

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

ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DE DISCOS DE FREIO AUTOMOTIVO DURANTE FRENAGENS

por

Liu Yesukai de Barros

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

Porto Alegre, Julho de 2015



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DE DISCOS DE FREIO AUTOMOTIVO DURANTE FRENAGENS

por

Liu Yesukai de Barros

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

Prof. Dr. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Comissão de Avaliação:

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Cintia Cristiane Petry Mazzaferro

Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Prof. Dr. Tiago Becker

Porto Alegre, 1 de Julho de 2015.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Patric Daniel Neis, pela orientação, conselhos, suporte e disponibilidade durante a elaboração deste trabalho;

À equipe do LATRIB, pelo apoio, em especial ao Rafael Pains Pavlak, pela programação e ajuste dos softwares;

Aos colegas, por acompanhar estes longos anos de graduação;

Aos meus pais, por motivos mais que óbvios.

Não podemos resolver os nossos problemas  
com o mesmo pensamento que usamos para criá-los.

*Albert Einstein*

BARROS, L.Y. **Análise da Superfície de Discos de Freio Automotivos Durante Frenagens.** 2015. 29 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

## **RESUMO**

Este trabalho tem como objetivo avaliar o depósito do terceiro corpo (também chamado de filme) ao longo de frenagens em disco de freio automotivo. Para tanto, foi desenvolvida uma metodologia capaz de quantificar o depósito deste terceiro corpo através de micrografias ao longo do raio do disco bem como sua evolução em ensaios com parâmetros diversos. Estes ensaios foram realizados no tribômetro do Laboratório de Tribologia (LATRIB) da UFRGS, utilizando dois tipos de pastilhas distintas: Orgânica (NAO) e Semi-metálica (SM). Três métodos foram utilizados para avaliar o depósito de filme: Método visual, média e desvios padrão das intensidades e análise via programa computacional. Os três métodos mostraram-se eficientes para esta avaliação do filme, levando a resultados semelhantes. Verificou-se que pastilhas de freio NAO formam filme mais heterogêneo ao longo do raio do disco, enquanto que pastilhas SM apontaram o contrário, levando a uma distribuição mais uniforme. O aumento da força normal levou a um aumento no depósito de filme para os ensaios com a pastilha NAO, e o contrário ocorreu para a pastilha SM. Observou-se uma correlação moderada entre a distribuição de temperatura radial do disco, obtida por termografia, e a distribuição radial do filme.

**PALAVRAS-CHAVE:** Terceiro corpo, disco de freio, micrografia.

BARROS, L.Y. **Surface Analysis of Automotive Brake Discs During Braking**. 2015. 29 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

## **ABSTRACT**

This study aims evaluate the deposit of third-body (also known as film) in automotive disc brake system during braking. Therefore, was developed a methodology able to quantify the deposit of the third-body with micrography along the disc's radius and its evolution in tests with several parameters. These tests were realized in the tribometer of the Laboratory of Tribology of UFRGS, using two different types of pads. Three methods were used to evaluate the film deposit: Visual method, mean and standard deviation of intensity and analysis by software. The three methods were effective for this assessment of film, showing similar results. It was found that NAO pads formed heterogeneous film along the disc's radius, while SM pads show the opposite, with an uniform distribution. The increase in normal force led to an increase in the film deposit for the NAO pads tests, and the opposite occurred in the SM pads tests. There was a moderate correlation between the radial temperature distribution, obtained by thermography, and the radial distribution of the film on the disk.

**KEYWORDS:** Third-body, disk Brake, micrography.

## ÍNDICE

	Pág.
1	INTRODUÇÃO ..... 1
2	OBJETIVOS ..... 1
2.1	Objetivo Geral ..... 1
2.2	Objetivos Específicos ..... 1
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ..... 1
3.1	Conceito de Atrito ..... 1
3.2	Sistemas de Freio Veiculares ..... 2
3.3	Classificação das Pastilhas de Freio ..... 2
3.4	Área de Contato ..... 2
3.5	Terceiro Corpo ..... 2
3.6	Tribômetro ..... 3
3.7	Técnicas para Segmentação de Imagens ..... 3
3.8	Modos de Cor ..... 3
4	METODOLOGIA ..... 4
4.1	O Tribômetro do LATRIB ..... 4
4.2	Corpo de Prova ..... 4
4.3	Disco de Freio ..... 4
4.4	Escolha do Microscópio ..... 4
4.5	Obtenção das Imagens do Disco ..... 5
4.6	Obtenção das Imagens da Pastilha ..... 5
4.7	Métodos de Análise da Superfície do Disco de Freio ..... 6
4.7.1	Análise Visual ..... 6
4.7.2	Média e Desvios Padrão das Intensidades das Seções ..... 6
4.7.3	Programa Computacional ..... 7
4.8	Parâmetros de Ensaio ..... 7
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO ..... 8
5.1	Avaliação Visual do Filme ..... 8
5.2	Média e Desvios Padrão das Intensidades das Seções ..... 9
5.3	Análise Via Programa Computacional ..... 10
5.4	Área de Contato da Pastilha ..... 12
5.5	Coeficiente de Atrito ..... 12
5.6	Variação de Temperatura ..... 13
5.7	Distribuição de Temperatura Radial por Termografia ..... 13

5.8	Cruzamento dos Resultados .....	13
6	CONCLUSÕES .....	14
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	14
	Anexo A .....	16
	Apêndice A .....	17
	Apêndice B .....	19

## 1. INTRODUÇÃO

O funcionamento de sistemas de freio automotivo provém do atrito entre um elemento rotativo e um disco (ou tambor), que por sua vez está fixo na roda [Albuquerque, et al. 1976]. Por se tratar de um dispositivo de contato entre duas superfícies (disco e pastilha), estes componentes são sujeitos a desgastes, sendo necessária a manutenção destes de forma periódica. O presente trabalho aborda um aspecto particular do freio a disco automotivo: a camada de terceiro corpo (ou filme) formado entre o disco e pastilha de freio durante a frenagem. O filme é oriundo do arrancamento de partículas das superfícies do disco e pastilha de freio [Eriksson, 2000]. A composição do filme é principalmente determinada pelo lubrificante sólido presente na formulação da pastilha [Österle e Urban, 2006]. Apesar de ter influência direta na capacidade de frenagem do sistema [Jang, et al., 2003; Matozo, 2006], estudos relacionados ao filme tem sido pouco abordado no meio científico, principalmente com respeito à sua evolução ao longo de frenagens. Jang, et al., 2003, menciona que o terceiro corpo, por evitar o contato direto entre disco e o material de fricção (pastilha), preserva a integridade do disco. Matozo, 2006, por sua vez, afirma que o terceiro corpo garante a estabilidade do atrito em sistemas de discos de freio, o que é um efeito desejável. Este trabalho visa estudar a evolução do terceiro corpo em diversas condições de frenagem, correlacionando-o com outros parâmetros obtidos em ensaios. O trabalho também busca um método capaz de quantificar o depósito de filme no disco, sendo uma novidade nesta área de pesquisa. Um estudo neste sentido permitirá uma melhor compreensão na interação entre disco e pastilha ao longo de frenagens, podendo auxiliar no desenvolvimento de novos tipos de pastilhas de freio automotivo com reduzido nível de desgaste no disco e na própria pastilha, diminuindo assim a necessidade de manutenção e substituição destes componentes.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo observar a evolução da deposição de filme no disco de freio, correlacionando-o com outros parâmetros (temperatura, coeficiente de atrito e força normal) obtidos ao longo de frenagens que executadas em um tribômetro.

### 2.2 Objetivos específicos

- Realização de frenagens no tribômetro do Laboratório de Tribologia da UFRGS;
- Obtenção de imagens microscópicas do disco de freio e das pastilhas de freio (uma semi-metálica e outra orgânica) ao longo de ensaios de frenagem;
- Análise qualitativa (visual) das imagens do disco a fim de avaliar o comportamento do filme depositado sobre a superfície do disco durante ensaios;
- Definição de um método quantitativo para medir a deposição de filme sobre o disco;
- Estudos de correlação entre os resultados obtidos nas análises das imagens de microscópio com a temperatura obtida por termografia ao longo do raio do disco.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Conceito de Atrito

Segundo Butt, et al., 2003, atrito é a força de interação entre superfícies que resistem ou dificultam seu movimento relativo.

O atrito divide-se em atrito estático e atrito dinâmico:

“Atrito dinâmico, também chamado de atrito cinético, é a força mecânica entre superfícies de deslizamento ou de rolamento que resistem ao movimento. O atrito estático deve

ser superado para iniciar o movimento entre dois corpos que estão inicialmente em repouso” [Butt, et al., 2003].

### 3.2 Sistemas de Freio Veiculares

O funcionamento dos sistemas de freio veiculares baseia-se no contato entre um elemento fixo (pastilha ou lona) e um elemento rotativo (disco ou tambor), o qual está acoplado à roda. O atrito, por sua vez, produz a força necessária para reduzir a velocidade do veículo através da conversão da energia cinética em energia térmica [Albuquerque, et al., 1976; Eriksson, et al., 2001], vibração e ruído [Matozo, 2006].

### 3.3 Classificação das Pastilhas de Freio

As pastilhas de freio são normalmente classificadas em dois grupos: Semi-Metálica e Non Asbesto Organic [Matozo, 2006].

