

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

ANÁLISE DO EFEITO DO HISTÓRICO DE ALTAS TEMPERATURAS DE FRENAGEM (*FADE*)
SOBRE O ATRITO MEDIDO EM PASTILHAS DE FREIO

por

Bruno Christiano Correa Ruiz Zart

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, Novembro de 2015



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

ANÁLISE DO EFEITO DO HISTÓRICO DE ALTAS TEMPERATURAS DE FRENAGEM (*FADE*)
SOBRE O ATRITO MEDIDO EM PASTILHAS DE FREIO

por

Bruno Christiano Correa Ruiz Zart

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. Dr. André João de Souza

Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Prof. Dr. Tiago Becker

Porto Alegre, 27 de Novembro de 2015.

AGRADECIMENTOS

Ao professor orientador Patric Neis pelo apoio, paciência, conselhos, e disponibilidade sempre que foi preciso. Ao colega Jean Poletto pela ajuda na aquisição de dados. À Fras-le por ter cedido a pastilha de freio. Aos colegas e amigos ao longo destes anos. A minha família pelo apoio de sempre e a minha namorada pela ajuda e paciência.

ZART, B.C.C.R. **Análise do Efeito do Histórico de Altas Temperaturas de Frenagem (*Fade*) Sobre o Atrito Medido em Pastilhas de Freio**. 2015. 22 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 verificar se as alterações provocadas pelas altas temperaturas (efeito de *fade*) no desempenho tribológico do material (atrito e desgaste) afetam o volume total de uma pastilha de freio veicular ou apenas uma camada superficial (área atritada). Para isto, foram realizadas etapas compostas por uma série de frenagens com o intuito de comparar os coeficientes de atrito das etapas ocorridas após o efeito de *fade* com a etapa de assentamento (comportamento do material virgem). Estas frenagens foram realizadas no tribômetro do Laboratório de Tribologia (LATRIB) da UFRGS utilizando pastilhas de dois materiais semi-metálicos (SM) diferentes. Foram utilizados dois métodos para verificar a influência do efeito de *fade* sobre o atrito do material: análise gráfica e análise estatística ANOVA. Ambos os métodos mostraram resultados semelhantes. Verificou-se uma recuperação de cerca de 100% do atrito inicial para um material SM após o desgaste e remoção de uma fina camada, enquanto que para o segundo material SM a recuperação foi de 96%. Diante disso, existe a possibilidade que o efeito de *fade* seja dependente do material de fricção utilizado.

PALAVRAS-CHAVE: Pastilha de freio, *fade*, atrito, recuperação

ZART, B.C.C.R. **Analysis of the Effect of High Temperature Brakings (Fade) on Friction Obtained in Brake Pads**. 2015. 22 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 to verify if the changes caused by high temperatures (fade) on material's tribological performance (friction and wear) affect the total volume of vehicular brake pads or just a thin surface layer of the rubbed area. Therefore, steps composed of a series of braking were performed in order to compare the friction coefficient that occur after the fade to the bedding-in (virgin material behavior). These brakings were performed on the tribometer of the Laboratory of Tribology of UFRGS, using two different semi-metallic (SM) brake pads. Two methods were employed to check the influence of the fade in friction material: graphical analysis and analysis of variance (ANOVA). Both methods showed similar results. It was found a recovery of nearly 100% for the first SM material after removal (wear and machining) of material from the sample's surface, while for the second SM material recovery was of 96%, according to ANOVA. Thus, it was proved that the fade is material-dependent.

KEYWORDS: brake pad, fade, friction, recovery

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3.1. Sistemas de Freio	1
3.2. Materiais de Fricção Utilizados em Freios Veiculares	1
3.3. Fatores que Influenciam no Coeficiente de Atrito	2
3.3.1. Velocidade de Deslizamento	2
3.3.2. Pressão e Área de Contato	2
3.3.3. Temperatura	3
3.4. Procedimentos de Ensaios	3
3.4.1. Assentamento	3
3.4.2. <i>Fade</i>	3
3.4.3. Caracterização	3
3.5. Recuperação do material	3
4. METODOLOGIA DE ENSAIOS	4
4.1. Corpos de Prova e Disco de Freio	4
4.2. Procedimento e Parâmetros de Ensaio	5
4.3. Equipamentos de Medição	6
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	7
5.1. Etapa de Assentamento	7
5.2. Análise Gráfica	7
5.3. Análise de Variância (ANOVA)	9
5.4. Porcentagem de Recuperação Pós- <i>fade</i> e Pós-usinagem (1º e 2º comparação)	9
5.5. Avaliação do Desgaste em Altura e da Porcentagem de Recuperação	10
5.6. Avaliação do Desgaste por Perda de Massa	11
6. CONCLUSÕES	12
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	12
ANEXO A	14
APÊNDICE A	15
APÊNDICE B	16

1. INTRODUÇÃO

Por décadas, os sistemas de freios eram testados exclusivamente em veículos através de ensaios em campo. Ao longo dos anos, a indústria automotiva tem investido em melhorias no desempenho destes sistemas já que estão diretamente relacionados com a segurança dos seus usuários [Tsang *et al.*, 1985]. Com o avanço da tecnologia, grande parte dos testes tornaram-se mais eficazes em laboratórios, devido a um controle mais preciso e uma maior facilidade de instrumentação. Ademais, há também uma redução nos custos e um menor tempo gasto [Rusnak *et al.*, 1970]. Por isso, ensaios em bancadas vem sendo utilizados por permitirem simular as condições reais as quais os materiais de fricção sofrem quando sujeitos a processos de frenagens. E, diante disso, obter-se resultados comparando algumas variáveis como coeficiente de atrito, propriedades mecânicas, estrutura da pastilha, desgaste [Timte, 2000], utilizando-se diferentes parâmetros de ensaio. Um dos principais parâmetros a ser monitorado durante os testes de frenagem é a temperatura, visto que elevadas temperaturas (cerca de 300 °C) provocam uma redução no coeficiente de atrito, um efeito chamado de “*fade*” [Neuman *et al.*, 1983] alterando as propriedades tribológicas das amostras ensaiadas. No entanto, pouco se sabe sobre qual a espessura da camada do material de fricção afetada pelas elevadas temperaturas. Em outras palavras, não se sabe se a alta temperatura é capaz de afetar todo o volume do material ou apenas uma fina camada sobre sua superfície. Diante deste contexto, o trabalho busca verificar se existe uma influência do efeito *fade* sobre as propriedades tribológicas (atrito, desgaste) de todo o material ou se estas alterações apenas influenciam a camada superficial das amostras. Uma pesquisa neste sentido também permitirá avaliar a possibilidade de estender a vida útil dos corpos de prova de pastilhas de freios veiculares.

2. OBJETIVOS

Verificar se o efeito de *fade* influencia o desempenho tribológico do material (atrito e desgaste) no volume total da pastilha de freio veicular ou em apenas uma camada superficial (área atritada), ou seja, se a alteração provocada pelo *fade* é reversível (apenas numa camada superficial) ou irreversível (afeta todo o volume)

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Sistemas de Freio

Os sistemas de freio são dispositivos de conversão de energia cinética em energia térmica, entre outras formas de energia [Serbino, 2005]. Estes sistemas são elementos críticos tanto para a segurança como para o desempenho do veículo. São responsáveis pela redução da velocidade ou por cessar totalmente o movimento de um veículo, além de mantê-lo estacionado em rampas.

