

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

ANÁLISE DA QUEDA DO ATRITO DE MATERIAIS DE FRICÇÃO EM INTERVALOS DE
PARADA DE ENSAIOS DE FRENAGEM

por

Marcelo Rodrigues Viveiros

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

ANÁLISE DA QUEDA DO ATRITO DE MATERIAIS DE FRICÇÃO EM INTERVALOS DE
PARADA DE ENSAIOS DE FRENAGEM

por

Marcelo Rodrigues Viveiros

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. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador 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. Ney Francisco Ferreira

Prof. Dr. Tiago Becker

Porto Alegre, 04 de julho de 2019.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ser meu maior companheiro nessa jornada.

Aos meus pais Jocines e Janete, por motivos mais que óbvios.

Aos meus avós Estevão e Maria, por serem os maiores exemplos de fé e bondade que já testemunhei.

À família Krav Maga, por todos os bons momentos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Patric Neis, por toda paciência, disponibilidade, sabedoria e conhecimentos transmitidos ao longo desses meses.

A toda equipe do LATRIB (Professores, Doutorandos, Mestrandos, Bolsistas e agregados) pelo acolhimento e apoio ao longo desse trabalho.

“Faça, mas faça certo.”

Imi Lichtenfeld

VIVEIROS, M.R. **Análise da queda do atrito de materiais de fricção em intervalos de parada de ensaios de frenagem**. 2019. 16p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

RESUMO

Um fenômeno frequentemente observado nos experimentos relacionados à Tribologia consiste na queda brusca dos valores médios do coeficiente de atrito em intervalos de parada de máquina (tribômetro). Esse fenômeno pode distorcer os dados médios de atrito e comprometer os resultados e conclusões da pesquisa. Pouco se sabe sobre esse fenômeno e os parâmetros que interferem em sua ocorrência e intensidade. Para compreender melhor a natureza do problema e as variáveis envolvidas, foi analisado o comportamento tribológico de dois materiais de fricção comerciais em diferentes condições de temperatura (100 e 300 °C) e tempo de parada de máquina (30, 120 e 240s). Para tal, foi utilizado o tribômetro do Laboratório de Tribologia (LATRIB) da UFRGS, que permitiu realizar o estudo sob as condições de interesse estabelecidas. Os valores do coeficiente de atrito em função do número de frenagens foram organizados em forma de gráficos e o efeito do intervalo de parada do tribômetro foi devidamente analisado através de ferramentas gráficas e matemáticas. Os dados levantados mostraram que maiores variações no atrito ocorrem em temperaturas em torno de 300°C e em tempos de parada de máquina maiores ou iguais a 120s. A intensidade do efeito difere de um material para outro, mas as tendências permanecem semelhantes.

PALAVRAS-CHAVE: Tribologia, Queda do Atrito, Material de Fricção.

VIVEIROS, M.R. **Analysis of the friction fall in friction materials in stopping intervals of braking tests.** 16p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

ABSTRACT

A phenomenon frequently observed in the experiments related to Tribology consists of the sharp decrease of the average values of the coefficient of friction in machine stop intervals (tribometer). This phenomenon can affect the average friction data and compromise the results and conclusions of the research. There is little knowledge about this phenomenon and the parameters that interfere in its occurrence and intensity. To comprehend better the nature of the problem and the variables involved, the tribological behavior of two commercial friction materials under different temperature (100 and 300 °C) and machine stop intervals (30, 120 and 240s) conditions was analyzed. For doing that, the tribometer of the Tribology Laboratory (LATRIB) of UFRGS was used, which allowed the study to be carried out under the established conditions of interest. The values of the coefficient of friction as a function of the number of braking stops were organized as graphs and the machine stop effect was analyzed through graphical and mathematical tools. The collected data showed that higher friction variations occur at temperatures around 300 °C and at machine stop times greater than or equal to 120s. The intensity of the effect differs from one material to another, but the trends remain similar.

KEYWORDS: Tribology, Friction decrease, Friction Material.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
2.1. Objetivo Geral.....	2
2.2. Objetivos Específicos.....	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3.1. Tribologia e Atrito.....	2
3.2. Tribômetro.....	2
3.3. Materiais de Fricção.....	2
3.4. Fatores que Influenciam no Coeficiente de Atrito.....	3
3.5. ANOVA.....	4
3.6. Assentamento.....	4
4. METODOLOGIA	4
4.1. O Tribômetro do LATRIB.....	4
4.2. Corpos de Prova e Disco de Freio.....	5
4.3. Parâmetros de Ensaio.....	5
4.4. Comparação das condições de interesse.....	7
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	8
5.1. Corpo de prova “A” (para temperatura de 100 e 300 °C).....	8
5.2. Corpo de prova “B” (para temperatura de 100 e 300 °C).....	9
5.3. Análise Estatística.....	10
5.3.1. Comparação entre material “A” e “B”	11
5.3.2. Comparação entre as temperaturas.....	12
5.3.3. Comparação entre os tempos de parada de máquina.....	12
6. CONCLUSÕES	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13
Apêndice I.....	16

1. INTRODUÇÃO

Na sua definição, atrito significa uma força de oposição ao movimento relativo entre superfícies em contato (Czichos, 1978). O atrito está presente em diversas aplicações da engenharia mecânica. Às vezes seu efeito é desejado (freios de automóveis, por exemplo) e outras vezes não, como no contato entre os dentes de duas engrenagens em operação. Por esses motivos é fundamental identificar, mensurar e avaliar esse elemento da natureza.

O Laboratório de Tribologia da UFRGS (LATRIB) desenvolve uma série de pesquisas relacionadas ao atrito e desgaste dos materiais, em especial entre os seguintes pares tribológicos: material de fricção (pastilha ou lona) contra o rotor (disco ou tambor). Para essas linhas de pesquisas, utiliza-se um tribômetro desenvolvido por Neis, 2012, capaz de reproduzir frenagens sob condições controladas de temperatura, força, tempo, rotação, torque, entre outras.

Em alguns procedimentos específicos de ensaio executados no tribômetro, há necessidade de retirar a amostra de pastilha ou lona de freios durante os testes. É o caso, por exemplo, quando se deseja fazer microscopias da superfície da amostra. Durante esse intervalo de tempo em que a amostra está sendo manipulada, que pode durar de poucos segundos até dezenas de minutos, a máquina fica parada. Ao recolocar a amostra no tribômetro para reinício dos ensaios, nota-se uma queda repentina nos valores do atrito nas primeiras aplicações de frenagem. Tal efeito já havia sido previamente observado por Neis et al., 2014 durante ensaios de frenagem que duraram dois dias, com paradas de máquina no período da noite (ver figura 1.1). Na ocasião, foram empregados dois tipos distintos de materiais de fricção. Notou-se uma queda significativa nos valores do atrito entre um dia e outro do experimento para ambos os materiais. Porém, naquele estudo os autores se limitaram a mostrar tal efeito, sem buscar explicações mais aprofundadas para o mesmo.

