

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

AVALIAÇÃO DA FORMAÇÃO DE FILME EM DISCO DE FREIO AUTOMOTIVO DURANTE AS
FRENAGENS

por

Denilson Longen Junior

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 2019.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

AVALIAÇÃO DA FORMAÇÃO DE FILME EM DISCO DE FREIO AUTOMOTIVO DURANTE AS
FRENAGENS

por

Denilson Longen Junior

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^a. Dr. Mario Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Prof. Dr. Fabiano Disconzi Wildner

Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Porto Alegre, 12 de julho de 2019.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

À minha família, especialmente aos meus pais Denílson e Eloisa, pela educação, carinho e apoio que sempre me proporcionaram. A minha irmã Morgana Luísa Longen e a minha namorada Marina Valente pela ajuda nos momentos difíceis.

Aos professores Patric Daniel Neis e Ney Francisco Ferreira. Obrigado pela ajuda, ensinamentos ao longo do curso e por serem exemplos como profissionais e pesquisadores.

À equipe do LATRIB, pelo auxílio técnico e pelo apoio, em especial ao Matheus Fernandes e Carol Pandolfo, pelo companheirismo durante os ensaios necessários para este trabalho.

Aos amigos que a vida me proporcionou durante essa caminhada.

JUNIOR, D.L. **Avaliação Formação de Filme em Discos de Freio Automotivo Durante as Frenagens**. 2019. 23 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho é analisar a influência dos parâmetros operacionais de força normal, velocidade de rotação e temperatura na formação de um terceiro corpo (ou filme) sobre o disco de freio automotivo em ensaios de frenagem laboratoriais. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tribologia (LATRIB) da UFRGS. Para o estudo, foi utilizada uma pastilha e um disco de ferro fundido cinzento. Dessa forma, buscou-se desenvolver, através de fotos da superfície do disco após cada frenagem, uma metodologia capaz de avaliar e quantificar o filme que foi depositado sobre a superfície do mesmo. Assim, foi possível observar a evolução do terceiro corpo ao longo dos ensaios para as diferentes combinações dos parâmetros predeterminados. Como resultado, pode-se concluir que o aumento da temperatura possui a maior influência na formação do filme, visto que, houve uma maior formação de filme homogêneo para a temperatura mais elevada (de 250°C). Já para os outros parâmetros, a influência teve uma menor relevância e os resultados são discutidos ao longo do trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: Terceiro corpo, tribologia, pastilha Semi-Metálica.

JUNIOR, D.L. **Evaluation of the Film Formation on Automotive Brake Discs during Brakings**. 2019. 23 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

ABSTRACT

The main objective of this work is to analyze the influence of the parameters of normal force, speed and temperature on the formation of a third body (or film) on the automotive brake disc in laboratory braking tests. The tests were carried out at the Tribology Laboratory (LATRIB) at UFRGS. For the study, a Semi-Metallic brake pad (SM) and a gray cast iron disc were used. In this way, through photos of the disk surface for each braking, it was tried to develop a methodology capable of evaluating and quantifying the film that was deposited on the surface of the brake. Thus, it was possible to observe the evolution of the third body throughout the tests for the different combinations of the predetermined parameters. As a result, it can be concluded that the increase in temperature has the greatest influence on the formation of the film, since there was a higher formation of homogeneous film at the highest temperature (250°C) for the Semi-Metallic brake pad. For the other parameters, the influence was less relevant and the results are going to be discussed throughout the work.

KEYWORDS: Third body, tribology, Semi-Metallic brake pad.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
2.1 Objetivo Geral	1
2.2 Objetivos Específicos	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3.1 Atrito	2
3.2 Sistema de Freios Veiculares	2
3.3 Material de Fricção	2
3.4 Área de Contato	2
3.5 Terceiro Corpo	3
3.6 Tribômetro	3
4. METODOLOGIA	3
4.1 Parâmetros dos Ensaios	3
4.2 Tribômetro do Laboratório de Tribologia	4
4.3 Corpo de Prova	5
4.4 Disco de Freio	5
4.5 Obtenção das Imagens da Superfície do Disco	5
4.6 Método de quantificação do Terceiro Corpo	6
4.6.1 Programa para Obtenção das Médias e Desvio Padrão do Filme	6
4.7 Média Acumulada de Filme	6
4.8 Equacionamento Matemático	7
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	8
5.1 Resultados Experimentais	8
5.2 Relação Força e Velocidade	9
6. CONCLUSÕES	11
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	11
ANEXO A – INCERTEZAS	13
APÊNDICE A – Imagens obtidas durante as frenagens	14
APÊNDICE B - Superfícies obtidas com a média acumulada de filme	15

1. INTRODUÇÃO

O funcionamento de um freio automotivo consiste na pressão de um fluido que chega aos cilindros da roda e pinças, onde a lona ou pastilha é pressionada contra a superfície do disco ou tambor. Para Rhee, Jacko e Tsang, 1991, um sistema de freio a disco consiste em um rotor, um par de pastilhas para fricção e um mecanismo para pressionar as pastilhas contra o rotor, que irá absorver a energia cinética de um veículo na desaceleração. O atrito é o principal responsável pela diminuição da velocidade e parada de veículo [Nakata, 2015]. Devido ao contato entre disco e pastilha, ocorre desgaste das partes. Com base nisso, Cho, et al, 2005, observaram que a formação do terceiro corpo era capaz de reduzir a fricção e o desgaste no disco durante frenagens. Dessa forma, este trabalho tem como particularidade estudar a formação e o desenvolvimento do terceiro corpo (ou filme), assunto que não está totalmente entendido. Contudo, entende-se que o filme é formado pela adesão, compactação de detritos e lubrificantes sólidos [Cho, 2005]. Segundo Österle e Urban, 2006, o terceiro corpo é formado principalmente por lubrificantes sólidos que estão presentes na pastilha do freio. Além disso, sabe-se que o filme tem um papel muito importante no desempenho do freio, pois o seu aumento na superfície do disco proporciona uma redução no coeficiente de atrito, no desgaste do material e na amplitude das oscilações do atrito durante a frenagem [Cho, 2005]. Ainda assim, existem muitas perguntas a serem respondidas sobre a estrutura e o papel do filme na frenagem [Österle e Urban, 2006], bem como na forma como esse se desenvolve ao longo das frenagens e quais são os parâmetros que propiciam a sua geração e evolução. Diante disso, o presente trabalho busca encontrar os parâmetros que influenciam no desenvolvimento do terceiro corpo sobre a superfície do disco, para dessa maneira, compreender formas de controlar seu desenvolvimento. Espera-se com este trabalho proporcionar conhecimento para desenvolver discos e pastilhas com coeficiente de atrito mais estável, com menor ruído e com maior durabilidade, devido ao menor desgaste dos componentes durante a operação de frenagem.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo estudar a formação e desenvolvimento de filme na superfície de um disco de freio, relacionando-o com três outros parâmetros (temperatura, força normal e rotação) utilizados durante frenagens realizadas em um tribômetro.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar ensaios de frenagem no tribômetro;
- Capturar imagens do disco de freio ao longo de cada frenagem;
- Analisar as imagens, através de um programa em MatLab, para verificar a quantidade de filme depositado na superfície do disco após cada frenagem;
- Investigar qual a influência dos parâmetros na formação e na distribuição do filme na superfície do disco;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Atrito

A força interativa entre superfícies que restringem o movimento é denominada de força atrito, o qual se divide em atrito estático e atrito dinâmico [Butt, et al., 2003]. Segundo Bhushan, 2013, o coeficiente de atrito estático está relacionado com a força necessária para que se inicie o movimento relativo entre superfícies que estão em contato. Quando as superfícies em contato já possuem velocidade relativa, atribui-se a denominação de atrito dinâmico à resistência desse movimento.

