

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

CLARICE RODRIGUES DE OLIVEIRA

ANÁLISE DOS MECANISMOS DE DESGASTE DAS PASTILHAS DE FREIO EM
ENSAIO DE BANCADA

Joinville
2023

CLARICE RODRIGUES DE OLIVEIRA

ANÁLISE DOS MECANISMOS DE DESGASTE DAS PASTILHAS DE FREIO EM
ENSAIO DE BANCADA

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Automotiva do Centro Tecnológico de Joinville
da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof.Dr. Andrea Piga Carboni.

Coorientador: Prof.Dr. Thiago Antonio
Fiorentin.

Joinville
2023

Dedico este trabalho ao meu marido, Clayton, e aos meus pais, Marcos e Cleonice. Sem a presença e apoio de vocês, nada disso seria possível. Devo todas as minhas conquistas a cada um de vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Dr. Andrea Piga pela orientação e ensinamentos ao longo desta jornada. Ao meu coorientador professor Dr. Thiago Antonio Fiorentin, agradeço pelas contribuições no desenvolvimento deste estudo, assim como a todos os integrantes do projeto, especialmente ao Laboratório de Acústica e Vibrações, ao programa ROTA 2030 e à Fundação de Ensino e Engenharia de Santa Catarina (FEESC).

Expresso minha gratidão ao Laboratório de Sistemas Veiculares, Laboratório de Materiais e Laboratório de Metrologia por disponibilizarem espaço e equipamentos essenciais para a montagem da bancada e análise de material.

Agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina por proporcionar os meios necessários para meu desenvolvimento profissional e social.

Agradeço a Deus por me dar forças para superar os obstáculos. À minha família e aos meus amigos, cujo apoio foi fundamental ao longo de toda a minha trajetória universitária, possibilitando a realização dos meus objetivos.

Sabemos que todas as coisas cooperam para o bem daqueles que amam a Deus, daqueles que são chamados segundo o seu propósito (Romanos 8:28).

RESUMO

O trabalho analisa os mecanismos de desgaste em pastilhas de freio, incluindo processos físicos e químicos em dois tipos de pastilhas, considerando o material particulado (MP) como o principal contribuinte para a poluição do ar, com impactos significativos na saúde. Durante a utilização, a matriz polimérica das pastilhas de freio sofre desgaste devido ao aumento das tensões e temperaturas nas áreas circundantes. Esse desgaste é um processo complexo que inclui fusão, liga mecânica e tribooxidação, levando à formação de um filme de óxido duro chamado platô. A vida útil do platô é finita, influenciada por desgaste, geração de calor e tensões mecânicas, diminuindo sua estabilidade. A rugosidade do disco de freio induz movimentos e vibrações nos platôs, propiciando a propagação de fissuras. A estrutura, junto com a partícula original, perde suporte na matriz, levando eventualmente à ruptura do platô do sistema. Testes foram realizados em um sistema de freio a disco da moto G 310 GS no Laboratório de Sistemas Veiculares da UFSC. Medidas de massa, espessura e rugosidade foram feitas antes e após os experimentos, com o propósito de monitorar o desgaste na pastilha de freio. Foram realizadas análises detalhadas dos platôs nas pastilhas de freio, utilizando técnicas avançadas como a Microscopia Metalográfica e o programa Fiji. A microscopia possibilitou o estudo da estrutura, enquanto o Fiji permitiu análises quantitativas, incluindo medidas de área relativa, número médio e perímetro médio dos platôs. O estudo revelou variações significativas na massa e espessura das pastilhas de freio, além de mudanças notáveis na rugosidade durante os experimentos.

Palavras-chave: Pastilhas de Freio. Mecanismos de Desgaste. Platôs.

ABSTRACT

The paper examines the wear mechanisms in brake pads, encompassing physical and chemical processes in two types of pads, considering particulate matter (PM) as the main contributor to air pollution, with significant impacts on health. During usage, the polymeric matrix of brake pads undergoes wear due to increased stresses and temperatures in the surrounding areas. This wear is a complex process involving fusion, mechanical alloying, and tribooxidation, leading to the formation of a hard oxide film called a plateau. The lifespan of the plateau is finite, influenced by wear, heat generation, and mechanical stresses, reducing its stability. The roughness of the brake disc induces movements and vibrations in the plateaus, facilitating the propagation of fissures. The structure, along with the original particle, loses support in the matrix, eventually leading to the rupture of the system's plateau. Tests were conducted on a disc brake system of the G 310 GS motorcycle at the Vehicle Systems Laboratory of UFSC. Mass, thickness, and roughness measurements were taken before and after the experiments, aiming to monitor wear in the brake pad. Detailed analyses of the plateaus in the brake pads were performed using advanced techniques such as Metallographic Microscopy and the Fiji program. Microscopy enabled the study of the structure, while Fiji allowed quantitative analyses, including measurements of relative area, average number, and average perimeter of the plateaus. The study revealed significant variations in the mass and thickness of the brake pads, along with notable changes in roughness during the conducted experiments.

Keywords: Brake Pads. Wear Mechanisms. Plateaus.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Contato pastilha/disco: Sentido do deslizamento com a formação dos platôs primário e platôs secundários.	15
Figura 2 – Modos de desgaste	17
Figura 3 – Principais fatores influenciadores nas taxas de desgastes.	19
Figura 4 – Classificação do desgaste abrasivo: (a) desgaste a dois corpos; (b) desgaste a três corpos.	19
Figura 5 – Tipos de mecanismos de desgaste	20
Figura 6 – Processo de desgaste abrasivo por microindentação.	21
Figura 7 – Esquema representativo da adesão	22
Figura 8 – Esquema de desgaste por fadiga	23
Figura 9 – Esquema de freio à disco (a) e freio a tambor (b)	24
Figura 10 – Sistema de freio mais utilizado no Brasil	25
Figura 11 – Componentes de um freio a disco.	26
Figura 12 – Pastilha de freio e suas camadas constituintes.	27
Figura 13 – (a) Freio a disco do tipo Cáliper Fixo e (b) Cáliper Flutuante.	28
Figura 14 – (a) Disco de freio maciço, (b) disco de freio perfurado, (c) disco de freio perfurado e com superfície ranhurada e (d) disco de freio perfurado e com superfície furada.	29
Figura 15 – Exemplo de Dinamômetro Inercial	35
Figura 16 – Alterações no perfil do par pastilha-disco e, à direita, apresentar uma pequena seção ampliada.	37
Figura 17 – Diferentes momentos $t_0 < t_1 < t_2$: Crescimento de um platô.	38
Figura 18 – (a) Microscopia eletrônica de varredura de uma pastilha de freio desgastada, com direção de deslizamento da esquerda para a direita. (b) Microscopia confocal de uma pastilha de freio desgastada, com direção de deslizamento de cima para baixo.	39
Figura 19 – Diferentes momentos $t_3 < t_4 < t_5$: destruição de um platô.	39
Figura 20 – O contato entre pastilha e disco envolve quatro fases: (a) a composição da pastilha nova, (b) a formação de um platô, (c) o crescimento do platô com aumento da instabilidade e (d) a destruição do platô.	40
Figura 21 – Platôs de contato na superfície de uma pastilha de freio orgânica. Os platôs de contato apresentam a típica superfície ranhurada, como pode ser observado no detalhe ampliado	41

Figura 22 – Platôs na superfície de uma pastilha de freio orgânica podem se formar após a frenagem em (a) condições de baixa pressão e temperatura de freio e (b) em condições de alta pressão e temperatura.	41
Figura 23 – Três ampliações consecutivas da superfície de contato da pastilha revelam distintos platôs de contato.	42
Figura 24 – Em uma pastilha de freio orgânica, observamos a presença de dois platôs primários que sustentam um platô secundário. Uma imagem MEV de elétrons secundários (SE) fornece informações topográficas da superfície (Figura a), enquanto uma imagem de elétrons retroespalhados (BSE) revela o contraste na composição do material (Figura b).	43
Figura 25 – Sistema de Freios BMW G 310 GS	44
Figura 26 – Configuração da Câmara	46
Figura 27 – Representação esquemática dos pontos de medição da espessura da posição externa e interna da pastilha	47
Figura 28 – Representação esquemática dos pontos de medição da rugosidade da posição externa e interna da pastilha	47
Figura 29 – Montagem do suporte na moto	49
Figura 30 – Conjunto de pastilhas	51
Figura 31 – Representação do pré-processamento de imagem.	55
Figura 32 – Representação do pré-processamento de imagem.	55
Figura 33 – Temperatura do primeiro ensaio - Pastilha Metálica	57
Figura 34 – Temperatura do primeiro ensaio - Pastilha Orgânica	58
Figura 35 – Temperatura do segundo ensaio - Pastilha Metálica	59
Figura 36 – Temperatura do segundo ensaio - Pastilha Orgânica	59
Figura 37 – Imagens obtidas por Microscopia Metalográfica - 100x - para pastilha metálica: a) Antes do ensaio; b) Após o primeiro ensaio.	64
Figura 38 – Imagens obtidas por Microscopia Metalográfica - 200x - para pastilha metálica após o primeiro ensaio	65
Figura 39 – Imagens obtidas por Microscopia Metalográfica - 200x - para pastilha orgânica após o primeiro ensaio	65
Figura 40 – Imagens obtidas por Microscopia Metalográfica - 200x - para pastilha orgânica após o segundo ensaio	66
Figura 41 – Imagens obtidas por Microscopia Metalográfica - 200x - para pastilha metálica após o segundo ensaio	66
Figura 42 – Imagens obtidas por Microscopia Metalográfica - 100x - para pastilha orgânica após o segundo ensaio	67
Figura 43 – Área das pastilhas externas - 50x	68

Figura 44 – Área das pastilhas externas - 100x	69
Figura 45 – Área das pastilhas externas - 50x	70
Figura 46 – Área das pastilhas externas - 200x	71
Figura 47 – Perímetro das pastilhas externas - 50x	72
Figura 48 – Perímetro das pastilhas externas - 100x	72
Figura 49 – Perímetro das pastilhas externas - 50x	73
Figura 50 – Perímetro das pastilhas externas - 200x	74
Figura 51 – Área das pastilhas internas	82
Figura 52 – Área das pastilhas internas	83
Figura 53 – Perímetro das pastilhas internas	84
Figura 54 – Perímetro das pastilhas internas	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplos de composição de materiais de atrito	31
Tabela 2 – Comparação das características das máquinas de caracterização de materiais de fricção	36
Tabela 3 – Variáveis utilizadas para análise dos experimentos em veículo. . . .	50
Tabela 4 – Dados de entrada da massa	52
Tabela 5 – Dados de entrada das médias das espessuras	52
Tabela 6 – Dados de entrada das médias das Rugosidades	52
Tabela 7 – Técnicas de análise laboratorial aplicadas em materiais de atrito. . .	54
Tabela 8 – Dados de saída da massa	61
Tabela 9 – Dados de Saída das médias das espessuras	61
Tabela 10 – Dados de Saída das médias das Rugosidades	61
Tabela 11 – Dados de saída da massa	62
Tabela 12 – Dados de Saída das médias das espessuras	62
Tabela 13 – Dados de Saída das médias das Rugosidades	63

LISTA DE SÍMBOLOS

F_a	Força de atrito
N	Força Normal
α	Ângulo alpha
μ_{pp}	Componente de abrasão por penetração de partículas.
r_p	Raio da partícula
w	Comprimento de contato
μ_{AD}	Componente de abrasão por aspereza duras
θ	Ângulo de ponta da asperidade
μ_A	Componente adesiva do atrito
τ_{max}	Tensão de cisalhamento máxima do material
A_R	Área de contato aparente
P_R	Pressão sobre a área de contato real

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Mecanismos de Desgaste	17
2.1.1	Desgaste Abrasivo	17
2.1.2	Desgaste Corrosivo	21
2.1.3	Desgaste Adesivo	21
2.1.4	Desgaste por Fadiga	22
2.2	SISTEMA DE FRENAGEM	23
2.2.1	Funções de um sistema de frenagem	25
2.2.2	Sistema freio a disco	26
2.3	Composições utilizadas na fabricação de pastilhas	30
2.4	Emissão de Particulados por Sistemas de Freios: Análise Crítica de Estudos Pioneiros (2000-2010)	34
2.5	Equipamentos de ensaios de frenagem	34
2.6	Formação dos Platôs	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1	Descrição do veículo de ensaio de frenagem	44
3.1.1	Câmara de Coleta	45
3.1.2	Instrumentos empregados nos ensaios	46
3.2	Procedimentos de Ensaios de Frenagem	47
3.2.1	Procedimento de Krauss – Banco de Ensaios	48
3.3	Planejamento Experimental – Ensaios em veículo	48
3.3.1	Massa, espessura e rugosidade da superfície da amostra	50
3.4	Técnicas de análise laboratorial do material de atrito	53
4	RESULTADOS	56
4.1	Ensaio em veículo	56
4.1.1	Temperatura do Ensaio a partir do tipo de Pastilha	56
4.1.2	Massa, espessura e rugosidade da superfície da amostra	61
4.2	Análise das micrografias obtidas por meio de microscopia metalográfica	63
5	CONCLUSÕES	75

REFERÊNCIAS	76
APÊNDICE A	81

1 INTRODUÇÃO

Entre as substâncias que contribuem para a poluição do ar, o material particulado (MP) é considerado o mais prejudicial, de acordo com diversos estudos. O material particulado pode desencadear diversos impactos na saúde, incluindo problemas como asma, bronquite, doenças cardiovasculares e câncer de pulmão (ANDERSON; THUNDIYIL; STOLBACH, 2012). O monitoramento e a caracterização do MP têm sido uma área importante de pesquisa, dada a influência do MP na saúde. (ABU-ALLABAN et al., 2003).

A maior parte das partículas finas, cujo diâmetro é inferior a $2,5 \mu\text{m}$, tem origem nas fontes de combustão, como veículos automotivos e caminhões. Enquanto isso, muitas partículas maiores, variando entre $2,5$ e $10 \mu\text{m}$, consistem em poeira dispersa proveniente de estradas, canteiros de obras e áreas adjacentes (ABU-ALLABAN et al., 2003). As emissões de partículas provenientes de estradas pavimentadas representam uma complexa combinação de várias fontes.

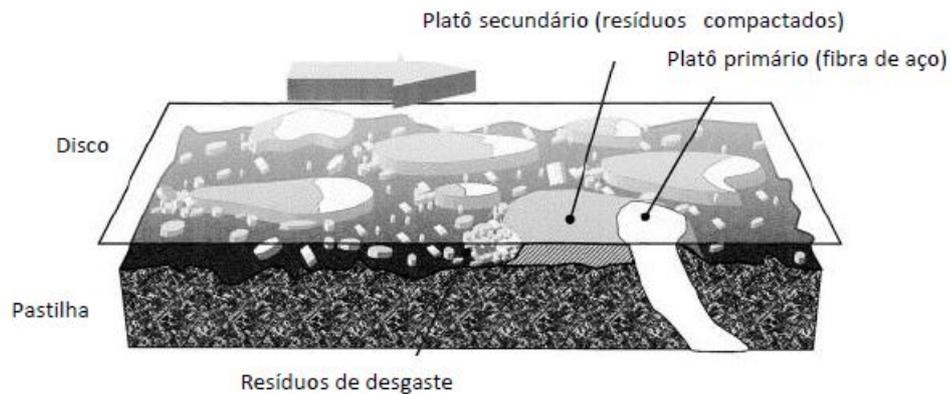
As partículas geradas a partir da estrada incluem as emissões diretas provenientes do escapamento e aquelas formadas devido ao desgaste geral de pneus, freios e componentes veiculares (ROGGE et al., 1993). Segundo Grigoratos e Martini (2015) as primeiras avaliações apontam que o sistema de frenagem contribui com 55% das partículas liberadas com diâmetro menor que $10 \mu\text{m}$, e 21% das partículas liberadas com diâmetro inferior a $2,5 \mu\text{m}$.

A geração de partículas surge devido à deterioração do material, que pode ser categorizada em várias formas: desgaste abrasivo, desgaste derivado do calor e oxidação, desgaste resultante da aderência e desgaste superficial causado por fadiga. Para além dos processos inerentes ao desgaste, existem também mecanismos conectados à fricção (ÖSTERLE; URBAN, 2004).

Um exemplo segundo Österle e Urban (2004) é a formação de uma camada denominada terceiro corpo, a qual se origina pelo desprendimento de partículas das superfícies da pastilha e do disco. Outro mecanismo de desgaste ligado à fricção, é conhecido como histórico do material, no qual o coeficiente de atrito dos materiais de atrito é impactado pelas condições de utilização anteriores. O platô é último e mais importante mecanismo de desgaste em sistemas de frenagem, assume um papel central.

Na Figura 1 são apresentados os platôs primários, os resíduos resultantes do deslizamento e a formação dos platôs secundários (PINTO et al., 2020).

Figura 1 – Contato pastilha/disco: Sentido do deslizamento com a formação dos platôs primário e platôs secundários.



Adaptado de Ostermeyer e Muller (2008) apud Machado Pinto (2020)

Durante o acionamento dos freios, as arestas do material resistente são gradualmente erodidas, dando espaço a novas arestas emergentes. Essas transformações na área de contato podem levar à formação de pontos de alta temperatura nas pastilhas, e à acumulação concentrada de resíduos de desgaste, que são denominados platôs (PRESTON; FORTHOFFER, 1971). A liberação de partículas está intrinsecamente associada à criação de platôs primários e secundários, conforme destacado por Eriksson (2000).

Este estudo teve como objetivo analisar e avaliar os mecanismos de desgaste para identificar estratégias que visam minimizar a geração de material particulado fino e a deterioração do material de fricção presente nas pastilhas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar processos de desgaste por meio de experimentos em banco de ensaios de freios em um veículo real, buscando identificar alterações nas características superficiais do material de atrito e desgaste que podem resultar na geração de material particulado fino.

1.1.2 Objetivos Específicos

Levantar o estado da arte sobre processos físicos e químicos que levam ao desgaste das pastilhas de freio.

Analisar os diferentes tipos de desgaste, com foco nas pastilhas de freio a disco.

Mensurar o desgaste por massa e espessura, além de realizar uma comparação da rugosidade.

Efetuar análise das superfícies desgastadas por meio de microscopia de metalografia, para analisar as características dos platôs formados na superfície da pastilha de freios.

Elaborar um protocolo de ensaio em bancada, abordando parâmetros controlados e análises dos resultados.

Realizar ensaios experimentais em bancada e analisar os resultados obtidos.

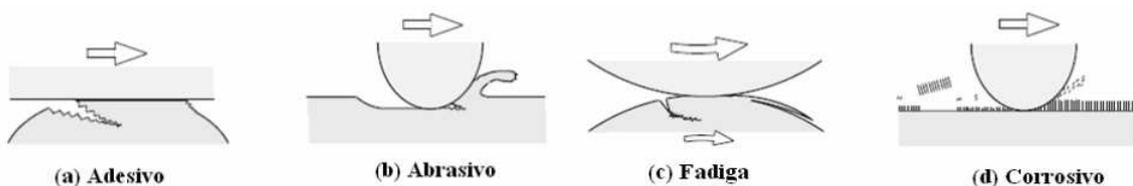
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, é apresentada a revisão bibliográfica, abordando os conceitos essenciais que moldam a base deste estudo. Com esse intuito, busca-se estabelecer a fundamentação teórica para as definições centrais ligadas à análise de sistemas de freio a disco, bem como as variáveis e mecanismos que afetam a emissão de material particulado durante o processo de frenagem

2.1 MECANISMOS DE DESGASTE

O desgaste é definido como a redução contínua de material causada pelo movimento relativo entre a superfície e as substâncias em contato, ou entre diferentes superfícies de contato, podendo resultar em danos para uma ou ambas as superfícies (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Os mecanismos de desgaste que agem nos materiais de atrito no par tribológico durante a operação dos freios automotivos são: desgaste adesivo, desgaste abrasivo, desgaste por fadiga superficial e desgaste corrosivo, como apresentado na Fig. 2 (MENEZES, 2016).

Figura 2 – Modos de desgaste



Fonte: Kato (2001)

2.1.1 Desgaste Abrasivo

O desgaste abrasivo é caracterizado como o desgaste originado pelo atrito de partículas rígidas ou asperezas presentes na superfície de um corpo mais duro que desliza sobre uma superfície sólida mais suave, resultando na exposição ou remoção de material (GAHR, 1998). Apesar de ainda não haver uma teoria fundamental sobre o desgaste abrasivo que seja totalmente aceita, a ideia central da maioria das teorias é que a abrasão é um processo de riscamento, onde a forma do penetrador é normalmente aproximada como cônica.

Conforme mencionado por Hutchings (1992), Stachowiak e Andrew (2005) é evidente que a componente abrasiva do atrito prevalece em temperaturas mais baixas. O processo de desgaste abrasivo pode ocorrer devido à penetração de partículas duras,

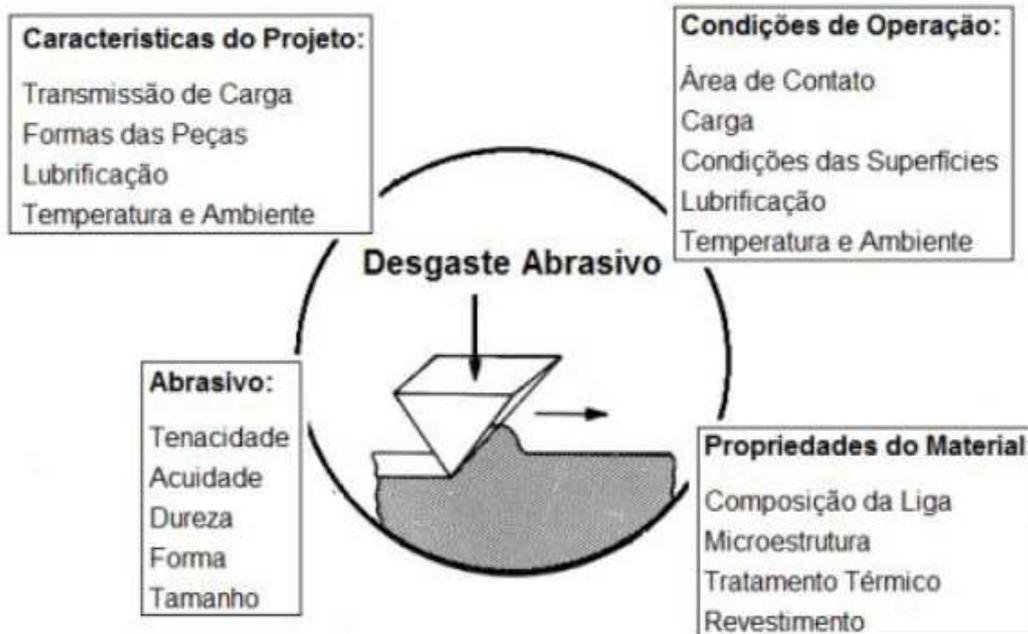
quando uma superfície macia contendo essas partículas desliza sobre outra superfície de menor dureza. Além disso, o desgaste também pode ser causado por asperidades duras, em que uma superfície rugosa e de alta dureza desliza sobre uma superfície de menor dureza, resultando na formação de ranhuras (BLAU, 2008).

$$\mu_{pp} = \frac{2}{\pi} \left\{ \left(\frac{2r_p}{w} \right)^2 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{w}{2r_p} - \sqrt{\left(\frac{2r_p}{w} \right)^2 - 1} \right) \right\} \quad (1)$$

$$\mu_{AD} = \frac{2}{\pi} \cdot \cot\theta \quad (2)$$

Na equação fornecida, μ_{pp} representa a componente de abrasão por penetração de partículas. Essa variável reflete a contribuição específica do desgaste causado pela penetração de partículas em uma superfície. Importante notar que μ_{pp} é adimensional, indicando que não possui uma unidade específica associada, r_p raio da partícula em mm e w o comprimento de contato dado em mm, Na equação fornecida, μ_{AD} representa a componente de abrasão por aspereza duras. Vale destacar que μ_{AD} é adimensional, indicando que não possui uma unidade específica associada, e θ o ângulo de ponta da asperidade em graus. Gahr (1987) ilustra como vários parâmetros de desgaste abrasivo exercem influência, sendo possível observar esses diferentes parâmetros na Figura 2.1.1.

Figura 3 – Principais fatores influenciadores nas taxas de desgastes.

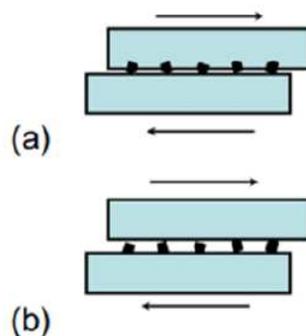


Adaptado Gahr (1987) *apud* e Gomes (2022).

Conforme abordado por Hutchings e Shipway (2017), a categorização do desgaste abrasivo compreende duas modalidades: desgaste abrasivo a dois corpos e desgaste abrasivo a três corpos, conforme ilustrado na Figura 4.

A abrasão a dois corpos ocorre quando protuberâncias rígidas da superfície da contra face ou partículas duras aderidas a ela penetram uma superfície com menor dureza. Por outro lado, na abrasão a três corpos, partículas duras têm liberdade de movimento, podendo rolar ou deslizar entre o corpo e o contra-corpo. O grau de penetração varia de acordo com os ângulos formados entre as extremidades dessas partículas e as superfícies de contato (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

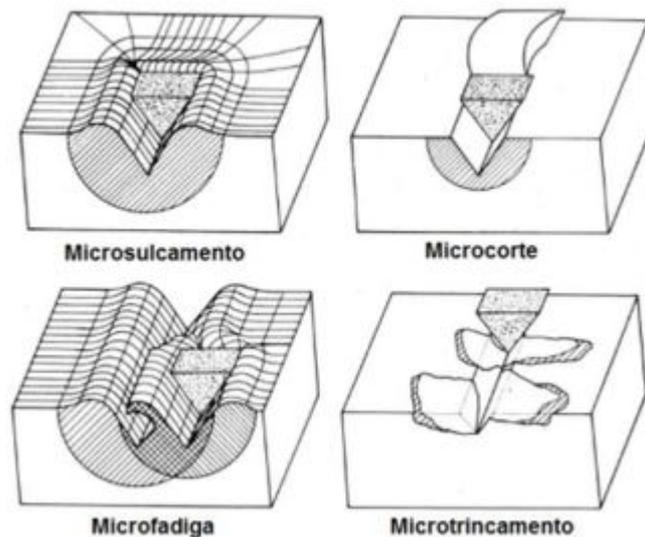
Figura 4 – Classificação do desgaste abrasivo: (a) desgaste a dois corpos; (b) desgaste a três corpos.



Hutchings e Shipway (2017)

O desgaste abrasivo resulta da interação entre partículas abrasivas e o material desgastado, causando dano ou remoção da superfície de menor dureza. Esse processo ocorre por meio de diversos mecanismos, conforme proposto por (GAHR, 1987). Ele identificou quatro tipos distintos de mecanismos de desgaste abrasivos: microsulcamento, microcorte, microfadiga e microtrincamento. Esses mecanismos mostram o efeito do deslocamento, fratura ou remoção de material da superfície mais suave, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Tipos de mecanismos de desgaste



Adaptado Gahr (1987) *apud* Gomes (2022).

