

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PROCEDIMENTO PARA ENSAIO DE MATERIAIS DE ATRITO UTILIZANDO UM  
TRIBÔMETRO

por

Jean Greselle Balotin

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, março de 2010.

PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MATERIAIS DE  
ATRITO UTILIZANDO UM TRIBÔMETRO

por

Jean Greselle Balotin  
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da  
Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos  
requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Projeto e Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Aprovada por:

Prof. Dr. André João de Souza

DEMEC / UFRGS

Prof. Dr. José Antônio E. Mazzaferro

PROMECC / UFRGS

Prof. Dr. Rafael Antônio Comparsi Laranja

PROMECC / UFRGS

Prof. Dr. Horácio Antonio Vielmo  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 12 de março de 2010.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, José, Ana, Jonas e Josean, que, apesar das dificuldades, sempre me deu todo suporte e carinho necessário em todos os momentos.

À Francielle, que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos, me dando força e equilíbrio pra concluir essa etapa.

Ao professor Ney Francisco Ferreira, que, com sua paciência e conhecimento me orientou magistralmente.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por toda a estrutura oferecida.

Ao meu amigo Tiago Poletto pela enorme ajuda nesses últimos anos.

A Deus, a todos meus amigos e demais familiares que de uma forma ou de outra me ajudaram a chegar até aqui.

## **RESUMO**

Este trabalho mostra o desenvolvimento de um procedimento de ensaio para materiais de fricção a ser aplicado em um tribômetro, tendo como característica principal frenagem com velocidade constante e elevadas temperaturas envolvidas. Desenvolveu-se uma metodologia simples, com etapas e parâmetros definidos a partir das características principais do tribômetro utilizado e da temperatura limite desejada no final de cada frenagem. Ao todo, três etapas distintas formam a estrutura básica do procedimento de ensaio: assentamento, caracterização e etapas com altas temperaturas. Para determinação dos parâmetros preliminares de cada uma das etapas envolvidas, utilizou-se amostras de formulação semelhantes a pastilhas de freio de veículos e também amostras com número reduzido de componentes. Para provar a eficácia do método proposto, foram utilizados três materiais com formulações distintas, sendo dois com uma variedade maior de componentes e um notadamente mais simples. Na etapa de assentamento, observou-se a estabilização do coeficiente de atrito das amostras enquanto que nas etapas de caracterização, observou-se a recuperação do coeficiente de atrito entre as etapas de temperatura. Para os estágios de temperatura elevada realizados, foi possível verificar a diferença de comportamento dos materiais utilizados, sendo o coeficiente de atrito menor na primeira etapa de temperatura que na segunda. Entretanto, os resultados também indicaram que alguns dos parâmetros preliminares escolhidos para as etapas de assentamento e temperatura não se mostraram satisfatórios, implicando em mudanças para a versão final da metodologia de ensaio apresentada.

**PALAVRAS-CHAVE:** procedimento de ensaio, tribômetro, temperatura, atrito.

## **ABSTRACT**

This work presents the development of a testing procedure to evaluate the friction and wear of friction materials to be applied in a tribometer, with main characteristic braking with constant speed and high temperatures. It was developed a simple methodology, with steps and parameters defined from the main characteristics of the used tribometer and the final limit temperature desired at the end of each braking. Totally, three different stages form the basic structure of the testing procedure: bedding-in, characterization and stages with high temperature. To determinate de primary parameters of each stage, it was used samples with similar formulation as vehicles friction pads and also samples with reduced number of components. To prove the efficiency of the proposed methodology, were used three different friction materials, being two with a large variability of components and a simple one. The bedding-in and the characterization stages showed the stabilization and the recuperation of the friction coefficient of the samples, respectively. After each high temperature stages, it was possible to verify the difference of the used materials, being the friction coefficient lower in the first temperature stage than the second one. However, these results also showed that some chosen primary parameters for the bedding-in and high temperature stages were not satisfactory, implicating in changes to the final procedure version.