3.2 Sistema de Freios Veiculares

O freio automotivo tem com principal função transmitir a força aplicada pelo motorista no pedal até o freio, produzindo o atrito necessário para que o veículo desacelere [Puhn, 1987]. Dessa forma, a força gerada pelo atrito que desacelera o veículo é a transformação de energia cinética em energia térmica [Albuquerque, et al, 1976], vibração e ruído [Matozo, 2006].

O funcionamento do sistema de freio consiste no contato de uma superfície fixa (pastilha ou lona) e um elemento rotativo (disco ou tambor) que fica preso à roda. O material de fricção é pressionado contra o disco através de uma pinça ou sapata [Albuquerque, et al, 1976; Rhee, et al, 1991].

3.3 Material de Fricção

A classificação das pastilhas de freio divide-se em dois grupos: Semi-Metálicas e Non Asbestos Organic [Matozo, 2006].

Semi-Metálicas (SM): Possuem um coeficiente de atrito entre disco e pastilha mais elevado, devido ao seu percentual elevado de metais ferrosos. Apresentam resistência ao desgaste e suportam altas temperaturas. Muito utilizadas na Europa.

Non Asbestos Organic (NAO): Não apresentam metais ferrosos em sua composição, os quais, são substituídos pelo aumento do percentual de cobre e aramida. São mais macias, se comparadas às Semi-Metálicas, e devido a isso apresentam um coeficiente de atrito mais baixo, o que também reduz o desgaste no disco.

3.4 Área de Contato

As pastilhas de freio são constituídas por materiais com diferentes propriedades. Resinas e lubrificantes sólidos apresentam uma dureza baixa (próximo de 200 MPa), enquanto as fibras abrasivas podem apresentar elevada dureza (até 20 GPa). Com isso, o desgaste distribuído durante as frenagens torna-se desigual e a compactação dos detritos resulta em uma superfície denominada de platôs [Eriksson, 2000].

De acordo com Eriksson, 2000, os platôs são classificados em primários e secundários. Os platôs primários apresentam uma menor taxa de remoção, pois possuem em sua composição partículas com maior resistência ao desgaste. Entretanto, algumas partículas com uma menor resistência (ou menor dureza) acabam sofrendo “arrancamento” da superfície do disco e da própria pastilha. Com isso, esses detritos mais macios podem levar ao surgimento dos platôs secundários, devido à compactação e aglomeração dos mesmos, ou na formação do terceiro corpo. A Figura 3.1 ilustra esquematicamente a superfície de contato.

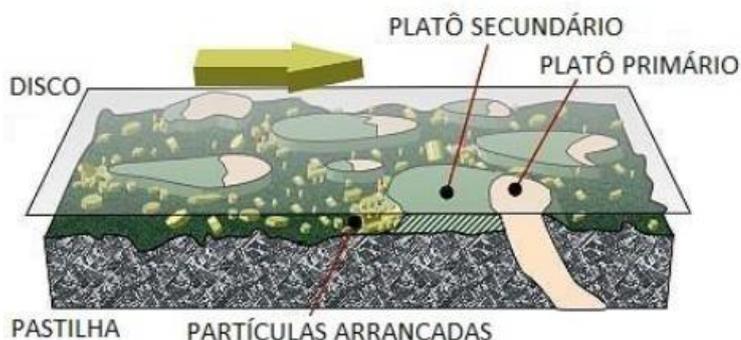


Figura 3.1 - Esquema da situação de contato disco de freio/pastilha envolvendo o contato com os platôs primário e secundário [adaptado: Eriksson, 2000].

3.5 Terceiro Corpo

O estudo sobre o terceiro corpo foi introduzido por Godet em 1970. Godet evidenciou que a formação de um filme no disco, durante as frenagens, propiciava a separação dos dois primeiros corpos (disco e pastilha) evitando, assim, a adesão e a micro-soldagem de constituintes metálicos entre as partes. Esse filme Godet denominou de terceiro corpo [Österle, et al, 2009].

Para Österle, et al, 2009, o filme é composto por uma mistura de componentes da pastilha e do disco que é produzida durante as frenagens pela compactação de detritos, os quais se prendem à superfície do disco. Basicamente, o filme é constituído por óxido de ferro, carbono e cobre. Da mesma forma, Cho, et al, 2005, definiu a composição do filme como a compactação e adesão dos detritos e lubrificantes sólidos presentes no material de fricção.

A formação do terceiro corpo na superfície do disco tem como benefícios, uma grande influência na redução do atrito e, conseqüentemente, no desgaste dos componentes de fricção [Cho, et al, 2005]. Para Matozo, 2006, o terceiro corpo conserva a integridade do disco de freio. Dessa forma, não há dúvida que o bom desempenho do atrito, atrelado a um coeficiente estável, depende da formação do filme [Österle e Urban, 2006; Österle et al, 2009]. Junto a isso, o filme também apresenta um papel importante no desempenho da pastilha [Rhee, et al, 1991, Vicente, 2016].

3.6 Tribômetro

Tribômetros são equipamentos utilizados em testes de atrito e desgaste de materiais [Desplanques, 2006]. Amplamente utilizados como ferramentas de apoio a pesquisas para o entendimento de fenômenos tribológicos, o que é muito importante para o desenvolvimento de novas tecnologias e análise do tempo de vida de materiais de fricção [Neis, 2008].

4. METODOLOGIA

4.1 Parâmetros dos Ensaios

A Tabela 4.1 exhibe os parâmetros foram adotados no tribômetro para a realização dos ensaios de formação do terceiro corpo.

Tabela 4.1 - Parâmetros adotados nos ensaios.

Temperatura [°C]	Força [N]	Rotação [RPM]	Frenagens
80/250	150	500/1000/1500	100
	450	500/1000/1500	
	750	500/1000/1500	

Antes do primeiro ensaio foram realizadas 100 frenagens a uma temperatura de 240°C para assentar a pastilha de freio sobre o disco. O tempo aproximado de duração de cada frenagem foi 6 s, sendo realizadas 100 frenagens para cada mudança de parâmetro da Tabela 4.1, totalizando 1900 frenagens no estudo, se considerar a etapa de assentamento. Antes do início de cada condição, o disco foi lixado. No primeiro ensaio, a temperatura utilizada foi de 80°C, com uma força de 150 N e uma rotação de 500 RPM, após foram realizados os ensaios com as velocidades de 1000 RPM e 1500 RPM para essa força. Para as forças de 450 N e 750 N também foi realizado frenagens para as três velocidades (500 RPM, 1000 RPM e 1500 RPM). Finalizado os ensaios com a temperatura de 80°C, repetiram-se os ensaios para uma temperatura de 250°C.

