

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

A INFLUÊNCIA DOS RESÍDUOS E DO TEMPO DE RESFRIAMENTO DO DISCO DE FREIO
SOBRE O COMPORTAMENTO DO ATRITO EM FRENAGENS

por

Fábio Mello Montenegro Pittel

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 2011

A INFLUÊNCIA DOS RESÍDUOS E DO TEMPO DE RESFRIAMENTO DO DISCO DE FREIO
SOBRE O COMPORTAMENTO DO ATRITO EM FRENAGENS

por

Fábio Mello Montenegro Pittel

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. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Comissão de Avaliação:

Prof. Ivan Guerra Machado

Prof. Vilson João Batista

Prof. Flávio José Lorini

Porto Alegre, 01, julho de 2011.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por iluminar o caminho trilhado, me dando força nas horas das dificuldades.

Aos meus pais *Rosa* e *Murilo*, por todo apoio e amor que recebi ao longo destes anos.

À minha noiva *Carla*, por toda paciência, compreensão, carinho e preocupação por mim.

Ao meu orientador *Prof. Dr. Ney Ferreira* e ao doutorando *Patric Neis* pela ajuda, disponibilidade e paciência que tiveram para comigo.

Aos meus familiares e amigos, que me ajudaram a conquistar esta graduação.

Aos professores, que transmitiram seus conhecimentos com excelência para eu me tornar um engenheiro que honre à Universidade.

Muito obrigado a todos.

Pittel, F. M. M. **A Influência dos Resíduos e do Tempo de Resfriamento do Disco de Freio sobre o Comportamento do Atrito em Frenagens**. 2011. 21 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RESUMO

Este trabalho tem por finalidade estudar algumas das variáveis que influenciam no comportamento do atrito durante ensaios de frenagem em um tribômetro. Uma delas é o tempo de resfriamento do disco de freio, pois o período que leva para o rotor esfriar e voltar à temperatura inicial do teste não é um parâmetro controlado durante os ensaios. Outra variável refere-se a remoção de fragmentos deixados pela pastilha durante as frenagens e sua implicação em mudanças no atrito do conjunto, determinando a importância da limpeza da superfície do disco antes da execução dos ensaios. Para isso, realizaram-se testes de fricção com durações e temperaturas diversas, com e sem limpeza da superfície do disco para avaliar o coeficiente de atrito. Os resultados indicam que, com base nas amostras, não se pode afirmar que há influência do tempo de resfriamento no comportamento do atrito do rotor. Também se verificou que, pelo número de ensaios realizados, não há depósito significativo destes fragmentos sobre a superfície do disco a ponto de alterar o coeficiente de atrito.

PALAVRAS-CHAVE: Coeficiente de atrito, tempo de resfriamento, limpeza da superfície do disco.

Pittel, F. M. M. **The Influence of Fragments and the Cooling Time on the Brake Disc about the Behavior of Friction in Braking Tests.** 2011. 21 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ABSTRACT

This work aims to study some variables that can influence the friction behavior during braking tests on a tribometer. One of them is the cooling time of a brake disc, because the period it takes for the rotor cooling to return to the initial temperature of the test is not a controlled parameter. Another variable is whether the removal of the fragments released by the brake pad also involves changes in the friction of the process and so to determine the importance of cleaning the surface of the disk before to run the tests. For doing that, braking tests were performed by using different temperatures, cooling time as well as the disk surface was cleaned before to start the measurements in some cases. The results show that based on the number of the samples, the influence of the cooling time on the friction behavior cannot be observed. It was also found that based on the number of tests performed, there is not a significant deposition of fragments on the disk surface able to cause changes in the coefficient of friction.

KEYWORDS: Coefficient of friction, cooling time, cleaning the surface of the disk.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	1
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3.1 Sistema de freios	2
3.2 Desempenho de um Sistema de Freio	4
3.3 Mecanismo Tribológico nos Materiais de Fricção	6
4 MATERIAIS E MÉTODOS	7
5 ENSAIOS	10
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	11
7. CONCLUSÕES	14
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a indústria automotiva está projetando veículos mais velozes e mais potentes, e com isso, há um cuidado maior quando se trata de segurança. Sem as informações precisas sobre o comportamento do atrito, pode haver deterioração no sistema de freios e queda no desempenho do controle de um veículo. Visando um melhor desenvolvimento deste sistema, inúmeros testes são realizados para garantir a qualidade do disco e da pastilha de freio.

Muitos parâmetros podem influenciar o atrito: material, rugosidade da superfície, área de contato, pressão de contato, velocidade de deslizamento, condições ambientais, sistema mecânico, aceleração e desaceleração [Velde e Baets, 1997]. Mas, segundo Neuman e McNinch (1983), há três importantes variáveis que determinam o coeficiente de atrito dos materiais: velocidade do escorregamento, pressão de contato entre os corpos e temperatura.

Verificou-se que, durante ensaios de atrito em bancadas, não há preocupação com o tempo de resfriamento entre as frenagens e não se sabe se esse fator afeta ou não o comportamento do atrito. A mesma ideia aplica-se sobre a remoção dos fragmentos do disco de freio, pois muitas vezes é usado um mesmo disco para vários ensaios com diferentes materiais de fricção e objetivos.

Este trabalho, então, insere-se em uma linha de pesquisa para o grupo do laboratório Grupo de Projetos, Fabricação e Automação Industrial da UFRGS – GPFAI/UFRGS considerando o desenvolvimento de uma metodologia de ensaio de frenagens no tribômetro, dando subsídios a pesquisas referentes aos fenômenos tribológicos.

A análise da influência destes parâmetros foi realizada através de ensaios de frenagem executados em um tribômetro desenvolvido por Neis, 2008.

2. OBJETIVOS

O trabalho visa determinar, de forma experimental, a influência do tempo de resfriamento do disco de freio sobre o comportamento do atrito durante frenagens realizadas em um tribômetro.

Investigou-se ainda, se a remoção dos fragmentos deixados pela pastilha durante as frenagens, também implica em mudanças tanto na emissividade do disco quanto no atrito do conjunto, determinando a necessidade da limpeza da superfície do disco antes da execução dos ensaios.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Sistema de freios

O sistema de freios é um item de segurança do veículo que tem como principal função dissipar a energia cinética. Assim, o veículo pode desacelerar, parar, manter a velocidade em um declive ou manter o corpo parado após a frenagem completa [Limpert, 1999].

Os freios automotivos são classificados pela geometria do rotor em freios a disco e a tambor.

Nos freios a disco, o material de fricção é pressionado axialmente por pistões contra um disco de freio, produzindo uma frenagem [Rehkopf e Halderman, 2006]. Os discos são fabricados em ferro fundido cinzento ou aço, podendo ser aletados ou não.

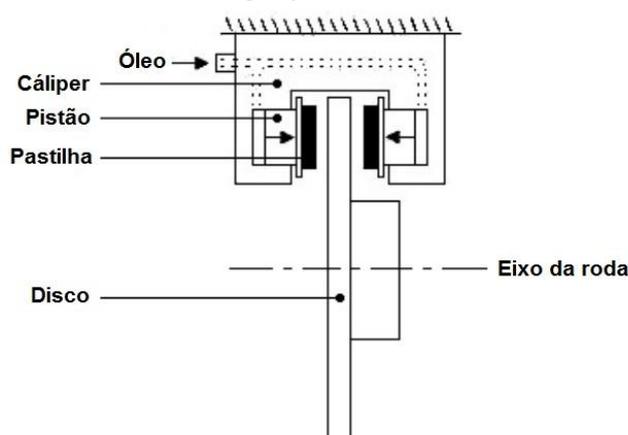


Figura 3.1 – Componentes de um sistema de freio a disco acionado por pistões hidráulicos.