**KEY-WORDS:** test procedure, tribometer, temperature, friction.

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	OBJETIVOS .....	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
3.1	Atrito .....	4
3.2	Coeficiente de Atrito.....	4
3.3	Materiais de Atrito.....	4
3.4	Variáveis de Desempenho de Atrito.....	6
3.4.1	Pressão de Contato .....	7
3.4.2	Velocidade de Escorregamento .....	8
3.4.3	Temperatura.....	9
3.5	Mecanismo de Atrito de Materiais de Fricção .....	12
3.6	Procedimentos de Ensaios.....	15
3.6.1	Máquinas de Ensaio de Materiais de Fricção .....	17
3.6.2	O Tribômetro .....	18
3.6.3	Medição dos Parâmetros de Operação .....	21
3.6.4	Medição do Atrito .....	22
3.6.5	Medição da Temperatura.....	22
3.6.6	Medição da Velocidade de Escorregamento do Tribômetro.....	22
4	ENSAIOS PRELIMINARES .....	24
4.1	Frenagens Prévias de Assentamento.....	24
4.2	Frenagens Diversas.....	26
5	PROCEDIMENTO DE ENSAIO .....	29
5.1	Assentamento .....	31
5.2	Caracterização .....	37
5.3	Fade.....	42
6	APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO PROPOSTO .....	48
6.1.1	Assentamento.....	48
6.1.2	Etapas de Caracterização e <i>Fade</i> .....	52
7	VERSÃO FINAL DO PROCEDIMENTO PROPOSTO.....	62

8	CONCLUSÕES .....	64
9	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	67
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	68

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V$	velocidade de escorregamento	[m/s]
$r_e$	raio efetivo	[m]
$\omega$	velocidade angular	[rad/s]
$\mu$	coeficiente de atrito	[adm]
$M$	torque	[N.m]
$F_N$	força normal	[N]
$N$	rotação	[rpm]
$P$	potência	[W]

## LISTA DE SIGLAS

<i>USA</i>	United States of America
<i>NAO</i>	Non-Asbestos Organic
<i>TGA</i>	Thermo Gravimetric Analysis
<i>CO<sub>2</sub></i>	Gás Carbônico
<i>H<sub>2</sub>O</i>	Água
<i>FAST</i>	Friction Assessment and Screening Test
<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 – Comportamento do coeficiente de atrito com relação a pressão de contato.....	7
Figura 3.2 – Relações entre a o tamanho da pastilha, platôs de contato e a real área de contato.....	8
Figura 3.3 – Desenho esquemático do disco e a variação da velocidade de escorregamento....	9
Figura 3.4 – Influência da variação da velocidade sobre o coeficiente de atrito, onde as letras A, B e C indicam diferentes amostras.....	9
Figura 3.5 – Liberação de CO <sub>2</sub> e H <sub>2</sub> O e variação de massa, utilizando TGA.....	10
Figura 3.6 – (a) comportamento do atrito ao atingir 515°C pela primeira vez para primeira amostra; (b) comportamento do atrito ao atingir 515°C pela primeira vez para segunda amostra e (c), comportamento do atrito ao atingir 515°C pela segunda vez para segunda amostra.....	11
Figura 3.7 – Temperaturas estimadas em função da distância da superfície de contato.....	12
Figura 3.8 – Contato inicial entre pastilha e disco de freio e seus elementos.....	13
Figura 3.9 – Contato entre as partículas duras (fibras metálicas) e o rotor durante o processo de frenagem. ....	13
Figura 3.10 – Aumento da tensão normal (a) antes e, (b) e (c) durante o contato da fibra metálica com o disco.....	14
Figura 3.11 – Processo de fundição entre as partículas duras e de desgaste, (a), (b) e (c).. ....	14
Figura 3.12 – Platôs primários e platôs secundários de contato.....	15
Figura 3.13 – Fim da vida útil de um platô de contato e fluxo para fora da zona de contato..	15
Figura 3.14 – Estrutura geral dos procedimentos de ensaio.....	16
Figura 3.15 – Tribômetro de Neis, 2008: (a) vista em perspectiva e (b) vista lateral de parte do equipamento. ....	19
Figura 3.16 – Dimensões detalhadas do disco de freio do tribômetro de Neis, 2008.....	20
Figura 3.17 – Geometria do corpo de prova recomendada para utilização no tribômetro de Neis, 2008.....	20