4.2 Tribômetro do Laboratório de Tribologia

Para a realização dos ensaios de frenagens do trabalho foi utilizado o tribômetro tipo pino sobre disco do Laboratório de Tribologia (LATRIB) da UFRGS. No tribômetro foi montado o disco, a câmera e o aquecedor indutivo ilustrados na Figura 4.1.

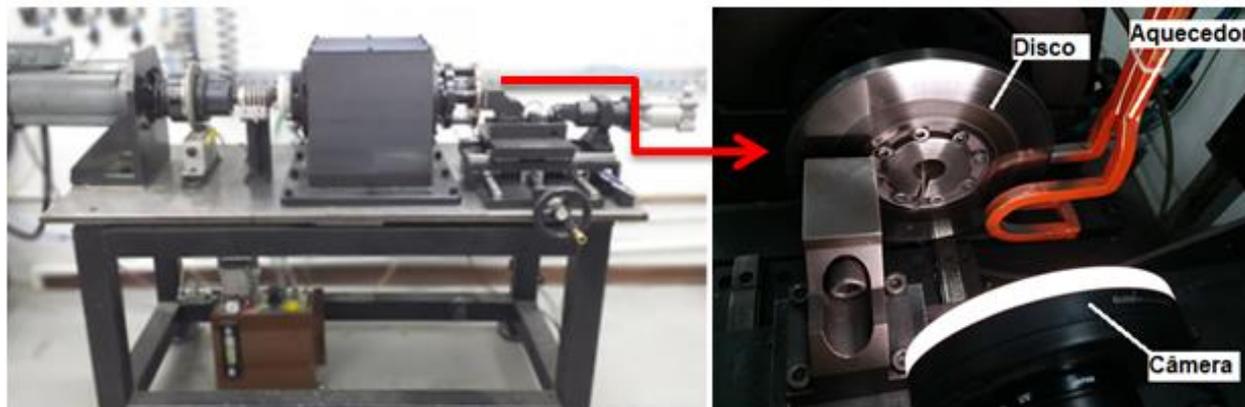


Figura 4.1 - Tribômetro e componentes do LATRIB – UFRGS [Adaptado: Pavlak et al., 2017].

No tribômetro, o coeficiente de atrito é uma relação entre o torque, força normal e o raio de deslizamento (distância entre a amostra e o centro do disco). Essa relação é representada pela Equação 4.1 abaixo:

$$\mu = \frac{T}{RF_N} \quad (4.1)$$

Onde μ é o coeficiente de atrito [adimensional], T é o torque medido pelo tribômetro [N.m], R é o raio de deslizamento [m] e F_N é a força normal aplicada [N]. O raio de deslizamento utilizado nos ensaios foi de 0,05m. As incertezas do equipamento se encontram no Anexo A.

4.3 Corpo de Prova

No estudo, utilizou-se uma pastilha Semi-Metálica (SM) para todas as frenagens. A mesma possui um diâmetro 0,015m e área de contato da pastilha de 176 mm². Esse corpo de prova tem como característica apresentar maior quantidade de materiais ferrosos na sua composição e, com isso, ter um coeficiente de atrito maior. Na Tabela 4.2 está descrita a composição pastilha e a na Figura 4.2 está representada a geometria do corpo de prova.



Figura 4.2 - Corpo de prova utilizado no ensaio.

Tabela 4.2 - Composição da pastilha

<u>Categoria</u>	<u>Volume</u> <u>[%]</u>
Aglutinantes	30
Abrasivos	5
Lubrificantes	28
Fibras	22
Enchimentos	15

4.4 Disco de Freio

Na realização dos ensaios, utilizou-se um disco de freio de ferro fundido cinzento, material empregado normalmente em discos e tambores automotivos. O disco foi lixado para remover o filme produzido e manter uma rugosidade padrão na superfície do disco, de aproximadamente 0,2 µm, para cada novo teste. As seguintes granulações de lixas foram aplicadas: 80, 100, 180, 320, 500, 600, 1200, 1500 e 2000, nessa ordem, antes de iniciar o ensaio de cada parâmetro.

4.5 Obtenção das Imagens da Superfície do Disco

As fotos da superfície do disco, após cada frenagem, foram feitas utilizando uma câmera de um microscópio ZEISS AxioCam ERc 5s combinada a uma lente Nikon Af Nikkor 35-80 mm para capturar imagens detalhadas e com alta qualidade. O tempo de exposição para cada foto foi de 15 segundos e o conjunto câmera e lente foram fixados ao tribômetro com auxílio de um suporte.

4.6 Método de quantificação do Terceiro Corpo

Tendo em vista que a formação de filme na superfície do disco pode ter diferentes intensidades e distribuições, buscou-se um método que pudessem distinguir um filme bem desenvolvido e homogêaneamente distribuído sobre a superfície do disco. Para isso, o método descrito abaixo foi utilizado na análise de formação do filme.

4.6.1 Programa para Obtenção das Médias e Desvio Padrão do Filme

Através do Programa para Obtenção das Médias e Desvio Padrão do Filme, foi possível obter as médias e o desvio padrão do filme depositado para cada frenagem. O programa foi desenvolvido pela equipe do LATRIB no software MATLAB® (MathWorks) e seu funcionamento consiste em analisar os tons de cinza dos pixels, que possui uma escala de 0 (preto) a 255 (branco), das fotos tiradas após as frenagens. Para o software realizar a análise é necessário delimitar fronteiras da imagem, conforme Figura 4.3. Essa delimitação de fronteira é importante para excluir da análise pontos da imagem que não tiveram contato com a pastilha durante as frenagens. Assim, só serão analisados os pixels que estiverem dentro da fronteira, ou seja, que tiveram contato com a pastilha de freio durante as frenagens. A referência para as fronteiras é mantida fixa para todas as imagens da superfície do disco, visto que todos os componentes foram mantidos nas mesmas condições para todos os ensaios. Após a criação das fronteiras o MatLab faz a verificação de todas as imagens e no fim novas fotos com o histograma de intensidade da cor cinza de cada imagem são geradas, junto com os arquivos de texto contendo as médias de filme, desvio padrão e intensidade de cores de cada foto.