O sistema de freio usa como material de fricção a pastilha de freio, que é um componente cuja finalidade é produzir torque frenante no disco. É o elemento mais importante para o desempenho de freio. Um bom material de fricção garante estabilidade no atrito em diferentes condições de uso [Neuman e McNinch, 1983].

Segundo Eriksson e Jacobson, 2000, os materiais de fricção automotivos são compósitos normalmente formados por compactação a quente. Inúmeros são esses componentes que alteram as propriedades mecânicas, cada uma com uma função específica. Ainda segundo o autor, os materiais incluem:

- **Ligantes:** São resinas fenólicas que aglutinam os outros componentes, formando uma matriz termicamente estável, em que, muitas vezes, é adicionada borracha;
- **Materiais Estruturais:** Proporcionam resistência mecânica. Normalmente são usadas as fibras de metal, carbono e vidro e, mais raramente, diferentes minerais e fibras cerâmicas.
- **Carga:** Usada para reduzir custos e melhorar a manufatura. Diferentes minerais tais como mica e sulfato de bário são utilizados com frequência.
- **Aditivos de atrito:** São adicionados para assegurar a estabilidade das propriedades do atrito e para controlar a taxa de desgaste das pastilhas e do disco. Lubrificantes sólidos como grafite e sulfetos são usados para estabilizar o coeficiente de atrito, principalmente em temperaturas elevadas. Partículas abrasivas, tipicamente de alumina

e sílica, aumentam o coeficiente de atrito e o desgaste do disco através da remoção de óxidos de ferro e outros filmes de superfície indesejáveis.

As pastilhas de freio são fixadas por um elemento metálico, geralmente de ferro fundido, chamado de cáliper. Os cálipers transformam a pressão hidráulica sobre os pistões em força mecânica nas pastilhas sobre o disco. Há dois tipos de cálipers: os fixos e os flutuantes.

Os cálipers fixos contêm um ou mais pares de pistões que atuam de forma simultânea em cada lado do disco. Isso permite que os pistões recebam a mesma pressão, pois são ativados pelo mesmo circuito hidráulico [Rehkopf e Halderman, 2006].

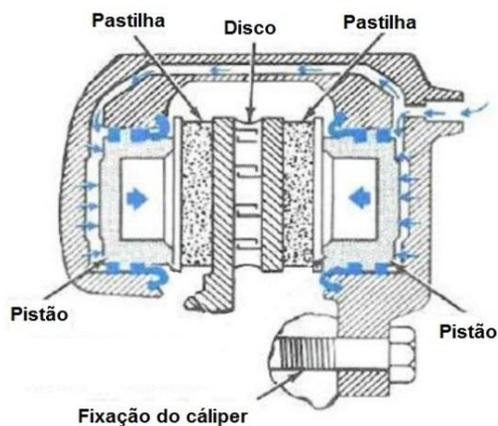


Figura 3.2 – Esquema de um cáliper fixo [adaptada de Rehkopf e Halderman, 2006]

Já nos cálipers flutuantes, o pistão é localizado em apenas um lado do cáliper, aplicando a pressão hidráulica na pastilha interna. Assim que o material de fricção toca no disco, por reação, faz com que a pastilha externa entre também em contato com o disco [Rehkopf e Halderman, 2006]

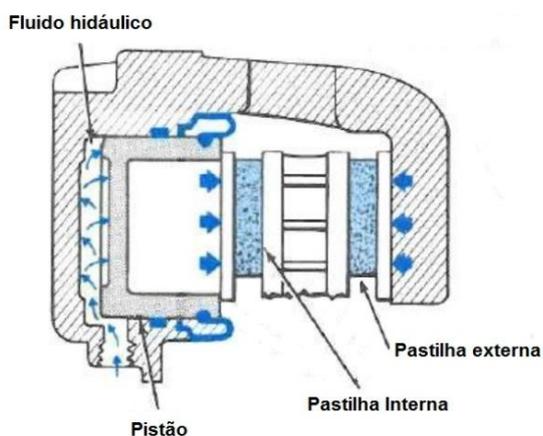


Figura 3.3 – Esquema de um cáliper flutuante [adaptada de Rehkopf e Halderman, 2006]

Segundo o mesmo autor, nos freios a tambor, figura 3.4, o pressionamento do material de fricção contra o rotor é realizado pelo giro das sapatas exercendo pressão da lona no tambor, produzindo um torque frenante.

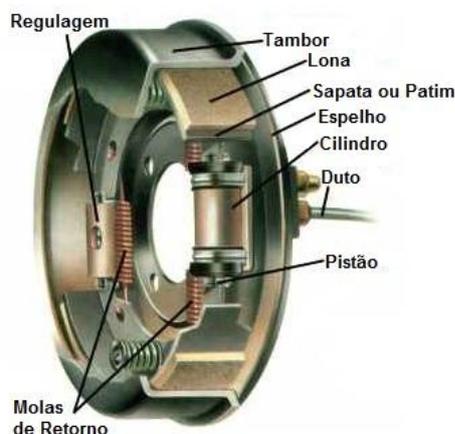


Figura 3.4 – Esquema de um freio a tambor [Renault19club]

De acordo Halderman, 1996, o freio a tambor, por ser uma estrutura fechada, tem mais dificuldade de dissipar calor que o freio a disco, e ao esquentar, o tambor dilata afastando-se das lonas. Isso leva a um curso maior no pedal do freio para a aplicação de um torque frenante equivalente.

3.2 Desempenho de um Sistema de Freio

São três as principais variáveis que influenciam o desempenho do atrito durante as frenagens: velocidade de escorregamento, pressão de contato e temperatura [Neuman et al., 1983]. O comportamento do coeficiente de atrito durante o processo de frenagem é influenciado pela velocidade de escorregamento, Neis et al., 2009, mostram que há uma queda no atrito com o aumento da velocidade. O mesmo comportamento acontece pela influência da magnitude e distribuição da pressão de contato do par de fricção. Segundo Desplanques et al., 2007, quanto maior a pressão, numa mesma velocidade, menor o coeficiente de atrito.

Neuman et al., 1983, afirmam que a variável que mais influencia no desempenho do material de atrito é a temperatura, principalmente na região de contato do par de fricção, pois é lá que acontecem os fenômenos tribológicos (de atrito). A distribuição de temperatura nesta região de contato não é uniforme devido à existência de pontos quentes (*hot spots*) durante a frenagem.

Caracterizar materiais de atrito significa avaliar seu desempenho (medido geralmente por atrito e desgaste) frente às diferentes variáveis de operação vistas anteriormente. Para tal, utilizam-se procedimentos de ensaios que têm como principais funções a pesquisa e o desenvolvimento deste material [Rusnak et al., 1970].

As máquinas para ensaio de materiais de fricção têm como finalidade avaliar amostras em escala sem necessidade de instrumentar um veículo. Há vários tipos de equipamento para estes fins, cada um com um procedimento diferente. Como, por exemplo, as máquinas do tipo FAST, que realizam frenagens com a velocidade constante para comparar o desgaste de diferentes tipos de materiais. Ainda os dinamômetros inerciais, que são operados por desaceleração, utilizando discos de inércia para simular a energia cinética dos veículos. Também há o tribômetro, que tem como principal objetivo servir como uma ferramenta para a

compreensão do comportamento do coeficiente de atrito frentes às diferentes condições de operação [Neis, 2008].

Algumas das etapas de ensaios de materiais de fricção utilizadas dividem-se em assentamento, caracterização e *fade*. O assentamento visa assegurar uma melhor uniformidade da área de contato do material atritado com o disco. A caracterização é a etapa em que avalia-se o atrito. Este procedimento é executado repetidas vezes intercalando com o *fade* (que é onde se avalia o desempenho do material em altas temperaturas, simulando um veículo em uma descida de serra, onde os freios são acionados por longos períodos). A análise do atrito, ao longo das caracterizações, é verificada durante os ensaios, mostrando o desempenho do material de fricção.