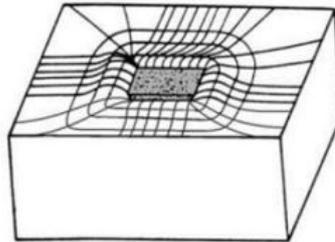
O processo de microsulcamento é definido por um único passe que não leva ao desprendimento do material da superfície desgastada, mas sim à criação de sulcos através de deformação plástica. Por outro lado, a microfadiga ocorre quando dois ou mais passes ocorrem nos sulcos formados ou em sua proximidade, podendo resultar no desprendimento de partículas devido a fadiga (GAHR, 1987).

No processo de microcorte, ocorre a remoção de material com a perda de resíduos do mesmo volume do sulco ou ranhura formada pela partícula abrasiva. Por fim, o microtrincamento ocorre quando fissuras se desenvolvem e se espalham ao longo das bordas da falha como resultado das consideráveis tensões geradas pela partícula abrasiva na superfície do material, esse microprocesso constitui uma falha adicional aos que são controlados pela deformação plástica. Essa situação ocorre quando a força exercida pelo abrasivo ultrapassa a tenacidade a fratura do material. Isso, por sua vez, leva ao desprendimento de resíduos maiores (GAHR, 1998).

Enquanto o microsulcamento e a microfadiga predominam durante o desgaste abrasivo moderado, é o microcorte e o microtrincamento que prevalecem quando se trata de desgaste abrasivo severo (GATES, 1998). Além disso, o microsulcamento

e o microcorte são processos predominantes em materiais dúcteis, enquanto o microtrincamento ocorre em materiais frágeis (GAHR, 1998). Quando a partícula rola entre o corpo e o contracorpo, o mecanismo de desgaste predominante é o por microindentação chamado também de indentações múltiplas, conforme ilustrado na Fig. 6 (JUNIOR, 2008).

Figura 6 – Processo de desgaste abrasivo por microindentação.



Junior (2008).

A microindentação ocorre quando uma partícula abrasiva entra em contato com a superfície sob uma carga específica sem deslizar, resultando em uma deformação plástica localizada até a matéria ser removida. Nesse processo, a perda de massa é provocada por múltiplas deformações simultâneas (JUNIOR, 2008).

2.1.2 Desgaste Corrosivo

O desgaste corrosivo ocorre em situações de deslizamento com a falta de lubrificação adequada ou quando a espessura do filme de lubrificante é inferior à rugosidade das superfícies em contato. Isso resulta na formação de óxidos nas regiões reais de contato quando há exposição à atmosfera em condições de elevada temperatura (SERBINO, 2005).

De acordo com Hutchings (1992), as camadas de óxidos que se formam nas superfícies metálicas desempenham um papel importante ao evitar o contato direto entre os metais. No entanto, o calor gerado devido ao atrito entre essas superfícies desencadeia a criação e o crescimento das camadas de óxidos. Inicialmente, essas camadas surgem em áreas isoladas, variando em espessura, mas com o aumento gradual da carga térmica, levam a uma expansão generalizada na formação de óxido em toda a superfície.

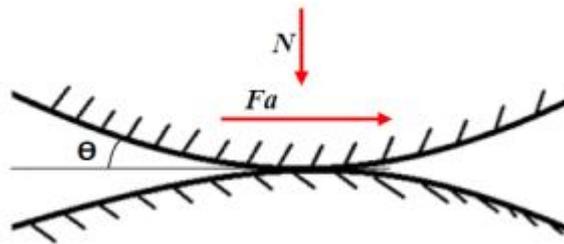
2.1.3 Desgaste Adesivo

O desgaste adesivo, ocorre quando a ligação adesiva entre as superfícies é suficientemente forte para resistir ao deslizamento. Esse desgaste é causado pela junção localizada entre as superfícies sólidas em contato. Como resultado dessa

adesão, ocorre uma deformação plástica na região de contato, devido ao deslizamento relativo entre as superfícies. Isso gera uma trinca que pode se propagar, resultando na formação de um terceiro corpo e na transferência de material entre as superfícies, ou até mesmo na perda de uma delas (KATO, 2001).

Rabinowicz (1995) enfatiza que a interação entre as superfícies é influenciada por fatores como temperatura, tempo de contato e afinidade química entre as superfícies. Hutchings (1992) visualiza essa interação adesiva mostrada na Fig. 7 e define a componente adesiva do atrito matematicamente por meio da Eq. 3.

Figura 7 – Esquema representativo da adesão



Hutchings (1992)

$$\mu_A = \frac{F_a}{N} = \frac{\tau_{max} \cdot A_R}{P_R \cdot A_0} \quad (3)$$

Na equação fornecida, μ_A representa a componente adesiva do atrito. Essa variável é o coeficiente de atrito adesivo, que é a relação entre a força de atrito F_a e a força normal dada em kgf, τ_{max} a tensão de cisalhamento máxima do material em MPa, A_R sendo a área de contato aparente em m^2 e P_R a pressão sobre a área de contato real em Pa.

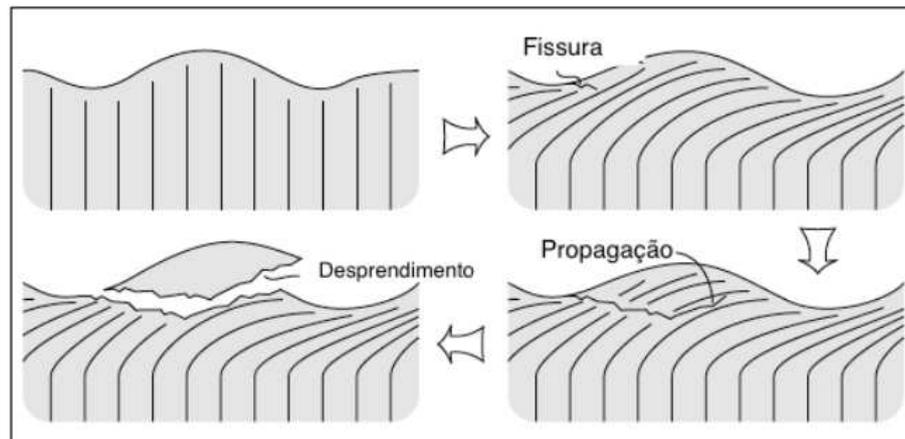
2.1.4 Desgaste por Fadiga

Segundo Stachowiak e Batchelor (2005) desgaste por fadiga ocorre quando partículas são liberadas devido a variações de tensões cíclicas. Nesse mecanismo, as tensões cíclicas resultantes do movimento relativo entre as superfícies causam concentração de tensões, levando a deformações plásticas localizadas e, por conseguinte, a possibilidade de iniciação de trincas na superfície ou subsuperfície.

Na Fig. 8 é representado como esses materiais submetidos a movimentos repetitivos causam a formação de tensões superficiais que se propagam para camadas mais internas, resultando em deformações plásticas, rachaduras e possível

desprendimento de material. Inicialmente, pequenas fissuras surgem na superfície, seguidas pela propagação em direção ao interior do material. O encontro da fissura inicial com uma rachadura interna já existente que pode levar ao desprendimento de material (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

Figura 8 – Esquema de desgaste por fadiga



Stachowiak e Batchelor (2005)

2.2 SISTEMA DE FRENAGEM

Pinto et al. (2017-a) relata que os avanços tecnológicos vivenciados pela indústria automotiva possibilitaram o aumento da velocidade dos veículos e o aumento das capacidades de transporte de carga. Esse cenário resultou em uma demanda por sistemas de freios ainda mais eficientes.

Os sistemas de freios automotivos podem ser classificados em freios de serviço, empregados para frenagens normais; freios secundários ou de emergência, acionados em casos de falhas nos freios de serviço; freio de estacionamento, destinado a manter o veículo estacionado; e o freio auxiliar (BOSCH, 2005). Os componentes principais citados por Eriksson (2000) de um sistema veicular são:

- **Rotor**

Componente fixado junto à roda, que recebe uma considerável quantidade de energia térmica da frenagem, o que requer uma abordagem que explore alternativas eficientes para a dissipação dessa energia. Os tipos predominantes de rotores incluem os tambores e os discos de freio.

- **Material de fricção**

O componente estacionário do par de fricção pressionado contra o rotor durante a frenagem

- **Sistema hidráulico ou pneumático**

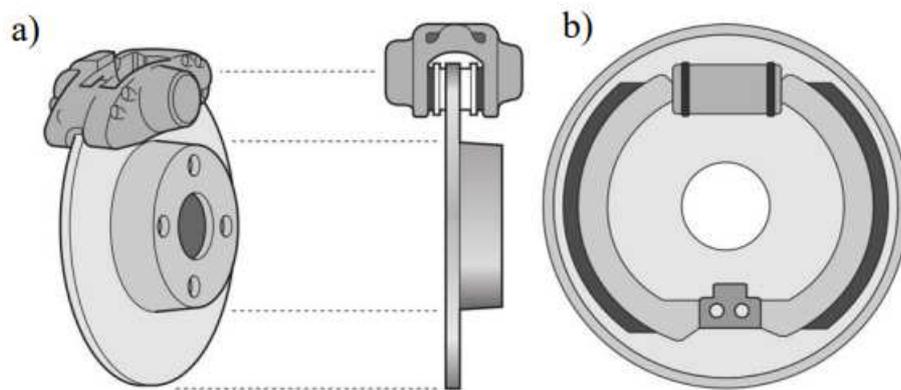
O conjunto de componentes responsáveis por transmitir a energia desde o ponto de aplicação do esforço de frenagem até os freios nas rodas inclui acumuladores

de energia que estão integrados nesse sistema de transmissão de energia.

Limpert (2011) classifica as formas pelas quais a energia é transmitida da fonte de aplicação de energia para as rodas, tais como: freios mecânicos, que utilizam mecanismos para transmitir energia ao dispositivo de frenagem; freios hidráulicos, que empregam um fluido como meio de transmissão de energia para a frenagem; freios pneumáticos, que transferem a energia por meio do ar; freios elétricos, que utilizam corrente elétrica como meio de transmissão; e freios mistos, que empregam dois ou mais meios de transmissão de energia durante a frenagem.

Os sistemas de freio apresentam uma variedade de geometrias, no entanto, os freios a disco e os freios a tambor representados na Fig.9 foram amplamente adotados pela indústria automobilística, sendo praticamente os tipos de freios utilizados em veículos de passeio (MATOZO, 2012).

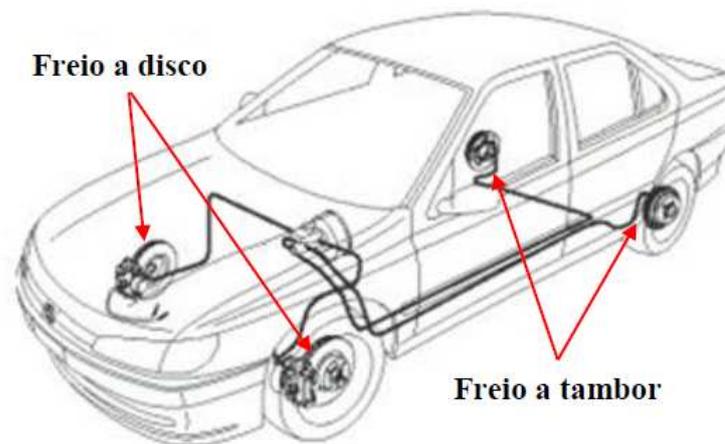
Figura 9 – Esquema de freio à disco (a) e freio a tambor (b)



Manual... ()

Segundo Limpert (2011) a maioria dos automóveis fabricados no Brasil na atualidade (cerca de 90%) emprega freios a tambor no eixo traseiro e freios a disco no eixo dianteiro, como evidenciado na Figura 10. Isso ocorre devido à concentração de peso do veículo sendo transferida para as rodas dianteiras, resultando na necessidade de mais potência no eixo dianteiro do sistema (PAZ, 1970) e (DIULGHEROGLO, 2016).

Figura 10 – Sistema de freio mais utilizado no Brasil



Hutchings (1992).

Sistemas de freio a disco são mais robustos, proporcionando uma frenagem mais estável. Além disso, como enfatizado por Halderman e Mitchell (2004), o efeito de *fade* (a diminuição da eficiência do freio devido ao aumento da temperatura) torna-se mais elevado em freios a tambor, devido à natureza fechada desse tipo de freio, que oferece uma maior resistência à dissipação de calor em comparação com os sistemas de freio a disco.

2.2.1 Funções de um sistema de frenagem

O sistema de freio automotivo funciona convertendo a energia cinética do veículo em energia térmica, ou seja, transforma a energia resultante do movimento do veículo em calor. Durante o processo de frenagem, a energia térmica é inicialmente gerada nas superfícies de contato do freio, tais como o disco de freio e as pastilhas de freio no caso do freio a disco, e o tambor e as lonas no freio a tambor. Posteriormente, essa energia térmica é então transferida para os componentes de contato do freio, como as pinças do freio e as partes adjacentes (CHAN; STACHOWIAK, 2004).

Conforme afirmado por Barros et al. (2016) a operação dos sistemas de freios automotivos por atrito ocorre durante o contato entre um elemento estático (pastilha ou lona de freio) e um componente em rotação (disco de freio ou tambor). O último elemento mencionado está conectado à roda do veículo.

O atrito gerado pelo contato entre a pastilha e o disco desempenha um papel essencial na geração da força requerida para desacelerar o veículo, transformando a energia cinética em calor, bem como em vibração e ruído. Dado que essas superfícies estão sujeitas a movimentos de deslizamento, é natural que sofram desgaste ao longo do tempo. Portanto, torna-se necessário realizar substituições periódicas das pastilhas de freio (PINTO et al., 2017-b).

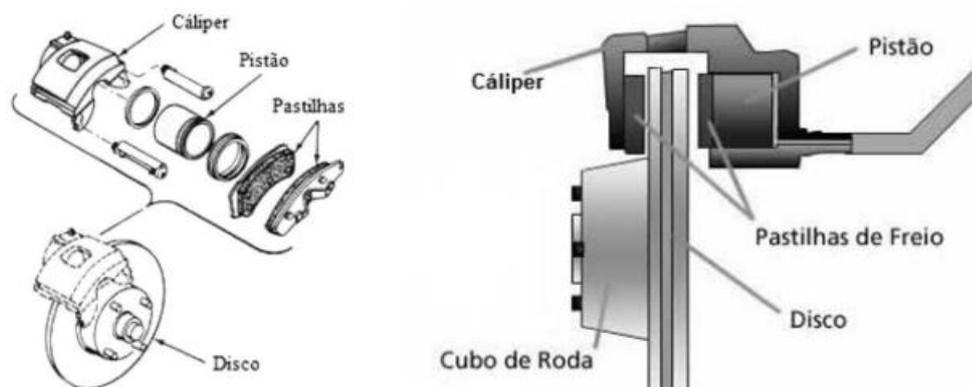
De acordo com Limpert (2011) a condução segura de um veículo motorizado exige um constante ajuste de sua velocidade de acordo com as variações nas condições do tráfego. Os freios, pneus e o sistema de direção representam os componentes mais cruciais em termos de segurança de um veículo motorizado. A utilização comum dos freios pode ser descrita em relação a três funções fundamentais que um sistema de frenagem deve fornecer:

- Desacelerar e parar o veículo.
- Manter a velocidade do veículo durante uma descida, com a ajuda do freio motor.
- Garantir que o veículo permaneça parado.

2.2.2 Sistema freio a disco

Halderman e Rehkopf (2006) destacam que, de modo geral, os freios a disco são preferencialmente aplicados nas rodas dianteiras devido à sua capacidade de proporcionar uma frenagem mais eficaz. Contudo, em determinadas situações, eles podem ser empregados em todas as rodas de um veículo. Na Figura 11 apresenta-se os principais componentes de um sistema de freio a disco.

Figura 11 – Componentes de um freio a disco.



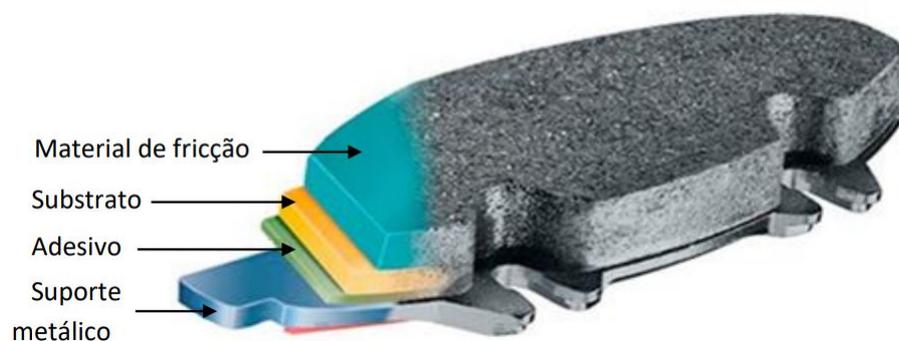
Adaptado de Kruze (2009) *apud* Machado Pinto (2020).

a) Pastilha de freio - Os revestimentos das pastilhas sofrem o maior desgaste entre os elementos dos freios a disco, sendo responsáveis por gerar atrito com a superfície do disco de freio, transformando assim a energia cinética do veículo em energia térmica (BREZOLIN, 2007). Para Ostermeyer e Müller (2008) é crucial que as pastilhas de freio preservem suas propriedades mecânicas em altas temperaturas, visto que os sistemas de freio tendem a aquecer durante o acionamento. Essas pastilhas são fabricadas empregando materiais compósitos.

As pastilhas de freio consistem em camadas distintas, conforme ilustrado na

Figura 12. O material de fricção, que entra em contato direto com a superfície do disco de freio, um substrato ou material de fundo, com propósito de aprimorar a ancoragem mecânica entre o adesivo e o material de fricção, ao mesmo tempo em que melhora a absorção de vibrações originadas durante o processo de frenagem, um adesivo, que tem a responsabilidade de fixar o material de fricção ao suporte metálico, por fim, o suporte metálico é encarregado de distribuir a força proveniente do pistão de freio sobre o material de fricção (BREMBO, 1997).

Figura 12 – Pastilha de freio e suas camadas constituintes.

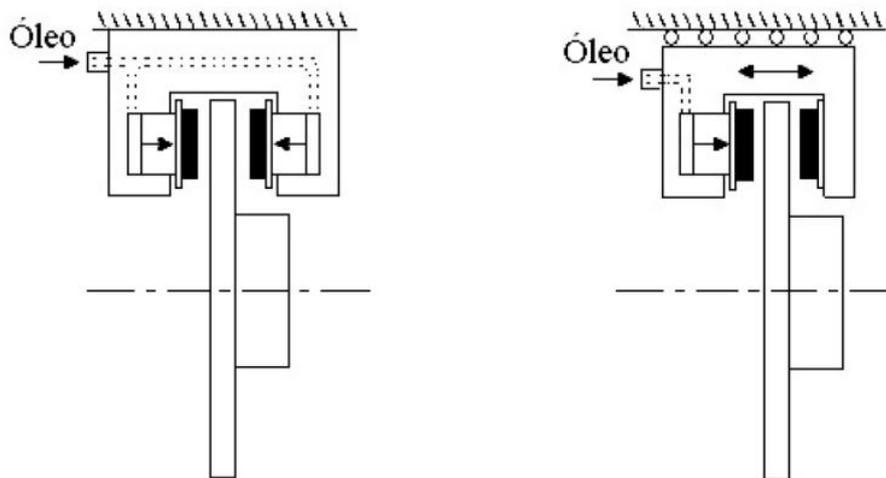


Adaptado de Menezes (2016) apud Machado Pinto (2020)

b) Cáliper - O cáliper abriga as pastilhas e o pistão, sendo fundamental para a operação do sistema de freio. Conforme afirmado por Bosch (2005), o cáliper deve ser projetado para suportar as consideráveis pressões nos sistemas hidráulicos e as forças axiais e tangenciais geradas durante o processo de frenagem.

De acordo com Limpert (2011), a busca por um equilíbrio entre desempenho, dimensões, conforto, peso e custos resultou no desenvolvimento de dois tipos de cálipers: fixos e flutuantes mostrado na Fig. 13.

Figura 13 – (a) Freio a disco do tipo Cáliper Fixo e (b) Cáliper Flutuante.



Adaptado de Infantini (2008) apud Machado Pinto (2020)

O caliper fixo, conforme mostrado na Figura 13 (a), é conectado à suspensão e é equipado com pelo menos dois pistões opostos que são operados pelo mesmo sistema hidráulico (BREMBO, 1997). É importante destacar que esse tipo de caliper é sempre hidráulico. Inicialmente, a pressão hidráulica do sistema é aplicada ao primeiro pistão, que avança em direção ao disco. Somente após o primeiro pistão entrar em contato com o disco é que o pistão oposto é acionado, proporcionando assim o momento de força necessário para a frenagem.

O sistema de freio a disco com caliper flutuante, como mostrado na Figura 13 (b), é caracterizado pela presença de pistões somente no lado interno do caliper. Quando a pressão é aplicada, os pistões se movem para frente, fazendo com que as pastilhas de freio se aproximem do disco. Nesse ponto, o caliper desliza ao longo de guias, impulsionado pela reação à força exercida pelos pistões nas pastilhas internas. Isso resulta na retração do caliper, permitindo que a pastilha externa entre em contato automaticamente com o disco, desencadeando o processo de frenagem.

c) Pistão de freio - Este componente é encarregado de transferir força para a pastilha. Nos sistemas hidráulicos, é acionado por pressão hidráulica, enquanto nos sistemas mecânicos, é operado por meio de um sistema mecânico de alavanca. (HALDERMAN; REHKOPF, 2006).

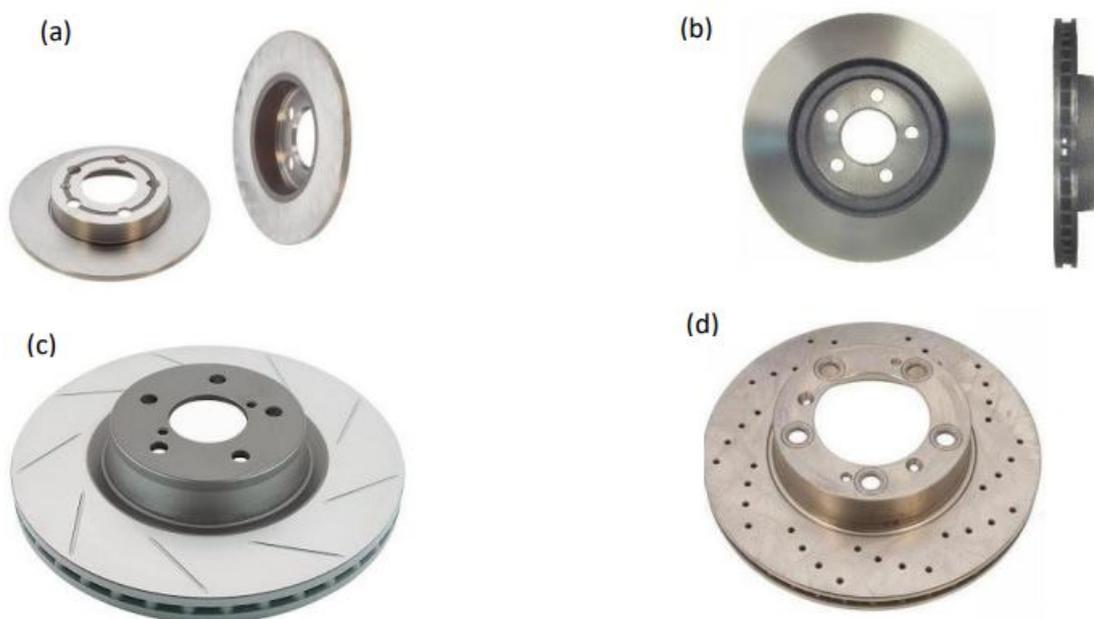
d) Disco - O disco, também conhecido como rotor, é o componente rotativo essencial em um sistema de freio a disco. De acordo com Haynes e Publishing (1999), geralmente, ele é fabricado em ferro fundido cinzento. A preferência pelo ferro fundido cinzento se deve às suas notáveis propriedades térmicas, resistência ao desgaste, resistência mecânica e características de amortecimento, tudo isso a um custo competitivo (POLETTTO et al., 2018).

A superfície do disco, sem sofrer alterações, desempenha não apenas o papel

de suportar a fricção das pastilhas para reduzir a rotação do disco, mas também absorve considerável quantidade de calor gerado durante o processo de frenagem. Devido à sua estrutura aberta, o fluxo de ar favorece eficazmente o processo de resfriamento do disco (BREMBO, 1997).

Na Figura 14 mostra-se uma visão das diferentes alternativas de geometrias empregadas em discos de freio. Na Figura 14 (a) apresenta-se o disco de freio sólido, uma solução simples e amplamente adotada em veículos de passeio. Por outro lado, a Figura 14 (b) exhibe -se o disco de freio ventilado, projetado para permitir uma dissipação térmica mais eficiente. Na Figura 14 (c) ilustra-se um disco de freio ventilado com uma superfície ranhurada, conforme sugerido por Diulgheroglo (2016), destacando seus benefícios, como uma limpeza aprimorada da superfície de atrito, eliminação do filme de água e dispersão de gases gerados em temperaturas elevadas. Enquanto isso, na Figura 14 (d) observa-se um disco de freio ventilado com superfície furada, projetado para melhorar a troca de gases e facilitar a eliminação de resíduos. Isso é quando as pastilhas de freio estão sob cargas extremas, proporcionando um escoamento mais eficaz da água quando o veículo trafega em superfícies úmidas.

Figura 14 – (a) Disco de freio maciço, (b) disco de freio perfurado, (c) disco de freio perfurado e com superfície ranhurada e (d) disco de freio perfurado e com superfície furada.



Adaptado Sharp (2013) apud Machado Pinto (2020)

Entretanto, de acordo com Bosch (2005), é importante notar que a presença de furos nos discos de freio reduz a área de contato entre o disco e as pastilhas, o que, por sua vez, resulta em uma diminuição da força de atrito. Os discos de freio ilustrados nas

figuras (b), (c) e (d) são empregados com o propósito de melhorar tanto a capacidade de resfriamento quanto o desempenho dos freios.

2.3 COMPOSIÇÕES UTILIZADAS NA FABRICAÇÃO DE PASTILHAS

De acordo com Dmitriev, Österle e Klob (2008), os fabricantes de sistemas de freio a disco enfrentam um conjunto de desafios relacionados ao material de fricção:

- É necessário que o coeficiente médio de atrito (μ) se aproxime de 0,45 para automóveis de passageiros e 0,35 para aplicações ferroviárias;
- A variação de μ durante a frenagem, conhecida como $\Delta\mu$, deve ser próxima de zero;
- As taxas de desgaste da pastilha e do disco devem ser mantidas baixas.
- As matérias-primas utilizadas na fabricação das pastilhas devem ser acessíveis economicamente, sem causar danos ao meio ambiente;
- A geração de ruído durante a frenagem e a geração de resíduos devem ser minimizadas.

Eriksson, Bergman e Jacobson (2002) destacam que as demandas em relação ao coeficiente atrito dos freios são rigorosas e diversas. Devem permanecer constante, independentemente das condições de temperatura, umidade, uso, desgaste, corrosão, sujeira e exposição à água da estrada, entre outros fatores. Além desses requisitos de segurança, também são necessárias longevidade e conforto superiores, o que implica na ausência de vibrações e ruídos durante a frenagem.

Portanto, a formulação das pastilhas de freio torna-se progressivamente mais complexas. Eriksson, Bergman e Jacobson (2002) destacam que as demandas em relação ao atrito dos freios são rigorosas e diversas. Devem permanecer constante, independentemente das condições de temperatura, umidade, uso, desgaste, corrosão, sujeira e exposição à água da estrada, entre outros fatores. Além desses requisitos de segurança, também são necessárias vida longa e conforto superiores, o que implica na ausência de vibrações e ruídos durante a frenagem.