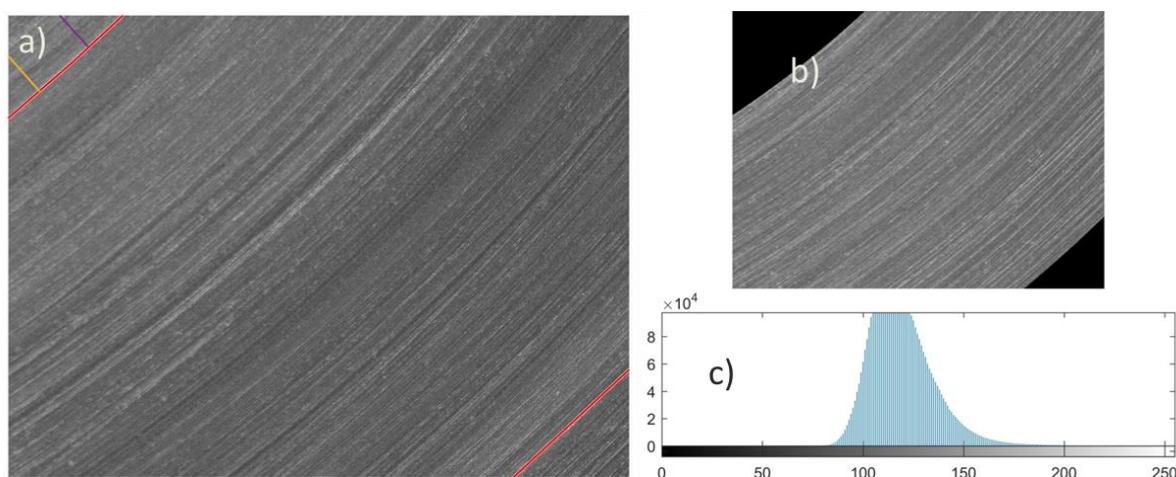


Figura 4.3 - Funcionamento do programa de processamento de imagens; (a) eliminação da fronteira da imagem, (b) imagem contendo apenas área útil para processamento e c) histograma da distribuição de tons de cinza.

4.7 Média Acumulada de Filme

Os valores processados pelo programa em MatLab são gerados em ordem inversa para a quantidade de filme, ou seja, quanto menor o valor da média, que varia de 0 (para superfície totalmente preta) a 255 (para superfície totalmente branca), maior é a quantidade de filme depositado sobre a superfície disco. Para tornar os gráficos mais intuitivos criou-se a média acumulada, a qual se obtém através da subtração da média de referência inicial, média dos tons de cinza após o lixamento da superfície (aproximadamente 124), da média dos tons de cinza após cada frenagem.

Os valores processados pelo programa em MatLab são gerados em ordem inversa para a quantidade de filme, ou seja, quanto menor o valor da média, que varia de 0 (para superfície totalmente preta) a 255 (para superfície totalmente branca), maior é a quantidade de filme depositado sobre a superfície disco. Para tornar os gráficos mais intuitivos, inverteu-se o sentido, ou seja, quanto maior o valor no eixo Y, maior a quantidade de filme. Para essa inversão, o valor processado pelo programa após a superfície ser lixada foi considerado como a condição inicial, sendo esse, então subtraído do valor médio de filme após cada frenagem. Com isso, as frenagens que possuem médias menores que a média inicial (após lixamento) passaram a ter um valor médio de filme acumulado positivo. Já para as médias maiores ou iguais a média inicial, o valor do filme acumulado será negativo ou zero. Entretanto, valores negativos significa que a superfície está mais clara que a superfície inicial (lixada), assim, podemos considerar como zero a sua média acumulada também.

4.8 Equacionamento Matemático

Através de um programa de regressão quadrática desenvolvido em MatLab, tendo como dados a força, velocidade, temperatura e a média acumulada da quantidade de filme da última frenagem de cada ensaio, obteve-se uma equação matemática representada pela Equação 4.2.

$$filme(F,V) = C0 + C1 \cdot F + C2 \cdot V + C3 \cdot F^2 + C4 \cdot F \cdot V + C5 \cdot V^2 \quad 4.2$$

As variáveis $C0$, $C1$, $C2$, $C3$, $C4$ e $C5$ são constantes que variam conforme a temperatura. Já as variáveis F e V , representam a força [N] e a velocidade [RPM], respectivamente, analisadas. Abaixo estão listadas, na Tabela 5.3, as constantes da equação.

Tabela 5.3 - Constantes para as diferentes temperaturas.

<u>Constantes</u>	<u>80°C</u>	<u>250°C</u>
$C0$	- 42.84	7.742
$C1$	0.04458	0.104
$C2$	0.1009	0.04177
$C3$	- $2.407 \cdot 10^{-6}$	- $6.481 \cdot 10^{-5}$
$C4$	- $5.307 \cdot 10^{-6}$	- $4.837 \cdot 10^{-5}$
$C5$	- $3.797 \cdot 10^{-5}$	- $1.363 \cdot 10^{-5}$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resultados Experimentais

Na Figura 5.1 está representado o coeficiente de atrito (linha azul), a média acumulada filme (linha preta) e o desvio padrão (área cinza acima da média de filme, somente parte superior) para a temperatura de 80°C e para diferentes parâmetros de força e velocidade. As imagens utilizadas para obtenção das médias são mostradas no Apêndice A.

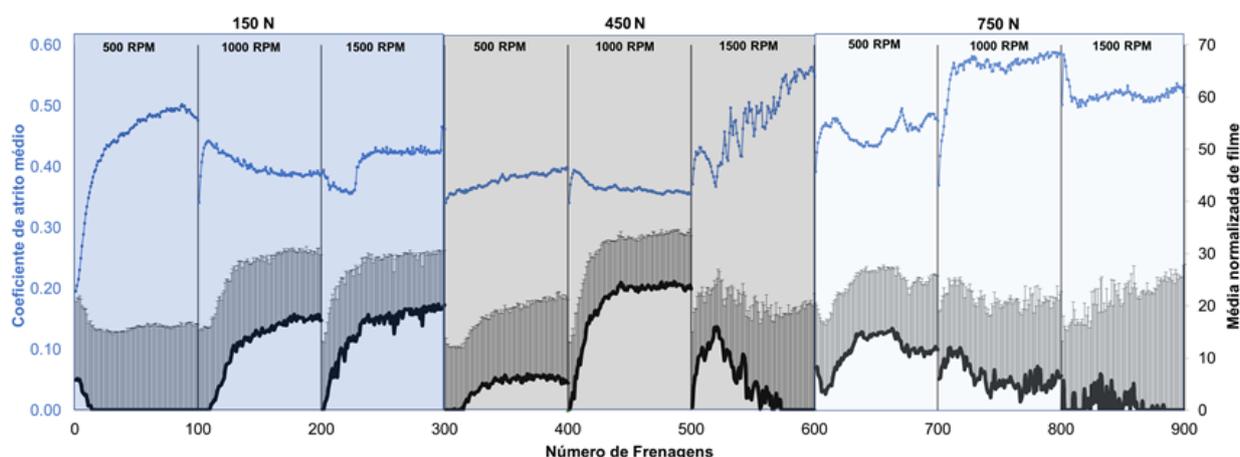


Figura 5.1 – Relação do filme sobre o disco com o coeficiente de atrito nos ensaios realizados a 80°C.