- Semi-Metálica (SM) possuem uma carga maior de compostos metálicos. Apresentam resistência ao desgaste e suportam altas temperaturas. São mais utilizados no mercado europeu.
- Non Asbesto Organic (NAO), quando comparadas às pastilhas SM, são mais macias, levando a um maior contato com o disco, o que reduz o coeficiente de atrito e reduz o desgaste do disco de freio. Este tipo de pastilha não apresenta materiais ferrosos em sua composição e é muito utilizada no mercado americano, que prioriza o conforto na operação de frenagem.

### 3.4 Área de Contato

Os diversos materiais utilizados na composição de pastilhas de freio apresentam propriedades distintas, o que acarreta um desgaste não uniforme ao longo de toda superfície da pastilha. Esta distribuição irregular do desgaste leva à formação dos chamados platôs, onde estes se elevam em relação ao restante da superfície [Eriksson, 2000].

Eriksson, 2000, classificou os platôs em primários e secundários. Os platôs primários são formados a partir de materiais com maiores dureza. Por apresentar maior resistência, provocam o arrancamento de partículas mais macias do disco e da própria pastilha. Estas partículas podem levar a formação dos platôs secundários, através da aglomeração destes, ou na formação do filme, também conhecido como terceiro corpo. Eriksson, 2000, também menciona que os platôs representam de 10% a 30% da área nominal de uma pastilha de freio. A Figura 3.1 abaixo mostra esquematicamente os platôs.

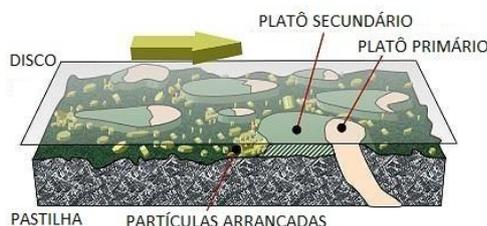


Figura 3.1 – Esquema dos platôs de contato - platôs primários (coloração mais clara) e platôs secundários (coloração mais escura). A seta indica o movimento relativo do disco [Adaptado: Eriksson, 2000].

### 3.5 Terceiro Corpo

O filme (também chamado de terceiro corpo) surge devido ao arrancamento de partículas oriundas das superfícies do disco e pastilha de freio [Eriksson, 2000]. Sua

composição é principalmente determinada pelo lubrificante sólido presente na formulação da pastilha de freio [Österle e Urban, 2006]. A presença do terceiro corpo é observada tanto no material de fricção quanto no disco de freio.

Estudos demonstram que o filme tem grande influência no desempenho de materiais de fricção, visto que previne o contato direto entre as superfícies do disco e da pastilha [Jang, et al., 2003]. Segundo Matozo, 2006, o terceiro corpo preserva a integridade do disco de freio, garantindo a estabilidade do atrito durante a frenagem. Österle e Urban, 2006, mencionam que o filme também reduz a geração de ruído e de vibração.

### 3.6 Tribômetro

O tribômetro é um equipamento de testes que tem como objetivo determinar propriedades de atrito e desgaste de combinações de materiais e lubrificantes sob condições de carga, temperatura, velocidade e atmosfera [Radi, et al., 2007]. Segundo Neis, 2008, um tribômetro pode ser utilizado como ferramenta de apoio à pesquisa para a compreensão de fenômenos tribológicos, incluindo materiais de fricção utilizados para freios.

### 3.7 Técnicas para segmentação de imagens

Existem diversas técnicas para segmentação de imagens, como o Método de Rosin e o Método de Niblack [Seixas, et al., 2008]. Dentre as técnicas ou algoritmos, destaca-se o algoritmo de Otsu, que é a técnica utilizada no presente trabalho.

O método Otsu é um método que possibilita, através da segmentação de imagens, selecionar automaticamente os limites dos níveis de cinza que melhor separam os elementos de interesse em uma imagem [Seixas, et al., 2008]. A Figura 3.2 mostra um exemplo de aplicação do método de Otsu para estimativa da área real de contato de uma pastilha de freio automotiva.

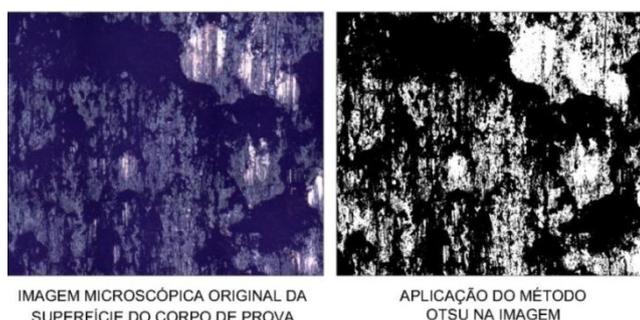


Figura 3.2 - Imagem após aplicação do método de segmentação de Otsu.

### 3.8 Modos de Cor

Os modos de cor de uma imagem podem ser, dentre outros, RGB e tons de cinza. Segundo Adobe, 2015, imagens em RGB (do inglês Red, Green and Blue) utilizam três cores (ou canais), convertidos em 24 bits (3 canais x 8 bits) de informação por pixel para reprodução das demais cores, podendo reproduzir 16,7 milhões de cores para cada pixel. Em cada canal de 8 bits, a intensidade varia de 0 a 255 para cada uma das cores RGB. No modo de tons de cinza, cada pixel de uma imagem de 8 bits possui um valor de intensidade de brilho que varia de 0 (preto) a 255 (branco) [Adobe, 2015].

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 O Tribômetro do LATRIB

Os ensaios realizados neste trabalho foram efetuados no tribômetro (Figura 4.1) existente no laboratório de tribologia (LATRIB) da UFRGS.



Figura 4.1 – Tribômetro do LATRIB – UFRGS [Adaptado: Neis, et al., 2014].

Este equipamento registra, entre outros parâmetros, valores de coeficiente de atrito e variação de temperatura provenientes dos ensaios. As incertezas deste equipamento encontram-se no Anexo A.

### 4.2 Corpo de Prova

Nos experimentos foram ensaiados dois tipos de corpos de prova utilizados no ramo automotivo nacional: Semi-Metálico (SM) e Non Asbesto Organic (NAO). A Figura 4.2 ilustra a geometria do corpo de prova utilizado.

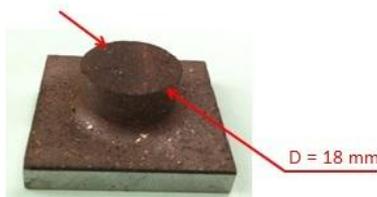


Figura 4.2 – Geometria dos corpos de prova [Adaptado: Cappellaro, 2014].

### 4.3 Disco de Freio

Consiste em um disco de freio de ferro fundido cinzento, material comumente utilizado para discos de freio automotivo comerciais. Antes do início dos ensaios para cada pastilha, o disco foi lixado com lixas de diferentes granulações de modo a reduzir a rugosidade da sua superfície. Este processo foi realizado até que a superfície do disco apresentasse uma rugosidade  $R_a$  inferior a  $0,3 \mu\text{m}$ . As lixas utilizadas apresentam granulação de 240, 300, 400, 500 e 1500, nesta ordem.

### 4.4 A Escolha do Microscópio

Com o intuito de permitir a análise morfológica das pastilhas e do disco de freio, foram obtidas imagens de microscópio (micrografias). Primeiramente tentou-se utilizar um microscópio móvel, comercialmente chamado de “microscópio USB”. Este tipo de equipamento permite o registro fotográfico do disco de freio sem a necessidade de removê-lo do tribômetro, o que facilitaria o registro das imagens. Após alguns testes, observou-se que o nível de aproximação (zoom), bem como a resolução obtida por este tipo de equipamento, foram insatisfatórios para a análise adequada da superfície dos componentes. Desta forma, partiu-se para utilização de um microscópio de bancada, marca Zeiss modelo Axio Lab.A1, o qual se encontra no LATRIB. Visto que este tipo de microscópio é fixo, foi necessária a remoção do

disco de freio ao final de cada ensaio de forma a permitir as análises das imagens. Embora a desinstalação e instalação do disco de freio seja uma tarefa delicada (há a necessidade de remoção e instalação de termopar, bem como alinhamento do disco de freio antes do início de cada ensaio), a utilização do microscópio de bancada é capaz de fornecer uma qualidade de imagem superior ao microscópio USB, permitindo uma análise mais detalhada da superfície do disco de freio. A Figura 4.3 ilustra estes dois equipamentos.

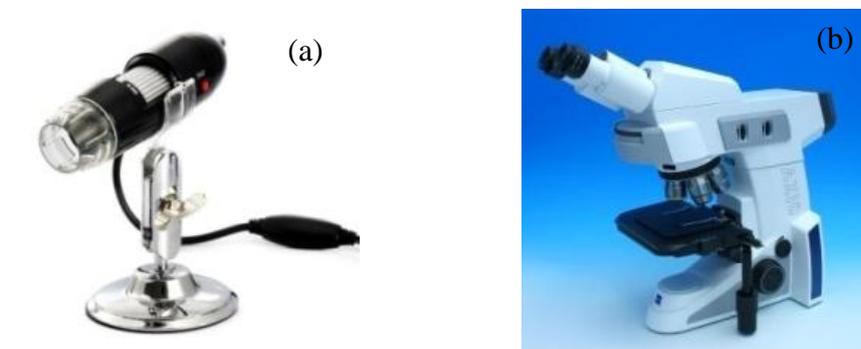


Figura 4.3 – Microscópio USB (a); Microscópio ZEISS modelo AXIO Lab.A1 (b).

