólica em massa, valor médio utilizado nos testes da etapa 1, e a combinação D apresentada na Tabela 2, a qual utilizou os maiores tempo e temperatura avaliados no estudo. A relação de parâmetros utilizados está indicada na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros utilizados na preparação de amostras da segunda avaliação.

PROCESSO/ PARÂMETRO	D
Tempo (Min)	+1
Temperatura (°C)	+1
Resina fenólica utilizado no material (%)	13%

Extraído de: o autor.

A fim de simular a carga térmica, as amostras produzidas na segunda etapa foram expostas a ciclos de aquecimento (ciclagem térmica) em estufa estacionária seguindo parâmetros indicados na norma SAE J160:2013, utilizada em avaliações de estabilidade dimensional de materiais de atrito. De acordo com a norma, as amostras foram submetidas a uma taxa de aquecimento de, aproximadamente, 4 °C/min até a temperatura de 200 °C, em processo controlado por sensor do tipo PT-100. Após, permaneceram expostas a temperatura de 200 °C por mais 30 minutos. Em seguida, foram retiradas e dimensionadas em intervalo de tempo inferior a 3 minutos, para avaliação da dilatação.

Na sequência, as amostras foram colocadas na bancada de teste até atingirem a temperatura ambiente e medidas novamente, para avaliação do crescimento. Ambas as medidas foram comparadas com a medida inicial da lona,

antes da exposição ao calor. A Tabela 4 indica o número de ciclos de aquecimento aos quais as amostras foram expostas para posterior caracterização de propriedades físicas, mecânicas e químicas, sendo 8 peças para cada ciclo

Tabela 4. Ciclos definidos para avaliações do impacto na aplicação do processo de pós-cura realizado em forno contínuo.

ETAPAS DE AVALIAÇÃO	CICLOS DE AQUECIMENTO
1 ^a	Produto acabado
2 ^a	4
3 ^a	7
4 ^a	10

Extraído de: o autor.

3.2 Caracterização das lonas de freio

Com objetivo de avaliar as características das amostras processadas nas etapas 1 e 2, foram realizados os ensaios e métodos descritos a seguir e indicados na Tabela 5. Todos os ensaios foram realizados em um laboratório acreditado pela norma ISO/IEC 17025.

Tabela 5. Propriedades analisadas nas amostras.

PROPRIEDADES ANALISADAS	1^a AVALIAÇÃO	2^a AVALIAÇÃO
Dureza Gogan	3 amostras	4 amostras
Massa Específica	3 amostras	4 amostras
Extração por Acetona	1 amostra	-
Dilatação & Crescimento	3 amostras	4 amostras
Resistência à flexão	4 corpos de prova	10 corpos de prova
Resistência ao impacto	-	10 corpos de prova
Resistência à compressão	-	5 corpos de prova
Resistência ao Cisalhamento int.	-	5 corpos de prova
Análise termogravimétrica	-	1 amostra

Extraído de: o autor.

3.2.1 Dureza Gogan

Para determinação da dureza Gogan, foi utilizado um durômetro modelo 911 (Figura 12), com auxílio de um penetrador plano de 9,52 mm², para penetração

superficial, com aplicação de carga na faixa de 1500 kgf. O método seguiu a norma ABNT NBR 5520:1991, sendo realizadas medições em três pontos da peça na ponta grossa da lona (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991, p.1-4).

Figura 12. Durômetro modelo 911.



Extraído de: Fras-le 2019.

3.2.2 Massa específica

O ensaio de massa específica fornece informações sobre a compactação, integridade e porosidade do material de atrito e foi realizado conforme a norma NBR 5544:1998. Para realização do ensaio a peça é pesada ao ar e após é pesada totalmente submersa em água. A medida é obtida usando o volume de água deslocado quando a amostra é inserida no recipiente com água. Para pesagem utilizou-se uma balança semi-analítica Ohaus com precisão de 0,01 g (Figura 13). O valor de massa específica é obtido a partir da Equação 1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998, p. 1-2).

Figura 13. Sistema de medição de massa específica.



Extraído de: Fras-le 2019.

$$M_E = \frac{M_{AR}}{(M_{AR} - M_{\text{ÁGUA}})} \quad (1)$$

Sendo:

M_E a massa específica do material, em gramas.

M_{AR} a massa da amostra ao ar, em gramas.

$M_{\text{ÁGUA}}$ a massa da amostra submersa na água, em gramas.

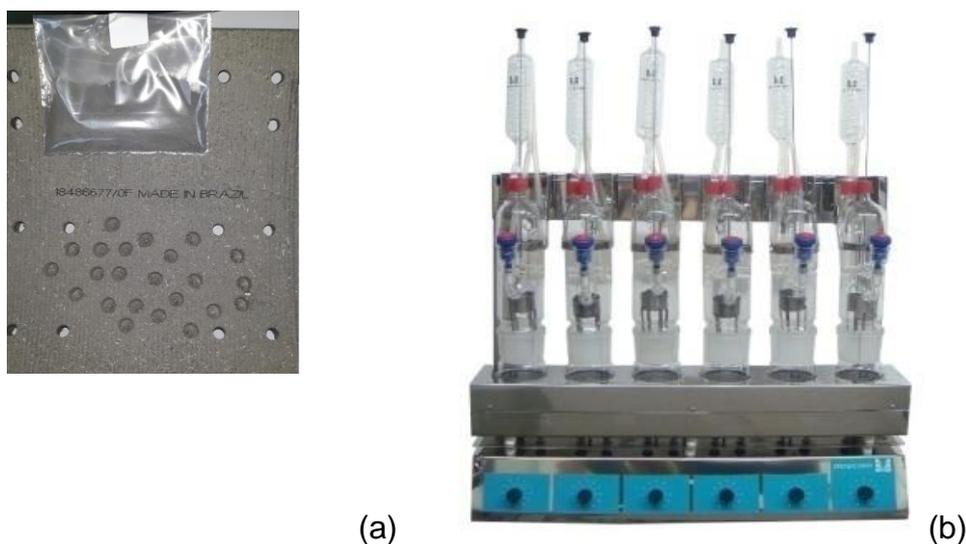
3.2.3 Extração por acetona

O ensaio de extração por acetona tem por objetivo determinar o percentual de constituintes solúveis em solvente utilizados no produto. Para realização deste ensaio, foi retirado material de uma amostra de cada teste, com auxílio de uma furadeira que opera a 300 rpm para não causar queima no volume amostrado. Foi empregada uma broca de 8 mm de diâmetro e as furações foram feitas entre 6 a 10 pontos diferentes da peça, a partir de 6 mm, no mínimo, da borda e com profundidade suficiente para alcançar o centro da espessura da amostra (Figura 14a).

O material obtido foi pesado (3 gramas), colocado no cartucho de extração e inserido no aparelho Soxhlet (Figura 14b), já preparado com o balão volumétrico

contendo acetona. O processo foi realizado durante 4 horas após o primeiro refluxo a uma temperatura de 300 °C. Finalizada esta etapa, o balão foi inserido em uma estufa a 105 °C por mais 2 h. O percentual do extrato foi determinado conforme Equação 2.

Figura 14. (a) Amostra com material removido para realização do ensaio e (b) aparelho Soxhlet para avaliação de extração por acetona.



Extraído de: Fras-le 2019.

$$\%E = \frac{M_3 - M_2}{M_1} \quad (2)$$

Sendo:

M_1 a massa inicial do corpo de prova em gramas.

M_2 a massa do balão vazio.

M_3 a massa do balão somada à massa do extrato.

Nesse ensaio é obtido o percentual de material orgânico presente na resina fenólica que não sofreu a cura, ou seja, material puro sem alteração química.

3.2.4 Dilatação e crescimento

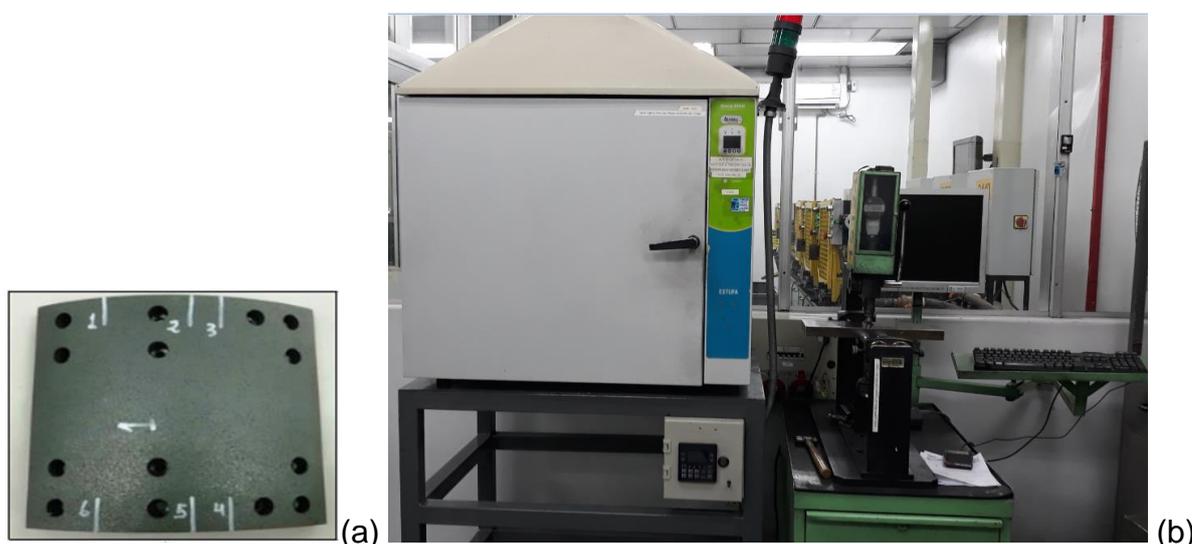
As propriedades de dilatação e crescimento são usualmente utilizadas nas avaliações de estabilidade térmica e dimensional de materiais de atrito, em função

do comportamento destas características na aplicação. Uma vez que não haja estabilidade térmica no material, a lona de freio pode sofrer deformações durante o uso, gerando transtornos ao usuário final, como, por exemplo, o travamento de rodas e superaquecimento do sistema de freio (Lamb, 2008 p. 37; Muller, 2017, p. 29-30),

Os ensaios de dilatação e crescimento, foram realizados conforme a norma SAE J160:2013. Esta norma determina a dilatação em função da temperatura, ou seja, a alteração temporária das dimensões exteriores do material de atrito devido à exposição a temperaturas elevadas, e a deformação permanente ocasionada pelo processo de aquecimento, denominado crescimento (Society of Automotive Engineers, 2013, p.1-10).