Figura 4.1 – Curvas de força, temperatura e atrito para as amostras utilizadas. ....	25
Figura 4.2 – Curvas de Coeficiente de atrito médio e temperatura final para amostras utilizadas.....	27
Figura 5.1 – Estrutura básica do procedimento proposto.....	29
Figura 5.2 – Geometria das amostras utilizadas, conforme Neis, 2008.....	30
Figura 5.3 – Curvas de força de aplicação, temperatura e atrito para determinação da etapa de assentamento.....	32
Figura 5.4 – Diagrama esquemático para cálculo das médias móveis para critério de assentamento.....	33
Figura 5.5 – Diagrama esquemático para cálculo da variação da média móvel.....	34
Figura 5.6 – Forma gráfica do critério de assentamento proposto. ....	35
Figura 5.7 – Aplicação do critério de assentamento proposto para amostras utilizadas.....	35
Figura 5.8 – Seqüência de frenagens de caracterização para amostras utilizadas. ....	39
Figura 5.9 – Atrito médio das frenagens de caracterização para amostras utilizadas. ....	40
Figura 5.10 – Verificação da dispersão para as curvas de caracterização para amostras utilizadas.....	40
Figura 5.11 – Curvas de temperatura da etapa de caracterização para amostras utilizadas.....	41
Figura 5.12 – Curvas de força, temperatura e atrito para as amostras utilizadas. ....	43
Figura 5.13 – Curvas de força, temperatura e torque constante para amostra A2.....	45
Figura 6.1 – Curvas de assentamento para as amostras utilizadas. ....	49
Figura 6.2 – Curvas de aplicação do critério proposto para as amostras utilizadas. ....	50
Figura 6.3 – Coeficiente de atrito médio para amostras B3 e B4.....	53
Figura 6.4 – Temperatura final do disco para amostra B3 e B4.....	53
Figura 6.5 – Curvas de atrito e temperatura durante as etapas de <i>fade</i> para amostras (a) B3 e (b) B4. ....	54
Figura 6.6 – Coeficiente de atrito médio para amostras C1 e C2.....	55
Figura 6.7 – Temperatura final do disco para amostra C1 e C2.....	55

Figura 6.8 – Curvas de atrito e temperatura durante as etapas de <i>fade</i> para amostras (a) C1 e (b) C2. ....	57
Figura 6.9 – Coeficiente de atrito médio para amostras D1 e D2. ....	58
Figura 6.10 – Temperatura final do disco para amostra D1 e D2. ....	58
Figura 6.11 – Curvas de atrito e temperatura durante as etapas de <i>fade</i> para amostras (a) D1 e (b) D2. ....	59

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Características gerais de operação do tribômetro de Neis, 2008.....	21
Tabela 4.1 – Parâmetros utilizados para frenagens prévias. ....	24
Tabela 4.2 – Parâmetros utilizados para frenagens de velocidade e força.....	26
Tabela 5.1 – Amostras utilizadas para definição de cada etapa do procedimento. ....	31
Tabela 5.2 – Aplicação do critério de assentamento proposto.....	36
Tabela 5.3 – Modificação dos parâmetros do critério de assentamento proposto.....	36
Tabela 5.4 – Parâmetros para etapa de assentamento.....	37
Tabela 5.5 – Parâmetros para etapas de caracterização. ....	41
Tabela 5.6 – Valores de atrito mínimo, força máxima, tempo total de frenagem e atrito mínimo permitido para curvas de torque constante.....	46
Tabela 5.7 – Parâmetros definidos para frenagens de <i>fade</i> . ....	47
Tabela 6.1 – Resultado para aplicação do critério de assentamento para amostras utilizadas. ....	51
Tabela 6.2 - Comportamento qualitativo do coeficiente de atrito para as amostras utilizadas.....	60
Tabela 7.1 – Parâmetros finais reavaliados para etapa de assentamento.....	62
Tabela 7.2 – Parâmetros finais reavaliados para etapas de caracterização. ....	62
Tabela 7.3 – Parâmetros finais reavaliados para etapas de <i>fade</i> .....	63

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria automobilística atual torna seus veículos cada vez mais potentes e mais rápidos, graças a todo o avanço tecnológico das últimas décadas. Entretanto, quanto maior a velocidade atingida, maior a preocupação com a segurança dos usuários de seus produtos. Desse modo, a cada nova geração de automóveis, cresce a necessidade de materiais de atrito melhores e mais confiáveis.

Para o desenvolvimento desses materiais, inúmeros testes são realizados para certificar e garantir a qualidade tanto por parte das montadoras como para os fabricantes de materiais de fricção. Até meados da década de 50, os experimentos eram feitos apenas em veículos reais, dependendo muitos recursos por parte dos pesquisadores, que não podiam controlar totalmente as variáveis ambientais e humanas envolvidas [Tsang et al., 1985; Rusnak et al., 1970].

A partir dessas dificuldades, cresceu o interesse por máquinas em escala que simulassem as condições de frenagem dos veículos, a fim de facilitar a pesquisa e desenvolvimento de produtos relacionados aos sistemas de freio dos automóveis. [Rusnak et al., 1970]. Assim, uma vez testado em laboratório e em condições controladas, os pesquisadores podem selecionar os materiais com melhor desempenho para então serem testados em carros reais, economizando tempo total de pesquisa [Desplanques et al., 2006].