Um dos componentes mais importantes do sistema de freio a disco é a pastilha, a qual é fixada por um elemento chamado *cáliper* que transforma a pressão hidráulica dos pistões em força mecânica nas pastilhas, pressionando-as axialmente contra o disco de freio causando a frenagem [Rehkopf e Haldeman, 2006].

3.2. Materiais de Fricção Utilizados em Freios Veiculares

As pastilhas de freios são compostas por materiais de atrito de diferentes matérias-primas. Essa combinação de materiais visa obter um coeficiente de atrito que seja estável. O atrito deve manter um nível de estabilidade independente da temperatura, umidade, desgaste e corrosão, presença de impureza, etc. [Eriksson *et al.*, 2002]. Desta forma, Eriksson e Jacobson,

2000, citam que basicamente todos os materiais de fricção possuem em sua composição ligantes, materiais estruturais, carga e modificadores de atrito.

A classificação das pastilhas de freio é geralmente dividida em duas categorias: materiais semi-metálicos e materiais orgânicos [Matozo, 2006]:

- Semi-Metálica (SM) são constituídas de elevada quantidade de elementos metálicos e fibras ferrosas. São mais resistentes ao desgaste e altas temperaturas. Entretanto, o contra corpo (disco de freio) sofre um desgaste maior, assim, diminuindo a vida útil do mesmo.
- Non Asbesto Organic (NAO) são compostas basicamente por fibra de vidro ou aramida como base. Apresentam fibras metálicas, porém em baixa porcentagem. Por isso, são mais macias, proporcionando um maior contato com o disco. São largamente utilizadas no mercado devido a uma maior estabilidade durante a frenagem [Eriksson e Jacobsoon 2000].

3.3. Fatores que Influenciam no Coeficiente de Atrito

São três as principais variáveis que influenciam o comportamento do atrito durante as frenagens: velocidade de deslizamento, pressão de contato e temperatura [Neuman *et al.*, 1983]. No entanto, Neis, 2008, cita que existem outros fatores que interferem no desempenho, entre estes, a composição química e microestrutura dos materiais de fricção, formação do filme de fricção, condição de frenagem (a seco e molhado) e histórico de frenagens do material. A seguir, são discutidas as principais variáveis que afetam o desempenho.

3.3.1. Velocidade de Deslizamento

Entre os principais modelos de variação da força de atrito está a lei que sugere uma dependência de força de atrito com a velocidade de deslizamento [Tsang *et al.*, 1985]. Ostermeyer, 2001, afirma que há uma diminuição no coeficiente de atrito com o aumento da velocidade de deslizamento.

3.3.2. Pressão e Área de Contato

Segundo Tirovic e Day, 1991, o desempenho de um sistema de freio está relacionado com a intensidade da pressão de contato entre o par de fricção, pastilha e disco. Eriksson *et al.*, 2002, mostraram que apenas 15% a 30% da pastilha está em contato real com o disco, através dos platôs de contato (Fig. 3.1).

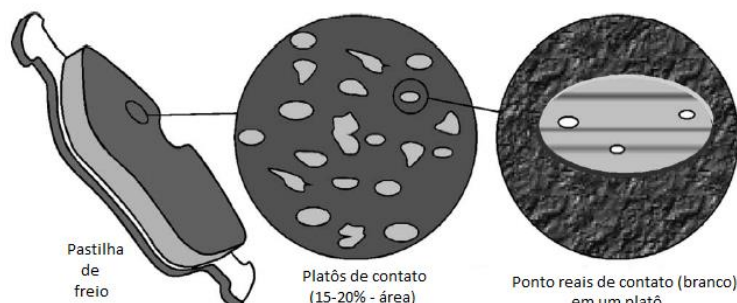


Figura 3.1 – Relações entre o tamanho da pastilha, platôs de contato e a real área de contato. [Adaptado de Eriksson *et al.*, 2002].

3.3.3. Temperatura

O aquecimento do disco e da pastilha de freio durante frenagens resulta em reações químicas no material de fricção, em mudanças em suas propriedades mecânicas e estruturais (decomposição dos componentes do polímero, etc), bem como aderência de partículas de desgaste em ambas as superfícies [Eriksson *et al.*, 2002].

De acordo com Blau e McLaughlin, 2003, altas temperaturas (300°C - 400°C), na superfície de contato de uma pastilha com um disco de freio levam a redução da tensão de cisalhamento da pastilha e, conseqüentemente, em uma perda da força de atrito, causando o efeito de *fade*. Segundo Kosbe e More, 2011, a liberação de gás nas interfaces de frenagens como conseqüência da pirólise e da degradação térmica do material, resulta em uma diminuição da força aplicada em elevadas temperaturas. Bijwe *et al*, 2004 e Bijwe *et al*, 2005, citam que, normalmente, a causa do *fade* é atribuída à degradação da resina fenólica. O *fade* também tem sido atribuído à formação do filme de fricção ou terceiro corpo, que leva a um aumento na área de contacto real e, assim, reduz a pressão aplicada sobre a pastilha [Anderson, 1987].

3.4. Procedimentos de Ensaios

Para verificar o comportamento (coeficiente de atrito, desgaste) de materiais de atrito submetidos a diferentes parâmetros de teste (velocidade de escorregamento, temperatura, pressão de contato), utilizam-se procedimentos de ensaios [Rusnak *et al*, 1970]. Um procedimento de ensaio normalmente é composto de etapas formadas por frenagens. A seguir serão descritas as principais etapas utilizadas nos procedimentos:

3.4.1. Assentamento

Etapas que tem como objetivo assegurar um contato uniforme do material atritado com a superfície do disco, visando a estabilização do atrito do material [Kumar e Bijwe, 2010]. Neis *et al.*, 2010, cita que alguns materiais necessitam de mais frenagens do que outros para assentar.

3.4.2. *Fade*

A etapa *fade* tem como objetivo submeter o material de fricção a frenagens que resultam em altas temperaturas e avaliar a resposta de atrito quando sujeito a estas condições [Balotin, 2010].

3.4.3. Caracterização

Segundo Balotin, 2010, a etapa de caracterização de um material de fricção serve para verificar o comportamento do material de atrito após submetido a diferentes condições (velocidade de deslizamento, temperatura, pressão de contato).

3.5. Recuperação do material

Bijwe 1997, define que o retorno da fricção para níveis aceitáveis após o material ter sido submetido a elevadas temperaturas é chamado de “recuperação”. Anderson, 1987, menciona que a utilização de fibras de aço na composição do material de fricção proporciona uma rápida recuperação do atrito do material. Bijwe *et al.*, 2005, aponta que a recuperação do material pode ser alterada de acordo com as distintas resinas utilizadas.

3.6. Análise de Variância (ANOVA)

A análise de variância (ANOVA) é um método estatístico cuja principal aplicação é verificar se existe uma diferença significativa entre as médias de diferentes grupos, e se os fatores exercem influência em alguma variável. A variável F representa o valor estatístico do teste. Tem-se que se $F_{\text{calculado}} > F_{\text{crítico}}$, rejeita-se a hipótese, ou seja, existem diferenças estatisticamente significativas entre as variáveis. Em contrapartida, se $F_{\text{calculado}} < F_{\text{crítico}}$ não se rejeita a hipótese, o que indica que não existem evidências estatísticas de que estas sejam diferentes [Montgomery e Runger, 2009].