Durante as etapas de um procedimento de ensaio, são realizadas diversas frenagens com o objetivo de adquirir dados de atrito, temperatura, força de atuação do material de fricção e torque frenante. Entretanto, o tempo que leva para o rotor resfriar e voltar à temperatura inicial do teste não é um parâmetro controlado durante os ensaios. A figura 3.5 mostra, em um ensaio com etapas de assentamento, *fades* e caracterizações realizado para avaliar três diferentes materiais, a desigualdade do tempo de resfriamento do disco de freio entre as frenagens.

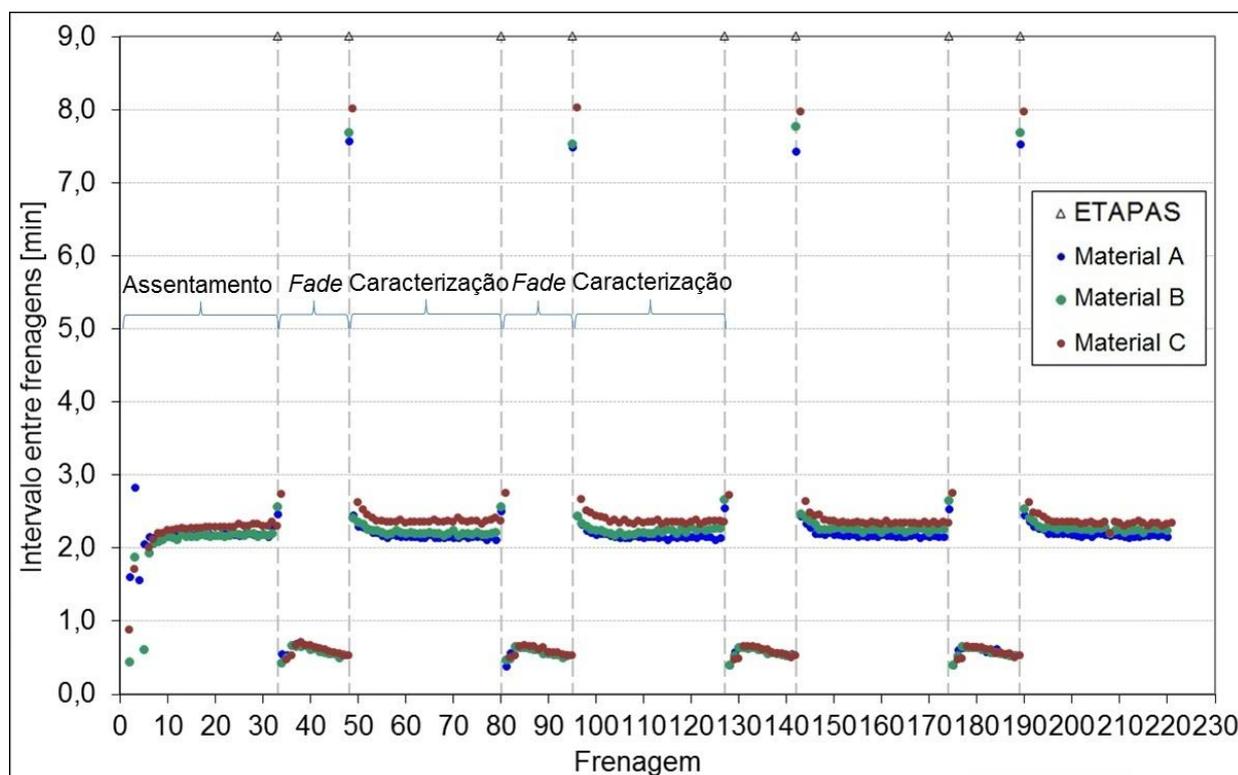


Figura 3.5 – Análise dos tempos de resfriamento em ensaios de frenagens

Verifica-se que o intervalo entre as frenagens nas diversas etapas são diferentes, podendo ser da ordem de trinta segundos, como a última da etapa de *fade* (em que o disco chega a temperaturas próximas a 600°C), a oito minutos, como na primeira frenagem de caracterização (que é o período para o rotor resfriar até chegar à temperatura de 100°C).

A temperatura do rotor é medida com o auxílio de um termopar tipo K inserido no interior do disco de freio como ilustra a figura 3.6.

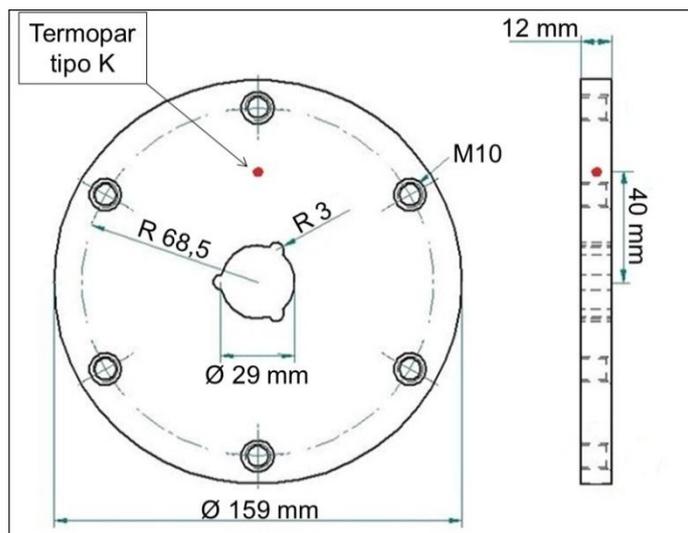


Figura 3.6 – Desenho esquemático da instrumentação do disco

3.3 Mecanismo Tribológico nos Materiais de Fricção

Durante a frenagem, a medida em que a pastilha desgasta, a área de contato do par de fricção varia interferindo no comportamento do atrito. Esta variação é devido ao desprendimento de material duro da pastilha que se aglomera formando um filme de fragmentos entre o disco e o material de fricção [Fillot et al., 2007]. Segundo Erickson e Jacobson, 2000, esse desprendimento de material é causado pela fricção dos chamados “platôs” de contatos da superfície das pastilhas. Os platôs primários desgastam em ação do atrito e se fragmentam. Esses fragmentos, também chamados de “debris”, circulam livremente entre os materiais atritados, dando origem a um filme ou conglomerando-se formando os platôs secundários. A figura 3.7 mostra a evolução do crescimento dos platôs durante o atrito.

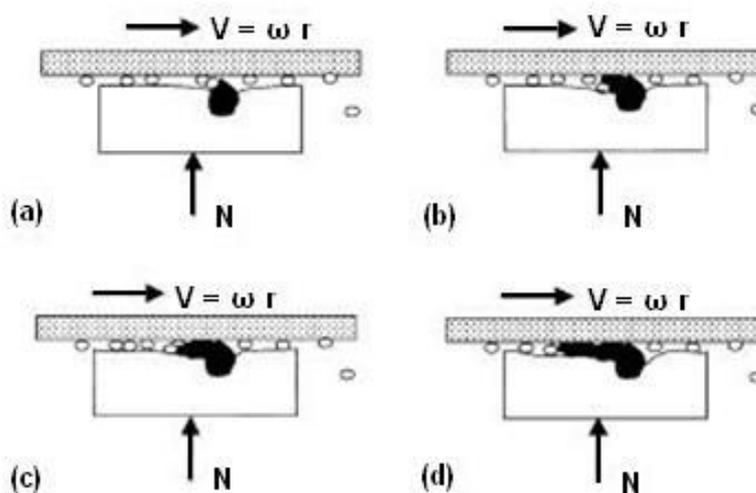


Figura 3.7 – Crescimento dos platôs [Ostermeyer, 2001]

Segundo o mesmo autor, a composição deste filme é determinada pelos lubrificantes dos sólidos, que são parte da composição da pastilha. As elevadas pressões, temperaturas e tensões cisalhantes compactam esses resíduos dando origem aos platôs secundários, conforme mostra a figura 3.8.