De acordo com Dmitriev e Österle (2010), entender os complexos mecanismos de fricção na interface entre pastilha e disco de freio rotativo continua a ser um desafio. Tanto a teoria quanto a experimentação indicam a formação de camadas superficiais com propriedades notavelmente distintas em relação aos materiais de base.

A composição, estrutura e espessura dessas camadas modificadas estão intrinsecamente ligadas às características do material inicial, às condições de carga, à temperatura e ao ambiente de fricção. Apesar da influência de múltiplos parâmetros nesse processo, engenheiros automotivos buscam propriedades de fricção consistentes, ou ao menos previsíveis, mesmo sob variações ambientais (DMITRIEV; ÖSTERLE, 2010).

Os altos padrões de desempenho e a necessidade de manter os parâmetros de fricção do sistema de freio dentro de limites aceitáveis durante a frenagem resultam em formulações complexas para as pastilhas de freio. Essas pastilhas são feitas de compostos que incluem uma matriz polimérica e mais de 20 ingredientes, como fibras de aço, latão, fragmentos de cobre, bem como materiais de enchimento, abrasivos e lubrificantes sólidos.

Na Tabela 1 exibe a composição de materiais destinados a vários usos relacionados à fricção. Tal composição se sujeita a variações conforme a finalidade das aplicações, os elementos constituintes do compósito, a interação com a matriz e a estrutura cristalina conforme Schatt, Wieters e Kieback (2007). Devido às relações muito complexas, não existe uma composição fixa para cada aplicação, já que esta dependerá dos objetivos a serem alcançados e das especificações relevantes do projeto.

Tabela 1 – Exemplos de composição de materiais de atrito

Composição em % (Volume) - (N = condição molhada, T = condição a seco)				
Material de Matriz	Metálico	Lubrificante	Modificador de Atrito	Utilização
	4-7 Fe: 5-10			
CuSn 92/8	Pb	3-8 Grafite	2-4 SiO ₂	N: T
CuSn 95/5	5 Pb	4 Grafite	5 Mulita	N
CuTi 95/5	-	12 Grafite	12 TiO ₂	N: T
CuSn 90/10	5-10 Fe	3-10 Grafite: 3-12 MoS ₂	2-7 SiO ₂	T
Cu	7,5 Pb: 15 Bi	3 Grafite	5 SiO ₂	N
			3,5 SiO ₂ : 2,5	
CuZnSn 65/30/5	4,5 Fe: 1,8 Pb	7 Grafite: 4 MoS ₂	Al ₂ O ₃	N: T
FeCu 85/15	-	13 Pb: 9 Grafite	25 BaSO ₄	T
Fe	-	11 Bi: 15 Grafite	14 Mulita	T
Fe	-	5 Pb: 15-20 Grafite	0,8 P	T
FeCu 70/30	-	5-10 Grafite	5 Sulfeto de Fosfato	T
FeNiCu 78/15/7	-	7 Bi: 10-30 Grafite: 6 MoS ₂	7 Mulita	T
FeNiCrMo 85/5/5/5	-	10 Pb: 20-30 Grafite	0,8 P	T
Ni	-	28 Grafite: 5 PbWO ₄	20 Al ₂ O ₃	T
	35 CuSn			
40 Mulita/7 MgO	90/10	3-20 Cd: 5-0 Pb	-	T

Fonte: Schatt, Wieters e Kieback (2007) .

Conforme apontado por Xiao et al. (2016), em épocas passadas, a fibra de amianto foi escolhida como componente reforçador na formulação de materiais de atrito, devido ao seu desempenho excepcional relacionado à baixa densidade, alto ponto de fusão, elevado coeficiente de atrito, resistência mecânica considerável e reduzido impacto no disco de freio. No entanto, a baixa condutividade térmica desse material tende a comprometer seu desempenho de atrito e a aumentar o desgaste. Adicionalmente, a comprovação de que o amianto é cancerígeno para o sistema

respiratório humano levou à progressiva eliminação de materiais de atrito que o incluíam na sua composição. Atualmente, a maioria dos dispositivos de freio é produzida com materiais de atrito isentos de amianto. Esses pesquisadores conduziram uma classificação dos materiais de atrito, levando em consideração tanto a matriz material quanto a fonte material.

Outra classificação é quanto à matriz do material de atrito:

- **Matriz Metálica** - A matriz metálica de materiais de atrito pode ser dividida em dois grupos: fundição e metalurgia do pó. O primeiro inclui aço, ferro fundido e bronze, mas tem sido pouco utilizado devido à fácil adesão e baixo coeficiente de atrito em altas temperaturas e velocidades. Já os materiais de atrito por metalurgia do pó, principalmente à base de ferro ou cobre, são prensados e sinterizados após uma mistura uniforme com aditivos de atrito. Materiais de atrito baseados em ferro oferecem alta resistência à temperatura, dureza e estabilidade térmica, enquanto os de cobre têm um coeficiente de atrito baixo, mas estável. Esses materiais são comumente aplicados em aviões, trens, caminhões e máquinas pesadas que exigem alta força de frenagem e operam em velocidades extremamente elevadas.
- **Matriz semi-metálica** - Os principais componentes do material de atrito da matriz semi-metálica incluem fibra de metal, fibra cerâmica e pó de cobre ou ferro. Os materiais de atrito da matriz semi-metálica apresentam notável resistência ao calor, alta capacidade de absorção de energia e excelentes propriedades tribológicas. Contudo, eles também apresentam algumas limitações, tais como a ocorrência de ruído de baixa frequência, facilidade de oxidação e o potencial para causar danos significativos ao disco de freio. Neste momento, os materiais de atrito da matriz semi-metálica são amplamente empregados em automóveis, motocicletas e outros veículos leves.
- **Matriz não-metálica** - Em materiais de atrito de matriz não metálica, utilizam-se resinas modificadas, borrachas e fibras orgânicas ou minerais como reforço. Após a mistura com outros aditivos de atrito, são solidificados por pressão a quente. Alguns exemplos desses materiais incluem compósitos de carbono reforçados com fibras de carbono (CRFC) e matriz cerâmica, que possuem excelentes propriedades tribológicas, como alta resistência, dureza, estabilidade térmica e resistência ao desgaste, sendo empregados principalmente em aviões e carros de corrida.

Atualmente, dois tipos principais de materiais de fricção são usados em freios: material de fricção por metalurgia de pó e material de fricção orgânica. O material de fricção por metalurgia de pó é composto por matriz, materiais de fortalecimento, agentes de incremento de fricção e materiais de lubrificação, enquanto o material de fricção orgânica consiste em aglutinantes, fibras reforçadas, aditivos de fricção e enchimentos (XIAO et al., 2016).

Birch (1988) e Eriksson (2000) destacam que os materiais de fricção utilizados em sistemas de freios veiculares são categorizados em dois grupos principais: orgânicos e semi-metálicos. Nos materiais semi-metálicos (SM), observa-se uma proporção significativa de compostos metálicos, como fibras de aço, que podem representar até 50% da composição do material.

Birch (1988) comparou materiais orgânicos e semi-metálicos, chegando às seguintes conclusões:

- **Materiais orgânicos** - Menor custo, menor abrasividade, resultando em menor desgaste do disco de freio, baixo ruído, bom coeficiente de atrito a frio, mas mais sensíveis ao efeito fade. São preferenciais em veículos leves e em mercados que valorizam o conforto de frenagem, como o mercado americano.
- **Materiais semi-metálicos** - Mais caros, frágeis, baixo coeficiente de atrito a frio, porém mais resistentes ao efeito fade e com vida útil prolongada. Com boas propriedades de dissipação de calor, são amplamente utilizados em aplicações mais intensas, como veículos grandes e esportivos.

De acordo com Limpert (2011), Eriksson (2000) e Brembo (1997) as pastilhas de freio são compósitos formados pela compactação de 10 a 20 materiais diferentes, os quais podem ser classificados em quatro grupos básicos.

a) Fibras - Contribuem para a rigidez, resistência mecânica, resistência ao desgaste e aumento do coeficiente de atrito é uma característica importante. Para materiais de fricção expostos a altas temperaturas, as fibras também desempenham um papel crucial na estabilidade térmica. Exemplos de fibras incluem fibras metálicas, de carbono, minerais e cerâmicas. Vale mencionar que o amianto, também conhecido como asbesto, foi amplamente utilizado como uma forma de fibra, mas seu uso foi proibido na década de 1980, por causar danos a saúde.

b) Carga - São minerais de baixo custo que desempenham um papel crucial na melhoria das características específicas do material de fricção, tais como resistência mecânica a altas temperaturas e condutividade térmica. Além disso, eles atuam como preenchimento, sem afetar o coeficiente de atrito do material de fricção. Dessa forma, ajudam a reduzir os custos e a prolongar a vida útil da pastilha. Exemplos desses minerais incluem carbonato de cálcio, sulfeto de bário e sílica. Outros minerais, como mica e vermiculita, sulfato de bário são frequentemente empregados nesse contexto.

c) Aglutinantes - São materiais ligantes que têm a função de unir os demais ingredientes do material de fricção. É possível adicionar elementos anti-ruído juntamente com os aglutinantes. Como exemplos de materiais ligantes, podem ser mencionadas as resinas cresol, resinas fenólicas modificadas por elastômeros,

fenol-formoldeído e novolak.

d) Modificadores de atrito - Esses materiais melhoram as propriedades mecânicas e de desgaste, sendo empregados para ajustar o coeficiente de atrito do material de fricção. Eles contribuem para a limpeza da superfície de atrito do disco de freio. Exemplos incluem latão, zinco, grafite, óxido de cobre, óxido de ferro e borracha de estireno butadieno. Conforme destacado por Eriksson, Bergman e Jacobson (2002) as partículas abrasivas, geralmente alumina e sílica, aumentam o coeficiente de atrito e o desgaste do disco. O propósito deste último é aprimorar a superfície de fricção, removendo óxidos de ferro e outros filmes de superfície indesejados do disco.

2.4 EMISSÃO DE PARTICULADOS POR SISTEMAS DE FREIOS: ANÁLISE CRÍTICA DE ESTUDOS PIONEIROS (2000-2010)

Na década de 2000 e 2010, estudos fundamentais foram conduzidos sobre a emissão de particulado por sistemas de freios. Dois desses estudos destacados são o da General Motors (GARG et al., 2000) e da Ford Motor Company (SANDERS et al., 2003).

General Motors - 2000: Garg et al. (2000) realizaram um estudo na General Motors para determinar a quantidade de partículas emitidas por sete formulações de pastilhas de freios. O experimento, baseado em um dinamômetro inercial, utilizou a montagem original do sistema de frenagem do veículo. Os resultados indicaram uma emissão média de 3,2 a 8,8 mg por quilômetro para veículos que variam de carros de passeio a picapes. A variação significativa entre diferentes pastilhas sugere oportunidades para aprimorar formulações e métodos de fabricação.

Ford Motor Company - 2003: O estudo conduzido por Sanders et al. (2003) em colaboração com a Ford Motor Company focou na diferença de emissão entre três tipos de materiais de atrito: baixo teor metálico, semi-metálico e orgânico sem amianto. A metodologia, semelhante à do estudo da General Motors, incluiu medições no veículo e em túnel de vento, abrangendo diferentes padrões de frenagem. Os resultados corroboraram as descobertas anteriores, validando a metodologia. Além disso, o estudo discutiu as características de emissão específicas para as três categorias de pastilhas mencionadas.

2.5 EQUIPAMENTOS DE ENSAIOS DE FRENAGEM

Conforme Limpert (2011) argumenta, devido a restrições financeiras e limitações de tempo, apenas os materiais de maior qualidade são submetidos a testes nos veículos. Antes desse estágio, os materiais de fricção passam por avaliações em máquinas para sua caracterização. O objetivo é desenvolver um modelo que permita

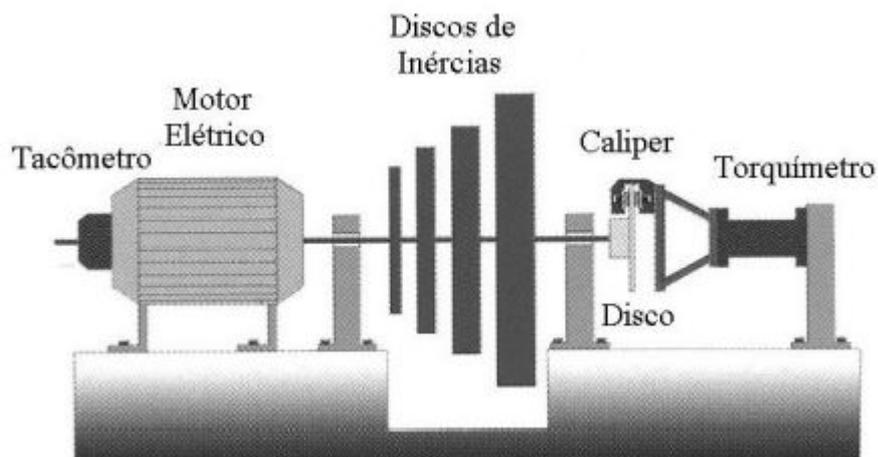
testar esses materiais sob condições de operação o mais próximo possível da realidade de um sistema de frenagem.

Zimmer (1982) afirma que os principais equipamentos empregados na caracterização de materiais de fricção incluem o dinamômetro inercial, Chase, Fast e Krauss, com destaque para o dinamômetro inercial, que é reconhecido por melhor reproduzir as condições de frenagem em sistemas de freios veiculares. Brembo (1997) destaca que os dinamômetros inerciais são os mais amplamente empregados na realização de testes de freios. Portanto, o princípio de funcionamento dessa máquina será explicado em detalhes.

Um dinamômetro inercial é composto por um motor elétrico capaz de controlar a variação de velocidade dos discos de inércia em rotação e, mais especificamente, da velocidade máxima de rotação correspondente à velocidade máxima do veículo em que o freio é testado. Com o auxílio dos discos de inércia, é fornecido à máquina um valor de energia cinética idêntico àquela fornecida pelo motor à parte do veículo afetado pelo freio testado (BREMBO, 1997).

O disco de freio é fixado na extremidade do eixo. O sistema de freio original do veículo é utilizado, preso à bancada, muitas vezes usando o próprio eixo do veículo testado. Na Figura 15 apresenta-se um exemplo típico de um dinamômetro inercial.

Figura 15 – Exemplo de Dinamômetro Inercial



Adaptado de Brembo (1997) apud Machado Pinto (2020)

As máquinas Chase e Fast são amplamente empregadas no controle de qualidade. Na máquina Chase, o corpo de prova é submetido a pressão contra um tambor cuja temperatura é controlada por meio de resistências elétricas e um sistema de ventilação. Por outro lado, na máquina Fast, o corpo de prova é submetido a pressão contra um disco em um ensaio com uma duração de 90 minutos. A máquina Fast é normalmente operada com atrito constante, mas também pode ser configurada para trabalhar com pressão constante (ZIMMER, 1982).

De acordo com Zimmer (1982), a máquina Krauss é semelhante a um dinamômetro, porém não incorpora discos de inércia. Ela faz uso do sistema de freio original do veículo, o qual é integrado à própria máquina. Essa ferramenta pode ser empregada tanto no desenvolvimento de novos materiais de fricção quanto no controle de qualidade.

Na Tabela 2 são comparadas as principais características discutidas por Zimmer (1982), conforme citado por Machado Pinto(2020), sobre as máquinas usadas na caracterização de materiais de fricção.

Tabela 2 – Comparação das características das máquinas de caracterização de materiais de fricção

Tipo de Máquina	Componentes			Tempo de Teste (tempo de preparação incluso)	Vantagens	Desvantagens
	Sistema de Freio	Pastilha	Disco			
Dinamômetro	Original	original	original	10h	resultados significantes	alto custo e tempo de teste longo
Chase	suporte da máquina	corpo de prova 1"x1"	disco da máquina	7,5h	baixo custo	tempo de teste longo e não compatível com resultados de veículo
Fast	suporte da máquina	corpo de prova 0,5"x0,5"	disco da máquina	7,5h	baixo custo	
Krauss	Original	original	original	3h	resultados significantes	-

Fonte: Zimmer (1982) apud Machado Pinto(2020).

2.6 FORMAÇÃO DOS PLATÔS

As partículas de desgaste foram coletadas e fotografadas com Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), como relatado por Kukutschová et al. (2016). Esses pesquisadores realizaram medições das distribuições de tamanho das partículas de desgaste durante os testes em dinamômetro, enfatizando a relevância das partículas de desgaste de tamanho nanométrico no contexto da frenagem automotiva.

Ao acionar o freio, as superfícies rugosas da pastilha e do disco de freio entram em contato e sofrem um processo de deslizamento. Devido à maior dureza do disco de freio e à sua alta velocidade de rotação, ocorre a remoção de alguns materiais de fricção por meio de corte, resultando na formação de resíduos de desgaste (XIAO et al., 2016).

Ostermeyer (2001) ressalta que o atrito é afetado pelo desgaste, e os componentes mais rígidos das pastilhas desempenham um papel significativo no

aumento do atrito devido às maiores tensões normais que eles geram. À medida que ocorre o desgaste da pastilha, a área de contato entre esses componentes rígidos das pastilhas e o disco se altera, o que por sua vez influencia o valor do atrito.

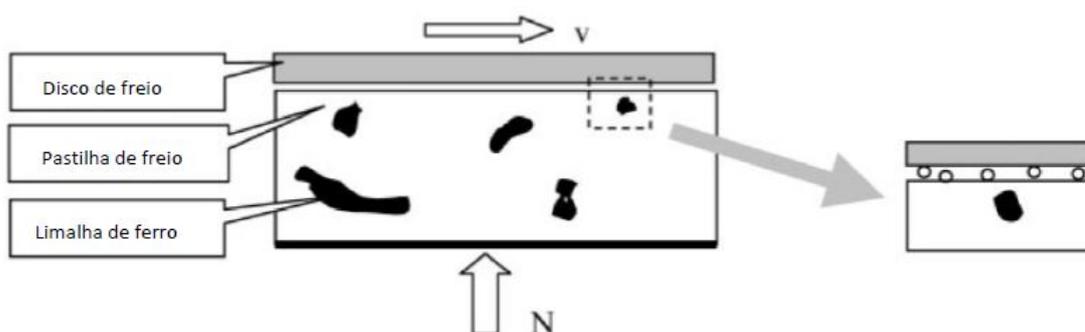
Os resultados das sucessivas aplicações do freio envolvem a remoção de cristais de material duro e o surgimento de novos cristais, resultando na formação dos platôs de contato. Esses platôs de contato, conforme demonstrado por Eriksson (2000) e Neis et al. (2017), apresentam uma dureza superior à da pastilha de freio.

As partículas geradas durante os processos de frenagem são liberadas no ar na forma de material particulado, podendo ser depositadas nos componentes do sistema de freio ou caírem na superfície à beira da estrada. As partículas liberadas possuem um tamanho menor que 10nm, e a composição dos platôs formados é principalmente determinada pelo lubrificante sólido, que faz parte da formulação da pastilha de freio (ÖSTERLE; URBAN, 2006).

De acordo com Müller e Ostermeyer (2007) e Ostermeyer e Müller (2008), os platôs têm sua origem devido às heterogeneidades presentes no material da pastilha. As pastilhas orgânicas convencionais, que não contêm amianto, são compostas por partículas duras (tais como pós, fibras metálicas e orgânicas) que estão imersas em uma matriz polimérica bastante macia. Como resultado do atrito gerado pelo processo de frenagem, que envolve o deslizamento da pastilha contra o disco, duas situações podem ocorrer: apenas a matriz macia entra em contato. Essa condição se aplica exclusivamente às pastilhas 'verdes' (novas). No caso geral, há também contato entre as não-homogeneidades e o disco.

O primeiro caso é exemplificado pela Figura 16. A maior parte dos resíduos é originada da matriz polimérica. Nas pastilhas de freio, as partículas de desgaste percorrem a zona de contato. Ao alcançarem a borda, uma parte dessas partículas é liberada no meio ambiente, enquanto a outra continua a passar por processos de deformação, esmagamento, quebra e descamação repetidamente.

Figura 16 – Alterações no perfil do par pastilha-disco e, à direita, apresentar uma pequena seção ampliada.

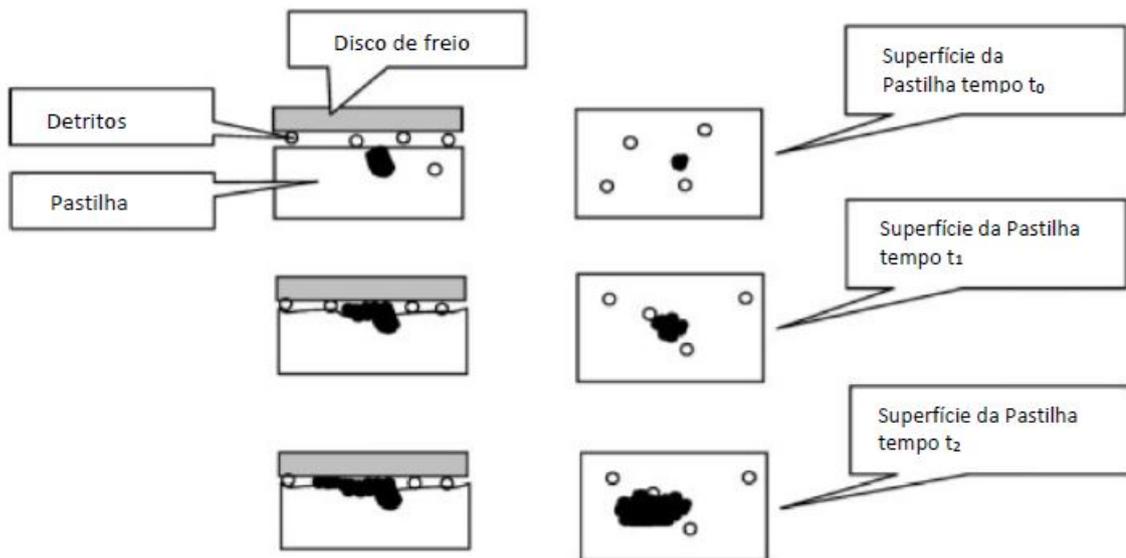


Adaptado de Ostermeyer e Muller (2008) apud Machado Pinto (2020)

Segundo Ostermeyer e Müller (2008) quando a matriz polimérica de uma pastilha de freio sofre desgaste, ocorrem dois eventos significativos relacionados às partículas de material duro presentes na formulação para aumentar o atrito. O primeiro evento resulta do aumento da taxa de desgaste da matriz polimérica, que pressiona a partícula dura contra a superfície da pastilha, aumentando a pressão local. O segundo evento ocorre devido à perturbação do fluxo das partículas de desgaste na interface de contato.

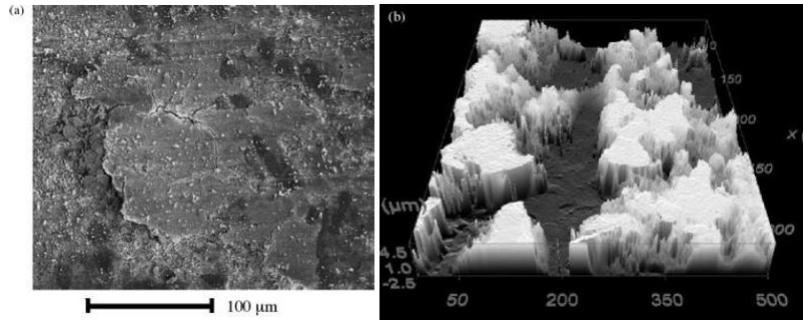
Essas mudanças causam o acúmulo e compactação das partículas de desgaste ao redor da partícula dura, devido ao aumento das tensões e da temperatura nas áreas circundantes. Esse processo de fusão e liga, como a liga mecânica e a tribooxidação, leva ao desenvolvimento de um fino filme de óxido duro, conhecido como platô, no topo da pastilha. Esses platôs crescem em sentido contrário e perpendicular ao fluxo das partículas de desgaste, como mostrado na Figura 17. Na Figura 18 podem ser observadas as imagens de platôs formados em pastilhas de freio desgastadas, obtidas por meio de técnicas de microscopia (OSTERMEYER; MÜLLER, 2008).

Figura 17 – Diferentes momentos $t_0 < t_1 < t_2$: Crescimento de um platô.



Adaptado de Ostermeyer e Muller (2008) apud Machado Pinto (2020)

Figura 18 – (a) Microscopia eletrônica de varredura de uma pastilha de freio desgastada, com direção de deslizamento da esquerda para a direita. (b) Microscopia confocal de uma pastilha de freio desgastada, com direção de deslizamento de cima para baixo.

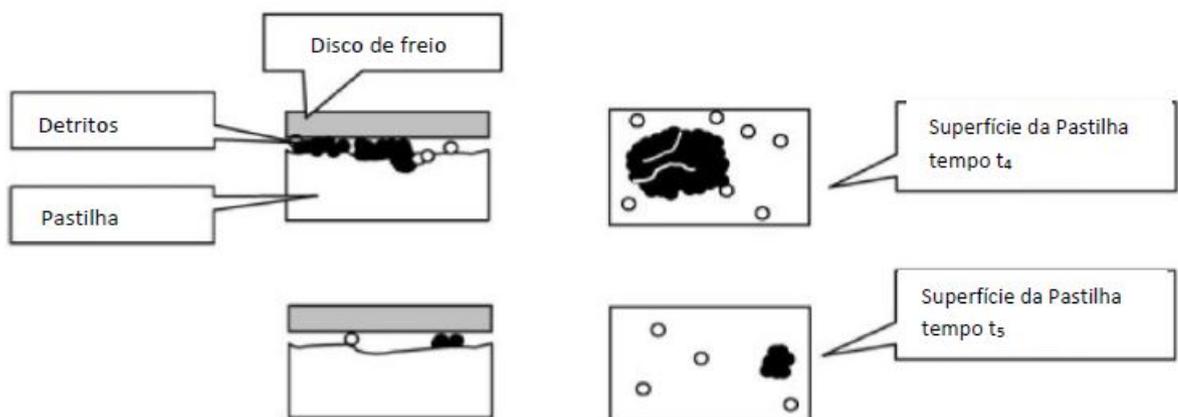


Adaptado de Muller e Ostermeyer (2007) apud Machado Pinto (2020)

Segundo Muller e Ostermeyer (2007), os platôs protegem a matriz polimérica contra o desgaste. No entanto, é importante notar que o atrito transmitido pelo platô pode atingir níveis que causam desgaste no disco. Por essa razão, a inclusão de um lubrificante sólido na composição da pastilha é uma prática comum, pois ajuda a limitar o desgaste abrasivo entre o disco e a pastilha.

O tempo de vida de um platô é finito. O desgaste ao seu redor, a geração de calor e as tensões mecânicas diminuem sua estabilidade. Além disso, a rugosidade da superfície do disco de freio causa movimentos locais e vibrações nos platôs, o que leva à propagação de fissuras. Esses efeitos resultam na deterioração de parte dos platôs com o passar do tempo, conforme ilustrado na Figura 19. Além disso, a estrutura cultivada, junto com a partícula original, perde gradualmente seu suporte na matriz, até que, em algum momento, o platô inteiro se rompe e sai do sistema.

Figura 19 – Diferentes momentos $t_3 < t_4 < t_5$: destruição de um platô.