4. METODOLOGIA DE ENSAIOS

A metodologia utilizada para este trabalho consiste em analisar as consequências que o efeito *fade* pode acarretar na camada superficial de um corpo de prova (pastilha de freio), assim como avaliar um possível retorno de suas características tribológicas a níveis iniciais. Desta forma, ensaios foram realizados em um tribômetro multifuncional, o qual está localizado no Laboratório de Tribologia (LATRIB) da UFRGS, Figura 4.1. O atrito é uma grandeza medida por este equipamento, conforme mostrado no Anexo A. Detalhes desta máquina podem ser obtidos em Neis, 2012.



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

4.1. Corpos de Prova e Disco de Freio

Foram utilizados dois materiais semi-metálicos (SM) distintos para a realização dos experimentos, material “A” e material “B”. Dois corpos de prova ($CP_1(A)$ e $CP_2(A)$) foram obtidos a partir da usinagem da pastilha de freio SM “A”. Um terceiro corpo de prova ($CP_1(B)$) foi obtido a partir do material SM “B”. Ao longo do texto adotou-se as nomenclaturas conforme a Tabela 4.1 com o intuito de facilitar a leitura, onde CP representa “corpo de prova” (3 corpos de prova), e a composição dos materiais semi-metálicos foi definida como “A” e “B”.

Tabela 4.1 – Denominação dos corpos de prova

Nomenclatura	Composição	Força normal no Tribômetro [N]
$CP_1(A)$	A	600
$CP_2(A)$	A	900
$CP_1(B)$	B	600

A Figura 4.1 ilustra a geometria dos corpos de prova utilizados nos experimentos (formato circular, com 18 mm de diâmetro).



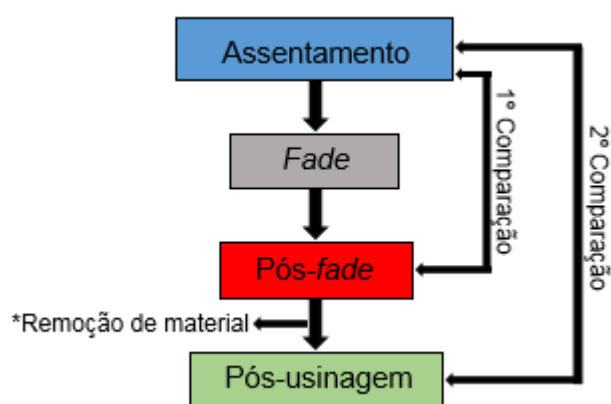
Figura 4.1 Corpo de prova utilizado nos ensaios

Quanto ao rotor, foi utilizado um disco de freio de 159 mm de diâmetro e 12 mm de espessura, feito de ferro fundido cinzento, material comumente utilizado para discos de freio automotivo. As temperaturas do disco durante os ensaios de frenagem foram medidas utilizando um termopar instalado a 2 mm de sua superfície.

Antes da realização das etapas de frenagem, o disco de freio foi preparado com lixas de diferentes granulações de modo a reduzir a rugosidade da sua superfície. As lixas utilizadas neste processo apresentam granulação de 240, 300, 400, 500 e 1500, nesta ordem.

4.2. Procedimento e Parâmetros de Ensaio

O procedimento foi proposto pela estrutura básica mostrada pela Figura 4.2, na qual as três amostras foram submetidas a quatro etapas (assentamento, *fade*, pós-*fade* e pós-usinagem) compostas por uma série de frenagens, com o objetivo de caracterizar os corpos de prova e, assim, possibilitar as comparações de atrito entre as etapas.



*Remoção de cerca de 1 mm em espessura de material da superfície de contato das amostras.

Figura 4.2 – Sequência das etapas do procedimento

A Tabela 4.2 apresenta os parâmetros experimentais utilizados nos ensaios executados no tribômetro.

Tabela 4.2 – Parâmetros adotados nos ensaios.

Amostra	Etapas	Força Normal no Tribômetro [N]	Número de Frenagens	Temperatura Inicial [°C]	Pressão hidráulica em veículo leve [bar]	Velocidade inicial de escorregamento [m/s]
CP ₁ (A)	Assentamento, Pós- <i>fade</i> e Pós-usinagem	600	100	100	48	7,7 a 0
CP ₂ (A)		900			72	
CP ₁ (B)		600	200		48	
CP ₁ (A) CP ₂ (A) CP ₁ (B)	<i>Fade</i> x 4	1200	10	100	96	
	3		100			
	3		300			
	3		350			

Etapas utilizadas para os ensaios serão descritas a seguir:

- **Assentamento:** Para esta etapa, foram realizadas 100 frenagens para o CP₁(A) e CP₂(A) e 200 frenagens para o CP₁(B), as quais tiveram uma temperatura inicial do disco de 100 °C. Esta fase teve como objetivo caracterizar o atrito e desgaste dos materiais virgens.

- **Fade (frenagens a altas temperaturas):** Etapa na qual os corpos de prova foram submetidos a frenagens sob elevadas temperaturas com o intuito de simular o efeito *fade*. Foi utilizado um aquecedor indutivo para atingir as temperaturas de gatilho desejadas. Este método consistiu na realização de 4 ciclos de frenagens. Cada ciclo foi composto pela sequência de: 10 frenagens a 100 °C, 3 frenagens a 200 °C, 3 frenagens a 300 °C e 3 frenagens a 350 °C.
- **Caracterização pós-fade:** Ou apenas pós-*fade*. Etapa realizada após o material ter sido submetido à frenagens a altas temperaturas (*fade*). Foi realizado o mesmo número de frenagens da etapa de assentamento. Esta fase teve como propósito caracterizar os materiais A e B após a etapa *fade*.
- **Caracterização pós-usinagem:** Ou apenas pós-usinagem. Logo após a etapa de pós-*fade*, as amostras foram usinadas com o auxílio de uma fresa do laboratório de Usinagem da UFRGS. Foi removido cerca de 1mm de material do topo (área de contato) das amostras. Após esta remoção, executou-se novamente o mesmo número de frenagens das etapas anteriores (assentamento e pós-*fade*).

Foram feitas duas comparações com o objetivo de analisar o coeficiente de atrito, estas foram divididas em 1º e 2º comparação descritas abaixo:

- **1º comparação:** Comparação entre os coeficientes de atrito da etapa de pós-*fade* e da etapa de assentamento. Objetivo: Avaliar a influência do efeito *fade* após a etapa *fade*.
- **2º comparação:** Comparação entre os coeficientes de atrito da etapa de pós-usinagem e da etapa de assentamento. Objetivo: Verificar se após as etapas de *fade*, pós-*fade* e a remoção de cerca de 1 mm em espessura de material dos corpos de prova ainda existe a influência do efeito *fade* nos materiais.

4.3. Equipamentos de Medição

Uma balança eletrônica com resolução de 0,2 mg foi utilizada para obter as massas dos corpos de prova após cada etapa de ensaio. De posse destes valores foram calculados os desgastes.