Mesmo com as ferramentas atuais de análise para materiais de atrito, a dificuldade em caracterizar um material é significativa, visto todas as condições adversas ao qual um veículo real é submetido, como fatores humanos, ambientais e condições de trafegabilidade [Tsang et al., 1985; Rusnak et al., 1970; Rhee e Schwartz, 1979]. Cada máquina para ensaio tem no mínimo um procedimento que pode ser considerado válido, fazendo com que as próprias montadoras decidam qual o fabricante de material de atrito deve seguir para certificar os seus produtos. Essa exigência de qualidade que as montadoras cobram dos fabricantes de pastilhas e lonas de freio elevam os custos de pesquisa e conseqüentemente o valor final dos produtos [Desplanques et al., 2006].

Visando melhorar a relação pesquisa e desenvolvimento com seus respectivos custos, o tribômetro desenvolvido por Neis, 2008 é capaz de realizar frenagens com um controle mais simples das principais variáveis envolvidas no processo de frenagem (temperatura, velocidade de escorregamento e pressão de contato), detalhadas na Seção 3.7.2. Entretanto, como cada

aparelho necessita de uma metodologia padrão para realização de ensaios, eis que surge a necessidade do procedimento desenvolvido no presente trabalho, o qual se propõe a aliar um maquinário de baixo custo, porém confiável, com uma metodologia simples e com reprodutibilidade para analisar atrito sob condições semelhantes às atingidas por Cristhól-Bulthé, et. al., 2008, que serão mencionadas na Seção 3.4.3. Assim, reduz-se o valor agregado à pesquisa e possibilita a comparação entre materiais com diferentes formulações.

Nesta dissertação, é apresentado primeiramente o embasamento teórico necessário para entender como ocorre o processo de atrito, bem como algumas das principais máquinas e etapas de metodologias de ensaio existentes. Então, é apresentado o desenvolvimento do procedimento de ensaio proposto, mostrando todos os parâmetros finais para realização de testes com as amostras escolhidas. Por fim, os resultados obtidos quando aplicado o procedimento para o coeficiente de atrito são apresentados.

## 2 OBJETIVOS

### *Objetivo geral:*

Criar um procedimento de ensaio com frenagens em arrasto que possibilite a avaliação comparativa do atrito de materiais quando submetidos a altas temperaturas utilizando um tribômetro.

### *Objetivos específicos:*

- determinar as etapas formadoras do procedimento;
- determinar os parâmetros a serem utilizados para cada etapa da metodologia de ensaio;
- aplicar o procedimento em materiais de diferentes formulações;
- verificar o desempenho do atrito das amostras estudadas.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo são apresentados assuntos que servem de embasamento teórico para uma melhor compreensão do desenvolvimento do trabalho.

#### **3.1 Atrito**

Segundo Halliday et al., 1996, o atrito é uma força natural resultante do movimento relativo entre dois corpos quando submetidos a uma força externa, sendo paralela à superfície de contato e atuando sempre na direção oposta ao movimento. Quanto maior a força aplicada, maior a força de atrito resultante. As forças de atrito estão presentes em nossas vidas, sendo necessário vencê-las, pois, de outra forma, todos os objetos parariam e os eixos girantes não mais girariam. Por outro lado, se o atrito fosse inexistente, algumas ações do cotidiano seriam impossíveis, como caminhar, andar de bicicleta, frear um automóvel ou atar um nó. A força de atrito divide-se em estática e dinâmica, se opondo respectivamente ao início e a continuidade do movimento relativo entre as superfícies.

#### **3.2 Coeficiente de Atrito**

É a relação entre as forças de atrito e a força normal, sendo, portanto uma grandeza adimensional usada para avaliar o contato entre duas superfícies [Halliday et al., 1996]. Geralmente, o coeficiente de atrito tem valores entre 0,1 e 0,9 [Ostermeyer, 2001 e Ostermeyer, 2003], mas pode atingir valores maiores que 1,00 [Department of Energy of USA, 2009], quando a força de atrito for maior que a força normal. Segundo Halliday et al., 1996, o coeficiente de atrito divide-se em estático e dinâmico. O coeficiente de atrito estático faz-se presente até a eminência do movimento relativo entre dois corpos, enquanto que o dinâmico passa a ser considerado no momento em que é iniciado o deslocamento entre superfícies. Ainda segundo o mesmo autor, o coeficiente de atrito estático é sempre maior que o dinâmico.