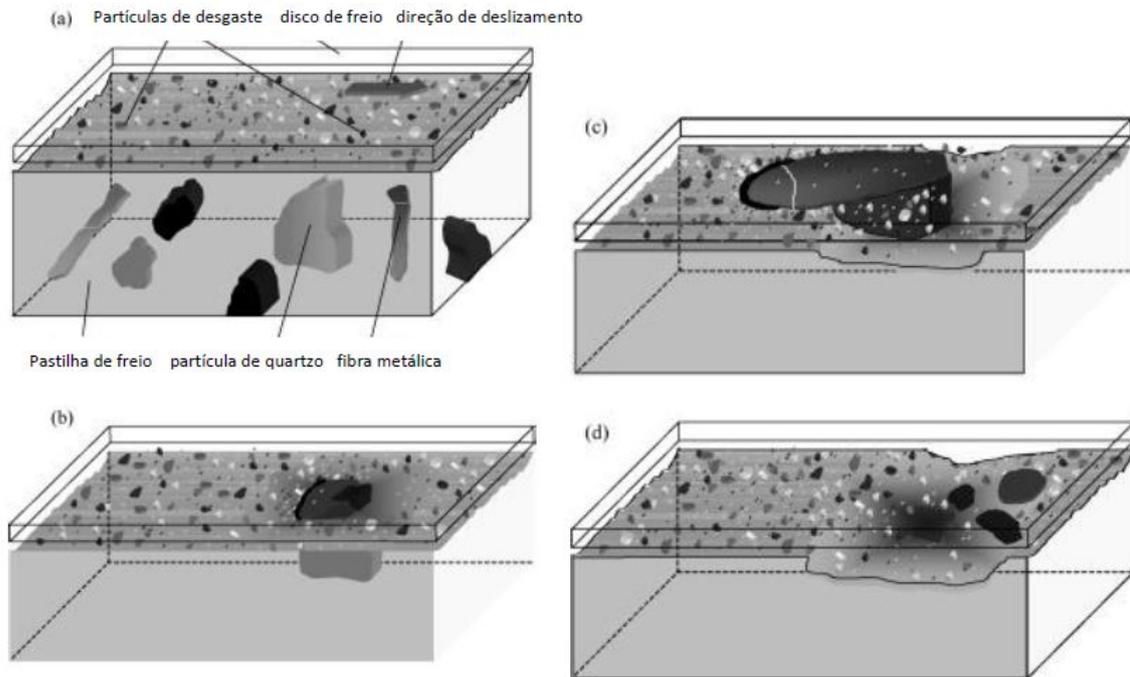


Adaptado de Ostermeyer e Muller (2008) apud Machado Pinto (2020)

Em resumo, a interação entre o disco e a pastilha envolve o desenvolvimento

e a deterioração de áreas de contato contendo platôs, que são estruturas de alta resistência ao desgaste e ao atrito na superfície da matriz polimérica macia, como ilustrado na Fig. 20.

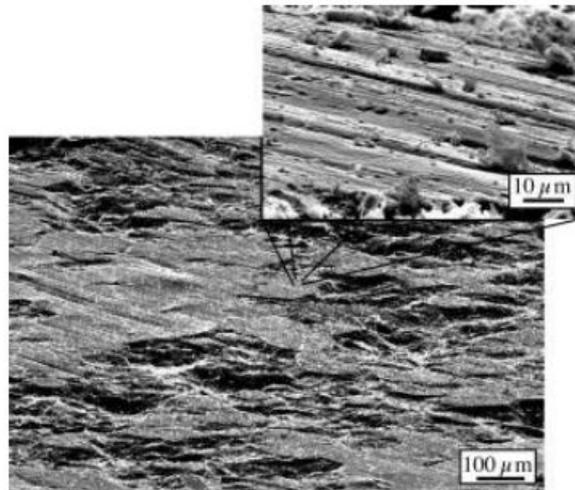
Figura 20 – O contato entre pastilha e disco envolve quatro fases: (a) a composição da pastilha nova, (b) a formação de um platô, (c) o crescimento do platô com aumento da instabilidade e (d) a destruição do platô.



Adaptado de Ostermeyer e Muller (2008) apud Machado Pinto (2020)

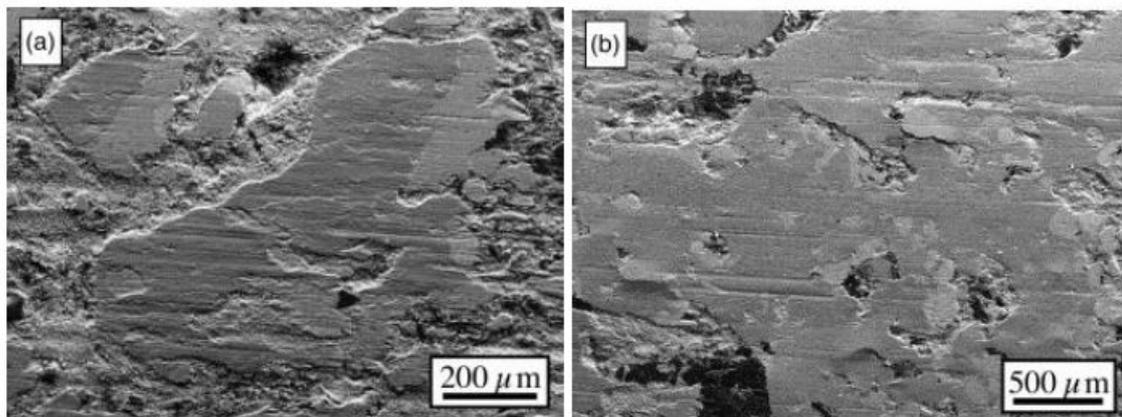
Eriksson (2000) realizou medições da dureza dos platôs em várias profundidades. Os resultados revelaram que a dureza dos platôs era comparável à dureza das fibras metálicas quando as profundidades de recuo eram muito baixas, sendo cerca de 20 vezes maior do que a dureza do material da matriz. Conforme Eriksson e Jacobson (2000), é possível identificar os platôs de maneira visível, aparecendo como manchas brilhantes em contraste com um fundo escuro. Através da utilização de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) ou um perfilômetro, é possível determinar que esses platôs apresentam tamanhos variados, normalmente com diâmetros entre 50 e 500 μm e uma altura de alguns microns. Esses platôs correspondem às áreas da pastilha de freio que demonstram sinais de contato deslizante com o disco. Esses sinais geralmente se manifestam como superfícies relativamente planas com ranhuras rasas na direção do deslizamento, como ilustrado na Figura 21. Em situações com temperaturas e pressões elevadas nos freios, como destacado por Eriksson, Lord e Jacobson (2001), os platôs podem crescer consideravelmente, chegando a cobrir grande parte da pastilha de freio, como ilustrado na Figura 22.

Figura 21 – Platôs de contato na superfície de uma pastilha de freio orgânica. Os platôs de contato apresentam a típica superfície ranhurada, como pode ser observado no detalhe ampliado



Adaptado de Eriksson e Jacobson(2000) apud Machado Pinto (2020)

Figura 22 – Platôs na superfície de uma pastilha de freio orgânica podem se formar após a frenagem em (a) condições de baixa pressão e temperatura de freio e (b) em condições de alta pressão e temperatura.



Adaptado de Eriksson e Jacobson(2000) apud Machado Pinto (2020)

De acordo com Eriksson e Jacobson (2000), em situações de contato deslizante, as forças de atrito são transmitidas através da área de contato real. Essa área de contato real é limitada pelas características da superfície das pastilhas de freio. No entanto, em qualquer momento, a área de contato real é substancialmente menor do que a área total dos platôs de contato. O tamanho e a composição dos platôs desempenham um papel fundamental no comportamento do atrito na interface entre a pastilha e o disco.

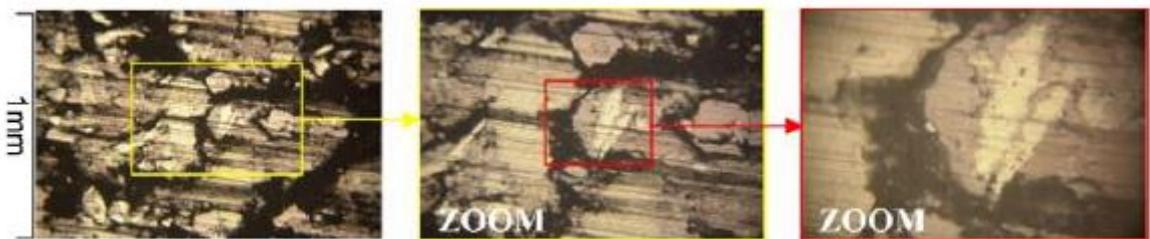
Segundo Eriksson e Jacobson (2000) e Zula e Pandya (2017), os platôs de contato são divididos em dois tipos: platôs primários e secundários. Os platôs

primários surgem inicialmente devido à menor taxa de remoção dos componentes mecânicos estáveis e resistentes ao desgaste da pastilha, que geralmente são as fibras responsáveis por aumentar o atrito. Posteriormente, essas partículas duras podem se tornar pontos de partida para o desenvolvimento dos platôs secundários. Platôs secundários são formados devido a altas pressões, temperaturas e tensões cisalhantes que compactam os resíduos gerados durante o processo de frenagem. Isso resulta na criação de canais rasos entre a pastilha e o disco, como ilustrado na Fig. 21.

Devido ao constante contato com o disco em movimento, pequenas partículas de resíduos circulam continuamente por esses canais. Em alguns casos, esses resíduos podem se acumular nos platôs primários ou secundários, caso estes já estejam presentes.

Eriksson e Jacobson (2000) evidenciaram que os platôs, em geral, exibem sinais de desgaste e contato deslizante, como ilustrado na Figura 23, que apresenta um padrão de sulcos paralelos à direção de deslizamento.

Figura 23 – Três ampliações consecutivas da superfície de contato da pastilha revelam distintos platôs de contato.

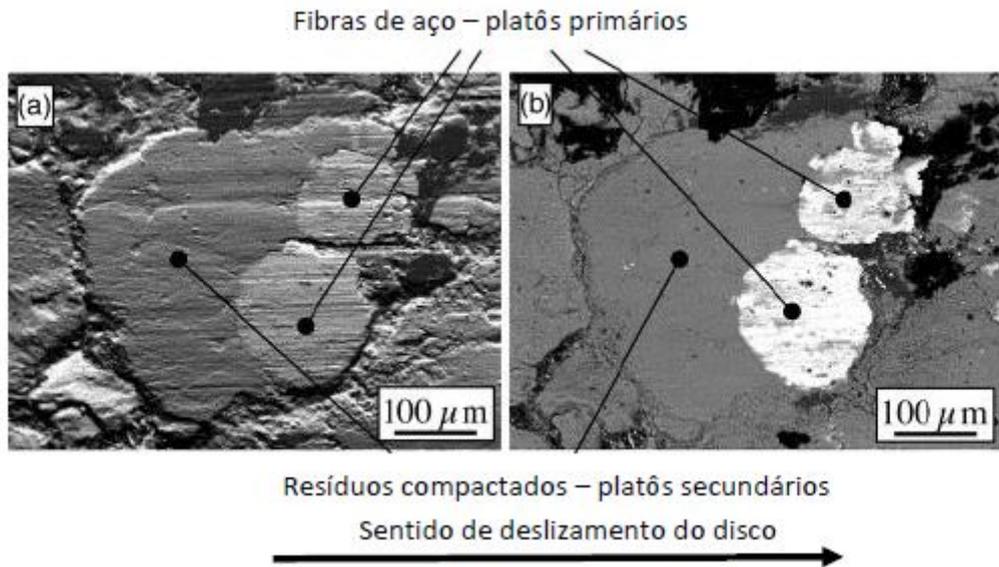


Adaptado de Ostermeyer e Muller (2008) apud Machado Pinto (2020)

A nucleação dos platôs de contato ocorre onde as fibras metálicas saem da superfície, conhecidos como platôs primários, que são consideravelmente mais duros do que a média do compósito da pastilha. Isso leva à aglomeração e compactação de um terceiro corpo ao redor desse ponto mais duro, expandindo a área efetiva dos platôs de contato e formando os platôs secundários, conforme mostrado na Figura 24.

Uma análise EDS pode identificar essas áreas pela alta concentração de carbono, que é usada para estabilizar o coeficiente de atrito nas pastilhas automotivas.

Figura 24 – Em uma pastilha de freio orgânica, observamos a presença de dois platôs primários que sustentam um platô secundário. Uma imagem MEV de elétrons secundários (SE) fornece informações topográficas da superfície (Figura a), enquanto uma imagem de elétrons retroespalhados (BSE) revela o contraste na composição do material (Figura b).



Eriksson e Jacobson (2000).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, apresentam-se as metodologias empregadas na realização dos ensaios experimentais e na obtenção dos dados para posterior análise. As variáveis a serem medidas, as variáveis resposta que serão analisadas e as técnicas de medição utilizadas para esse propósito. Por fim, apresenta-se as técnicas de análise de dados adotadas neste estudo.

3.1 DESCRIÇÃO DO VEÍCULO DE ENSAIO DE FRENAGEM

Os ensaios de frenagem em um veículo foram conduzidos nas instalações do Laboratório de Sistemas Veiculares da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O veículo em questão é uma motocicleta BMW G 310 GS, com as seguintes características: Motor monocilíndrico de quatro tempos com refrigeração líquida, capacidade de 313 cm^3 e potência de 34 cv (25 kW) a 9.250 rpm.

A motocicleta está equipada com freios a disco tanto no eixo dianteiro quanto no traseiro, com um diâmetro de 300mm e no disco traseiro de 240mm de diâmetro uma espessura de 4,5 mm fabricado em aço inoxidável, conforme mostrado na Figura 25. Uma pinça de fixação radial de quatro pistões do tipo deslizante, acionada manualmente por pedal, e é fabricada pela BREMBO (2018).

Figura 25 – Sistema de Freios BMW G 310 GS



Bmw motorrad (2023)

Os resultados obtidos podem ser correlacionados e confirmados para veículos de maior porte que também utilizam sistemas de freio a disco, uma vez que o princípio

de funcionamento de um sistema de freio a disco em motocicletas é semelhante, com variações apenas na rigidez e na intensidade de frenagem.

Como o foco está na análise do desgaste das pastilhas, incluindo o impacto de parâmetros operacionais no desempenho do atrito e nos processos de desgaste, o banco de ensaios se mostra apropriado para a realização dos experimentos. Os instrumentos empregados para controle de desgaste serão descritos no tópico 3.1.2.

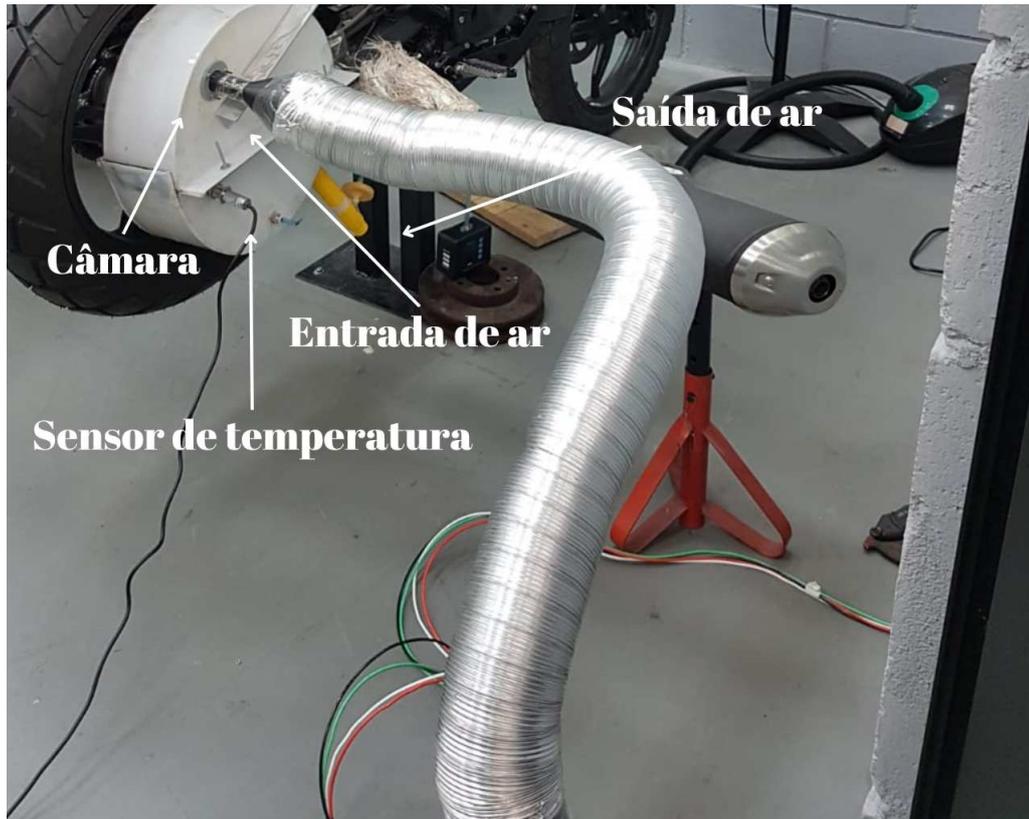
3.1.1 Câmara de Coleta

O conjunto disco e a pinça da roda traseira são protegidos por uma câmara, com um fluxo de ar controlado e filtrado, que direcionam o sistema para um escoamento de ar semelhante ao observado em condições de uso em estrada, removendo, assim, o material particulado.

O projeto de fabricação e montagem da câmara de coleta de partículas foi desenvolvido com base no artigo do autor (HAGEN; FERDINAND, 2020). O princípio de medição adotado fundamenta-se em um sistema de volume constante, onde o ar limpo é direcionado para o sistema de freios. Nesse ponto, ocorre a mistura com as partículas de poeira provenientes dos freios, resultando na formação de um aerossol.

Em seguida, esse aerossol é conduzido para o ponto de amostragem, mantendo-se um fluxo de ar constante, independentemente das manobras de frenagem. Para realizar essas medições, são indispensáveis os seguintes componentes: uma câmara que acomoda o sistema de freios, um sistema de tubulação, filtros de ar e um ventilador (HAGEN; FERDINAND, 2020). A disposição detalhada desses componentes é esquematicamente apresentada na Figura 26.

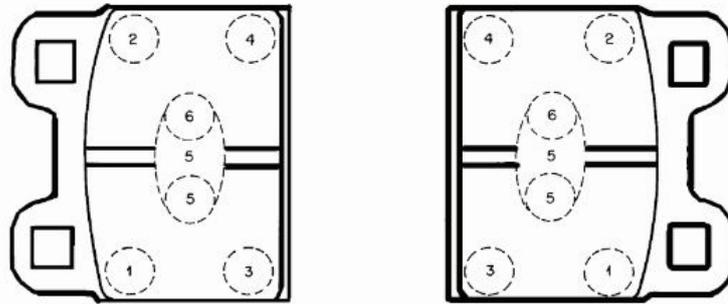
Figura 26 – Configuração da Câmara



3.1.2 Instrumentos empregados nos ensaios

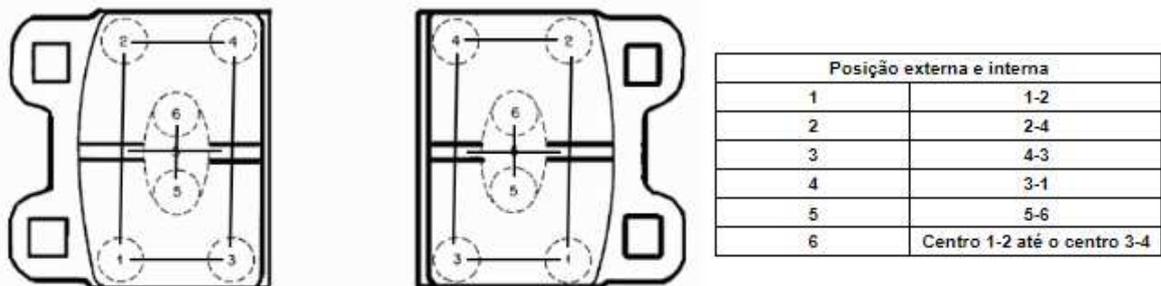
Para avaliar o desgaste das pastilhas em relação à espessura, foi realizado o cálculo da diferença entre as médias das espessuras das pastilhas antes e depois dos testes. Para efetuar essas medições, foi utilizado um micrômetro digital da marca Mitutoyo 293-821-30 com capacidade de 0-25mm e uma resolução de 0,001 mm, uma balança eletrônica de precisão da marca RADWAG, modelo PS 600, com uma resolução de 0,001 gramas e um rugosímetro portátil da marca Mitutoyo modelo SJ-210. A representação esquemática dos pontos de medição para a espessura estão representados na Figura 27 enquanto para a rugosidade, a representação segue na Figura 28 .

Figura 27 – Representação esquemática dos pontos de medição da espessura da posição externa e interna da pastilha



ABNT (1995)

Figura 28 – Representação esquemática dos pontos de medição da rugosidade da posição externa e interna da pastilha



adaptado ABNT (1995)

A análise microestrutural das pastilhas, com o objetivo de identificar os platôs, foi conduzida utilizando um microscópio metalográfico Bel MTM17T com capacidade de ampliação de até 1000x. Para aquisição de dados referente a temperatura foi utilizado um sensor infravermelho empregado junto a um conjunto arduino. O controle da velocidade foi realizado por meio do painel do veículo, enquanto o tempo foi registrado por um cronômetro.

3.2 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS DE FRENAGEM

Com o objetivo de avaliar o desempenho dos materiais de atrito no processo de frenagem, optou-se por conduzir experimentos em um veículo, permitindo uma análise das condições reais de aplicação de um sistema de freios. Para os ensaios, seguiu o procedimento estabelecido pela norma ABNT NBR-6143/1995, intitulada "Pastilhas de Freio a Disco - Determinação do Coeficiente de Atrito e Desgaste através da Bancada de Ensaios Krauss". Os próximos subseções detalharão cada um desses procedimentos.

3.2.1 Procedimento de Krauss – Banco de Ensaios

Para a execução desses testes, seguiu as diretrizes da norma ABNT NBR-6143/1995 como base de referência. Conforme o estipulado por esta norma, deve-se usar um disco de freio específico para cada variação de pastilha de freio. Além disso, a norma estabelece um limite máximo de $15 \mu m$ para o parâmetro de rugosidade Rz da superfície de contato entre o disco e as pastilhas durante a frenagem. Nesse sentido, torna-se essencial aferir a rugosidade da superfície do disco.

Conforme as diretrizes aplicáveis, o procedimento para a realização do ensaio de frenagem é da seguinte forma:

- a) Cada frenagem deve ter uma duração de 5 segundos.
- b) Deve haver um intervalo de 10 segundos entre cada frenagem, durante o qual o freio deve permanecer desaplicado.
- c) O experimento deve ser composto por 10 ciclos de frenagem, sendo que cada ciclo é composto por 10 frenagens.

Conforme estipulado pela ABNT NBR-6143/1995, uma vez que o par de pastilhas de freio foi corretamente colocado na pinça de freio, a etapa inicial do processo consiste na fase de adaptação das pastilhas. A norma especifica que os três primeiros ciclos de frenagem têm o propósito de promover a perfeita adaptação das pastilhas de freio. Conforme destacado por Zangiacomi (2002), a etapa de assentamento das pastilhas tem como objetivo verificar a correta disposição das pastilhas e a adequada operação das mesmas.

O processo de ensaio inicia-se com o disco à temperatura ambiente, ou à temperatura presente no ambiente, desde que esta seja inferior a $50^\circ C$. Entre cada ciclo individual, é fundamental permitir que o disco resfrie naturalmente até atingir temperaturas inferiores a $100^\circ C$. Os sete ciclos de frenagem que seguem o período de assentamento serão os ciclos utilizados para a análise, constituindo as sete réplicas experimentais necessárias.

3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL – ENSAIOS EM VEÍCULO

Os ensaios foram realizados em uma Bancada de Testes onde a base é constituída por uma motocicleta fixada ao solo. Nesse arranjo, a roda traseira permanece suspensa, permitindo apenas o contato da roda dianteira com o solo, conforme ilustrado na conforme ilustrado na Figura 29.

Figura 29 – Montagem do suporte na moto



Este experimento teve como objetivo analisar o desempenho do sistema de freios em situações semelhantes a frenagens de emergência, nas quais o freio é acionado de forma abrupta.

Os procedimentos utilizados para os ensaios em veículo foram os seguintes: dez ciclos com dez frenagens consecutivas, iniciando a 36 km/h e parando o veículo com máxima desaceleração e retomada, o acionamento do freio traseiro ocorreu por meio do pedal, sendo que a pressão aplicada foi ajustada de acordo com a necessidade de manter uma velocidade constante antes da desaceleração, pois com a variação do coeficiente de atrito μ a pressão aplicada também irá se modificar. Resumidamente, o procedimento para os testes realizados no veículo envolveu as seguintes etapas:

1 - Assentamento das pastilhas de freio com 3 ciclos com o total de 30 frenagens;

2 – Realização do teste de 36 a 0 km/h de freio com 7 ciclos com o total de 70 frenagens permitindo que o sistema de freio esfriasse até atingir 100 °C no final de cada ciclo;

Os ensaios realizados em um veículo tiveram como objetivo a análise das características dos platôs formados na superfície do material de atrito utilizado e sua relação com o desempenho durante o processo de frenagem. As variáveis de resposta analisadas são: Medida de desempenho da frenagem, características dos platôs, parâmetros de massa, espessura e rugosidade da superfície da amostra. A Tabela 3 apresenta as variáveis de cada grupo.

Tabela 3 – Variáveis utilizadas para análise dos experimentos em veículo.

Grupos	Variáveis relacionada	Unidade
Medida de desempenho da Frenagem	Temperatura	° C
Medidas das características dos platôs	Área relativa dos platôs	μm^2
	Número médio dos platôs	quantidade de platôs
	Perímetro médio	μm
Parâmetros de rugosidade superficial das amostras	Ra	μm
	Rz	μm
	Rt	μm

Fonte: Adaptado de Machado Pinto(2020).

O estudo da caracterização da frenagem em veículos relacionou as medidas das características dos platôs, incluindo a área relativa ocupada por eles, o número médio de platôs e o perímetro médio dos platôs nas amostras selecionadas. No grupo de variáveis relacionadas à rugosidade superficial, foi destacado os seguintes parâmetros: Ra, Rz e Rt. O Ra corresponde à média aritmética dos desvios no perfil da superfície, calculada ao longo de um comprimento de amostragem. O Rz, por sua vez, é determinado pela média das amplitudes extraídas em cinco pontos de avaliação ao longo do comprimento. Finalmente, o Rt representa a altura máxima da rugosidade, ou seja, a amplitude máxima entre o ponto mais alto e o ponto mais profundo no mesmo comprimento de avaliação.

Os parâmetros de superfície foram avaliados através do rugosímetro, no Laboratório de Metrologia Departamento de Engenharias da Mobilidade do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

3.3.1 Massa, espessura e rugosidade da superfície da amostra

Antes do início do ensaio, procedeu-se à preparação e posicionamento dos instrumentos. Foram pesados dois conjuntos de pastilhas, submetidos a medidas e análises referentes à sua massa, espessura e rugosidade. Os conjuntos de pastilhas foram posteriormente subdivididos em pastilhas internas e externas, resultando em dois grupos: a pastilha metálica, mostrada na Fig. 30 (a), e a pastilha orgânica, localizada no lado direito, conforme representado na Fig. 30 (b).

Figura 30 – Conjunto de pastilhas



A seguir, são apresentados os valores de massa (g), espessura (mm) e rugosidade (μm) nas Tabelas 4, 5 e 6.