#### 4.5 Obtenção das Imagens do Disco

Diversas micrografias (15 ao total) foram obtidas sobre a pista de atrito do disco, utilizando um aumento de 50x. Estas micrografias foram então montadas em uma única imagem, possibilitando a visualização de toda a área radial atritada sobre a superfície do disco (imagem panorâmica), conforme ilustrado esquematicamente na Figura 4.4. As micrografias individuais (antes da montagem da panorâmica) possuem uma largura maior (aproximadamente 2,20 mm). Mas para possibilitar a montagem, foi realizada uma sobreposição de regiões em comum das micrografias, o que levou a uma largura útil de 1,77 mm.

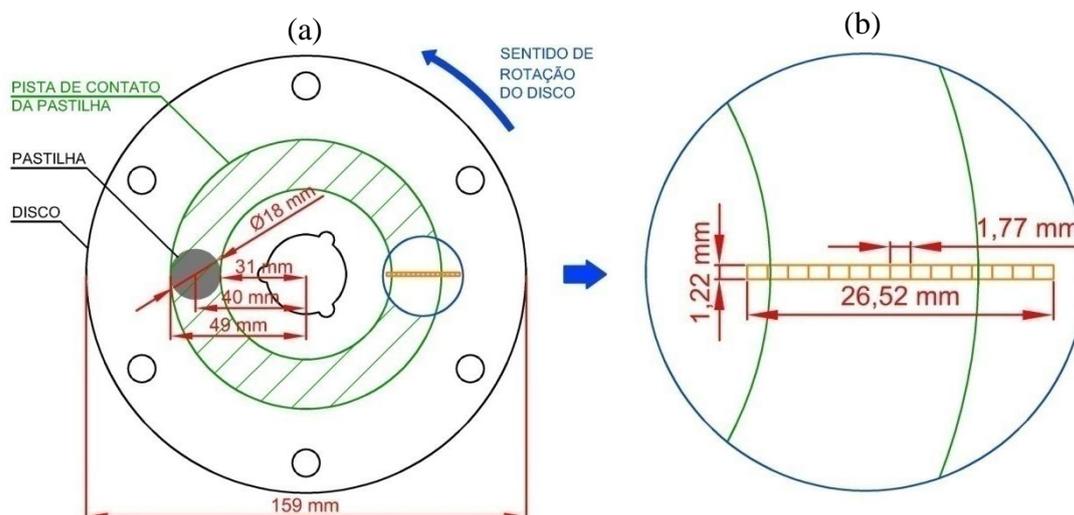


Figura 4.4 – Esquema mostrando dimensões do disco (a) e locais de obtenção de uma imagem ampla do disco (b).

#### 4.6 Obtenção das Imagens da Pastilha

As imagens das pastilhas de freios ocorreram de forma similar, sendo realizada uma montagem (contendo nove micrografias, configuradas na forma de matriz 3x3) de uma única

imagem da região central da pastilha. As microscopias estão apresentadas na Figura A.2 do Apêndice A. Através do método Otsu foi possível obter o valor da área real de contato em cada experimento. A Figura 4.5 ilustra o esquema mostrando as dimensões desta montagem.

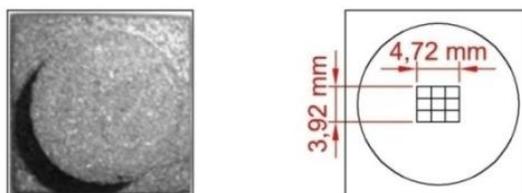


Figura 4.5 – Dimensões e locais de registro de imagens nas pastilhas.

#### 4.7 Métodos de Análise da Superfície do Disco de Freio

A fim de possibilitar a comparação da superfície do disco de freio frente aos diversos parâmetros estabelecidos, utilizaram-se diferentes métodos de análise. A seguir, serão descritos como foram realizados estes métodos.

##### 4.7.1 Análise Visual

Uma primeira avaliação foi efetuada de forma qualitativa, comparando as imagens microscópicas dos ensaios de forma visual. Este método possibilita a comparação dos resultados quantitativos oriundos dos outros métodos empregados (seções 4.7.2 e 4.7.3), verificando assim a validade de cada um destes.

##### 4.7.2 Médias e Desvios Padrão das Intensidades das Seções

Este método consiste em uma análise dos pixels das micrografias ao longo do raio do disco, de forma a avaliar a homogeneidade do filme em cada experimento. Deve-se transformar a imagem panorâmica radial do disco de freio em tons de cinza, onde cada uma destas panorâmicas foi dividida em 20 seções equidistantes (Figura 4.6), sendo então registrada a média dos tons de cinza em cada seção por meio da análise dos pixels. Em seguida, foi registrado o desvio padrão das médias das intensidades dos tons de cinza em cada ensaio. Este método permite verificar o gradiente dos tons de cinza ao longo do raio do disco em cada um dos experimentos e entre os diferentes testes realizados. Quanto maior o desvio padrão, maior a variação de tons de cinza no ensaio, indicando uma maior variação de filme depositado radialmente sobre a superfície do disco.

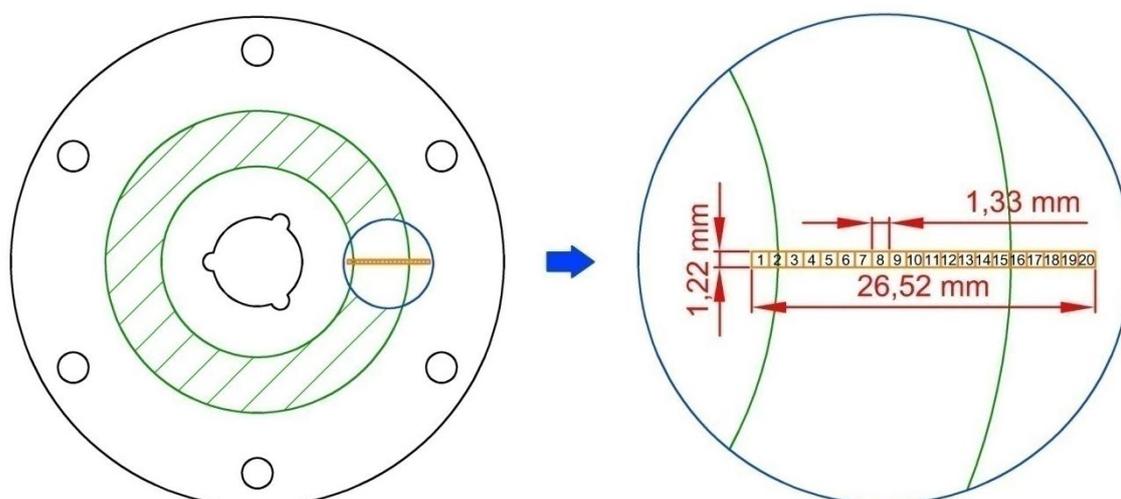


Figura 4.6 – Locais das seções para obtenção das intensidades médias.

Cabe aqui salientar que a escolha do número de seções (20) teve como objetivo aumentar os pontos de análise, onde cada imagem possui uma largura de 1,33 mm e, por isso, menor do que a largura útil de 1,77 mm referente à imagem panorâmica originalmente criada.

#### 4.7.3 Programa Computacional

Outro método empregado para análise da quantidade de filmes sobre o disco foi a utilização de um programa computacional criado em conjunto com a equipe do LATRIB no software MATLAB® (MathWorks), o qual é baseado na análise dos tons RGB da imagem. Neste programa, são escolhidos dois pixels de referência no disco de freio lixado, ou seja, duas tonalidades que limitam a existência de filme (limite superior e limite inferior). O software então seleciona na micrografia a ser analisada todos os pixels que encontram-se fora deste intervalo (onde não há a presença de filme) de referência, substituindo-as por uma coloração amarela. O programa também informa o percentual da imagem que foi classificado como sendo filme. O critério para escolha destes pixels de referência consistiu na análise geral dos experimentos e diversos testes do software. Vale salientar que esta referência é mantida fixa para todos os ensaios, pois as micrografias foram registradas pelo mesmo operador nas mesmas condições de iluminação. O Apêndice B ilustra a sequência de funcionamento do programa.

#### 4.8 Parâmetros de Ensaio

A Tabela 4.1 abaixo mostra os parâmetros adotados no tribômetro para a realização dos ensaios.

Tabela 4.1 – Parâmetros adotados ao longo dos ensaios

Frenagem	Força [N]	Temperatura Inicial [°C]	Rotação Inicial [RPM]
1-5	600	60	1840
6-10			
11-20			
21-30			
31-40	1200		

O tempo de frenagem de cada ensaio é de aproximadamente 10 segundos. Levando em consideração a área do corpo de prova utilizado (254,5 mm<sup>2</sup>), a força normal de 600 N utilizada na maioria dos ensaios é um valor típico àquela empregada em freios a disco automotivo. O primeiro ensaio de cada conjunto de frenagens foi realizado com temperatura ambiente (aproximadamente 25 °C). Ao longo desta primeira frenagem, a temperatura do disco de freio aumentou gradativamente até um valor acima de 60 °C devido ao atrito causado entre pastilha e disco. Os demais ensaios foram realizados com esta temperatura inicial (60 °C). Em relação à rotação inicial dos ensaios, foi utilizado um valor de 1840 RPM, valor equivalente a um veículo leve se deslocando a 80 Km/h. Na 40ª frenagem optou-se por duplicar a força normal com o intuito de verificar o impacto que esta mudança ocasiona na deposição de filme sobre o disco, bem como sobre a área de contato real da pastilha. Um estudo paralelo a este, efetuado por Castel, 2015, foi realizado durante estes mesmos experimentos, no qual visou estudar, entre outros parâmetros, a temperatura radial obtida por termografia do disco de freio.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Avaliação Visual do Filme

As imagens foram agrupadas de forma a permitir uma avaliação simultânea de todos os ensaios, e estão apresentadas no Apêndice A. A Figura 5.1 ilustra uma região específica utilizada para uma primeira análise.