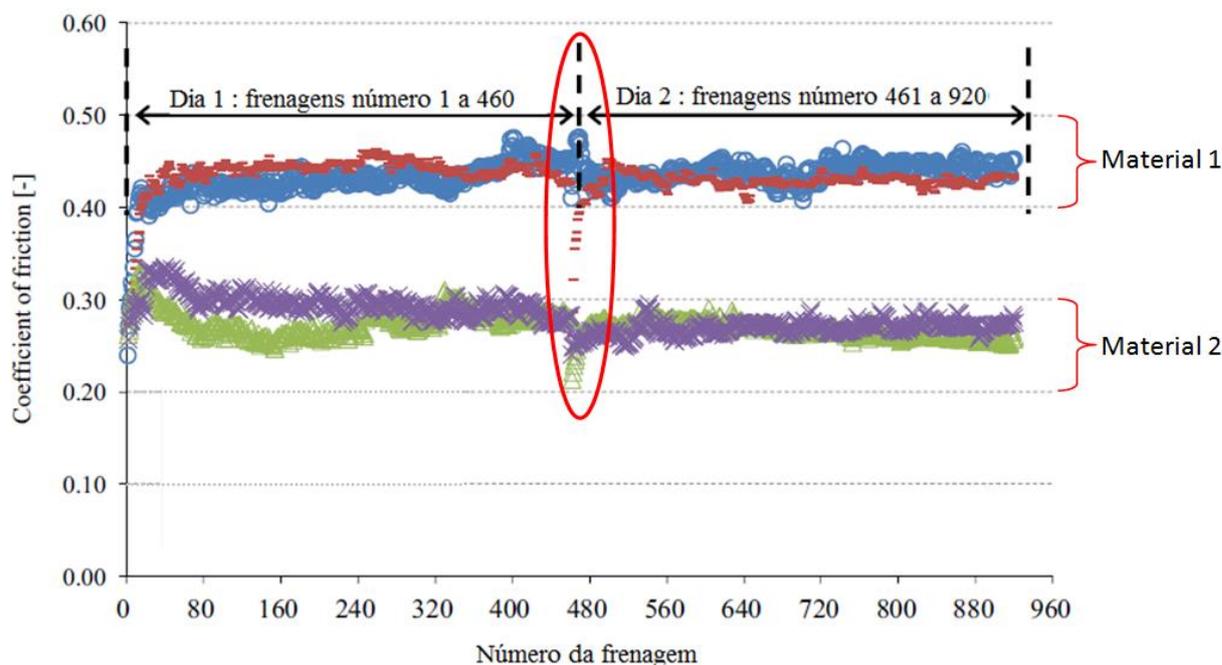


Figura 1.1 – Fenômeno observado por Neis et al., 2014 no intervalo entre um dia e outro de um ensaio com dois materiais de fricção.

O efeito da queda abrupta do atrito em intervalos de parada da máquina é, de certa forma, indesejado, uma vez que pode distorcer os dados médios de atrito e comprometer os resultados e conclusões da pesquisa. A literatura, de um modo geral, aborda muito superficialmente o tema e os fatores que o ocasionam.

O presente trabalho visa contribuir no sentido de entender um pouco melhor esse fenômeno até então pouco discutido, juntamente com os fatores que influenciam mais ou menos o seu agravamento. Para estudar o tema, foi desenvolvida uma metodologia experimental que permite testar diferentes combinações das variáveis de interesse (temperatura, natureza do material e tempo de parada de máquina).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O principal objetivo do trabalho é estudar o efeito do intervalo de tempo de parada de máquina (parada do tribômetro) sob a queda de atrito em diferentes materiais de fricção.

2.2. Objetivos Específicos

Verificar se o efeito da queda abrupta do atrito após parada do tribômetro é mais forte sob condições de temperatura elevada.

Procurar, na medida do possível, fundamentar e quantificar os efeitos observados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Tribologia e Atrito

A tribologia abrange o estudo de lubrificantes e lubrificação, atrito e desgaste (Dowson, 1998). O termo foi definido como a “ciência e tecnologia de superfícies interativas em movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionados” (Jost, 1990). Em tribologia, o atrito é entendido como a oposição ao movimento relativo entre sólidos, partículas, fluidos ou uma combinação desses [Schulze, 2007]. O atrito pode ser dividido em dois grandes grupos: o atrito cinético (ou dinâmico), aquele que está presente no movimento relativo entre duas superfícies e o atrito estático, aquele que deve ser vencido para se iniciar o movimento (Butt, 2013).

A tribologia reúne os conhecimentos adquiridos na física, química, mecânica e ciência dos materiais para explicar e prever o comportamento de sistemas físicos que são utilizados em sistemas mecânicos. O que unifica a tribologia não são os conhecimentos básicos, mas sim a área de aplicação (Sinatora, 2005).

3.2. Tribômetro

O Tribômetro consiste em um equipamento de teste que tem por finalidade determinar propriedades do atrito e desgaste de combinações de materiais e lubrificantes sob condições de carga, temperatura, velocidade e atmosfera controladas (Radi, 2007). Segundo Neis, 2008, um tribômetro pode ser utilizado como ferramenta de apoio à pesquisa para a compreensão de fenômenos tribológicos.

3.3. Materiais de Fricção

Os materiais de fricção empregados em freios automotivos devem atender a uma série de requisitos de projeto dentre os quais se destacam: coeficiente de atrito elevado e estável, reduzida taxa de desgaste, e baixa produção de ruído e vibrações (Eriksson, 2002).

Existem inúmeros arranjos possíveis de matérias primas que podem formar as pastilhas ou lonas, porém três famílias de materiais de fricção se destacam na classificação desses componentes: *NAO (Non-Asbestos Organic)*, *Low-Met* e *Semi-Met*. A terminologia *NAO* se refere a materiais de fricção em que não há presença de fibras metálicas ferrosas, o que proporciona menor desgaste a frio e baixos valores do coeficiente de atrito [Matozo, 2012].

De forma contrária, o grupo dos *Semi-Met* apresenta elevado percentual de fibras ferrosas, além de abrasivos de maior dureza. Isso favorece o mecanismo de desgaste abrasivo, o que aumenta o nível de atrito obtido, mas acelera o desgaste do par tribológico e propicia uma maior produção de ruído [Matozo, 2012]. Já a família dos *Low-Met* são materiais de fricção que também possuem fibras ferrosas, só que em menores quantidades em relação aos *Semi-Met*. Os compósitos utilizados nas matrizes desses materiais geram propriedades (atrito e desgaste) intermediárias daquelas existentes nas outras duas famílias [Matozo, 2012].

3.4. Fatores que influenciam no coeficiente de atrito

Muitos fatores influenciam nos valores medidos do coeficiente de atrito, dentre eles se destacam: temperatura, velocidade e pressão de contato entre as superfícies (Neuman, 1983). No entanto, outros autores da área de Tribologia apontam mais alguns fatores que interferem significativamente nos valores do atrito tais como: composição química do material, umidade, porosidade, microestrutura do material, formação do filme de fricção e histórico de frenagens do material.

A influência de cada componente, bem como o desenvolvimento de novos materiais de fricção, tem sido intensamente estudada a fim de melhorar o desempenho dos pares tribológicos. A composição química dos materiais atritados exerce influência direta sobre o atrito e o desgaste, conforme atestado por diversos estudos [Coyle et al., 1983 ; Kim e Jang, 2000].