Foi utilizado uma Máquina de Medir Coordenadas Mitutoyo modelo QM-Measure 353 para medir as alturas, conforme Figura 4.3 a), dos corpos de prova antes e após cada etapa de ensaio. Estas alturas foram obtidas através da medição entre um ponto na plaqueta de fixação do corpo de prova (ponto X) e cinco pontos na superfície da pastilha (pontos 1 a 5) conforme pode ser visto de forma mais detalhada na Figura 4.3 b). De posse destes valores, a altura utilizada foi calculada a partir da média dos 5 pontos.

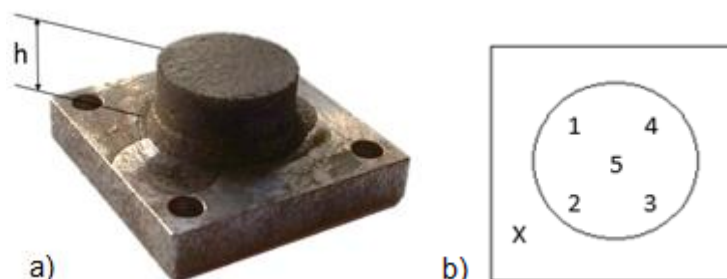


Figura 4.3 – a) Altura medida referente ao CP e b) Pontos onde foram realizadas as medições (vista superior do CP)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Etapa de Assentamento

Através da Figura 5.1 abaixo pode ser visto o coeficiente de atrito e a temperatura média no disco para ensaios realizados com o CP₁(A), CP₂(A) e CP₁(B) utilizando os parâmetros definidos na metodologia.

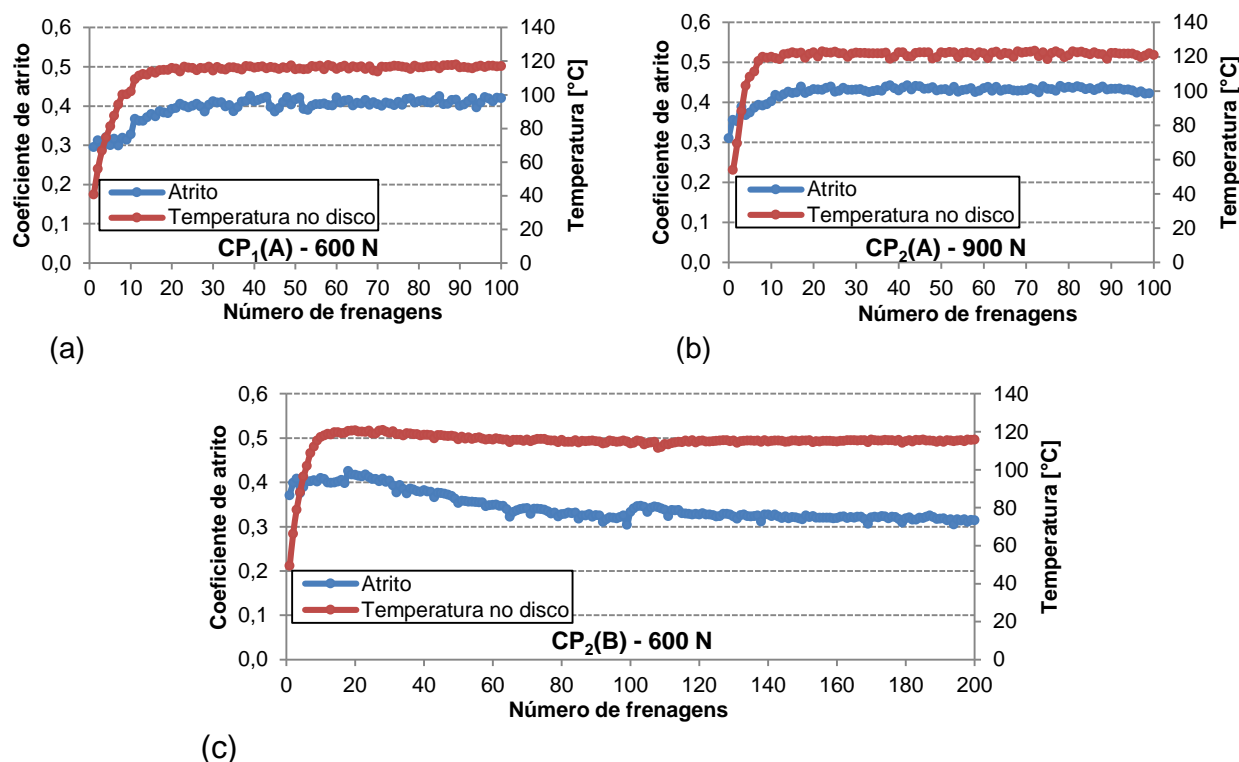


Figura 5.1 – Temperaturas médias de disco e curvas de atrito medidas no assentamento do CP₁(A) (a); CP₂(A) (b); CP₁(B) (c)

Observa-se que os corpos de prova do material A apresentaram coeficiente de atrito maior que o corpo de prova do material B. Conforme pode ser visto pela Figura 5.1 acima foi necessário um maior número de frenagens para o atrito do material B estabilizar. Por esta razão foram realizadas 200 frenagens.

A através da Figura 5.1 (a) é possível notar que a estabilização do atrito ocorre em torno da 20^o frenagem para o CP₁(A), no entanto, observa-se através da Figura 5.1 (b) que para o CP₂(A) a estabilização do atrito ocorreu por volta da 10^o frenagem. Já para o corpo de prova do material B (CP₁(B)), o período de estabilização do atrito se deu em torno da frenagem número 120.

Todas as curvas de temperaturas mantiveram-se em temperaturas relativamente baixas (em torno de 120 °C), critério utilizado para que não ocorresse efeito de *fade* durante a etapa de assentamento.

5.2. Análise Gráfica

Através de uma avaliação gráfica para a 1^o e 2^o comparação dos três corpos de prova foi possível ter um primeiro conhecimento sobre as diferenças de atrito médio entre as etapas de ensaio.

A Figura 5.2 apresenta as médias dos coeficientes de atrito das etapas de assentamento, pós-*fade* e pós-usinagem realizadas com o CP₁(A) e o CP₂(A). Para o cálculo destas médias não foram consideradas as frenagens anteriores ao período de estabilização do

coeficiente de atrito. No caso, foram eliminadas as 20 primeiras frenagens das três etapas realizadas com o CP₁(A) e eliminadas as 10 primeiras frenagens das três etapas realizadas com o CP₂(A). Mais detalhes são ilustrados no Apêndice A.