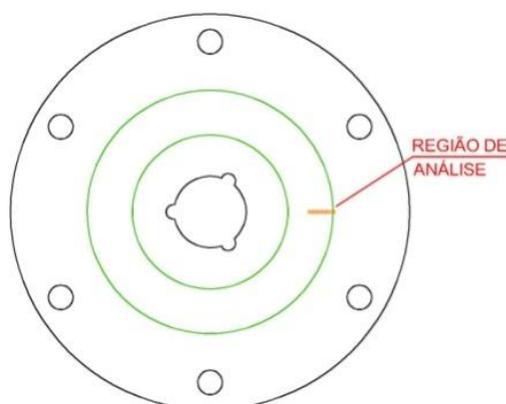


Figura 5.1 – Região de análise do disco.

Nesta região constam cinco das 15 micrografias utilizadas para a montagem do panorama geral. Esta região foi selecionada por representar o comportamento médio verificado nos demais ensaios. A Figura 5.2 ilustra imagens panorâmicas (radiais) da superfície do disco para os materiais NAO e SM, nas condições antes das frenagens (disco lixado) e após a 20ª frenagem.

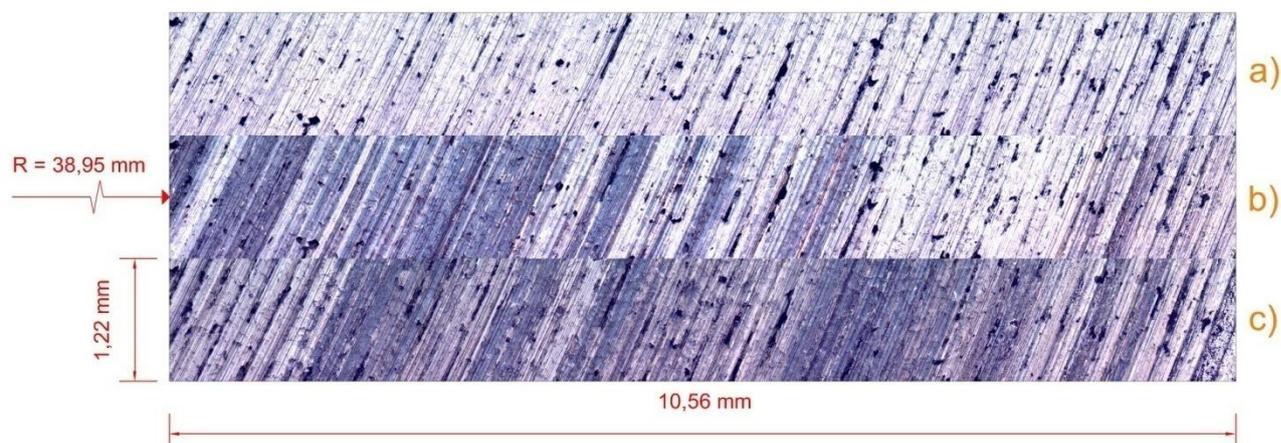


Figura 5.2 – Comparativo visual da superfície radial do disco de freio (a) antes das frenagens (disco lixado) e após, submetido a 20 frenagens com (b) pastilha NAO e (c) pastilha SM.

Percebe-se uma maior variação nas tonalidades de cor quando comparado o disco lixado com o disco atritado nos dois corpos de prova. Isso indica uma maior formação de filme ao longo das frenagens. Quando se compara a formação de filme entre o NAO e o SM, nota-se que no primeiro ocorre uma variação grande nas tonalidades ao longo do raio, enquanto o segundo apresenta uma maior homogeneidade ao longo de todo o disco.

Este padrão de variação do filme em cada pastilha se repete ao longo de todo o ensaio, conforme pode ser visto no Apêndice A. Também se pode notar que na 40ª frenagem, onde foi dobrada a força normal (de 600 N para 1200 N), o disco que sofreu frenagens com a pastilha NAO apresentou tons mais escuros do que os ensaios anteriores com a mesma pastilha,

indicando uma maior formação de filme. Por outro lado, o disco que sofreu frenagens com a pastilha SM nas mesmas condições (1200 N de força normal) apresentou tons mais claros quando comparado com as outras frenagens realizadas com a pastilha Semi-Metálica, o que indica uma remoção do filme existente no disco proveniente dos ensaios anteriores.

## 5.2 Médias e Desvios Padrão das Intensidades nas Seções

A Figura 5.3 e Figura 5.4 mostram os valores das médias das intensidades dos tons de cinza ao longo do raio do disco para os ensaios com as pastilhas NAO e SM, respectivamente.

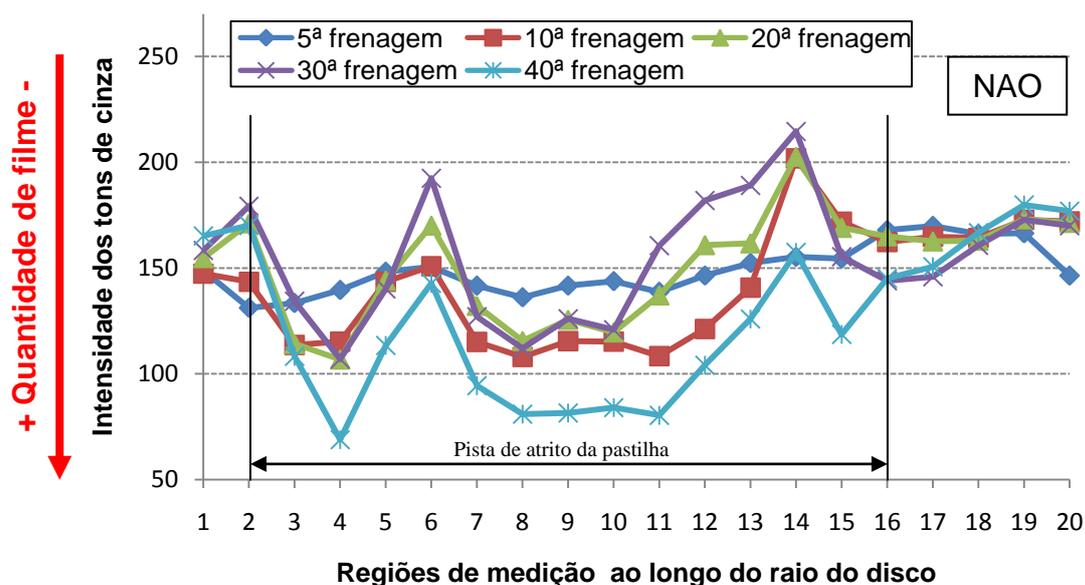


Figura 5.3 – Média dos tons de cinza no disco ao longo do raio utilizando pastilha NAO.

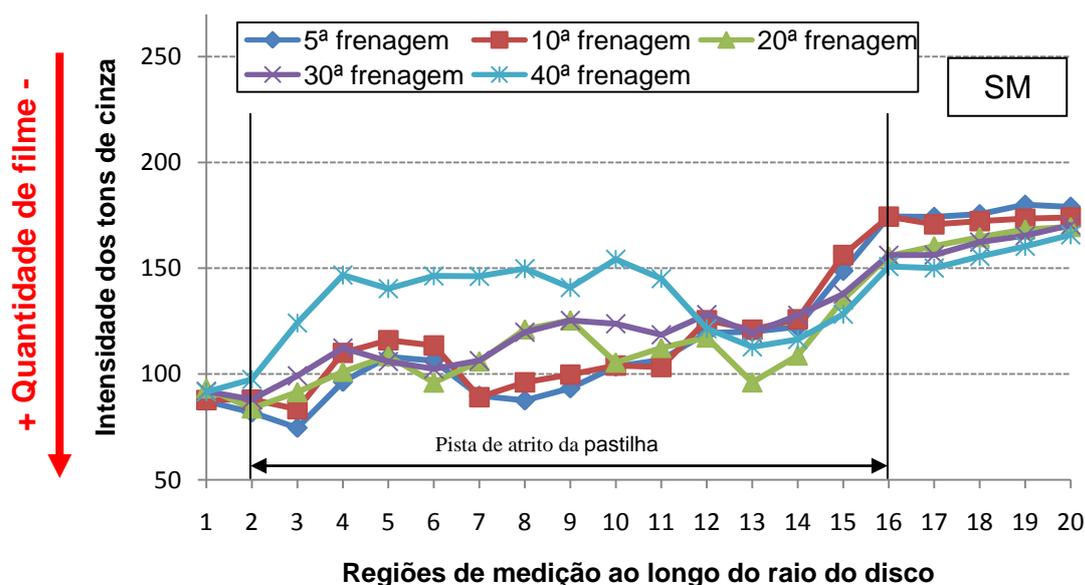


Figura 5.4 – Média dos tons de cinza no disco ao longo do raio utilizando pastilha SM.

É importante salientar que, neste método, quanto maior o valor de intensidade dos tons de cinza, menor a quantidade de filme. Percebe-se que as variações de intensidade dos tons de cinza correspondem ao esperado quando comparado aos resultados obtidos no método visual. A superfície do disco atritada com a pastilha NAO mostrou uma maior variação do filme depositado ao longo do raio, enquanto que a superfície atritada com a pastilha SM apresentou uma distribuição mais homogênea. A Tabela 5.1 abaixo mostra os valores dos desvios padrão das médias das intensidades entre os pontos 02 e 16 do disco para cada experimento.