É consenso entre os autores que a carga normal age no sentido da diminuição do coeficiente de atrito [Ostermeyer, 2003]. Já Tirovic e Day, 1991, afirmam que a forma como a pressão é distribuída sob as superfícies tribológicas influi diretamente no valor médio do atrito.

Ostermeyer, 2003, verificou em seus experimentos que, em velocidades de deslizamento mais baixas, há um rápido aumento do coeficiente de atrito.

O aquecimento do par tribológico resulta em reações químicas que alteram as propriedades mecânicas e estruturais do material, assim como a deposição de partículas desgastadas em ambas as superfícies (Eriksson, 2002). Segundo Blau e McLaughlin, 2003, frenagens em altas temperaturas (entre 300 °C e 400 °C) resultam em uma redução da tensão de cisalhamento e, por consequente, geram o efeito do *fade*, que consiste na queda considerável do atrito de um material de fricção submetido a altas temperaturas.

A formação do filme (também conhecido como terceiro corpo) se dá pelo arrancamento de partículas oriundas das superfícies de pastilha e disco, onde sua composição é determinada principalmente pelo lubrificante sólido presente na formulação do material de fricção [Österle e Urban, 2006]. O filme interfere diretamente no desempenho de materiais de fricção, pois a sua presença evita o contato direto entre as superfícies da pastilha e disco [Jang et al., 2004].

Blau e McLaughlin, 2003, através de experimentos, mostraram que o atrito cai significativamente sob condições de frenagem aplicando jato de água quando comparados a frenagens a seco.

A porosidade dos materiais de fricção está envolvida na transmissão do calor de fricção e no som produzido durante a frenagem. Também auxilia na liberação dos gases oriundos da decomposição que podem vir a gerar o fenômeno do *fade* durante uma frenagem muito repentina. Seus efeitos estão diretamente relacionados à conservação do par tribológico e aumento da vida útil dos materiais. Com o aumento da porcentagem de porosidade, o coeficiente de atrito dinâmico tende a aumentar, mas a tendência do coeficiente de atrito estático é o inverso (Rouge et al., 1995).

3.5. ANOVA

Entende-se por ANOVA (Análise de Variância) uma técnica estatística que permite avaliar afirmações sobre as médias de populações. A análise visa, fundamentalmente, verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente (Milone, 2009).

A ANOVA compara médias de diferentes populações para verificar se essas populações possuem médias iguais ou não. Assim, essa técnica permite que vários grupos sejam comparados ao mesmo tempo. Em outras palavras, a análise de variância é utilizada quando se quer decidir se as diferenças amostrais observadas são reais (causadas por diferenças significativas nas populações observadas) ou casuais (decorrentes da mera variabilidade amostral). Portanto, essa análise parte do pressuposto que o acaso só produz pequenos desvios, sendo as grandes diferenças geradas por causas reais (Milone, 2009).

3.6. Assentamento

Assentamento é um processo tribológico que tem por objetivo assegurar um contato uniforme do material atritado com a superfície do disco, visando uma estabilização do atrito. O Número de frenagens mínimo para que isso ocorra varia de material para material (Kumar e Bijwe, 2010).

4. METODOLOGIA

4.1. O Tribômetro do LATRIB

O funcionamento do tribômetro do LATRIB se dá pelo corpo de prova que exerce uma força normal sobre o disco de freio devido à pressão do atuador pneumático. O ponto de aplicação dessa força está a uma distância predeterminada do eixo de rotação, denominada raio de deslizamento. A interação entre o disco girante e o corpo de prova causa uma força de atrito, que exerce um torque frenante sobre o eixo de rotação do disco. A Figura 4.1 ilustra esquematicamente os componentes do tribômetro.

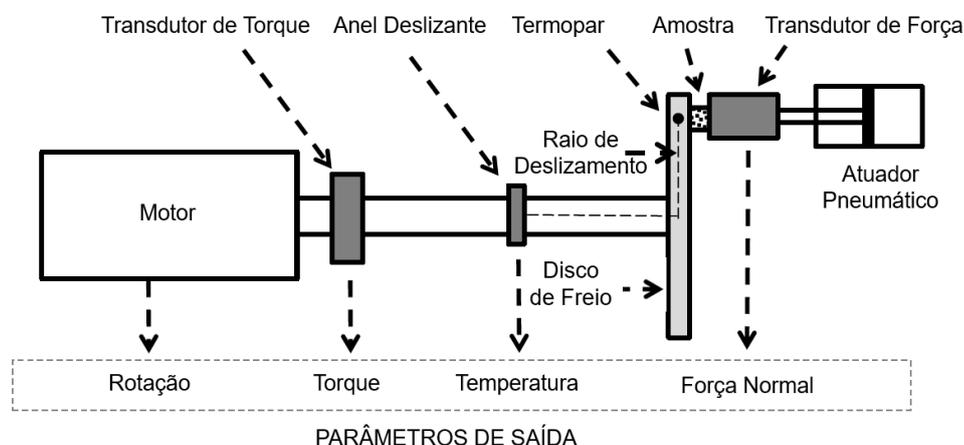


Figura 4.1 - Representação esquemática do tribômetro [adaptado de Neis et al., 2017].

Os dados do ensaio são coletados pelo software de aquisição e controle do equipamento e posteriormente processados com o auxílio dos *softwares* Matlab e Excel. O coeficiente de atrito $\mu[-]$ é obtido a partir da solução da equação 4.1 no software do Tribômetro, onde “T” é o torque frenante [Nm] obtido pelo transdutor de torque, “F” é a força aplicada pelo atuador pneumático [N], medida pela célula de carga e “R” é o raio [mm] da trilha onde a amostra realiza o contato, medido por uma régua potenciométrica.

$$\mu = \frac{T}{(R \cdot F)} \quad (4.1)$$

4.2. Corpos de Prova e Disco de Freio

O disco de freio utilizado (Figura 4.2 à esquerda) é do tipo sólido feito de ferro fundido cinzento (material amplamente utilizado na indústria de freios). O disco possui termopar tipo K instalado a 3 mm da sua superfície, permitindo assim a medição da temperatura durante os testes de frenagem. A etapa de preparação do disco consistiu em lixar a superfície que entra em contato com os corpos de prova, e para isso utilizou-se oito lixas específicas para metal em ordem crescente de granulação (200, 240, 400, 500, 600, 1000, 1500, 2000). Para regular o alinhamento do disco foi utilizado um relógio comparador da marca Pantec modelo 12326-100. O alinhamento foi feito de forma que o valor medido no relógio não ultrapassasse 20 μm na direção axial.

Os dois corpos de prova “A” e “B” (geometria cilíndrica de 18 mm de diâmetro) indicados à direita na figura 4.2 são lonas comerciais usinadas em formato de disco e coladas a um suporte específico para conexão com atuador pneumático do tribômetro. O corpo de prova “A” possui uma composição química diferente do corpo de prova “B”. As composições químicas detalhadas de ambas as amostras são tratadas como informações confidenciais pela indústria especializada. Foram realizados dois processos de lixamento do disco, um para cada amostra (“A” e “B”).