#### **3.3 Materiais de Atrito**

Os materiais de atrito são os elementos chaves para o desempenho do sistema de freio [Zimmer, 1982 e Neuman, 1983]. No caso da indústria automobilística, podem tomar a forma de pastilhas [Neuman, 1983] e segundo Infantini, 2008, esses materiais são especialmente

desenvolvidos para serem pressionados contra um rotor em movimento relativo para uma redução de velocidade em um veículo de forma segura através das forças de atrito que atuam durante o processo de frenagem. Desplanques et al., 2006, diz que os materiais de fricção devem obedecer a normas técnicas para atenderem a algumas necessidades básicas, também citadas por Rhee e Schwartz, 1979, Eriksson, 2000 e Eriksson e Jacobson, 2002:

- coeficiente de atrito elevado e principalmente estável, desprezando condições ambientais como temperatura e umidade, tempo de uso, grau de desgaste e corrosão, sujeira e spray de água proveniente da estrada;
- elevada vida útil, apresentando o menor desgaste possível da pastilha e do rotor;
- alto grau de conforto, limitando vibrações e ruído.

O desenvolvimento de materiais de atrito é uma tarefa de difícil cumprimento devido à interação dos diferentes componentes e à ocorrência de efeitos de liga [Desplanques et. al., 2006]. Cada fabricante tem a sua própria formulação para os constituintes dos materiais das pastilhas de freio, que é determinada através do método da tentativa e erro [Ostermeyer, 2001, Ostermeyer, 2003 e Desplanques et al., 2006]. De acordo com Eriksson, 2000 e Eriksson e Jacobson, 2002, os materiais de atrito possuem entre 10 a 20 componentes, com diferentes propriedades mecânicas. Os principais grupos são:

- **ligantes:** adicionados para manter todos os outros componentes juntos e formar uma matriz termicamente estável. Frequentemente são utilizadas resinas fenólicas termo ajustáveis, com a adição de borracha para melhorar as propriedades de amortecimento;
- **materiais estruturais:** fornecem resistência mecânica. Geralmente utilizam-se fibras metálicas, de carbono, de vidro e mais raramente fibras cerâmicas. O amianto, até a metade dos anos 80, era o elemento estrutural mais utilizado, mas devido à proibição em alguns países, seu uso em pastilhas de freio foi eliminado;
- **carga:** utilizados principalmente para reduzir custos e melhorar a manufatura. Alguns exemplos utilizados são sulfatos de bário e mica;
- **aditivos de fricção:** adicionados para assegurar as propriedades de estabilidade de fricção e para controlar as taxas de desgaste tanto da pastilha como do disco. Lubrificantes sólidos como grafite e vários sulfetos metálicos são usados para estabilizar o coeficiente de atrito, principalmente em elevadas temperaturas. Partículas abrasivas, tipicamente alumina e sílica,

aumentam tanto o coeficiente de atrito como o desgaste do disco, dessa forma, removendo óxidos de ferro e outros filmes de superfícies indesejáveis.

Uma classificação dos materiais de atrito bastante aceita entre fabricantes de materiais de atrito é a proposta por Birch, 1999:

- **NAO:** do inglês, *Non-Asbestos Organic*. Material de atrito livre de amianto, devido aos inúmeros malefícios que essa substância causa à saúde. A maioria das pastilhas NAO utiliza fibra de vidro ou aramida como base. Eriksson e Jacobsson, 2000 e Neis, 2008 afirmam que materiais NAO são mais utilizados no mercado americano devido ao conforto proporcionado durante a frenagem. Isso acontece porque esses materiais são mais macios, aumentam o contato entre o par de fricção, diminuem o coeficiente de atrito e aumentam a vida útil dos discos. Outras características desse material, ainda segundo Birch, 1999, são baixo custo, menor ruído, baixa abrasividade, bom atrito em baixas temperaturas e maior propensão a variação do coeficiente de atrito quando submetido a frenagens em altas temperaturas.
- **Semi-metálicos:** material de atrito com elevada quantidade de elementos metálicos em sua composição. São mais resistentes ao desgaste e altas temperaturas. Eriksson e Jacobsson, 2000 e Neis, 2008 asseguram que materiais semi-metálicos são mais utilizados no mercado europeu, que prima pelo desempenho durante a frenagem. Nesse caso, o coeficiente de atrito é mais alto, bem como o desgaste do disco, diminuindo a vida útil do mesmo. Outras características citadas por Birch, 1999 são maior custo, maior resistência a ao desgaste e a variação do coeficiente de atrito quando em temperaturas elevadas, apresentando também menor coeficiente de atrito em baixas temperaturas.