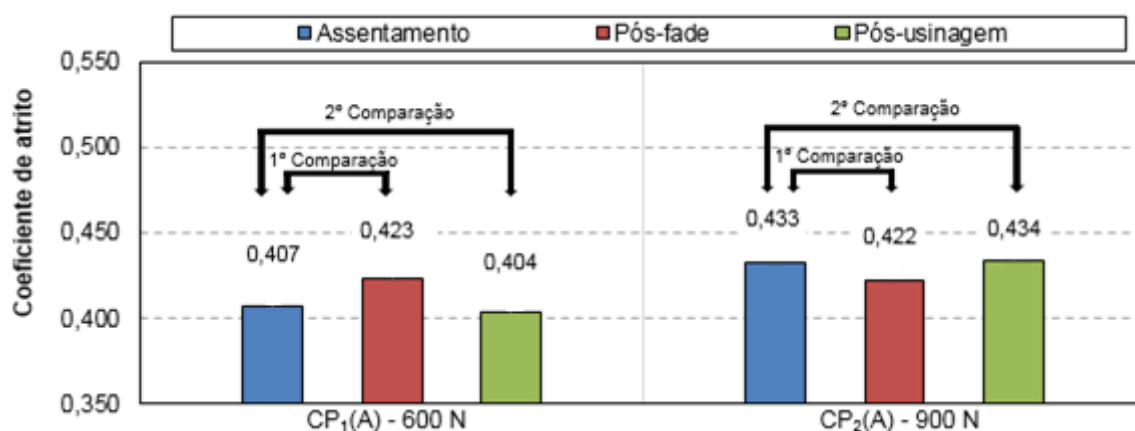


Figura 5.2 – Médias dos coeficientes de atrito para o CP₁(A) e CP₂(A)

É possível observar por meio da 1^o comparação que há relativamente uma considerável diferença do coeficiente de atrito entre a etapa de pós-*fade* e a etapa de assentamento para as duas amostras. Assim, através da 1^o comparação feita para as duas amostras da Figura 5.2, pode-se pressupor que o efeito de *fade* altera as propriedades do material A. Contudo, quando feita a 2^o comparação para as duas amostras, as etapas de pós-usinagem e de assentamento tiveram coeficientes de atrito bem próximos. Logo, através da 2^o comparação o atrito parece retornar ao comportamento do material virgem (etapa de assentamento).

A Figura 5.3 mostra as médias dos coeficientes de atrito das etapas de assentamento, pós-*fade* e pós-usinagem realizados com o CP₁(B). Para o cálculo destas médias não foi considerado o período anterior à estabilização do coeficiente de atrito do assentamento. Neste caso, foram eliminadas as 120 primeiras frenagens para todas três etapas.

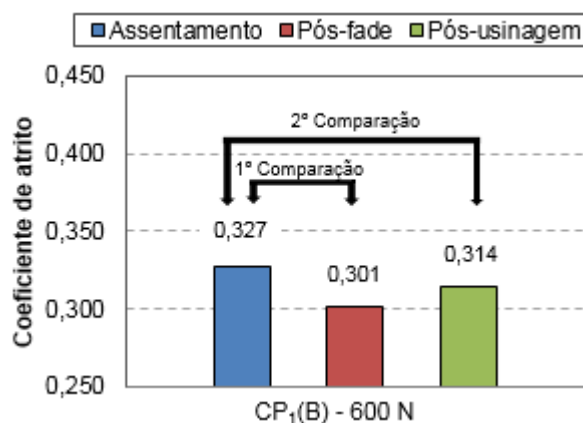


Figura 5.3 – Médias dos coeficientes de atrito das etapas para o CP₁(B).

Nota-se através da 1^o comparação realizada para o corpo de prova do material B, uma considerável alteração entre os coeficientes de atrito da etapa de pós-*fade* e a etapa de assentamento, o mesmo ocorrido para os corpos de prova do material A. Por meio da 2^o comparação, novamente, nota-se alteração entre o atrito médio da etapa de pós-usinagem e da etapa de assentamento. É importante salientar que esta última comparação tem um comportamento oposto ao material A.

5.3. Análise de Variância (ANOVA)

Foi calculado o método ANOVA utilizando o software Excel com o intuito de verificar se houve uma influência significativa do fator (efeito *fade*) sobre a variável (coeficiente de atrito) nas etapas de pós-*fade* e pós-usinagem em relação a etapa de assentamento (1º e 2º comparação respectivamente). Foi utilizado um nível de significância de F a 5%. O número de frenagens utilizadas para esta análise é o mesmo da análise gráfica a qual foram excluídas as frenagens referentes ao período anterior à estabilização do atrito (20, 10 e 120 primeiras para CP₁(A), CP₂(A) e CP₁(B) respectivamente).

A Tabela 5.1 a seguir mostra os resultados obtidos através do método de ANOVA realizado para a 1º comparação dos três corpos de prova.

Tabela 5.1 – Resultados da ANOVA para a 1º comparação

	Assentamento/Pós- <i>fade</i>		
	F _{crítico}	F _{calculado}	Influência
CP ₁ (A)	3,900	47,097	Significativa
CP ₂ (A)	3,895	133,036	Significativa
CP ₁ (B)	3,880	504,232	Significativa

Percebe-se que o efeito *fade* ocasionou uma significativa influência no coeficiente de atrito das três amostras ensaiadas. Mesmo resultado foi observado por meio da análise gráfica.

A Tabela 5.2 abaixo mostra os resultados da 2º comparação feita através da ANOVA.

Tabela 5.2 – Resultados da ANOVA para a 2º comparação

	Assentamento/Pós-usinagem		
	F _{crítico}	F _{calculado}	Influência
CP ₁ (A)	3,900	3,304	Não significativa
CP ₂ (A)	3,895	0,886	Não significativa
CP ₁ (B)	3,880	148,698	Significativa

Nota-se que os corpos de prova do material A deixam de ter influência significativa do efeito *fade* na etapa de pós-usinagem. Entretanto, verificou-se que, todavia, existe uma significativa influência do efeito *fade* no atrito do material B, mesmo após ter sido removido cerca de 1 mm em altura da camada superficial.

Através de resultados da ANOVA é possível perceber que para uma certa espessura de camada verificada alguns materiais podem retornar ao seu comportamento de atrito inicial, como foi o caso do material A, e outros não, como é o caso do material B.

5.4. Porcentagem de Recuperação Pós-*fade* e Pós-usinagem (1º e 2º comparação)

A partir das médias dos coeficientes de atrito obtidas para as etapas de assentamento, pós-*fade* e pós-usinagem foram calculadas as porcentagens de recuperação pós-*fade* e pós-usinagem de acordo com valores da Tabela 5.3 e Equações 5.1 e 5.2.

$$\% \text{ Recuperação pós-} \textit{fade} = \frac{\text{Média do coeficiente de atrito da etapa pós-} \textit{fade}}{\text{Média do coeficiente de atrito da etapa de assentamento}} \times 100 \quad (5.1)$$

$$\% \text{ Recuperação pós-usinagem} = \frac{\text{Média do coeficiente de atrito da etapa pós-usinagem}}{\text{Média do coeficiente de atrito da etapa de assentamento}} \times 100 \quad (5.2)$$

	Assentamento	Pós-fade	Pós-usinagem
	Média do Coeficiente de Atrito		
CP ₁ (A)	0,407	0,433	0,404
CP ₂ (A)	0,433	0,422	0,434
CP ₁ (B)	0,327	0,301	0,314

Tabela 5.3 – Média dos coeficientes de atrito para as etapas de assentamento, pós-fade e pós-usinagem para os três corpos de prova.

Estas recuperações podem ser vistas através da Figura 5.4. É importante salientar que para esta análise foi utilizado o mesmo número de frenagens das análises anteriores, desconsiderando as frenagens anteriores à estabilização do atrito.