Neste ensaio, as espessuras das lonas de freio foram dimensionadas em 6 (seis) pontos específicos da peça (Figura 15a), com relógio comparador de precisão milesimal, em temperatura ambiente, antes do processo de aquecimento em estufa (Figura 15b). Os parâmetros do ciclo de aquecimento, rampa de aquecimento, temperatura e tempo, seguiram os parâmetros já indicados na etapa 2, para realização da ciclagem térmica (página 40). Com base nessas variações de espessura foram calculados os valores de dilatação e crescimento.

Figura 15. (a) Pontos de medição da peça para análise de dilatação e crescimento e (b) estufa e relógio comparador.

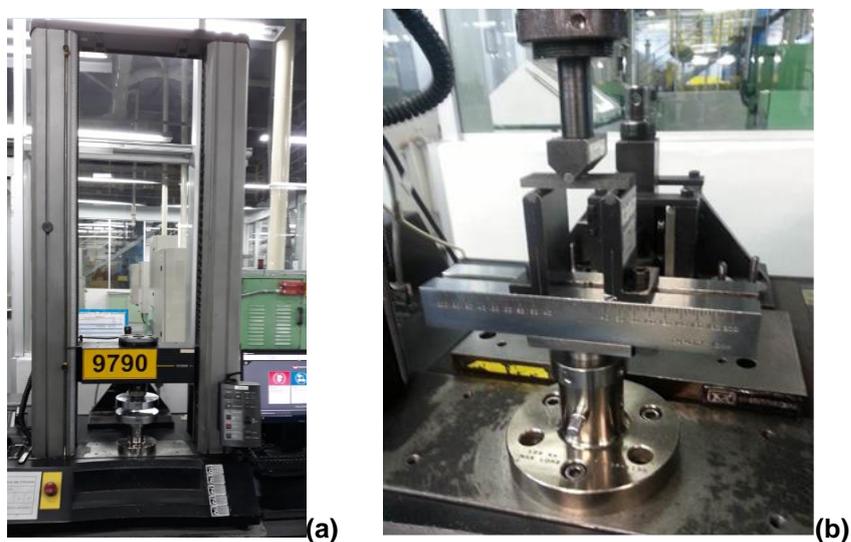


Extraído de: Fras-le 2019.

3.2.5 Resistência à Flexão

Para realização do ensaio de resistência à flexão a três pontos, em que se determina a resistência à flexão longitudinal de materiais de fricção, foi utilizada uma máquina universal de ensaio Instron modelo 5569 (Figura 16a). Os corpos de prova foram preparados com $70 \pm 0,2$ mm de comprimento, $25 \pm 0,1$ mm de largura e $6,4 \pm 0,1$ mm de espessura. Com o corpo de prova preparado, este foi posicionado sobre apoiadores, distantes 50 mm, e abaixo da ponteira do equipamento (Figura 16b), sofrendo pressão a uma velocidade de 1,2 mm/min, até o rompimento da amostra. O resultado foi expresso em resistência à flexão em N/mm² e obtido a partir da Equação 3.

Figura 16.(a) Máquina universal de ensaio e (b) corpo de prova posicionado para realização de teste.



Extraído de: Fras-le 2019.

$$\text{Resistência à Flexão} = \frac{\text{Força}}{\text{Largura} \times \text{Espessura}} \quad (3)$$

Sendo:

Resistência à flexão, em N/mm².

Força de ruptura do corpo de prova, em N.

Largura e espessura do corpo de prova, em mm.

3.2.6 Resistência ao impacto

Para determinação da resistência ao impacto, foi utilizado um equipamento de ensaio de impacto Ceast, modelo Resil 5.5, (Figura 17). O teste consistiu no posicionamento de um corpo de prova na morsa no centro do equipamento. Este possui um pêndulo em forma de “martelo” na extremidade externa, que foi posicionado com ângulo máximo de 10° . O pêndulo foi solto de uma altura conhecida, atingindo o corpo de prova anteriormente fixado. O *software* do equipamento fornece dos dados de energia (J) e resistência da amostra (kJ/m^2), sendo o resultado obtido seguindo a Equação 4.

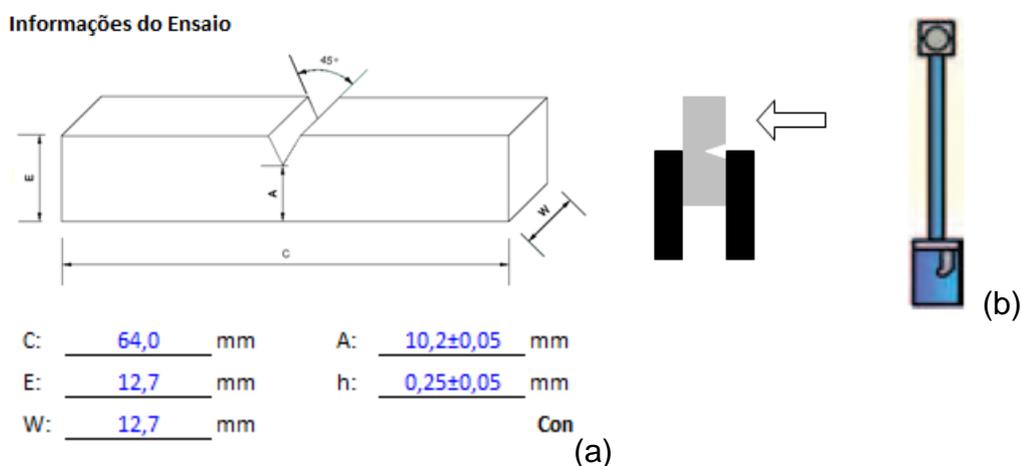
O corpo de prova foi preparado de acordo com as dimensões informadas na Figura 18. O método seguiu a norma ASTM D256-10 pelo método IZOD, (*American Society for Testing and Materials*, 2010), no qual é necessário fazer um pequeno entalhe centralizado no corpo de prova, para que as tensões no material se acumulem nesse ponto, minimizando as deformações plásticas e direcionando a fratura para a parte de posterior da amostra.

Figura 17. Equipamento para ensaio de resistência ao impacto.



Extraído de: Fras-le 2019.

Figura 18. (a) Dimensões do corpo de prova para ensaio de resistência ao impacto e (b) posicionamento do corpo de prova no equipamento.



Extraído de: Fras-le 2019.

$$\text{Resistência ao Impacto} = \frac{\text{Energia}}{A \times W} \quad (4)$$

Sendo:

Resistência ao impacto, em KJ/m².

Energia absorvida pelo corpo de prova, em KJ.

A a espessura abaixo de entalhe do corpo de prova, em m.

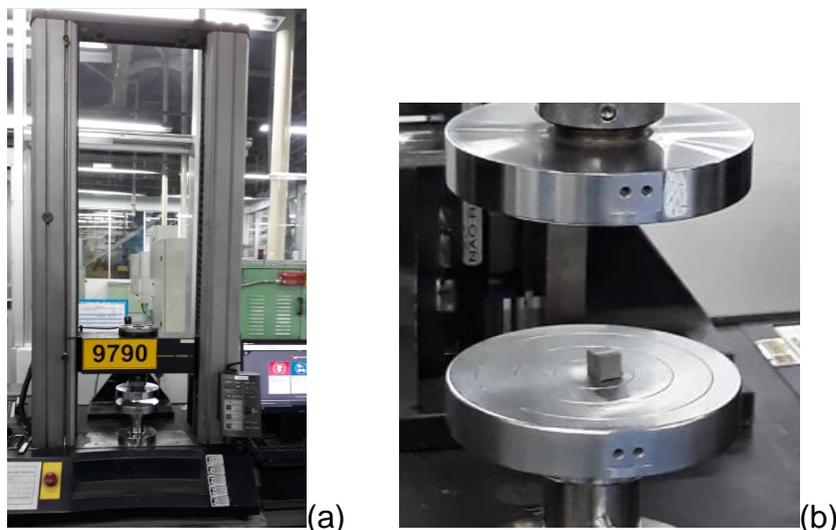
W a largura do corpo de prova, em m.

3.2.7 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado em uma máquina universal de ensaio Instron modelo 5569 (Figura 19a), com corpos de prova em formato de cubo com medidas de 12,7x12,7x12,7 mm³ (Figura 19b), removidos do material de fricção, no lado da superfície de contato durante a aplicação. O corpo de prova foi colocado entre duas placas de compressão rígidas, planas e paralelas, sendo aplicada uma força na direção normal ao plano horizontal, com velocidade de

5 mm/min até a ocorrência de fratura/ruptura. O resultado de resistência à compressão foi obtido a partir da Equação 5.

Figura 19. (a) Máquina universal de ensaio e (b) corpo de prova posicionado para realização de teste.



Extraído de: Fras-le 2019.

$$\text{Resistência à Compressão} = \frac{\text{Força}}{a \times b} \quad (5)$$

Sendo:

Resistência à compressão, em N/mm².

Força máxima exercida sobre o corpo de prova, em N.

a a lagura do copo de prova, em mm.

b o comprimento do corpo de prova, em mm.

