

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA AUTOMOTIVA

VICTOR ALMEIDA COTTA BARBOSA

A INFLUÊNCIA DO PROCESSO PRODUTIVO NA QUALIDADE FINAL DE  
PASTILHAS DE FREIO AUTOMOTIVA

Joinville

2017

VICTOR ALMEIDA COTTA BARBOSA

A INFLUÊNCIA DO PROCESSO PRODUTIVO NA QUALIDADE FINAL DE  
PASTILHAS DE FREIO AUTOMOTIVA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, no curso de Engenharia Automotiva da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Dr. Thiago Antonio Fiorentin

Joinville

2017

VICTOR ALMEIDA COTTA BARBOSA

A INFLUÊNCIA DO PROCESSO PRODUTIVO NA QUALIDADE FINAL DE  
PASTILHAS DE FREIO AUTOMOTIVA

Esta Monografia foi julgada e aprovada como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 29 de junho de 2017.

Banca Examinadora:

---

Dr. Thiago Antonio Fiorentin  
Orientador

---

Dr. Alexandre Mikowski  
Membro

---

Dr. Lucas Weihmann  
Membro

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu professor e orientador por toda ajuda, paciência e dedicação que foram essenciais para a realização deste trabalho e formação como acadêmico.

Agradeço principalmente aos meus pais e irmão, por sempre me apoiarem e incentivarem em todas as minhas escolhas e sem eles minha trajetória neste curso não seria possível.

Agradeço a minha namorada por sempre estar ao meu lado e me ajudar incondicionalmente, me apoiando nos momentos difíceis desta trajetória.

Agradeço especialmente a empresa Fremax, que me auxiliou e proporcionou recursos para que os testes fossem possíveis de serem concluídos com êxito.

*“Do mesmo modo que o metal enferruja com a ociosidade e a água parada perde a sua pureza, assim a inércia esgota a energia da mente. ”*

*( Leonardo da Vinci )*

## RESUMO

O presente trabalho enfatiza a importância do controle do processo produtivo na qualidade final do produto, mostrando os resultados em termos práticos através de comparações entre pastilhas de freio do mercado de reposição e as que vem originalmente no veículo, mensurando-os a partir de ensaios mecânicos de cisalhamento e dureza. Geralmente, quando em situações de emergência, o motorista é obrigado a acionar o pedal de freio de forma abrupta, pressionando as pastilhas contra o disco para gerar a força de frenagem. A força aplicada na pastilha de freio para frear o veículo deve ser no mínimo três vezes maior que a força de aceleração do mesmo. Para suportar tamanha pressão, é imprescindível que a mistura da massa de atrito seja composta pelos ingredientes corretos, além de estar devidamente compactada. Além disso, é importante que a massa de atrito não descole da plaqueta, pois, caso contrário, não ocorreria frenagem. Nesse trabalho, os testes foram realizados utilizando pastilhas de freio OEM e do mercado de reposição, testadas no próprio ambiente fabril com máquinas especializadas. Através dos dados obtidos foi possível explicar a importância de ter um processo produtivo controlado, bem como mostrar os possíveis efeitos devido a variações na produção. Os dados dos testes internos foram compilados e comparados com os resultados advindos do laboratório externo para o item OEM.

**Palavras-chave:** Frenagem. Pastilha de freio. Massa de atrito.

## **ABSTRACT**

This paper emphasizes the importance of the productive process control in the final product quality, showing the practical results through comparisons between original and replacement braking pads, measuring them by stress and hardness tests. Usually, in emergency situations, the driver presses roughly the brake pedal, pressing the brake pads against the brake disc to generate the braking of the car. The force applied in the brake pad must be at least three times higher than the acceleration one. Thus, to support such pressure, it is imperative that the mix of the friction mass be composed by the correct ingredients in addition to being well compressed. Also, this friction mass must not paste off the backing plate, because, otherwise, an accident could happen. The tests were performed using OEM and replacement braking pads, tested in the own manufacturing environment. Through the data collected, it was possible to explain the criticality of having a controlled manufacturing process, as well as the results if machine parameters were modified. After all, the results of the internal and lab tests were compared.

**Keywords:** Braking. Brake Pad. Friction mass.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema de freio hidráulico com freio a disco na dianteira e tambor na traseira .....	17
Figura 2 - Pedal de freio com acionamento mecânico .....	18
Figura 3 - Pedal de freio com acionamento hidráulico .....	19
Figura 4 - Sistema <i>Power Brake</i> .....	20
Figura 5 - Seção de um servo freio: bloco hidráulico a depressão.....	21
Figura 6 - Cilindro mestre de metal e de plástico .....	22
Figura 7 - Composição de um freio a tambor .....	23
Figura 8 - Funcionamento de um freio a tambor .....	24
Figura 9 - Obtenção do fator de frenagem dos tambores.....	25
Figura 10 - Freios a tambor de setores autocentradores .....	26
Figura 11 - Freios a tambor de setores comprimidos .....	27
Figura 12 - Freios a tambor de compressão automática .....	28
Figura 13 - Principais componentes de um freio a disco.....	29
Figura 14 - Freios a disco: (a) de pinça fixa; (b) de pinça flutuante.....	29
Figura 15 - Partes de um disco de freio .....	30
Figura 16 - (a) Disco de freio sólido (b) Disco de freio ventilado.....	31
Figura 17 - Corte transversal do disco de freio (a) sólido e (b) ventilado .....	31
Figura 18 - Discos de freios especiais.....	32
Figura 19 - Disco de freio perfurado e ranhurado.....	33
Figura 20 - Conjunto lona de freio e sapata de freio .....	34
Figura 21 - Componentes da pastilha de freio.....	35
Figura 22 - Reação química da resina .....	41
Figura 23 - Alto coeficiente de atrito em relação à umidade do ar .....	45
Figura 24 - Baixo coeficiente de atrito em relação à umidade do ar.....	45
Figura 25 - Máquina de estampagem das chapas de aço.....	48
Figura 26 - Misturador da composição de atrito .....	48
Figura 27 - Máquina de pré-moldagem .....	49
Figura 28 - Material de atrito compactado .....	49
Figura 29 - Máquina de termoprensagem .....	50
Figura 30 - <i>Blank</i> pré-moldado .....	53
Figura 31 - Desenho técnico do molde.....	54



Figura 32 - Separação, identificação e alojamento das pastilhas fabricadas .....	56
Figura 33 – Medição de Dureza Rockwell .....	57
Figura 34 - Escalas Rockwell vermelha e preta .....	59
Figura 35 - Máquina de medir Dureza Rockwell.....	59
Figura 36 - Posições de medição de Dureza Rockwell nas Pastilhas .....	60
Figura 37 - Amostras produzidas sendo resfriadas em temperatura ambiente .....	60
Figura 38 - Máquina Universal de Ensaio de Cisalhamento .....	61
Figura 39 - Dispositivo de teste para pastilha de freio.....	62
Figura 40 - Dispositivo “faca” para cisalhamento da pastilha de freio .....	63
Figura 41 - Suporte para fixação da pastilha de freio na Máquina de Cisalhamento Universal. ....	64
Figura 42 - Níveis de aderência periférica e nucleica.....	65
Figura 43 - Aderência periférica e nucleica do jogo original.....	67
Figura 44 - <i>Blank</i> pré-moldado com 45 e 15Bar, respectivamente.....	68
Figura 45 - Comparação de Dureza Rockwell com a amostra original, pressão de termoprensagem constante em 86Bar .....	70
Figura 46 - Comparação de Força de cisalhamento com a amostra original, pressão de termoprensagem constante em 86Bar .....	71
Figura 47 - Aderência periférica e nucleica da amostra 4 .....	72
Figura 48 - Aderência periférica e nucleica da amostra 12 .....	72
Figura 49 - Aderência periférica e nucleica da amostra 41 .....	72
Figura 50 - Comparação de Dureza Rockwell com a amostra original, pressão de termoprensagem constante em 115Bar .....	74
Figura 51 - Comparação de Força de cisalhamento com a amostra original, pressão de termoprensagem constante em 115Bar .....	75
Figura 52 - Aderência periférica e nucleica da amostra 68 .....	76
Figura 53 - Aderência periférica e nucleica da amostra 83 .....	76
Figura 54 - Comparação de Dureza Rockwell com a amostra original, pressão de termoprensagem constante em 144Bar .....	78
Figura 55 - Comparação de Força de cisalhamento com a amostra original, pressão de termoprensagem constante em 144Bar .....	79
Figura 56 - Aderência periférica e nucleica da amostra 122 .....	80
Figura 57 - Aderência periférica e nucleica da amostra 83 .....	80
Figura 58 - Aderência periférica e nucleica da amostra 137 .....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Constituintes da formulação da massa de atrito .....	37
Tabela 2 - Comparativo entre os tipos de materiais de atrito .....	42
Tabela 3 - Variação dos parâmetros de fabricação .....	55
Tabela 4 - Escalas Rockwell para medições superficiais .....	58
Tabela 5 - Resultado de Dureza Rockwell e Força de Cisalhamento das amostras originais.....	66
Tabela 6 - Ensaios com pressão de termoprensagem constante em 86Bar .....	69
Tabela 7 - Ensaios com pressão de termoprensagem constante em 115Bar .....	73
Tabela 8 - Ensaios com pressão de termoprensagem constante em 144Bar .....	77

## LISTA DE SÍMBOLOS

$P_a$	Força atuante advinda do pedal de freio	[N]
$e$	Distância perpendicular entre a força de atuação ao pivô	[m]
$N_a$	Força normal entre a sapata de freio A e o tambor	[N]
$N_b$	Força normal entre a sapata de freio A e o tambor	[N]
$n$	Força perpendicular entre as sapatas de freio ao pivô	[N]
$m$	Distância perpendicular entre a força perpendicular ao pivô	[m]
$\mu$	Coeficiente de atrito	
$T_b$	Torque no tambor de freio	[N/m]
$F_b$	Força de frenagem do tambor	[N]
$\alpha_w$	Desaceleração rotacional	[rad/s <sup>2</sup> ]
$I_w$	Inércia rotacional	[kg . m <sup>2</sup> ]
$r$	Raio de giro do pneu	[m]
$HR$	Dureza Rockwell	
$E$	Constante dependente do formato do penetrador	
$\varepsilon$	Aumento de profundidade	[mm]
$P$	Profundidade	[mm]
$\tau$	Tensão de cisalhamento	[MPa]
$F$	Força	[N]
$A$	Área	[mm]

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 <b>Objetivos</b> .....	14
1.1.2 Objetivo Geral .....	14
1.1.3 Objetivos específicos .....	15
2. SISTEMAS DE FREIO.....	16
2.1 <b>Sistema de freio hidráulico</b> .....	17
2.2 <b>Geometria do rotor</b> .....	23
2.2.1 Freios a tambor.....	23
2.2.2 Freios a disco .....	28
2.3 <b>Material de fricção</b> .....	33
2.3.1 Lonas de freio .....	33
2.3.2 Pastilhas de freio .....	34
2.4 <b>Estado da Arte</b> .....	46
3. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE UMA PASTILHA DE FREIO QUE SERÁ USADA NESSE ESTUDO .....	47
3.1 <b>Principais etapas de fabricação</b> .....	47
3.2 <b>Propriedades desejadas</b> .....	51
4. METODOLOGIA .....	52
4.1 <b>Análise da pressão de pré-moldagem</b> .....	52
4.2 <b>DOE da máquina de termoprensagem</b> .....	53
4.3 <b>Avaliação experimental</b> .....	56
4.3.1 Procedimento de medição de Dureza Rockwell .....	56
4.3.2 Procedimento de ensaio de força de cisalhamento .....	61
4.3.3 Análise de aderência periférica e nucleica .....	64
5. RESULTADOS .....	66
5.1 <b>Massa pré-moldada com 15 e 45Bar de pressão</b> .....	67
5.2 <b>Pressão de termoprensagem 86Bar, temperatura do molde <math>160 \pm 20</math> °C, tempo de cura <math>240 \pm 120</math>s, pressão de pré-moldagem 30Bar</b> .....	68
5.3 <b>Pressão de termoprensagem 115Bar, temperatura do molde <math>160 \pm 20</math> °C, tempo de cura <math>240 \pm 120</math>s, pressão de pré-moldagem 30Bar</b> .....	73
5.4 <b>Pressão de termoprensagem 144Bar, temperatura do molde <math>160 \pm 20</math> °C, tempo de cura <math>240 \pm 120</math>s, pressão de pré-moldagem 30Bar</b> .....	77
6. CONCLUSÃO .....	81
6.1 <b>Sugestão para trabalhos futuros</b> .....	83
REFERÊNCIAS .....	84

## 1. INTRODUÇÃO

Uma grande evolução na história da humanidade foi a invenção da roda como forma de auxílio à locomoção de passageiros. Através dela, a força para mover e transportar objetos de interesse foi reduzida de forma significativa, devido à redução do atrito gerado entre a roda e o solo. Sem dúvida a roda trouxe muitos benefícios. Contudo, tornou-se necessário controlar a velocidade por ela gerada, à fim de evitar acidentes com pessoas e outros veículos de locomoção. Sendo assim, surgiu a necessidade de desenvolver um sistema que fosse capaz de parar o veículo de maneira eficaz.

Os primeiros freios para automóveis surgiram através de adaptações dos freios utilizados em carruagens: uma alavanca que acionava uma sapata externa diretamente no pneu para a parada total do veículo. O sistema funcionava relativamente bem para velocidades de até 30 km/h. Apenas em 1890, com o advento do pneu pelos irmãos Michelin, observou-se que a madeira utilizada para reduzir a velocidade do carro danificava muito a borracha do pneu. Já em 1902, foi desenvolvido e testado por Ransom E. Olds, um freio de cinta externa de aço que envolvia um tambor. Essa invenção, contudo, causava uma fadiga precoce do sistema e era insegura em certas situações. O desgaste precoce do sistema exigia que ele fosse substituído a cada 150 km percorridos. Poucos anos depois, criou-se o freio a tambor interno, que tinha como características um bom freio de estacionamento, que evitava o deslocamento dos veículos em declives, além de possuir uma vida útil significativamente maior (HEDGBETH, 2016).

Na mesma época, devido ao crescimento urbano e ao acréscimo de veículos no trânsito, os automóveis passaram a contar com freios internos nas rodas dianteiras e traseiras. O freio a disco foi desenvolvido e começou a ser utilizados em veículos mais caros nos anos seguintes. Entretanto, muito ruído era gerado no contato entre o disco e a pastilha de freio, fato que foi solucionado em 1907 por

Herbert Froot, o qual produziu uma pastilha de freio de amianto que reduzia significativamente o ruído e proporcionava maior vida útil ao componente (HEDBETH, 2016).

No cenário atual, a indústria automotiva busca constantemente soluções inovadoras para aplicar aos componentes que constituem o sistema de freio. O grande foco está no comportamento desses materiais quando solicitados na prática. Para isso, diversos testes são realizados em bancadas. O objetivo é criar um produto que tenha um ponto ótimo de fricção, permitindo realizar paradas eficazes, em curtos períodos de tempo e desgastando o mínimo possível.

Segundo Belhocine e Abdullah (2014), quando dois corpos estão em contato por fricção, diversos parâmetros interferem no comportamento do atrito, e nesse contato, há dissipação de energia e calor gerado de forma que aumenta o nível de pressão na hora da frenagem. Os efeitos termomecânicos são perceptíveis nas zonas de contato entre os dois componentes, e podem gerar trincas e vibrações nos discos de freio, bem como causar desgaste excessivo da pastilha. Em situações extremas, a pastilha se adere ao disco, gerando uma superfície desgastada.

O trabalho a seguir foi realizado numa empresa fabricante de pastilha e discos de freio. Este estudo proporcionará uma visão dos sistemas de freios presentes no cenário automotivo, e apresentará a influência do processo produtivo na qualidade final do produto.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.2 Objetivo Geral**

O objetivo geral é utilizar de experimentos e ensaios para comparar as características de pastilhas de freios utilizadas originalmente no veículo (OEM – *Original Equipment Manufacturer*) e do mercado de reposição, produzidas pela empresa FREMAX.

### 1.1.3 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Revisar os conceitos sobre sistemas de freio;
- Analisar a influência da pressão de pré-moldagem do material de atrito no processo produtivo;
- Verificar como o tempo de termoprensagem, bem como tempo de cura do processo, interferem na qualidade do produto final;
- Realizar ensaios mecânicos de dureza, para verificar como a variação dos parâmetros de fabricação influem nesta característica;
- Realizar ensaios mecânicos de cisalhamento nas pastilhas de freio selecionadas, para analisar a resistência a tração, bem como tornar possível a visualização da aderência periférica e nuclear;
- Analisar aderência periférica e nuclear da pastilha de freio.

## 2. SISTEMAS DE FREIO

Todo o veículo necessita de um sistema de freio, de modo que seja capaz de controlar a velocidade ou pará-lo totalmente. Em função disso, é um item crítico de projeto. O sistema de freio do carro pode ser dito como um conjunto de componentes cuja função é converter a energia cinética do movimento em calor. Os requisitos críticos de projeto envolvem segurança, eficiência, durabilidade, entre outros (RUZZI, 2004).

Diversos são os tipos de sistemas de freio, eles podem ser classificados conforme sua finalidade. Por exemplo, o sistema de freio de serviço é aquele no qual o motorista do veículo atua diretamente, reduzindo a velocidade durante a operação ou mesmo parando ele. Por sua vez, o sistema de freio auxiliar atua quando há uma pane no sistema de freio de serviço, permitindo que o motorista atue progressivamente na parada do carro. O freio de estacionamento é aquele que faz o veículo ficar imóvel, em uma pista reta ou inclinada, mesmo na ausência de motorista. Por fim, o sistema de freio de atuação contínua, o qual consiste de um conjunto de elementos que causam pouquíssimo desgaste do freio de fricção, que pode ter um ou mais desaceleradores, permite ao motorista reduzir a velocidade do automóvel ou até mesmo em longos trechos em declive manter a velocidade quase que constante (BOSCH, 2005).

Além dos sistemas de freio citados acima, há os dispositivos eletrônicos de freio: assistência de frenagem e distribuição eletrônica de frenagem. O primeiro realiza um monitoramento do veículo na hora da frenagem e avalia se há uma emergência ou não; situação na qual é desejado parar o veículo em um pequeno espaço e curto período de tempo. A assistência de frenagem aumenta a potência nos freios para que a frenagem seja possível, evitando colisões. Já a Distribuição Eletrônica de Frenagem garante que haja distribuição igualitária de frenagem em todas as rodas, proporcionando segurança na frenagem (SCLAR, 2015).

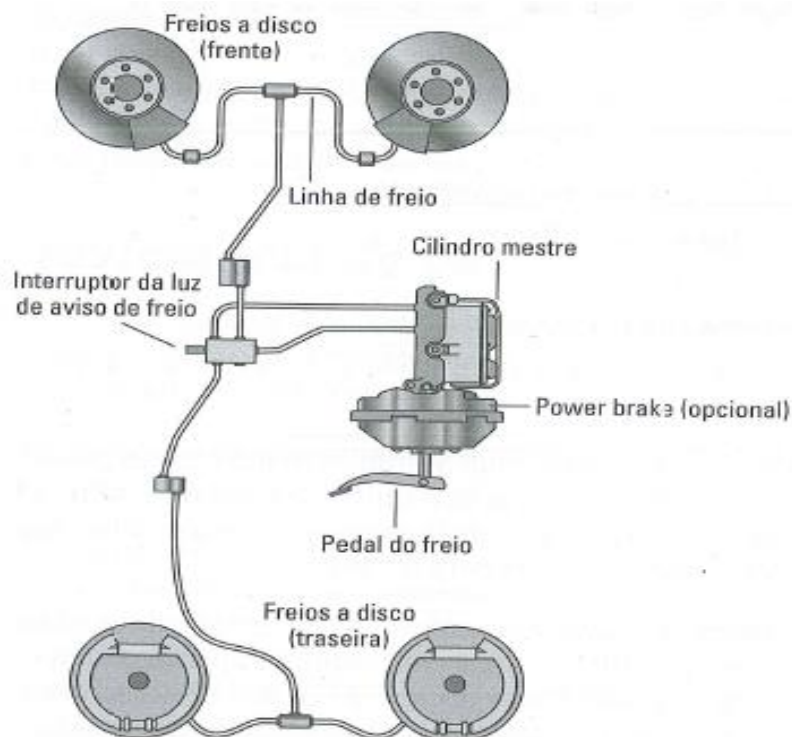


## 2.1 SISTEMA DE FREIO HIDRÁULICO

No sistema de freio hidráulico, ocorre a amplificação da força, que é aplicada mecanicamente pelo motorista, quando o pedal de freio é acionado, outra força, de maior intensidade, atua no êmbolo do cilindro mestre. Este, por sua vez, é conectado diretamente às pinças (freio a disco; normalmente dianteiro) e às sapatas (freio a tambor; geralmente traseiro) através dos cilindros, fazendo a movimentação do fluido de freio. Portanto, a pressão gerada no cilindro mestre atuará sobre os êmbolos, pressionando a pinça que, por sua vez, proporcionará o contato entre as pastilhas e o disco de freio, ou as sapatas, que serão expandidas até o contato com o tambor, gerando o atrito e a frenagem (SCLAR, 2015).

Na Figura 1 é possível observar os principais componentes do sistema de freio hidráulico. Neste trabalho, será analisado o material de fricção (pastilhas que entram em contato com o disco).

Figura 1. Sistema de freio hidráulico com freio a disco na dianteira e tambor na traseira.