Tabela 5.1 – Desvios padrão das médias das intensidades nas seções atritadas.

ENSAIO	DESVIOS PADRÃO DAS MÉDIAS ENTRE OS PONTOS 02 E 16	
	NAO	SM
5ª Frenagem	9,68	26,01
10ª Frenagem	27,58	25,01
20ª Frenagem	27,57	18,27
30ª Frenagem	32,78	16,79
40ª Frenagem	31,21	16,88

Nota-se que, com exceção à 5ª frenagem, os ensaios com a pastilha NAO apresentam valores de desvios padrão maiores do que aqueles comparados com o SM para o mesmo número de frenagens. Este resultado está de acordo com o método visual, indicando que os ensaios com NAO ocasionam um depósito de filme mais heterogêneo ao longo do raio do disco.

### 5.3 Análise Via Programa Computacional

A Figura 5.5 abaixo mostra o percentual de filme (percentual de pixels que se encontram entre os pixels de referência selecionados) encontrado no disco na região de atrito da pastilha ao longo dos ensaios.

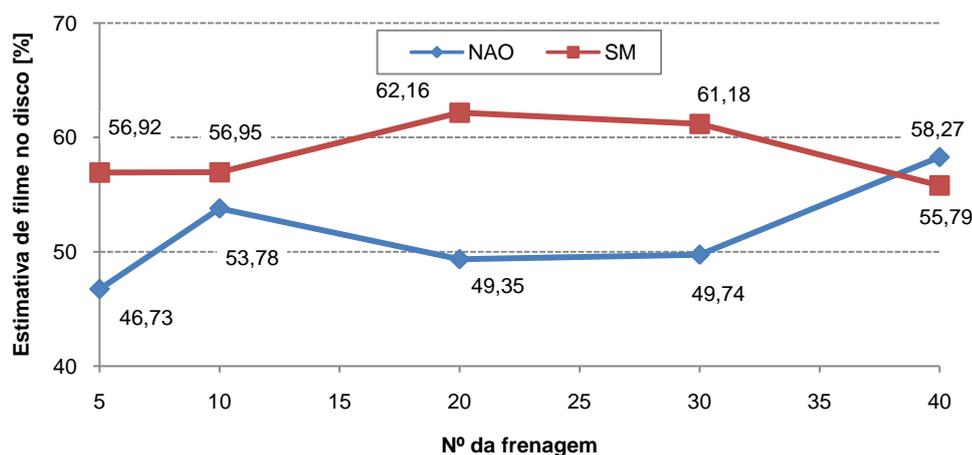


Figura 5.5 – Percentual de filme no disco.

O percentual não é um valor exato da quantidade de filme no disco, mas é um parâmetro que possibilita a comparação entre as frenagens e os materiais.

A Figura 5.6 e Figura 5.7 representam a quantidade de filme (via software) normalizado (conforme explicação no Apêndice B do presente trabalho) ao longo do raio para os ensaios com NAO e SM, respectivamente, na região atritada pela pastilha (entre 31 mm e 49 mm).

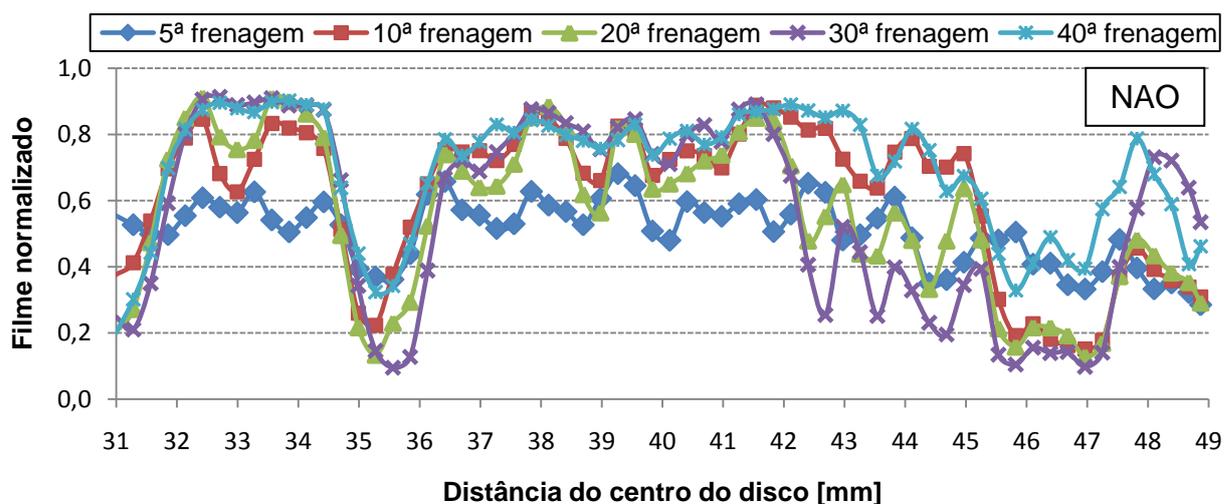


Figura 5.6 – Quantidade de filme normalizado obtido via software ao longo do raio do disco utilizando a pastilha NAO.

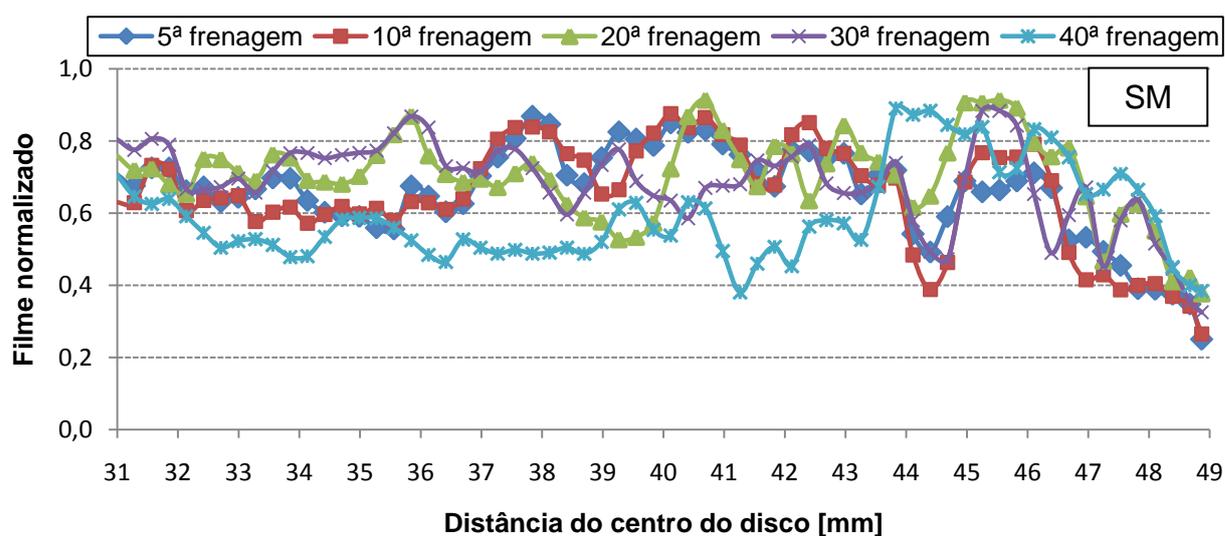


Figura 5.7 – Quantidade de filme normalizado obtido via software ao longo do raio do disco utilizando a pastilha SM.

É possível observar que o comportamento da evolução do filme encontrado neste método está de acordo com o método das médias das intensidades, bem como o método visual. Ao contrário dos experimentos com a pastilha SM, os ensaios com a pastilha NAO ocasionam uma distribuição de filme mais heterogênea ao longo do disco. A Tabela 5.2 abaixo mostra o desvio padrão do filme normalizado.

Tabela 5.2 – Desvios padrão do filme normalizado.

ENSAIO	DESVIOS PADRÃO DO FILME NORMALIZADO	
	NAO	SM
5ª Frenagem	0,10	0,13
10ª Frenagem	0,22	0,15
20ª Frenagem	0,24	0,12
30ª Frenagem	0,28	0,12
40ª Frenagem	0,19	0,13

Observa-se que o comportamento dos desvios padrão verificado por meio deste método é o mesmo que no método das médias das intensidades das seções: com exceção da 5ª frenagem, os ensaios com a pastilha NAO apresentam valores de desvios padrão maiores do que aqueles comparados com o SM para o mesmo número de frenagens.

#### 5.4 Área de Contato da Pastilha

A Figura 5.8 abaixo representa o percentual de área de contato (obtido através do Método Otsu) para os dois tipos de pastilha ao longo dos experimentos.

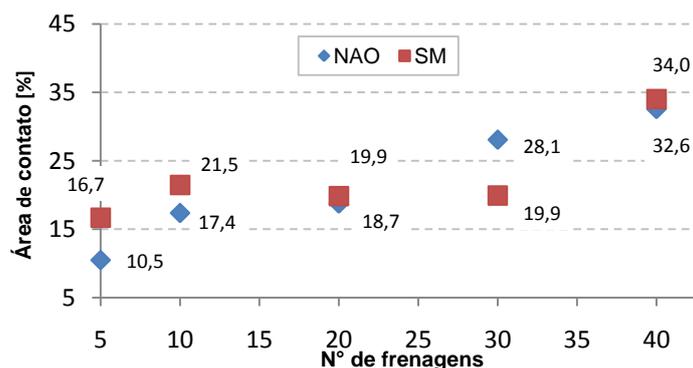


Figura 5.8 – Evolução da área de contato das pastilhas ao longo dos ensaios.