Tabela 4 – Dados de entrada da massa

Material	Massa (g)
Pastilha_interna_Metálica	66,14
Pastilha_externa_Metálica	65,59
Pastilha_interna_Orgânica	65,95
Pastilha_externa_Orgânica	66,07

Tabela 5 – Dados de entrada das médias das espessuras

Material	Média das Espessuras (mm)
Pastilha_interna_metalica	9,211
Pastilha_externa_metalica	9,192
Pastilha_interna_Orgânica	8,887
Pastilha_externa_Orgânica	8,783

Tabela 6 – Dados de entrada das médias das Rugosidades

Material	Média das Rugosidades		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Rt (μm)
Pastilha_interna_Metalica	2,247	16,064	24,656
Pastilha_externa_Metalica	2,266	15,483	25,673
Pastilha_interna_Orgânica	3,172	19,720	44,263
Pastilha_externa_Orgânica	3,762	23,540	36,356

O experimento teve início com o disco mantido a uma temperatura ambiente inferior a 50°C. Entre cada ciclo individual, permitiu-se que o disco resfriasse naturalmente até atingir temperaturas inferiores a 100°C. O intervalo de tempo entre os resfriamentos foi de aproximadamente quatro minutos, após o qual um novo ciclo era iniciado.

Foram realizados sete ciclos consecutivos após o período de assentamento, e esses dados foram utilizados para a análise. O comportamento da temperatura durante o ensaio está representado no subtópico 4.1.1. Foram examinadas duas variáveis de saída: a temperatura durante cada ciclo em situação de frenagem e o desgaste das pastilhas de freio.

O desgaste das pastilhas foi avaliado de duas maneiras: através da subtração da massa inicial pela massa final e pela diferença entre as médias das espessuras das pastilhas antes e após o ensaio. Além disso, realizou-se uma comparação entre o valor inicial e o valor final da rugosidade.

3.4 TÉCNICAS DE ANÁLISE LABORATORIAL DO MATERIAL DE ATRITO

Analisar alguns estudos sobre as técnicas laboratoriais utilizadas e os propósitos de sua aplicação, serão fundamentais como ponto de referência para a escolha das técnicas de análise a serem aplicadas neste estudo. Conforme constatado por meio da análise da Tabela 7, a maioria expressiva dos estudos que se dedicam à análise microestrutural dos materiais de atrito emprega o MEV como técnica para investigar as superfícies sujeitas ao atrito durante o processo de frenagem.

Os microscópios ampliam objetos, permitindo observar detalhes que o olho nu não consegue distinguir devido ao chamado Limite de Resolução (LR). O LR a olho nu é cerca de 0,2mm, o Microscópio Ótico (MO) possui um LR de 0,2 μ m, enquanto o Microscópio Eletrônico (ME) tem um LR de 0,2nm. Portanto, microscópios revelam detalhes que seriam invisíveis a olho nu. Isso se deve à diferença de comprimento de onda da luz (MO) e dos elétrons (ME) usados para formar a imagem, bem como às lentes empregadas.

Em resumo, o ME, com seu menor comprimento de onda, supera significativamente o MO na resolução, permitindo ver detalhes extremamente pequenos (MEIB, 2022). Entretanto diante das limitações no acesso ao MEV, optou-se por empregar técnicas de análise com um Microscópio Metalográfico nesta pesquisa.

Tabela 7 – Técnicas de análise laboratorial aplicadas em materiais de atrito.

Técnica Empregada para Análise	Metodologia e objetivos	Autores que empregaram esta técnica
Microscópio eletrônico de varredura (MEV)	Preparação das amostras para visualizar as estruturas em uma escala mesoscópica. Utiliza um feixe focalizado de elétrons para produzir imagens da amostra na câmara	Eriksson e Jacobson (2000) Massi, Berthier e Baillet (2008) Osterle e Urban (2006) Verma <i>et al.</i> (2015) Verma <i>et al.</i> (2016) Deng <i>et al.</i> (2010) Han <i>et al.</i> (2011) Bao <i>et al.</i> (2012) Kukutschová <i>et al.</i> (2010) Massi, Berthier e Baillet (2008) Barros <i>et al.</i> (2016) Ostermeyer e Muller (2008) Eriksson, Bergman e Jacobson, (2000); Eriksson, Bergman e Jacobson (2002) Filip, Weiss e Rafaja (2002) Osterle, Urban (2004) Kemmer (2002) Jacobson (2006)
Espectroscopia por dispersão de energia (EDS)	Técnica analítica usada para análise elementar ou caracterização química de uma amostra	Eriksson e Jacobson (2000) Osterle e Urban (2006) Verma <i>et al.</i> (2015) Verma <i>et al.</i> (2016)
Perfilômetro tridimensional	Instrumento para obtenção do perfil topográfico da superfície das pastilhas	Eriksson e Jacobson (2000)
Espectroscopia Raman	Técnica fotônica de alta resolução que pode proporcionar informação química e estrutural de qualquer material, composto orgânico ou inorgânico, permitindo sua identificação.	Verma <i>et al.</i> (2016) Osterle e Urban (2006)
FIB - feixe de ions focalizado	O funcionamento do FIB assemelha-se ao de um <u>microscópio eletrônico de varredura (MEV)</u> . No entanto, enquanto um MEV utiliza um feixe de elétrons, uma configuração FIB usa um feixe de <u>ions</u> focalizado. Foi utilizado para revelar filmes de superfície induzidos e para a preparação transversal de camadas superficiais	Osterle e Urban (2006)
Análise termogravimétrica (TGA)	Técnica destrutiva no ramo de <u>análises térmicas</u> , na qual se monitora a variação da massa de uma amostra em função da temperatura ou do tempo em um ambiente de temperatura e atmosfera controladas.	Verma <i>et al.</i> (2016)
Métodos Analíticos de Superfície (GDOS, XPS e RS)	<u>Métodos analíticos de superfície para obter informações químicas de filmes finos formados sobre o disco de freio</u>	Osterle e Urban (2006)
Microscopia de varredura de ions (SIM).	<i>Scanning Ion Microscopy</i>	Osterle e Urban (2006)
Difratometria de raios X (DRX)	Para identificar as fases cristalinas presentes nos resíduos de desgaste	Verma <i>et al.</i> (2015)
Espectroscopia de fluorescência de raios-x (XRF)	Obtenção da composição elementar da pastilha de freio	Verma <i>et al.</i> (2015)

Fonte: Machado Pinto (2020).

Para conduzir as análises microscópicas das pastilhas em estudo, empregou-se um microscópio metalográfico Bel MTM17T com capacidade de ampliação de até 1000x. Após a obtenção das imagens, procurou-se analisar as características superficiais presentes nelas. O estudo se concentra em características mencionadas na revisão bibliográfica, especificamente os platôs de contato observados em uma escala mesoscópica. A análise aborda a relação entre a área relativa ocupada pelos platôs nas amostras, juntamente com a avaliação do número, área e perímetro médio desses platôs.

As características foram adquiridas por meio do software analisador de imagem, Fiji, um pacote de processamento de imagem de código aberto baseado no ImageJ2. Para cada tipo de ensaio em veículo, oito imagens foram analisadas, com ampliações de 50,100 e 200 vezes. No ImageJ Fiji, foi realizado um pré-processamento da imagem antes da análise, incluindo etapas como binarização, ajuste da escala, configuração da análise e definição do limite (threshold), dois exemplos estão representados no lado direito nas Figuras 31 e 32.

Figura 31 – Representação do pré-processamento de imagem.

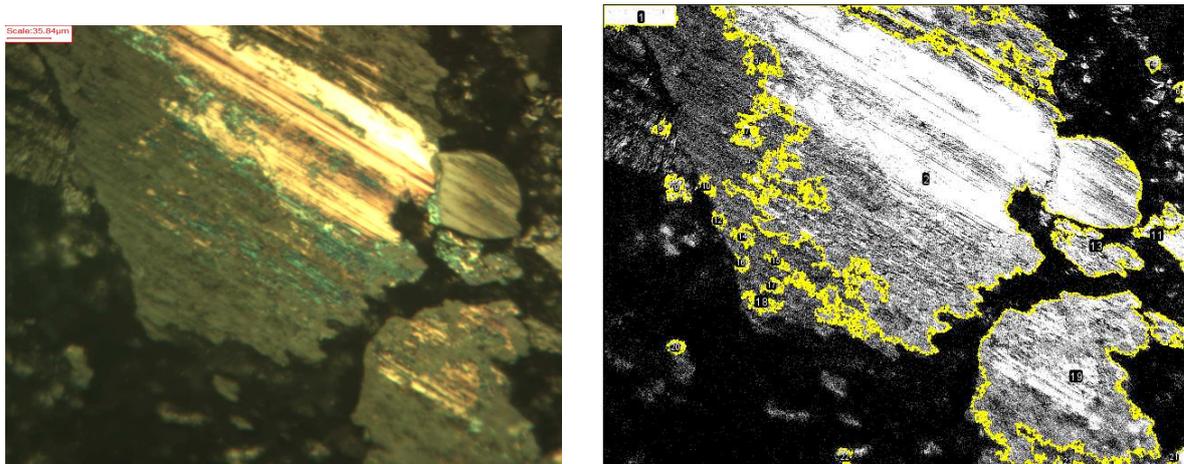
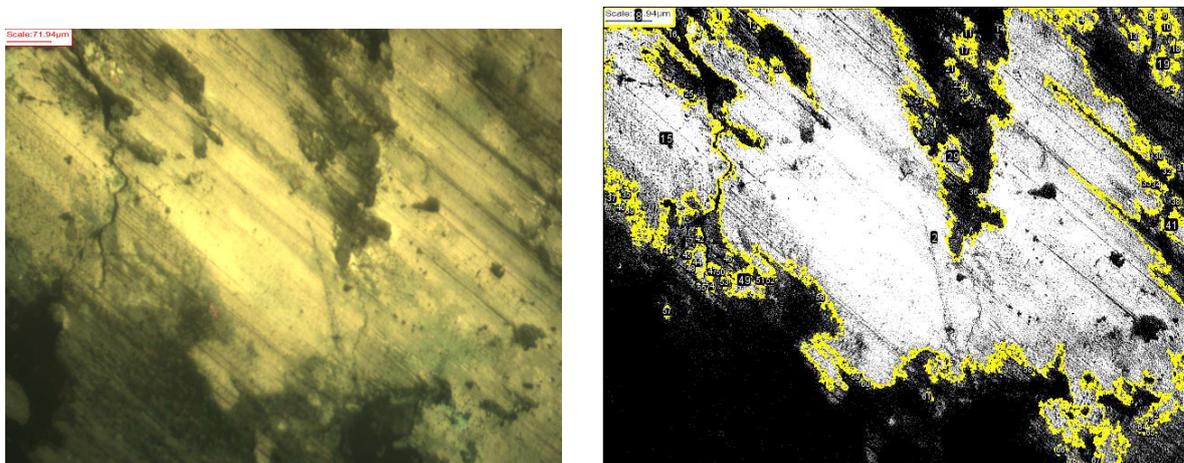


Figura 32 – Representação do pré-processamento de imagem.



4 RESULTADOS

4.1 ENSAIO EM VEICULO

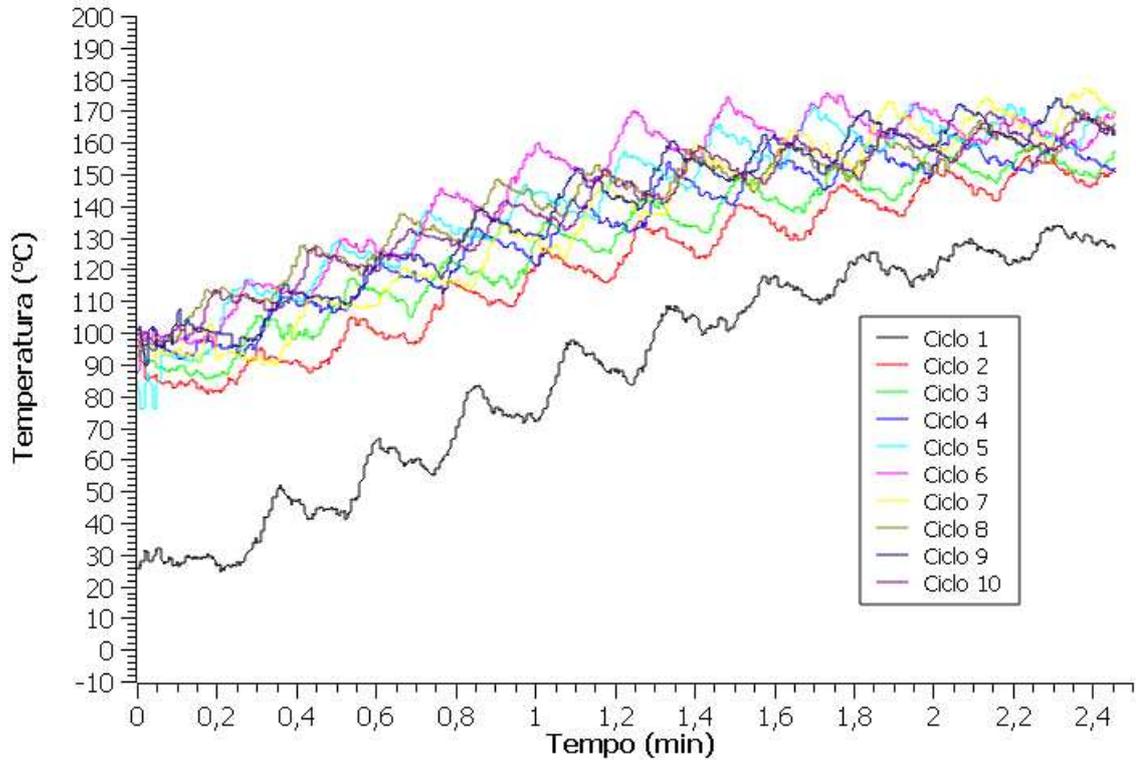
Esta seção é dedicada à análise de ensaios de frenagem em um veículo real. A abordagem inclui avaliar a importância das variáveis envolvidas e suas correlações. Além disso, foram apresentadas análises das imagens do material de atrito, obtidas por meio de um microscópio metalográfico.

4.1.1 Temperatura do Ensaio a partir do tipo de Pastilha

Nas Figuras 33 e 34, apresentam-se os gráficos de temperatura em função do tempo de cada ciclo de frenagens de emergência realizado na pastilha metálica e orgânica no ensaio.

Na Figura 33 mostra-se que o primeiro ciclo do ensaio exibiu uma diferença maior devido à temperatura inicial do teste ser abaixo de 50°C, enquanto nos ciclos subsequentes, as temperaturas iniciais foram inferiores a 100°C de acordo com o procedimento mencionado no subtópico 3.2.1. Na análise da pastilha metálica notou-se um aumento da temperatura ao longo do tempo durante os primeiros dois minutos. Após esse período, as temperaturas mantiveram um padrão semelhante até o final do ciclo. A pastilha metálica atingiu uma temperatura máxima de cerca de 177,2°C durante o ciclo 7.

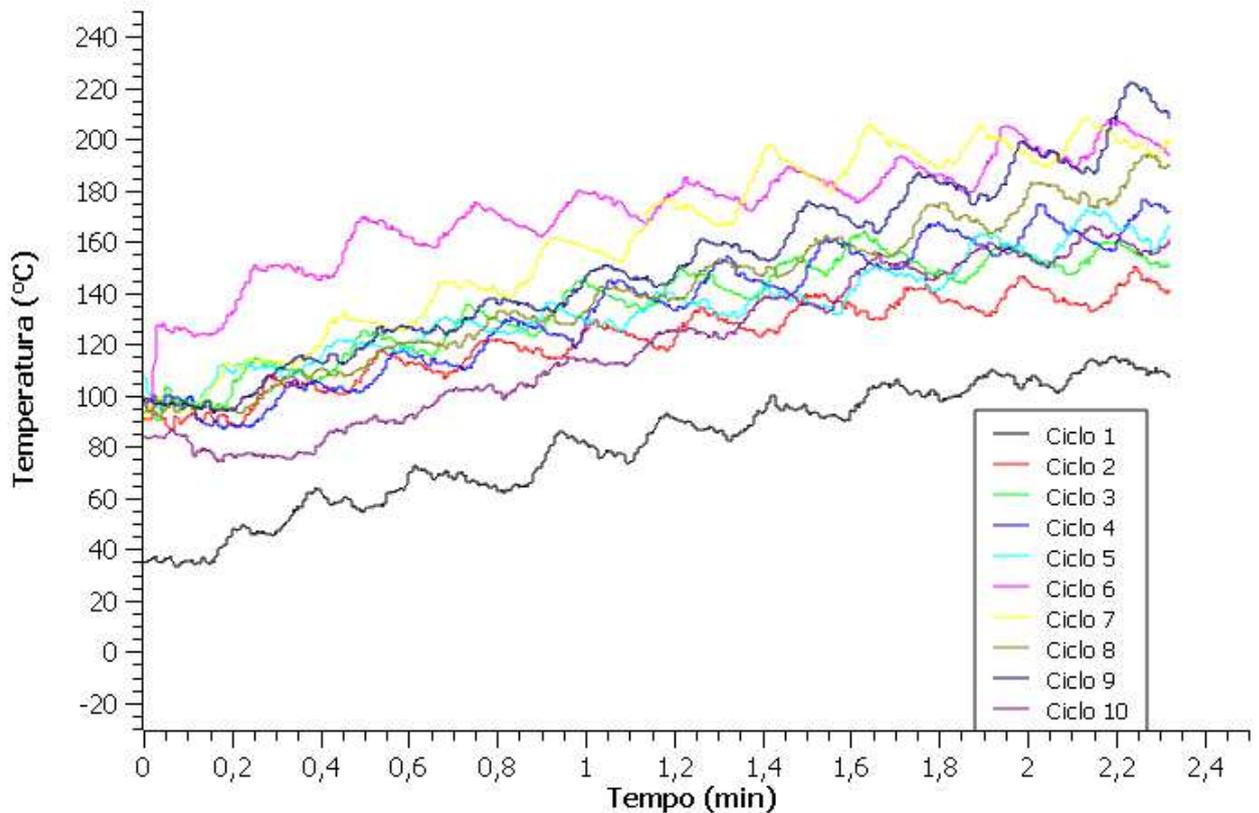
Figura 33 – Temperatura do primeiro ensaio - Pastilha Metálica



Analogamente, a pastilha orgânica mostrada na Fig. 34 também mostrou um valor menor para o ciclo 1 devido à temperatura inicial do teste ser abaixo de 50°C, enquanto nos ciclos seguintes, as temperaturas iniciais foram aproximadamente de 100°C. A pastilha orgânica exibiu variações nos ciclos 2, 3 e 6. No ciclo 2, a partir de 1,7 minutos, foi observado um padrão semelhante. Da mesma forma, no ciclo 3, a partir de 1,8 minutos. No ciclo 6, foram registradas temperaturas mais elevadas no primeiro minuto.

Além disso, observou-se que os padrões de temperatura no ensaio também apresentaram uma maior discrepância em cada ciclo em comparação com o ensaio realizado com a pastilha metálica. No caso da pastilha orgânica, a temperatura máxima atingiu aproximadamente 223°C no ciclo 9, o que resultou em uma diferença de 47°C entre os experimentos.

Figura 34 – Temperatura do primeiro ensaio - Pastilha Orgânica



Nas Figuras 35 e 36 apresentam-se os gráficos de temperatura em função do tempo de cada ciclo de frenagens de emergência realizado na pastilha metálica e orgânica no segundo ensaio. Na Figura 35, observa-se que o ciclo 1 do ensaio apresentou uma diferença significativa devido à temperatura inicial do teste ser abaixo de 50°C. A partir de um minuto, o padrão tornou-se semelhante aos demais ciclos.

O ciclo 6 registrou a temperatura mais elevada, atingindo 432,02°C. Na pastilha orgânica mostrada na Fig.36, o padrão do ciclo 1 se assemelha aos demais ciclos em aproximadamente 0,80 minutos. No ciclo 6, a pastilha orgânica atinge uma temperatura máxima de 424,73°C, evidenciando uma diferença de cerca de 7,29°C em comparação com a pastilha metálica.

Figura 35 – Temperatura do segundo ensaio - Pastilha Metálica

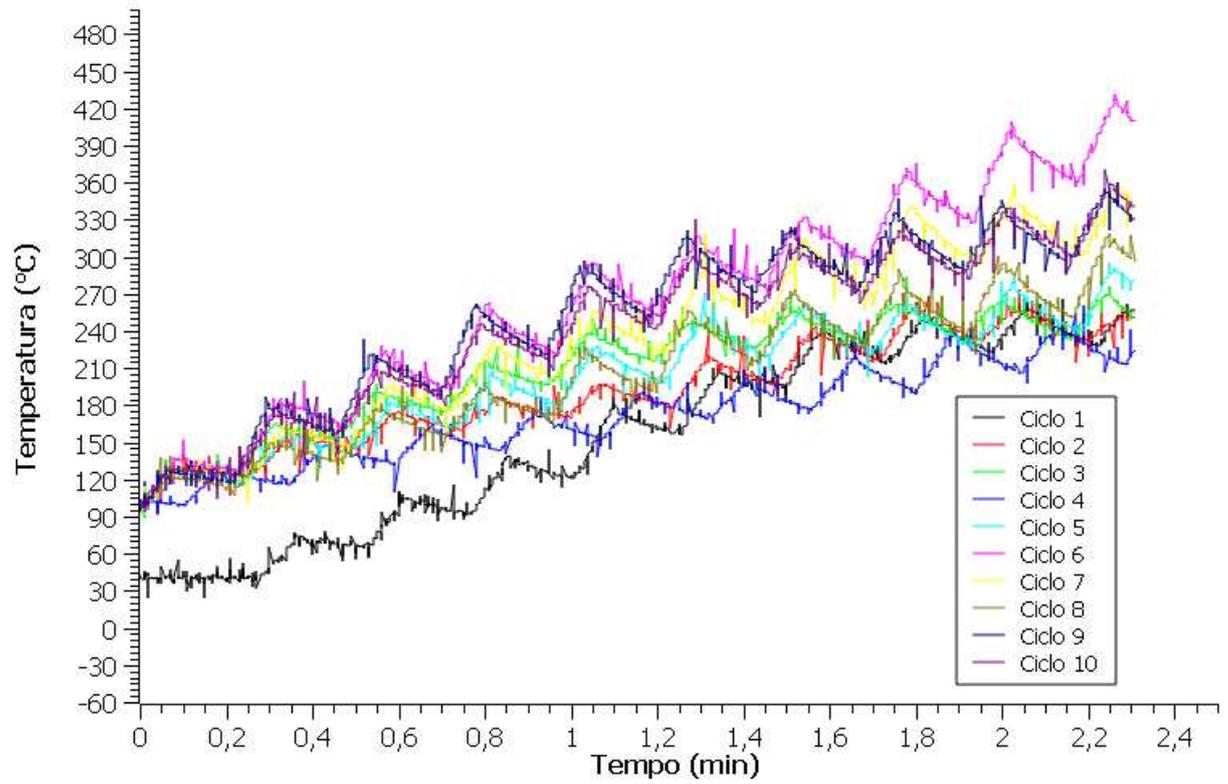
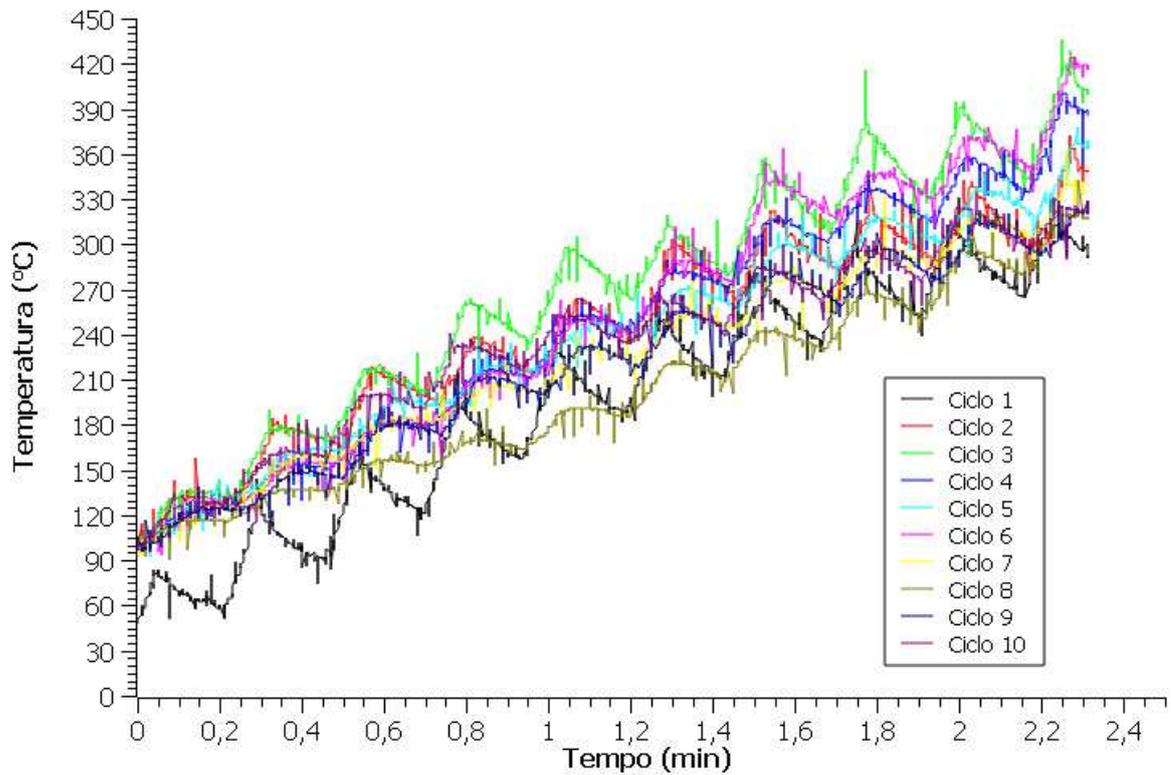


Figura 36 – Temperatura do segundo ensaio - Pastilha Orgânica



O disco de freio utilizado neste ensaio foi um disco assentado, caracterizado por uma superfície mais polida em comparação com um disco novo. Na mesma condição, as micro irregularidades são minimizadas, resultando em uma superfície mais suave em comparação com um disco novo. Tal procedimento contribui para aumentar a área de contato entre o disco e as pastilhas de freio, conforme apontado por Eriksson, Bergman e Jacobson (1999).

A existência dessas micro "erosões" na superfície do disco resulta na diminuição da área de contato, ocasionando, assim, uma redução no coeficiente de atrito. Assim, a temperatura final experimenta um acréscimo quando se utiliza um disco desgastado, em virtude do aumento do coeficiente de atrito (ERIKSSON; BERGMAN; JACOBSON, 1999). (ERIKSSON; BERGMAN; JACOBSON, 1999).

Neste contexto, é relevante notar que as temperaturas finais máximas, estão limitadas a aproximadamente 223°C para a pastilha orgânica e 177,2°C para a pastilha metálica no primeiro ensaio, não evidenciaram sinais de fadiga térmica no sistema de freio. Isso ocorre porque, em níveis de temperatura até esse limite, não observa-se uma diminuição na eficiência de frenagem devido à degradação térmica das pastilhas.

No segundo teste da pastilha orgânica, a temperatura máxima atingida foi de 424,73°C, enquanto na pastilha metálica, esse valor foi de 432,02°C, ultrapassando assim a temperatura de decomposição térmica do material de fricção. A probabilidade de ocorrência do fenômeno fade é elevada quando a temperatura de decomposição térmica do material de fricção é ultrapassada.