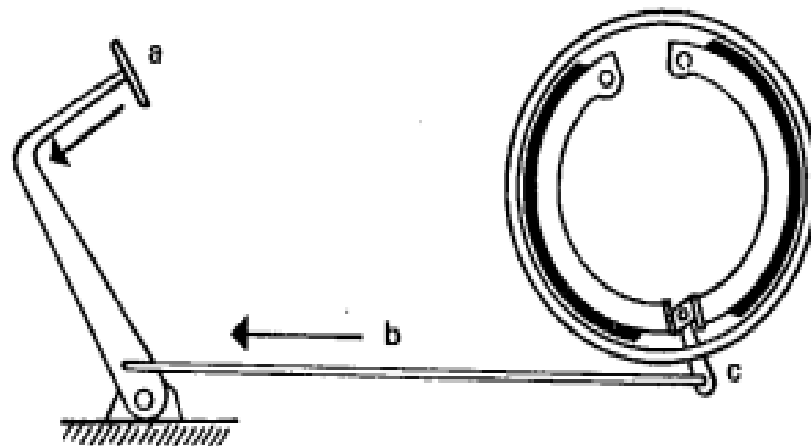
Fonte: Sclar (2015, p. 280).

### (a) Pedal de freio

O pedal de freio do carro é uma alavanca do tipo inter-resistente e está ligado à um eixo conectado até o cilindro mestre. A força aplicada no pedal na hora da frenagem é transmitida através de pequenos pistões no cilindro mestre que forçam o fluido de freio para fora deste até as linhas de freio. Em perfeito funcionamento, o pedal de freio deve parar a uma altura de 5 cm do piso do veículo. Caso nessa condição, ainda, ele deverá descer com facilidade e parar com firmeza no seu ponto mais baixo sem que o condutor sinta uma sensação esponjosa (SCLAR, 2015).

O pedal de freio pode acionar o freio de maneira hidráulica ou mecânica. Na Figura 2 é possível observar os componentes do conjunto de freio mecânico: (a) pedal do freio; (b) haste de freio; (c) alavanca com came de afastamento dos setores.

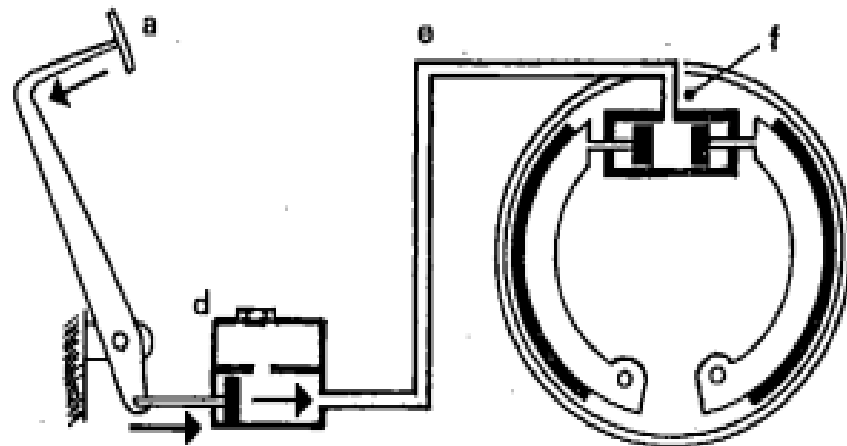
Figura 2. Pedal de freio com acionamento mecânico.



Fonte: Chollet (2002, p.128).

Por sua vez, o pedal de freio de acionamento hidráulico possui os seguintes componentes: (a) pedal do freio; (d) cilindro mestre; (e) conduto guarnecido com óleo; (f) cilindro acionado com pistão agindo sobre os setores. Na Figura 3 é possível observar esta esquematização.

Figura 3. Pedal de freio com acionamento hidráulico.



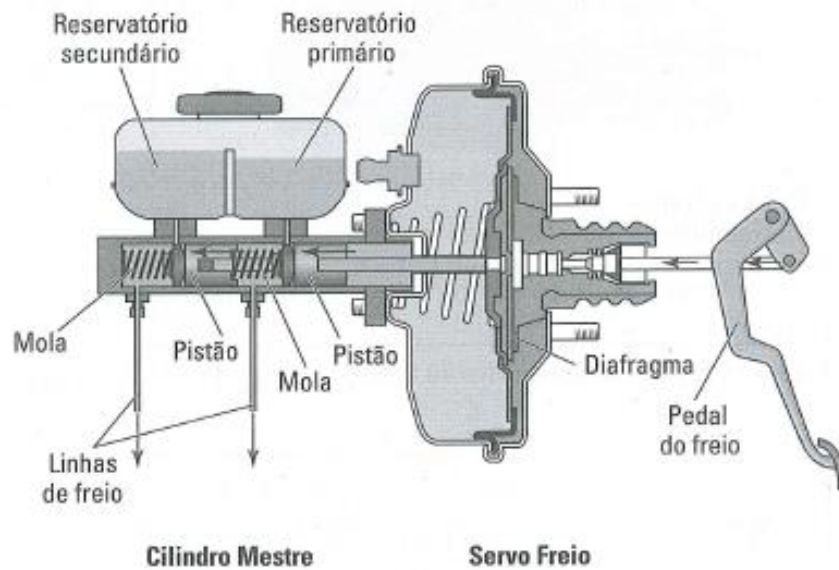
Fonte: Chollet (2002, p.128).

### **(b) Power Brakes**

*Power Brakes* é a denominação dada ao conjunto hidráulico do sistema de freio, usado para parar ou reduzir a velocidade do veículo.

Nesse sistema, é usado uma combinação de componentes mecânicos para multiplicar a força aplicada no pedal de freio pelo motorista em uma força capaz de atuar nos freios e parar um carro que pesa algumas toneladas. Geralmente, o conjunto *Power Brake* é constituído por um servo freio posicionado entre o pedal e o cilindro mestre, para aumentar a força dos pistões sobre este, reduzindo a força necessária aplicada pelo motorista para parar o carro. Os dois tipos mais comuns de servos deste sistema são: servos freio a vácuo, que usa a pressão atmosférica para seu funcionamento, e servos freio hidráulicos, também conhecidos como hidrovácuos, que usam da pressão hidráulica advinda da direção hidráulica do veículo para seu funcionamento. Há ainda carros com sistema ABS (*Anti-Block Braking System*) que usam uma bomba hidráulica para que uma pressão seja gerada e proporcione o funcionamento do servo (SCLAR, 2015).

Na Figura 4 é mostrado o sistema *Power Brake* com seus componentes, os quais serão citados na sequência.

Figura 4. Sistema *Power Brake*.

Fonte: Sclar (2015, p. 281).

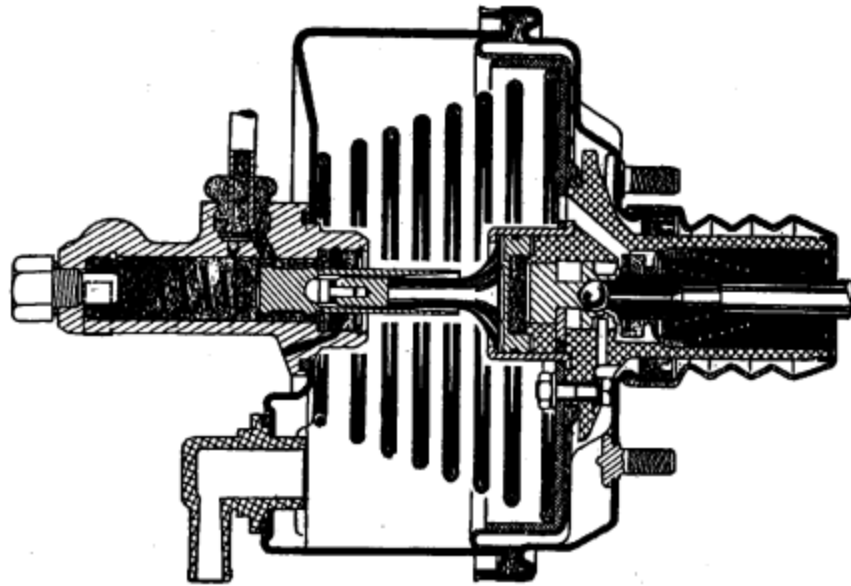
### (c) Servo freio

A função do servo-freio é amplificar e, portanto, facilitar a frenagem. Há duas variações desse componente: servo freio de depressão e servo-freio de pressão a ar (CHOLLET, 2002).

Os servo-freios à depressão são utilizados em automóveis de passeio ou em caminhões pequenos. Eles devem produzir um esforço proporcional àquele gerado pelo motorista ao pisar sobre o pedal de freio. Este item é composto por dois componentes principais: o cilindro de comando e o dispositivo de sujeição. O primeiro é de diâmetro bastante grande e possui um pistão solidário a uma barra central, que serve basicamente para transmitir o impulso do pistão, além de possuir também uma mola helicoidal que mantém o pistão fixo em uma das extremidades do curso. O funcionamento ocorre quando houver a ação da depressão, criando uma diferença de pressão em uma das faces do pistão, continuando-se o deslocamento deste com a barra central de impulso. A força do impulso gerada na barra central é, então, proporcional à diferença de pressão entre as faces do pistão; e quanto maior for essa diferença, menor será a ação do servo-freio e maior será o impulso gerado.

Na Figura 5 é possível observar um conjunto servo freio a depressão montado em sistema de freio hidráulico.

Figura 5. Seção de um servo freio: bloco hidráulico a depressão.



Fonte: Chollet (2002, p.153).

#### **(d) Dispositivo de sujeição**

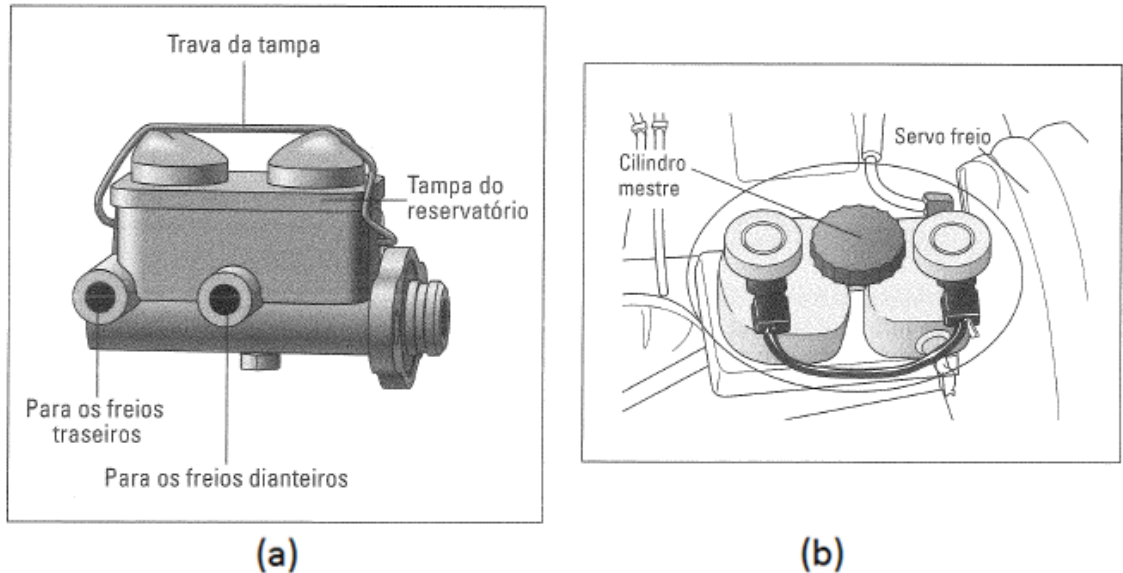
O componente que faz a dosagem de pressão sobre o pistão é a válvula de sujeição. O dispositivo de sujeição é composto por um par de válvula, onde uma se comunica com o canal de depressão e a outra com a atmosfera. Cada válvula atua de forma solidária, ou seja, no seu deslocamento em um dado sentido fecha primeiro uma das passagens e depois abre a outra, e elas são comandadas diretamente pelo pedal de freio ou pelo intermédio do circuito hidráulico (CHOLLET, 2002).

#### **(e) Cilindro mestre**

O cilindro mestre é o dispositivo localizado debaixo do capô do veículo, em geral perto da placa corta-fogo, e pode ser de plástico ou de metal. Em seu interior está presente o fluido de freio e é conectado ao pedal através das linhas de freio, onde o contato com as quatro rodas do carro é realizado. Basicamente, ao pisarmos no pedal, o servo freio é ativado e este aciona os pistões dentro do cilindro mestre, forçando o fluido de freio para fora de seu recipiente em direção as linhas de freio; de maneira contrária, quando solta-se o pedal, o fluido retorna para seu interior (SCLAR, 2015).

Na Figura 6 é possível observar as diferentes configurações do cilindro mestre: (a) cilindro mestre de metal; (b) cilindro mestre de plástico.

Figura 6. Cilindro mestre de metal e de plástico.



Fonte: Sclar (2015, p. 282).

Em situações de repouso, o pistão deve deixar o fluido de freio circular livremente em seu reservatório, de maneira que ele possa sofrer contrações ou dilatações através da variação de temperatura (CHOLLET, 2002).

#### (f) Linhas de freio

As linhas de freio saem do cilindro mestre, passando por toda a carroceria do veículo, até alcançarem as rodas. Elas são geralmente feitas de aço. Contudo, nas partes próximas as rodas dianteiras e do eixo traseiro, essas partes são feitas de material de borracha, com propriedades flexíveis, de maneira a suportar o movimento que acontece no eixo traseiro (SCLAR, 2015).

#### (g) Fluido de freio

Com vida útil de 24 meses, o fluido de freio deve absorver a umidade advinda da atmosfera, além de ter de apresentar aspecto límpido e homogêneo, não conter sedimentos ou materiais estranhos em suspensão, e não pode conter qualquer tipo de material que prejudique o perfeito funcionamento do freio hidráulico. Assim sendo, à medida que o fluido de freio é contaminado pela água, seu ponto de

ebulição é alterado, e bolhas de ar nesse fluido são geradas, fazendo com que os freios falhem (SCLAR, 2015).

## 2.2 GEOMETRIA DO ROTOR

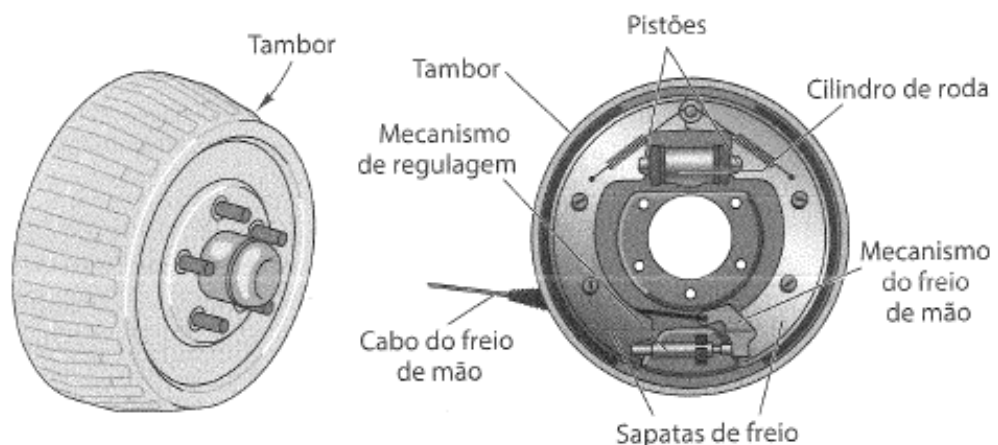
Em relação à geometria do rotor, o sistema de freio é diferido entre freios a tambor e a disco. No automóvel, pode haver apenas freios a disco, em carros mais luxuosos e esportivos, ou a combinação deles, sendo a aplicação do tambor geralmente no eixo traseiro e o disco normalmente nas rodas dianteiras.

### 2.2.1 Freios a tambor

Os freios a tambor são os tipos de freios mais antigos que ainda se encontram em uso no cenário automotivo. A grande vantagem deles é que exigem menor pressão hidráulica para parar o carro, uma vez que as sapatas de freio tendem a se atritar contra os tambores de freio após serem empurradas pelos pistões nos cilindros de freio (SCLAR, 2015).

Na Figura 7, observa-se um freio a tambor com seus componentes principais.

Figura 7. Composição de um freio a tambor.

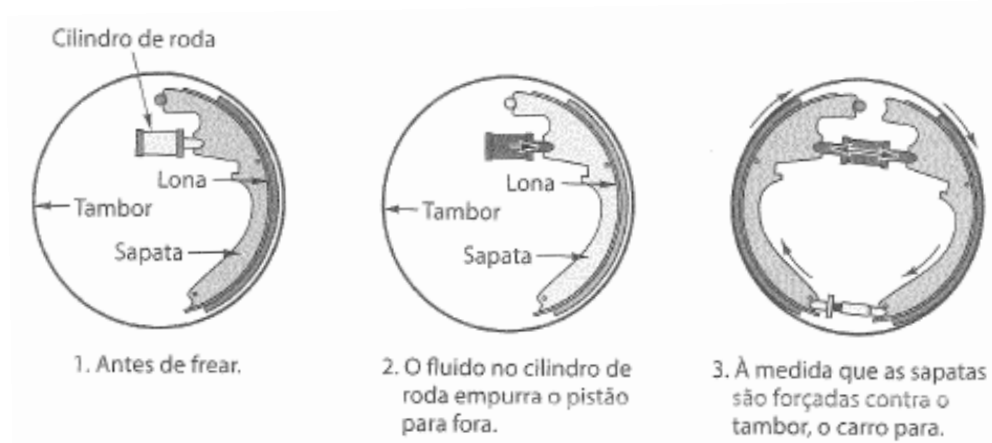


Fonte: Sclar (2015, p. 284).

Os tambores de freio são cilindros ocos de aço localizado atrás de cada roda e giram acoplados com elas. Este componente possui enorme vida útil, considerando que uma manutenção preventiva da lona de freio seja feita antes de ficarem demasiadamente gastas (SCLAR, 2015).

Os cilindros de freio são pequenos mecanismos, cujo funcionamento é acionado ao fluido de freio passar pelas linhas de freio, gerando o afastamento entre o par deste componente. O funcionamento deles pode ser observado na Figura 8 (SCLAR, 2015).

Figura 8. Funcionamento de um freio a tambor.



Fonte: Sclar (2015, p. 286).

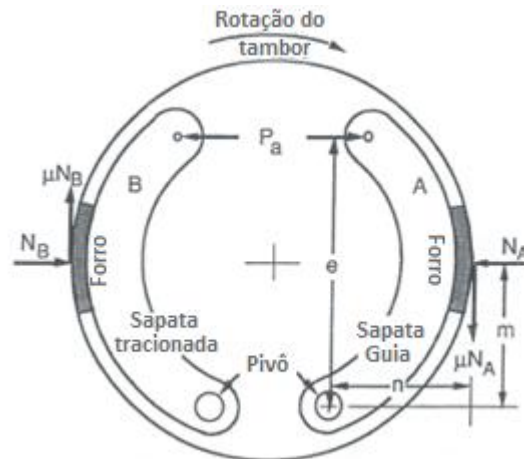
As sapatas de freio são peças de metais curvas que, ao receber pressão do cilindro de freio contra a parede do tambor, realizam a parada do automóvel. Elas estão fixas a um conjunto de molas que as retornam à posição inicial quando o motorista retira o pé do pedal. (SCLAR, 2015).

Por fim, as lonas de freio, que são peças curvas de material resistente, estão fixadas às sapatas, estas, por sua vez, quando forçadas contra a superfície interna do tambor, promove o atrito entre as lonas e a parede do tambor, interrompendo o giro da roda. Geralmente, as lonas de freio utilizadas em freios a tambor, no eixo dianteiro possuem uma superfície maior que as dos freios no eixo traseiro, uma vez que há uma maior força de frenagem na região dianteira do veículo (SCLAR, 2015).

Nos tambores de freio, há o fator de frenagem, que pode ser entendido como uma vantagem mecânica que esse tipo de freio possui para minimizar os esforços realizados na frenagem. Na Figura 9 é possível observar como se obtém esse fator de frenagem dos tambores.



Figura 9. Obtenção do fator de frenagem dos tambores.



Fonte: Adaptado de Gillespie (1992, p.51).

Na figura acima, temos:

- $P_a$ : Força atuante advinda do pedal de freio;
- $e$ : Distância perpendicular entre a força de atuação ao pivô;
- $N_a$ : Força normal entre a sapata de freio A e o tambor;
- $N_b$ : Força normal entre a sapata de freio B e o tambor;
- $n$ : Força perpendicular entre as sapatas de freio ao pivô;
- $m$ : Distância perpendicular entre a força normal ao pivô;
- $\mu$ : Coeficiente de atrito.

Das considerações acima, temos que o momento da sapata A é regido pela equação que se segue:

$$\sum M_p = e P_a + n \mu N_a - m N_a \quad (1)$$

Para os componentes A, a força de fricção é regidos pela equação 2.

$$F_A = \mu N_a \quad (2)$$

Da equação acima, é possível manipular para obter os parâmetros em função de  $F_A / P_a$ , utilizando a equação (1) para obter:

$$\frac{F_A}{P_a} = \frac{\mu e}{(m - \mu n)} \quad (3)$$

A mesma análise pode ser feita para o componente B.

Segundo Gillespie (1992), o torque em tambores de freio normalmente aumenta de acordo com a força de atuação do pedal,  $P_a$ , ao mesmo tempo que varia com a velocidade e energia absorvida pelo sistema. Assim, tem-se:

$$T_b = f(P_a, v, T) \quad (4)$$

Onde “ $v$ ” é a velocidade e “ $T$ ” é a temperatura.

O torque produzido por cada sapata de freio age, então, gerando a força de frenagem no chão que por sua vez desacelera as rodas e os componentes girantes. Assim, temos:

$$F_b = \frac{(T_b - I_w \alpha_w)}{r} \quad (5)$$

Onde:

- $r$ : raio de rolamento dos pneus;
- $I_w$ : inércia rotacional das rodas e componentes girantes;
- $\alpha_w$ : desaceleração rotacional das rodas;
- $F_b$ : força de frenagem do tambor.