No gráfico acima nota-se que o material NAO segue uma tendência de aumentar a área de contato com o aumento do número de frenagens. O corpo de prova SM, por sua vez, apresentou uma distribuição mais uniforme da área de contato com o aumento do número de frenagens, exceto na última frenagem (40ª) em que ocorre um aumento significativo neste valor. Conforme a Tabela 4.1, esta última frenagem foi realizada com o dobro de força normal do que nos outros ensaios. Isso indica que para a pastilha Semi-Metálica, a área de contato aumenta substancialmente com o aumento da força normal.

#### 5.5 Coeficiente de Atrito

A Figura 5.9 abaixo apresenta o coeficiente de atrito obtido durante os ensaios.

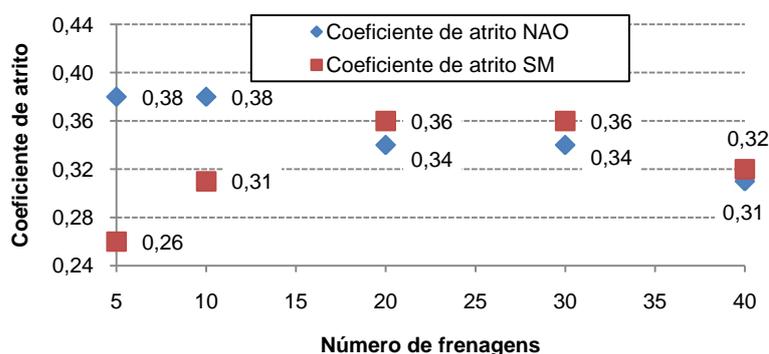


Figura 5.9 – Coeficiente de atrito ao longo dos experimentos.

O coeficiente de atrito encontrado nos ensaios da pastilha NAO diminuiu com o aumento do número de frenagens. Para os ensaios com a pastilha SM, ocorre um aumento deste coeficiente até este se estabilizar nas frenagens de número 20 e 30. Este resultado está de acordo com aquele relatado por Matozo, 2006, que constatou que o filme estabiliza o coeficiente de atrito. Na 40ª frenagem, onde a força normal foi aumentada (de 600 N para 1200

N), ocorre uma redução do coeficiente de atrito para ambas as pastilhas, fato já comprovado por outros autores.

### 5.6 Variação de Temperatura

A Figura 5.10 abaixo representa a variação de temperatura entre o início e fim de cada conjunto de ensaios.

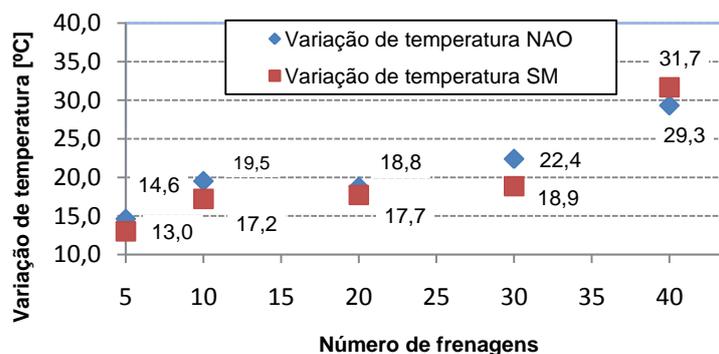


Figura 5.10 – Variação de temperatura ao longo dos experimentos.

Em geral, nota-se um aumento na variação de temperatura com o aumento do número de frenagens. Ocorre um aumento mais acentuado na 40ª frenagem para ambas as pastilhas devido à maior energia entregue (visto que há um aumento na força normal).

### 5.7 Distribuição de Temperatura Radial por Termografia

Durante a realização dos ensaios, foram levantados os valores de temperatura radial da superfície do disco através de termografia por Castel, 2015. A Figura 5.11 abaixo mostra uma comparação do filme e temperatura radial registrada por termografia para a 30ª frenagem com a pastilha SM e NAO.

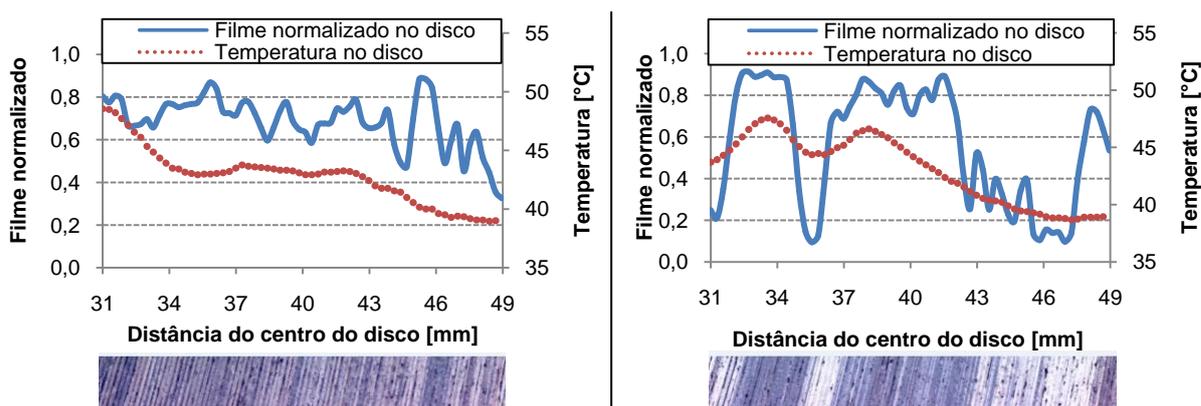


Figura 5.11 – Comparativo do filme normalizado com temperatura ao longo do raio do disco para 30ª frenagem para SM (esquerda) e NAO (direita).

### 5.8 Cruzamento dos Resultados

Uma comparação geral dos resultados obtidos nos experimentos encontra-se na tabela 5.3 abaixo.

Tabela 5.3 – Comparativo geral dos ensaios.

PARÂMETROS	FRENAGENS									
	NAO					SM				
	5ª	10ª	20ª	30ª	40ª	5ª	10ª	20ª	30ª	40ª
Força normal [N]	600	600	600	600	1200	600	600	600	600	1200
Filme no disco [%]	46,73	53,78	49,35	49,74	58,27	56,92	56,95	62,16	61,18	55,79
Desvio Padrão das Intensidades	10,33	29,30	24,80	31,52	28,64	29,16	27,92	20,51	16,96	14,08
Área de contato da pastilha [%]	10,47	17,37	18,74	28,08	32,56	16,69	21,47	19,85	19,94	34,04
Coefficiente de atrito	0,38	0,38	0,34	0,34	0,31	0,26	0,31	0,36	0,36	0,32
Varição de temperatura [°C]	14,6	19,5	18,8	22,4	29,3	13,0	17,2	17,7	18,9	31,7

A Tabela 5.4 mostra a correlação entre filme depositado e temperatura radial no disco obtida por termografia.

Tabela 5.4 – Correlação entre depósito de filme e temperatura radial do disco.

FRENAGEM	CORRELAÇÃO				
	5ª	10ª	20ª	30ª	40ª
NAO	0,66	0,61	0,59	0,63	0,56
SM	0,53	0,47	0,23	0,48	-0,32

Em geral, percebe-se que há uma correlação moderada entre depósito de filme e temperatura ao longo do raio, ou seja, em regiões onde há maior depósito de filme, há um valor maior de temperatura. Na 40ª frenagem para o material SM não foi observada esta correlação.

## 6. CONCLUSÕES

Neste estudo, dois métodos se mostraram adequados para quantificar o filme sobre o disco: (i) método das médias e desvios padrão das intensidades e (ii) método via software. Ambos levaram a resultados semelhantes com os obtidos por meio de análise visual. Os experimentos com NAO mostraram uma distribuição mais heterogênea de filme ao longo do raio do disco, enquanto que os ensaios com SM mostraram uma distribuição mais uniforme. Foi observado que, com o aumento da força normal, os ensaios com NAO levaram a um aumento na quantidade de filme depositado, enquanto que para os experimentos com SM esta quantidade de filme foi reduzida. Em geral, foi observada uma correlação moderada entre depósito de filme e temperatura obtida por termografia ao longo do raio do disco. Esta correlação não foi observada na 40ª frenagem para os ensaios com a pastilha SM.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adobe; **“Photoshop/Modos de Cores”**. Disponível em: <<https://helpx.adobe.com/br/photoshop>>, acesso em 22/04/2015.

Albuquerque, C. F. et al.; **“O Livro do Automóvel”**, Reader’s Digest, 1976.

Butt, H. J.; Graf, K.; Kappl, M.; **“Physics and Chemistry of Interfaces”**, 2003.

Cappellaro, J.; **“Caracterização da Superfície de Materiais de Fricção”**, 2014.

Castel, E. A. S. D.; **“Análise de Distribuição Radial de Temperatura Em Um Disco de Freio Através de Termografia”**, 2015.

Eriksson, M.; Bergman, F.; Jacobson, S.; **“On the Nature of Tribological Contact in Automotive Brakes”**, 2002.

Eriksson, M.; **“Friction and Contact Phenomena of Disc Brakes Related to Squeal”**, 2000.