Segundo Bhushan (1999), as condições térmicas influenciam as características dos mecanismos de atrito e desgaste. Em ambientes de baixa temperatura, observa-se a presença de asperidades duras, pequenos detritos e partículas fragmentadas na região de contato. Logo, as asperidades duras têm a capacidade de se incorporar a uma matriz mais macia, originando um fenômeno de fluxo plástico conhecido como efeito de sulco.

Conforme Kim e Jang (2000), o aumento da temperatura pode causar diversos fenômenos na interface de atrito. Pode amolecer e carbonizar a resina da matriz, resultando na perda de sua força de adesão. Isso leva à extração das fibras reforçadas, formando filmes de fricção. Esses filmes sofrem deformações, fraturas e fragmentações, gerando detritos que prejudicam a estabilidade do atrito, aumentam o desgaste e, ocasionalmente, provocam vibrações e ruídos intensos.

Como no primeiro experimento, as temperaturas atingidas não provocaram degradação térmica no material das pastilhas, não foram identificadas diferenças significativas no desgaste das pastilhas, mesmo ao variar os tipos de pastilha.

4.1.2 Massa, espessura e rugosidade da superfície da amostra

A seguir, são fornecidos os dados de saída após o primeiro ensaio referentes à massa (g), espessura (mm) e rugosidade (μm) para cada um dos grupos mencionados nas Tabelas 8, 9, 10.

Tabela 8 – Dados de saída da massa

Material	Massa (g)
Pastilha_interna_Metálica	65,63
Pastilha_externa_Metálica	65,07
Pastilha_interna_Orgânica	65,39
Pastilha_externa_Orgânica	65,51

Tabela 9 – Dados de Saída das médias das espessuras

Material	Média das Espessuras (mm)
Pastilha_interna_metalica	9,156
Pastilha_externa_metalica	9,155
Pastilha_interna_Orgânica	8,874
Pastilha_externa_Orgânica	8,763

A massa da pastilha interna e externa metálica diminuiu 0,51g e 0,52g, respectivamente. A massa total do conjunto de pastilhas Metálica foi reduzida em 1,03 g, correspondendo a uma diminuição de 0,78%, A espessura total do conjunto diminuiu em 0,092 mm, representando uma redução de 0,49 %. O conjunto de pastilhas orgânicas apresentou uma redução de 1,12g, correspondendo a uma diminuição de massa de 0,84%. Além disso, a espessura do conjunto diminuiu em 0,033, representando uma queda de 0,18%.

Tabela 10 – Dados de Saída das médias das Rugosidades

Material	Média das Rugosidades		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Rt (μm)
Pastilha_interna_Metalica	2,165	14,489	21,906
Pastilha_externa_Metalica	1,818	13,164	20,164
Pastilha_interna_Orgânica	2,988	19,457	27,101
Pastilha_externa_Orgânica	3,594	21,089	33,772

Quanto aos parâmetros de rugosidade superficial, notou-se que as amostras das pastilhas de freio submetidas aos ensaios de frenagem exibiram valores médios mais baixos para os parâmetros de rugosidade superficial média Ra, Rz e Rt. Uma possível explicação para esse resultado pode estar associada às medidas das características dos platôs, mais especificamente à área relativa média quando há presença de platôs nas amostras. Segundo Eriksson e Jacobson (2000) esses platôs são as regiões na pastilha de freio que exibem evidências de contato deslizante com o

disco, manifestando-se tipicamente como superfícies planas com ranhuras rasas na direção do deslizamento.

O aumento do coeficiente de atrito ocorre devido aos platôs, conforme descrito por Ostermeyer e Müller (2008), uma vez que o poder de atrito se manifesta por meio deles. Conforme observado por Deng et al. (2010), à medida que as asperidades são mais deformadas, desgastadas e fraturadas para criar filmes de fricção, que se adicionam à área de contato real, ocorre um incremento no coeficiente de atrito.

Nesse segundo ensaio, o objetivo foi alcançar temperaturas na interface de atrito acima de 300 °C, permitindo, assim, a análise dos impactos de temperaturas mais elevadas no desgaste da pastilha. A seguir, são fornecidos os dados de saída do segundo ensaio referentes à massa (g), espessura (mm) e rugosidade (μm) para cada um dos grupos mencionados nas Tabelas 11, 12 e 13.

Tabela 11 – Dados de saída da massa

Material	Massa (g)
Pastilha_interna_Metálica	63,78
Pastilha_externa_Metálica	63,15
Pastilha_interna_Orgânica	64,29
Pastilha_externa_Orgânica	64,38

Devido às temperaturas elevadas registradas na interface de atrito durante o segundo ensaio, atingindo valores superiores a 300 °C, observou-se um aumento significativo no desgaste. Neste contexto, a quantidade de desgaste foi medida em 3,77g para o conjunto de pastilhas metálicas, representando uma taxa de desgaste de 2,88% e em relação a 2,23g para o conjunto de pastilhas orgânicas, observou-se uma variação de 1,70%. Esses resultados indicam uma correlação direta entre as temperaturas mais elevadas, especialmente acima de 300 °C, e o aumento no desgaste, sendo que o conjunto de pastilhas metálicas apresentou uma perda maior em comparação com o conjunto de pastilhas orgânica.

Conforme destacado por Neis (2012), em temperaturas elevadas, especialmente superiores a 300 °C, observam-se transformações significativas na composição química do material de atrito. Um dos processos de maior relevância induzidos pelo aumento da temperatura é a degradação da resina fenólica, ocasionada pela oxidação de materiais voláteis.

Tabela 12 – Dados de Saída das médias das espessuras

Material	Média das Espessuras (mm)
Pastilha_interna_metalica	8,761
Pastilha_externa_metalica	8,755
Pastilha_interna_Orgânica	8,715
Pastilha_externa_Orgânica	8,611

A espessura total do conjunto de pastilhas metálicas registrou uma redução

de 0,795 mm, representando uma diminuição percentual de 4,34%. Enquanto isso, o conjunto de pastilhas orgânicas registrou uma diminuição em sua espessura de 0,311 mm, representando uma redução de 1,76%. Essa redução pode ser atribuída a vários fatores, como desgaste decorrente do uso e do atrito durante o funcionamento do sistema de frenagem.

Por outro lado, o conjunto de pastilhas orgânicas também passou por uma redução em sua espessura, embora em uma medida um pouco menor. Essa diminuição na espessura das pastilhas orgânicas pode estar relacionada às características específicas do material orgânico, bem como às condições operacionais do sistema de freio.

Tabela 13 – Dados de Saida das médias das Rugosidades

Material	Média das Rugosidades		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Rt (μm)
Pastilha_interna_Metalica	14,465	124,585	124,525
Pastilha_externa_Metalica	17,410	144,827	144,827
Pastilha_interna_Orgânica	20,391	151,483	151,433
Pastilha_externa_Orgânica	20,449	155,170	155,170

Quanto à rugosidade superficial, observou-se um aumento significativo nos valores médios de Ra, Rz e Rt das pastilhas de freio após os ensaios de frenagem, destacando-se notavelmente em Rz e Rt. Essas medições indicam uma alteração na superfície das pastilhas, tornando-as mais rugosas. O aumento em Rz e Rt sugere variações mais pronunciadas na altura da superfície, refletindo uma resposta específica do material às forças e temperaturas durante a frenagem; tais diferenças notáveis na rugosidade das pastilhas podem ser atribuídas à degradação térmica durante o segundo teste, evidenciando a influência das temperaturas alcançadas durante o processo.

Outra possível explicação é que, dado ao caráter finito do tempo de vida de um platô, o desgaste ao seu redor, a geração de calor e as tensões mecânicas contribuem para a diminuição de sua estabilidade. Esses efeitos, por conseguinte, resultam na deterioração de uma parte dos platôs ao longo do tempo, aumentando sua rugosidade.

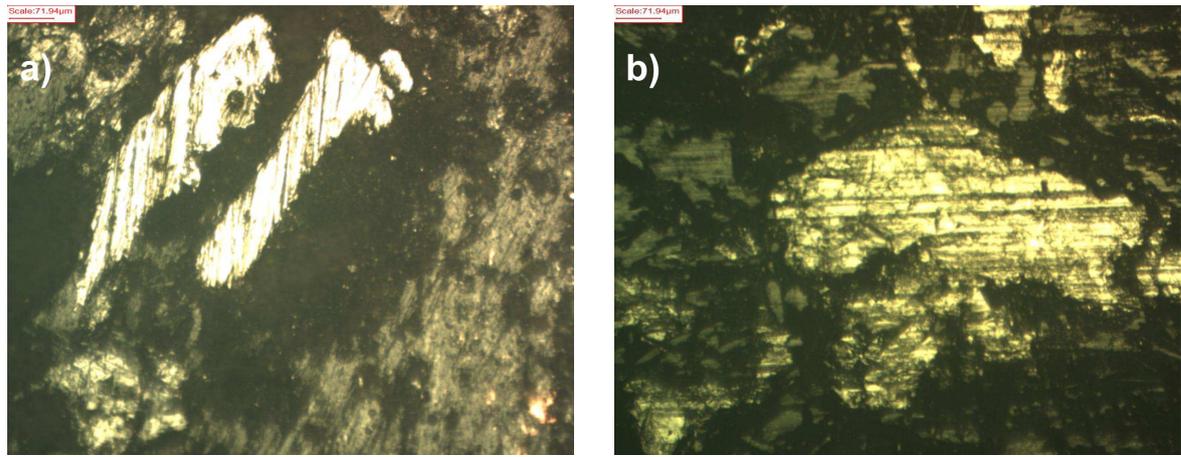
4.2 ANÁLISE DAS MICROGRAFIAS OBTIDAS POR MEIO DE MICROSCOPIA METALOGRÁFICA

As microscopias das amostras foram obtidas utilizando três ampliações: 50, 100 e 200 vezes o tamanho original. Com o intuito de viabilizar uma análise comparativa, foram capturadas imagens da microscopia das pastilhas, tanto as submetidas ao primeiro ensaio, quanto aquelas sujeitas ao segundo ensaio de operação de frenagem. Na Figura 37 (a), são apresentadas as imagens capturadas pelo Microscópio de Metalografia, proporcionando uma visão topográfica da superfície da pastilha antes do primeiro ensaio. Já na Figura 37 (b), observa-se a imagem obtida após a realização do

primeiro ensaio.

A pastilha utilizada foi a metálica, e a aproximação empregada foi de 100x. Na Figura 37, ao examinar a imagem (a), são observadas fibras metálicas mais finas, que se destacam por seu aspecto mais brilhante em comparação com os demais elementos constituintes da pastilha. Notam-se áreas mais escuras, correspondentes à matriz polimérica do material. Já na imagem (b), apresenta o platô resultante da presença de fibras metálicas, acompanhado de maior rugosidade na topografia superficial.

Figura 37 – Imagens obtidas por Microscopia Metalográfica - 100x - para pastilha metálica: a) Antes do ensaio; b) Após o primeiro ensaio.



Nas Figuras 38 e 39 ilustram-se uma micrografia da pastilha com uma ampliação de 200x. São observados platôs primários de contato, e os constituintes da pastilha, especialmente as fibras metálicas, são visualizados em maior detalhe. Esses constituintes desempenharão um papel crucial como pontos de nucleação durante as frenagens, promovendo a formação dos platôs secundários. Também é apresentada a matriz polimérica, conforme mencionado por Eriksson (2000). A matriz polimérica da pastilha consiste em um material aglutinante utilizado para unir os demais componentes do material de fricção, incluindo resinas cresol, resinas fenólicas, fenol formaldeído e novolack.

Figura 38 – Imagens obtidas por Microscopia Metalográfica - 200x - para pastilha metálica após o primeiro ensaio

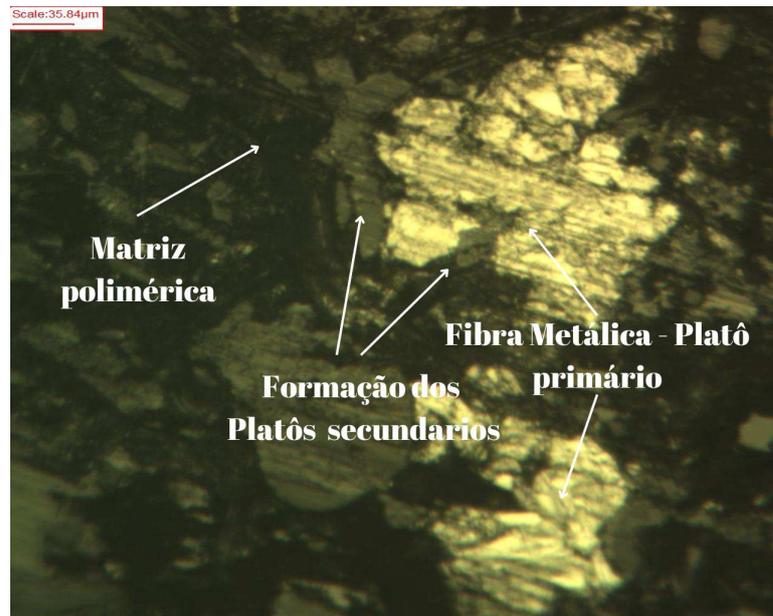
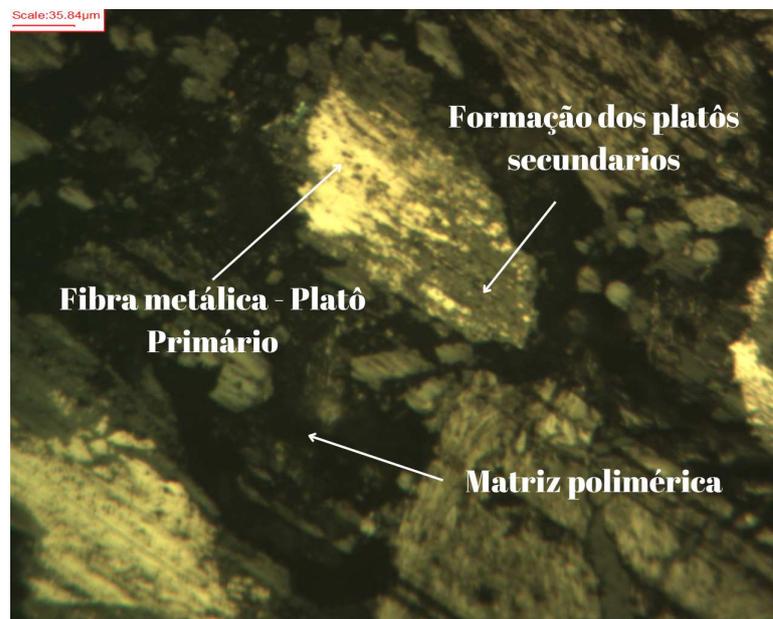


Figura 39 – Imagens obtidas por Microscopia Metalográfica - 200x - para pastilha orgânica após o primeiro ensaio



Nas Figuras 40 e 41 mostram-se uma ampliação de 200 vezes, proporcionando uma visualização mais detalhada da formação dos platôs primários e secundários. Observam-se, adicionalmente, marcas de deslizamento resultantes do processo de frenagem. Essas marcas são originadas pela ação abrasiva dos "debris" (resíduos de desgaste), que, antes de serem removidos do sistema ou formarem novos platôs, atuam como partículas abrasivas, sulcando as superfícies desgastadas.

Figura 40 – Imagens obtidas por Microscopia Metalográfica - 200x - para pastilha orgânica após o segundo ensaio

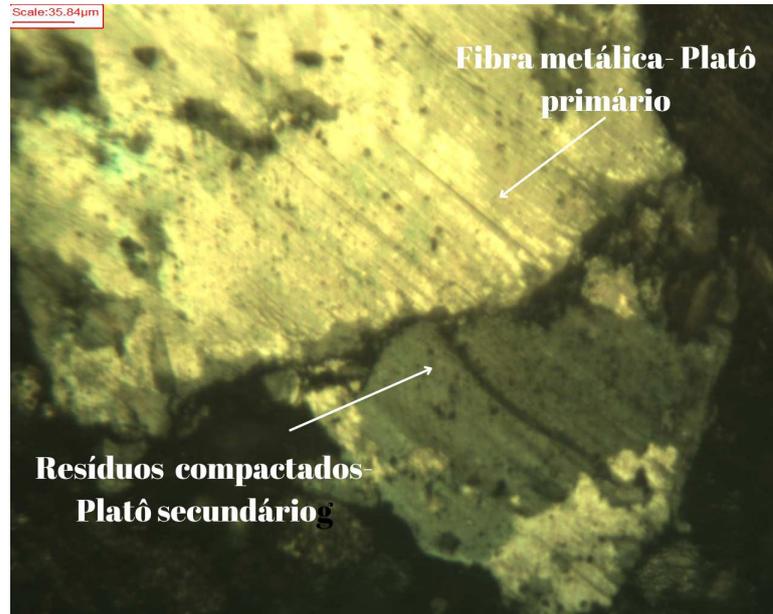
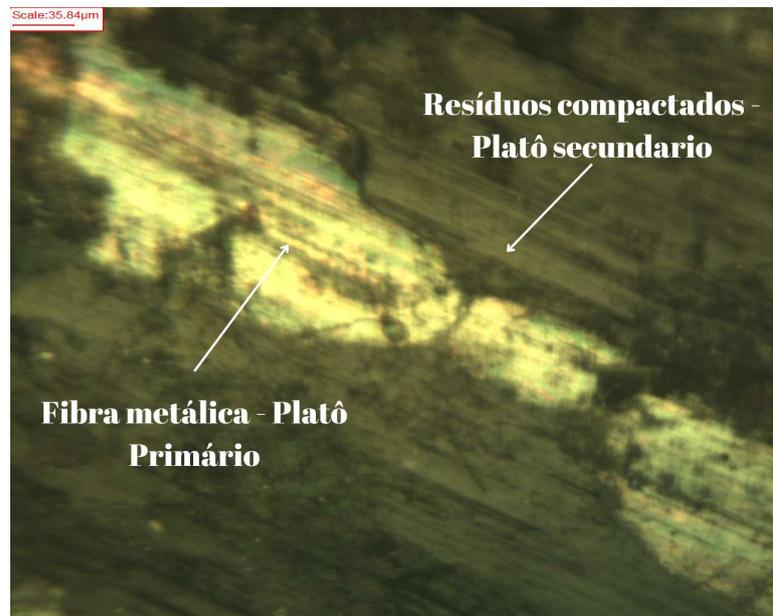


Figura 41 – Imagens obtidas por Microscopia Metalográfica - 200x - para pastilha metálica após o segundo ensaio

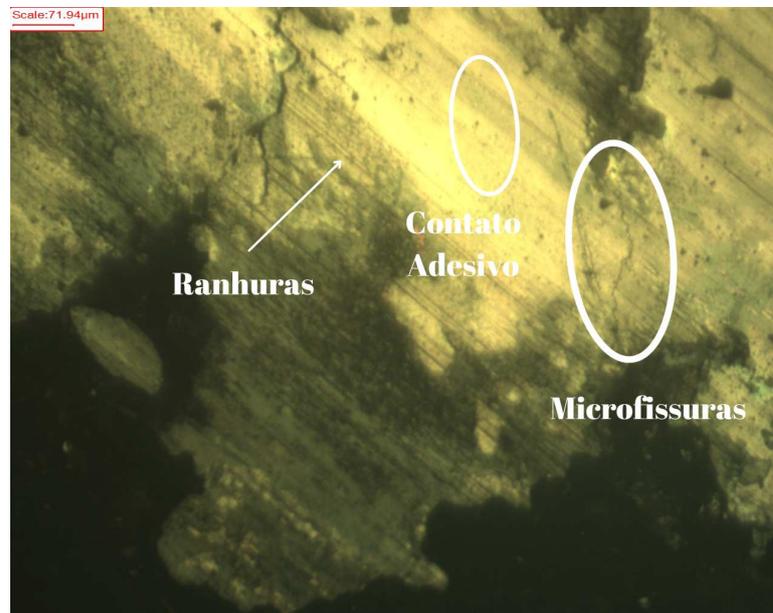


Conforme Ma et al. (2018) e Silvestre (2013), as características tribológicas dos materiais de atrito estão intrinsecamente ligadas à morfologia das superfícies desgastadas, abrangendo detritos provenientes do desgaste, partículas de alta dureza, áreas planas de desgaste e microfissuras. As variações nas taxas de expansão térmica nas diversas áreas da superfície de atrito, resultantes da composição heterogênea da pastilha, podem ocasionar o desenvolvimento de microfissuras na região desgastada, como evidenciado nas Fig. 42. Essas variações ilustram características comuns

associadas ao desgaste por fadiga.

De acordo com a descrição feita por Wang e Liu (2014), em elevadas temperaturas são gerados pontos de aderência na superfície de atrito, devido à adesão metálica entre as fibras de aço e o disco rotativo de ferro fundido. Como resultado, observa-se um aumento no contato adesivo, juntamente com a presença de detritos de desgaste na superfície, influenciados pela ação da força de cisalhamento. Esse contato pode ser ampliado e aprofundado quando as asperidades duras e os detritos de desgaste acima desintegram a superfície da matriz solta (platôs secundários), sendo, possivelmente, a principal causa do desgaste adesivo.

Figura 42 – Imagens obtidas por Microscopia Metalográfica - 100x - para pastilha orgânica após o segundo ensaio



Em resumo, a análise microscópica das pastilhas de freio, realizada com ampliações de 50, 100 e 200 vezes, proporcionou informações detalhadas sobre o desempenho durante ensaios de frenagem. As imagens revelaram detalhes topográficos, platôs primários e secundários, fibras metálicas e marcas de deslizamento.

Nas Figuras 43, 44, 45 e 46, são apresentados gráficos que ilustram a variação da área em μm^2 e do perímetro em μm dos platôs em relação ao número de platôs das pastilhas externas para ambos os conjuntos. Com ampliações de aproximadamente 50, 100 e 200 vezes. As informações relativas às pastilhas internas estão devidamente representadas no Apêndice A.

Com o intuito de promover maior clareza, ressalta-se que a análise das regiões nas ampliações de 50x, 100x e 200x pressupõe distintas áreas de observação, ampliando assim o número de locais examinados. Contudo, é válido reconhecer que esta abordagem, embora contribua para a variação das áreas de interesse, pode, em algumas situações, não atender à exigência quantitativa necessária para uma análise

abrangente e rigorosa.

Figura 43 – Área das pastilhas externas - 50x

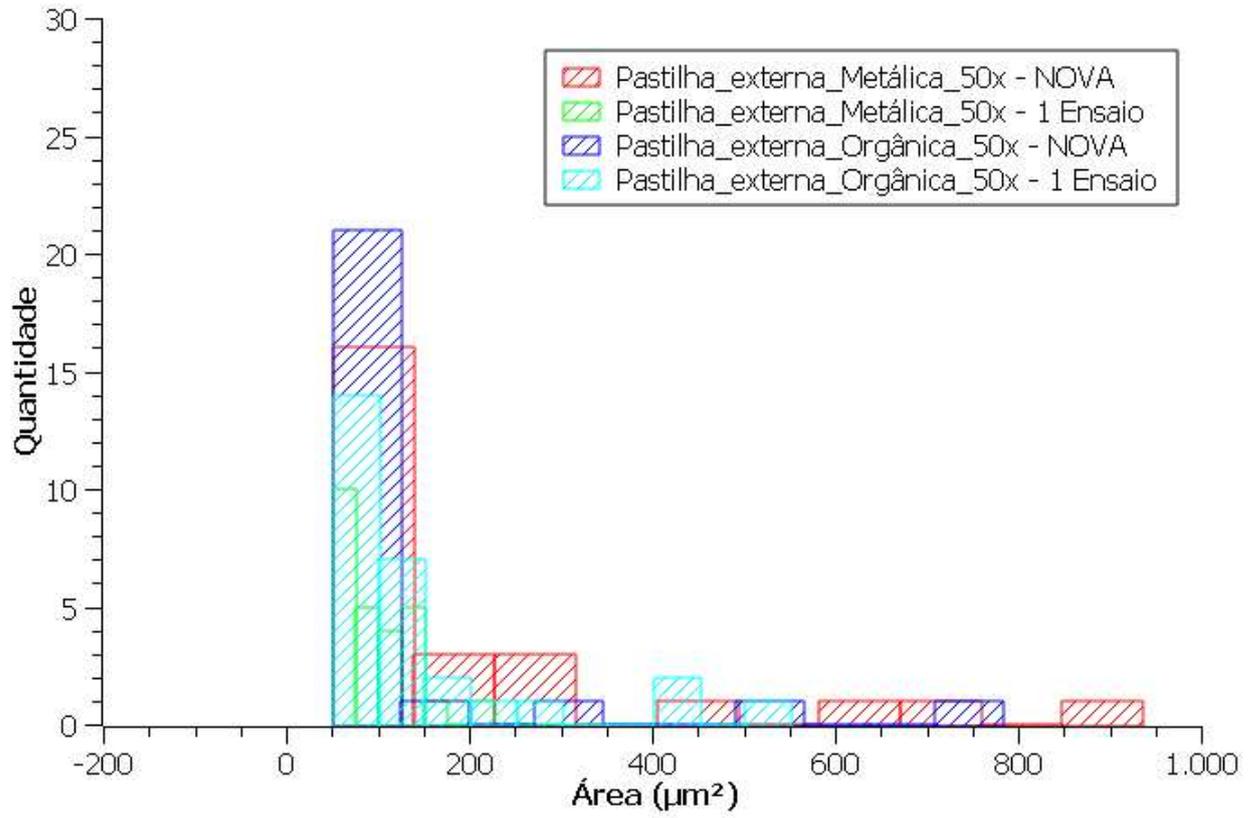
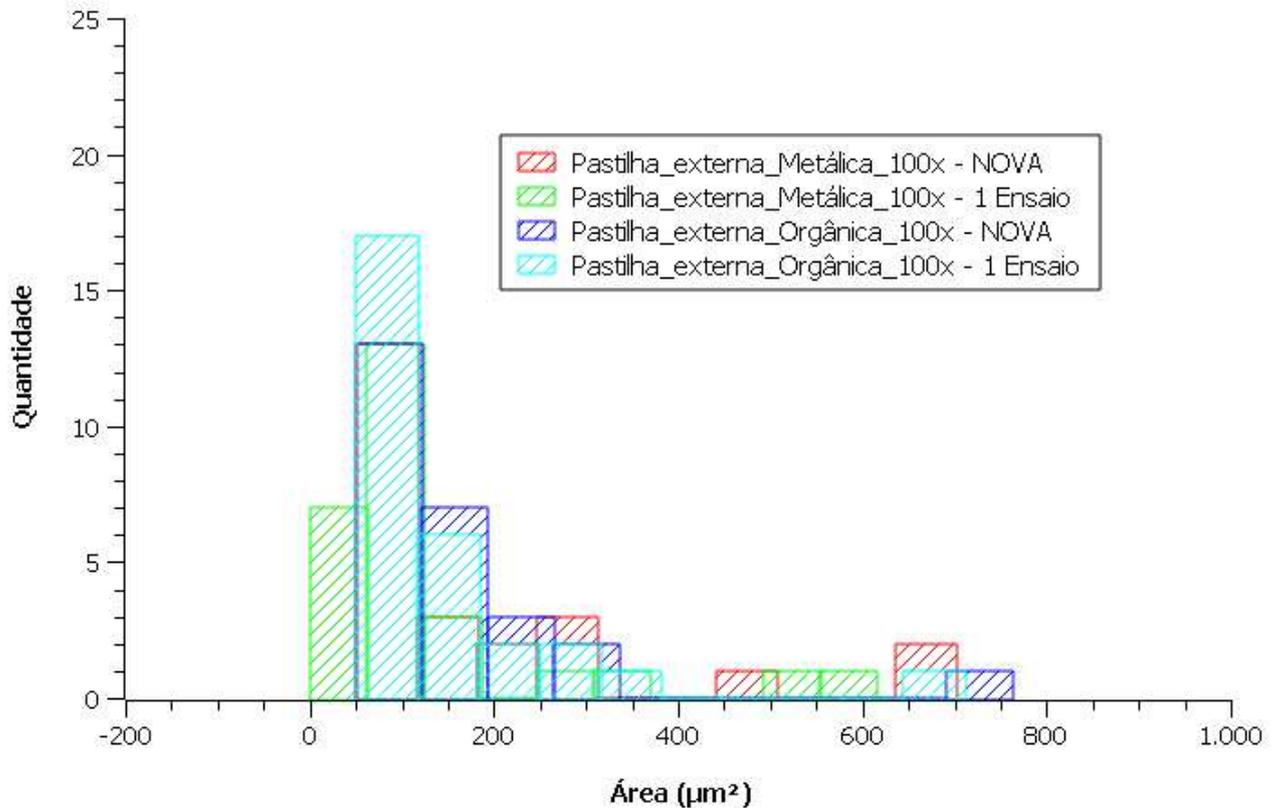


Figura 44 – Área das pastilhas externas - 100x



Nas regiões demarcadas na Figura 44 para uma resolução de 50x, das pastilhas metálicas externas NOVAS, não foi observado um padrão claro em relação aos resultados do teste inicial. Na região pós-ensaio, não se evidenciou uma diminuição quantitativa. Quanto às pastilhas orgânicas, a análise revelou uma quantidade superior em comparação ao pós-ensaio. Com a resolução de 100x para a pastilha metálica, observou-se um aumento na quantidade de platôs após o primeiro ensaio, enquanto a pastilha orgânica apresentou um significativo incremento na formação de platôs após o primeiro ensaio.