Os freios a tambor podem ser de três tipos: (a) de setores autocentradores; (b) de dois setores comprimidos; (c) de setores de compressão automática.

#### a) Freios a tambor de setores autocentradores

Também denominados de freios a tambor simplex, a ancoragem apresenta superfícies planas, paralelas ao eixo de rotação do tambor. Ao frear, cada seletor, que está apoiado unicamente na superfície, pode se deslocar ao longo desta para então tomar uma posição perfeitamente centrada no tambor (SCLAR, 2015).

Na Figura 10 é possível observar a configuração do freio a tambor com setores autocentradores.

Figura 10. Freios a tambor de setores autocentradores.



Fonte: Chollet (2002, p. 132).

### b) Freios a tambor de setores comprimidos

Denominados também por freios a tambor duplex, a característica marcante desse tipo de freio a tambor é que cada setor é disposto de modo benéfico ao acionamento provocado pelo tambor em rotação, ou seja, seu movimento tende a favorecer a abertura de um dos setores, enquanto se opõe a abertura do outro. Assim sendo, o setor favorecido é denominado de comprimido, enquanto o outro é tracionado (CHOLLET, 2002).

Na Figura 11, observa-se os freios a tambor com setores comprimidos. Nota-se, diferentemente do caso anterior, que nenhuma ancoragem fica solitária.

Figura 11. Freio a tambor de setores comprimidos.



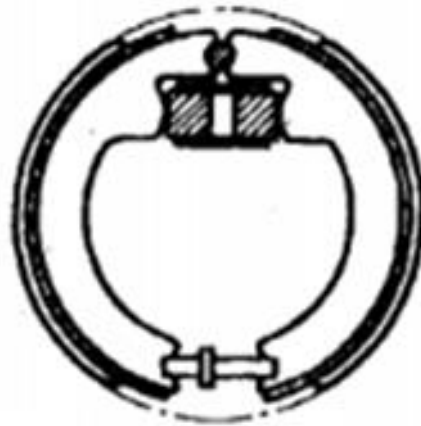
Fonte: Chollet (2002, p. 132).

### c) Freios a tambor de compressão automática

Esse tipo de freio a tambor é também denominado de duo-servo. A configuração dos freios a tambor de compressão automática possui uma singularidade: os dois setores de uma roda se apoiam um sobre o outro por meio de uma ligação mecânica regulada. O esforço aplicado pelo motorista no pedal de freio na hora da frenagem é reduzido, pois, quando acionado, o primeiro setor aciona o segundo setor pela ligação mecânica, empurrando-o contra o tambor. Assim sendo, a força de freio é proporcional à força em que o primeiro setor aplicará no segundo setor para realizar a frenagem (CHOLLET, 2002).

Na Figura 12 é possível visualizar a configuração de um freio a tambor de compressão automática.

Figura 12. Freio a tambor de compressão automática.



Fonte: Chollet (2002, p. 132).

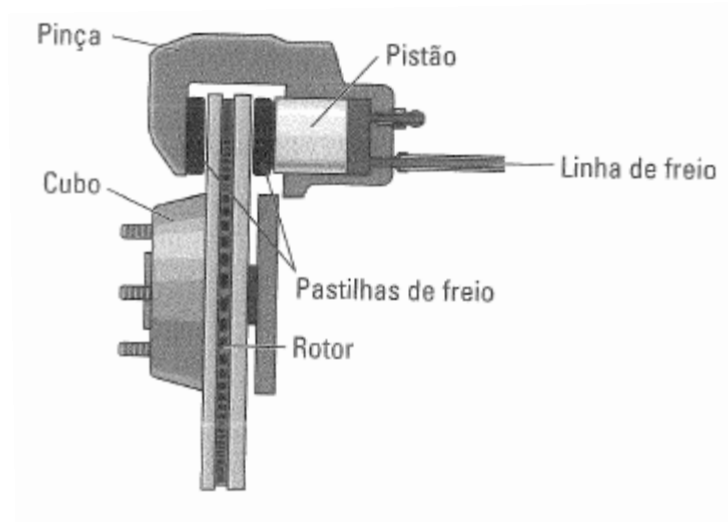
### 2.2.2 Freios a disco

Geralmente encontrados nas rodas dianteiras dos veículos, o freio a disco é o melhor sistema de frenagem existente na atualidade, pois apresenta longa vida útil, além de apresentar menor dilatação, melhor equilíbrio e equalização das pressões exercidas sobre eles quando comprimidos contra as pastilhas de freio (SCLAR, 2015).

A grande vantagem deles em relação ao tambor é de funcionarem do lado de fora do freio (ao invés do lado de dentro, como o tambor de freio), tendendo a superaquecer menos. Seu princípio de funcionamento consiste no deslocamento do êmbolo da pinça pressionando as pastilhas de freio contra o disco de freio, gerando a força de frenagem. O mecanismo responsável por deslocar as pinças é o fluido de freio contido nas linhas de freio, advindo do cilindro mestre, previamente acionado pelo servo freio. Assim, durante o funcionamento atinge a altas temperaturas (800°C a 900°C), e mesmo com essa alta temperatura, devido a dilatação do disco de freio, não há perda do volume de fluido de freio, não afetando, portanto, o conforto de frenagem (KAWAGUCHI, 2005).

Na Figura 13 é possível observar os principais componentes de um freio a disco.

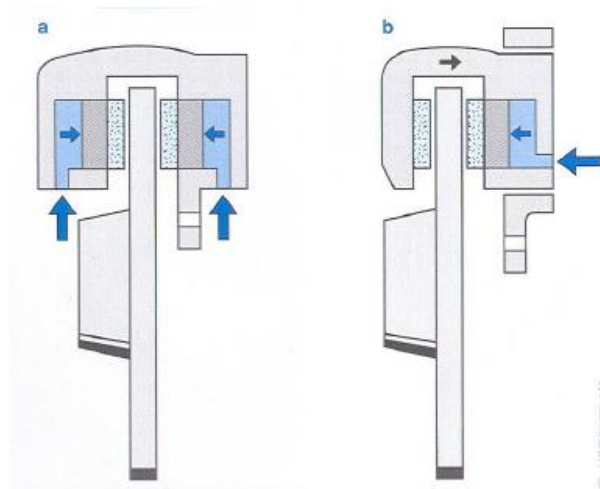
Figura 13. Principais componentes de um freio a disco.



Fonte: Sclar (2015, p. 288).

Em sua forma construtiva, o freio a disco divide-se em duas categorias: (a) freio a disco de pinça fixa e (b) freio a disco de pinça flutuante. Na Figura 14, é apresentado esses dois esquemas construtivos.

Figura 14. Freios a disco: (a) de pinça fixa; (b) de pinça flutuante.



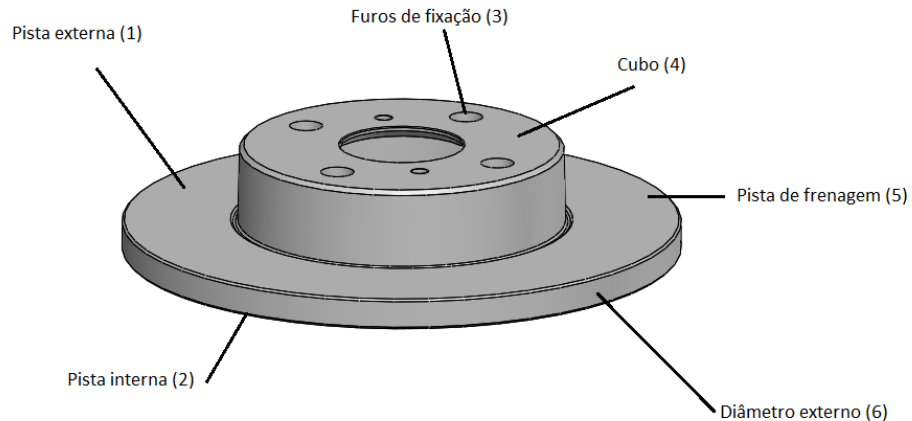
Fonte: Kawaguchi (2005, p. 25).

### a) Discos de freio

Geralmente são feitos de ferro fundido e, posteriormente, fabricados por usinagem, para garantir propriedades específicas, como acabamento, rugosidade, batimento, paralelismo, entre outras.

Na Figura 15, tem-se o disco de freio com seus principais componentes, onde segue a representação: (1) pista externa; (2) pista interna; (3) furos de fixação; (4) cubo; (5) pista de frenagem; (6) diâmetro externo.

Figura 15. Partes de um disco de freio.



Fonte: Autor (2017).

A pista externa está situada no lado do aro, enquanto a interna está localizada no lado do eixo. Basicamente, um disco de freio consiste em dois anéis com pistas de tração, as quais sofrerão pressão das pastilhas de freio, um cubo que é fixado no eixo e na roda e uma superfície que promove a conexão entre as pistas e o cubo. Esta conexão é necessária porque o anel e a parte do cubo que é fixada no eixo não estão no mesmo plano, por questões de obstrução e alocação das pinças e pastilha. Essas partes são usinadas, de forma a gerar uma superfície com menor coeficiente de atrito, que por sua vez gerará menos calor na frenagem, evitando aquecimento excessivo do pneu e roda (ABDULLAH, 2014).

A área indicada como pista de frenagem é altamente solicitada, e é ela que sofrerá maior força de pressão advinda das pinças. Além disso, essa área tende a sofrer maior gradiente de expansão térmica e dilatação. Contudo, devido à presença do cubo, que é menos quente, retém parte desse calor, causando uma zona de retenção de tensão localizada. Caso a temperatura alcance níveis elevados, poderá causar zonas de rupturas localizadas, também denominadas de trinca, que são visíveis até o diâmetro externo do cubo (ABDULLAH, 2014).

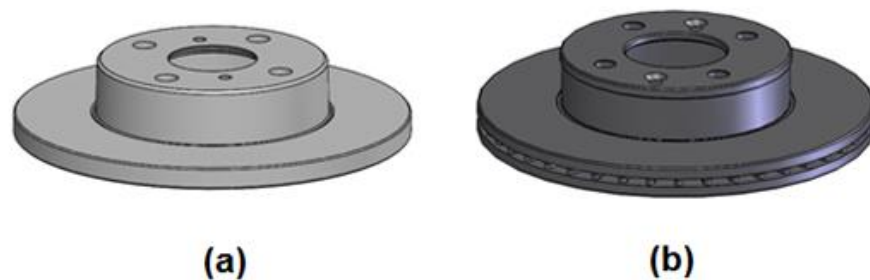
Assim, para melhor dissipação de calor, utiliza-se discos de freio ventilados, perfurados e slotados, que serão explicados na sequência.

## I. Disco de freio sólido x Disco de freio ventilado

O disco de freio sólido é o mais comum e mais fácil de ser produzido, uma vez que não possui aletas. É o tipo de disco de freio mais barato e aplicado em uma grande variedade de veículos de passeio, geralmente combinado com o tambor de freio.

Por sua vez, o disco de freio ventilado possui espaços ventilados, como o próprio nome diz. Essa área é composta por um número simétrico de aletas, cuja função primordial é circular o ar no interior do componente, melhorando, portanto, a transferência de calor e a refrigeração. A utilização desse disco de freio é notada em combinação com o disco de freio sólido: carros esportivos utilizam discos ventilados nas rodas frontais e discos de freio sólidos nas rodas traseiras. Na Figura 16, tem-se a comparação visual de um disco de freio sólido e ventilado.

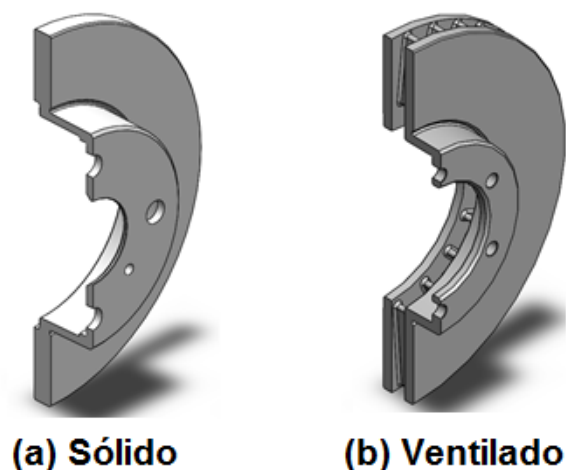
Figura 16. a) Disco de freio sólido b) Disco de freio ventilado.



Fonte: Autor (2017).

Para a melhor visualização, um corte transversal é feito nesses dois discos de freios, conforme identificado na Figura 17.

Figura 17. Corte transversal do disco de freio (a) sólido e (b) ventilado.



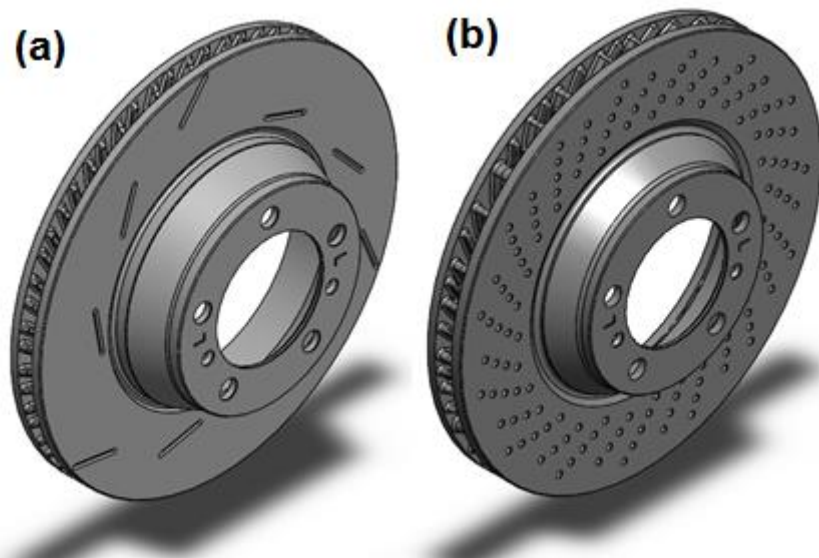
Fonte: Autor (2017).

## II. Discos de freio especiais

Dentre os discos de freios ventilados, há alguns modelos especiais, que são utilizados em veículos de alto padrão e em veículos de competição, onde o foco é a performance combinado com a alta capacidade de frenagem e dissipação de calor. Estes são os discos de freio perfurados e ranhurados. Estes discos são muito mais leves se comparados com os discos de ferro tradicionais, o que gera maior potência de frenagem e capacidade de dissipar calor. Além de possuírem as aletas para auxiliar a dissipação de calor, eles possuem furos ou ranhuras para ajudar nesta função.

Na Figura 18, tem-se: (a) disco de freio ranhurado e (b) disco de freio perfurado.

Figura 18. Discos de freios especiais.

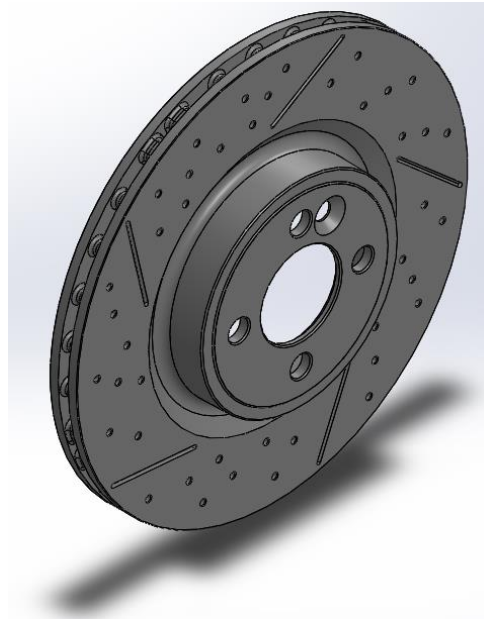


Fonte: Autor (2017).

Esses discos podem até mesmo serem feitos materiais especiais, como por exemplo com mais carbono, o que confere, ainda, mais leveza na peça. Na Figura 19, é ilustrado um disco de freio perfurado e ranhurado, utilizado, por exemplo, em veículos de corrida, como carros da Stock Car.



Figura 19. Disco de freio perfurado e ranhurado.



Fonte: Autor (2017).

## 2.3 MATERIAL DE FRICÇÃO

De maneira complementar, para cada sistema de freio há um tipo de material de atrito diferente. Para freios a tambor, por exemplo, utiliza-se lonas de freio, enquanto para freios a disco são utilizadas as pastilhas de freio.

### 2.3.1 Lonas de freio

As lonas de freio são os materiais de atrito que revestem as sapatas dos freios a tambor. Quando acionado o pedal de freio, são elas que entrarão em contato direto com a superfície interna do tambor de freio de forma a proporcionar a frenagem do veículo. Sua composição é parecida com a da pastilha de freio, que será citado em sequência neste tópico.

Na Figura 20 pode-se observar o conjunto lona de freio montado sobre a sapata de freio.

Figura 20. Conjunto lona de freio e sapata de freio.



Fonte: Pietro (2014, p. 124).

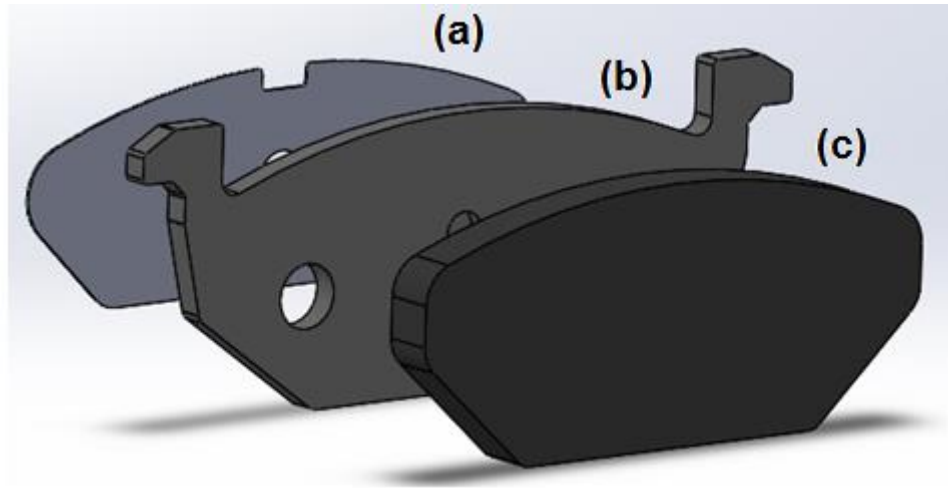
### 2.3.2 Pastilhas de freio

Foco deste trabalho, as pastilhas de freio são utilizadas na configuração do freio a disco, onde uma placa metálica serve como base à uma massa, que é a superfície de atrito que entrará em contato direto com o freio quando o pedal for acionado pelo motorista. Como é um item de segurança, este componente encontra-se em constante desenvolvimento para atingir melhorias para o consumidor final, visando aprimorar a tecnologia do processo e produto.

Uma pastilha de freio tradicional, da linha de veículos leves ou pesados, é composta por plaqueta, massa de atrito e antirruído (*shim*). Dependendo da aplicação, pode ainda possuir mola, sensor de desgaste e/ou alarme. A função da plaqueta é de sustentação da massa, a qual é responsável por realizar o atrito com o disco quando em situação de frenagem. O antirruído, material composto por borracha e ferro, comumente chamado de *shim*, reduz tanto a transmissibilidade como a amplitude de forças vibracionais. Além disso, por possuírem uma fina camada de borracha, eles são capazes de amortecer vibrações entre o cáliper e a pastilha de freio, bem como agir como barreira térmica para garantir temperaturas consistentes em toda a pastilha, assegurando alto torque de frenagem. Este acessório é colado diretamente na plaqueta, e seu formato varia de acordo com as diversas formas que esta possui. Por fim, a mola serve de encaixe no cáliper do veículo.

Na Figura 21, tem-se uma vista explodida de uma pastilha de freio tradicional, onde: (a) anti-ruído (*shim*); (b) plaqueta; (c) massa de atrito.

Figura 21. Componentes da pastilha de freio.



Fonte: Autor (2017).

Produzir este item é realmente desafiante, pois diversos aspectos têm de ser levados em consideração. Por exemplo, as propriedades mecânicas que o material de atrito deve possuir: deve apresentar baixa compressibilidade e expansão térmica, alta resistência estrutural, alto poder de isolante térmico e acústico e dureza adequada aliada à formulação da massa. Quanto às propriedades químicas, a pastilha de freio deve obrigatoriamente não colar no disco quando pressionadas pelo pedal de freio e não ter corrosão interna. Já em relação ao nível de ruído (NVH – *Noise Variation Harshness*), o ideal é que este item seja isento dos mais diversos ruídos que podem ser gerados, que serão citados em sequência com mais detalhes. Por fim, é necessário que a pastilha apresente no final do processo as seguintes características: distância de frenagem adequada de acordo com cada veículo, evitando acidentes; alta durabilidade e vida útil; cause pouco desgaste no disco de freio; não suje a roda do veículo. O coeficiente de atrito deve ser alto e constante com a variação de temperatura, pressão e velocidade (BRITO, 2016).

A qualidade da pastilha de freio é determinada pela capacidade de gerar atrito quando solicitada ao encontro dos discos de freio. O material de atrito das pastilhas de freio, também comumente chamados de “massa”, são compostos de aproximadamente 25 ingredientes diferentes, podendo variar para mais ou para menos. Estes vão determinar as características dela, e focam conseguir o ponto de

equilíbrio entre o alto poder de parada, baixo ruído e baixo desgaste por um longo período de tempo (BRITO, 2016).