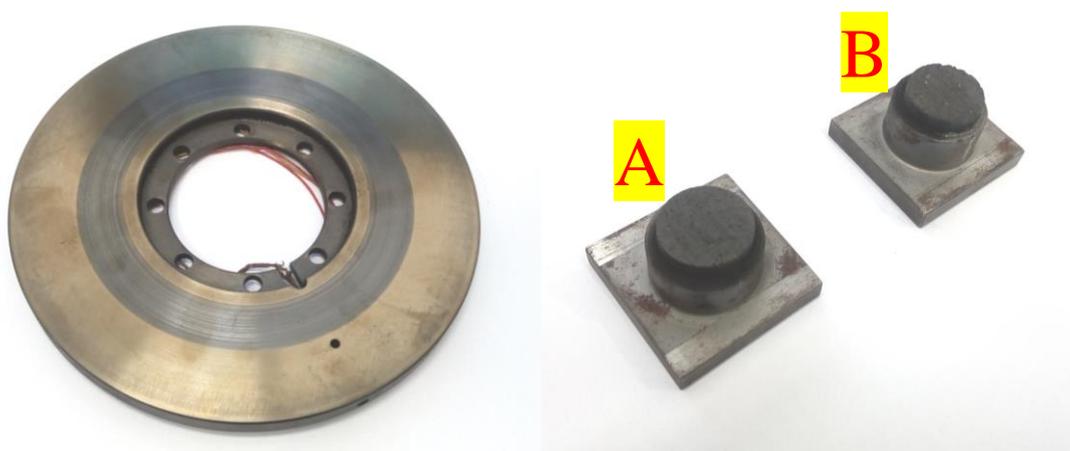


Figura 4.2 – Disco de freio (à esquerda) e corpos de prova (à direita) utilizados nos testes.

4.3. Parâmetros dos Ensaio

A tabela 4.1 sumariza os parâmetros operacionais empregados neste estudo. Foram realizados um total de 15 ciclos, onde cada ciclo contém 20 frenagens. Os tempos de parada de máquina ocorrem entre ciclos. Antes de se realizar o experimento propriamente dito, foi realizado o processo de assentamento. Para tal, foram executadas 50 frenagens consecutivas (valor determinado empiricamente) isso fez com que o valor do coeficiente de atrito se tornasse relativamente estável em torno de um valor inicial.

A temperatura de ensaio de 100 °C foi escolhida por ser um valor bem próximo das aplicações reais das pastilhas e lonas de freio comerciais. E para observar o efeito da temperatura no fenômeno estudado, escolheu-se um valor bem maior que esse (300°C) a fim de se fazer um contraponto. O raio do disco utilizado para as frenagens foi de 57,5 mm.

Tabela 4.1 – Parâmetros operacionais dos testes.

Corpo de prova	Temperatura	Número de frenagens por ciclo	Número total de ciclos	Total de frenagens	Rotação (constante) [RPM]	Força normal [N]	Tempo entre frenagens [s]
A	100 °C	20	15	300	1281	200	6
	300 °C						
B	100 °C						
	300 °C						

A tabela 4.2 apresenta os tempos de parada de máquina avaliados. Para visualizar melhor a intensidade do efeito escolheram-se os intervalos de 30, 120 e 240 segundos. A cada conjunto de 5 ciclos, alterou-se o intervalo de tempo entre ciclos.

Tabela 4.2 – Tempos de parada de máquina avaliados no presente estudo.

Corpo de prova	Temperatura	Tempo de parada de máquina
A	100 °C	30s
		120s
		240s
	300 °C	30s
		120s
		240s
B	100 °C	30s
		120s
		240s
	300 °C	30s
		120s
		240s

Com as informações da tabela 4.2, definiu-se o conceito de “Condição de interesse” do estudo como sendo a combinação dos três parâmetros principais de ensaio (material, temperatura e tempo de parada de máquina). Por exemplo, o Material “A” à 300 °C com um tempo de parada de 120 segundos (Material “A” 300°C/120s) constitui uma condição de interesse do estudo.

Os dados de atrito médio (μ) foram plotados em função do número de frenagens (N). Assim, o efeito estudado ficou mais evidente. Para completar a análise, foram feitas avaliações estatísticas com os dados obtidos a fim de caracterizar o comportamento de cada condição de interesse e determinar se houve variação significativa do coeficiente de atrito entre uma condição e outra.

4.4. Comparação das condições de interesse

Para se determinar se as variações numéricas entre uma condição de interesse e outra foram de fato significativas, aplicou-se a ferramenta matemática conhecida como ANOVA de fator único através do software Excel.

Pela análise do fator “P” e dos fatores “F” e “F crítico” pode-se inferir se a variação foi significativa ou não.

Caso o fato “P” seja menor que 0,05 ($P < 0,05$) ou “F” seja maior que “F crítico” ($F > F$ crítico) pode-se afirmar com uma confiabilidade de 95 % que houve uma variação significativa entre as duas condições de interesse comparadas. A figura 4.3 traz um exemplo disso.

Anova: fator único						
RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Material "B" 300 °C /120 s	5	0,10516	0,02103	9,1E-05		
Material "B" 300 °C /240 s	5	0,18907	0,03781	4,8E-05		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,00070409	1	0,0007	10,1664	0,01283	5,31766
Dentro dos grupos	0,000554055	8	6,9E-05			
Total	0,001258146	9				



É possível afirmar com certeza que existe diferença!

Figura 4.3 – Exemplo de ANOVA em que há certeza que as condições de interesse apresentam variação entre si.

Caso o fator “P” seja maior ou igual a 0,05 ($P \geq 0,05$) ou “F” seja menor ou igual a “F crítico” ($F \leq F$ crítico) não se pode afirmar que houve uma variação significativa entre as duas condições de interesse comparadas. A figura 4.4 traz um exemplo disso.

Anova: fator único						
RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Material "A" 100 °C /240 s	5	0,123069	0,024614	8,22E-05		
Material "A" 300 °C /240 s	5	0,153808	0,030762	6,76E-05		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	9,44902E-05	1	9,45E-05	1,262071	0,293838	5,317655
Dentro dos grupos	0,000598953	8	7,49E-05			
Total	0,000693443	9				



Não é possível afirmar com certeza que existe diferença!

Figura 4.4 – Exemplo de ANOVA em que não há certeza que as condições de interesse apresentam variação entre si.

Essa análise foi feita para todos os cruzamentos das condições de interesse em estudo e os resultados encontram-se no apêndice I.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 5.1 apresenta uma curva típica obtida nos ensaios. Para cada operação de frenagem (eixo das abscissas) tem-se um valor correspondente do coeficiente de atrito (eixo das ordenadas). As diferentes escalas de cores representam curvas geradas em temperaturas diferentes. Nesta “curva exemplo” tem-se 100 frenagens para cada temperatura. Os pontos destacados pelas elipses correspondem à etapa entre ciclos em que, ao final das 20 frenagens, o tribômetro é desligado, aguarda-se o tempo de análise e posteriormente religa-se o equipamento para dar início ao ciclo seguinte. Essa região destacada corresponde ao interesse principal do presente trabalho. Todas as conjecturas, análises estatísticas e gráficas foram feitas levando em consideração essas quedas de atrito.