### 3.4 Variáveis de Desempenho de Atrito

Neuman et al., 1983, afirmam que as três principais variáveis de desempenho durante a frenagem são: *pressão de contato, velocidade de escorregamento e temperatura*. Essas variáveis são responsáveis pela formação do terceiro corpo – elemento que assegura a transmissão de carga e velocidade entre o par de fricção [Desplanques, 2006] – e também pelo histórico de utilização dos materiais de atrito [Neuman et al., 1983, Ostermeyer, 2001, Eriksson et al., 2002 e Ostermeyer, 2003]. Essas três variáveis de desempenho são discutidas a seguir.

### 3.4.1 Pressão de Contato

O desempenho de um sistema de freio é influenciado tanto pela magnitude quanto pela distribuição de pressão no contato entre a pastilha e o rotor [Tirovic e Day, 1991 e Day, 1991]. Segundo a literatura, quanto maior a pressão de contato, menor o coeficiente de atrito (Figura 3.1) [Tsang et al., 1985, Ostermeyer, 2003 e Desplanques et al., 2007].

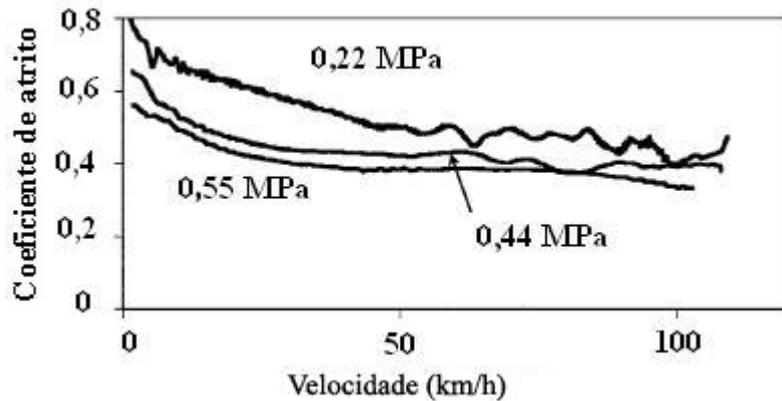
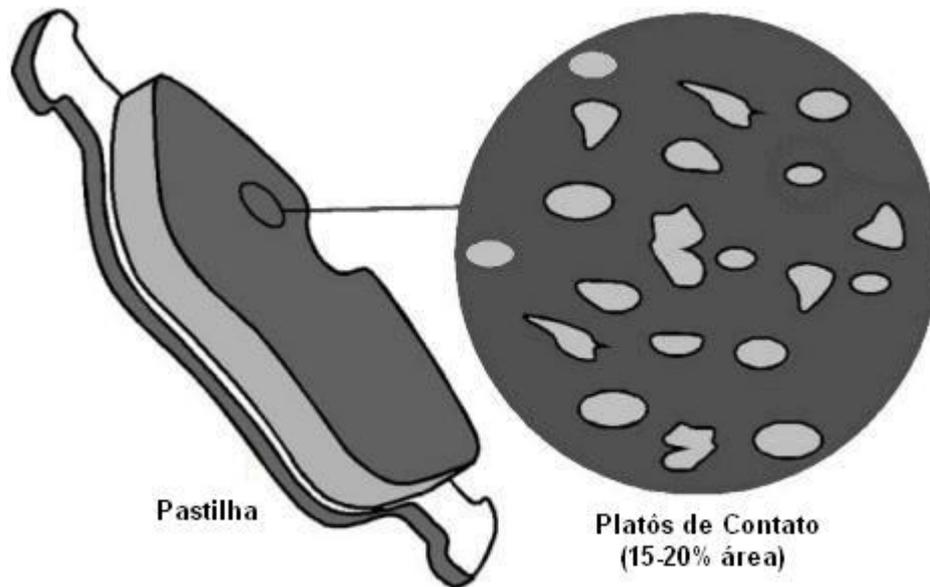


Figura 3.1 – Comportamento do coeficiente de atrito com relação a pressão de contato. [Adaptado de Desplanques et al., 2007].

Em teoria, a melhor condição de desempenho aconteceria se o contato entre a área nominal da pastilha e o disco de freio fosse total, o que na prática não ocorre. Em uma visão macroscópica, a rigidez do sistema, folgas inerentes ao sistema e a compressibilidade do material (quanto mais macio, melhor o contato) influenciam na uniformidade de distribuição de pressão [Tirovic e Day, 1991, Day, 1991, Qi e Day, 2006 e Dillenburg, 2007]. Do ponto de vista microscópico, Eriksson e Jacobsson, 2000 e Eriksson et al 2002 mostraram que apenas 15% a 20% da pastilha está em contato real com o disco (Figura 3.2), devido a formação dos platôs de contato (melhor apresentada na Seção 3.5).