### **a) Formulação da pastilha de freio**

Sabe-se que a formulação da pastilha de freio é essencial para que o produto final apresente todas as características citadas no início deste tópico. Ela depende da habilidade do químico responsável em fazer a mistura e determinar a quantidade ideal de cada componente.

Para se obter uma boa formulação, as seguintes características são desejáveis:

- Deve apresentar coeficiente de atrito estático/dinâmico estável, mesmo em diferentes circunstâncias ambientais, como por exemplo temperaturas totalmente adversas (frio de  $-40^{\circ}\text{C}$  à temperaturas de até  $700^{\circ}\text{C}$  em operação);
- Proporcionar o aquecimento uniforme na área da pastilha e do disco de freio;
- Isolamento térmico adequado, suficiente para evitar superaquecimento do fluido de freio, o que impediria o travamento do sistema;
- Possuir alta força de resistência mecânica, de maneira a evitar rupturas durante a frenagem, impedindo que ocorra acidentes de operação durante a frenagem;
- Ter alta resistência à corrosão nas diversas condições adversas (chuva, maresia, lama, neve, etc.), mantendo, pelo menos, as propriedades mínimas para funcionamento nessas situações;
- Desgastar o mínimo que, combinados com as propriedades abrasivas dos materiais, iniba o desgaste da contra-superfície, de maneira que seja suave no contato com o disco de freio;
- Não gerar vibração ou ruído durante a frenagem.

## b) Formulação da massa – constituintes

Como citado anteriormente, o material de atrito das pastilhas de freio é formado por uma mistura de diversos componentes, dentre eles aglomerantes, fibras, pós metálicos, lubrificantes, abrasivos, além de cargas orgânicas e inorgânicas.

Na Tabela 1 é possível observar o constituinte da formulação da massa de atrito, com os devidos materiais e funções.

Tabela 1. Constituintes da formulação da massa de atrito.

CONSTITUINTE	MATERIAL	FUNÇÃO
Aglomerantes	Resinas: Borrachas e catalizadores	Manter a coesão dos demais componentes, mesmo em altas temperaturas
Fibras	Metálicas (aço, latão, Cobre, etc...) Naturais (rocha, basalto, etc...) Sintéticas (vidro, aramida, etc...)	Reforço estrutural
Pós Metálicos	Cu, Bronze, latão, Zn, Fe, Al, etc.	Estabilizadores de atrito
Lubrificantes	Graphites, Sulfetos	Redução do nível de atrito.
Abrasivos	Aluminas (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), Silicatos (CrO <sub>4</sub> ), (SixOy), Cromatos magnetita (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ), etc...	Modificam o atrito , limpeza do disco
Cargas Orgânicas	Oleos vegetais, Borrachas, etc.	Reduzem desgastes a baixa temperatura
Cargas Inorgânicas	Vermiculita, BaSO <sub>4</sub> , CaCO <sub>3</sub> , etc.	Reduzem desgastes a alta temperatura

Fonte: Brito (2016, p. 12).

A seguir, serão citados cada um dos constituintes de acordo com as características singulares.

### I. Aglomerantes

Os aglomerantes são os elementos também denominados de ligantes, cuja função primordial é a realizar a junção com os demais materiais de atrito, onde uma matriz é formada térmica e mecanicamente. São conjuntos de resinas, borrachas, aditivos e catalizadores (BRITO, 2016).

No quesito resinas, dois tipos principais são utilizados: as resinas novolacas e resólicas.

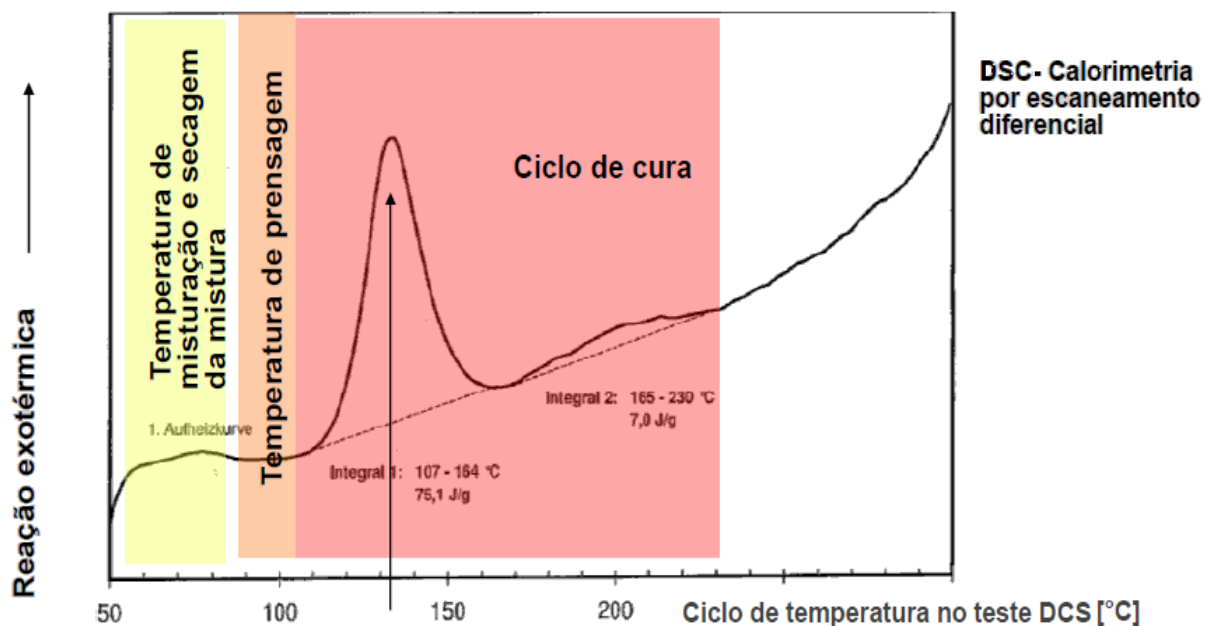
As resinas novolacas são caracterizadas pela deficiência de formaldeído em sua composição, ou seja, é necessário adicionar agente de cura em seu processo. Assim sendo, há a ligação cruzada dos átomos, o que causa maior endurecimento

(desejável). Elas podem ser de três tipos: resinas novolacas puras, modificadas com aditivos inorgânicos ou modificadas por elastômeros especiais (BRITO, 2016).

- Resina novolaca pura: apresenta diferentes níveis de fluidez do agente de cura (Hexamina). Isso afeta diretamente na moldabilidade e nível de cura do material de atrito em etapas posteriores do processo;
- Resina novolaca modificada com aditivos inorgânicos: este tipo de resina apresenta uma maior resistência térmica e, dessa forma, propicia ganho na força estrutural e redução no desgaste da massa;
- Resina novolaca modificada por elastômeros especiais: essas resinas são comumente conhecidas como borrachas nitrílicas ou até mesmo silicone. Possuem alta resistência química e alta resistência ao choque térmico. Contudo, sua maior vantagem é possuir qualidades anti-vibrações, o que é ideal para pastilhas de freio. Por esses fatores, esse tipo de resina se torna mais cara que as demais citadas anteriormente (BRITO, 2016).

Na figura abaixo, é mostrado as etapas de aquecimento que a resina sofre. É importante salientar que a consolidação efetiva da cura se dará no último ciclo na máquina de termoprensagem, onde é realizado o ciclo de cura propriamente dito. A reação térmica da resina novolaca começa a temperaturas superiores a 100°C.

Figura 22. Reação química da resina.



Fonte: Brito (2016, p. 15).

Por sua vez, as resinas resólicas são totalmente opostas, sendo ricas em formaldeído, ou seja, não requerem agente extra para realizar a cura, seu aquecimento já basta para finalizar o processo (BRITO, 2016).

## **II. Reforço estrutural**

O reforço estrutural é proveniente do material fibroso, o qual possui uma influência muito maior sobre as propriedades mecânicas, como resistência ao cisalhamento, à flexão, elasticidade e compressibilidade, do que nas propriedades tribométricas. As propriedades estruturais vão depender basicamente dos seguintes fatores: resistência mecânica da fibra; tamanho e morfologia dela; concentração dispersa no composto; entrelaçamento com os outros componentes; sentido de orientação e aderência aos aglomerantes. O uso é baseado na influência ao atrito e desgaste, e principalmente nas propriedades mecânicas (BRITO, 2016).

As fibras metálicas são chamadas de fibras reforçantes, cuja composição consiste de grãos ou pós metálicos, como por exemplo o aço, cobre e latão. Contudo, há peculiaridades de acordo com a fibra metálica escolhida: as fibras de aço irão ter uma oxidação maior se o veículo operar em litorais ou se ainda ele tiver um período de descanso muito longo, além de que, quando utilizadas em excesso, causam desgaste excessivo do disco de freio. Este componente ainda causa variações no coeficiente de atrito, uma vez que ele agride a superfície de transferência, a qual é responsável pela estabilização do mesmo (BRITO, 2016).

Embora tenha algumas desvantagens em se utilizar fibras metálicas, como citado acima, existe uma vantagem muito significativa, que é a alta capacidade de remover calor das superfícies de atrito, uma vez que sua condutividade térmica é elevadíssima. Além disso, o tamanho médio das partículas interfere na atuação como modificadores de atrito e fazem a diferença no controle de desgaste (BRITO, 2016).

## **III. Pós metálicos**

Os pós metálicos mais moles e leves que o material da contra superfície (disco de freio) são utilizados para aumentar o atrito dinâmico. Devido suas

características mole e lamelar, eles asseguram que os detritos desprendidos pelo desgaste na hora da frenagem possam ser reincorporados benéficamente na superfície de contato, podendo, dessa forma, ser reutilizado (BRITO, 2016).

Além disso, devido sua elevada plasticidade, a deposição no disco aumenta a real área de contato entre a pastilha de freio e o disco. Dessa forma facilita a subida de temperatura uniforme e simultaneamente, fazendo com que os filmes indesejáveis formados pela deposição dos detritos do material de atrito sejam quebrados na hora da frenagem (BRITO, 2016).

#### **IV. Lubrificantes**

Os lubrificantes utilizados em pastilhas de freio são ditos lubrificantes sólidos. Eles são uma classe de modificadores de atrito que ajudam na formação do *Third Body Layer* (terceira camada do corpo), atuando na interface de atrito e na superfície metálica do disco. Eles proporcionam alta estabilidade de atrito dentro diferentes faixas de temperatura, além de reduzirem o desgaste de pastilha e capacitarem a otimização do efeito “*slip-stick*”, o qual causa as vibrações e ruídos (BRITO, 2016).

#### **V. Abrasivos**

Os materiais abrasivos são partículas abrasivas utilizadas de forma a propiciar um aumento do nível de atrito quando a pastilha entrar em contato com o disco de freio. Estas partículas ajudam na limpeza do disco por sua ação abrasiva. É de propriedade comum aos abrasivos possuírem caráter básico e elevada dureza em altas temperaturas de operação (BRITO, 2016).

#### **VI. Cargas orgânicas**

As cargas orgânicas normalmente são:

- Óleos vegetais – total ou parcialmente polimerizado;
- Óleo polimerizado à base de Cardanol;
- Partículas de borracha trituradas curadas e/ou moídas (BRITO, 2016).



Esse tipo de carga irá proporcionar alta resistência ao desgaste quando utilizadas em baixas temperaturas (como na Europa), e são também usadas para redução da densidade (BRITO, 2016).

## **VII. Cargas inorgânicas**

As cargas inorgânicas que constituem o material de fricção são geralmente minerais de baixo custo. Em sua formulação, pode haver o controle de PH da mistura, desejando-se sempre o caráter levemente alcalino para evitar adesão por corrosão devido o contato com o disco de freio (BRITO, 2016).

Dois são os tipos mais comuns de cargas inorgânicas utilizadas: vermiculita e wollastonita. A vermiculita é um material composto que é caracterizado como carga inorgânica e lubrificante sólido, além de também ser considerado um material de reforço estrutural fibroso. Em seu formato expandido, ela é termicamente estável, por isso e aliado as outras características citadas, ela é altamente utilizada em pastilhas de freio. Já a wollastonita é um mineral industrial que possui um processamento avançado, o que a torna uma carga inorgânica multifuncional. Pelo fato de sua estrutura física e por possuir propriedades não perigosas, ela é utilizada no material de fricção. Sua maior qualidade é, por ser um material que possui propriedades físicas e mecânicas melhoradas, reduzir ou eliminar o potencial de trincas da pastilha, além de melhorar todos os processos durante a fabricação da pastilha no que envolve a massa propriamente dita (ela melhora o potencial de pré-moldagem e moldabilidade na etapa de termoprensagem), além de contribuir diretamente na redução do ruído (BRITO, 2016).

### **c) Tipos de material de fricção**

Três são os possíveis tipos de materiais de fricção: baixo teor metálico, semi-metálico e cerâmico.

- Baixo teor metálico: constituem no material de fricção cerca de 10% de seu peso total. Algumas fibras orgânicas e inorgânicas são utilizadas, juntamente com complexos lubrificantes, com a intenção de substituir os grafites;

- Semi-metálico: possuem alto teor de grafite e constituem mais que 40% do peso do material de fricção. Esse tipo de material possui alto teor de grafite;
- Cerâmico: também chamados de *NAO (Non Asbestos Organics)*, que são materiais que não possuem qualquer partícula metálica de ferro ou aço. Possuem, em sua composição, pós de cobre e/ou latão, além de fibras orgânicas e inorgânicas. Esse tipo de material de fricção proporciona à pastilha uma alta performance (BRITO, 2016).

Na tabela abaixo, temos um comparativo entre esses três tipos de materiais de fricção, levando em conta as características primordiais do material de atrito.

Tabela 2. Comparativo entre os tipos de materiais de atrito.

	Baixo teor metálico	Semi-metálico	NAO/ Cerâmico
<b>Estabilidade de atrito</b>	Intermediário	Bom	Intermediário
<b>Desgaste (pastilha e disco)</b>	Bom	Bom	Bom
<b>Controle de ruído</b>	Ruim	Intermediário	Bom
<b>Deposição de poeira nas rodas</b>	Intermediário	Ruim	Bom
<b>Custo das matérias-primas</b>	Bom	Intermediário	Ruim

Fonte: Autor (2017).

De acordo com a tabela acima, nota-se que o material cerâmico (livre de asbestos) possui a melhor classificação, tendo três notas boas. Embora mais custoso, este material apresenta bom desgaste entre o contato da pastilha com o disco, além de possuir bom controle ao ruído (ter pouca/ nenhuma geração de ruído) e haver baixa deposição de poeira nas rodas, o que é ótimo para um sistema de freio a disco. As duas outras opções são consideradas semelhantes em relação à nota, tendo cada qual peculiaridades em suas características, sendo uma com baixo custo de matéria prima, outra com melhor estabilidade de atrito, etc.

#### d) Geração de ruído

O ruído gerado em uma pastilha de freio está ligado a vibração gerada quando o carro realiza a frenagem, onde ela entra em contato direto com o disco de freio. Pequenas irregularidades, tanto na superfície de um quanto na superfície do outro, agem como colisões de velocidade, o que faz com que as pastilhas trepidem quando raspam o rotor. Além disso, há também a vibração gerada entre o cáliper e a pastilha de freio (junções e buchas). Quanto mais robusto for o conjunto cáliper, pastilha e disco de freio, mais fontes de vibração irá ter o sistema (BRITO, 2016).

Diversos são os ruídos emitidos pela pastilha de freio. A frequência, amplitude e modo de vibração irá variar de acordo com a velocidade do carro, a pressão de aplicação e a temperatura ambiente. Dentre estes temos: *squeal* de alta e baixa frequência, *judder*, *groan*, *moan*, *rattle*, *clack*, *chirp* e *creak* (BRITO, 2016).

- *Squeal*: esse fenômeno ocorre em baixas velocidades, geralmente em frenagens onde o carro está quase parando, abaixo dos 15 km/h. O *squeal* é um chiado que ocorre quando a temperatura de frenagem atinge os 300°C, e pode ser de alta frequência (4-16 kHz) ou baixa frequência (1-4 kHz);

- *Judder*: este fenômeno ocorre em velocidades superiores a 80km/h, com temperaturas de operação na faixa de 200 a 800°C. Ele ocorre devido à vibração gerada entre disco de freio e suspensão, quando há folgas entre o cubo da roda e o disco ou até mesmo sobreaquecimento do disco de freio. Possui frequência entre 10–100 Hz;

- *Groan*: imperceptível aos ouvidos durante a frenagem, visto que ocorre em velocidades de 0-1km/h. O *groan* é um pequeno barulho perceptível ao mecânico girar a roda. Está associado ao cubo do disco de freio e seu encaixe. Sua frequência está na faixa dos 50–500 Hz;

- *Moan*: também conhecido como gemido, o *moan* ocorre em baixas velocidades, geralmente em situações de 0-10 km/h e temperatura ambiente. Sua frequência varia de 50 – 1000 Hz;

- *Rattle*: ruído conhecido como chocalho. Ocorre quando uma pastilha de freio é escolhida de maneira incorreta para o modelo do veículo, o que causa uma folga entre os componentes fixadores (pastilha de freio no cáliper). É comum de acontecer essa situação, visto que muitas pastilhas de freio são bastante semelhantes, onde modelo idênticos visualmente possuem 1mm de variação,

suficiente para causar o *rattle* quando montados. Sua frequência de vibração está na faixa dos 50 – 1000 Hz;

- *Clack*: fenômeno que ocorre geralmente em mudanças de trajetória. Este fenômeno independe da temperatura dos componentes na hora da operação. A sensação que o motorista percebe é que algo está solto na roda. Sua frequência de vibração está entre os 50-500 Hz;

- *Chirp*: fenômeno perceptível devido o contato do alarme da pastilha de freio com o disco de freio. É um ruído intermitente, e quando ele aparece é necessário realizar a troca da pastilha de freio. Sua frequência de vibração varia de 1-16 KHz;

- *Creak*: é o ruído semelhante ao rangido. Acontece devido aos componentes do conjunto freio e suspensão não estarem ajustados corretamente. Perceptível ao motorista do veículo, e sua faixa de vibração varia entre 50-1000 Hz (BRITO, 2016).

Em pastilhas de freio, as características mínimas exigidas são: possuir zero NVH, isenta de qualquer tipo de ruído *squeal*, *groan* ou *judder* de alta velocidade, além de apresentar baixo desgaste.

Contudo, as fontes geradoras do ruído não são apenas provenientes da pastilha de freio. Por exemplo, caso o disco de freio possua alta DTV (*Disc Thickness Variation*), o ruído tipo *judder* pode vir a aparecer (BRITO, 2016).

#### **e) Influência do ar no coeficiente de atrito**

A influência da Umidade Relativa do Ar (URA) influi diretamente no comportamento das pastilhas de freio. Geralmente, espera-se uma estabilidade no atrito quando a URA esteja entre 20 e 60%. Por exemplo, na cidade de Joinville, onde a URA é elevada, chegando a níveis superiores a 100%, as pastilhas de freio podem apresentar características diferentes se comparadas com locais onde há pouca umidade.

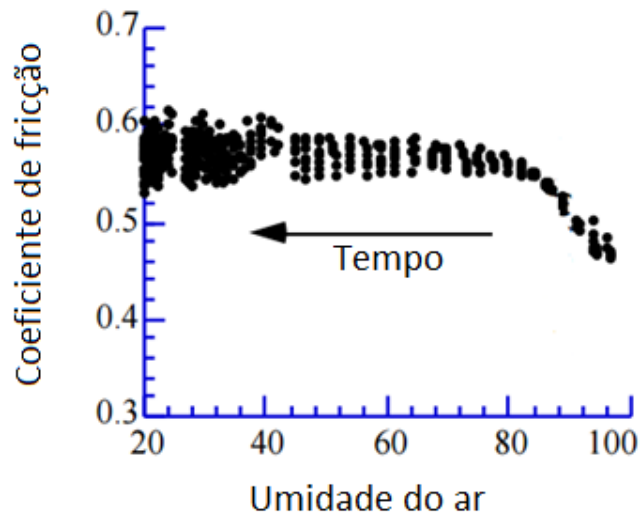
Segundo Eriksson (2000), essa mudança de comportamento está associada a formação de tribofilmes na superfície da pastilha. Em locais de menor umidade, há maior geração e deposição de detritos da própria pastilha.

Em dois testes, realizados com diferentes pastilhas de freio em localidades distintas, analisou-se a variação do coeficiente de fricção em dois possíveis

cenários: em um local onde havia baixa umidade relativa do ar e em uma cidade onde o índice de umidade era elevado.

Na Figura 23 é possível observar um alto coeficiente de atrito em uma pastilha de freio testada num local com baixa umidade relativa do ar.

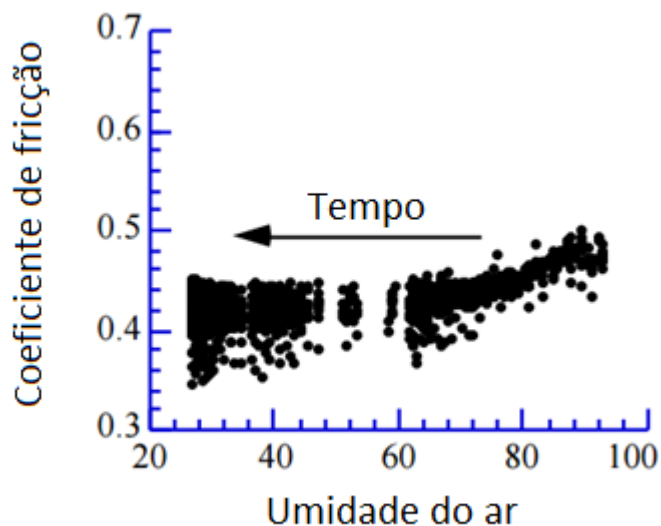
Figura 23. Alto coeficiente de atrito em relação à umidade do ar.