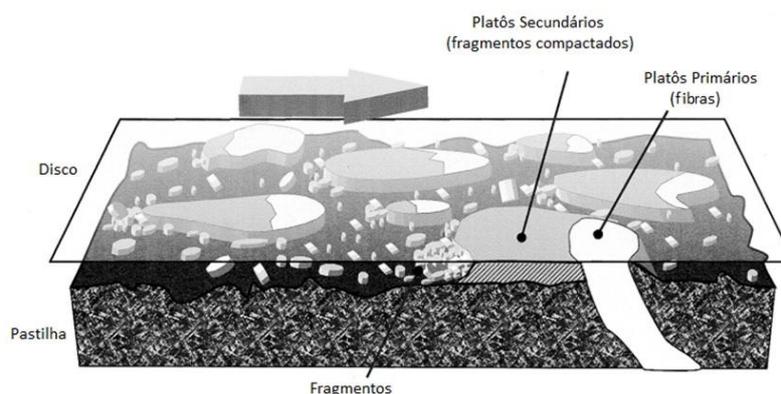


Figura 3.8 – Esquema de situação de contato entre pastilha e disco de freio envolvendo o contato dos platôs [Adaptado de Eriksson e Jacobson, 2000].

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho utilizou-se um tribômetro, projetado por Neis, 2008, que visa simular as condições reais de um veículo, tais como velocidade de escorregamento e pressão de contato. A figura 4.1 mostra um desenho esquemático do equipamento.

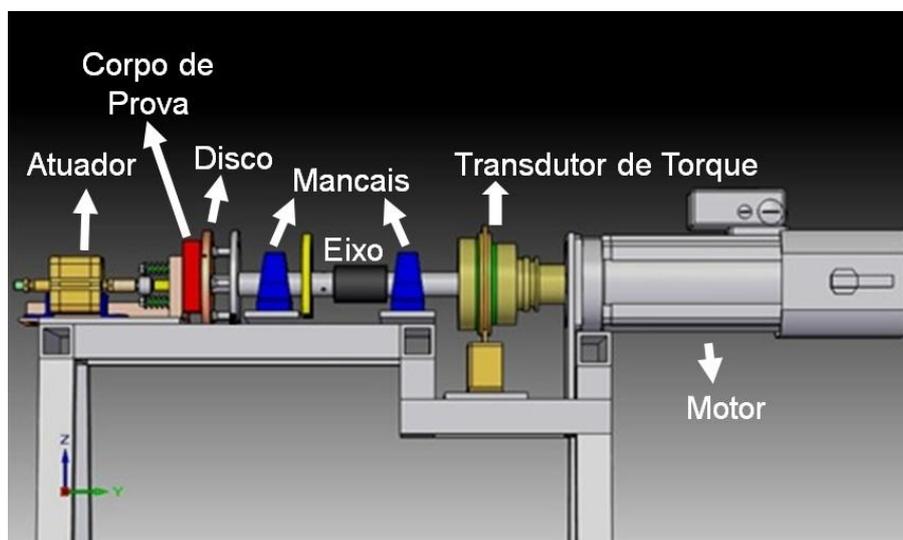


Figura 4.1 – Desenho esquemático do tribômetro

No tribômetro, há um rotor vertical (disco de freio) no qual o material de fricção é pressionado. Este rotor é do tipo sólido e o corpo de prova consiste em uma pastilha de freio comercial fabricada pela FRAS-LE.

Para acelerar o processo de resfriamento é utilizado um soprador de ar na superfície traseira do disco. Nos ensaios em que o tempo de resfriamento é longo (como 10 minutos), usa-se um sistema de aquecimento por indução eletromagnética para controlar o período entre frenagens (figura 4.2). A temperatura do disco é medida em duas formas: pelo termopar (figura 3.6), e por um pirômetro, para medição da radiação dentro de uma faixa do infravermelho sobre a superfície do disco.

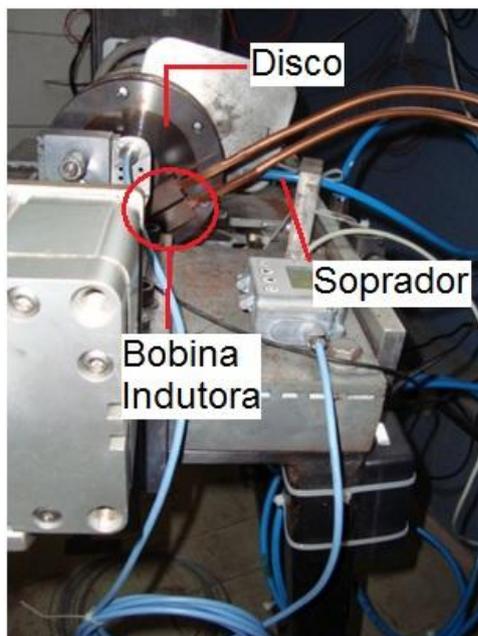


Figura 4.2 – Componente do sistema de aquecimento do rotor.

Segundo Morelli, 2002, durante uma frenagem, a temperatura da superfície do disco é superior à temperatura interna no instante inicial e, ao longo do tempo, o calor tende a se distribuir uniformizando a temperatura no disco de freio. A velocidade com que isso corre vai depender da difusividade térmica do material, que, segundo Incropera e Dewitt, 2003, é a capacidade do material de conduzir energia térmica em relação à sua capacidade de armazená-la. Materiais com valores elevados, responderão rapidamente a mudanças nas condições térmicas impostas, enquanto materiais com valores reduzidos, responderão mais lentamente, levando um tempo maior para atingir uma nova condição de equilíbrio. Isso pode ser melhor entendido na figura 4.3.

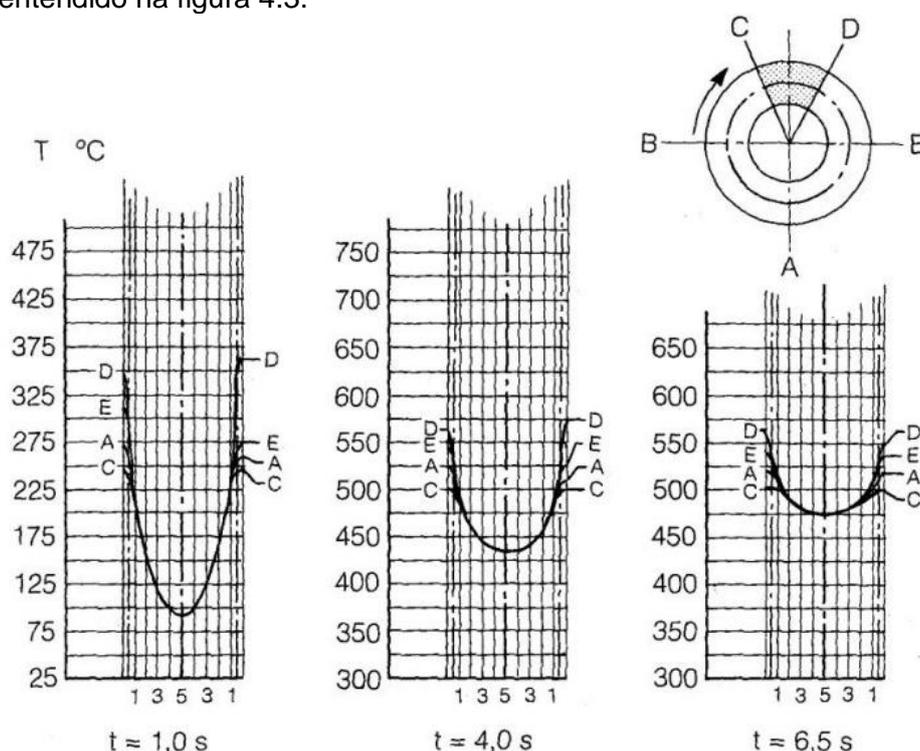


Figura 4.3 – Distribuição da temperatura da seção radial do disco de freio [Morelli, 2002].