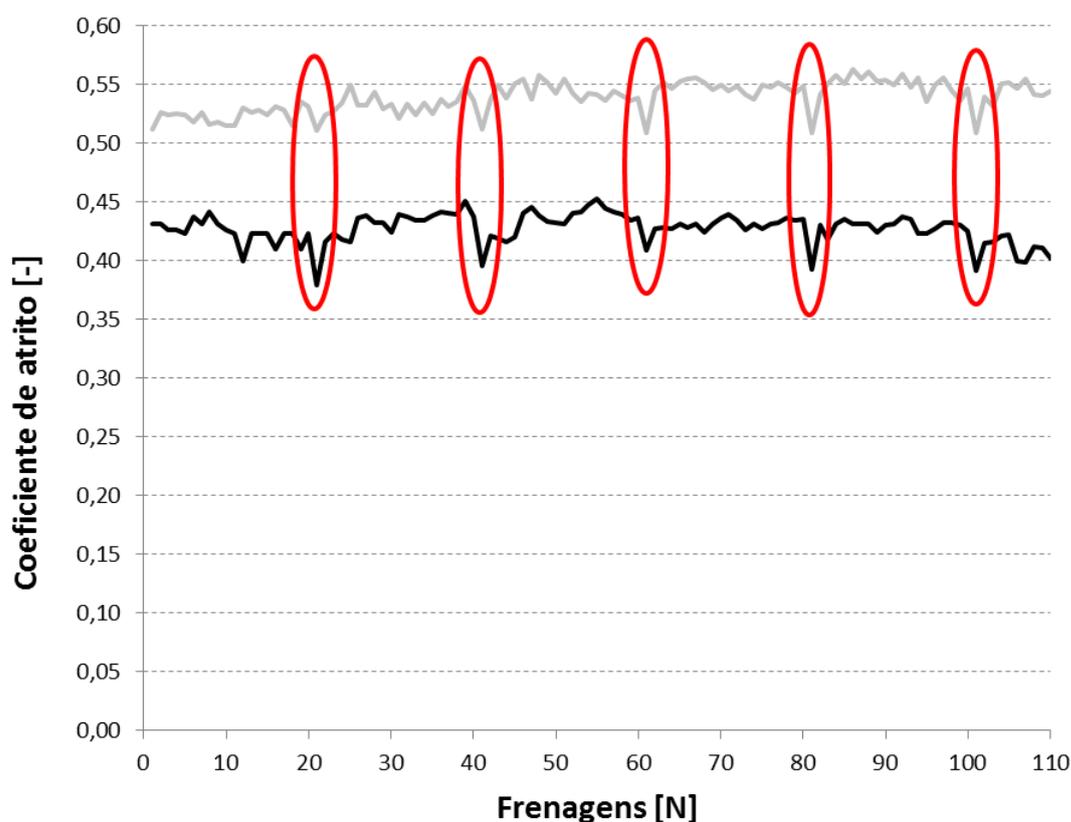


Figura 5.1 – Curva que exemplifica a organização dos dados e o fenômeno a ser estudado.

Vale ressaltar que as regiões de interesse do gráfico (onde ocorre a parada da máquina e a transição entre um ciclo e outro) se encontram sempre nas frenagens de números múltiplos de vinte (20, 40, 60, 80...).

5.1. Corpo de prova “A” (para temperatura de 100 e 300 °C)

Os valores do coeficiente de atrito medidos para o corpo de prova “A” na temperatura de 100 e 300 °C são mostrados na figura 5.2. O gráfico é separado em regiões delimitadas por linhas verticais em que cada região representa um tempo de parada de máquina diferente (tempo que o tribômetro fica desligado entre um ciclo e outro). Os tempos de parada de máquina representados no gráfico estão indicados acima de cada região.

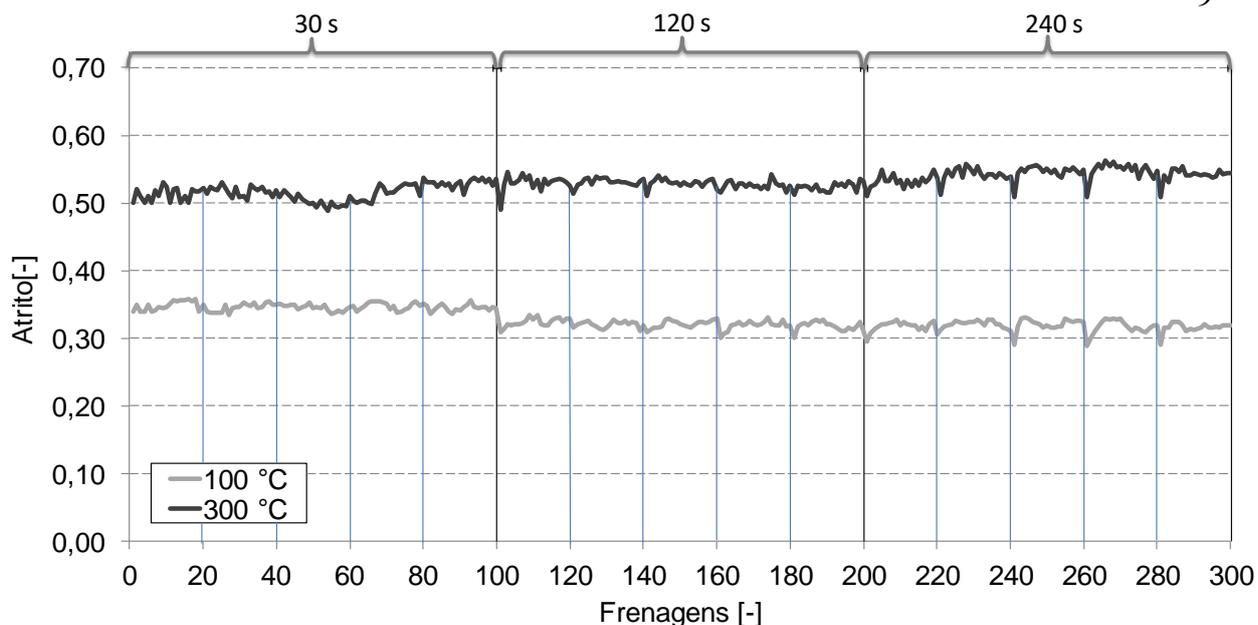


Figura 5.2 – Resultados obtidos para as temperaturas de 100 e 300 °C (material A).

Primeiramente, se observa que os valores absolutos do atrito são maiores para a temperatura de 300 °C em comparação com 100 °C em todas as regiões do gráfico. Esse comportamento tribológico está relacionado à natureza química do material de fricção e não é objeto de estudo deste trabalho.

Na primeira região do gráfico (tempo de parada de máquina de 30s) a queda do atrito é relativamente pequena, sendo quase imperceptível uma variação nos valores do coeficiente de atrito em qualquer frenagem do ciclo tanto na temperatura de 100 °C quanto na de 300 °C.

Na segunda região do gráfico (tempo parada de máquina de 120s) têm-se variações parecidas em ambas as temperaturas. Observa-se ao final de cada ciclo de 20 frenagens e começo do ciclo seguinte uma queda nos valores do coeficiente de atrito visualmente maior que na região anterior (30s) para as duas temperaturas.