Fonte: Adaptado de Eriksson (2000, p. 36).

Já na Figura 24, observa-se um coeficiente de atrito inferior ao anteriormente citado.

Figura 24. Baixo coeficiente de atrito em relação à umidade do ar.



Fonte: Adaptado de Eriksson (2000, p. 36)

Assim sendo, o coeficiente de atrito possui a tendência em ser maior em locais de baixa umidade e menor em locais que possuem altas umidades.

## 2.4 ESTADO DA ARTE

No trabalho publicado por Daniel Krummel (2014), foram estudadas e comparadas pastilhas de freio OEM e do mercado de reposição, através da utilização de um tribômetro. Neste aparelho, o foco estava na análise da estabilidade do coeficiente de atrito, bem como a resistência ao desgaste desses dois tipos de pastilha. Neste estudo consta ainda como se determinava e caracterizava o atrito gerado no contato entre a pastilha e o disco de freio, mostrando as etapas de assentamento e *fade*.

Por sua vez, Carlos Jódar (2015) resolveu fazer uma comparação do nível de ruído gerado por pastilhas do mercado de reposição e originais do veículo. Novamente, com o auxílio de um tribômetro desenvolvido especialmente para seu trabalho, foram realizados ensaios com estes dois tipos de pastilhas. Contudo, foi analisado além do atrito, os valores de vibração e de frequência ressonante. Portanto seu foco foi analisar o ruído gerado durante a frenagem do veículo, através da determinação das vibrações emitidas por cada pastilha.

No presente trabalho, o foco consiste na comparação das características de dureza, resistência ao cisalhamento e análise de aderência periférica e nucleica de pastilhas de freio OEM e do mercado de reposição. Porém, diferentemente da utilização do tribômetro, foi realizada variação nos parâmetros de fabricação: na pré-moldagem, por exemplo, foi variada a pressão de prensagem, enquanto na termoprensagem foram variados os parâmetros de pressão de termoprensagem, temperatura do molde e tempo de cura. Para a medição das características desejadas, foi utilizado um durômetro Rockwell tradicional para medir a dureza e uma Máquina de Ensaio Universal para avaliar a resistência ao cisalhamento. O foco, portanto, foi estudar como o processo produtivo, com suas variáveis, influi na qualidade final de pastilhas de freio automotiva.

### **3. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE PASTILHA DE FREIO QUE SERÁ USADA NESSE ESTUDO**

Para a produção de pastilhas de freio, diversas máquinas são utilizadas com funções distintas, porém complementares, com a finalidade de se criar um produto com qualidades semelhantes ou superiores às do item original de fábrica.

#### **3.1 PRINCIPAIS ETAPAS DE FABRICAÇÃO**

Abaixo serão citadas as principais etapas de fabricação das pastilhas de freio utilizadas nesse estudo.

##### **a) Estamparia**

Primeiramente, as chapas de aço devem ser cortadas nas máquinas de estampagem de acordo com a dimensão e formato desejado, resultando nas plaquetas. Em casos específicos de se adquirir plaquetas de fornecedor externo, esse posto operacional não é utilizado. Da estamparia as plaquetas são levadas para um aplicador de cola, que ajudará na adesão da etapa de termoprensagem.

Na Figura 25 é possível observar uma prensa excêntrica para a estampagem de plaquetas:

Figura 25. Máquina de estampagem das chapas de aço.



Fonte: Autor (2017).

### b) Misturador

A composição do material de atrito é feita no misturador. Os ingredientes são estequiometricamente calculados e pesados pelo laboratorista. Após separados, são colocados no misturador para que o arado realize a trituração e deixe a mistura com formato de pó.

Para linha automotiva leve, a formulação é diferente da linha pesada, visto que as características tanto de frenagem quanto de condução variam. O misturador dos ingredientes é possível de ser observado na imagem abaixo. Observa-se essa máquina na figura abaixo.

Figura 26. Misturador da composição de atrito.



Fonte: Autor (2017).



### c) Pré-moldagem

Feita a mistura, a composição deve tomar a forma desejada, e geralmente se assemelha ao formato da plaqueta de aço. O material é prensado no pré-molde, e a grande variável do processo é a pressão do êmbolo, visto que a propriedade física e aparente da massa está diretamente ligada com sua compactação.

Na Figura 27 é possível observar a máquina de pré-moldagem, cujo resultado é a compactação da massa de atrito, observada na Figura 28.

Figura 27. Máquina de pré-moldagem.



Fonte: Autor (2017).

Figura 28. Material de atrito compactado.



Fonte: Autor (2017).

### d) Termoprensagem

Na termoprensagem, a massa de atrito é prensada a quente para que se fixe à plaqueta. O equipamento é um molde de três camadas, onde a primeira serve de

base para a plaqueta; a segunda para o pré-molde e a terceira como superfície superior. Entre a plaqueta e a massa de atrito, é adicionado uma camada de *under-layer*, que é um pó de composição especial, que, em contato com a massa de atrito, no ambiente de elevada temperatura, realizará a fixação entre os componentes.

Nesta etapa, o tempo de termoprensagem, bem como a temperatura, são críticos para a qualidade final do componente. A Figura 29 retrata a máquina de termoprensagem.

Figura 29. Máquina de termoprensagem.



Fonte: Autor (2017).

#### **e) Remoção de cola**

Esta etapa não é crítica para a qualidade final do produto, porém esteticamente é importante. A cola remanescente nas plaquetas é removida através da utilização de um esmeril escova de aço, removendo toda a rebarba entre a plaqueta e a massa.

#### **f) Acabamento superficial**

No acabamento superficial, a pastilha de freio é posicionada numa base metálica e então é passada em um rebolo, que ajusta o tamanho da massa com a medida desejada.

O tamanho da massa é de extrema importância no processo, pois se o material de atrito for muito extenso, dependendo do modelo do veículo, seu posicionamento no cãliper fará com que ela esteja em contato direto com disco, o que causa desgaste prematuro e gera ruído. Após o acabamento superficial, as pastilhas recebem os respectivos acessórios e seguem para o embalamento.

### **3.2 PROPRIEDADES DESEJADAS**

Para cada aplicação, há variações no processo. Contudo, para cada final de processo, é desejado que a pastilha tenha as dimensões especificadas no procedimento operacional do produto, bem como todos os acessórios iguais ao item OEM (molas, alarmes, anti-ruídos, sensores).

Ainda, é desejado que ela possua uma boa aderência periférica e nucleica, bem como uma elevada resistência ao cisalhamento. Esses fatores são realizados por meio de ensaios destrutivos no laboratório, e com esses dados é feita a avaliação final quanto a aprovação do produto.

Por fim, as pastilhas devem apresentar pouco ou nenhum ruído em baixa rotação, teste que só é validado quando colocadas em prática.

## 4. METODOLOGIA

No momento da frenagem, a reação natural do motorista é pressionar o pedal de freio a intensidade adequada para as diversas situações possíveis, seja levemente em situações normais ou de maneira abrupta em casos emergenciais. A pressão gerada no fluido de freio é transmitida aos cálipers, pressionando as pastilhas contra o disco de freio, gerando a frenagem. A pastilha de freio é, portanto, um item crítico de segurança do veículo, pois deve funcionar em todos os momentos de utilização do mesmo.

Nesse trabalho foram realizados testes de dureza e de cisalhamento com pastilhas de freio OEM (Original Equipment Manufacturer) e de reposição, fabricadas pela FREMAX, com o objetivo de demonstrar a importância de ter um processo devidamente controlado. Todas as pastilhas em questão são da linha leve de veículos da Volkswagen, como por exemplo o UP, Fox, Voyage, entre outros. Os testes de cisalhamento foram realizados segundo os procedimentos de ensaio da norma ISO 6312:2010.

### 4.1 ANÁLISE DA PRESSÃO DE PRÉ-MOLDAGEM

Inicialmente, para realizar o procedimento experimental com as pastilhas de freio, foram feitas amostras de pré-moldagem com diferentes pressões. Em sequência, foco principal do estudo, foi realizado um estudo de DOE (*Design of Experiments*) da máquina de termoprensagem, com o intuito de identificar quais são os fatores que mais influenciam neste processo, bem como o comportamento individual delas.

Na etapa de pré-moldagem, processo explicado anteriormente na seção 3 deste trabalho, foram produzidos *blanks* para três diferentes pressões. Na Figura 30, observa-se uma amostra já prensada deste item.

Figura 30. *Blank* pré-moldado.



Fonte: Autor (2017).

Cada pastilha possui uma diferente área de material de atrito, conseqüentemente, área de pré-moldagem. Assim sendo, para as diversas aplicações no mercado, cada item possui uma quantidade empírica de massa própria. O item em questão utiliza 170 g de mistura e uma pressão de pré-molde de 30 Bar.

Com o intuito de demonstrar a influência da pressão de pré-moldagem no processo, esta foi variada em  $\pm 50\%$ . Obteve-se, assim, um *blank* prensado com 15 Bar, outro com 30 Bar e, por fim, um com 45 Bar.

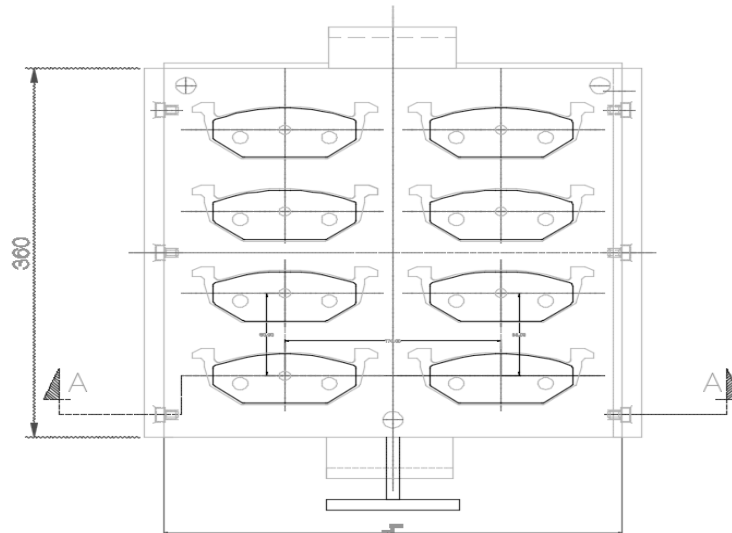
#### 4.2 DOE da máquina de termoprensagem

Esta etapa de fabricação é a que possui a maior quantidade de variáveis de processo. Dentre os parâmetros possíveis de se variar, optou-se pela alternância combinada de três deles: pressão de termoprensagem, temperatura de operação do molde e tempo de cura.

Cada molde de termoprensagem é dimensionado de acordo com a geometria da área de atrito da pastilha de freio. Dependendo do tamanho delas, eles podem variar de 6 a 14 cavidades. Assim sendo, como pressão e área são grandezas inversamente proporcionais, cada tipo de pastilha terá uma pressão pré-definida empiricamente. A temperatura de operação do molde é aquela em que o molde irá realizar seus ciclos (de retirada dos gases, de cura, etc.). Por fim, o tempo de cura é a etapa final do processo, onde o êmbolo do cilindro força o molde contra as chapas, realizando o que pode ser denominado de prensada final. Para o item em

questão, a configuração do molde consistia em 8 cavidades, como é possível de observar na Figura 31.

Figura 31. Desenho técnico do molde.



Fonte: Autor (2017).

A configuração testada e certificada por laboratório especializado para a pastilha em estudo é a seguinte:

- Pressão de termoprensagem: 115 Bar;
- Temperatura de operação do molde: 160°C;
- Tempo de cura: 240 s.

Com o intuito de estudar o processo com suas variáveis, cada variável de estudo foi separada em intervalos lineares distintos, da seguinte forma:

- Pressão de termoprensagem variada em aproximadamente  $\pm 25\%$ : 86Bar, 115Bar e 144Bar;
- Temperatura de operação do molde alternada aproximadamente  $\pm 13\%$ : 140°C, 160°C e 180°C;
- Tempo de cura variado em  $\pm 50\%$ : 120 s, 240 s e 360 s.

Assim sendo, o DOE consistiu em testes utilizando todas as possíveis combinações de variáveis: cada pressão diferente, testada com cada temperatura do molde diferente e tempos de cura distintos. Como cada molde é possível termoprensar 8 pastilhas ao mesmo tempo, o experimento consistiu na fabricação de 216 pastilhas para o estudo. As medições foram realizadas em metade das pastilhas. A relação do número do teste com a variação de cada parâmetro pode ser observada na Tabela 3.

Tabela 3. Variação dos parâmetros de fabricação.

TESTE N°	PRESSÃO DE TERMOPRENSAGEM (Bar)	TEMPERATURA DO MOLDE (°C)	TEMPO DE CURA (s)
1	86	140	120
2	86	140	240
3	86	140	360
4	86	160	120
5	86	160	240
6	86	160	360
22	86	180	120
23	86	180	240
24	86	180	360
7	115	140	120
8	115	140	240
9	115	140	360
10	115	160	120
11	115	160	240
12	115	160	360
19	115	180	120
20	115	180	240
21	115	180	360
13	144	140	120
14	144	140	240
15	144	140	360
16	144	160	120
17	144	160	240
18	144	160	360
25	144	180	120
26	144	180	240
27	144	180	360

Fonte: Autor (2017).

As cores foram destacadas em preto, vermelho e verde apenas para melhorar a visualização. O indicado em preto está relacionado com a pressão de 86 Bar. Já o indicado em vermelho, mostra os testes feitos com pressão de 115 Bar. Por fim, o ilustrado em verde diz respeito às termoprensagens realizadas com 144 Bar.

Cada forma de termoprensagem resultava em 8 pastilhas com as características escolhidas. Elas foram em seguida separadas por pressão de termoprensagem e temperatura do molde fixas, com apenas o tempo de cura variado, alojadas em bandejas e devidamente identificadas, conforme mostra a Figura 32.

Figura 32. Separação, identificação e alojamento das pastilhas fabricadas.



Fonte: Autor (2017).

### 4.3 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

Na etapa de avaliação experimental, foram realizados 108 ensaios de medição de dureza e cisalhamento (amostras de cada teste identificadas na Tabela 3). Além disso, foi realizado uma análise de aderência periférica e nucleica destes itens.

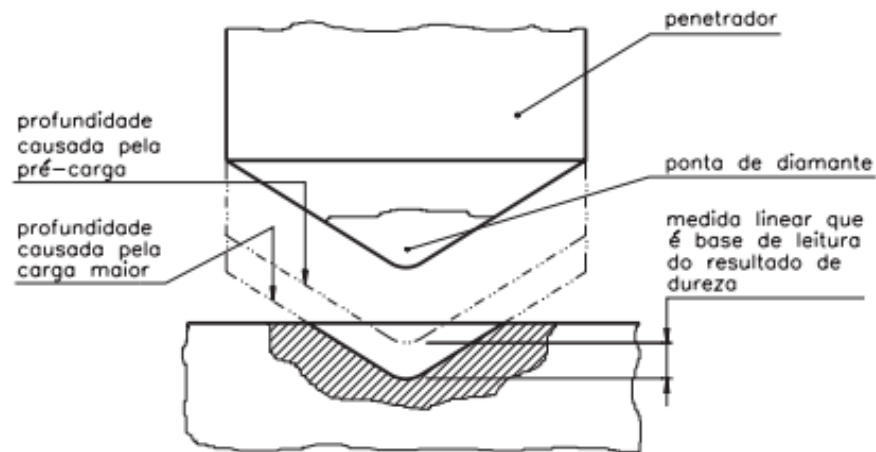
#### 4.3.1 Procedimento de medição de Dureza Rockwell

O ensaio Rockwell consiste na aplicação de uma pré-carga para garantir o contato firme entre o penetrador e o corpo ensaiado para, posteriormente, aplicar a carga do ensaio propriamente dita. A medida linear que quantifica o resultado da



dureza Rockwell é a diferença de profundidade causada pela ação dessas duas cargas, conforme se observa na Figura 33.

Figura 33. Medição de Dureza Rockwell.



Fonte: Manual Máquina Rockwell (p. 7).

Através da representação acima, é possível calcular o valor de Dureza Rockwell (HR), pela seguinte equação:

$$HR = E - \varepsilon \quad (6)$$

Onde:

- $HR$ : valor da Dureza Rockwell;
- $E$ : constante dependente do formato do penetrador;
- $\varepsilon$ : aumento permanente da profundidade de penetração, causado pela diferença entre a pré-carga e a carga maior.

Ainda, é possível medir a profundidade de penetração, que é dependente do tipo do penetrador e qual dureza se deseja medir. Nesse caso, usou-se penetrador esférico para medir a Dureza HR normal, pois, diferentemente da Dureza Rockwell superficial, indicada para avaliação de folhas finas, desejava-se avaliar a dureza em geral.

$$P = 0,002 \times (130 - HR) \quad (7)$$

Sendo que:

- $P$ : valor da profundidade aproximada;
- $HR$ : valor da Dureza Rockwell

O tipo penetrador irá depender do material testado e da intensidade do mesmo. A Tabela 4 a seguir demonstra as escalas de medição superficial Rockwell; em azul é possível observar os parâmetros usados para as medições deste ensaio.

Tabela 4. Escalas Rockwell para medições superficiais.

Símbolo de escala	Penetrador	Carga maior (kgf)	Cor da escala	Aplicações das escalas
A	Diamante	60	Preta	Carbonetos cementados, aço fino e aços endurecidos de baixa camada de endurecimento
B	Esfera de 1,59mm	100	Vermelha	Ligas de cobre, aços moles, ligas de alumínio, ferro maleável, etc.
C	Diamante	150	Preta	Aço fofo duro, fofo maleável, perlítico, titânio, aço endurecido e outros materiais mais duros
D	Diamante	100	Preta	Aplicações de aços com camada de endurecimento entre dos dois casos acima mencionados, fofo maleável perlítico
E	Esfera de 3,17mm	100	Vermelha	Fofo, ligas de Al e Mg, metais para mancais
F	Esfera de 1,69mm	60	Vermelha	Ligas de Cu recozidas, chapas finas de metais moles
G	Esfera de 1,59mm	150	Vermelha	Fofo maleável, liga Cu-Ni-Zn, cupro-níquis. Aplicações até HRG = 92 para evitar achatamento da esfera
H	Esfera de 3,17mm	60	Vermelha	Metais para materiais muito moles ou finos. Usar a menor esfera e a maior carga possível
K	Esfera de 3,17mm	150	Vermelha	
L	Esfera de 6,35mm	60	Vermelha	
M	Esfera de 6,35mm	100	Vermelha	
P	Esfera de 6,35mm	150	Vermelha	
R	Esfera de 12,70mm	60	Vermelha	
S	Esfera de 12,70mm	100	Vermelha	
V	Esfera de 12,70mm	150	Vermelha	

Fonte: Manual Máquina Rockwell (p. 9)

A escala citada na tabela acima (preta, vermelha) pode ser melhor compreendida quando observando a Figura 34.

Figura 34. Escalas Rockwell vermelha e preta.



Fonte: Autor (2017).

Para a realização das medições de dureza das pastilhas fabricadas, foi utilizada a máquina de Dureza Rockwell, medindo apenas a dureza superficial do material, em que cada divisão de escala representa 0,02mm. Sua pré-carga geralmente é de 10kgf e sua maior carga pode atingir de 100 a 150kgf, dependendo do modelo. A máquina utilizada no teste é mostrada na Figura 35.

Figura 35. Máquina de medir Dureza Rockwell.



Fonte: Autor (2017).

Para maior precisão dos dados, em cada pastilha foram realizadas três medições: inicialmente, tirava-se a medição no centro da massa do material de atrito; em seguida na parte esquerda e, por fim, na extremidade direita, conforme Figura 36.

Figura 36. Posições de medição de Dureza Rockwell nas Pastilhas.



Fonte: Autor (2017).

É importante ressaltar que todos os testes foram realizados com as pastilhas já resfriadas após a termoprensagem, bem como em temperatura ambiente laboratorial de 20°C, como pode ser observado na Figura 37.

Figura 37. Amostras produzidas sendo resfriadas em temperatura ambiente.



Fonte: Autor (2017).

Dentre todas as pastilhas produzidas, optou-se inicialmente por realizar medições de dureza em 108 delas. Ou seja, dentre os lotes de 8 itens produzidos especificamente com os parâmetros alternados (vide Tabela 3), os quais representam os números dos ensaios enumerados na figura acima, 4 foram selecionados aleatoriamente para que se realizasse as medições. Os outros 4 itens remanescentes de cada lote seriam contraprovas e testemunhas e futuros testes. Feita as medições, o objetivo era tirar uma média de cada lote para que uma comparação final pudesse ser feita.

A análise da Dureza Rockwell para as pastilhas em questão será melhor compreendida nas seções seguintes.

### 4.3.2 Procedimento de ensaio de força de cisalhamento

Segundo a norma ISO 6312:2010, a propriedade de cisalhamento se refere a tensões na área de contato entre o material de atrito e o disco de freio ou tambor. Ainda, este documento diz que a taxa de carga média e a recomendação para variações em taxas instantâneas dadas nesse padrão internacional é baseada a partir de uma verificação do equipamento em uso.

O ensaio de tensão de cisalhamento é um teste em que ocorre o fenômeno de deformação plástica ou ruptura quando um corpo está sujeito a forças que provocam um deslocamento em planos diferentes sem alterar seu volume. Sendo testes destrutivos, seu objetivo utilizando pastilhas de freio é mensurar, em kN, a força de cisalhamento que um determinado componente suporta.

A máquina de cisalhamento utilizada no teste é a Máquina Universal de Ensaio de Cisalhamento, conforme mostrado na Figura 38.

Figura 38. Máquina Universal de Ensaio de Cisalhamento.



Fonte: Autor (2017).