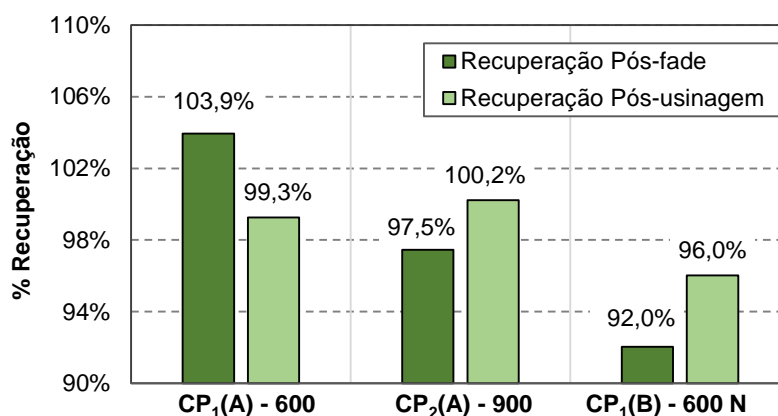


Figura 5.4– Porcentagem de recuperação pós-fade e pós-usinagem para os três corpos de prova

Nota-se que a porcentagem de recuperação pós-fade mais próxima a 100%, é de 97,5% para o CP₂(A). Conforme resultados da ANOVA (seção 5.3), nesta etapa (pós-fade) do CP₂(A), ainda existe a influência do *fade* sobre o atrito. Logo, pode-se afirmar que este valor de 97,5% de recuperação ainda sofre influência do *fade*. Percebe-se uma recuperação pós-usinagem muito próxima a 100% para os dois corpos de prova (CP₁(A) e CP₂(A)) do material A. Este fato corresponde ao esperado quando comparado aos resultados obtidos no método ANOVA, podendo-se pressupor que não existe mais a influência do efeito de *fade* na camada superficial do material. No entanto, a recuperação pós-usinagem para o CP₁(B) foi de 96% do atrito inicial, conforme resultados ANOVA (seção 5.3), pode-se afirmar que para este percentual de recuperação ainda exista a influência do efeito *fade* sobre o comportamento do material.

5.5. Avaliação do Desgaste em Altura e da Porcentagem de Recuperação

A Tabela 5.4 apresenta o desgaste em altura para os três corpos de prova após a etapa de pós-fade e após a etapa de pós-usinagem e suas respectivas porcentagens de recuperação. É importante salientar que o Δh_2 leva em conta a diferença de altura provocada pelo desgaste somada a altura removida pelo processo de usinagem da amostra, conforme mostram os dados do Apêndice B.

Tabela 5.4 – relação entre o desgaste em altura e % de recuperação.

	$\Delta h1^*$ (mm) // Recuperação Após Etapa de Pós- <i>fade</i> (%)	$\Delta h2^{**}$ (mm) // Recuperação Após Etapa de Pós-usinagem (%)
CP ₁ (A) – 600 N	0,0810 // 103,9	1,0154 // 99,3
CP ₂ (A) – 900 N	0,4553 // 97,5	1,6705 // 100,2
CP ₁ (B) – 600 N	0,0868 // 92,0	1,2768 // 96,0

* Diferença de alturas após etapa de pós-*fade* e após etapa de *fade*

**Diferença de alturas após etapa de pós-usinagem e altura após etapa de *fade*

Baseado no experimento conduzido neste trabalho, e conforme resultados da Tabela 5.4, pode-se dizer que para o CP₁(A) e CP₂(A) a camada superficial afetada pelo *fade* praticamente retornou a 100% do atrito inicial após a etapa de pós-usinagem. Este fato aconteceu para um $\Delta h2$ de 1,0154 mm para o CP₁(A) e $\Delta h2$ de 1,6705 para CP₂(A). Esta altura é o resultado da remoção por usinagem somado ao desgaste de 200 frenagens (100 frenagens da etapa de pós-*fade* + 100 frenagens da etapa de pós-usinagem). No entanto, o material B atingiu uma recuperação de 96% para um $\Delta h2$ de 1,2768 mm. Esta recuperação, de acordo com ANOVA, ainda indica a existência da influência do efeito *fade* no material. Logo, pode-se afirmar que a espessura afetada pelo *fade* é maior do que a altura removida (200 frenagens da etapa de pós-*fade* + usinagem + 200 frenagens etapa de pós-usinagem) que foi de 1,2768 mm.

5.6. Avaliação do Desgaste por Perda de Massa

A Figura 5.5 mostra as taxas de desgaste específico (por frenagem) calculadas utilizando a Equação 5.3.

$$\text{Taxa de desgaste específico} = \frac{\text{Diferenças de massas medidas antes e após a realização do ensaio}}{\text{Nº de frenagens do ensaio}} \quad (5.3)$$

É importante dizer que o desgaste na etapa de pós-usinagem leva em conta apenas a perda de massa referente as frenagens realizadas durante esta etapa, não sendo contabilizado a perda de massa pelo processo de usinagem.

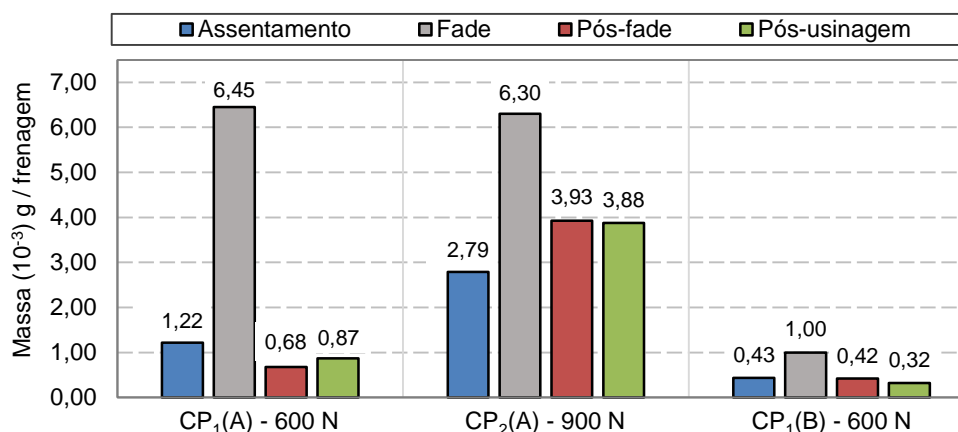


Figura 5.5 – Medidas de perda de massa por frenagem de cada etapa.

Pelo gráfico acima, nota-se que ao utilizar uma força de 600 N o material A apresenta um maior desgaste em relação ao material B. Ao comparar as duas amostras do material A, nota-se um maior desgaste do CP₂(A), onde foi aplicada uma força de 900N, exceto na etapa de *fade* onde foi aplicada a mesma força de 1200 N para ambos corpos de prova. É observado um alto desgaste durante a etapa *fade*, fato já comprovado por outros autores. Observa-se também a inexistência de um comportamento padrão do desgaste pós-*fade* e pós usinagem, a fim de justificar a formação de uma camada protetora oriunda da pastilha que pudesse reduzir

o desgaste. Isto prova o quanto é difícil encontrar um modelo preciso para previsão de desgaste em materiais de fricção utilizados em freios.