3.2.8 Resistência ao cisalhamento interno

A resistência ao cisalhamento foi executada em uma máquina universal de ensaio Instron modelo 5569, com corpos de prova com medidas indicadas na Figura 20a. As amostras para o ensaio foram confeccionadas de modo a que ocorresse o cisalhamento em um plano paralelo à superfície de tensão em condições normais de uso. O corpo de prova foi montado em um dispositivo conforme Figura 20b e

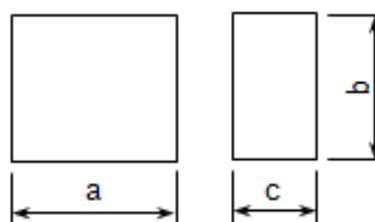
submetido à carga, até que houvesse ruptura. O método seguiu a norma NBR ISO 6311:2006. O resultado de resistência à compressão foi obtido a partir da Equação 6 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2006, p. 1-2).

Figura 20. (a) Dimensões corpo de prova e (b) dispositivo para realização do ensaio de resistência ao cisalhamento interno.

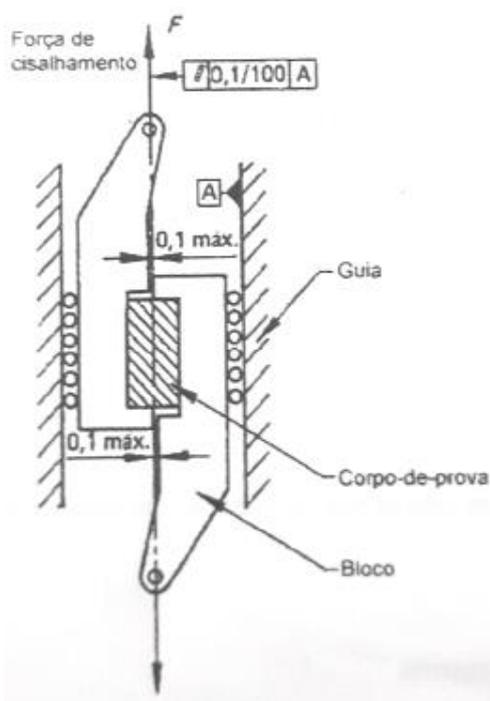
Informações do Ensaio

Dimensões do corpo de prova

a: 20,0 mm
b: 20,0 mm
c: 10,0 mm



(a)



(b)

Extraído de: NBR ISO 6311:2006 (2006, p2).

$$\text{Resistência ao Cisalhamento Interno} = \frac{\text{Força}}{a \times b}$$

(5)

Sendo:

Resistência ao Cisalhamento Interno, em N/mm².

Força máxima exercida até ruptura o corpo de prova, em N.

a a lagura do copo de prova, em mm.

b o comprimento do corpo de prova, em mm.

3.2.9 Análise termogravimétrica (TGA)

O ensaio de análise termogravimétrica (TGA) foi realizado a partir da retirada de 10 mg de amostra de uma lona de freio, com auxílio de uma broca. O material recolhido foi homogeneizado, peneirado com peneira de diâmetro de 0,59mm e inserido em um analisador termogravimétrico Perkin Elmer modelo STA 6000 (Figura 21), em temperatura ambiente. O equipamento foi programado para a rampa de aquecimento indicada na norma SAE J160:2013, 4°C/minuto até atingir 200°C. Ao finalizar o ensaio foi obtida a curva termogravimétrica, indicando a perda de massa da amostra em função da temperatura. A mesma amostra sofreu 4 repetições de aquecimento. Antes de iniciada nova análise, garantiu-se que a temperatura da amostra e do forno estivessem em temperatura ambiente.

Figura 21. Analisador termogravimétrico.



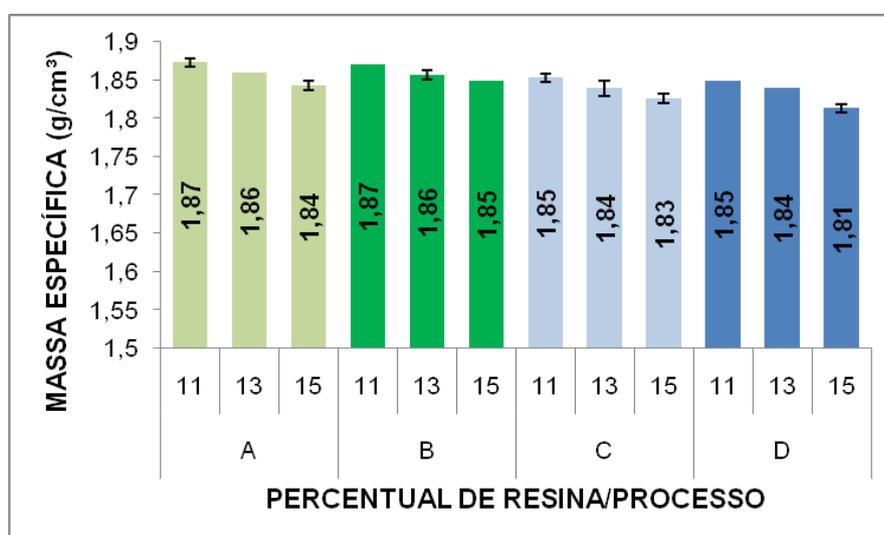
Extraído de: Fras-le 2019.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Avaliação 1

As Figuras 22 e 23 apresentam os resultados das análises de massa específica e dureza gogan, respectivamente, determinados nas amostras com diferentes percentuais de resina fenólica e processadas com as 4 combinações de tempo e temperatura no processo de pós-cura.

Figura 22. Variação da massa específica em função do teor de resina, tempo e temperatura de processamento.

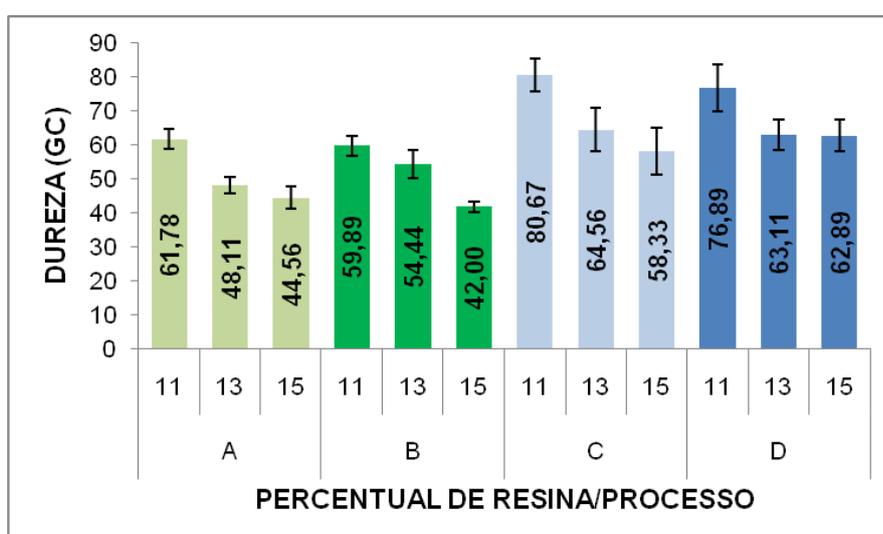


O resultado encontrado de massa específica corrobora com a estimativa teórica, pois, na preparação das misturas para as amostras foram alterados os percentuais de cargas minerais em relação à resina fenólica, que possui menor densidade. Logo, com o aumento da concentração desta no material, há uma redução na massa específica do produto acabado.

O incremento de tempo (processos AxB e CxD), não apresentou impacto na característica. O acréscimo da temperatura (processos AxC e BxD) resultou em uma leve redução nos valores de massa específica. Matté (2016, P, 59-60) verificou o

mesmo comportamento em estudos realizados com materiais de atrito aplicados em pastilhas de freio para automóveis. Este fato pode estar associado à maior emissão de voláteis durante o processamento. Trabalhos anteriores de avaliação do processo de cura da resina fenólica comprovaram que até 120 °C são liberados vapores de água e fenol, na faixa de 120 °C a 150 °C detecta-se a liberação de hexametenotetramina (HTMA) e acima de 170 °C é verificada a liberação de amônia (Artmann, Soares, Vasconcellos, 2003, p.10-12).

Figura 23. Variação da dureza em função do teor de resina, tempo e temperatura de processamento.



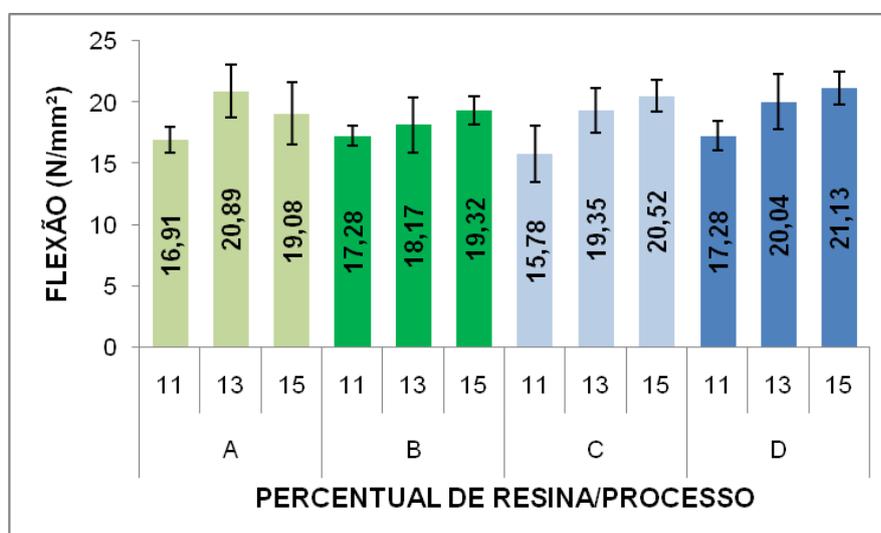
Nos testes de dureza gogan realizados, não foram verificadas alterações com a mudança no tempo (processos Ax B e CxD) de pós-cura, porém, evidenciou-se aumento da dureza com o acréscimo de temperatura (processos Ax C e BxD) e fato contrário foi constatado de acordo com o maior percentual de resina fenólica, ou seja, há uma redução. Estes valores estão associados, provavelmente, ao maior número de ligações cruzadas obtidos com o aumento do percentual de resina fenólica no material, maior quantidade de material ligante, e ao aumento de temperatura.