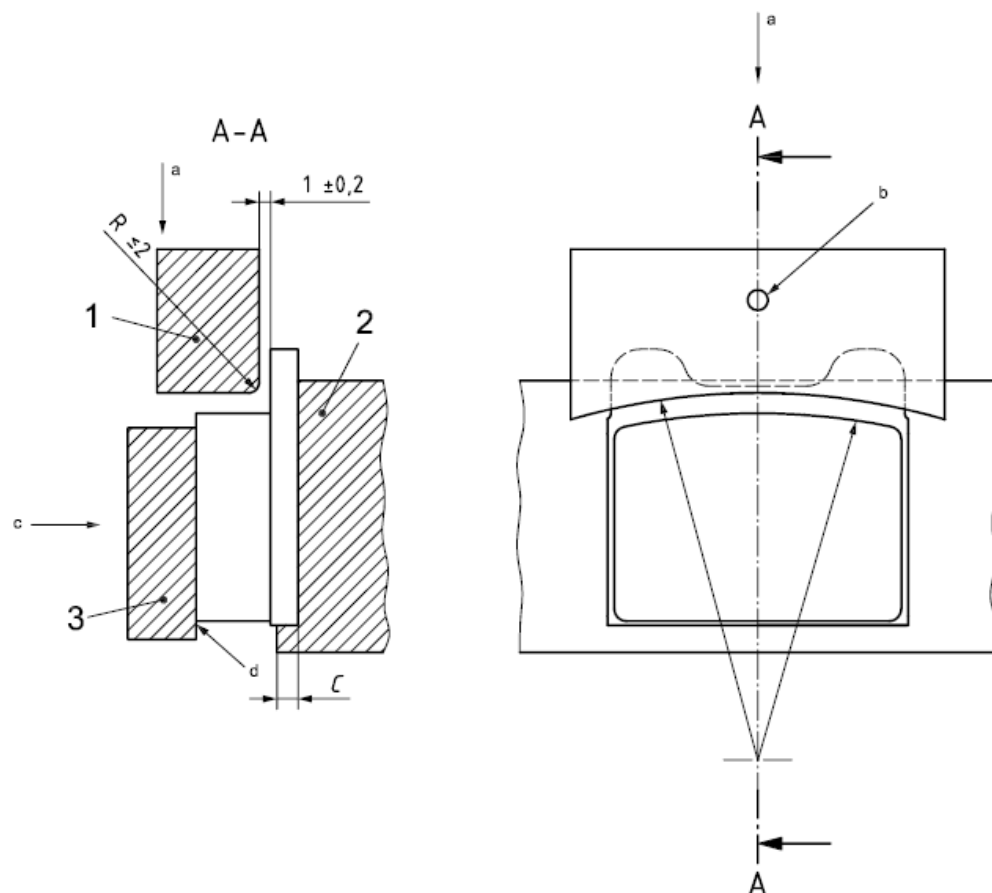
A norma ISO 6312:2010 para testes em pastilha de freio impõe os seguintes fatores:

- O plano da plaqueta deve ser paralelo ao plano de atuação da carga da máquina;
- A ferramenta que proporciona a carga da máquina deve estar em contato com  $1 \pm 0,2$ mm da plaqueta da pastilha;

- A ferramenta de carga deve estar em contato com toda a extensão da área de carga superior do material de atrito da pastilha, e ser ao mesmo tempo paralela à plaqueta;
- A plaqueta não deve sofrer carga;
- Para impedir que a amostra se mova, é necessário que algum dispositivo aplique uma pressão constante de pelo menos  $0,5 \pm 0,15$  N/mm<sup>2</sup> em uma direção perpendicular à da aplicação da força;
- A carga deve ser aplicada de forma a minimizar a interferência dos resultados devido à força de resistência ao atrito.

Esta norma pode ser mais facilmente entendida analisando a Figura 39, onde: (1) ferramenta de carga; (2) suporte da plaqueta; (3) dispositivo de fixação da face do material de atrito; (C) espessura da plaqueta; (a) direção de atuação da força; (b) pivô de guia da ferramenta com a massa de atrito; (c) pressão na face e (d) tensão minimizada na interface de contato entre massa de atrito e dispositivo de fixação.

Figura 39. Dispositivo de teste para pastilha de freio.



Fonte: ISO 6312:2010 (2010, p. 11).

O cálculo da tensão de cisalhamento é regido pela equação abaixo:

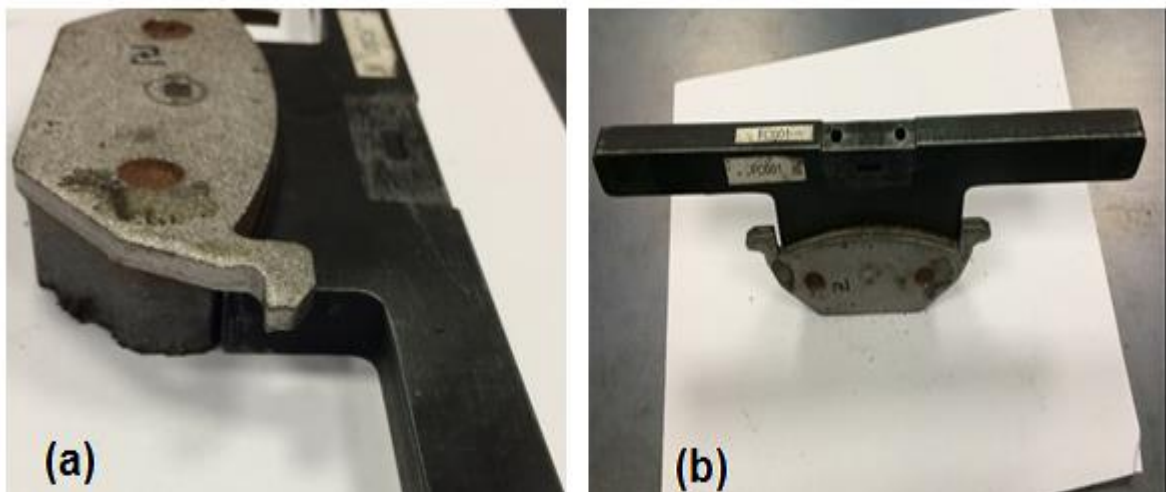
$$\tau = \frac{F}{A} \quad (8)$$

Onde:

- $\tau$ : tensão de cisalhamento;
- $F$ : força de cisalhamento;
- $A$ : área do material.

Para que o cisalhamento pudesse ser feito de maneira correta, dispositivos chamados de “faca” foram criados e usinados de acordo com o raio da área da massa de atrito. Assim, era assegurado que toda a pastilha estaria sofrendo uma força uniforme em sua direção axial. Este dispositivo pode ser melhor compreendido visualizando a Figura 40.

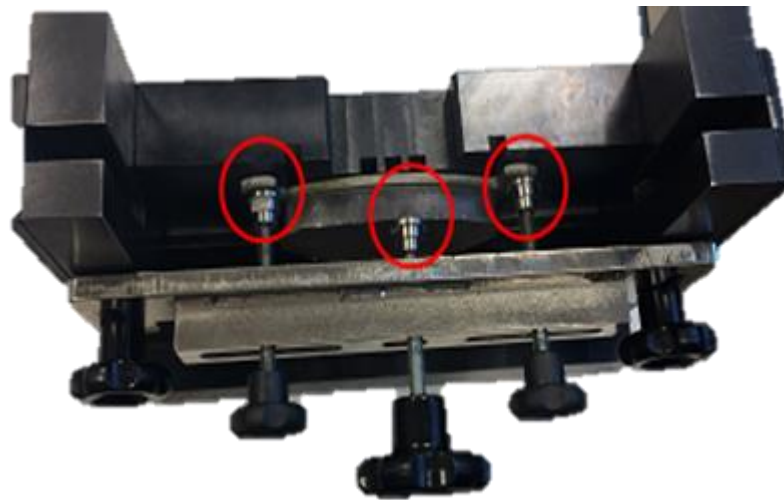
Figura 40. Dispositivo “faca” para cisalhamento da pastilha de freio.



Fonte: Autor (2017)

Para a fixação da pastilha de freio na máquina de cisalhamento, foi desenvolvido um dispositivo que permitisse a fixação das abas e da parte central dela. Assim, a área de interesse de cisalhamento (massa de atrito) não estaria obstruída, permitindo a aplicação da carga com o auxílio da “faca”. O suporte projetado pode ser visualizado na Figura 41.

Figura 41. Suporte para fixação da pastilha de freio na Máquina de Cisalhamento Universal.



Fonte: Autor (2017).

Como o teste de cisalhamento é um ensaio destrutivo, e para poder ter resultados com mais precisão, optou-se por cisalhar as 4 amostras que foram tiradas do lote de 8 previamente citados na Tabela 3. Assim sendo, totalizou-se também 108 ensaios de cisalhamento, sendo 4 itens específicos para cada categoria de combinação de componentes fabricados na termoprensagem.

#### 4.3.3 Análise de aderência periférica e nucleica

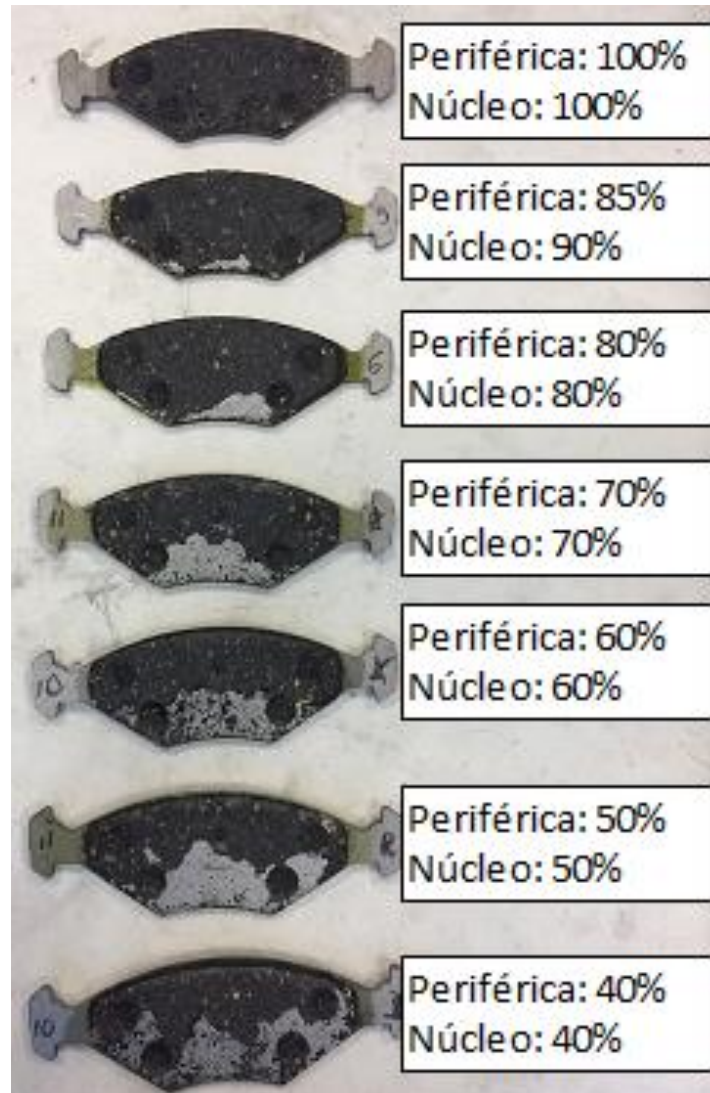
O significado de aderência na área de fabricação de pastilhas automotivas pode ser designado pela quantidade de material de atrito (massa) ou pó de fundo que ficam acoplados à plaqueta após o teste destrutivo de cisalhamento. Contudo, há dois tipos distintos de aderência: periférica e nucleica. Elas podem ser explicadas da seguinte forma:

- Aderência periférica: relativa à parte da massa que se mantém acoplada nas periferias entre a plaqueta e a massa de atrito;
- Aderência nucleica: se refere à parte da massa de atrito que se distancia das periferias em direção ao núcleo (centro). Quando se distancia mais que 2mm da periferia, já é possível observar a aderência nucleica.

Na Figura 42 é possível compreender mais claramente os níveis de aderência periférica e nucleica.



Figura 42. Níveis de aderência periférica e nucleica.



Fonte: Autor (2017).

Para o experimento em questão, optou-se por analisar separadamente as aderências nucleicas e periféricas de cada uma, enfatizando os casos em que houve maior divergência dos resultados.

Deseja-se, sempre, ter uma aderência periférica e nucleica de 100%. Contudo, na prática não é sempre possível obter esses resultados. A variação do processo de produção mostrou isso e será evidenciado no capítulo 5.

## 5. RESULTADOS

No total foram realizadas 324 medições de dureza (3 em cada pastilha; 108 itens) dentre as diferentes características do processo produtivo. Ainda, foram coletados 108 resultados de força de cisalhamento (um para cada amostra selecionada). Assim, foi possível comparar os resultados para avaliar com mais clareza a influência do processo produtivo na qualidade final da pastilha de freio.

Cada tópico será discutido com os resultados obtidos pela Dureza Rockwell e força de cisalhamento, seguido de uma breve análise sobre aderência periférica e nucleica..

É importante salientar que todos os testes foram realizados com as mesmas condições de operação (temperatura ambiente, qualidade do acabamento superficial da pastilha, etc.).

Os resultados foram comparados com os dados obtidos dos testes com amostras originais em laboratório creditado. Esses resultados serviram como base de comparação para os testes realizados na Fremax. Dentre um lote de quatro amostras dos testes, temos os resultados indicados na Tabela 5, onde  $x_1$  é a medida de Dureza Rockwell no centro da pastilha;  $x_2$  é a medida de Dureza Rockwell na extremidade esquerda;  $x_3$  é a medida no canto direito;  $\bar{x}$  é a média das medidas de Dureza;  $\bar{\bar{x}}$  é a média das médias da Dureza; S é o desvio padrão da amostragem.

Tabela 5. Resultado de Dureza Rockwell e Força de Cisalhamento das amostras originais.

Amostra original	Dureza HR $x_1$	Dureza HR $x_2$	Dureza HR $x_3$	Dureza HR $\bar{x}$	Dureza HR $\bar{\bar{x}}$	Desvio Padrão (S)	Força Cisalhamento (kN)	Força Cisalhamento Média (kN)
1	15	34	13	20,66667	18,83333	1,347151	25,6	23,005
2	14	21	22	19			20,17	
3	15	19	20	18			23	
4	16	17	20	17,66667			23,25	

Fonte: (Autor (2017)).

Em relação a aderência periférica e nucleica de duas pastilhas do jogo original, obteve-se o seguinte resultado, observado na Figura 43.

Figura 43. Aderência periférica e nucleica do jogo original.



Fonte: Autor (2017).

Da imagem acima, é possível notar que os dois tipos de aderência encontram-se em níveis máximos, de 100%, visto que tanto a massa de atrito como o pó de fundo, observado na cor marrom, encontram-se acoplados à plaqueta em toda a área ocupada.

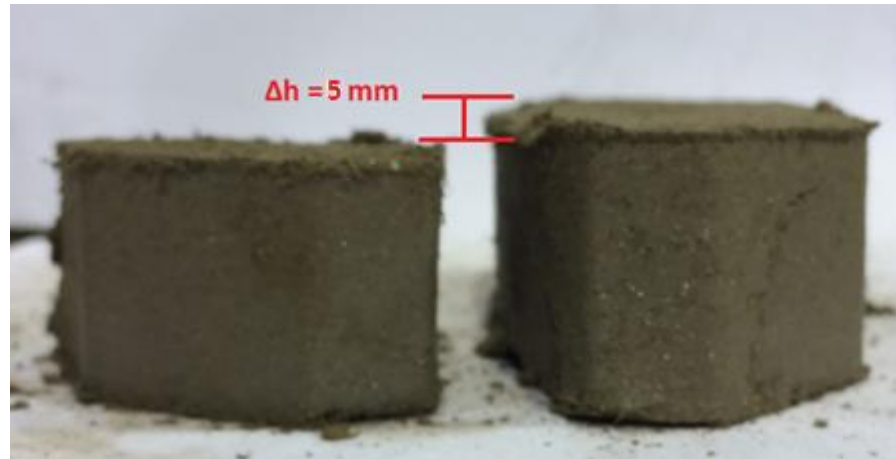
### 5.1 MASSA PRÉ-MOLDADA COM 15 E 45 Bar DE PRESSÃO

Inicialmente, foi importante fabricar *blanks* com as diferentes pressões de pré-moldagem para que ficasse claro a importância desse processo na etapa produtiva. O processo atual deste item utiliza uma pressão de pré-molde de 30Bar, a qual será utilizada nos experimentos deste trabalho. Este parâmetro é dependente da área (geometria da peça), visto que a força com que o êmbolo pressiona o molde é constante.

Fazendo uma comparação entre os *blanks* pré-moldados com 15 e 45 Bar de pressão, é notável uma diferença de tamanho entre os dois. A diferença foi de 5 mm entre uma amostra e outra. Enquanto a primeira apresentou uma medida de 20

mm, a outra obteve 25mm de altura total. A Figura 44 retrata a adversidade entre a variação da pressão nessa etapa do processo.

Figura 44. *Blank* pré-moldado com 45 e 15 Bar, respectivamente.



Fonte: Autor (2017).

Além da notável diferença de tamanho, a amostra prensada com 15 Bar ficou com a estrutura muito frágil, conseqüentemente, bastante quebradiça. Seu manuseio se tornou difícil, o que a impossibilitaria de ser utilizada em processos futuros. Em contrapartida, a unidade prensada com 45 Bar ficou bastante semelhante à outra já utilizada no processo, de 30 Bar. Seu manuseio ficou melhor, além de ter sua rigidez aumentada pelo fato da compactação ser maior.

## **5.2 PRESSÃO DE TERMOPRENSAGEM 86 Bar, TEMPERATURA DO MOLDE $160 \pm 20$ °C, TEMPO DE CURA $240 \pm 120$ s, PRESSÃO DE PRÉ-MOLDAGEM 30 Bar**

A Tabela 6 apresenta os resultados de dureza média e força de cisalhamento, com as pastilhas produzidas com pressão de termoprensagem constante de 86 Bar, variando a temperatura do molde de  $140 \pm 20$ °C e tempo de cura entre  $240 \pm 120$  s.

Cada ensaio representa uma “fornada” do molde de termoprensagem, contendo 8 pastilhas, dentre a qual apenas 4 foram analisadas. As amostras foram enumeradas de 1 a 216, e dentre cada ensaio foram retiradas as 4 primeiras pastilhas para realizar os experimentos.

Tabela 6. Ensaio com pressão de termoprensagem constante em 86 Bar.

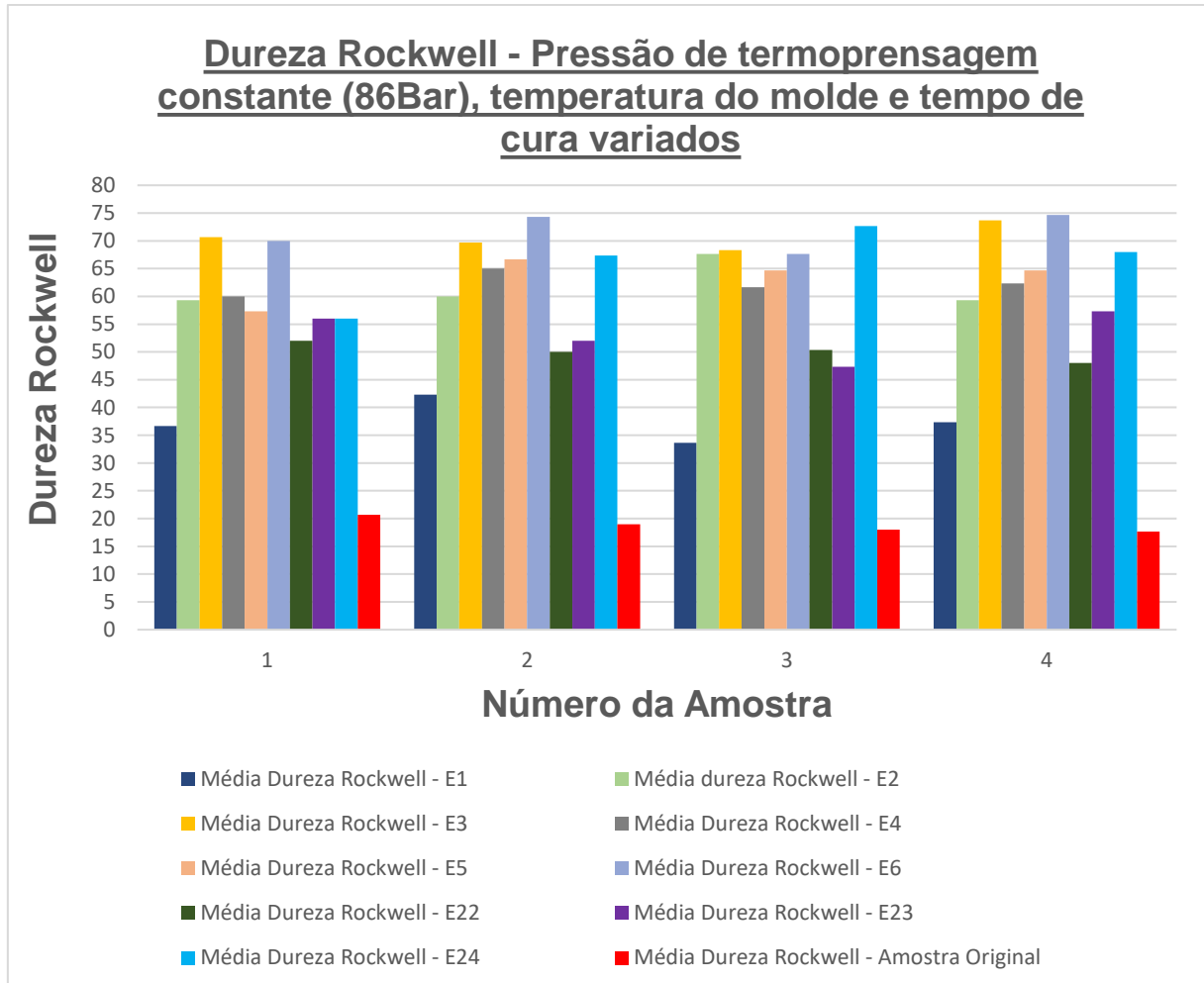
Teste n°	Amostra	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\bar{x}$	$\bar{\bar{x}}$	Desvio Padrão (S)	Força Cisalhamento (kN)	Força Cisalhamento Média (kN)
1	1	44	36	30	36,67	37,5	3,59526	15,8	15,0825
	2	40	46	41	42,33			15,38	
	3	45	32	24	33,67			15,55	
	4	39	34	39	37,33			13,6	
2	9	58	64	56	59,33	61,58	4,06771	17,54	18,4575
	10	62	56	62	60			15,78	
	11	65	70	68	67,67			19,57	
	12	60	62	56	59,33			20,94	
3	17	68	74	70	70,67	70,58	2,26691	19,3	21,0375
	18	69	73	67	69,67			21,2	
	19	71	68	66	68,33			22,11	
	20	71	75	75	73,67			21,54	
4	25	60	66	54	60	62,25	2,07944	17,1	19,54
	26	56	69	70	65			21,02	
	27	55	70	60	61,67			22,47	
	28	60	70	57	62,33			17,57	
5	33	59	60	53	57,33	63,33	4,10961	19,12	19,375
	34	64	75	61	66,67			21,56	
	35	60	70	64	64,67			19,3	
	36	61	65	68	64,67			17,52	
6	41	71	78	61	70	71,67	3,41022	21,92	20,095
	42	73	74	76	74,33			19,55	
	43	65	66	72	67,67			18,67	
	44	71	82	71	74,67			20,24	
22	169	58	52	46	52	50,08	1,64148	21,44	20,63
	170	55	50	45	50			19,08	
	171	55	48	48	50,33			20,35	
	172	45	46	53	48			21,65	
23	177	67	55	46	56	53,17	4,50103	22,3	23,0425
	178	62	45	49	52			22,71	
	179	45	47	50	47,33			22,97	
	180	58	62	52	57,33			24,19	
24	185	68	55	45	56	66	7,0763	23	23,975
	186	73	65	64	67,33			24,09	
	187	75	69	74	72,67			23,86	
	188	69	70	65	68			24,95	

Fonte: Autor (2017).