É possível visualizar que o comportamento do filme é distinto para cada condição de ensaio. Sob força reduzida, 150 N, por exemplo, a média de filme depositado aumenta com a velocidade não havendo formação de filme na rotação mais baixa (500 RPM). Outro ponto a se considerar é o desvio padrão, que representa a homogeneidade do filme depositado. Verifica-se que o desvio diminui à medida que o filme aumenta para essa força. Isso indica que o terceiro corpo que está sendo formado apresenta uma maior uniformidade com o incremento na rotação. Para força média (450 N), o comportamento é totalmente diferente. Sob a menor rotação (500 RPM), a formação de filme é relativamente reduzida. Já para velocidade de 1000 RPM, tal formação é elevada. Finalmente, a 1500 RPM pouco ou nenhum filme é formado. Com força de 750 N, tem-se comportamento inverso ao verificado na força mais reduzida, ou seja, a medida que a velocidade aumenta a quantidade de filme depositado diminui e o desvio padrão, nesse caso, aumenta.

Analisando o comportamento do coeficiente de atrito da Figura 5.1, é possível identificar, para alguns parâmetros, uma estabilidade do mesmo, principalmente no final das frenagens de cada ciclo. Esse comportamento regular do atrito é muito importante, pois está diretamente atrelada a maior formação do filme, visto que, quanto mais filme formado mais estável é o coeficiente. Para o caso de força média (450 N) e rotação média (1000 RPM), o coeficiente de atrito foi o mais estável ao longo das frenagens devido a grande formação do terceiro corpo. Contudo, somente a estabilização do coeficiente de atrito não é o suficiente para afirmar que houve formação de filme. Se observarmos os parâmetros (750 N para 1000 RPM e 1500 RPM), o comportamento do atrito, Figura 5.1, possui um grau de estabilidade, no entanto, o valor do coeficiente de atrito é mais alto que os demais mostrados na Figura 5.1. Isso implica fortemente na formação do terceiro corpo. Então, constatou-se que não somente a estabilidade do atrito, mas também o valor do coeficiente de atrito é influenciado pelo filme.

A seguir, a Figura 5.2 ilustra os resultados para a temperatura de 250°C.

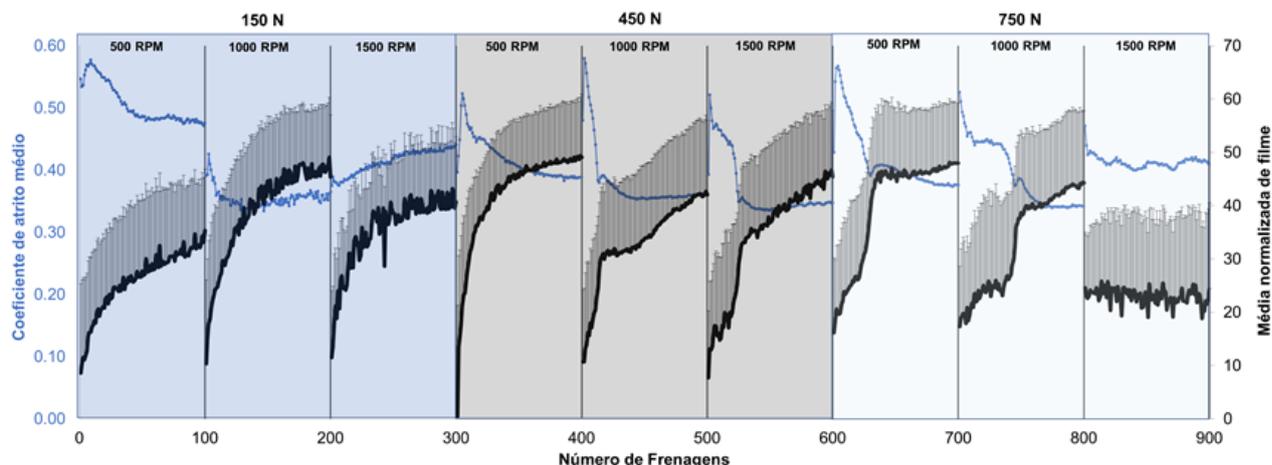


Figura 5.2 - Relação do filme sobre o disco com o coeficiente de atrito nos ensaios realizados a 250°C.

Para os ensaios com temperatura maior, representado pela Figura 5.2, a formação do terceiro corpo teve um aumento significativo em relação à temperatura de 80°, para todos os parâmetros. Isso comprova a grande influência que a temperatura possui no desenvolvimento do filme.

Outro ponto importante de ressaltar é o comportamento do coeficiente de atrito para a temperatura de 250°C. Analisando a Figura 5.2 é possível concluir que, para uma temperatura mais elevada (250°C), o coeficiente de atrito torna-se mais estável próximo a centésima frenagem de cada parâmetro testado, bem diferente do caso em que se tinha uma temperatura de 80°C, representado na Figura 5.1.

Quanto ao comportamento do atrito no início de cada ensaio (primeiras aplicações de cada conjunto de 100 frenagens), vale salientar que para a temperatura de 250°C ele inicia elevado e vai diminuindo conforme o filme é formado. Já para 80°C o comportamento do atrito não segue uma regra clara.

5.2 Relação Força e Velocidade

Junto com o desenvolvimento da Equação 4.2, foi possível gerar curvas de nível para a média acumulada de filme as quais estão representadas pela Figura 5.3 e Figura 5.4. Na Figura 5.3 temos quantidade do filme formado representado em relação à velocidade e força a uma temperatura de 80°C. No Apêndice B, estão as figuras das superfícies nas três dimensões.