Jang, H.; Ko, K.; Kim, S. J.; Basch, R. H.; Fash, J. W.; **“The Effect of Metal Fibers on the Friction Performance of Automotive Brake Friction Materials”**, 2003.

Matozo, L. T.; **“Análise de Materiais de Fundo de Alto Amortecimento e de Seus Efeitos em Pastilhas de Freio”**, 2006.

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

Neis, P. D.; **“Projeto e Construção de um Tribômetro com Controle Independente da Temperatura do Disco”**, 2012.

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

Österle, W.; Urban, I.; **“Third Body Formation on Brake Pads and Rotors”**, 2006.

Radi, P. A.; Santos, L. V.; Bonetti, L. F.; Airoldi, V. J.; **“Tribologia, Conceitos e Aplicações”**, 2007.

Seixas, F. L.; **“Avaliação dos Métodos Para a Segmentação Automática dos Tecidos do Encéfalo em Ressonância Magnética”**, 2008.

## ANEXO A – INCERTEZAS

No tribômetro do LATRIB, o coeficiente de atrito ( $\mu$ ) é determinado através da Equação A.1 abaixo.

$$\mu = \frac{T}{F_N R} \quad (\text{A.1})$$

Onde  $R$  é o raio de deslizamento (ou raio efetivo) [m],  $F_N$  é a força normal [N] de acionamento do corpo de prova (pastilha) e  $T$  é o torque frenante do eixo [Nm] do motor.

A incerteza deste coeficiente é obtida por medição indireta das variáveis, ou seja, através das incertezas do torque, força normal e raio de deslizamento [Neis, 2012].

### A.1 Incerteza do Torque e da Força Normal

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

### A.2 Incerteza do Raio de Deslizamento

O ajuste do raio de deslizamento é realizado através de um fuso e manivela. A leitura é feita através de um paquímetro digital. Segundo o fabricante, a repetitividade deste equipamento é de  $\pm 10$   $\mu\text{m}$ . Para uma análise conservativa, Neis, 2012, considerou uma incerteza de medição de  $\pm 17,8$   $\mu\text{m}$ , valor este encontrado em paquímetros mecânicos.

### A.3 Incerteza do Coeficiente de Atrito

Para o cálculo da incerteza do coeficiente de atrito foi utilizada uma relação que combina todas as grandezas envolvidas. Esta relação é aplicada para determinar a incerteza combinada quando estão envolvidas grandezas dependentes e independentes ao mesmo tempo. Para a faixa de operação utilizada nos ensaios deste trabalho, a incerteza de medição do coeficiente de atrito é inferior a  $\pm 3\%$ .

### A.4 Incerteza do Termopar

Os experimentos foram realizados utilizando um termopar tipo K, instalado no interior do disco de freio. A incerteza desta grandeza é determinada através da Equação A.2, na qual combina as incertezas individuais do termopar, condicionador de sinal e sistema de aquisição de dados.

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

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

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

## APÊNDICE A - Microscopias do disco e das pastilhas

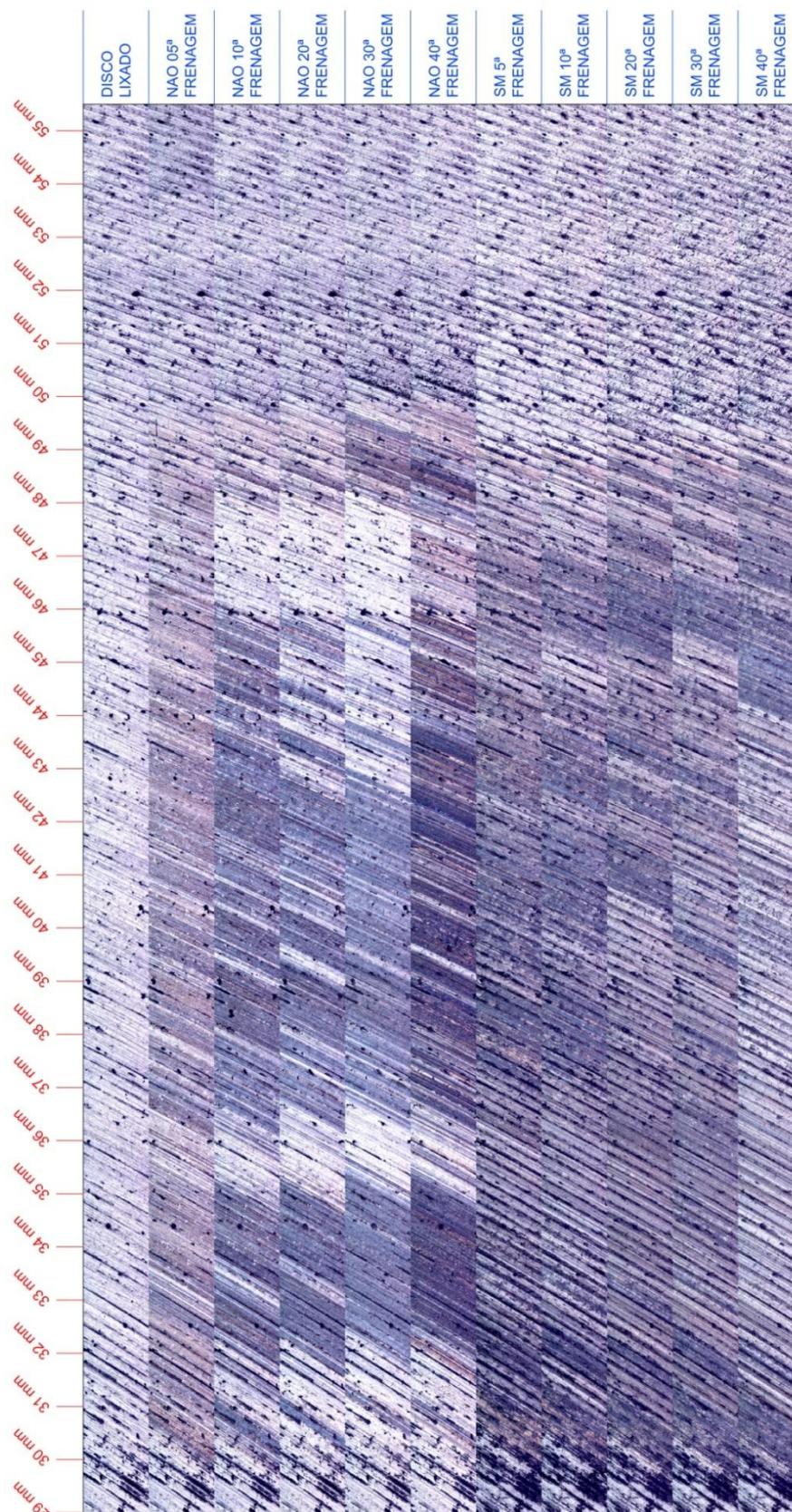


Figura A.1 – Microscopias do disco de freio ao longo dos ensaios (Aumento de 50x das micrografias).

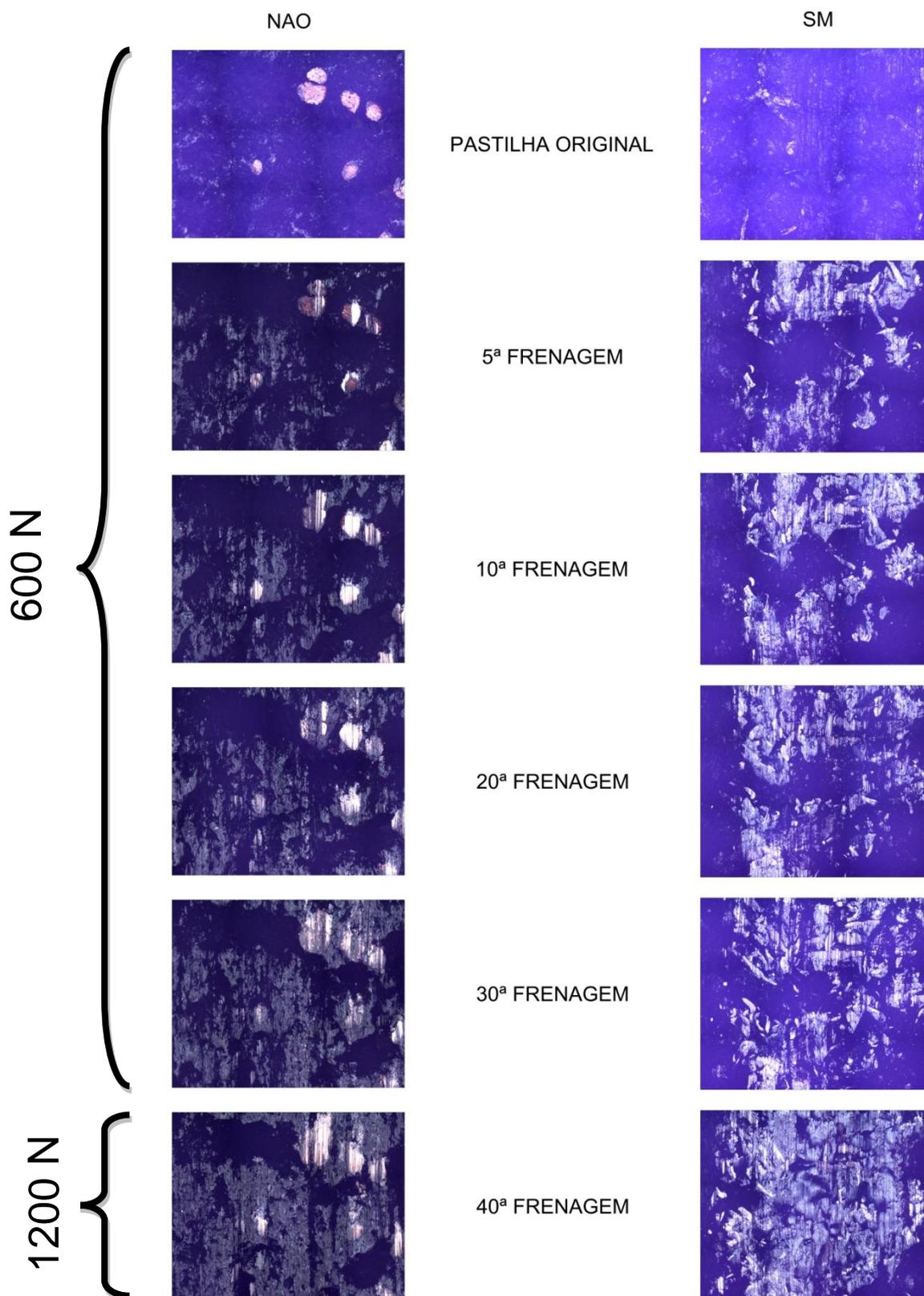


Figura A.2 – Microscopias das pastilhas de freio ao longo dos ensaios com aumento de 50x das micrografias.