Na tabela acima:  $x_1$  é a medida de Dureza Rockwell no centro da pastilha;  $x_2$  é a medida de Dureza Rockwell na extremidade esquerda;  $x_3$  é a medida no canto direito; S é o desvio padrão da amostragem; Ensaio 1-24: vide Tabela 3, página 55.

Comparando os resultados obtidos com o ensaio em laboratório com a amostra original, obtemos a Figura 45, onde “E” referencia-se aos ensaios realizados.

Figura 45. Comparação de Dureza Rockwell com a amostra original, pressão de termoprensagem constante em 86 Bar.

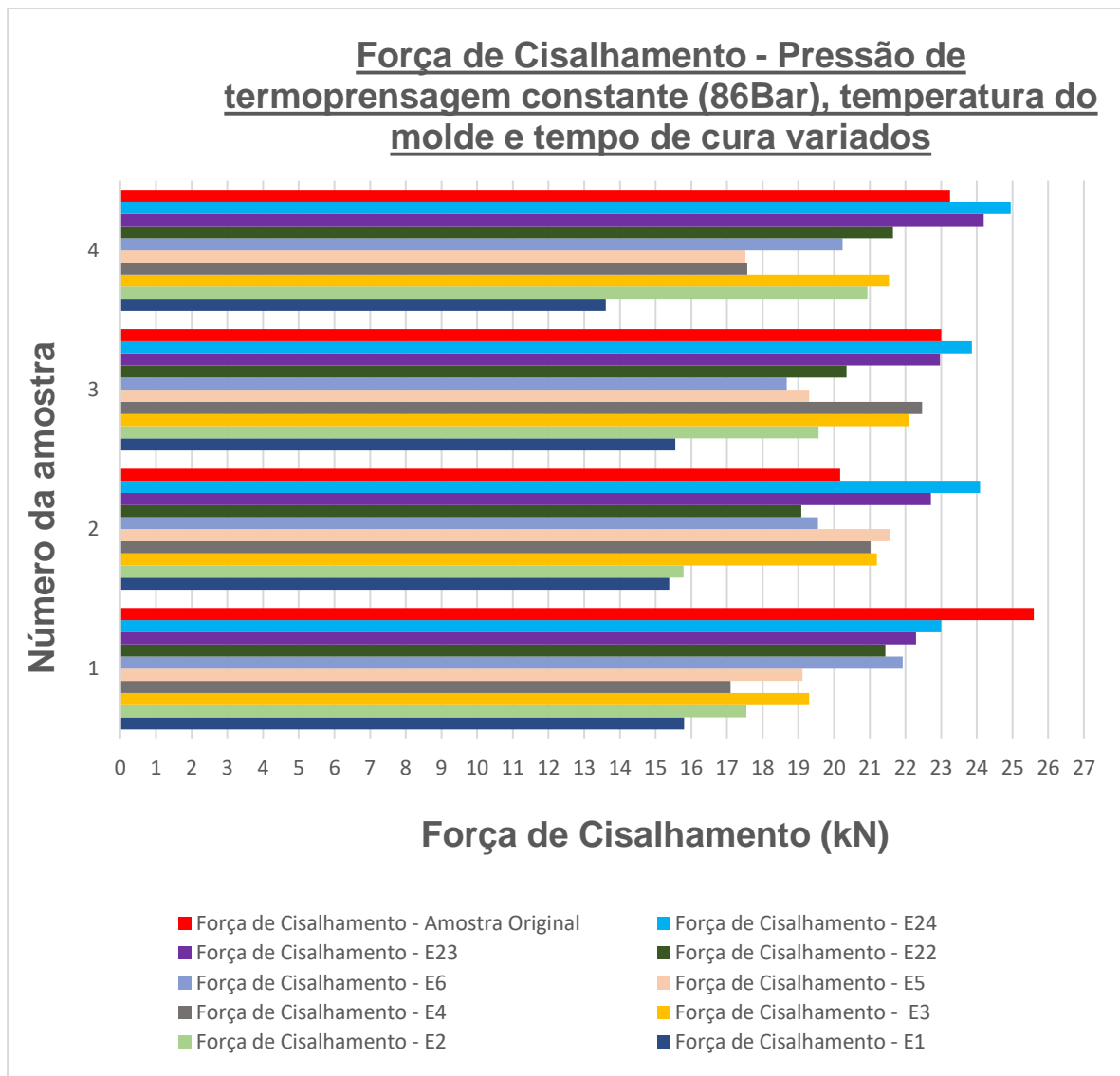


Fonte: Autor (2017).

Dos resultados de laboratório, obteve-se que a dureza média da amostra original é de 18,83 Rockwell, número muito inferior aos resultados de todos os testes realizados utilizando a pressão de termoprensagem constante em 86 Bar, alternando a temperatura do pré-molde e o tempo de cura. O resultado que mais se aproximou da amostra original foi o primeiro ensaio (E1), que obteve uma dureza média de 37,5 Rockwell, resultado que é duas vezes maior que o valor original.

De maneira similar à análise acima, foi feita a análise levando em conta a força de cisalhamento das amostras, e o resultado pode ser observado na Figura 46.

Figura 46. Comparação de Força de cisalhamento com a amostra original, pressão de termoprensagem constante em 86 Bar.



Fonte: Autor (2017).

Dos resultados de laboratório tem-se que a força de cisalhamento média do jogo original é de 23kN. Tanto o ensaio 23 (E23), quanto o ensaio 24 (E24), mostraram-se com características de cisalhamento similares, visto que apresentaram forças médias de, respectivamente, 23,04 e 23,97 kN. As outras amostras divergiram um pouco deste valor, contudo, o ensaio 3 (E3) mostrou um resultado interessante, visto que obteve um valor médio de 21,03 kN de força de cisalhamento.

Em relação à aderência periférica e nucleica, o resultado mostrou-se bastante satisfatório. Nas imagens abaixo, serão listadas o melhor caso e os piores resultados obtidos durante os ensaios.

Como dito, a maioria das amostras obteve uma boa excelente porcentagem de aderência nucleica e periférica. Um exemplo disso é possível observado na Figura 47, onde a amostra 4 possui aderência periférica e nucleica de 100%, visto que tanto a massa de atrito quanto o pó de fundo ficaram acoplados à plaqueta quando houve o cisalhamento.

Figura 47. Aderência periférica e nucleica da amostra 4.



Fonte: Autor (2017).

Os dois piores resultados deste experimento são mostrados abaixo, nas Figuras 48 e 49, respectivamente. No primeiro caso, a amostra número 12 apresenta aderência nucleica de 95% e aderência periférica de 95%. Já no outro caso, a amostra 41 apresenta uma aderência nucleica de 90% e aderência periférica de 85%.

Figura 48. Aderência periférica e nucleica da amostra 12.



Fonte: Autor (2017)

Figura 49. Aderência periférica e nucleica das amostras 41.



Fonte: Autor (2017).



### 5.3 PRESSÃO DE TERMOPRENSAGEM 115 Bar, TEMPERATURA DO MOLDE $160 \pm 20$ °C, TEMPO DE CURA $240 \pm 120$ s, PRESSÃO DE PRÉ-MOLDAGEM 30 Bar

A Tabela 7 mostra os resultados de dureza média e força de cisalhamento, com as pastilhas produzidas com pressão de termoprensagem constante de 115Bar, variando a temperatura do molde de  $140 \pm 20$ °C e tempo de cura entre  $240 \pm 120$ s.

Tabela 7. Ensaios com pressão de termoprensagem constante em 115 Bar.

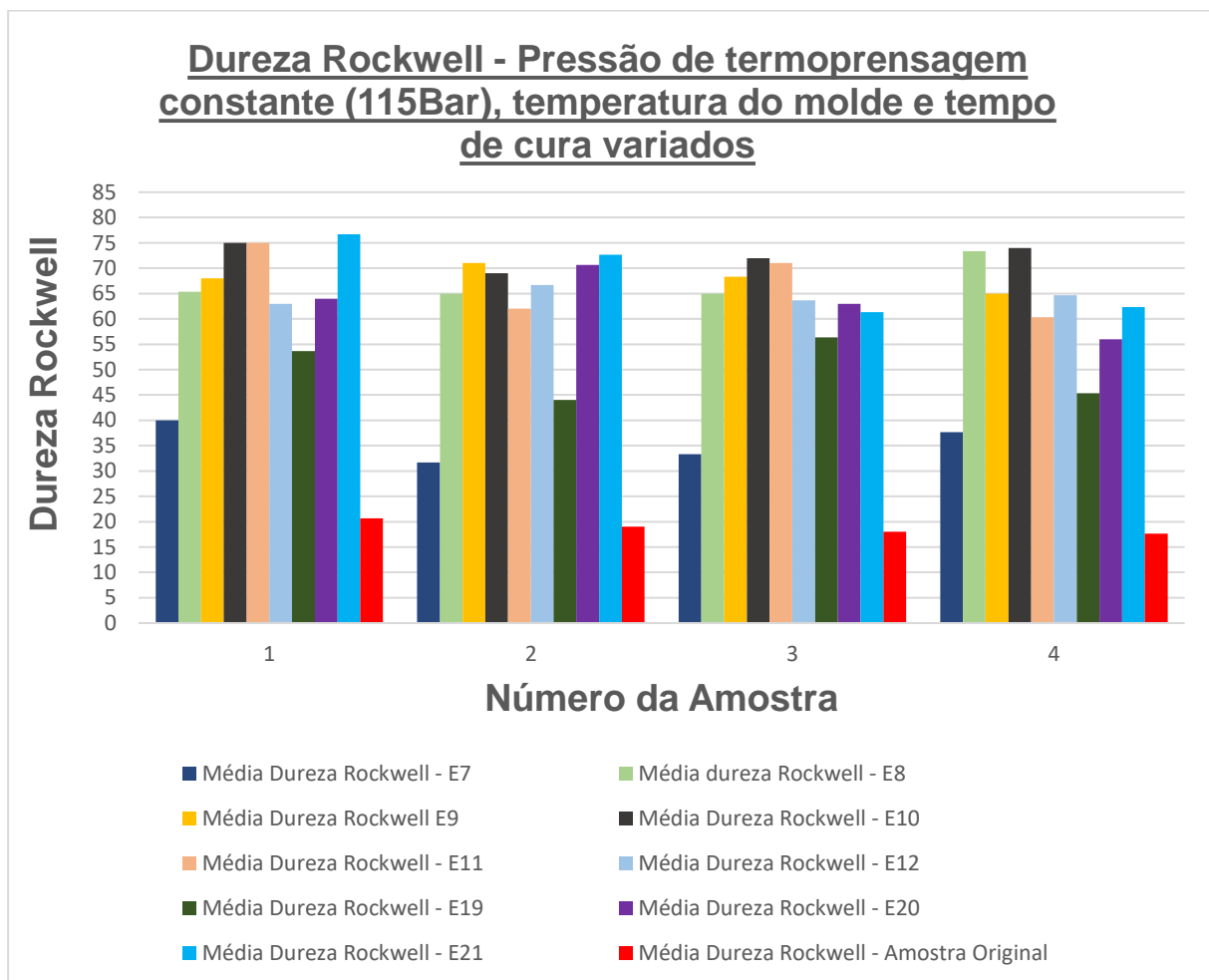
Teste n°	Amostra	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\bar{x}$	$\bar{\bar{x}}$	Desvio Padrão (S)	Força Cisalhamento (kN)	Força Cisalhamento Média (kN)
7	49	41	40	39	40	35,67	3,83937	18,64	18,1925
	50	19	41	35	31,67			15,99	
	51	22	45	33	33,33			18,24	
	52	39	46	28	37,67			19,9	
8	57	65	60	71	65,33	67,17	4,11411	22,73	20,415
	58	67	65	63	65			20,2	
	59	66	67	62	65			19,11	
	60	71	73	76	73,33			19,62	
9	65	60	68	76	68	68,08	2,45515	18,84	18,8275
	66	68	79	66	71			18,02	
	67	72	64	69	68,33			19,89	
	68	68	66	61	65			18,56	
10	73	68	76	81	75	72,5	2,64575	21,77	22,2725
	74	52	78	77	69			25,71	
	75	75	69	72	72			21,98	
	76	61	84	77	74			19,63	
11	81	75	73	77	75	67,08	7,05731	23,12	22,07
	82	69	69	48	62			19,79	
	83	72	71	70	71			22,31	
	84	61	61	59	60,33			23,06	
12	89	64	64	61	63	64,5	1,59861	23,12	21,005
	90	65	69	66	66,67			20,69	
	91	60	63	68	63,67			20,49	
	92	69	68	57	64,67			19,72	
19	145	49	54	58	53,67	49,83	6,08885	19,56	23,3
	146	52	43	37	44			23,04	
	147	58	66	45	56,33			25,73	
	148	49	52	35	45,33			24,87	
20	153	71	65	56	64	63,42	6,00231	23,33	24,9475
	154	76	66	70	70,67			24,37	
	155	62	63	64	63			24,09	
	156	62	57	49	56			28	
21	161	82	72	76	76,67	68,25	7,59812	23,15	24,525
	162	78	73	67	72,67			24,45	
	163	61	64	59	61,33			24,1	
	164	67	53	67	62,33			26,4	

Fonte: Autor (2017).

Na tabela acima:  $x_1$  é a medida de Dureza Rockwell no centro da pastilha;  $x_2$  é a medida de Dureza Rockwell na extremidade esquerda;  $x_3$  é a medida no canto direito; S é o desvio padrão das amostras; Ensaios 7-21: vide Tabela 3, página 5.

Comparando os resultados adquiridos deste teste, junto com os dados da amostra original, previamente coletados, obtemos a Figura 50.

Figura 50. Comparação de Dureza Rockwell com a amostra original, pressão de termoprensagem constante em 115 Bar.

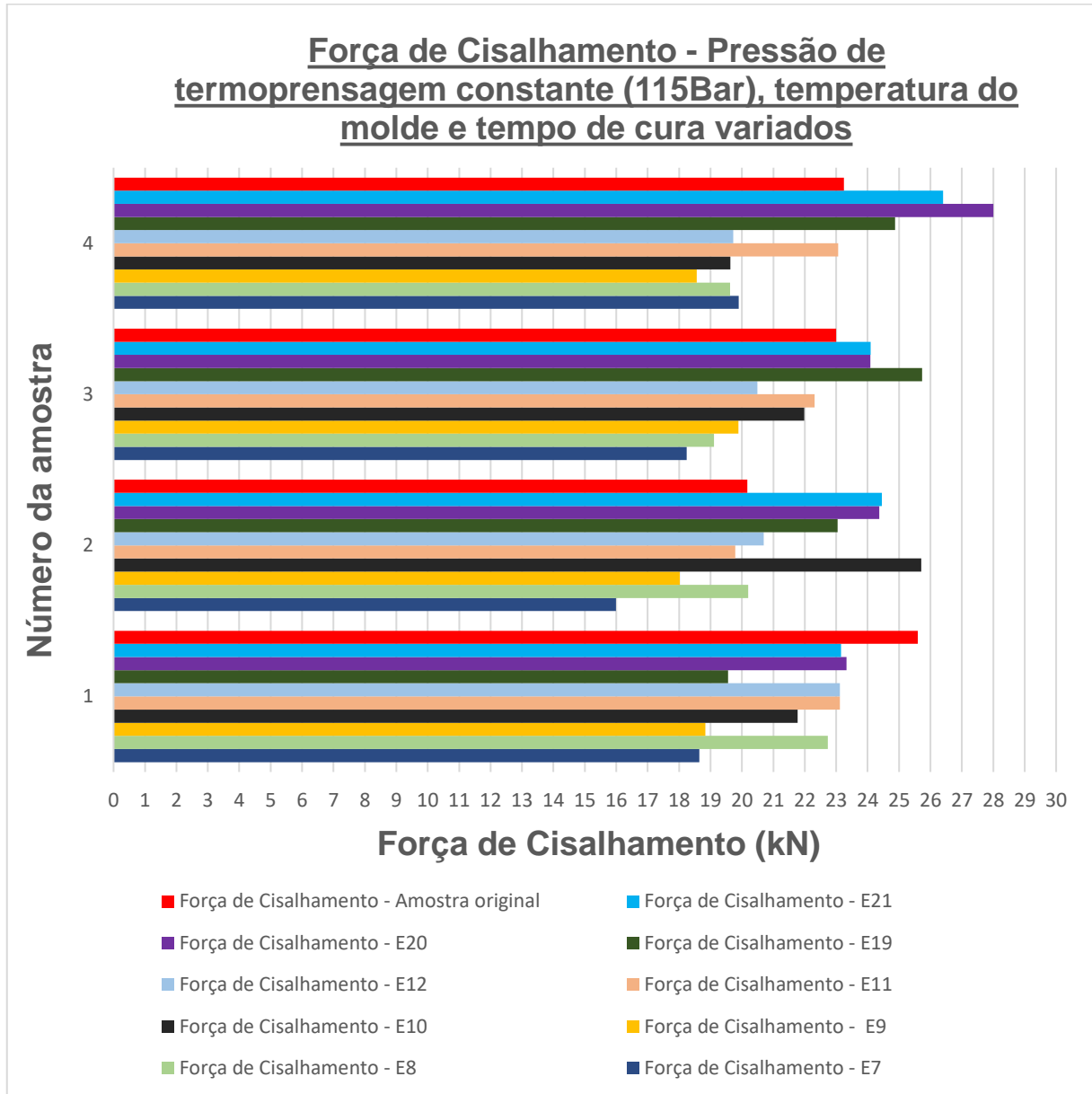


Fonte: Autor (2017).

Da figura acima, observa-se que todas as médias das Dureza Rockwell foram bem superiores ao resultado encontrado em comparação à amostra original. Nota-se que quanto menor a temperatura do molde, embora a pressão estivesse em 115 Bar, menor a dureza do item e que quanto maior o tempo de cura influencia para o acréscimo dela também. Isso é possível de observar ao se analisar o ensaio 7 (E7), ensaio 8 (E8) e ensaio 9 (E), que, para mesma pressão de termoprensagem e temperatura do molde, deram resultados de dureza aumentando de acordo com o acréscimo de tempo de cura.

Fez-se, então, a análise da força de cisalhamento, e o é visto na Figura 51.

Figura 51. Comparação de Força de cisalhamento com a amostra original, pressão de termoprensagem constante em 115 Bar.



Fonte: Autor (2017).

Da imagem acima, é possível observar que o ensaio 19 (E19) apresentou quase o mesmo valor médio de força de cisalhamento que a amostra original, que foram, respectivamente, 23,3 e 23kN. Os dois testes seguintes à este, onde a pressão de termoprensagem foi de 115Bar e a temperatura do molde de 180°C tiveram apenas seu tempo de cura aumentado, em 120s e 240s, respectivamente. Assim, o ensaio 20 (E20) ficou com 24,97 kN de força de cisalhamento e o ensaio 21 (E21) com 24,52kN.

Em relação à aderência periférica e nucleica, o resultado mostrou-se bastante satisfatório. Nas imagens abaixo, serão listadas o melhor caso e os piores resultados obtidos durante os ensaios.