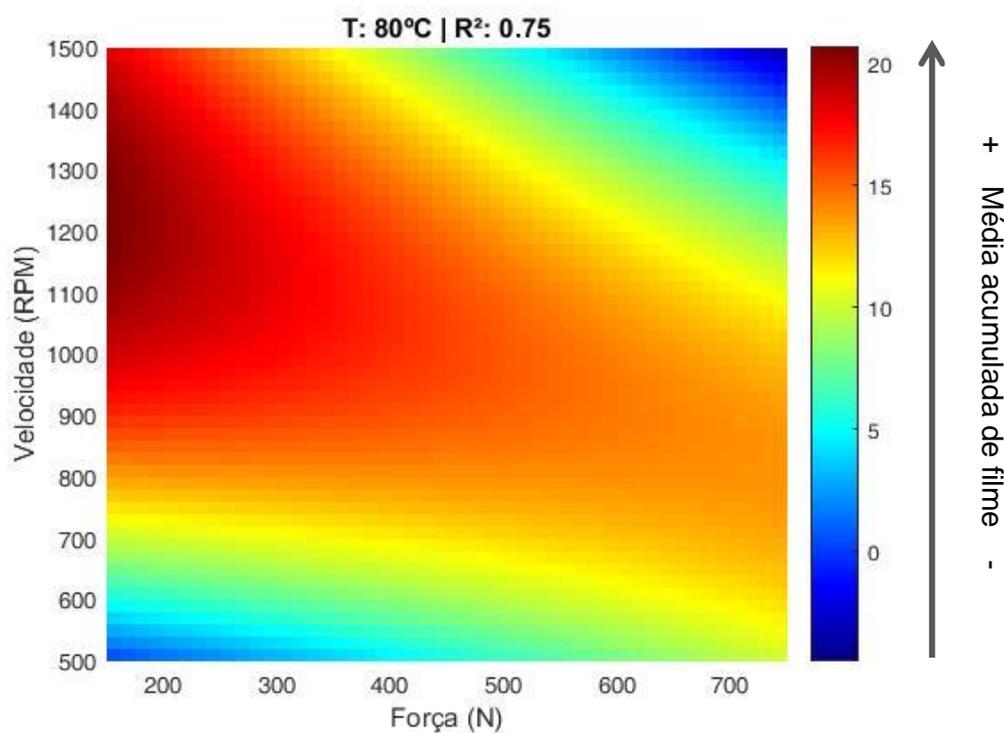


Figura 5.3 - Influência da velocidade e da força na formação do filme a 80°C.

Já na Figura 5.4, temos quantidade do filme formado para a temperatura de 250°C.

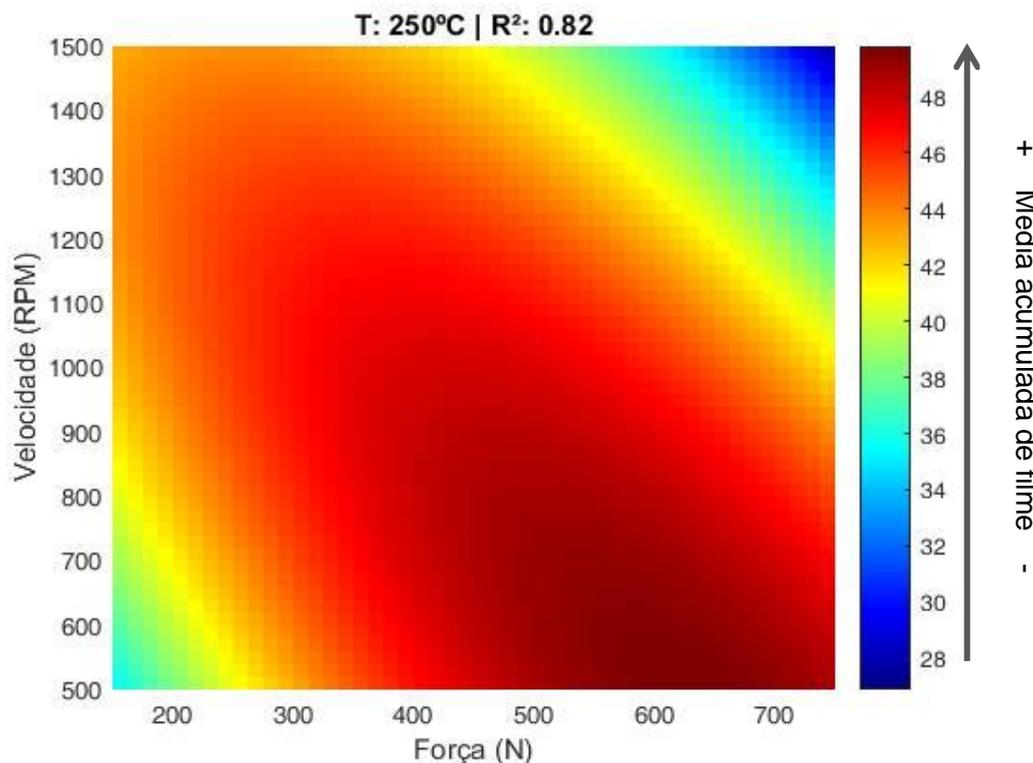


Figura 5.4 - Influência da velocidade e da força na formação do filme a 250°C.

Analisando as Figuras 5.3 e 5.4, podemos notar as diferentes influências que cada caso apresenta. Para a Figura 5.3, nota-se que a produção de filme está mais relacionada à

velocidade. Já para a Figura 5.4 a força exerce uma influência maior. Assim, pode-se dizer que para temperaturas baixas (80°C) a formação do filme ocorre muito mais devido à velocidade do que devido à força e para temperaturas altas (250°C), o caso se inverte, ocorrendo maior deposição de filme devido à força. Uma hipótese para termos uma maior influência da velocidade na formação do terceiro corpo para a temperatura de 80°C, é que conforme se aumenta a velocidade maior é a variação da temperatura durante a frenagem e com isso maior é a quantidade de filme depositado na superfície do disco. Contudo, pode-se perceber que a formação de filme depende de relação ideal entre os dois parâmetros (força e velocidade) para a sua formação.

6. CONCLUSÕES

A partir deste trabalho, foi possível desenvolver uma metodologia para avaliar a formação do terceiro corpo para uma pastilha Semi-Metálica tendo como conclusões:

- Através dos resultados obtidos é possível perceber a grande influência da temperatura na formação do filme. A temperatura de 250°C faz com que a quantidade de filme depositado na superfície do disco tenha um significativo aumento, independente dos outros parâmetros utilizados no ensaio. Em virtude disso, o coeficiente de atrito para uma temperatura mais alta (250°C) apresenta uma maior estabilidade que na temperatura de 80°C.
- Não obstante, os parâmetros de força e velocidade apresentam um comportamento semelhante para as duas temperaturas testadas. Em forças baixas (150 N), à medida que, a velocidade aumenta a formação de filme também aumenta. Já para força alta (750 N), ocorre o inverso, ou seja, o aumento da velocidade diminui a deposição do filme. Para o caso de força média (450 N) o comportamento não segue um padrão como para os casos anteriores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albuquerque, C. F.; **“O livro do automóvel”**, 1976.

Bhushan, B.; **“Introduction to Tribology”**, 2ª edição, 2013.

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

Cho, M. H.; Cho, K. H.; Kim, S. J.; Kim, D. H.; Jang, H.; **“The role of transfer layers on friction characteristics in the sliding interface between friction materials against-annotated”**, 2005.

Desplanques, Y.; **“A reduced-scale test for pad-disc contact tribological analysis in railway”**, 2006.

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

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

Nakata.; **“ Manual para Sistemas de Freio”**, <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC078/Aulas/extras/Manual%20sistema%20de%20freios%20-%20Nakata.pdf>. Acessado em 12/03/2019.

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

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

Österle, W.; Urban, I.; **“Third body formation on brake pads and rotors-annotated”**, 2006.

Österle, W.; Dörfel, I.; Prietzel, C.; Rooch, H.; Cristol-Bulthé, A. L.; Degallaix, G.; Desplanques, Y.; **“A comprehensive microscopic study of third body formation at the interface between a brake pad and brake disc du-annotated”**, 2009.