Assim, a figura 4.3 mostra que no instante inicial da frenagem, há uma diferença de temperatura de aproximadamente de 250°C entre a superfície e o centro do disco e, com o decorrer da frenagem, a temperatura vai se distribuindo ao longo da seção ficando com uma diferença bem menor, de aproximadamente 75°C. É esperado que numa situação de resfriamento, etapa em que o fluxo de calor que sai do disco por convecção e radiação é muito menor do que o calor que entra durante a frenagem, o gradiente de temperatura entre o interior e a face do disco seja significativamente menor.

Com os dados de temperatura medidos durante os ensaios com termopar e com o pirômetro, é possível calcular a emissividade da superfície do disco durante os ensaios. Para tal, utiliza-se a equação 4.1 que encontra-se em Incropera et al., 2003.

$$\varepsilon_{disco} = \frac{1 \cdot \sigma \cdot T_{pirômetro}^4}{\sigma \cdot T_{termopar}^4} \quad (4.1)$$

Onde a constante de *Stefan-Boltzmann* possui o valor de $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ e T a temperatura em K. Vale salientar que se desconsiderou o gradiente de temperatura, visto anteriormente, devido ao fato de que a emissividade foi calculada no final do resfriamento, no instante que antecede as frenagens.

Para o cálculo da incerteza de medição da emissividade, deve-se considera a incerteza da temperatura medida pelo pirômetro e pelo termopar. Admitindo que sejam diferentes instrumentos, aplica-se a formulação para tratamento de dados estatisticamente independentes. Por outro lado, existe correlação se considerarmos que a medição é feita sobre o mesmo corpo (disco de freio) e que ainda ao aumentar a temperatura da superfície, medida pelo pirômetro, aumenta também a temperatura medida pelo termopar. Diante deste “impasse”, foi empregada a teoria mais conservativa, que é a relação para dados estatisticamente dependentes, dada pela expressão 4.2 retirada da apostila de metrologia da UFSC, 2002.

$$u(G) = \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| u(x_1) + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| u(x_2) + \left| \frac{\partial f}{\partial x_3} \right| u(x_3) + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_n} \right| u(x_n) \quad (4.2)$$

Onde $u(G)$ representa a incerteza de grandeza G, $u(x_1)$, $u(x_2)$, $u(x_n)$ representam as incertezas padrão associadas às grandezas de entrada x_1 , x_2 , x_n respectivamente.

Para o cálculo a incerteza de medição de temperatura dos equipamentos, a equação 4.2 torna-se:

$$u(G) = \left| \frac{\partial \frac{T_p^4}{T_t^4}}{\partial T_p} \right| u(T_p) + \left| \frac{\partial \frac{T_p^4}{T_t^4}}{\partial T_t} \right| u(T_t)$$

T_p , T_t , $u(T_p)$ e $u(T_t)$ são as temperaturas e incertezas de medição do pirômetro e do termopar respectivamente. Os dados de incerteza são retirados dos manuais disponibilizados pelos fabricantes do condicionador de sinal [Lynx, 2011; Dspace, 2006], do termopar [ASTM E230-03, 2003; Webster, 1999] e do pirômetro [Raytek, 2010]. Simplificando a equação, tem-se.

$$u(G) = \left| \frac{4T_p^3}{T_t^4} \right| u(T_p) + \left| \frac{-4T_p^4}{T_t^5} \right| u(T_t)$$

Substituindo os termos da equação dentro do intervalo de temperaturas em que o disco de freio atuou, temos um resultado de $\pm 3,08\%$ e $\pm 0,91\%$ sobre o valor medido dos ensaios com a temperatura de gatilho de 100°C e 300°C, respectivamente.

5. ENSAIOS

Os objetivos propostos neste trabalho foram mostrar tanto na preocupação em controlar o tempo de resfriamento entre as frenagens em um procedimento de ensaio de frenagem, quanto se a limpeza dos fragmentos da superfície do disco de freio tem influência a ponto de mudar o comportamento do atrito.

Os ensaios realizados no tribômetro visto anteriormente são mostrados na tabela 5.1

Tabela 5.1 – Parâmetros dos ensaios

Ensaio	Temperatura Inicial do Disco	Tempo de Resfriamento	Disco de Freio	Retirada de Fragmentos
1	100°C	1,5 min	A	Não
2	100°C	10 min	A	Não
3	100°C	1,5 min	A	Não
4	300°C	18 s	A	Não
5	300°C	10 min	A	Não
6	100°C	1,5 min	B _(novo)	Não
7	100°C	1,5 min	B	Sim
8	100°C	1,5 min	B	Não

Cada ensaio é o resultado da média de 8 frenagens realizada com temperaturas, limpeza do disco e tempos de resfriamento predeterminados para obter o comportamento do atrito. Momentos antes da frenagem, a velocidade do rotor chega a 2300 Rpm, que representa 100 km/h em um veículo e a força que a pastilha de freio comercial da FRAS-LE FL3001539 aplica no disco, durante o ensaio, é de 2000 N.

Os ensaios 1, a 3 foram realizados com uma temperatura inicial do rotor de 100°C, com os tempos de resfriamento entre frenagens de 1,5 e 10 minutos. Com o mesmo disco de freio, foram executados mais dois ensaios com temperatura de gatilho de 300°C e com os tempos de resfriamento de 18 segundos (ensaio 4) e 10 minutos (ensaio 5).

Nos ensaios restantes, utilizou-se um disco de freio novo para garantir uma superfície limpa. Realizaram-se frenagens com uma temperatura de gatilho de 100°C para acompanhar o comportamento do atrito. O ensaio 6 consiste frenagens com o objetivo de acumular fragmentos do material de fricção na superfície do rotor. O ensaio 7 teve-se o cuidado com a remoção após cada fricção, para deixar o disco sem resíduos. E por último, mais frenagens para comprovar se houve alguma alteração no coeficiente de atrito comparado com os demais.

O tempo de resfriamento foi controlado utilizando um sistema de aquecimento indutivo, visto anteriormente. A figura 5.1 compara o resfriamento do disco de freio de dois ensaios diferentes.

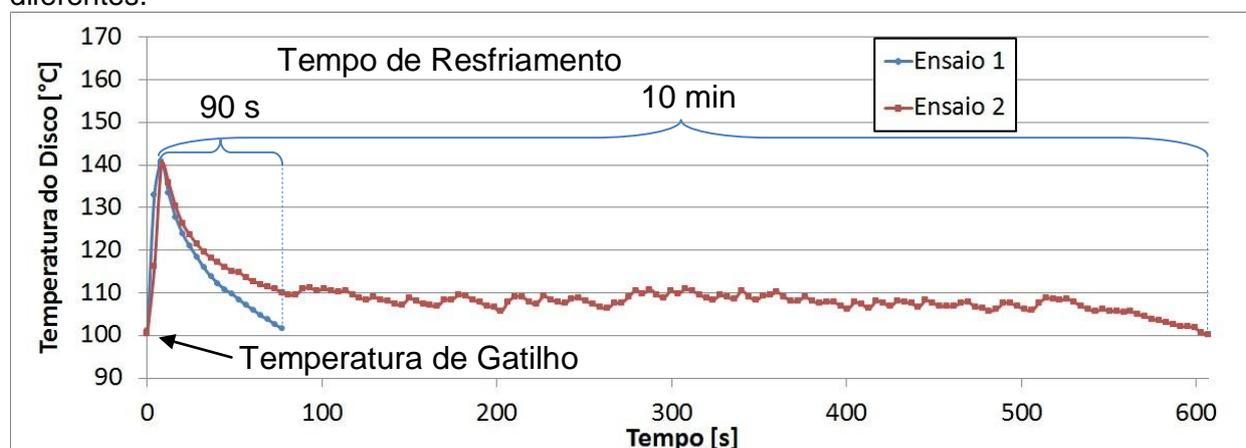


Figura 5.1 – Controle do tempo de resfriamento do rotor

A figura 5.1 mostra que quando o rotor chega à temperatura de gatilho (100°C), o tribômetro começa a frenagem, esquentando o mesmo. Durante o ensaio, o atrito entre o par de fricção retira a oxidação formada na superfície do disco e, após a frenagem, começa o processo de resfriamento, período em que ocorre também a oxidação.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para determinar a importância do tempo de resfriamento em ensaios de frenagem, investigou-se, primeiramente, a oxidação do disco de freio. Para isso, deve-se relacionar o estado da superfície do rotor com sua emissividade. Com os dados de temperatura do termopar e do pirômetro infravermelho, pode-se calcular a emissividade durante o ensaio pela equação 4.1.