Este fenômeno pode estar associado à restrita abrangência das áreas observadas, tanto na resolução de 50x quanto na de 100x, e à não coincidência dos pontos após o primeiro ensaio. No entanto, é plausível utilizar os pontos de referência previamente marcados para a medição de espessura, conforme delineado no subtópico 3.2.1, mediante a execução de ensaios adicionais, visando uma comparação mais precisa e fidedigna.

Figura 45 – Área das pastilhas externas - 50x

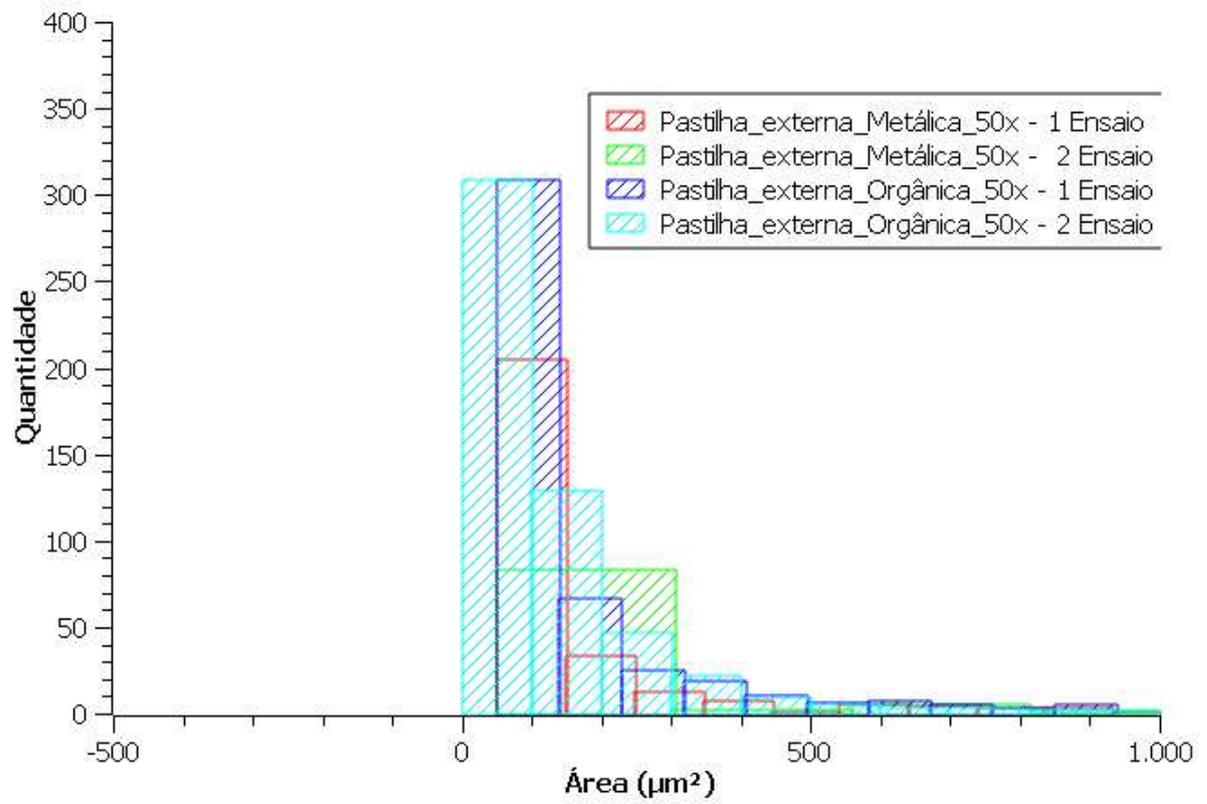
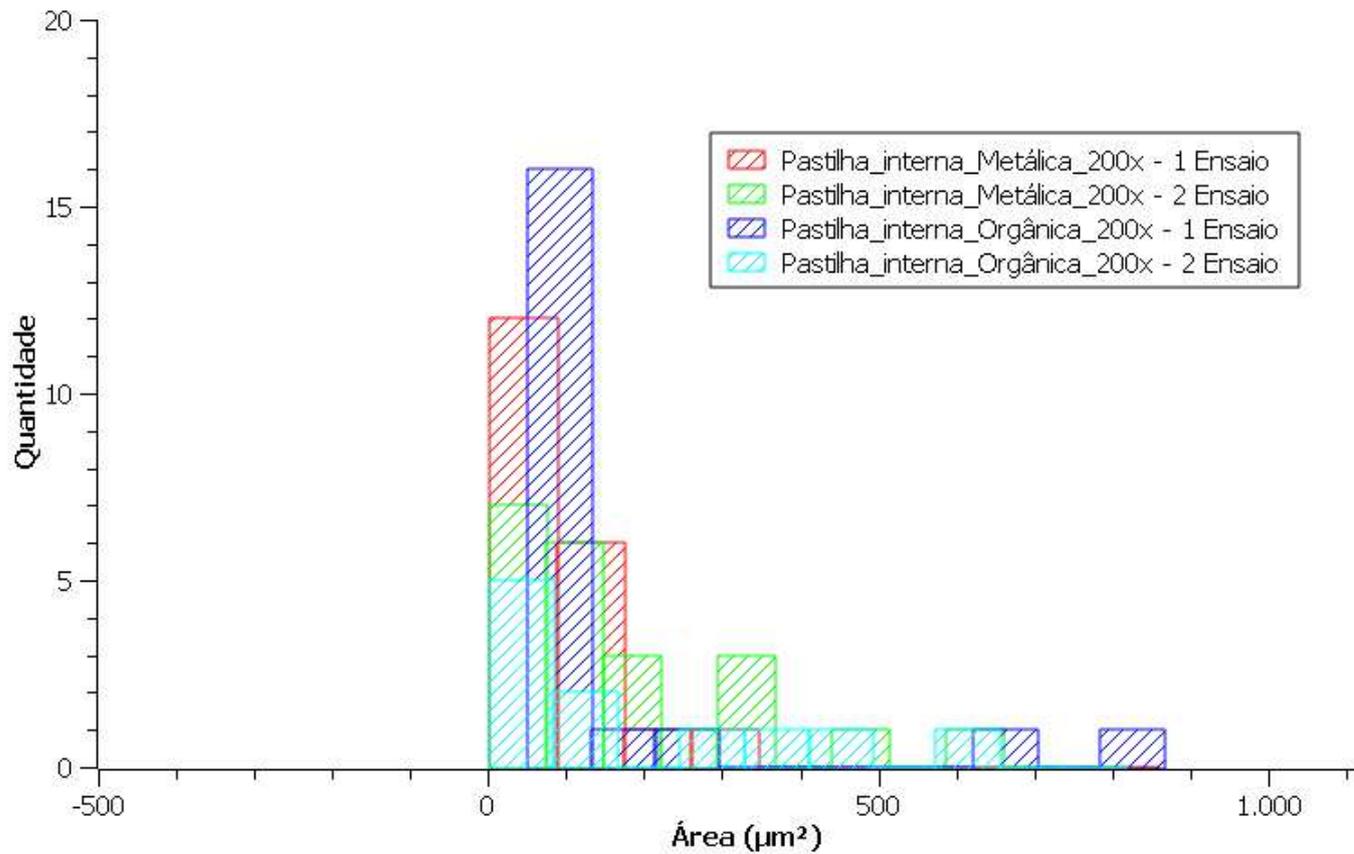


Figura 46 – Área das pastilhas externas - 200x



Nas duas resoluções analisadas na Figura 46, ambas as análises do primeiro e segundo ensaio, as pastilhas parecem seguir um padrão de menor quantidade de platôs formados para o segundo ensaio, tanto nas pastilhas externas quanto nas internas, conforme mostrado no apêndice A. No entanto, é importante observar que somente a análise referente à pastilha orgânica para a resolução de 50x não manteve esse padrão mais baixo.

Verma et al. (2016) destaca que, em condições de elevada temperatura, o desgaste acentuado resulta da decomposição da resina fenólica presente no composto da pastilha. Esse fenômeno resulta em uma reduzida retenção de resíduos de desgaste e um tempo limitado para a formação eficaz de camadas protetoras contra desgaste. Consequentemente, a área relativa dos platôs formados em temperaturas mais elevadas é diminuída.

No entanto, que, devido à falta de abrangência nas áreas observadas para ambas as resoluções, a fidedignidade da análise pode ser comprometida. Recomenda-se cautela na interpretação dos resultados, tendo em mente essas limitações. Nessas análises, pode-se afirmar que a predominância de platôs formados se concentra em áreas compreendidas entre 0 e 500 μm^2 .

Figura 47 – Perímetro das pastilhas externas - 50x

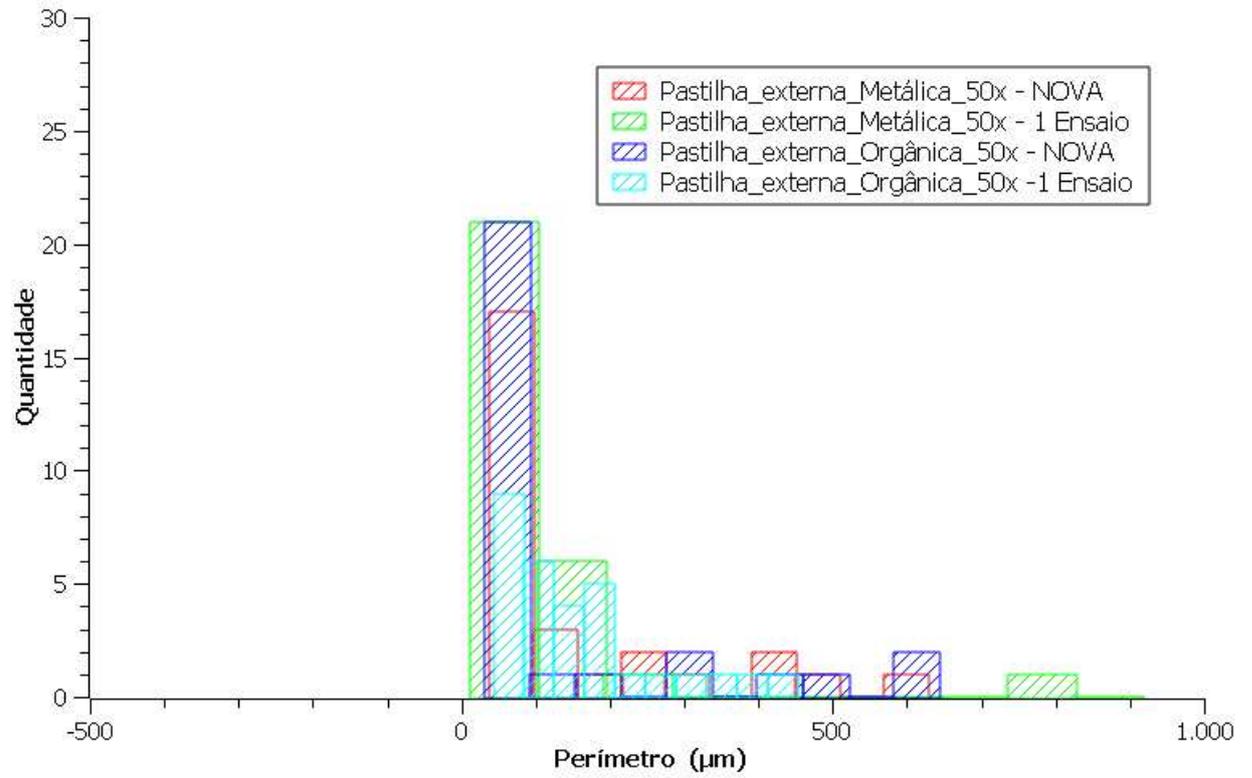
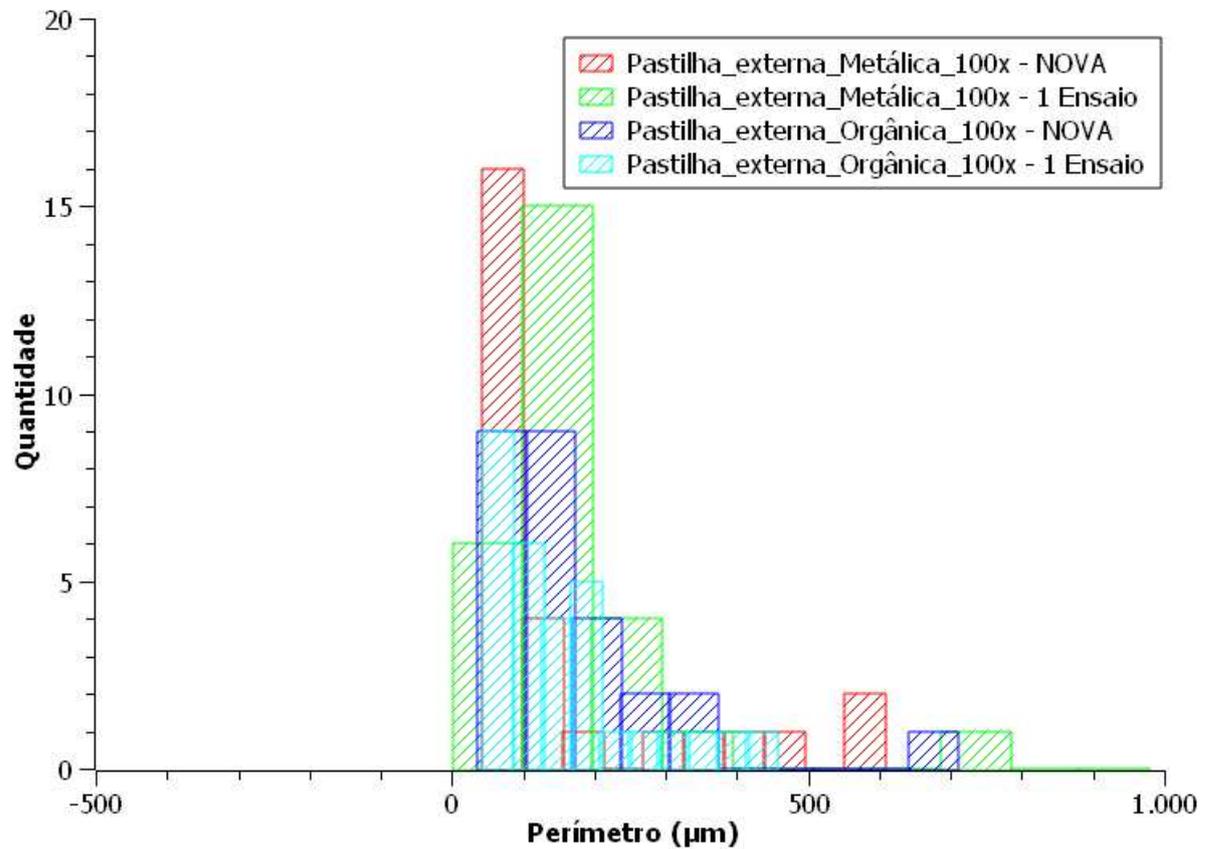


Figura 48 – Perímetro das pastilhas externas - 100x



Nas áreas demarcadas na Figura 48, com uma resolução de 50x para as novas pastilhas metálicas externas, observou-se que a quantidade de platôs após o primeiro teste foi maior em comparação com a pastilha orgânica. Na resolução de 100x após o ensaio, a pastilha metálica apresentou uma quantidade superior de platôs, enquanto a pastilha orgânica exibiu uma quantidade menor.

Na Figura 50, são apresentados os perímetros para as resoluções de 50x e 200x. Observa-se uma diminuição na quantidade de platôs na pastilha metálica após o segundo teste em comparação com a pastilha orgânica. Notavelmente, na resolução de 200x após o segundo ensaio, tanto a pastilha metálica quanto a pastilha orgânica exibiram uma redução na quantidade de platôs. Nessas análises, é possível afirmar que a predominância de platôs formados se concentra em perímetros compreendidas entre 0 e 500 μm .

Figura 49 – Perímetro das pastilhas externas - 50x

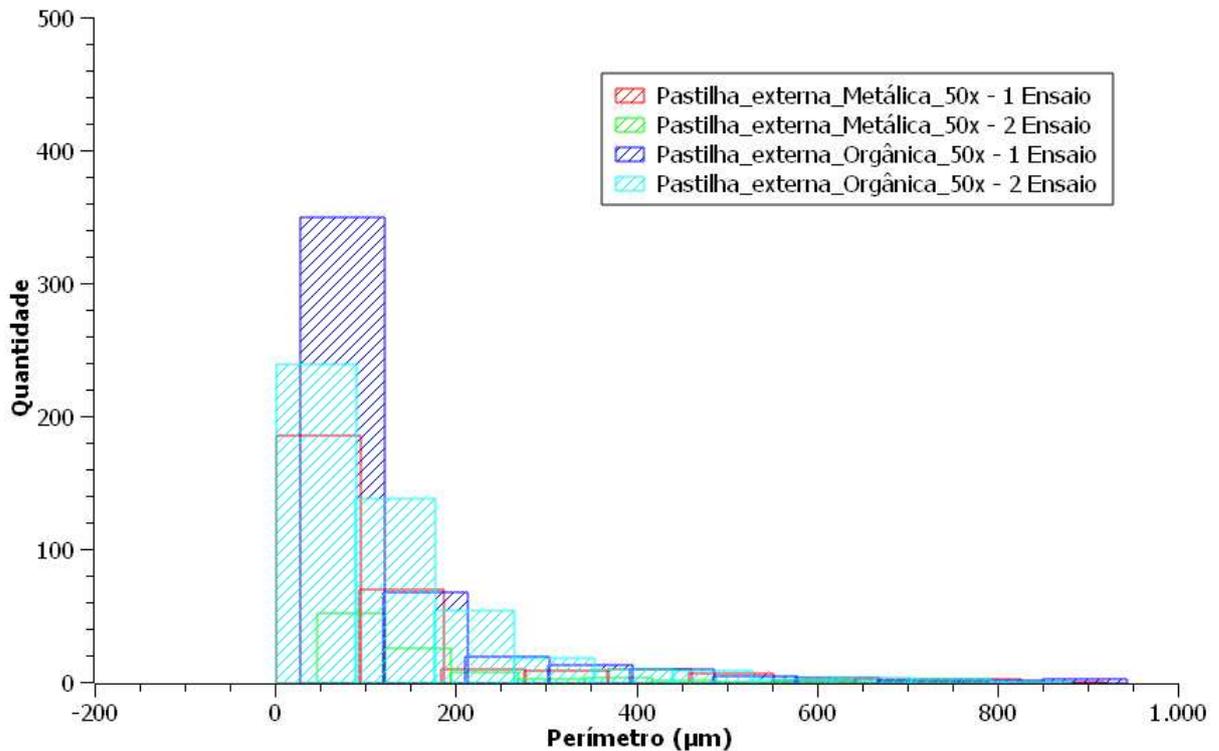
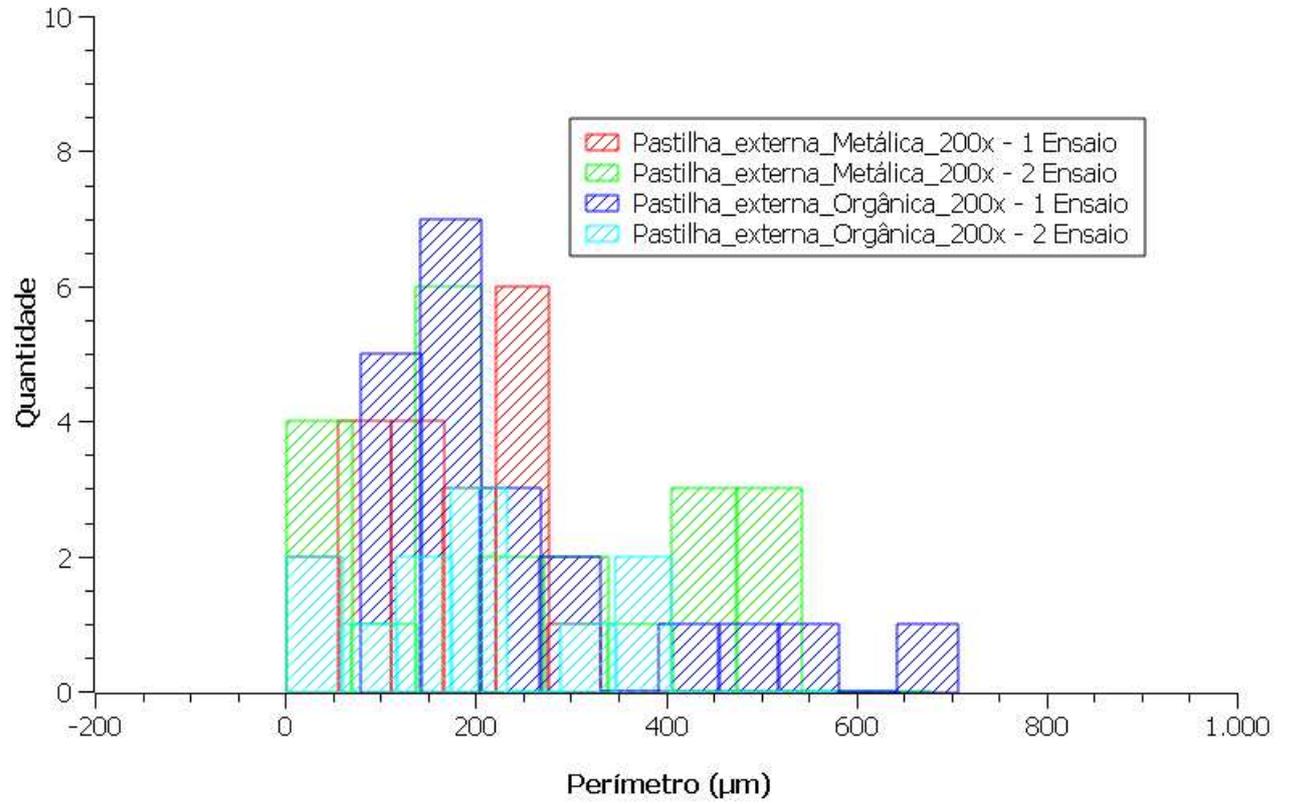


Figura 50 – Perímetro das pastilhas externas - 200x



5 CONCLUSÕES

No contexto desse estudo, foram empregados procedimentos metodológicos para a realização de ensaios de frenagem, em um veículo real. Uma contribuição singular deste trabalho destaca-se pela inclusão de experimentos de frenagem em veículos, uma vez que a maioria dos estudos nessa área concentra-se predominantemente na condução de experimentos em bancada. Embora os ensaios em bancada possam oferecer uma representatividade satisfatória do comportamento da frenagem, os testes conduzidos diretamente no veículo possibilitam a análise do comportamento real da frenagem. Vale ressaltar que ensaios em veículo são mais desafiadores de serem realizados, uma vez que demandam, a instrumentação do veículo, disponibilidade de disposição de espaço, tempo e coordenação do piloto pela execução dos testes.

No que diz respeito aos ensaios em veículo real, a metodologia adotada consistiu na análise da correlação entre as características superficiais das pastilhas e as medidas de desempenho. As características superficiais das pastilhas foram obtidas por meio de microscopia Metalográfica e de medidas de rugosidade. Por outro lado, as medidas de desempenho durante a frenagem, tais como a temperatura, foram mapeadas por meio do monitoramento do sensor de temperatura instalado no veículo. Imagens de microscopia Metalográfica das pastilhas foram utilizadas para explicar os resultados encontrados em relação aos ensaios em frenagem de emergência.

A microscopia metalográfica possibilitou a comparação entre amostras novas e após ensaios, evidenciando mudanças nas superfícies, especialmente após ultrapassar a temperatura de decomposição térmica do material de fricção e romper o platô do sistema.

Como sugestões para futuras pesquisas, propõe-se a realização de análises com temperaturas mais baixas, sem ultrapassar a temperatura de decomposição térmica do material. Isso permitiria acompanhar o crescimento dos platôs primários e secundários. Realizar análises de MEV e EDS na superfície da pastilha de freio. Essa abordagem seguiria uma metodologia semelhante à conduzida nas pastilhas de freio deste estudo, com o intuito de obter uma análise comparativa mais abrangente do par tribológico utilizado em sistemas de freio. Além disso, é recomendado conduzir mais experimentos e analisar um número maior de amostras para aprimorar a representatividade do estudo. Uma análise química e composicional dos materiais de atrito, por exemplo, utilizando técnicas de difração de raios X, também é sugerida como uma direção para investigação mais aprofundada.