**Figura 3.2 – Relações entre a o tamanho da pastilha, platôs de contato e a real área de contato. [Adaptado de Eriksson e Jacobsson, 2000].**

### 3.4.2 Velocidade de Escorregamento

O desempenho do coeficiente de atrito durante o processo de frenagem também é influenciado pela velocidade de escorregamento. Kolluri et al., 2008 e Neis et al., 2009 mostraram que há uma diminuição no coeficiente de atrito com o aumento da velocidade de escorregamento. Mesma afirmação é feita por Tsang et al., 1985, Ostermeyer, 2001 e Ostermeyer, 2003.

A velocidade em questão pode ser determinada pela relação entre a velocidade angular e o raio efetivo de frenagem, definido como sendo a distância entre o centro do disco e o da pastilha, onde se pode concentrar toda a força normal, garantindo assim o mesmo torque frenante [Shigley et al., 2004].

De acordo com a geometria da pastilha de freio, há uma variação linear da velocidade de escorregamento (Figura 3.3), há uma variação do raio da pastilha. Entretanto, de acordo com Wilson e Bowsher, 1971, uma variação de +/- 23% na velocidade de escorregamento, referente à diferença entre o raio máximo e mínimo da amostra utilizada em ensaio em escala, não resulta em variação significativa no coeficiente de atrito (Figura 3.4).

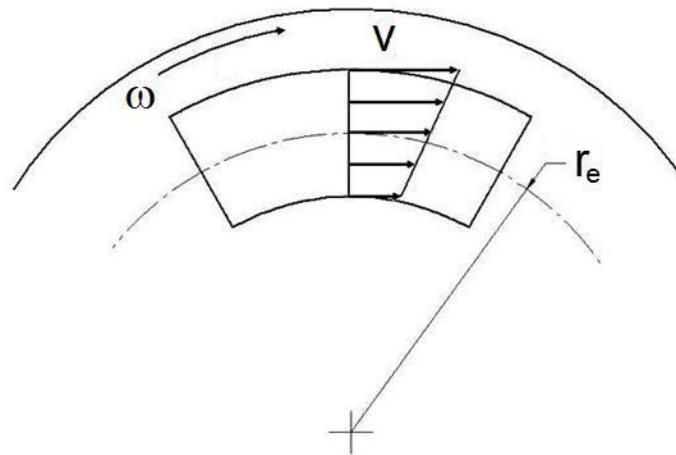


Figura 3.3 – Desenho esquemático do disco e a variação da velocidade de escorregamento.

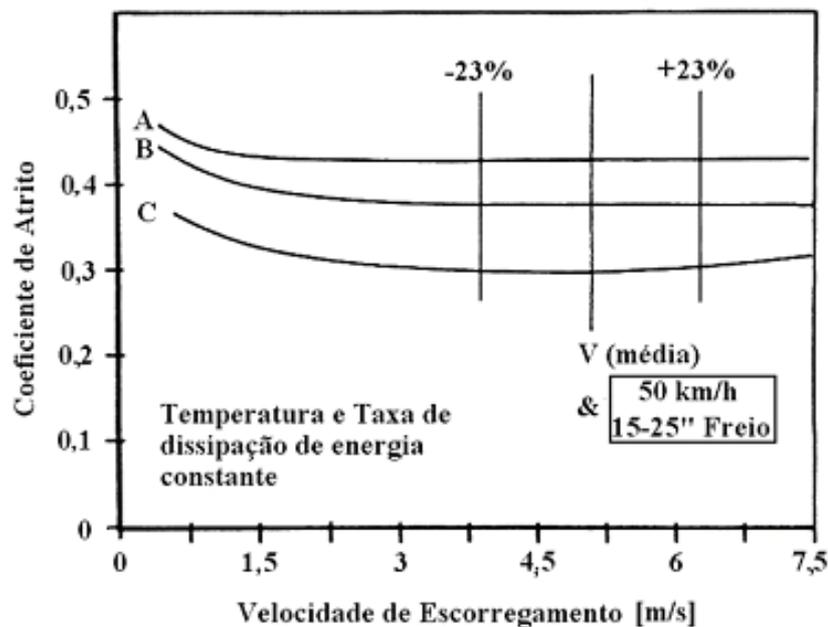


Figura 3.4 – Influência da variação da velocidade sobre o coeficiente de atrito, onde as letras A, B e C indicam diferentes amostras. [Adaptado de Wilson e Bowsher, 1971].