Sabendo que a oxidação da superfície altera a emissividade do rotor [Nicolau e Güths, 1997], com os dados alcançados nos ensaios, obteve-se um gráfico com as médias das emissividades dos ensaios 1 a 5, figura 6.1.

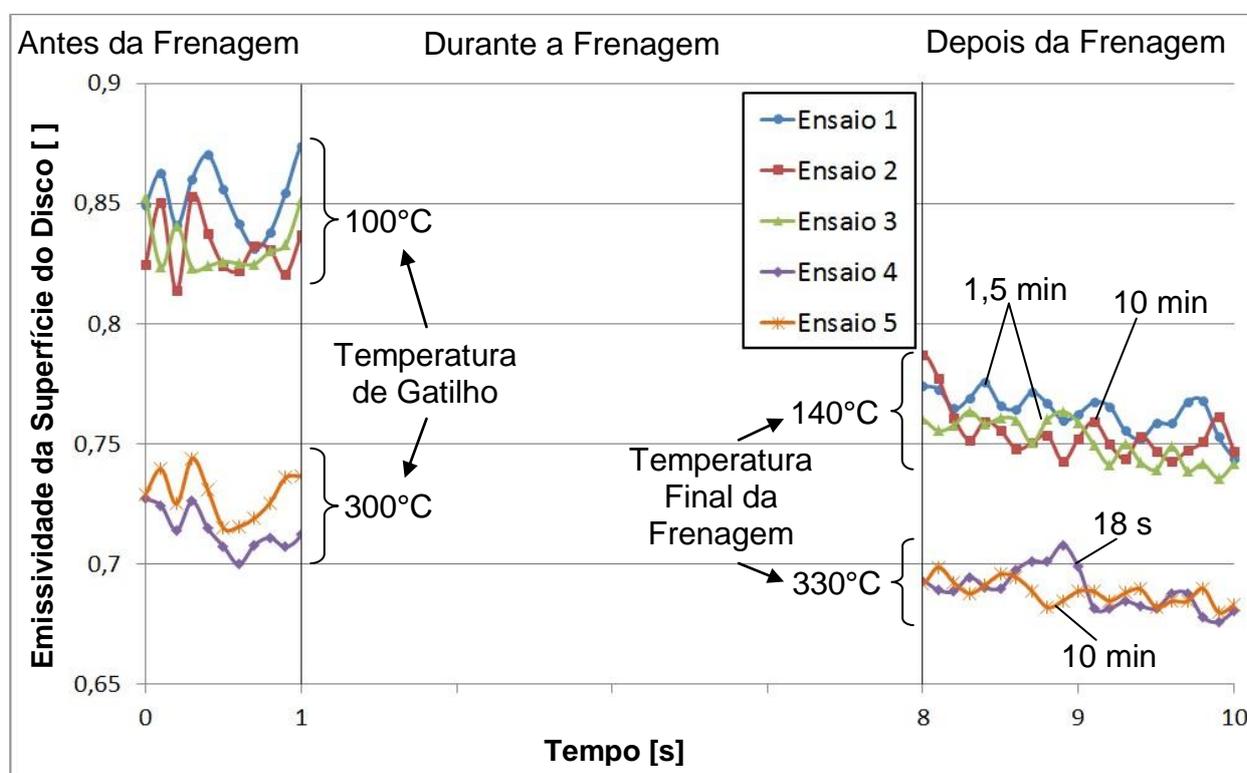


Figura 6.1 – Emissividade durante o resfriamento.

Calcula-se que, para os ensaios com a temperatura de gatilho de 100°C , a variabilidade dos resultados obtido no gráfico em relação à média foi de, no máximo, $\pm 3,01\%$, sendo menor que a incerteza de medição dos equipamentos, que foi de $\pm 3,08\%$. Também para os ensaios com a temperatura de gatilho de 300°C , o resultado foi de $\pm 0,66\%$, inferior à incerteza calculada de $\pm 0,91\%$.

Os resultados mostram que, 1,5 minuto para uma temperatura de gatilho de 100°C e 18 segundos para uma temperatura de 300°C é tempo suficiente para oxidar a superfície do disco de freio, como é mostrado na figura acima, pois momentos antes das frenagens, não houve mudanças significativas dos valores das emissividades dos ensaios, tendo em vista o erro embutido nos resultados devido aos equipamentos de medição de temperatura.

Após o estudo da emissividade, foi visto o comportamento do coeficiente de atrito durante as frenagens. Estudos conduzidos por Neis, 2010, mostram que o comportamento do atrito varia muito devido à heterogeneidade do material de fricção. Com um nível de confiabilidade de 95%, constatou-se que a variabilidade dos resultados é de $\pm 7,53\%$ sobre o valor medido do atrito.

Com os mesmos ensaios realizados para calcular a emissividade, obteve-se os coeficientes de atritos, conforme as figuras 6.2 e 6.3.

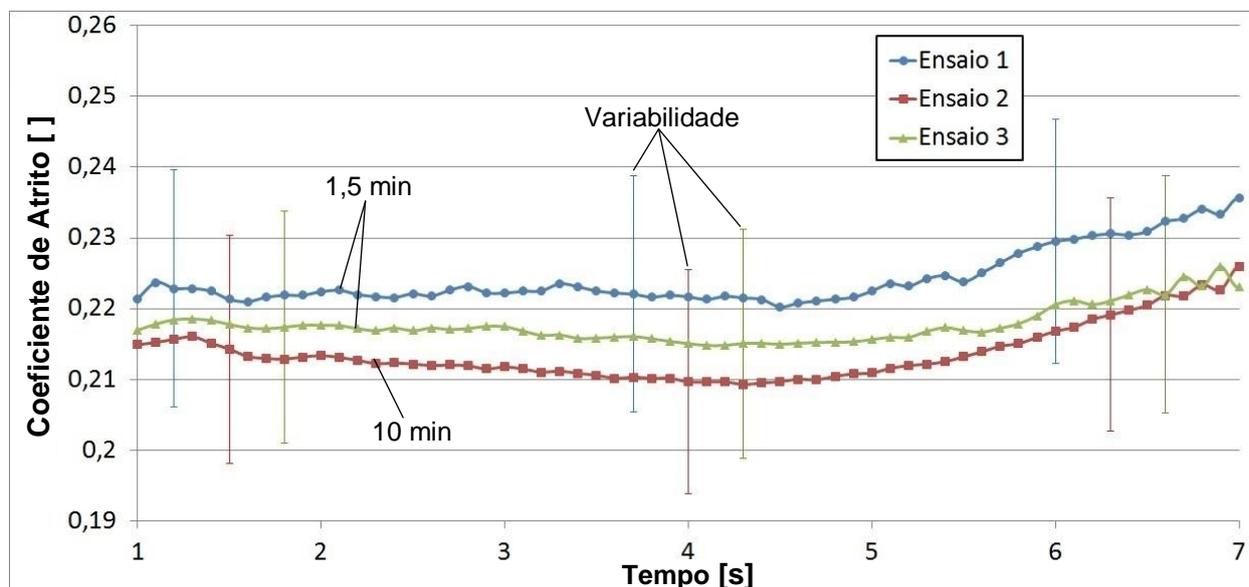


Figura 6.2 – Comportamentos dos coeficientes de atritos dos ensaios realizados com a temperatura de gatilho de 100°C.