O ensaio de dureza gogan mede a compressibilidade do material de atrito e representa a sua rigidez e, de acordo com a escala, quanto menor for o valor da dureza maior será a rigidez do material. A dureza gogan não fornece resultados em

relação à mecânica do material, e sim verifica a consistência. Desta forma, constatou-se que o aumento do percentual de resina fenólica na formulação tornou o material de atrito mais rígido e o inverso ocorreu quando houve um aumento de temperatura. Zangiacomi e Bittencourt (2006, p. 59-60) evidenciaram que a dureza gogan está diretamente relacionada à composição do material. Canali (2002) e Matté (2016, 59-68) indicaram que esta também sofre interferência do processo produtivo.

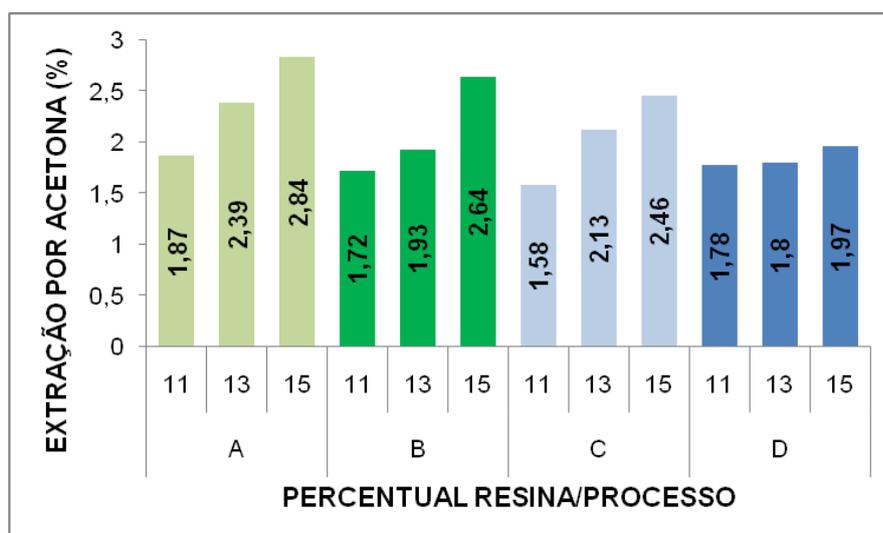
Os resultados dos ensaios de resistência à flexão e de extração por acetona estão apresentados nas Figura 24 e 25, respectivamente.

Figura 24. Variação da resistência à flexão em função do teor de resina, tempo e temperatura de processamento.



Analisando os resultados de resistência à flexão obtidos, foi possível identificar que não houve impacto na característica em função das alterações de tempo e temperatura utilizados no processo de pós-cura. Houve um aumento na resistência à flexão de acordo com o acréscimo do percentual de resina fenólica no material. Este aumento está relacionado com as características da resina fenólica, que possui a função de manter os demais materiais coesos, garantindo a integridade estrutural do produto sob carga térmica ou mecânica, além de possuir alta rigidez e resistências após o processo de cura.

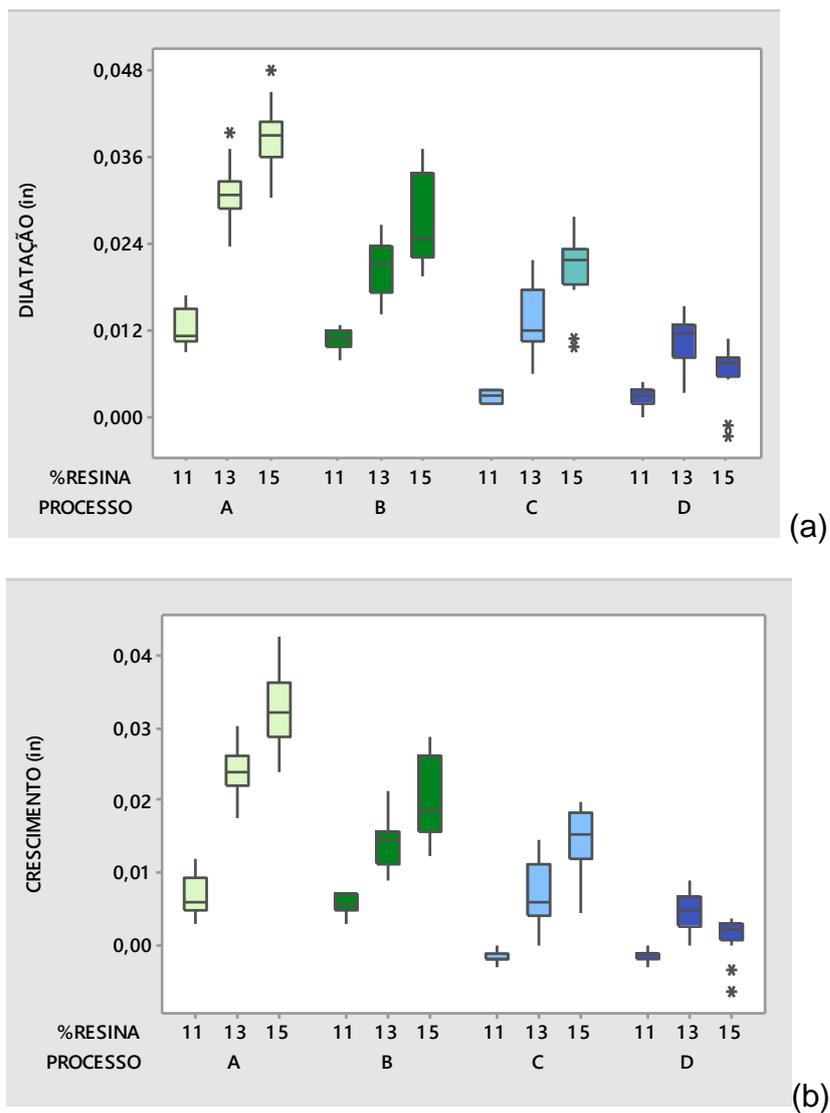
Figura 25. Dados de extração por acetona em função do teor de resina, tempo e temperatura de processamento.



Os dados obtidos nos ensaios de extração por acetona (Figura 25) identificaram que o aumento de ambos os parâmetros do processo de pós-cura, tempo e temperatura, apresentaram redução no percentual de orgânicos presentes no material. A combinação dos maiores valores de tempo e temperatura (processo D) gerou valores muito próximos, independente do percentual de resina fenólica utilizado nas misturas. Em todos os processos ficou evidenciada a maior dificuldade de cura, redução de orgânicos, de acordo com o acréscimo da quantidade de resina fenólica no material. Hentati *et al* (2014, p. 702-708) e Muller (2017, p. 50-64) também constataram em seus estudos que maiores tempos e temperaturas de processo garantem propriedades mais homogêneas no material, menor dispersão e menores quantidades de orgânicos no produto.

Na Figura 26, os resultados de dilatação (a) e crescimento (b), demonstraram a influência dos parâmetros tempo e temperatura de pós-cura. Com o aumento tanto do tempo quanto da temperatura, houve uma redução nos valores em ambas as características. Estes ensaios avaliam a estabilidade dimensional do produto quando expostos a altas temperaturas, desta forma, quanto mais baixos os valores obtidos nas medições das amostras, mais estável é o produto. O processo D, cuja combinação foi com maiores valores de tempo em temperatura, apresentou valores muito próximos em ambas às características para o três percentuais de resina fenólica avaliados e menor dispersão nos resultados.

Figura 26. Variação da (a) dilatação e (b) crescimento em função do teor de resina, tempo e temperatura de processamento.

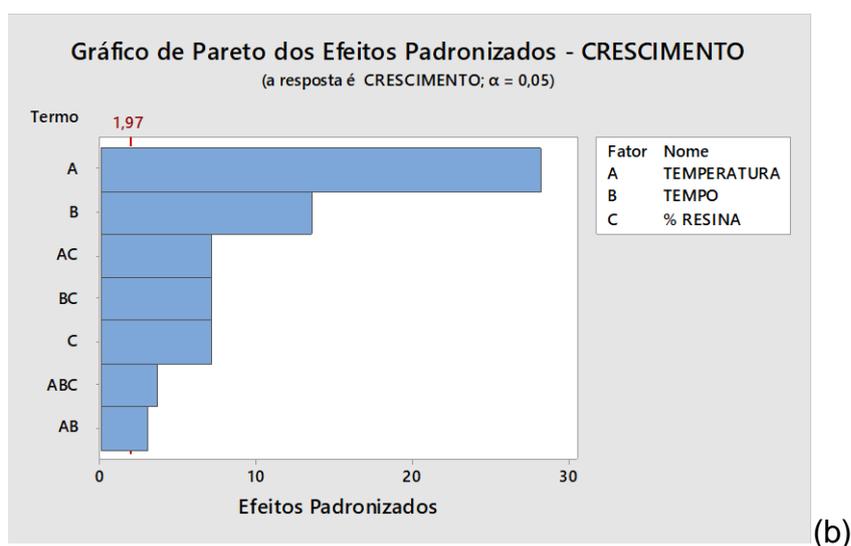
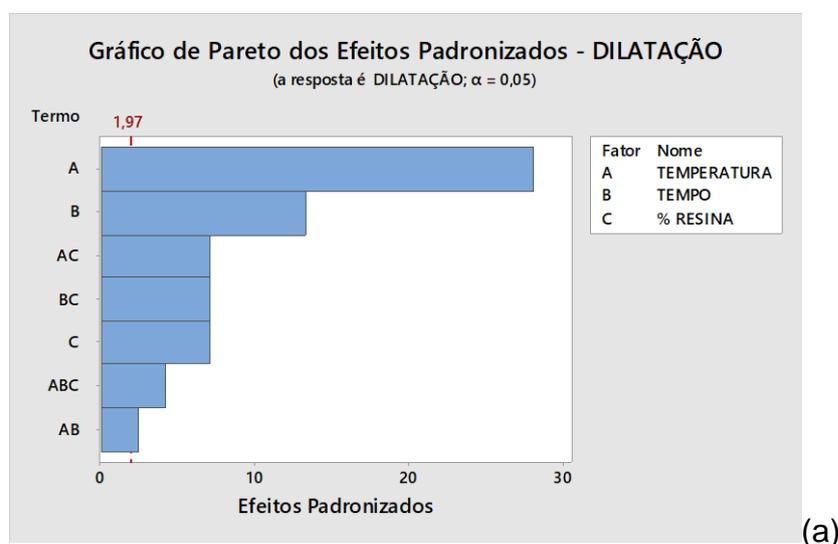


Comparando os processos A e B, é possível identificar a influência do tempo de pós-cura na dilatação e crescimento. Com o aumento deste houve queda nos resultados. Avaliando os processos A, B e C é possível identificar que quanto maior a concentração de resina fenólica no material, serão necessários maiores tempo e temperatura no processo de pós-cura para tornar o produto mais estável termicamente. Estes resultados corroboram com os dados observados no teste de extração por acetona, quando foi evidenciado maior grau de cura, maior conversão

de orgânicos, de acordo com o aumento dos parâmetros de tempo e temperatura de pós-cura.