Na terceira região do gráfico (tempo de parada de máquina de 240s) observam-se quedas um pouco mais acentuadas que nas regiões anteriores para ambas condições de temperatura.

5.2. Corpo de prova “B” (para temperatura de 100 e 300 °C)

Os valores do coeficiente de atrito medidos para o corpo de prova “B” à temperatura de 100 e 300 °C são mostrados na figura 5.3. Novamente o gráfico é separado em regiões delimitadas por linhas verticais em que cada região representa um tempo de parada de máquina diferente (tempo que o tribômetro fica desligado entre um ciclo e outro). Os tempos de parada de máquina representados no gráfico estão indicados acima de cada região.

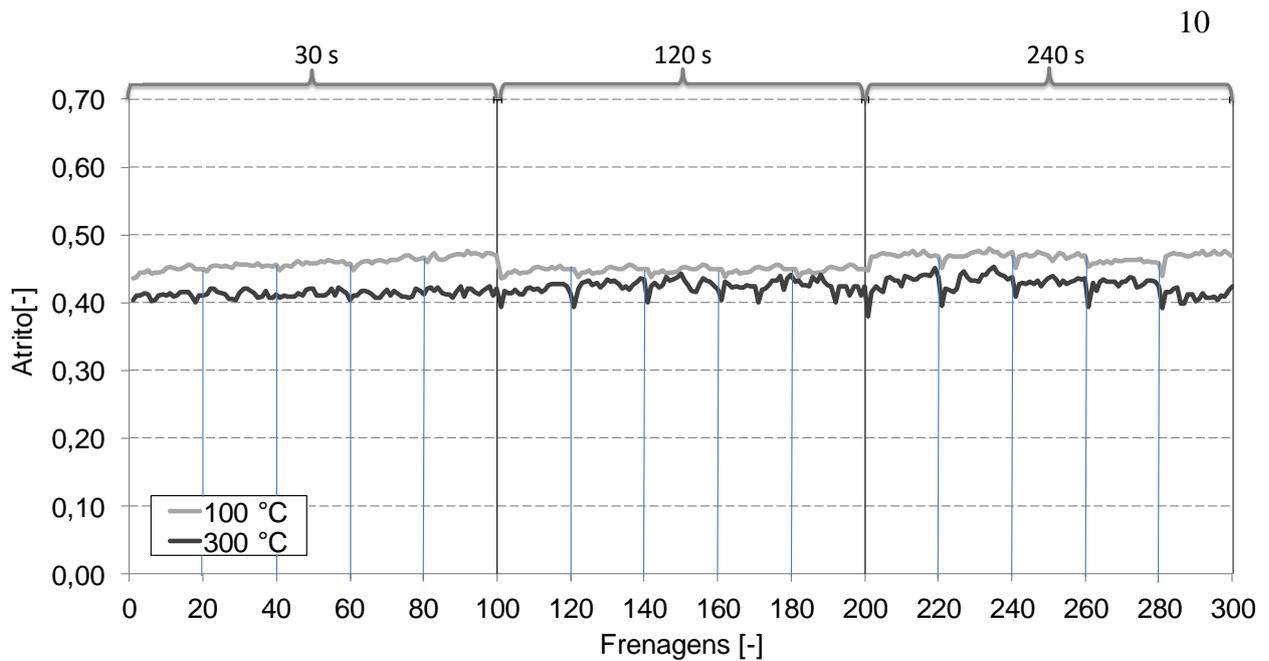


Figura 5.3 – Resultados obtidos para as temperaturas de 100 e 300 °C (material B).

Ao contrário do que se observou para a amostra “A”, os valores absolutos do coeficiente de atrito para a amostra “B” são maiores para a temperatura de 100 °C em todas as regiões do gráfico. Tal constatação ilustra o comportamento tribológico diferente do material da amostra “B” em relação à amostra “A” oriundo das diferenças químicas entre as amostras.

Na primeira região do gráfico (tempo de parada de máquina de 30s) a queda do atrito é relativamente pequena, sendo quase imperceptível a queda nos valores do coeficiente de atrito em qualquer frenagem do ciclo tanto na temperatura de 100 °C quanto na de 300 °C.

Na segunda região do gráfico (tempo parada de máquina de 120s) as variações para 300 °C são visualmente maiores que as variações para 100 °C. Observa-se ao final de cada ciclo e começo do ciclo seguinte uma queda nos valores do coeficiente de atrito aparentemente maior que na região anterior (30s) para as duas temperaturas.

Na terceira região do gráfico (tempo de parada de máquina de 240s) observam-se quedas bem mais acentuadas que nas regiões anteriores para ambas as condições de temperatura. Novamente, as variações para 300 °C são visivelmente maiores que as variações para 100 °C. Tal efeito não foi percebido para o material “A”.

5.3. Análise Estatística

Para se obter uma conclusão quantitativa da queda de atrito devido ao efeito do tempo de parada de máquina, calculou-se a queda do coeficiente de atrito ($\Delta\mu$) entre os ciclos de frenagem. Para isso, considerou-se a última frenagem do ciclo anterior menos a primeira frenagem do ciclo seguinte, tal como expresso pela equação 5.1.

$$\Delta\mu = \mu_{i-1} - \mu_i \quad (5.1)$$

onde o índice “i” representa o número da primeira frenagem do ciclo seguinte e “i-1” representa o número da última frenagem do ciclo anterior.

Por exemplo, utilizou-se o valor do atrito medido na frenagem de número 60 subtraído do valor do atrito medido na frenagem de número 61 para determinar a queda após o tempo de parada de máquina de 30 segundos. Tal como ilustrado na figura 5.4.

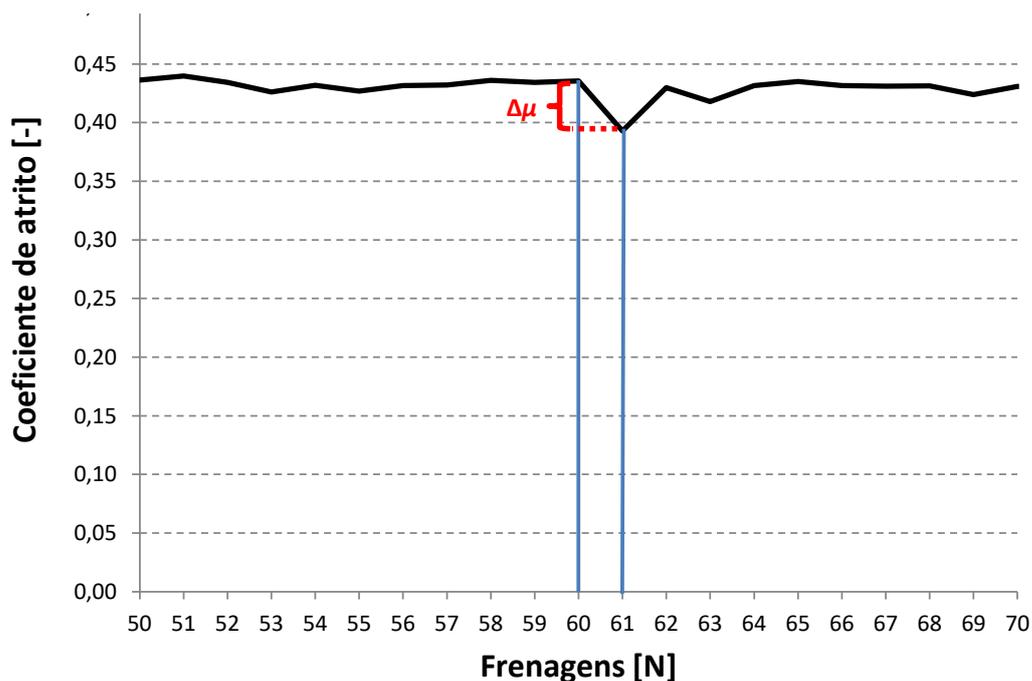


Figura 5.4 – Exemplo de como se calculou a queda do coeficiente de atrito ($\Delta\mu$).