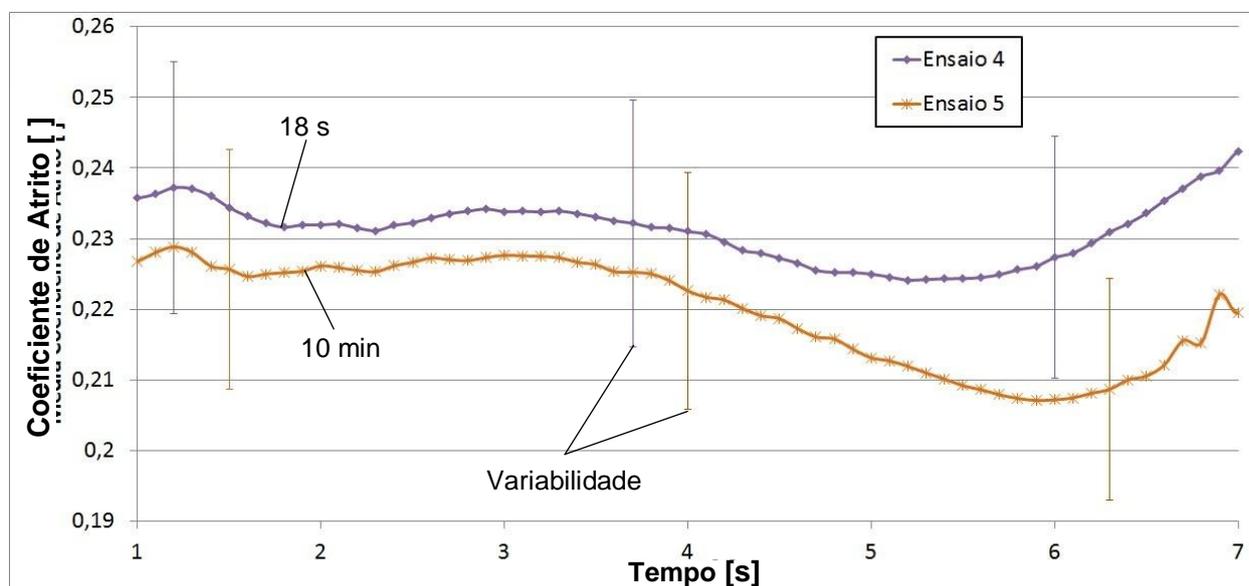


Figura 6.3 – Comportamentos dos coeficientes de atritos dos ensaios realizados com a temperatura de gatilho de 300°C.

Observa-se que a variabilidade devido à heterogeneidade dos materiais é de ordem de grandeza maior do que a variabilidade devido ao tempo de resfriamento do disco de freio, que foi calculada e assume valores de $\pm 4,62$ (para os ensaios a 100°C) e $\pm 6,41\%$ (para os ensaios a 300°C), mascarando o resultado.

Após a investigação do tempo de resfriamento dos ensaios, foi visto se a remoção dos fragmentos deixados pela pastilha durante as frenagens também implica em mudanças tanto na emissividade do disco quanto no atrito do conjunto.

A mudança do disco de freio se deve ao fato de que o anterior estava impregnado de fragmentos de outros materiais de fricção, podendo influenciar no resultado. É de se esperar que a emissividade e o coeficiente de atrito, ao longo da frenagem, assumam valores e comportamentos diferentes em relação aos ensaios anteriores, mesmo que o material de fricção seja o mesmo. Isso é mostrado nas figuras 6.5 e 6.6.

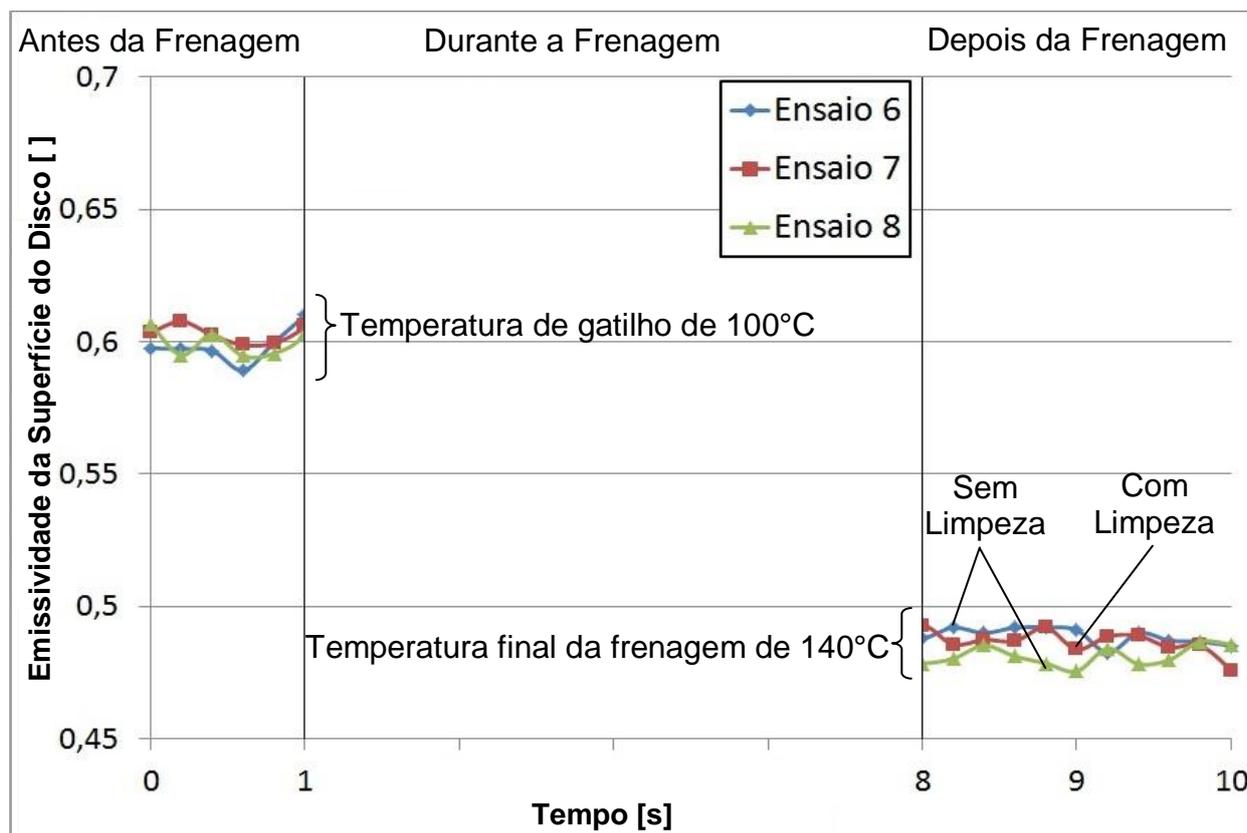


Figura 6.5 – Emissividades dos ensaios durante o resfriamento.