Com objetivo de avaliar o impacto de cada parâmetro analisado e suas interações nas propriedades físicas dilatação e crescimento, com auxílio do software estatístico Minitab, foi desenhado um delineamento de experimentos (DOE) com os fatores de tempo, temperatura e percentual de resina fenólica estudados. A partir destes foi construído o gráfico de Pareto de Efeitos para ambas as características, apresentado na Figura 27 para dilatação (a) e crescimento (b).

Figura 27. Pareto dos efeitos padronizados para características (a) dilatação e (b) crescimento.

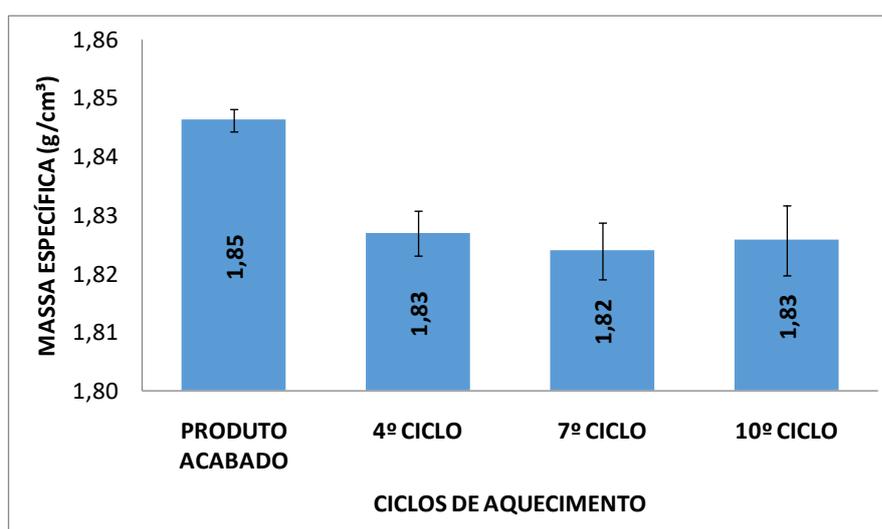


Analisando os gráficos de pareto de efeitos é possível identificar que todas as características avaliadas e suas interações apresentaram impacto nas propriedades dilatação e crescimento. Porém o fator temperatura foi o que apresentou maior efeito, comprovando, assim, os dados observados na Figura 26. A partir dos resultados observados nos ensaios de dilatação, crescimento e no gráfico de pareto de efeitos, foi possível afirmar que a temperatura apresenta maior efeito na estabilidade térmica e dimensional do produto, quando comparado ao tempo. Apenas o aumento da temperatura, em alguns casos, já permite tornar o produto mais estável dimensional e termicamente, possibilitando otimização de cura de materiais de atrito no processo de pós-cura sem necessidade obrigatória de alterações no tempo de processamento.

4.2 Avaliação 2

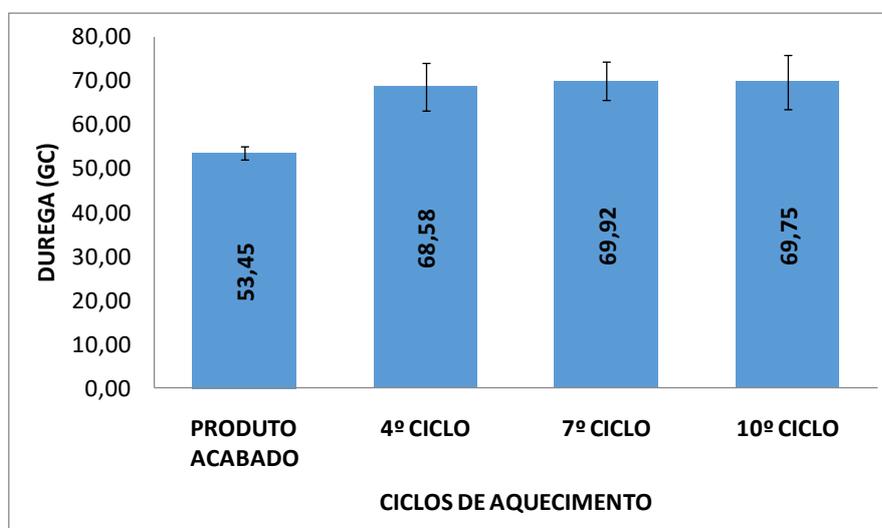
As Figuras 28 e 29 apresentam os resultados das análises de massa específica e dureza, respectivamente, determinados para as amostras produzidas com 13% de resina fenólica em sua composição. Estas amostras foram processadas em forno contínuo com os parâmetros do processo D (maiores tempo e temperatura avaliados) e, após finalizado o processamento, expostas a ciclos de aquecimento, a fim de avaliar as variações nas propriedades dos materiais de atrito quanto submetidos a cargas térmicas.

Figura 28. Variação da massa específica em função do número de ciclos de aquecimento.



Os resultados encontrados indicaram que houve uma ligeira redução nos valores de massa específica quando comparados o produto acabado e após a submissão aos ciclos de aquecimento. Um aumento no número de ciclos não levou a uma alteração posterior da massa específica, uma vez que nos 4º, 7º e 10º ciclos os valores mantiveram-se constantes. Este fato pode indicar que houve perda de massa nos primeiros ciclos de aquecimento. Estes resultados corroboram com os dados verificados na primeira avaliação e com Matté (2016, P, 59-60), nos quais foi possível identificar que com o acréscimo de temperatura há uma redução de massa específica causada pela perda de voláteis presentes no material de atrito.

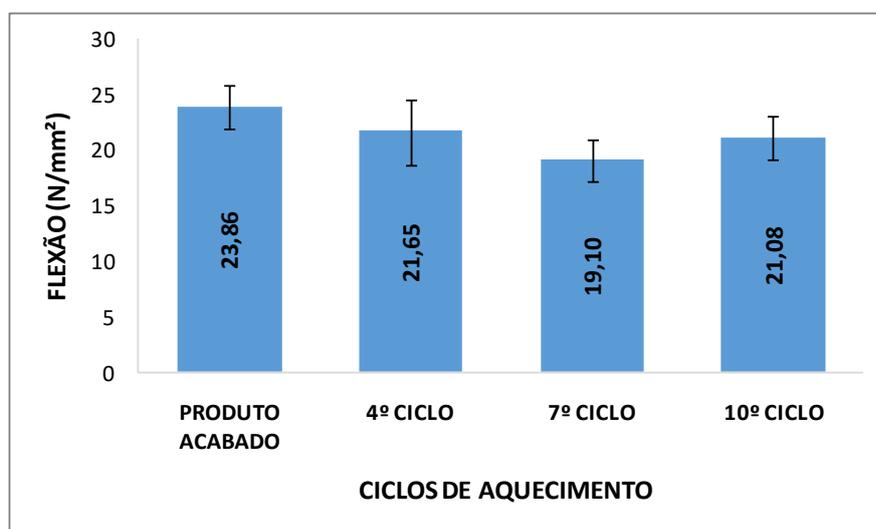
Figura 29. Variação da dureza em função do número de ciclos de aquecimento



Nos testes de dureza gogan realizados houve um aumento nos valores entre o produto acabado e o 4º ciclo. Já a partir do 4º ciclo, verifica-se valores médios e desvios padrão em faixas muito próximas. Como já mencionado anteriormente, quanto maior o valor de dureza, menor a rigidez da peça. Estes valores podem estar relacionados ao mesmo fenômeno observado na medição de massa específica, ou seja, liberação de voláteis e perda de massa a partir da exposição do produto acabado ao calor, tornando a peça mais “macia” e elevando os valores de dureza Gogan. Este mesmo comportamento também foi observado por Matté (2016, P, 59-61) em estudos realizados com dois diferentes materiais aplicados em pastilhas de freio, que utilizavam como ligante resina fenólica.

A Figura 30 apresenta os resultados de resistência à flexão obtidos nas avaliações.

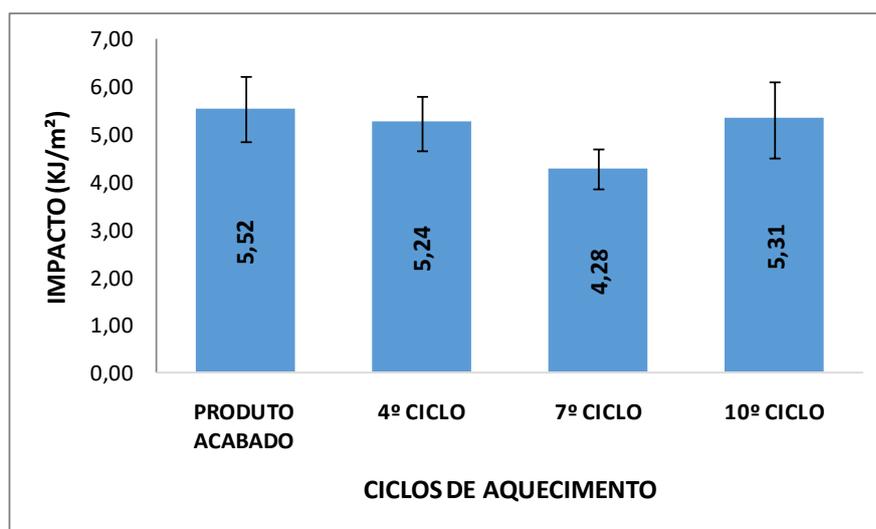
Figura 30. Variação da resistência à flexão em função do número de ciclos de aquecimento.