REFERÊNCIAS

- ABU-ALLABAN, M. et al. Tailpipe, resuspended road dust, and brake-wear emission factors from on-road vehicles. **Atmospheric Environment**, v. 37, n. 37, p. 5283–5293, 2003. ISSN 1352-2310. 11th International Symposium, Transport and Air Pollution.
- ANDERSON, J. O.; THUNDIYIL, J. G.; STOLBACH, A. Clearing the air: a review of the effects of particulate matter air pollution on human health. **Journal of medical toxicology**, Springer, v. 8, p. 166–175, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6153**: Pastilha de freio a disco - determinação do atrito e desgaste através da bancada de ensaio krauss. Rio de Janeiro, 1995.
- BARROS, L. et al. Morphological analysis of pad–disc system during braking operations. **Wear**, Elsevier, v. 352, p. 112–121, 2016.
- BHUSHAN, B. **Principles and applications of tribology**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1999.
- BIRCH, T. W. **Automotive braking systems**. [S.l.]: Houghton Mifflin Harcourt P, 1988.
- BLAU, P. J. **Friction science and technology: from concepts to applications**. [S.l.]: CRC press, 2008.
- BMW MOTORRAD. **ABS parcial-integral - Tecnologia em pormenor**. Motorrad, 2023. Disponível em: <https://www.bmw-motorrad.com.br/pt/experience/engineering/detail/safety/abs-partially-integral.html>.
- BOSCH, R. **Manual de tecnologia automotiva**. [S.l.]: Editora Blucher, 2005.
- BREMBO. **BREMBO Builds a new plant in Chennai**. 2018. <https://www.brembo.com/en/company/news/brembo-builds-a-new-plant-in-chennai>. Acesso em: 28 out. 2023.
- BREMBO, S. The brake disc manual. **Manual, Curno, 128p**, 1997.
- BREZOLIN, A. **Estudo de Geração de Trincas Térmicas em Discos de Freios de Veículos Comerciais**. Dissertação (Dissertação de Mestrado (Materiais)) — Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2007.
- CHAN, D.; STACHOWIAK, G. Review of automotive brake friction materials. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 218, n. 9, p. 953–966, 2004.
- DENG, H. et al. Effect of brake pressure and brake speed on the tribological properties of carbon/carbon composites with different pyrocarbon textures. **Wear**, Elsevier, v. 270, n. 1-2, p. 95–103, 2010.
- DIULGHEROGLO, P. A. Fundamentos de freios e seus componentes. **Congresso SAE Brasil**, São Paulo, v. 206, 2016.

DMITRIEV, A.; ÖSTERLE, W. Modeling of brake pad-disc interface with emphasis to dynamics and deformation of structures. **Tribology International**, Elsevier, v. 43, n. 4, p. 719–727, 2010.

DMITRIEV, A.; ÖSTERLE, W.; KLOB, H. Numerical simulation of typical contact situations of brake friction materials. **Tribology International**, Elsevier, v. 41, n. 1, p. 1–8, 2008.

ERIKSSON, M. **Friction and contact phenomena of disc brakes related to squeal**. [S.l.]: Acta Universitatis Upsaliensis Uppsala, Sweden, 2000.

ERIKSSON, M.; BERGMAN, F.; JACOBSON, S. Surface characterisation of brake pads after running under silent and squealing conditions. **Wear**, Elsevier, v. 232, n. 2, p. 163–167, 1999.

ERIKSSON, M.; BERGMAN, F.; JACOBSON, S. On the nature of tribological contact in automotive brakes. **Wear**, Elsevier, v. 252, n. 1-2, p. 26–36, 2002.

ERIKSSON, M.; JACOBSON, S. Tribological surfaces of organic brake pads. **Tribology international**, Elsevier, v. 33, n. 12, p. 817–827, 2000.

ERIKSSON, M.; LORD, J.; JACOBSON, S. Wear and contact conditions of brake pads: dynamical in situ studies of pad on glass. **Wear**, Elsevier, v. 249, n. 3-4, p. 272–278, 2001.

GAHR, K. H. Z. Microstructure and wear of materials. **New York: Elsevier**, 1987.

GAHR, K. H. Z. Wear by hard particles. **Tribology International**, 1998.

GARG, B. D. et al. Brake wear particulate matter emissions. **Environmental Science & Technology**, ACS Publications, v. 34, n. 21, p. 4463–4469, 2000.

GATES, J. Two-body and three-body abrasion: a critical discussion. **wear**, Elsevier, v. 214, n. 1, p. 139–146, 1998.

GOMES, L. M. S. Estudo da influência da variação da microestrutura, da composição química e da carga normal no controle do atrito nos freios a disco. Cachoeiro de Itapemirim, 2022.

GRIGORATOS, T.; MARTINI, G. Brake wear particle emissions: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, Springer, v. 22, p. 2491–2504, 2015.

HAGEN, F. zum; FERDINAND, H. **Investigation of Brake Wear Particle Emissions on the Dynamometer and the Vehicle under Real-Driving Simulation**. Tese (Doutorado) — Dissertation, Wuppertal, Bergische Universität, 2019, 2020.

HALDERMAN, J. D.; MITCHELL, C. D. **Automotive brake systems**. [S.l.]: Pearson/Prentice Hall, 2004.

HALDERMAN, J. D.; REHKOPF, J. **Automotive brake systems**. [S.l.]: Pearson/Prentice Hall, 2006.

HAYNES, T.; PUBLISHING, H. **Automotive Disc Brake Manual: The Complete Guide to the Theory and Practice of Automotive Disc Braking Systems**. Haynes, 1999. (Haynes Automotive TechBooks). ISBN 9781859605424. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=h0gJAAAACAAJ>.

HUTCHINGS, I. Tribology: Friction and wear of engineering materials. **Edward Arnold, London**, 1992.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. [S.l.]: Butterworth-heinemann, 2017.

INFANTINI, M. B. Variáveis de desempenho dos sistemas de freio. 2008.

SILVA JUNIOR, W. M. Simulação do desgaste abrasivo via interações múltiplas. Universidade Federal de Uberlândia, 2008.

KATO, K. A. **Wear Mechanisms, Modern Tribology Handbook**. [S.l.]: Ed. CRC Press LLC, V. 2, Cap. 2, 2001.

KIM, S. J.; JANG, H. Friction and wear of friction materials containing two different phenolic resins reinforced with aramid pulp. **Tribology international**, Elsevier, v. 33, n. 7, p. 477–484, 2000.

KRUZE, G. A. S. Avaliação do coeficiente de atrito em um dinamômetro em escala reduzida. 2009.

KUKUTSCHOVÁ, J. et al. Wear performance and wear debris of semimetallic automotive brake materials. **Wear**, Elsevier, v. 268, n. 1-2, p. 86–93, 2016.

LIMPERT, R. **Brake design and safety**. [S.l.]: SAE international, 2011.

MA, Y. et al. Performance assessment of hybrid fibers reinforced friction composites under dry sliding conditions. **Tribology International**, Elsevier, v. 119, p. 262–269, 2018.

MANUAL NAKATA para Sistemas de Freios. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC078/Aulas/extras/Manual%20sistema%20de%20freios%20-%20Nakata.pdf>.

MATOZO, L. T. Estudo da relação entre propriedades de compósitos de fricção aplicados a sistemas de freio a disco e a propensão à ocorrência de squeal noise. 2012.

MEIB. **Qual a diferença entre Microscópio Ótico e Eletrônico? | Plataforma de Microscopia Eletrônica**. 2022. Disponível em: <http://www.meib.uff.br/?q=content/qual-diferen%C3%A7a-entre-microsc%C3%B3pio-%C3%B3tico-e-eletr%C3%B4nico>.

MENEZES, R. C. de. Avaliação da influência da pressão de contato, da velocidade de escorregamento e da temperatura no desgaste e coeficiente de atrito do par pastilha-disco de um mecanismo de freio veicular. Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.

- MÜLLER, M.; OSTERMEYER, G. A cellular automaton model to describe the three-dimensional friction and wear mechanism of brake systems. **Wear**, Elsevier, v. 263, n. 7-12, p. 1175–1188, 2007.
- NEIS, P. et al. Towards a better understanding of the structures existing on the surface of brake pads. **Tribology International**, Elsevier, v. 105, p. 135–147, 2017.
- NEIS, P. D. Projeto e construção de um tribômetro com controle independente da temperatura do disco. 2012.
- ÖSTERLE, W.; URBAN, I. Friction layers and friction films on pmc brake pads. **Wear**, Elsevier, v. 257, n. 1-2, p. 215–226, 2004.
- ÖSTERLE, W.; URBAN, I. Third body formation on brake pads and rotors. **Tribology International**, Elsevier, v. 39, n. 5, p. 401–408, 2006.
- OSTERMEYER, G.; MÜLLER, M. New insights into the tribology of brake systems. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 222, n. 7, p. 1167–1200, 2008.
- OSTERMEYER, G. P. Friction and wear of brake systems. **Forschung im Ingenieurwesen**, Springer, v. 66, n. 6, p. 267–272, 2001.
- PAZ, M. A. **Manual do Automóvel**. [S.l.]: Editora Mestre, 1970.
- MACHADO PINTO, R. L. et al. Aplicação de técnicas de planejamento de experimentos para otimização do comportamento tribológico e térmico de materiais de atrito durante o processo de frenagem. **Matéria (Rio de Janeiro)**, SciELO Brasil, v. 22, 2017–b.
- MACHADO PINTO, R. L. et al. Avaliação do desempenho tribológico e térmico de materiais de atrito durante o processo de frenagem. *Revista matéria*, v. 22, p. n.03, 2017–a.
- PINTO, R. L. M. et al. Análise estatística das características superficiais de materiais de atrito, parâmetros de operação e desempenho na frenagem de um veículo automotivo por meio de ensaios experimentais. Universidade Federal de Minas Gerais, 2020.
- POLETTO, J. C. et al. Analysis of the error in the estimation of the morphology of contact plateaus existing on the surface of brake pads. **Tribology International**, Elsevier, v. 126, p. 297–306, 2018.
- PRESTON, J.; FORTHOFFER, R. **Correlation of vehicle, dynamometer and other laboratory tests for brake friction materials**. [S.l.], 1971.
- RABINOWICZ, E. **Friction and Wear of Materials**. [S.l.]: Editora John Wiley and Sons, 2.ed., 335p., Estados Unidos, 1995.
- ROGGE, W. F. et al. Sources of fine organic aerosol. 3. road dust, tire debris, and organometallic brake lining dust: roads as sources and sinks. **Environmental Science & Technology**, v. 27, n. 9, p. 1892–1904, 1993.

- SANDERS, P. G. et al. Airborne brake wear debris: size distributions, composition, and a comparison of dynamometer and vehicle tests. **Environmental science & technology**, ACS Publications, v. 37, n. 18, p. 4060–4069, 2003.
- SCHATT, W.; WIETERS, K.-P.; KIEBACK, B. **Pulvermetallurgie: technologien und werkstoffe**. [S.l.]: Springer, 2007.
- SERBINO, E. M. **Um estudo dos mecanismos de desgaste em disco de freio automotivo ventilado de ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2005.
- SHARP, B. **FADING, O INIMIGO DO MOTORISTA - AUTOentusiastas Classic (2008-2014)**. 2013.
- SILVESTRE, N. State-of-the-art review on carbon nanotube reinforced metal matrix composites. **International Journal of Composite Materials**, Citeseer, v. 3, n. 6, p. 28–44, 2013.
- STACHOWIAK, G.; ANDREW, B. **Engineering Tribology, Third Edit.** [S.l.]: Elsevier, 832p, 2005.
- STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. **Engineering Tribology**. [S.l.]: Elsevier Science, 2005. (Engineering Tribology). ISBN 9780750678360.
- VERMA, P. C. et al. Role of the friction layer in the high-temperature pin-on-disc study of a brake material. **Wear**, Elsevier, v. 346, p. 56–65, 2016.
- WANG, F.; LIU, Y. Mechanical and tribological properties of ceramic-matrix friction materials with steel fiber and mullite fiber. **Materials & Design**, Elsevier, v. 57, p. 449–455, 2014.
- XIAO, X. et al. Review on the friction and wear of brake materials. **Advances in Mechanical Engineering**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 8, n. 5, p. 1687814016647300, 2016.
- ZANGIACOMI, M. H. **Desenvolvimento e Análise de Compósitos reforçados com fibras de panox e fibras de aramida utilizados em materiais de fricção em freios automotivos**. Tese (Doutorado) — [sn], 2002.
- ZIMMER, D. Ate friction test machine and other methods of lining screening. **SAE Transactions**, JSTOR, p. 701–713, 1982.
- ZULA, H.; PANDYA, H. Z. Development of friction pad and study of its wear characteristics. **IJMPE**, v. 5, n. 2, p. 5–8, 2017.

APÊNDICE A - GRÁFICOS QUE REPRESENTAM A VARIAÇÃO DA ÁREA E DO PERÍMETRO

Nas Figuras 51, 52, 53 e 54 apresentam gráficos ilustrando a variação da área em μm^2 e o perímetro em μm em função do número de platôs das pastilhas internas em ambos os conjuntos. As ampliações utilizadas são de aproximadamente 50, 100 e 200 vezes.

Figura 51 – Área das pastilhas internas

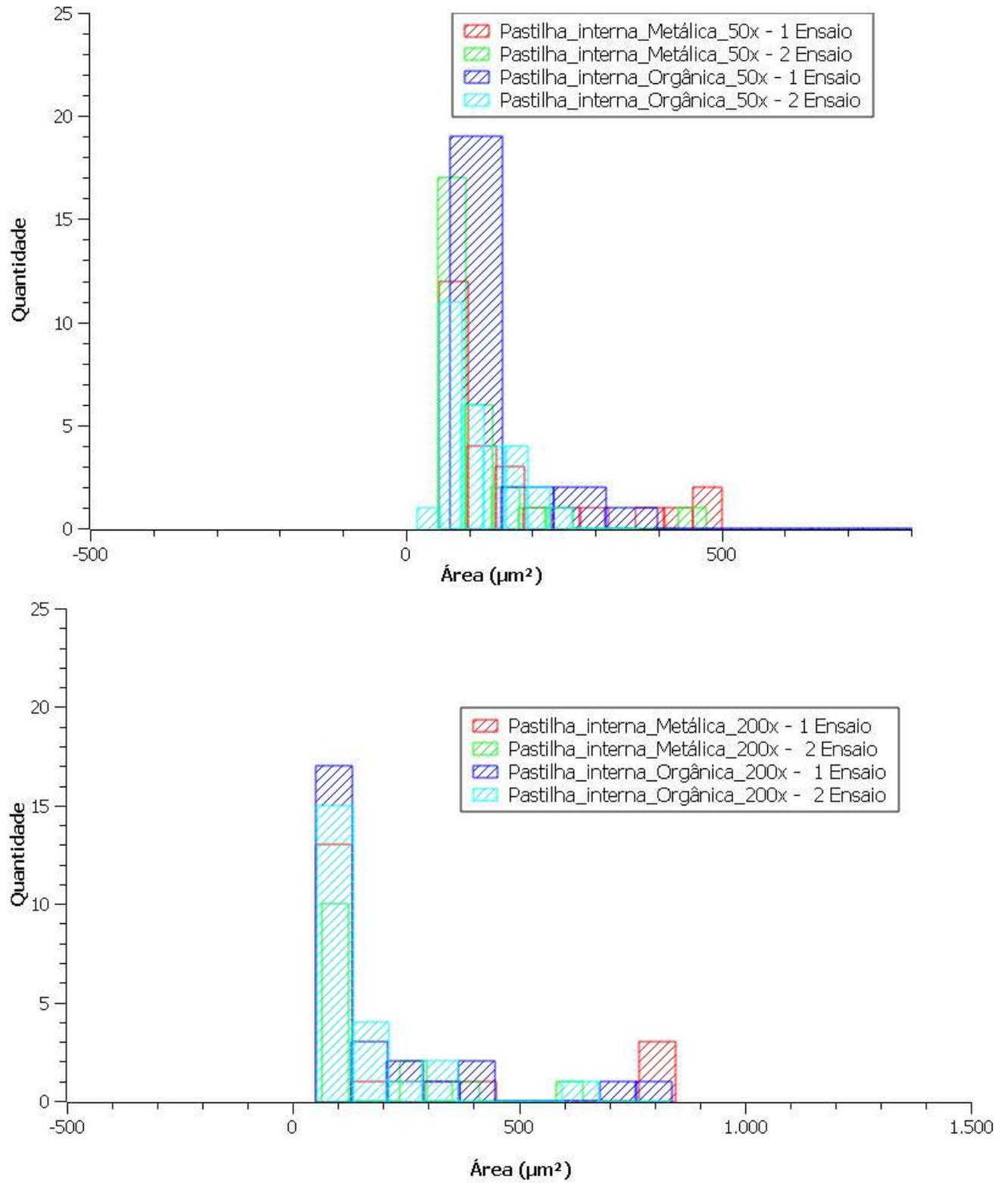


Figura 52 – Área das pastilhas internas

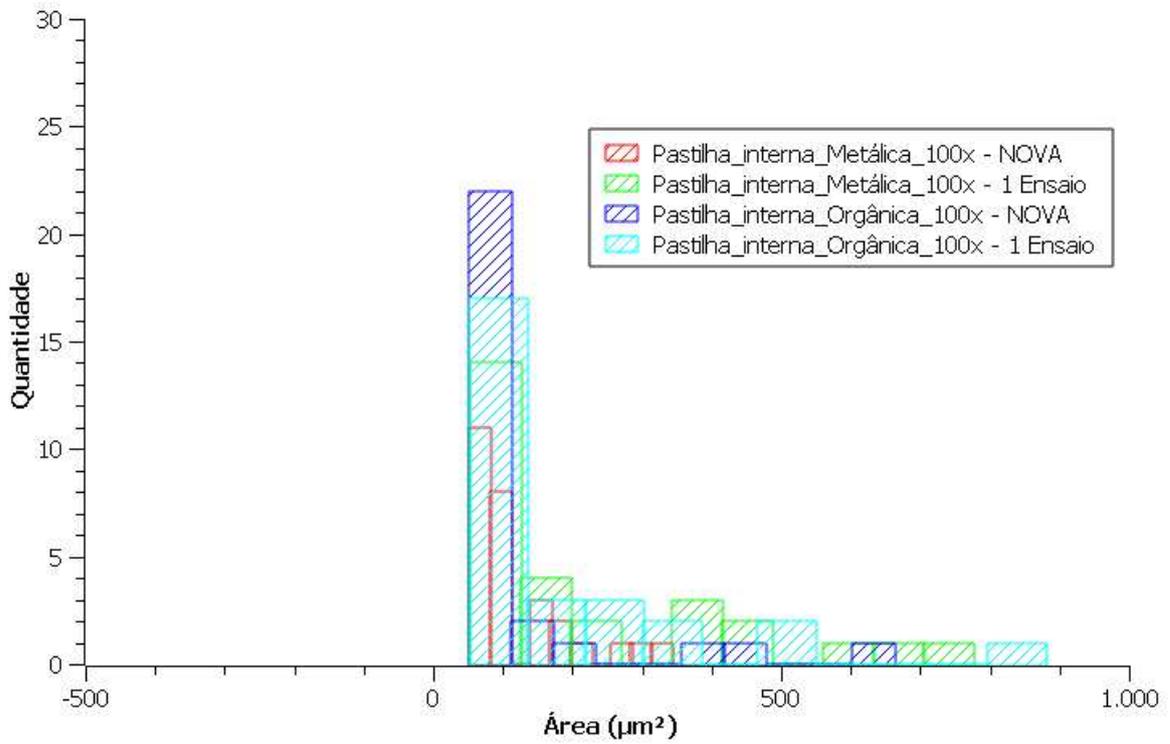
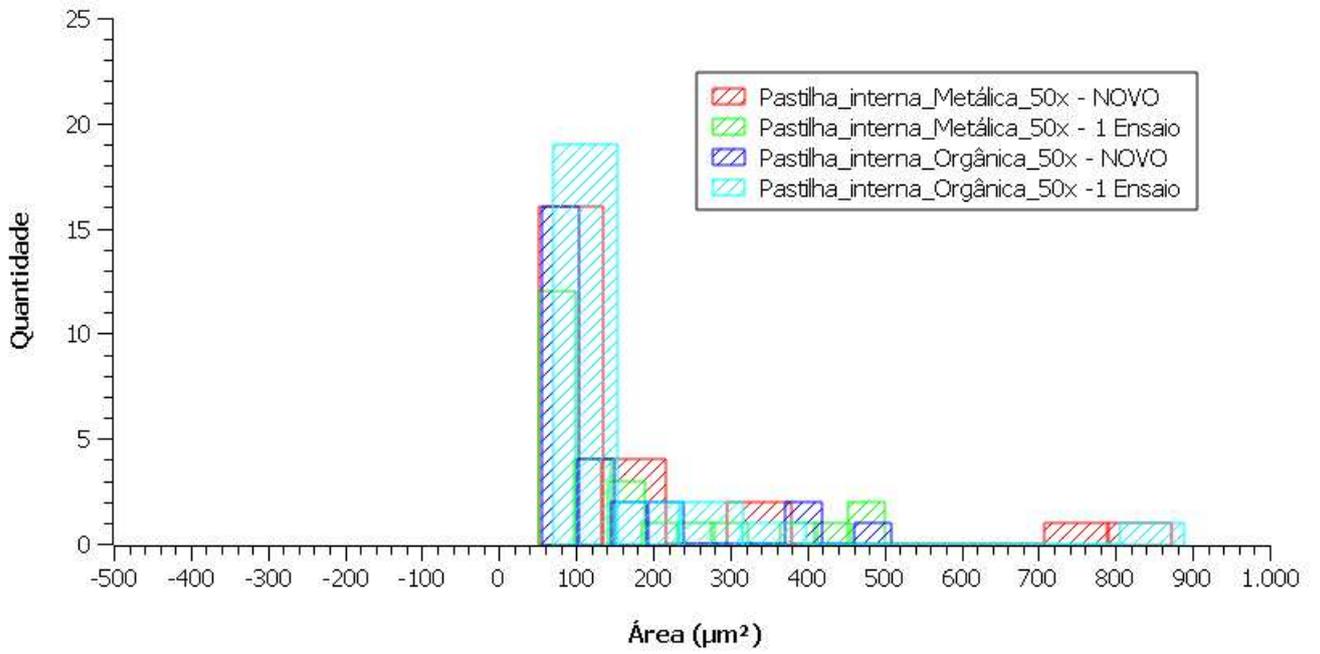


Figura 53 – Perímetro das pastilhas internas

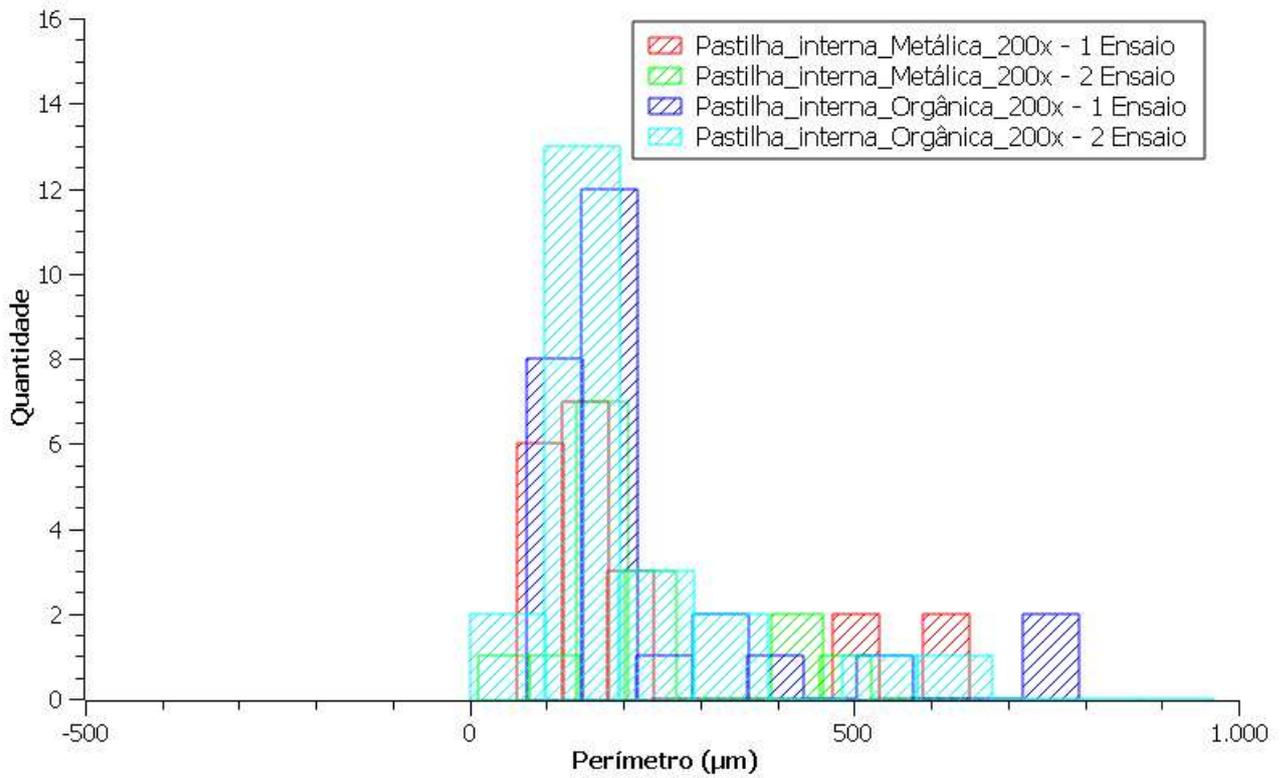
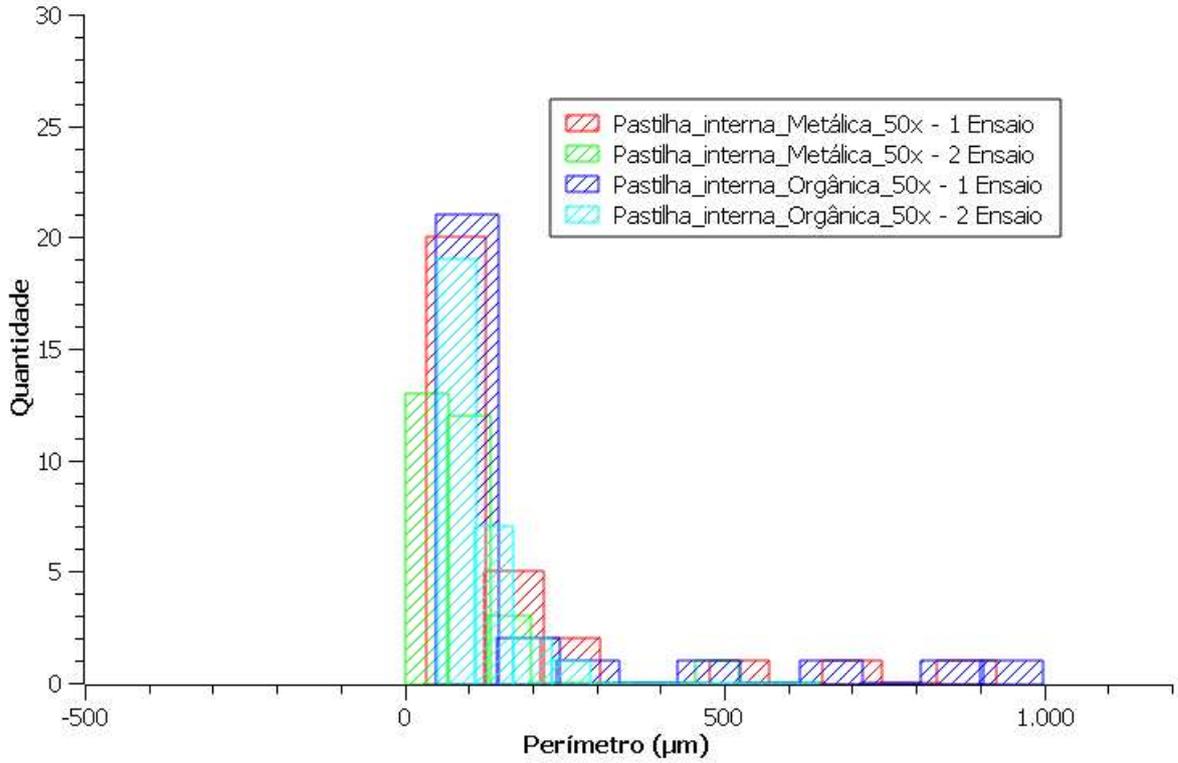


Figura 54 – Perímetro das pastilhas internas