6. CONCLUSÕES

Neste estudo, verificou-se que a influência provocada pelo efeito de *fade* no atrito pode ser reversível (apenas numa camada superficial), bem como, este efeito ser dependente do material e da força normal utilizada. Para isto, foram comparados os atritos das diferentes etapas através da análise gráfica e do método de análise de variância (ANOVA). Ambos os métodos obtiveram resultados semelhantes. Os experimentos realizados com as duas amostras do material A comprovaram que ambas, após submetidas a altas temperaturas (*fade*) possuíram uma capacidade de recuperação de quase 100% após o desgaste e remoção de uma camada superficial. Entretanto, para o corpo de prova composto pelo material B, houve apenas uma recuperação de 96% do atrito, pressupondo ainda a existência da influência do efeito *fade* sobre o material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, A. E.; **“Proceedings of Fiber in Friction Materials Symposium”**, 1987.
- Balotin, J. G.; **“Procedimento para Ensaio de Materiais de Atrito Utilizando um Tribômetro”**, Dissertação de mestrado, 83 p., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2010.
- Bijwe, J.; **“Composites as Friction Materials: Recent Developments in non-asbestos Fibers Reinforced Friction Materials”**, Polym, Compos. 378-398, 1997.
- Bijwe, J.; Nidhi; Majumdar N.; Satapathy, B. K.; **“Influence of Modified Phenolic Resins on the Fade and Recovery Behaviour of Friction Materials”**, Wear 259, pp. 1068-1078, 2005.
- Bijwe, J.; Nidhi; Satapathy, B. K.; **“Influence of Amount of Resin on Fade and Recovery Behaviour of non-asbestos Organic (NAO) Friction Materials”**, Trans. Indian Inst. Met., Vol.57, No, 4, pp. 335-344, 2004.
- Blau, P.J.; Mc Laughlin, J.C.; **“Effects of Water Films and Sliding Speed on the Frictional Behavior of Truck Disc Brake Materials”**, Tribology Internacional 36, p. 709-715, 2003.
- Butt, H. J.; Graf, K.; Kappl, M.; **“Physics and Chemistry of Interfaces”**, 2003.
- Eriksson M.; Jacobson S.; **“Tribological Surfaces of Organic Brake Pads”**, Tribology Internacional 33 p. 817-827, 2000.
- Eriksson M.; Bergman F.; Jacobson S.; **“On the Nature of Tribological Contact in Automotive Brakes”**, Wear 252 (2002), pg 26-36.
- Halliday, D.; Resnick, R.; Walker, J.; **Fundamentos de Física – Volume 1**, LTC, Rio de Janeiro, 1996.
- Kosbe, P.; More, C.; **“Characterization of Fade and Recovery Behaviour of Brake Friction Materials”** 2011.

Kumar, M.; Bijwe, J.; **“Studies o Reduced Scale Tribometer to Investigate the Effects of Metal Additives on Friction Coefficient, Temperature Sensitivity in Brake Materials”**, Wear, vol. 269, edição 11-12, p. 838-846, 2010.

Matozo, L. T.; **“Análise de Materiais de Fundo de Alto Amortecimento e de Seus Efeitos em Pastilhas de Freio”**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2006.

Montgomery, D.C.; Runger, G.C.; **“Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros”**, Quarta Edição, LTC, 2009.

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”**, Dissertação de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2012.

Neis, P. D.; **“Projeto e Construção de Um Tribômetro Para Estudos Relacionados a Materiais de Fricção Veiculares”**, Dissertação de mestrado, 84 p., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2008.

Neis, P.D.; Ferreira, N.F.; Lorini, F.J.; Giacomelli, J.F.; **“Contribuição para a Análise de Dispersão do Coeficiente de Atrito de Frenagens Realizadas em um Tribômetro com Materiais de Fricção”**, 10 p., VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM 2010, Paraíba, Brasil, 2010.

Neuman, R.F.; Urban, J.A; McNinch J.H.; **“Performance Characterization of Dry Friction Materials”**, Braking of Road Vehicles, Mechanical Engineering Publications Ltd, London, p. 233-238, 1983.

Ostermeyer, G.P.; **“Friction and Wear of Brake Systems”**, Forschung Im Ingenieurwesen 66, p. 267-272, 2001.

Rehkopf, J.; Halderman, J. D.; **“Automotive Brake Systems”**, Prentice Hall, 4th edition. 2006.

Rusnak R.M.; Spurgeon W.M.; Aldrich F.W. **“Friction Material Testing”**, Society of Automotvie Engineers, paper 700517, 1970.

Serbino, E. M.; **“Um estudo dos mecanismos de desgaste em disco de freio automotivo ventilado de ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar ”**, Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

Timte, M. A.; **“Comparison of Lining Output Generated Using AK-Master and FMVSS 105 Simulation Dynamometer Procedures”**, Society of Automotive Engineers, paper 2000-01-2777, 2000.

Tirovic M.; Day A. J.; **“Disc Brake Interface Pressure Distributions”**, Journal of Automobile Engineering, pg. 137-146, 1991.

Tsang, P.H.S.; Jacko, M.G.; Rhee, S.K.; **“Comparison of Chase and Inertial Brake Dynamometer Testing of Automotive Friction Materials”**, Wear, p. 129-137, 1985.

ANEXO A – INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

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

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

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

A.1 Incerteza de Medição do Coeficiente de Atrito

A incerteza do coeficiente de atrito é obtida através das incertezas das variáveis torque, força normal e raio de deslizamento [Neis, 2012]. Para a faixa de operação utilizada nos ensaios deste trabalho, a incerteza de medição do coeficiente de atrito é inferior a $\pm 2,92\%$.

A.2 Incerteza de Medição do Torque e da Força Normal

As incertezas de medição instrumental resultante do processo de medição do torque e da força é a combinação de incertezas individuais dos dispositivos no sistema. Determinando as incertezas de $\pm 0,036$ Nm para torque de $\pm 12,75$ N para força [Neis, 2012].

A.3 Incerteza de Medição de Temperatura

Esta grandeza está relacionada com o somatório de incertezas individuais do termopar tipo K, do condicionador de sinal e do sistema de aquisição e controle de dados. Através da equação X, é apresentada essa combinação de incertezas.

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

Onde $U(TK)$ é a incerteza de medição combinada [°C], $u(k)$ é a incerteza do termopar tipo K [°C], $u(ck)$ é a incerteza do condicionador de sinal [°C] e $u(sa)$ é a incerteza associada à capacidade de resolução do sistema de aquisição de dados [°C]

Para os valores de temperatura utilizados neste experimento, tem-se uma incerteza de $\pm 2,38$ °C para baixas temperaturas (100 °C) e $\pm 3,13$ °C para elevadas temperaturas (*fade*), com um intervalo de confiança de 95%.

A.4 Incerteza de Medição de Altura da Máquina de Medir Coordenadas

A incerteza de medição de altura para este equipamento para valores utilizados neste experimento, está na ordem de 0,005 mm.