Pavlak, R. P.; Neis, P. D.; Poletto, J. C.; de Barros, L. Y.; Ferreira, N. F.; **“Wear, Friction and NVH Characterization Using a Laboratory-Scale Tribometer”**, 2017.

PUHN, F.; **“Brake Handbook”**. Books, New York, 1ª edição, 1987.

Rhee, S. K.; Jacko, M. G.; Tsang, P. H. S.; **“The role of friction film in friction, wear and noise of automotive brakes-annotated”**, 1991.

Vicente, P. M. M.; **“Influência do papel de aditivos no comportamento tribológico de pastilhas de travão baseadas em sucata metálica não ferrosa”**, 2016.

ANEXO A – INCERTEZAS

A.1 Incerteza do Torque e da Força Normal

Segundo Pavlak, 2017, para a combinação das incertezas individuais dos dispositivos envolvidos nestas grandezas, encontrou-se, para torque e força normal, um valor de incerteza de ± 0.20 Nm e ± 2.29 N, respectivamente.

A.2 Incerteza do Raio de Deslizamento

O raio de deslizamento é ajustado através de um fuso e manivela. A realização da leitura é feita através de um paquímetro digital. De acordo com o fabricante, a repetitividade do equipamento é de ± 10 μ m. Neis, 2012, para uma análise conservativa, considerou uma incerteza de medição de ± 17.8 μ m, valor encontrado em paquímetros mecânicos.

A.3 Incerteza do Coeficiente de Atrito

A incerteza do coeficiente de atrito foi calculado utilizando a combinação de todas as grandezas envolvidas. Esta forma de calculo é empregada para determinar a incerteza combinada quando temos grandezas dependentes e independentes ao mesmo tempo. Assim a incerteza combinada das medições de atrito, considerando a faixa operacional utilizada neste trabalho, é menor ou igual a $\pm 1\%$ [Pavlak, 2017].

A.4 Incerteza do Termopar

Para a realização dos ensaios foi utilizado um termopar do tipo K. O mesmo foi instalado no interior do disco de freio. Para determinar a incerteza dessa grandeza foi utilizada a Equação A.1, a qual combina as incertezas individuais do termopar, condicionador de sinal e sistema de aquisição de dados.

$$U(TK) = \sqrt{u^2(k) + u^2(ck) + u^2(sa)} \quad (A.1)$$

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

Para os valores de temperatura encontrados neste experimento, tem-se uma incerteza de $\pm 2,38^{\circ}$ C.

APÊNDICE A – Imagens obtidas durante as frenagens

A Tabela A.1 é uma demonstração de como as fotos de todas as frenagens foram agrupadas, totalizando 101 imagens para 100 frenagens, pois está incluída a foto inicial do disco após o lixamento. Não somente isso, a primeira foto (1) foi repetida no final da sequência de imagens a fim de facilitar a visualização e comparação entre fotos.

Tabela A.1 - Representação do agrupamento dos imagens.

- Número de frenagens +						
1	2	3	...	32	33	34
35	36	37	...	66	67	68
69	70	71	...	100	101	1

A Figura A.1 mostra as fotos tiradas da superfície do disco ao longo das frenagens, cujas imagens estão dispostas da forma mostrada na Tabela. A.1

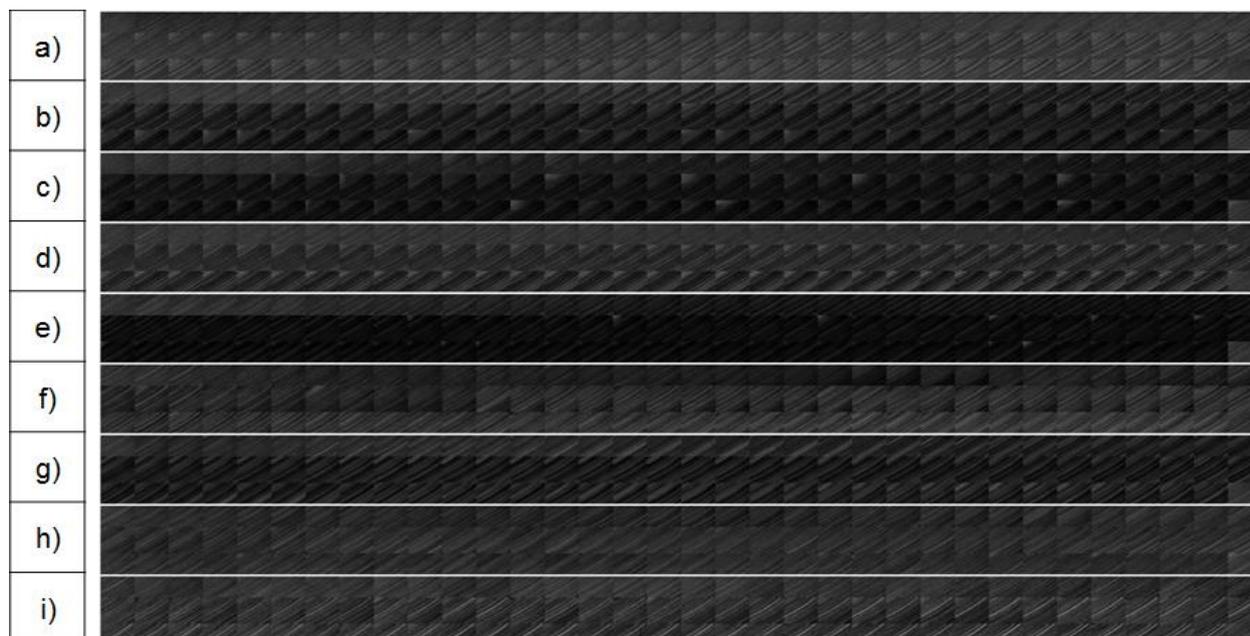


Figura A.1 - Evolução do filme para temperatura de 80°C com os seguintes parâmetros: a) 150 N;500 RPM, b) 150 N;1000 RPM, c) 150 N;1500 RPM, d) 450 N;500 RPM, e) 450 N;1000 RPM, f) 450 N;1500 RPM, g) 750 N;500 RPM, h) 750 N;1000 RPM, i) 750 N;1500 RPM.