Analisando os resultados de resistência à flexão obtidos, é possível identificar que não houve grande impacto na característica em função da exposição do produto acabado aos diversos ciclos de aquecimento, indicando que o processo de pós-cura, como já identificado na primeira avaliação, não afetou esta propriedade mesmo nas simulações de aquecimento do produto. Houve uma variação entre as médias, porém, avaliando os desvios padrão indicados no gráfico, é possível identificar que as faixas estão muito próximas.

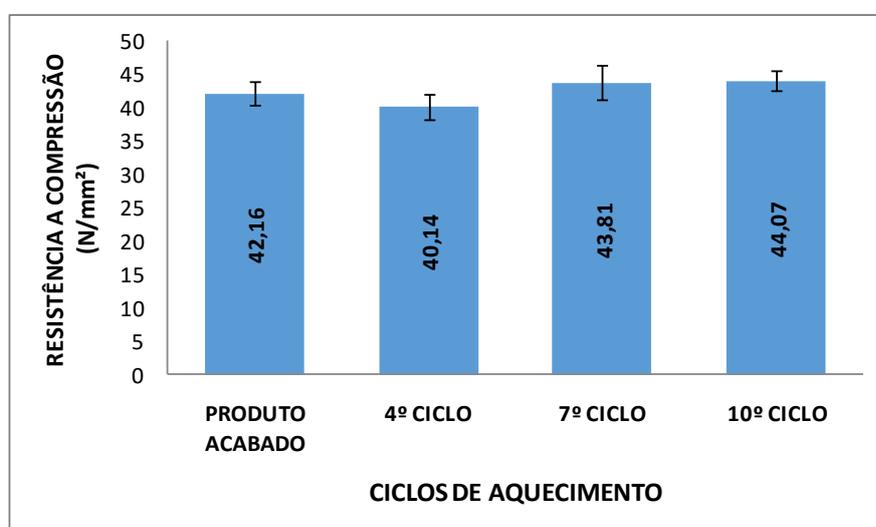
Na Figura 31 são apresentados os resultados dos testes de resistência ao impacto. A partir desta foi possível identificar um comportamento similar ao observado na resistência à flexão, variação nas médias. Porém, analisando os desvios padrão, os valores variaram dentro de faixas muito próximas, não sendo possível identificar interferência do aquecimento nesta característica.

Figura 31. Variação da resistência ao impacto em função do número de ciclos de aquecimento.



As Figuras 32 e 33 apresentam os resultados das análises de resistência à compressão e resistência ao cisalhamento, respectivamente, realizadas nas amostras submetidas aos ciclos térmicos.

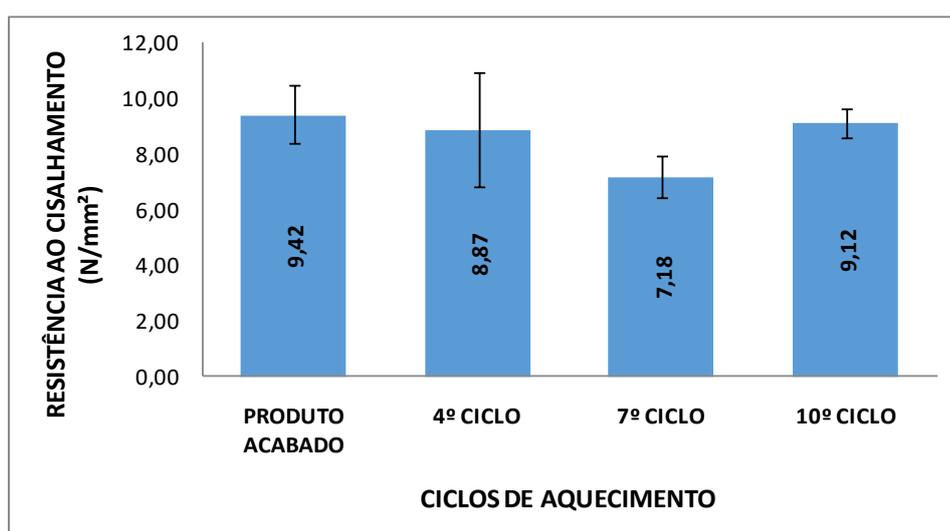
Figura 32. Variação da resistência à compressão em função do número de ciclos de aquecimento.



Analisando os resultados de resistência à compressão das amostras de lonas de freio expostas a diversos ciclos de aquecimento que foram processadas em forno

contínuo, foi possível identificar que não houve alteração na característica em função da carga térmica. As médias e desvios padrão constatados estão em faixas muito próximas em todas as análises. Desta forma, foi possível concluir que o cozimento realizado em forno contínuo não possui interferência nesta propriedade durante exposição do produto a cargas térmicas.

Figura 33. Variação da resistência ao cisalhamento em função do número de ciclos de aquecimento.

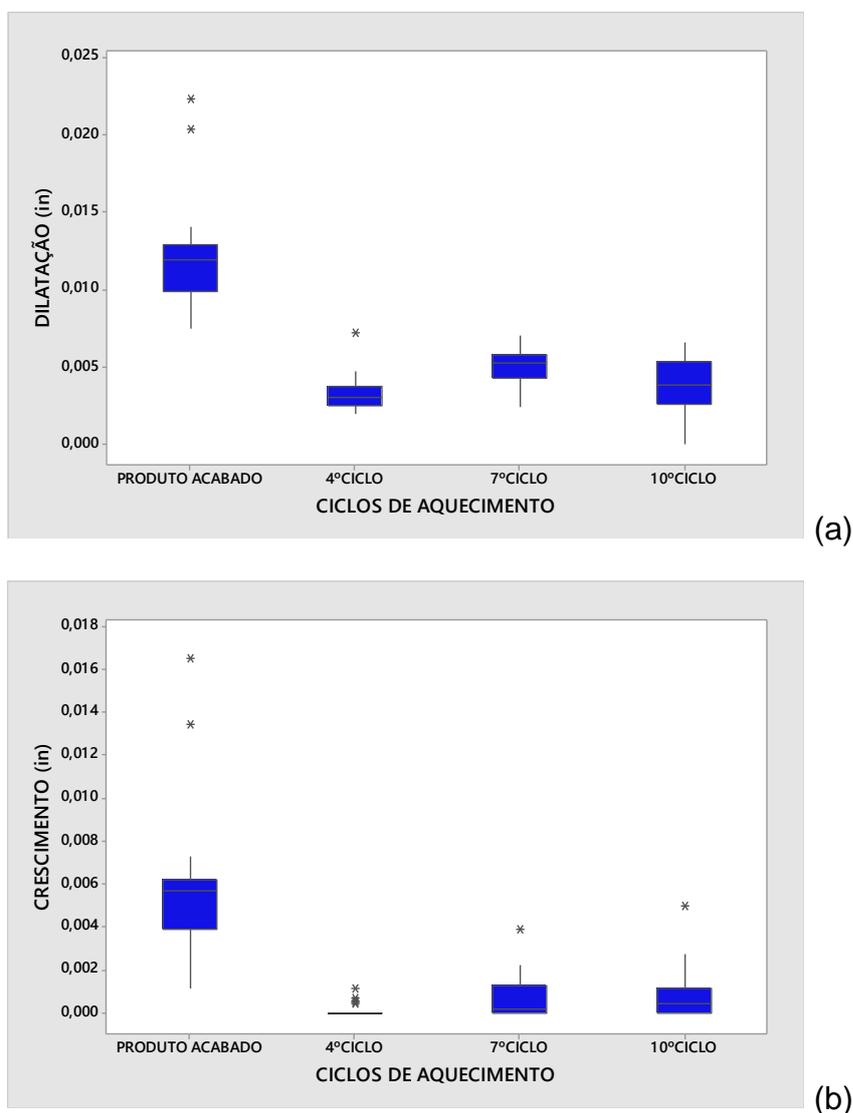


Com base nos resultados de resistência ao cisalhamento, foi possível identificar que não houve impacto significativo dos ciclos de aquecimento na propriedade. Houve uma variação nas médias, principalmente no 7º ciclo, porém, comparando o desvio padrão obtido em cada análise foram verificados valores oscilando em faixas similares.

É de extrema importância a análise do comportamento de propriedades mecânicas dos materiais de atrito, pois estes podem impactar significativamente na eficiência de frenagem. Caso os valores apresentados sejam muito baixos, pode ocorrer desgaste excessivo, quebra da lona durante aplicação, deslocamento ou deslocamento em função de redução na resistência da sede do rebite. Já se estes valores forem muito elevados pode ocorrer dificuldade no assentamento de lona e baixa eficiência de frenagem, além de desgaste excessivo do tambor (DFMEA, 2017, p1-45).

Na Figura 34 são apresentados os resultados de dilatação (a) e crescimento (b), demonstrando a influência de exposição a ciclos de carga térmica do produto acabado.

Figura 34. Variação da dilatação (a) e crescimento (b) em função do número de ciclos de aquecimento.