APÊNDICE A - COMPORTAMENTO DO ATRITO PARA AS TRÊS AMOSTRAS ENSAIADAS

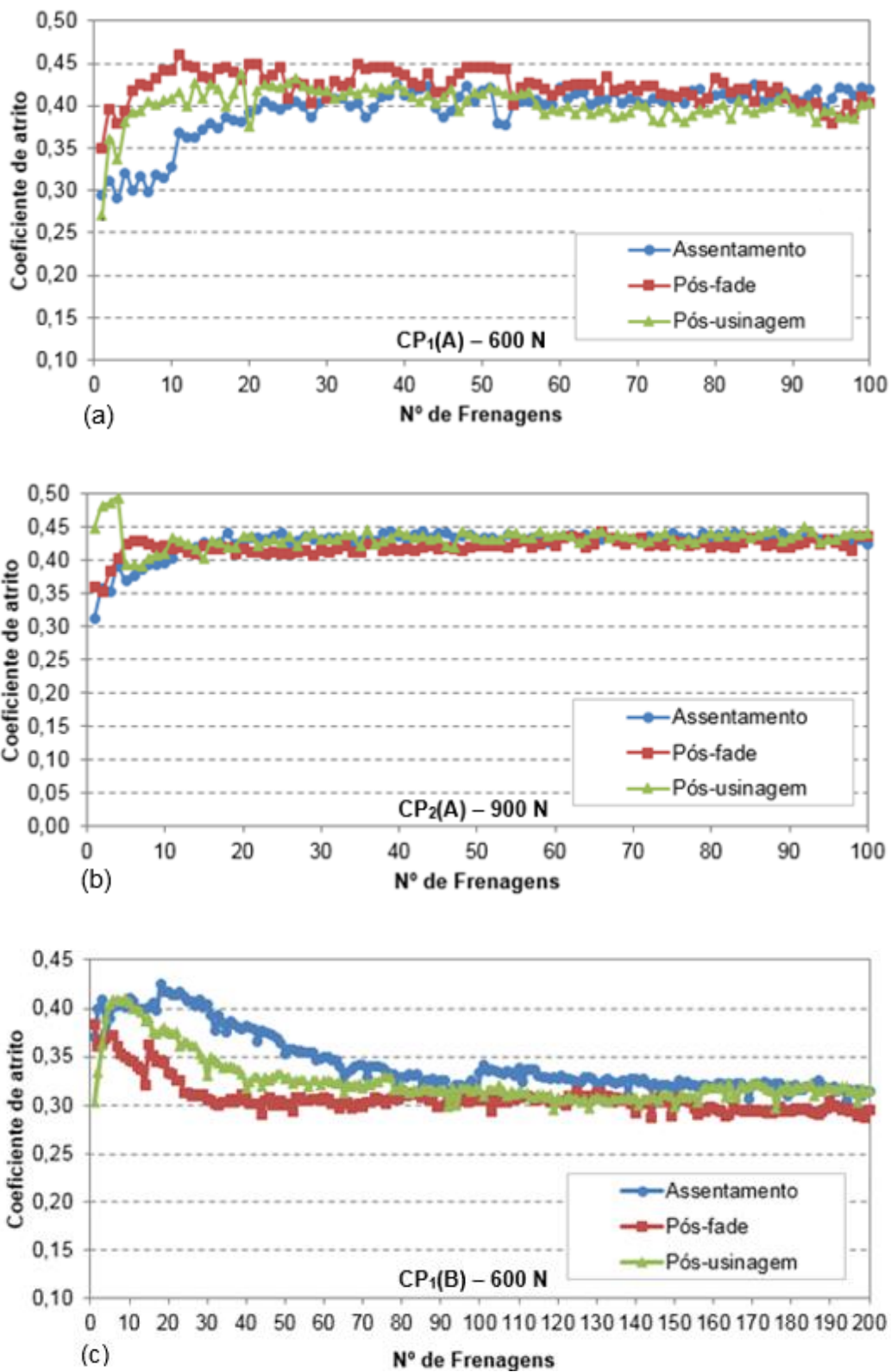


Figura A.1 – Atrito das etapas de assentamento, pós-fade e pós assentamento para (a) CP₁(A); (b) CP₂(A); (c) CP₁(B)

APÊNDICE B - DESGASTE EM ALTURA PARA OS TRES CORPOS DE PROVA

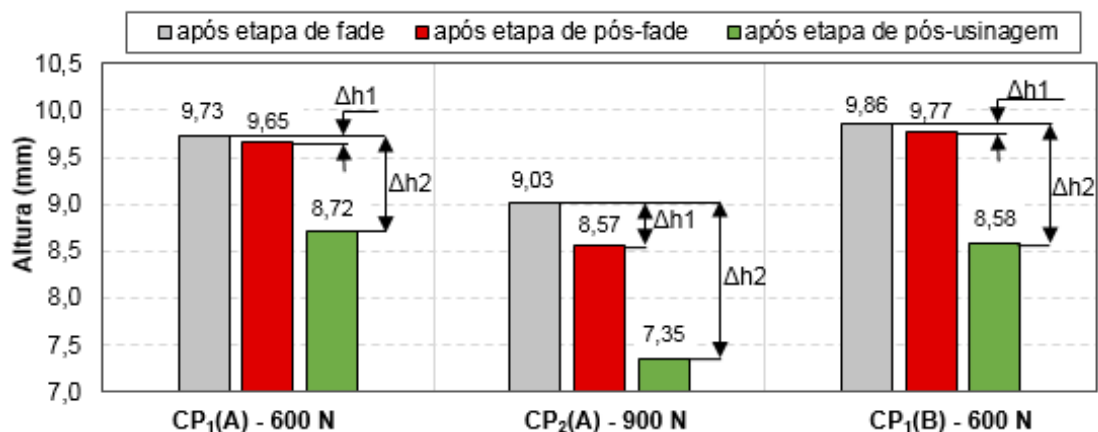


Figura B.1 – Relação de desgaste em altura entre as etapas para os três corpos de prova

Tabela B.1 – Medidas de desgaste em altura para (a) CP₁(A); (b) CP₂(A); (c) CP₁(B)

		Altura (mm)					
		Virgem	Após 100 frenagens (Assentamento)	Após Fade	Após 100 Frenagens (Pós-fade)	Após usinado	Após 100 frenagens (Pós-usinagem)
Ponto	1	10,5541	10,3708	9,7037	9,6328	8,8497	8,7048
	2	10,5706	10,3647	9,7210	9,6191	8,8756	8,6896
	3	10,5632	10,3966	9,7581	9,6708	8,8389	8,7206
	4	10,5442	10,4037	9,7535	9,6913	8,8820	8,7446
	5	10,5424	10,3764	9,7282	9,6457	8,8848	8,7279
Média		10,5549	10,3824	9,7329	9,6519	8,8662	8,7175

(a)

		Altura (mm)					
		Virgem	Após 100 frenagens (Assentamento)	Após Fade	Após 100 Frenagens (Pós-fade)	Após usinado	Após 100 frenagens (Pós-usinagem)
Ponto	1	10,0231	9,6730	9,0148	8,5685	7,7351	7,3723
	2	10,0137	9,6682	9,0312	8,5592	7,7472	7,3623
	3	10,0286	9,6593	9,0295	8,5729	7,7574	7,3475
	4	10,0472	9,6892	9,0027	8,5614	7,7236	7,3258
	5	10,0282	9,6725	9,0471	8,5869	7,7526	7,3647
Média		10,0282	9,6724	9,0251	8,5698	7,7432	7,3545

(b)

		Altura (mm)					
		Virgem	Após 100 frenagens (Assentamento)	Após Fade	Após 100 Frenagens (Pós-fade)	Após usinado	Após 100 frenagens (Pós-usinagem)
Ponto	1	10,2104	10,0565	9,8435	9,7735	8,7369	8,5884
	2	10,1957	10,0323	9,8520	9,7468	8,7390	8,5603
	3	10,1543	10,0769	9,8651	9,7778	8,7335	8,5776
	4	10,1728	10,0768	9,8638	9,7852	8,7547	8,6067
	5	10,1479	10,0607	9,8653	9,7722	8,7350	8,5729
Média		10,1762	10,0606	9,8579	9,7711	8,7398	8,5812

(c)