Com os dados das quedas de atrito obtidos, calculou-se a média aritmética das quedas. A figura 5.5 apresenta os resultados obtidos para as médias das quedas. Também se utilizou o recurso gráfico conhecido como “Barra de erro” a fim de ilustrar a variabilidade entre as 5 medições da queda de atrito.

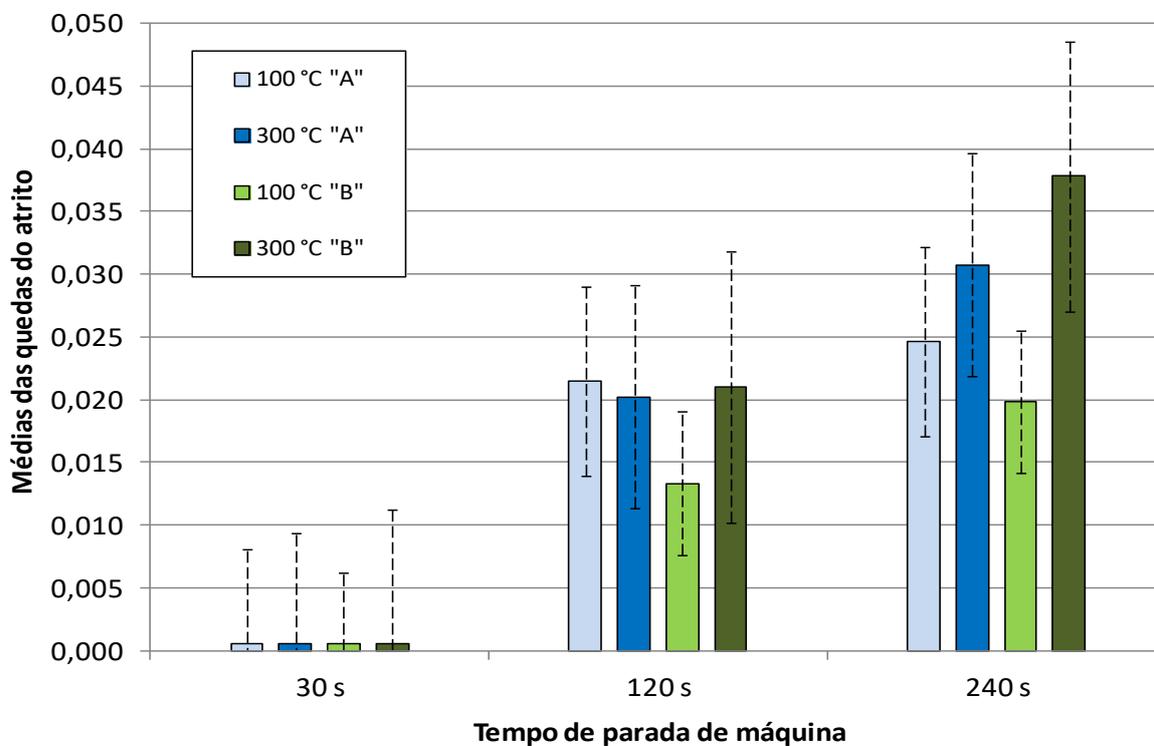


Figura 5.5 – Médias das quedas dos valores do atrito.

A seguir serão comparadas através da ANOVA as condições de interesse mais relevantes para se estabelecer conclusões concretas acerca dos fatores que influenciam o fenômeno.

5.3.1. Comparação da queda do atrito nos materiais “A” e “B”.

A tabela 5.1 traz as diferentes combinações das condições de interesse aplicadas comparando-se o material “A” com o “B” através da ANOVA, empregando um Índice de Confiabilidade de 95%. Por exemplo, a primeira linha da tabela 5.1 informa que não houve variação significativa entre a condição de interesse do material “A” 100°C/30s em relação à condição de interesse do material “B” 100°C/30s.

Tabela 5.1 – Comparação da queda do atrito nos materiais “A” e “B”.

Tempo de parada de máquina	Temperatura	Houve variação significativa do $\Delta\mu$ entre “A” e “B”?
30s	100 °C	X
	300 °C	X
120s	100 °C	X
	300 °C	X
240s	100 °C	X
	300 °C	X

Com base nos resultados da tabela 5.1, dados para um Índice de Confiabilidade de 95%, pode-se concluir que não há diferenças significativas entre as magnitudes da queda de atrito ($\Delta\mu$) observadas para os materiais de fricção de diferentes naturezas químicas, materiais A e B.

5.3.2. Comparação da queda do atrito nas temperaturas de 100 e 300 °C.

A tabela 5.2 traz as diferentes combinações das condições de interesse aplicadas comparando-se as temperaturas de 100 e 300 °C através da ANOVA, empregando um Índice de Confiabilidade de 95%. Por exemplo, a primeira linha da tabela 5.2 informa que não houve variação significativa entre a condição de interesse do material “A” 100°C/30s em relação à condição de interesse do material “A” 300°C/30s.

Tabela 5.2 – Comparação da queda do atrito nas temperaturas de 100 e 300 °C.

Tempo de parada de máquina	Material	Houve variação significativa do $\Delta\mu$ entre 100 e 300 °C?
30s	A	X
	B	X
120s	A	X
	B	X
240s	A	X
	B	✓

Com base nos resultados da tabela 5.2, dados para um Índice de Confiabilidade de 95%, pode-se concluir que não há diferenças significativas entre as magnitudes da queda de atrito ($\Delta\mu$) observadas para temperaturas diferentes (100 e 300 °C) exceto para o material “B” no tempo de 240s. Provavelmente isso se deve a composição química do material “B” que o torna mais sensível ao fenômeno de queda de atrito em altas temperaturas.

5.3.3. Comparação da queda de atrito nos diferentes tempos de parada de máquina

As tabelas 5.3 à 5.5 trazem as diferentes combinações das condições de interesse aplicadas comparando-se os diferentes tempos de parada de máquina (30s com 120s, 120s com 240s e 30s com 240s) através da ANOVA, empregando um Índice de Confiabilidade de 95%. Por exemplo, a primeira linha da tabela 5.3 informa que houve variação significativa entre a condição de interesse do material “A” 100°C/30s em relação à condição de interesse do material “A” 100°C/120s.