## APÊNDICE B – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO SOFTWARE NO DISCO

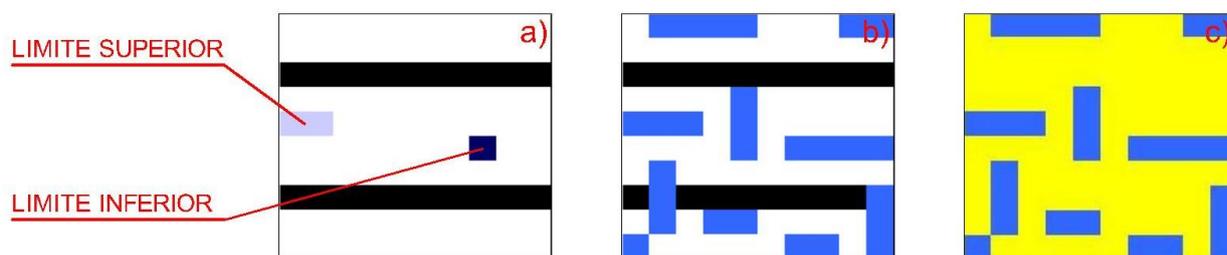


Figura B.1 – Sequência de funcionamento do software: a) Imagem com seleção de pixels de referência; b) Imagem a ser analisada; c) Processamento da imagem pelo software.

A Figura B.1 a) mostra os dois pixels de referência seleccionados. O programa então registra o número de pixels detectados com presença de filme ao longo de linhas verticais (colunas), conforme exemplifica a Figura B.2 abaixo.

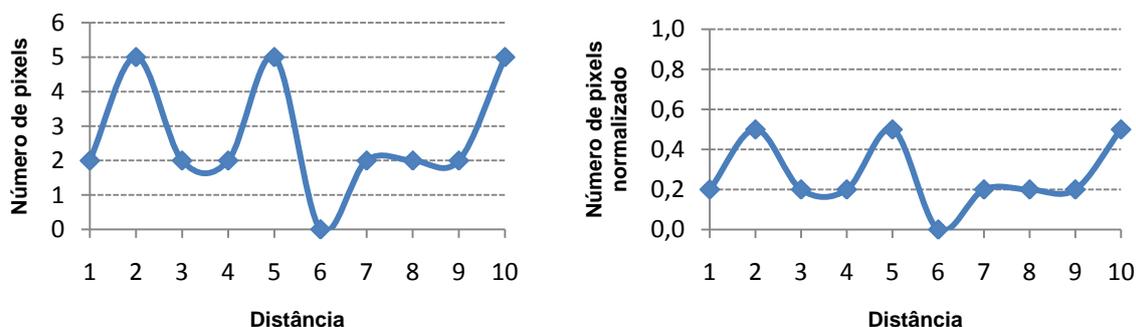


Figura B.2 – Número de pixels por coluna: em dados brutos (esquerda) e normalizados (direita).

O eixo horizontal representa a largura da imagem. Nos experimentos deste trabalho, esta largura representa a distância radial do disco entre o início e fim da região atritada pela pastilha. No eixo vertical um valor normalizado é utilizado para o número de pixels com filme, ou seja, um valor que varia de 0 (nenhum pixel na coluna foi classificado como filme) até 1 (todos os pixels da coluna analisada foram classificados como filme). Na Figura B.3 e Figura B.4 abaixo encontra-se um exemplo de aplicação deste método em uma micrografia do disco de freio.

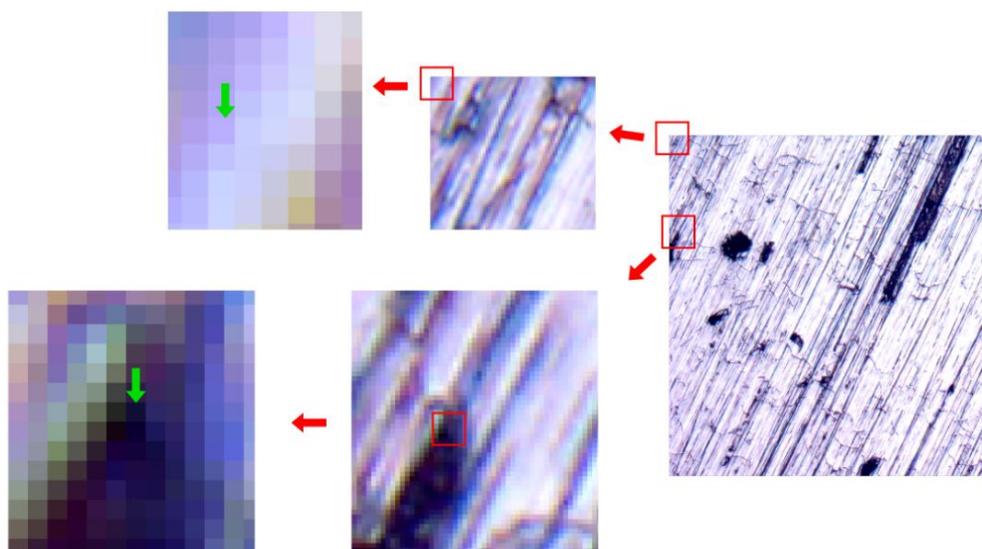


Figura B.3 – Seleção dos pixels de referência no disco lixado. As setas em verde indicam os pixels escolhidos como sendo os limites superior (região clara) e inferior (região escura).

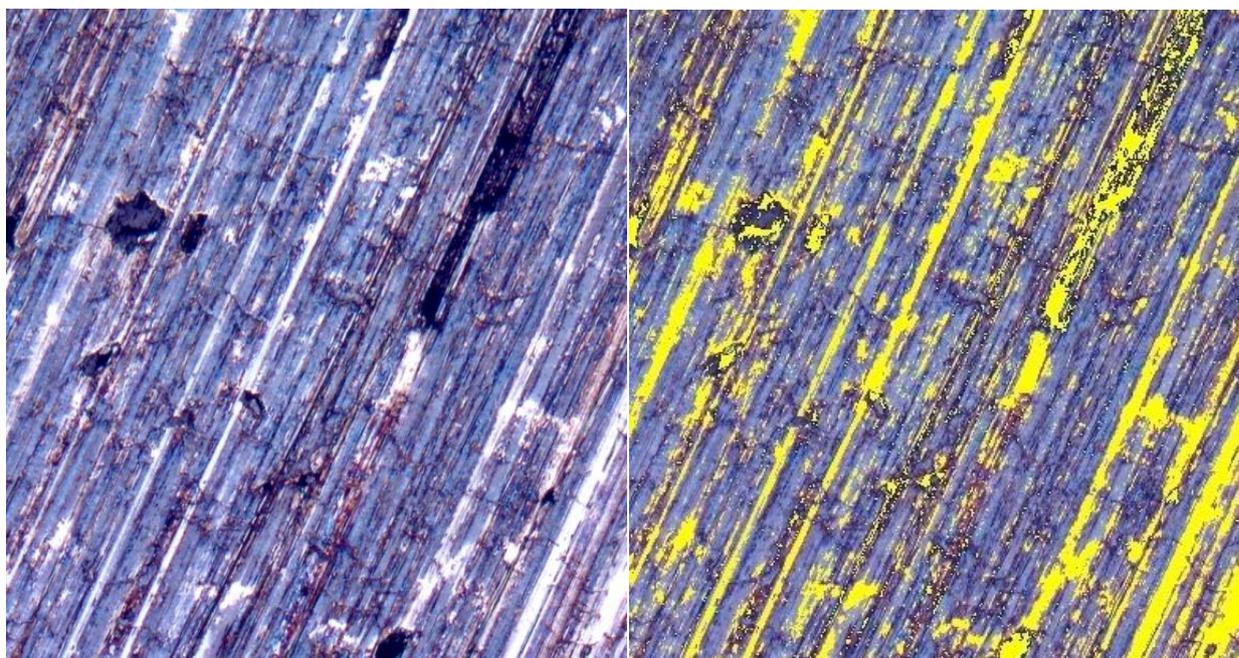


Figura B.4 – Exemplo de funcionamento do software no disco: Imagem a ser analisada com aumento de 50x das micrografias (esquerda); Processamento da imagem (direita).