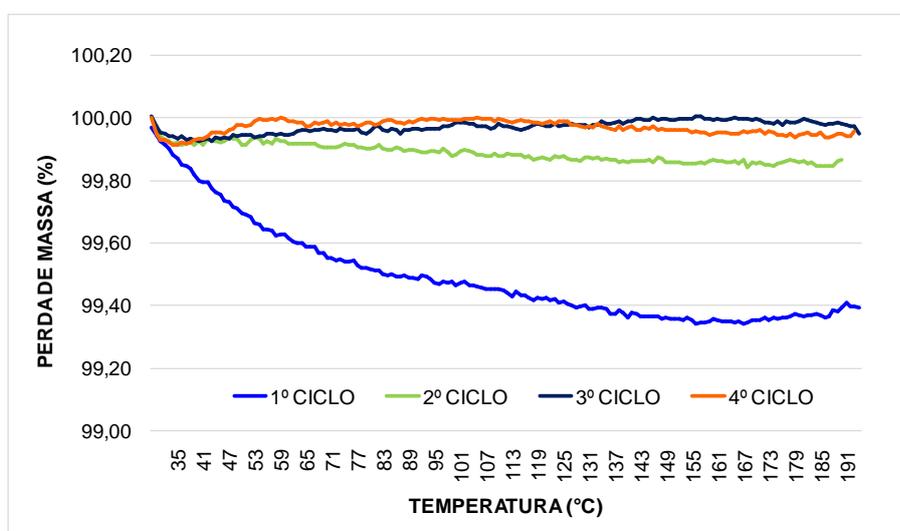
Analisando a Figura 34, foi possível identificar que tanto os valores de dilatação quanto os valores de crescimento foram mais elevados na primeira análise com o produto novo, indicando que a peça, apesar de ter passado pelo processo de pós-cura, ainda apresentou certa instabilidade dimensional quando exposta ao calor.

A partir destes resultados, pode-se afirmar que ainda haverá material orgânico da resina fenólica a ser curado.

Nesta avaliação é possível afirmar a importância do nível de cura adequado do material de atrito durante o processamento. Caso haja excesso de material orgânico não curado, poderá ocorrer inchamento da lona de freio durante aplicação, causando travamento de roda, superaquecimento do sistema e, no pior caso, geração e propagação de fogo para o veículo. A partir do 4º ciclo de aquecimento foi verificada estabilização nos valores de dilatação e crescimento, indicando cura completa de material.

A fim de identificar a perda de massa da lona de freio exposta à carga térmica, foram realizados ensaios de análise termogravimétricas (TGA), simulando os ciclos de aquecimento indicados na norma SAE J160:2013. A Figura 35 apresenta a análise de perda de massa do produto acabado até o 4º ciclo de aquecimento, visto que a partir deste foi verificada estabilização nos resultados de dilatação e crescimento.

Figura 35. Análise termogravimétrica em função do número de ciclos de aquecimento.



Analisando os dados da Figura 35, foi possível identificar que a maior perda de massa ocorre no 1º ciclo de aquecimento (0,550%), indicando que a maior parte do percentual de material ligante não curado degradou neste ciclo. Nos demais

ciclos, a perda de massa se tornou muito próxima, sendo 0,117%, 0,057% e 0,021% nos 2º, 3º e 4º ciclo, respectivamente.

A partir destes resultados, pode-se identificar que, caso não haja cura suficiente da resina fenólica durante o processo de produção, esta irá reagir no aquecimento durante uso gerando deformação ou instabilidade dimensional no produto acabado no início da vida útil. A análise de TGA em materiais de atrito pode auxiliar durante o processo de otimização de pós-cura, visto que foi possível identificar a perda de massa orgânica não curada nos ensaios realizados.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nas características massa específica e dureza gogan foi possível concluir que há influência da temperatura do processo de pós-cura e do percentual de resina fenólica utilizado no material de atrito. A elevação da temperatura gerou ligeira redução nos valores de massa específica e aumento da dureza gogan. O acréscimo do teor de resina fenólica no material gerou queda em ambas as características. O parâmetro tempo não gerou alterações significativas nestas propriedades.

Nos valores de resistência à flexão obtidos nos testes não foram evidenciadas mudanças de acordo com os parâmetros do processo de pós-cura avaliados. Porém, o acréscimo no percentual de resina fenólica causou aumento no índice de resistência à flexão.

Os dados de extração por acetona indicaram que os parâmetros de pós-cura impactaram no teor de orgânico e, tanto o acréscimo no tempo quanto na temperatura, proporcionaram percentuais menores de material não curado. O processo D apresentou os menores valores e muito próximos para todos os percentuais de resina fenólica avaliados, indicando maior nível de cura, independentemente da quantidade de resina fenólica. O acréscimo no teor de resina fenólica resultou em maior quantidade de orgânicos não curados ainda presentes no produto após o processamento, quando se compara um mesmo processo de pós-cura.

Nas características dilatação e crescimento foi identificada interferência de ambos os parâmetros de pós-cura. Com o aumento do tempo e da temperatura houve redução nos valores encontrados, mostrando que com a elevação destes parâmetros, mais estável termicamente ficará o produto acabado. O aumento da temperatura gerou maior impacto nas propriedades de dilatação e crescimento proporcionando menor variação dimensional quando o produto foi exposto a altas temperaturas. Isso foi comprovado a partir do Pareto de Efeitos.

O acréscimo do teor de resina fenólica elevou também os valores de dilatação e crescimento, indicando maior dificuldade para tornar o produto estável dimensional

e termicamente. O processo D testado apresentou valores muito próximos em ambas as características, independente do teor de resina fenólica.

Com base nos resultados obtidos foi possível afirmar que no processo de pós-cura a temperatura apresenta maior efeito, em relação ao tempo, quando objetivo é a estabilidade térmica e dimensional do produto. Em muitos casos, o processo de pós-cura pode ser otimizado apenas com alterações na temperatura, evitando assim aumento de tempo de processo que impactaria de forma mais significativa no custo do produto. O percentual de resina fenólica utilizado no produto deve ser analisado durante a definição destes parâmetros. Porém, para que estas alterações sejam benéficas, todas as demais características do produto devem ser avaliadas.

Analisando o impacto do processo de pós-cura durante aquecimento na aplicação (ciclagem térmica), foi possível identificar que ainda houve uma variação do produto nas características massa específica, dureza gogan, dilatação e crescimento. Estas variações podem estar relacionadas, assim como identificado na primeira avaliação, à finalização do processo de cura da resina fenólica. Quanto maior a presença de orgânicos da resina fenólica não curados durante o processamento do produto, maior o impacto durante aplicação e exposição em temperatura. Desta forma, deve ser garantido o nível de cura adequado do material de atrito durante o processo produtivo.

Já nas características mecânicas de resistência à flexão, compressão, resistência ao impacto e cisalhamento não foram identificadas variações do produto processado em forno contínuo, para realização de processo de pós-cura, quando submetido à temperatura durante aplicação.

Feitas estas análises, foi possível identificar que o processo de pós-cura em forno contínuo para materiais de atrito aplicados em veículos comerciais pode ser utilizado para finalização da cura de resina fenólica e estabilização térmica do produto.

5.1 Contribuição do trabalho

A partir dos resultados evidenciados no estudo em lonas de freio aplicadas em veículos comerciais, foi possível identificar que:

- ✓ O processo de pós-cura pode ser otimizado, em muitos casos, apenas com alterações na temperatura do processo de pós-cura, evitando assim aumento de tempo de processo, que impacta de forma mais significativa no custo do produto;
- ✓ O percentual de resina fenólica utilizado no produto deve ser analisado durante a definição dos parâmetros de processo;
- ✓ Elevados tempos e temperatura de processo podem apenas agregar custos ao produto, sem impactos na característica de estabilidade térmica;
- ✓ Devem ser controlados/garantidos os parâmetros de processo de pós-cura especificado durante o processamento, para proporcionar ao produto estabilização dimensional e térmica, bem como evitar alterações nas propriedades massa específica, dureza, dilatação e crescimento durante exposição do material em temperatura.

5.2 Possibilidades de trabalhos futuros

Poucos trabalhos foram encontrados na literatura sobre o assunto pós-cura de materiais de atrito aplicados em veículos comerciais. Desta forma, como sugestão de trabalhos futuros, é possível citar:

- Avaliação da relação entre as propriedades tribológicas do material de atrito em função da variação dos percentuais de resina fenólica e dos parâmetros tempo e temperatura utilizados no processo de pós-cura;
- Avaliação do impacto dos processos de pós-cura e do percentual de resina fenólica presente em materiais de atritos, com análise detalhada das incertezas de medição nas características avaliadas;
- Desenvolvimento de estudo comparativo entre processos de pós-cura realizados em fornos estacionários e fornos contínuos, avaliando o comportamento do produto a partir de variações nos parâmetros tempo ou temperatura e quantidade de resina presente no material;
- Avaliação do impacto na característica dilatação e crescimento dos parâmetros de pós-cura e quantidade de resina fenólica, em diferentes bases de materiais de atrito aplicados em veículos comerciais, buscando desenvolver modelo matemático que auxilie em otimização de processos e desenvolvimento de produtos.

REFERÊNCIAS

ABREU, M. M. S. P.; SHIGUE, C. Y.; OLIVEIRA, P. C.; ROBIN, A. L. M.; BALDAN, C. A.; RUPPERT, E. F. Determinação dos estágios de gelificação e de vitrificação na cura de um sistema epóxi-amina por análise dielétrica e dinâmico-mecânico. **9º Congresso Brasileiro de Polímeros**, Paraíba, outubro, 2007.

ALEKSENDRIC, D.; SENATORE, A. Optimization of manufacturing process effects on brake friction material wear. **Journal of Composite Materials**, v. 46, n. 22, p. 2777–2791, novembro, 2012.

ARTMANN, Albertina. **Estudo para otimização do processo de formulações de resina fenólica**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-graduação em Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2008.

AMARAL, Lucas. **Análise numérica da influência de defletores de ar no resfriamento de freios a tambor**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Automotiva) – Departamento de Engenharia Automotiva, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

ARTMANN, A.; SOARES, M.R.; VASCONSELLOS, M.A.Z. Thermal characterization of phenolic resin using TGA/TF-IR. **58º Congresso Anual da associação Brasileira de Metalurgia e Materiais**, Rio de Janeiro, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D256-10**: Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. United States of America: ASTM, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5520**: Determinação de dureza Gogan de materiais de fricção tipo orgânico para sistemas de freios. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5544**: Determinação da densidade relativa para guarnições da embreagem e do freio. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 6311**: Resistência interna ao cisalhamento do material de atrito. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

BAKLOUTI, M.; ELLEUCH, E.; CRISTOL, A.; NAJJAR, D.; DESPLANQUES, Y. Relationships between the heterogeneous microstructure, the mechanical properties

and the braking behaviour of an organic brake lining material. **Journal Automobile Engineering**, n. 227, n. 4, p. 549-560, abril, 2013.