Tabela 5.3 – Comparação entre as quedas de atrito nos tempos de 30s e 120s.

Tempo de parada de máquina	Material	Houve variação significativa do $\Delta\mu$ entre 30s e 120s?
100 °C	A	✓
	B	✓
300 °C	A	✓
	B	✓

Tabela 5.4 – Comparação entre as quedas de atrito nos tempos de 120s e 240s.

Tempo de parada de máquina	Material	Houve variação significativa do $\Delta\mu$ entre 120s e 240s?
100 °C	A	X
	B	X
300 °C	A	✓
	B	✓

Tabela 5.5 – Comparação entre as quedas de atrito nos tempos de 30s e 240s.

Tempo de parada de máquina	Material	Houve variação significativa do $\Delta\mu$ entre 30s e 240s?
100 °C	A	✓
	B	✓
300 °C	A	✓
	B	✓

Para o tempo de 30s há uma variação significativa em relação aos tempos superiores em todas as condições, visível na figura 5.5 e comprovada pela ANOVA de confiabilidade 95% mostrada nas tabelas 5.3 e 5.5. Já no tempo de 120s têm-se variações significativas na

comparação com os intervalos de tempo de 30 e 240s. Logo o efeito estudado só se torna relevante a partir de intervalos de 120s.

Na comparação entre 120s e 240s observa-se que em ambos os materiais o efeito é bem mais sensível para alta temperatura, uma vez que os resultados de ANOVA mostram haver diferenças significativas na queda de atrito somente em 300 °C. Isso se deve provavelmente ao efeito da temperatura no coeficiente de atrito, uma vez que altas temperaturas (na ordem de 300 °C) intensificam as reações químicas na superfície do par tribológico e alteram suas propriedades mecânicas e estruturais assim como a quantidade de partículas desgastadas e depositadas em ambas as superfícies. Todas essas consequências do aumento de temperatura acentuam o efeito da queda de atrito em parada de máquina.

6. CONCLUSÕES

Após a realização de todos os ensaios para verificação do fenômeno da queda de atrito nos intervalos de parada de máquina durante testes de frenagem, e depois da análise minuciosa dos dados obtidos através de ferramentas gráficas e matemáticas, baseado na análise estatística para um índice de confiabilidade de 95% pode-se constatar que:

Não houve diferenças significativas entre os materiais A e B avaliados no presente estudo. Logo, o fator natureza química do material não se fez atuante no fenômeno.

O fator Temperatura mostrou diferenças significativas em apenas em um caso (material "B" 240s). Logo, este não parece representar um fator muito expressivo para o fenômeno estudado.

O Tempo de parada de máquina parece ser a variável dominante sobre o efeito da queda de atrito, uma vez que os resultados estatísticos mostraram que em quase todos os casos (exceto à 100 °C na comparação entre 120 e 240s) há diferenças significativas entre as condições analisadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Blau, P.J.; Mc Laughlin, J.C.; **"Effects of water film and sliding speed on the frictional behavior of the truck disc brake materials"**, Tribology International, 2003.

Butt, H. J.; Graf, K;Kappi, M.; **"Physics and chemistry of interface"**, Willy-VCH, 1st edition, 2003.

Coyle, J.P.; **"The effect of rotor metallurgy on brake performance and wear resistance"**, SAE, paper 830533, 1983.

Czichos, H.; **" Tribology: A systems approach to the science and technology of friction, lubrication and wear"**, Elsevier, 1st edition, 1978.

Dowson, D.; **"History of Tribology"**, John Wiley & Sons, Inc., 2nd edition, 1998.

Eriksson, M.; Bergman, F.; Jacobson, S.; **"On the nature of tribological contact in automotive brakes."** Wear, 2002.

Ferreira, N.F.; Neis, P.D.; da Silva, F.P.; **"Comparison between methods for measuring wear in brake friction materials"**, 2014.

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"**, Wear, vol. 256, ed. 3–4, 2004.

Jost, H. P.; **“Tribology-origin and future”**, Wear, 1st edition, 1990.

Kumar, M; Bijwe, J.; **“Studies of reduced scale tribometer to investigate the effects of metal additives on friction coefficient, temperature sensitivity in brake materials”**, Wear, vol 269, edição 11, 2010.

Matozo, L.T., **“Estudo da relação entre propriedades de compósitos de fricção aplicados a sistemas de freio a disco e a propensão à ocorrência de squeal noise.”** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

MILONE, G.; **“Estatística geral e aplicada.”**, Cengage Learning, Primeira edição, 2009.

Neis, P.D., Ferreira, N.F, Fekete, G., Matozo, L.T., Masotti, D.; **"Towards a better understanding of the structures existing on the surface of brake pads"**, 2017.

Neis, P.D; **“Projeto e construção de um tribômetro Para Estudos Relacionados a Materiais de Fricção Veiculares”**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2008.

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, Porto Alegre, Brasil, 2012.

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

Österle, W., Urban, I.; **“Third body formation on brake pads and rotors”**, Tribology International, vol. 39, ed. 5, 2006.

Ostermeyer. G.P.; **“On the Dynamics of Friction Coefficient“**, Wear, Vol. 254, edição 9, 2003.

Rouge, N., Dubois, C., Vermillet, C., & Chambaudet, A.; **“Characterization of the open porosity of brake pads”**. I. Development of 2-D porosity image analysis techniques. Science and Engineering of Composite Materials, 1995.

Schulze, D.; **"Powders and Bulk Solids: Behavior, Characterization, Storage and Flow"**, Springer, 2007.

Sinatora, A.; **“Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte”**, 2005.

Tirovic M., Day A. J.; **“Disc Brake interface pressure distributions”**, Journal Of automotive Engineering, 1991.

APÊNDICE I – Cruzamento de todas as condições de interesse através da ANOVA.

	Material "A" 100 °C /30 s	Material "A" 300 °C /30 s	Material "B" 100 °C /30 s	Material "B" 300 °C /30 s	Material "A" 100 °C /120 s	Material "A" 300 °C /120 s	Material "B" 100 °C /120 s	Material "B" 300 °C /120 s	Material "A" 100 °C /240 s	Material "A" 300 °C /240 s	Material "B" 100 °C /240 s	Material "B" 300 °C /240 s
Material "A" 100 °C /30 s		X	X	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Material "A" 300 °C /30 s	X		X	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Material "B" 100 °C /30 s	X	X		X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Material "B" 300 °C /30 s	X	X	X		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Material "A" 100 °C /120 s	✓	✓	✓	✓		X	X	X	X	✓	X	✓
Material "A" 300 °C /120 s	✓	✓	✓	✓	X		X	X	X	✓	X	✓
Material "B" 100 °C /120 s	✓	✓	✓	✓	X	X		X	✓	✓	X	✓
Material "B" 300 °C /120 s	✓	✓	✓	✓	X	X	X		X	✓	X	✓
Material "A" 100 °C /240 s	✓	✓	✓	✓	X	X	✓	X		X	X	✓
Material "A" 300 °C /240 s	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X		✓	X
Material "B" 100 °C /240 s	✓	✓	✓	✓	X	X	X	X	X	✓		✓
Material "B" 300 °C /240 s	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	