Com essas características de fabricação, a pastilha demonstrou um comportamento um pouco diferente daquele anteriormente citado. Agora, na maioria das amostras, houve uma pequena porção de remoção total de material da plaqueta, tanto pó de fundo quanto massa de atrito. Ou seja, em todos os resultados é possível observar que a aderência periférica não foi de 100%, nem tampouco a nucleica. O melhor caso desse experimento é demonstrado abaixo na Figura 52.

Figura 52. Aderência periférica e nucleica da amostra 68.



Fonte: Autor (2017).

Na Figura 53, referente a amostra 83, se deduz que a aderência nucleica atingiu um índice de 80%, enquanto a periférica ficou com aproximadamente 85%. Este foi o pior caso desta etapa do experimento.

Figura 53. Aderência periférica e nucleica da amostra 83.



Fonte: Autor (2017).

#### 5.4 PRESSÃO DE TERMOPRENSAGEM 144 Bar, TEMPERATURA DO MOLDE $160 \pm 20$ °C, TEMPO DE CURA $240 \pm 120$ s, PRESSÃO DE PRÉ-MOLDAGEM 30 Bar

A Tabela 8 demonstra os resultados de dureza média e força de cisalhamento, com as pastilhas fabricadas com pressão de termoprensagem constante de 144 Bar, variando a temperatura do molde de  $140 \pm 20$ °C e tempo de cura entre  $240 \pm 120$ s.

Tabela 8. Ensaios com pressão de termoprensagem constante em 144 Bar.

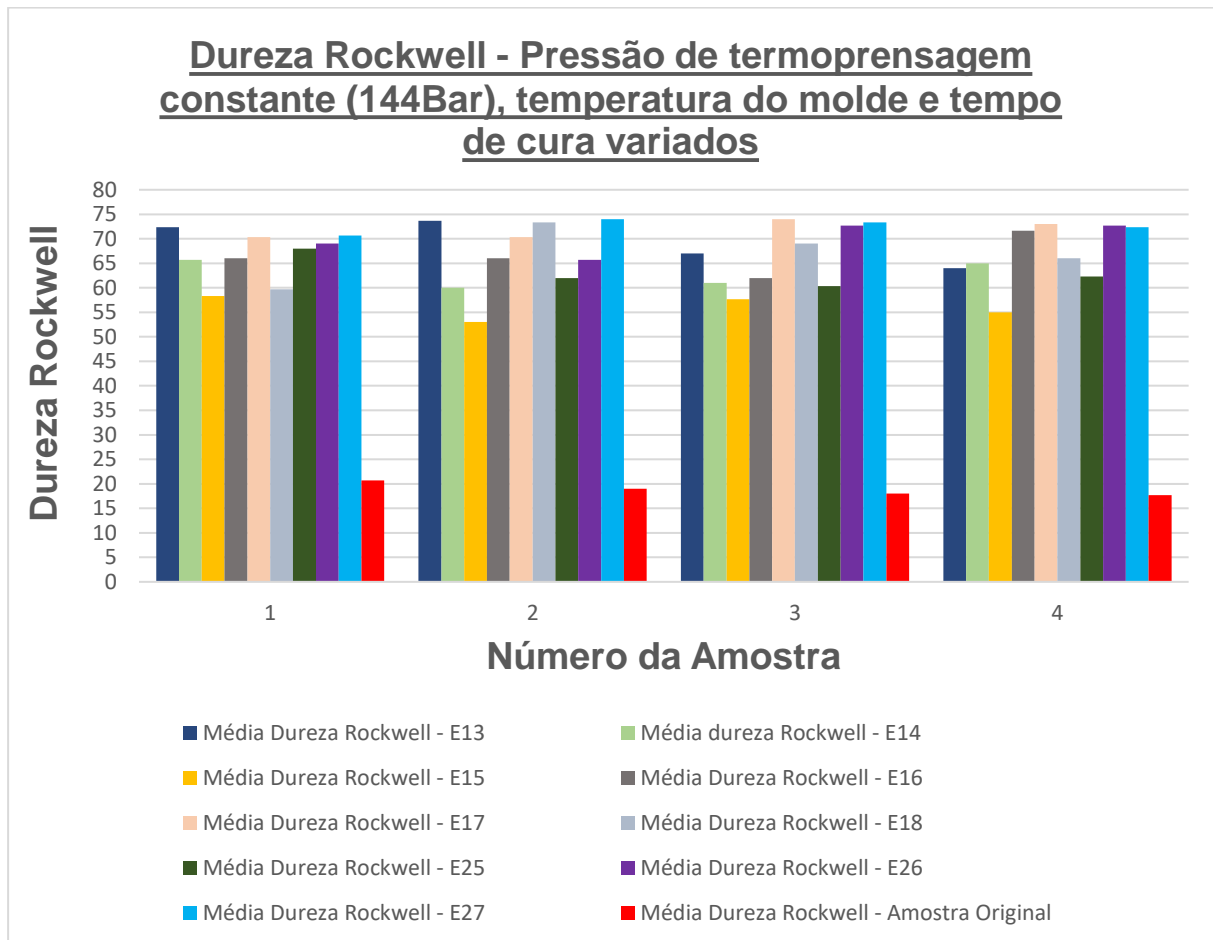
Teste n°	Amostra	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\bar{x}$	$\bar{\bar{x}}$	Desvio Padrão (S)	Força Cisalhamento (kN)	Força Cisalhamento Média (kN)
13	97	68	76	73	72,33	69,25	4,5328	21,35	21,54
	98	73	75	73	73,67				
	99	58	68	75	67				
	100	59	64	69	64				
14	105	69	65	63	65,67	62,92	2,83333	19,69	20,2675
	106	57	56	67	60				
	107	60	57	66	61				
	108	63	69	63	65				
15	113	54	66	55	58,33	56	2,46456	20,51	21,46
	114	56	49	54	53				
	115	65	54	54	57,67				
	116	49	61	55	55				
16	121	64	72	62	66	66,42	3,97562	22,42	24,635
	122	65	66	67	66				
	123	70	60	56	62				
	124	65	77	73	71,67				
17	129	71	74	66	70,33	71,92	1,8733	21,28	22,0525
	130	73	72	66	70,33				
	131	80	72	70	74				
	132	69	81	69	73				
18	137	54	50	75	59,67	67	5,74134	26,44	25,7325
	138	75	73	72	73,33				
	139	72	71	64	69				
	140	67	66	65	66				
25	193	72	67	65	68	63,17	3,33888	24,87	24,3625
	194	65	50	71	62				
	195	68	55	58	60,33				
	196	72	65	50	62,33				
26	201	73	66	68	69	70	3,3665	27,3	27,1425
	202	69	55	73	65,67				
	203	75	73	70	72,67				
	204	76	71	71	72,67				
27	209	77	67	68	70,67	72,58	1,44978	25,6	25,475
	210	76	74	72	74				
	211	70	72	78	73,33				
	212	72	74	71	72,33				

Fonte: Autor (2017).

Na tabela acima:  $x_1$  é a medida de Dureza Rockwell no centro da pastilha;  $x_2$  é a medida de Dureza Rockwell na extremidade esquerda;  $x_3$  é a medida no canto direito; S é o desvio padrão das amostras; Ensaio 13-276: vide Tabela 3, página 55.

Analisando os resultados advindos deste ensaio, junto com os resultados da amostra original, previamente coletados, obtém-se a Figura 54.

Figura 54. Comparação de Dureza Rockwell com a amostra original, pressão de termoprensagem constante em 144 Bar.

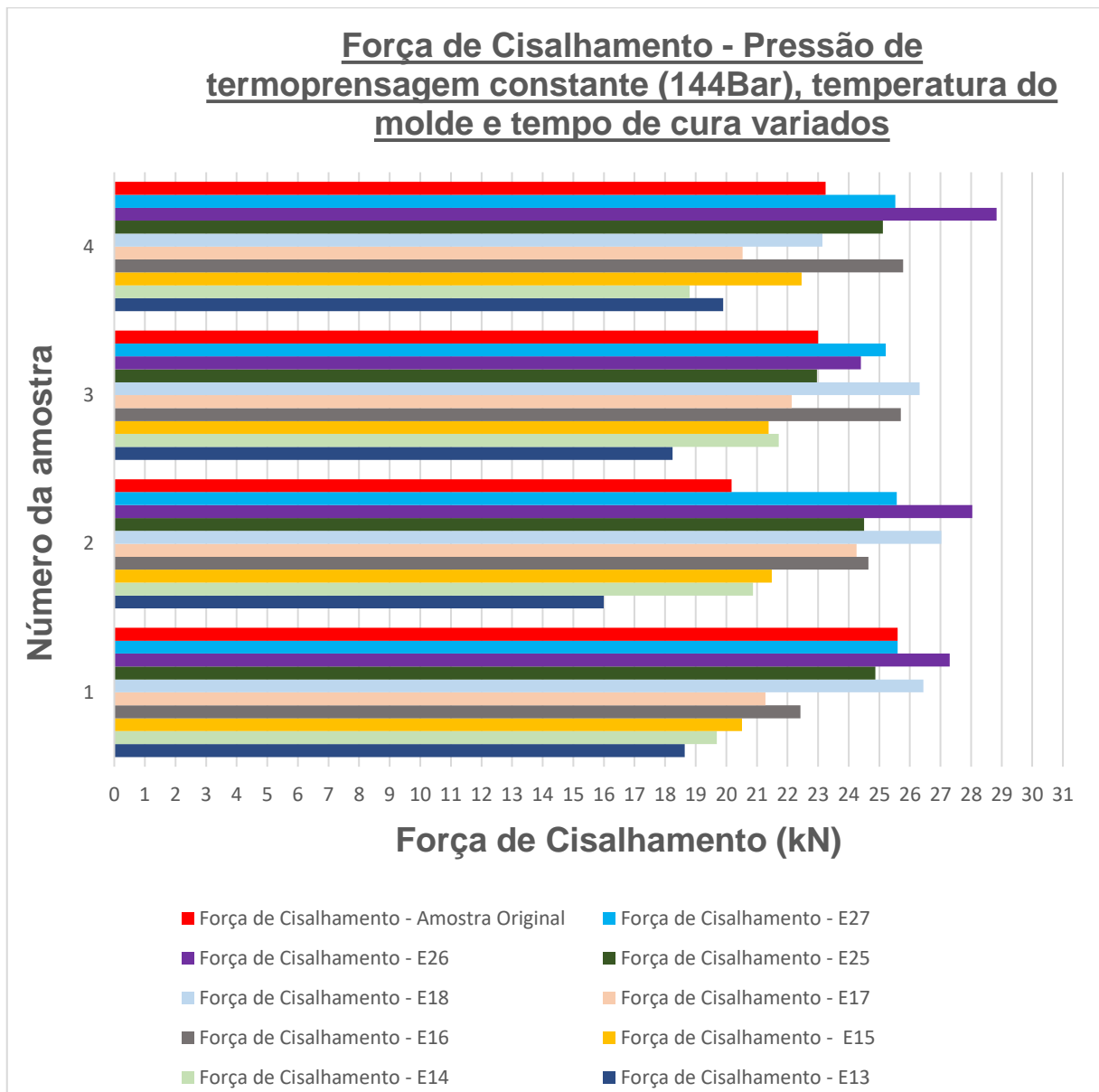


Fonte: Autor (2017).

Da Figura acima, observa-se que a dureza média da Dureza Rockwell de todos os testes foram muito superior à da amostra original, dificultando uma comparação acurada. Portanto, independentemente da temperatura do molde e do tempo de cura, a pressão de termoprensagem foi o fator predominante no quesito dureza.

Fez-se, então a análise da força de cisalhamento, e o resultado é visto na Figura 55.

Figura 55. Comparação de Força de cisalhamento com a amostra original, pressão de termoprensagem constante em 144 Bar.



Fonte: Autor (2017).

Analisando o aspecto de força de cisalhamento média necessária para romper a massa de atrito da plaqueta, o ensaio 17 (E17) obteve valor próximo ao da amostra original, sendo, respectivamente, 22,05 e 23kN. Os ensaios 18 (E18) e 26 (E26) obtiveram valores próximos, sendo o primeiro de 25,73kN e o outro de 27,14kN. É interessante reparar que nesses dois ensaios o único fator que variou foi a temperatura do molde, sendo de 20°C pra mais no E26.

Em relação à aderência periférica e nucleica, comparando aos resultados dos dois primeiros testes, este foi o que teve o resultado menos satisfatório.

Com essas características de processo de fabricação, a pastilha demonstrou um comportamento similar ao segundo caso citado, porém sua aderência periférica foi pior em geral. Dos resultados obtidos é possível observar que a aderência periférica não foi de 100%, embora houvesse casos em que a nucleica obteve padrão excelente. O melhor caso dentre as pastilhas desse experimento é demonstrado abaixo, na Figura 56.

Figura 56. Aderência periférica e nucleica da amostra 122.



Fonte: Autor (2017).

Na Figura 57, referente a amostra 121, é possível identificar a aderência periférica e nucleica de, respectivamente, 75 e 85%.

Figura 57. Aderência periférica e nucleica da amostra 83.



Fonte: Autor (2017).

Uma situação ruim observado foi a da amostra 137, Figura 58, em relação a sua aderência periférica, a qual ficou em aproximadamente 70%. Em contrapartida, sua aderência nucleica obteve resultados razoáveis, estagnando em cerca de 80%.

Figura 58. Aderência periférica e nucleica da amostra 137.



Fonte: Autor (2017).



## 6. CONCLUSÃO

Após a realização dos testes de produção com as pastilhas de freio, ficou evidente que a variação dos parâmetros de fabricação altera significativamente as propriedades finais delas.

Inicialmente, é possível afirmar que a pressão de pré-moldagem possui grande importância no processo produtivo. Massas fabricadas com pressões muito baixas, de 15 Bar, possuem pouca compactação, e isso dificulta o manuseio do operador entre um setor e outro. Além disso, quando ela se encontra pouco compactada e muito quebradiça, na etapa de termoprensagem, ela não consegue ocupar toda a área da ferramenta de maneira correta, o chamado de escoamento. Já massas compactadas com pressões elevadas, de 45 Bar, não impactam diretamente no processo produtivo, visto que elas terão o mesmo modo de operação se comparadas com o padrão de 30 Bar. Entretanto, ela gera um custo desnecessário para a etapa produtiva ao decorrer do tempo, pois quanto maior a pressão de compactação, mais tempo o êmbolo permanece empurrando a ferramenta contra o molde e mais energia consome. Portanto, a massa pré-moldada ideal é aquela em que há um benefício na relação produtividade e gastos indiretos.

Utilizando uma pressão constante de 86 Bar na termoprensagem e variando a temperatura do molde em 140°C em  $\pm 15\%$ , a dureza de todos os testes apresentou resultado superior em relação à amostra original, sendo a menor defasagem em relação ao ensaio 1 (E1), com uma variação de 49%. Em relação à força necessária para cisalhar a massa da plaqueta, os dois últimos ensaios (E23 e E24) desse experimento apresentaram resultados similares à original de 23 kN. Portanto, para a pressão de 86 Bar de termoprensagem, a melhor configuração da máquina seria utilizar 180°C na temperatura do molde com tempos de cura de 240 ou 360s.

Fixando a pressão do molde de termoprensagem em 115 Bar, a dureza de todas as pastilhas permaneceu ainda com nível muito elevado se comparada com o

item OEM. Já a força de cisalhamento se aproximou nos ensaios 19, 20 e 21, sendo, respectivamente, de 23,3 kN, 24,9k N e 24,5 kN, onde a temperatura do molde utilizada foi de 180°C e o tempo de cura variou de 240 ± 120s.

No último teste, a pressão do molde utilizada foi de 144 Bar, e, de maneira similar aos ensaios anteriores, o valor da dureza das pastilhas permaneceu bem superior à da amostra original. Entretanto com esta pressão utilizada e com a temperatura do molde a partir de 160°C, a força necessária para cisalhar a pastilha obteve valores similares e superiores em relação às amostras OEM.

Compilando todos estes resultados, conclui-se que o tempo de cura pouco influencia nos resultados de dureza e força necessária para cisalhar a massa da plaqueta das pastilhas de freio. Em contrapartida, a temperatura do molde mostrou ser o fator predominante tanto no valor de dureza quanto no resultado de força de cisalhamento. Esta variável consegue obter bons resultados mesmo quando utilizada em tempos de cura baixos, de 120 s.

Na teoria, pastilhas de freio mais duras tendem a gerar mais ruído, uma vez que se deformam menos quando em contato com o disco de freio. Porém na prática isso não é real, visto que a composição da massa de atrito é que vai reger essa característica. Embora os itens produzidos tenham apresentado dureza muito superiores, eles não geram ruído, principalmente em baixa velocidade. Esta pastilha está sendo testada por funcionários da empresa que já rodaram mais de 2500 km, e foi produzida com a mesma composição e características de fabricação do ensaio 11 (E11), com pressão de termoprensagem de 115 Bar, temperatura do molde de 160°C e tempo de cura de 240 s, e segundo eles o resultado foi excelente neste quesito. Quanto à força de cisalhamento, a mistura mostrou-se superior na grande maioria dos testes. Quanto maior a força necessária para cisalhar a plaqueta, melhor, visto que o material acoplado na plaqueta terá mais resistência e será mais difícil de se romper.

Em relação à aderência periférica e nucleica, a grande maioria dos experimentos apresentou resultado excelente, salvo exceções mostradas e detalhas anteriormente. Isso comprova que a formulação, aliada ao processo, está adequada para a produção, porém há espaço para aprimoramentos.

Com este experimento, foi possível observar que há melhorias a serem feitas no processo, como por exemplo utilizar a mesma pressão de termoprensagem que é utilizada atualmente, de 115 Bar, aumentando apenas a temperatura do molde para

180°C, para o mesmo tempo de cura de 240 s. Assim, obteríamos peças com durezas semelhantes, porém mais resistentes ao cisalhamento. De maneira análoga, poderia-se fazer o processo apenas alterando a pressão inicial de 115Bar para 144 Bar, para a mesma temperatura do molde e mesmo tempo de cura. O tempo de cura de 120 s apresentou resultados ruins, e o de 360 s mostrou resultados semelhantes. Quanto maior o tempo de cura, mais tempo para fabricar as pastilhas, e menor será a produtividade. Assim, manter o tempo de cura em 240 s seria ideal.

O fato de possibilitar melhorias no processo produtivo já justifica o investimento de tempo em realizar o *DOE*. Através dos testes realizados fica evidente quais parâmetros possuem comportamento majoritário e minoritário quando se deseja criar um componente com determinada característica, além de determinar qual processo possui a melhor relação custo x benefício para a empresa.

## **6.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

Em um trabalho futuro, pode-se estudar características de desgaste e atrito simulando, através de um dinamômetro de bancada, a vida útil da pastilha de freio. Assim, seria possível obter um resultado acurado do coeficiente de atrito para as diversas velocidades e temperatura de operação. Além disso, um estudo de compressibilidade da massa de fricção poderia ser feito, comparando-o novamente com as propriedades do item original. Dessa forma seria possível obter dados sobre o comportamento do material de atrito em relação à sua composição, visando aprimorar a mistura.

Outro assunto interessante a ser explorado seria utilizar de fato essas pastilhas fabricadas em diferentes veículos, no perímetro urbano preferencialmente, para que se obtenha opiniões sobre o desempenho e o ruído delas.

## REFERÊNCIAS

- BELHOCINE, Ali; ABDULLAH, Oday. **Finite element analysis of automotive disc brake and pad in frictional model contact**. Islamic Azad University. Majlesi Branch, 2014.
- BOSCH, Robert. **Manual de tecnologia automotiva**. 25. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.
- BRITO, Valdir. **Visão geral sobre material de fricção**. Indaiatuba/SP, 2016.
- CHOLLET, H. **Curso prático e profissional para mecânicos de automóveis: o veículo e seus componentes**. Curitiba: Hemus, 2002.
- ERIKSSON, Mikael. **Friction and Contact Phenomena of Disc Brakes Related to Squeal**. ACTA Universitatis Upsaliensis. Faculty of Science and Technology, 2000.
- GILLESPIE, Thomas. **Fundamentals of vehicle dynamics**. Society of Automotive Engineers. Warrendale, Estados Unidos, 1992.
- GONÇALVES, Jeferson. **Geração de ruído de alta frequência em sistemas de freio a disco**. 2011. 115p. Dissertação (Mestrado) - Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.
- HEDGBETHM, Llewellyn. **Hitting the brakes: a history of automotive breaks**. Second Chance Garage, 2017. Disponível em <<http://www.secondchancegarage.com/public/history-of-automotive-brakes-1.cfm>>. Acesso em: 20.jan.2017.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 6312:2010**. Road vehicles – Brake linings – Shear test procedure for disc brake pad and drum brake shoe assemblies. Rio de Janeiro, 2010.
- JÓDAR, Carlos. **Análise comparativa do nível de ruído produzido por pastilhas de freio originais e do mercado de reposição brasileiro**. 2015. 34. Dissertação (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.
- KAWAGUCHI, Hiroaki. **Comparação da análise de conforto de frenagem subjetiva x objetiva de um veículo de passeio**. 2002. 118p. Dissertação (Graduação) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.
- KRUMMEL, Daniel. **Análise de desempenho entre pastilhas de freio do Mercado de reposição e original**. 2014. 20p. Dissertação (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014.

PIETRO, Ronaldo Deziderio. **Freios Hidráulicos: da física básica à dinâmica veicular, do sistema convencional aos sistemas eletrônicos.** São Paulo: SENAI-SP Editora, 2014.

RUZZI, Melissa. **Medições de Propriedades Dinâmicas de Materiais de Pastilhas de Freios Automotivos.** 2004. [s.n]. Dissertação (Mestrado) – Univerisade de São Paulo. São Paulo, 2004.

SCLAR, Deanna. **Mecânica de automóveis.** 2<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Alta Books, 2015.