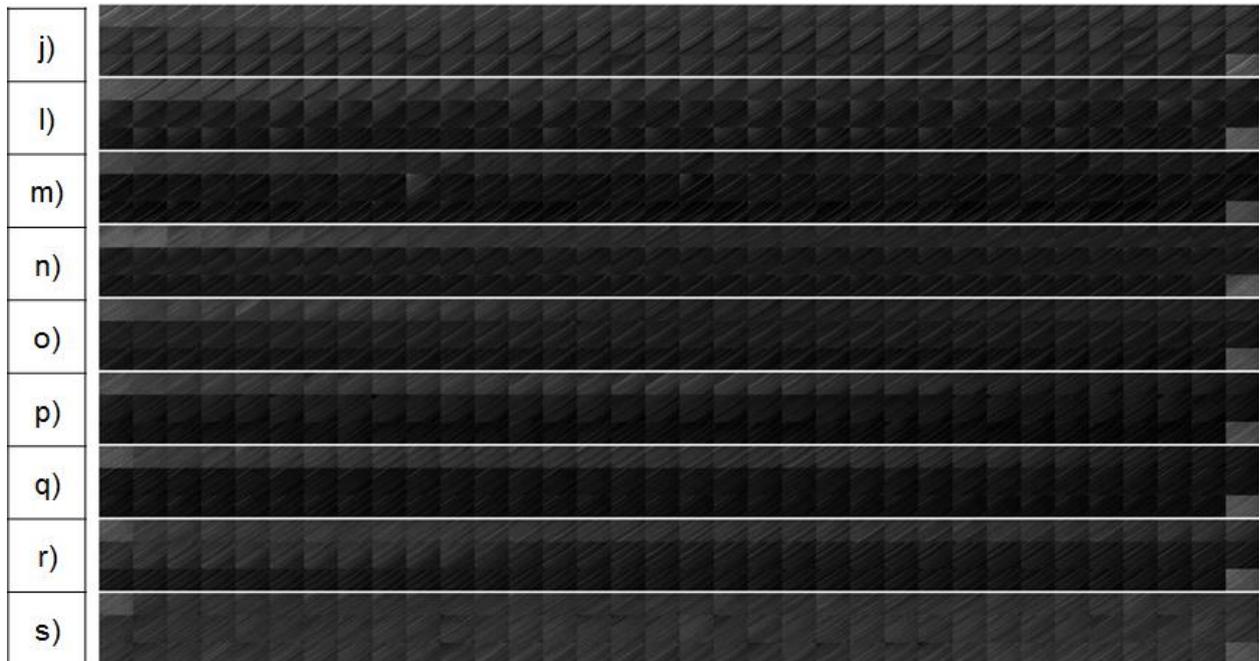


Figura A.2 - Evolução do filme para temperatura de 250°C com os seguintes parâmetros: j) 150 N; 500 RPM, l) 150 N;1000 RPM, m) 150 N;1500 RPM, n) 450 N;500 RPM, o) 450 N;1000 RPM, p) 450 N;1500 RPM, q) 750 N;500 RPM, r)750 N;1000 RPM, s) 750 N;1500 RPM.

APÊNDICE B - Superfícies obtidas com a média acumulada de filme.

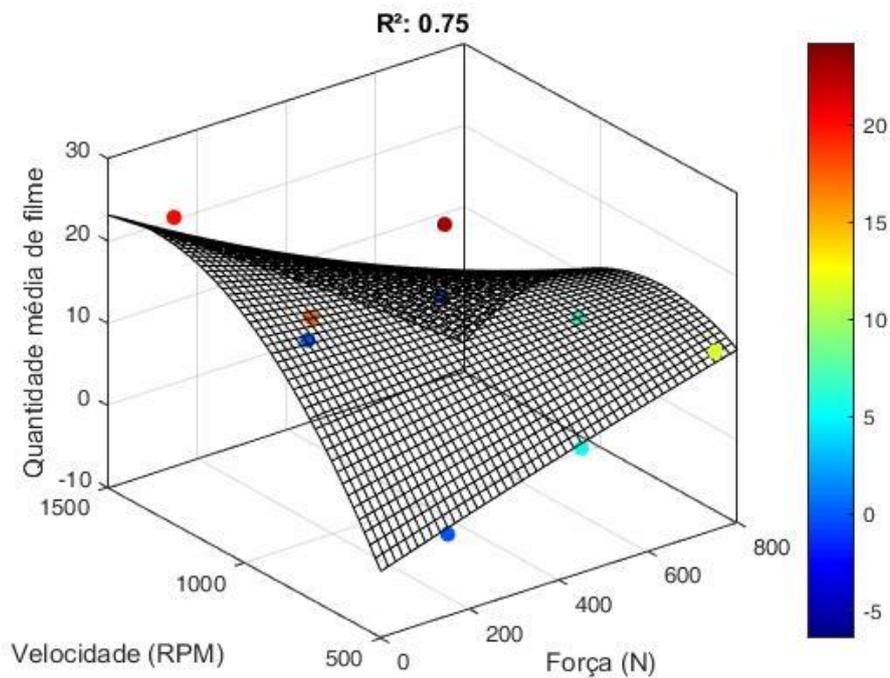


Figura B.1 - Superfície da quantidade de filme em relação a velocidade e a força a uma temperatura de 80°C.

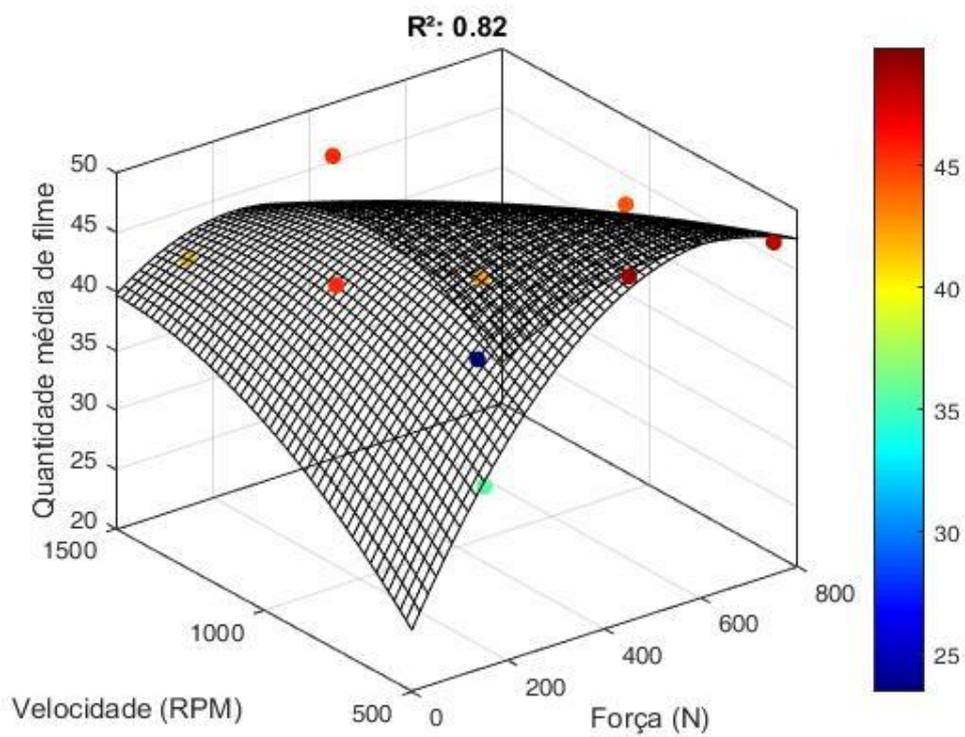


Figura B.2 - Superfície da quantidade de filme em relação a velocidade e a força a uma temperatura de 250°C.