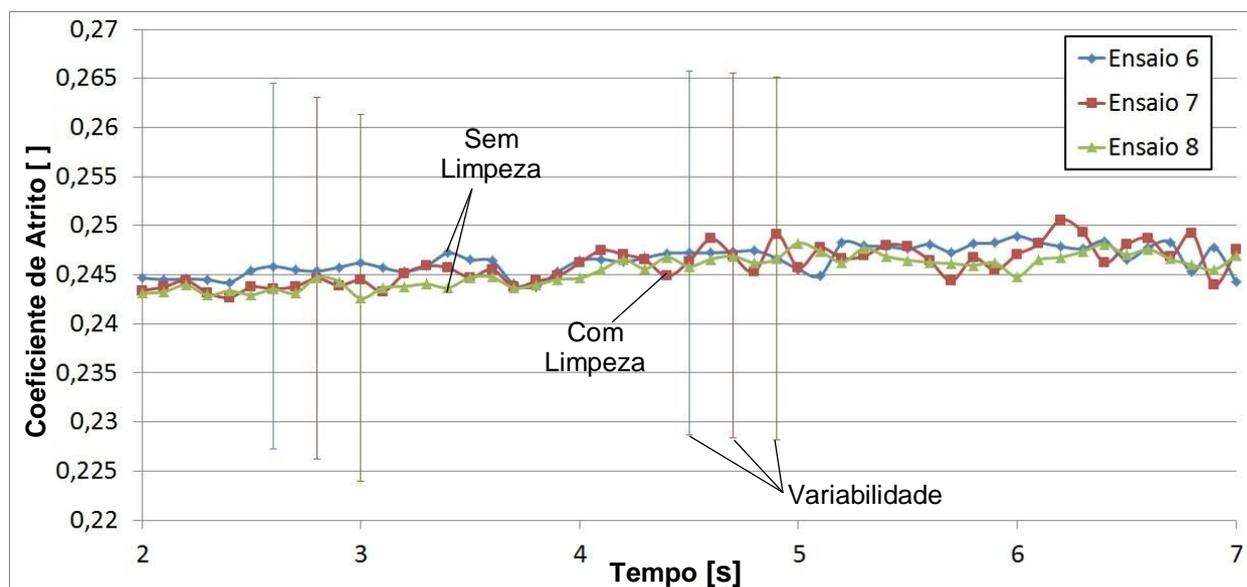


Figura 6.6 – Média dos coeficientes de atrito dos ensaios 6 a 8.

Do mesmo modo que foi calculada a variabilidade da emissividade dos ensaios 1 a 5, também se fez para os ensaios 6, 7 e 8. Obteve-se, então, um resultado de $\pm 0,93\%$ sobre o valor da média, inferior ao calculado devido à incerteza associada aos equipamentos de medição de temperatura, que foi de $\pm 3,08\%$. Também foi analisado o comportamento do atrito, que não ultrapassou de $\pm 4,85\%$, cuja ordem de grandeza é menor que a variabilidade do material.

7. CONCLUSÕES

Considerando os objetivos deste trabalho sobre a influência do tempo de resfriamento e a retirada dos fragmentos da pastilha sobre a superfície do disco no comportamento do coeficiente de atrito em ensaios de frenagens realizados em um tribômetro, conclui-se que:

- Com base no número de amostras (oito ensaios), nas temperaturas de 100°C e 300°C e no período estipulado de resfriamento (18 segundos, 90 segundos e 10 minutos), não pode-se afirmar que há influência do tempo de resfriamento no comportamento do coeficiente de atrito do disco de freio. Isso ocorre devido ao fato de que a variabilidade do material possui ordem de grandeza maior do que a variabilidade devido ao tempo de resfriamento, mascarando o resultado;
- Sobre o tempo de resfriamento, calculou-se que, para os ensaios com a temperatura de gatilho de 100°C , a variabilidade dos resultados foi de, no máximo, $\pm 3,01\%$, sendo menor que a incerteza de medição dos equipamentos, que foi de $\pm 3,08\%$. Também para os ensaios com a temperatura de gatilho de 300°C , o resultado foi de $\pm 0,66\%$, inferior à incerteza calculada de $\pm 0,91\%$. Isso mostra que 90 segundos (para 100°C) e 18 segundos (para 300°C) é suficiente para oxidar a superfície do disco de freio a ponto de não alterar o comportamento do atrito;
- Os resultados do procedimento realizado neste trabalho mostram que, com 8 frenagens a 100°C realizados com o material FL3001539, não há depósito significativo destes fragmentos sobre a superfície do disco a ponto de alterar a medição de emissividade sobre o mesmo. Um maior número de ensaios, bem como de materiais, é necessário para uma análise mais conclusiva a respeito do assunto.

8. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões para trabalhos futuros são:

- Realizar ensaios com um número maior de frenagens;
- Determinar temperaturas de gatilho diferentes, para analisar o comportamento da emissividade e do coeficiente de atrito;
- Utilizar um equipamento de resfriamento mais eficiente para conseguir tempos de resfriamento menores;
- Usar diferentes pastilhas de freio, obtendo dados para auxiliar na pesquisa do grupo GPFAI.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM E230-03. **“Standard Specification and Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples”**, American Society for Testing and Materials, 2003.

Desplanques, Y., Roussette, O., Degallaix, G., Copin, R., Berthier, Y., **“Analysis of Tribological Behaviour of Pad-Disc Contact in Railway Braking. Part 1. Laboratory Test Development, Compromises Between Actual and Simulated Tribological Triplets”**, Wear 262, pp582-591, 2007.

Dspace. **“Hardware Installation and Configuration – DS1104 Controller Board”**, pp122, Alemanha, 2006.

Eriksson, M., Jacobson, S. **“Tribological Surfaces of Organic Brake Pads”**, Tribology International 33, pp 817-827, 2000.

Euzébio, L. S. **“Determinação do Raio Efetivo em Pastilhas Circulares de Freios a Disco em Tribômetro”**. Trabalho de conclusão do Curso de Engenharia Mecânica, 29 folhas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

Fillot, N., Iordannoff, I., Berthier, Y. **“Wear modeling and the third body concept”**, wear 262, pp 949-957, 2007.

Gonçalves, A. A. **“Metrologia”**, Apostila do Laboratório de Metrologia e Automação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

Halderman, J. D. **“Automotive Brake Systems”**, Prentice Hall, 1996

Incropera F. P., Dewitt D. P. **“Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”**, LTC, Brasil, 2003.

Limpert, R. **“Brake Design and Safety”**, Second Edition, SAE International, 1999.

Lynx Tecnologia Eletrônica Ltda. **“Condicionador de sinal MCS5k”**, Brasil, 2010.

Morelli, A.; **“Progetto dell’ Autoveicolo”**, Celidi, Torino – Itália, 2002.

Neis, P. D., **“Projeto e Construção de um Tribômetro para Estudos Relacionados a Materiais de atritos Veiculares”**. Dissertação de Mestrado, 84 folhas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

Neis, P. D., Baloti, J. J. G., Ferreira, N. F., Soares, M. R., **“An Investigation of the Influence of the Operating Parameters on Braking Test Results With Friction Materials Using a Tribometer”**, 9º SAE Brasil: International Brake Colloquium. SAE Paper, 2009.

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

Neuman, R. F., McNinch, J. H. **“Performance Characterization of Dry Friction Materials”** IMech E, pp 233-238, 1983.

Nicolau, V. P., Güths, S. **“Medição de Emissividade e de Temperatura sem Contato – Experimento Didático”**, Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1997.

Ostermeyer, G. P. **“Friction and Wear of Brake Systems”**, Forshung Ingenieurwesen, vol. 66, pp 267-272, 2001.

Raytek. **“Noncontact temperature measurement for industrial applications and OEMs”**, Estados Unidos, pp 3, 2010.

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

Nenault, **“Freios a Tambor”**, <http://www.r19club.com>. Acessado em 01/06/2011.

Velde, F. Van, Baets P. **“Comparison of Two Stick-Slip Tester and Recommendations for Repeatable And Significant Stick-Slip Testing”** Tibotest Journal 3-4, 1997.

Webster, J.G. **“The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook”**, CRC Press, 1999.