BIJWE, J.; NIDHI, B.; MAJUMDAR, N.; SATAPATHY, B. K. Influence of modified phenolic resins on the fade and recovery behavior of friction materials. **Wear**, v. 259, n. 7-12, p. 1068–1078, julho-agosto, 2005.

BIJWE, J. Composites as friction materials: recent developments non-asbestos fiber reinforced friction materials - a review. **Polymer Composites**, v. 18, n. 3, p. 378-396, junho, 1997.

BREZOLN, André. **Estudo de geração de trincas térmicas em discos de freio de veículos comerciais**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-graduação em Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2007.

CAI, P.; WANG, Y.; WANG, T.; WANG, Q. Effect of resins on thermal, mechanical and tribological properties of friction materials. **Tribology International**, v. 87, p. 1–10, julho, 2015.

CAIRO, ALBERTO A. A. **Desenvolvimento de um sistema de proteção antioxidante para compósito carbono-carbono**. 1998. Tese (Doutorado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

CALLISTER, W. D. JR. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CANALI, Ricardo J. **Determinação de propriedades físicas de diferentes materiais para discos e pastilhas de freio e relação destas propriedades com ruído**. 2002. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

CAPELOZZI, Vera L. Asbestos, asbestose e câncer: critérios diagnósticos. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 27, n. 4, p. 206-218, julho-agosto, 2001.

CASARIL, Alexandre. **Modelagem matemática e avaliação experimental do módulo de elasticidade de materiais compósitos particulados de matriz fenólica para uso em material de fricção**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

CHAN, D.; STACHOWIAK, G. W. Review of automotive brake friction material, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. **Journal of Automobile Engineering**, v. 218, n. 9, p. 953-965, setembro, 2004.pós

CHIARONI, Alexandre B. **Análise térmica de um sistema de freio a tambor para rodas traseiras de veículos de passeio**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

CTB, Resinas fenólicas. Disponível em: <<https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/materias-primas/agentes-de-pegajosidade/tipos-agentes-de-pegajosidade/resinas-fenolicas/>>. Acesso em: 02 fev 2020.

DFMEA. **Design Failure Mode and Effect Analysis: Commercial Brake Linings Family (Blocks)**. Fras-le, n. 000001-FSA. 2017.

eCycle. Entenda o que são resinas fenólicas. 2019. Disponível em:<<https://www.ecycle.com.br/component/content/article/67-dia-a-dia/5809-entenda-o-que-sao-as-resinas-fenolicas.html>> Acesso em: 06 out 2019.

ERIKSON. Mikael. **Friction and contact phenomena of disc brakes related to squeal**. 2000. Dissertations – Faculty of Science and Technology, Acta Universitatis Upsaliensis, Uppsala, 2000.

ERTAN, R.; YAVUZ, N. An experimental study on the effects of manufacturing parameters on the tribological properties of brake lining materials. **Wear**, v. 268, n. 11-12, p. 1524–1532, maio, 2010.

FONTES, Raphael S. **Compósito polimérico híbrido: comportamento mecânicos, descontinuidade geométrica e resistência residual**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

FINIMUNDI, Andréia Vanessa. **Influência do abrasivo utilizado no jateamento de ferragem de freio estacionário na aderência do material de atrito**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2009.

GARDZIELLA, A.; PILATO, L.A.; KNOP, A. **Phenolic resins: chemistry, applications, standardization, safety and ecology**. 2nd edition, Heidelberg, Germany: Springer – Berlin Verlag, 2000.

HENTATI, N.; KCHAOU M.; CRISTOL, A.; NAJJAR, D.; ELLEUCH, R. Impact of post-curing duration on mechanical, thermal and tribological behavior of an organic friction material. **Materials and Design**, v. 63, p. 699-709, novembro, 2014.

HO, S. C.; LIN, J. H. C.; JU, C. P. Effect of fiber addition on mechanical and tribological properties of a copper/phenolic-based friction material. **Wear**, v. 258, n. 5-6, p. 861-869, fevereiro, 2005,

KIM, S. J.; KIM, K. S.; JANG, Ho. Optimization of manufacturing parameters for a brake lining using Taguchi method. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 136, n. 1-3, p. 202-208, maio, 2003.

LAMB, Ricardo G. **Estudo do comportamento de desgaste de materiais de atrito em função de variáveis de aplicação**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-graduação em Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2008.

LIMPERT, R. **Brake Design and Safety**. Warrendale / USA: Society of Automotive Engineers, 1999.

LIVRAMENTO, Bruno S. 2017, **Bancada de teste para análise de conceito de atrito entre disco e pastilha de freio**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

LUCAS, E. F.; SOARES, B. G.; MONTEIRO, E. E. C. **Caracterização de polímeros – determinação de peso molecular e análise térmica**. Rio de Janeiro: Ed. E-papers, 2001.

MATTÉ, Daniel. **Aplicação de planejamento experimental na otimização de pós-cura de pastilhas de freio em forno contínuo**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2016.

MAXWELL, Materiais compósitos. 2020. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/15391/15391_3.PDF>. Acesso em: 27 set 2020.

MENETRIER, Ademir Reus. **Estudo de variáveis de composição e processo para controle de compressibilidade**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-graduação em Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2006.

MOTHÉ, C. G.; AZEVEDO, A. D. **Análise térmica de materiais**. São Paulo: Ed. Artliber Ltda, 2009.

MULLER, Micael Gonçalves. **Influência do processo de cozimento em forno contínuo nas propriedades físicas, mecânicas e de desempenho de material de atrito para lonas de freios automotivos**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2017.

NICHOLSON, G. **Facts About Friction: A friction material manual almost all you need to know about manufacturing**. Winchester/USA: P&W price Enterprises, Inc., 1995.

OLIVEIRA Adriane Machado. **Estudo da correlação entra as principais variáveis de processo de um misturador interno e as propriedades mecânicas de um composto elastomérico**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade de Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PASCAULT, J. P; VERDU, J.; WILLIAMS, R. J. J. **Thermosetting Polymers**. New York/USA: Marcel Dekker, Inc., 2002

RESENDE, J. M.; OLIVEIRA, F. L.; MULINARI, D. R. Avaliação de compósitos híbridos para aplicações em Engenharia. **Cadernos UniFOA**, n. 15, p. 11-18, abril, 2011.

ROCHA, Bárbara P.; ALBERTON, Henrique B. de S.; OLIVEIRA, Luisa B. Frenagem Regenerativa. Escola de Engenharia. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014. Disponível em:<<http://www.ufrgs.br/projenergia3/projetos/trabalhos-2014/trabalhos-2014-2/GRUPOB.pdf>>. Acesso em: 13 jan 2020.

SANTOS, Alessandra M.; CALADO, Verônica M. A.; PEÇANHA, Ricardo P. Estudo do ciclo de cura de resinas fenólicas tipo resol. **9º Congresso Brasileiro de Polímeros**, Paraíba, outubro, 2007.

SATAPATHY, Bhabani K.; BIJWE, Jayashree. Composite friction materials based on organic fibres: sensitivity on friction and wear to operating variables. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 37, n. 10, p. 1557-1567, outubro, 2006.

SCALDAFERRI, Cristiane Almenida. **Síntese de resinas fenólicas a partir de ligninas geradas nos processos de produção de bioetanol e de papel e celulose**. 2015. Dissertação (Mestrado em Química) – Programa de Pós-graduação em Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

SEMCO, Tecnologie em Equipamentos. Disponível em: <<https://semcoequipamentos.com.br/equipamentos/>>. Acesso em: 04 out 2020.

SILVA, Anderson Lima. **Avaliação da influência da taxa de carregamento da pressão durante a moldagem a quente nas propriedades mecânicas de uma lona de freio**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2013.

SILVA, Luiz Rafael Coelho. **Caracterização de superfície de frenagem do tambor de freio de veículos comerciais após ensaio em dinamômetro**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2013.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. *SAE J160: Swell, Growth and dimensional Stability of Friction Materials and Noise Insulators when Exposed to Elevated Temperatures*. Estados Unidos: SAE International, 2013.

UDALL, Morris k.; STEVENS, Ted. **Advanced desing Materials: new structural materials technologies**. Congress of the U.S., Office of Technology Assessment, 1988.

VARGAS, Eduardo M. **Influência do tratamento superficial utilizado em plaquetas metalizas de freio na aderência do material de atrito**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2012.

VENTURA, Ana Mafalda F. M. Os compósitos e sua aplicação na reabilitação de estruturas. **Ciência e Tecnologia dos Materiais**, v. 21, n. 3-4, p. 10-19, julho, 2009.

VILANOVA, Carolina. Pastilhas: Frenagem sob controle. **O Mecânico**, São Paulo, ago. 2015. Disponível em: <<https://omecanico.com.br/frenagem-sob-controle/>>. Acesso em: 26 jul 2020.

XIAO, G.; ZHU, Z. Friction materials development by using DOE/RSM and artificial neural network. **Tribology International**, v. 43, n. 1-2, p. 218-227, janeiro-fevereiro, 2010.

ZHAO, L. G.; WARRIOR, N. A.; LONG, A. C. A micromechanical study of residual stress and its effect on transverse failure in polymer–matrix composites. **International Journal of Solids and Structures**, v. 43, n. 18-19, p. 5449-5467, setembro, 2006.

ZANGIACOMI, M. H.; BITTENCOURT, E. Compósitos poliméricos reforçados com fibras de PANox e fibras aramida. **Ciência e Engenharia**, v. 15, n. 1-2, p. 55-61, janeiro-dezembro, 2006.

WOLFRUM, J.; EHRENSTEIN, G. W. Interdependence Between the Curing, Structure, and the Mechanical Properties of Phenolic Resins. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 74, n. 13, p. 3173-3185, outubro, 1999.