### 3.4.3 Temperatura

A temperatura é a variável resultante da aplicação das outras duas variáveis de desempenho, sendo que a sua total relação com o desempenho dos freios ainda não é totalmente conhecida. Mesmo assim, Neuman et al., 1983 e Preston e Forthofer, 1971, são categóricos ao afirmarem que a variável de maior influência no desempenho do material de atrito é a temperatura, especialmente a da superfície de contato entre pastilha e disco. Todos os fenômenos tribológicos que ocorrem nessa região são principalmente guiados por essa

variável [Ostermeyer, 2001 e Ostermeyer, 2003]. A distribuição de temperatura na região de contato também não é uniforme, visto que alguns autores relatam a existência de pontos quentes – *hot spots* – durante o processo de frenagem [Cristol-Bulthé et al., 2007, Desplanques et al., 2007 e Dillenburg, 2007].

O aquecimento e resfriamento durante o processo de frenagem resultam em reações químicas na pastilha, fazendo com que o material tenha um histórico de utilização. Cristol-Bulthé et al., 2007 realizaram experimentos utilizando Análise Termo-Gravimétrica (do inglês *Thermo Gravimetric Analysis, TGA*), nos quais concluíram que, com o aumento da temperatura, há variação de massa e liberação de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ , resultantes da degradação de resinas fenólicas presentes na matriz orgânica da pastilha. A Figura 3.5 ilustra o gráfico da liberação de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  e da variação de massa utilizando TGA. A Etapa 1 compreende a faixa de temperatura ambiente até  $300^\circ\text{C}$ , onde há baixa produção de  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CO}_2$  e indica que a variação de peso da amostra é referente à perda de água e gás presentes nos poros do material; a segunda etapa de  $300^\circ\text{C}$  a  $600^\circ\text{C}$  mostra que os dois picos de produção de  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CO}_2$  estão relacionados com a degradação das resinas fenólicas do material de atrito; e a Etapa 3 de  $600^\circ\text{C}$  a  $1200^\circ\text{C}$  indica que sob altas temperaturas a produção de  $\text{H}_2\text{O}$  é baixa, indicando que as resinas já foram degradadas e que o pico de produção de  $\text{CO}_2$  revela que há a degradação de outro tipo constituinte do corpo de prova.

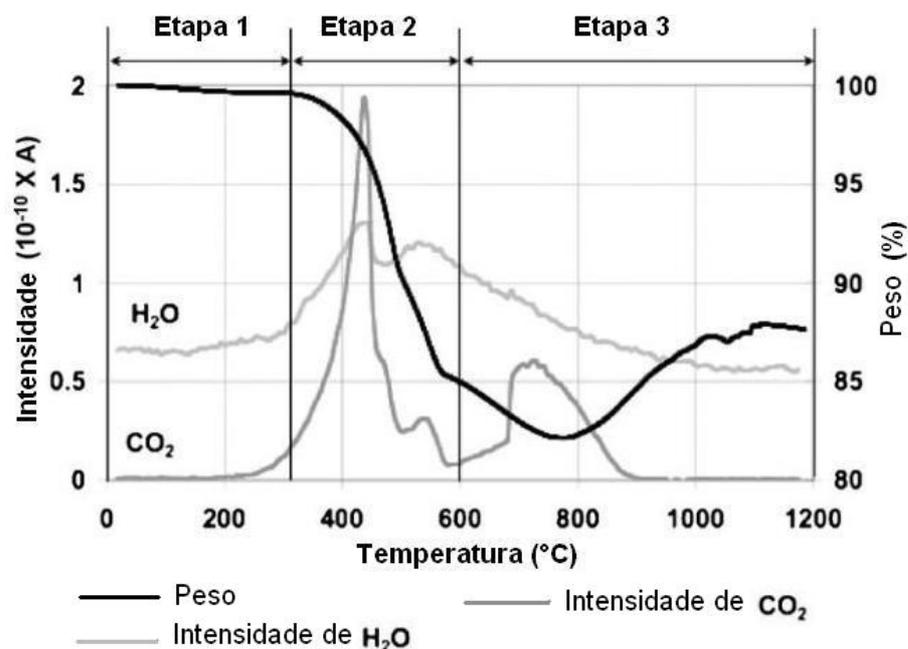
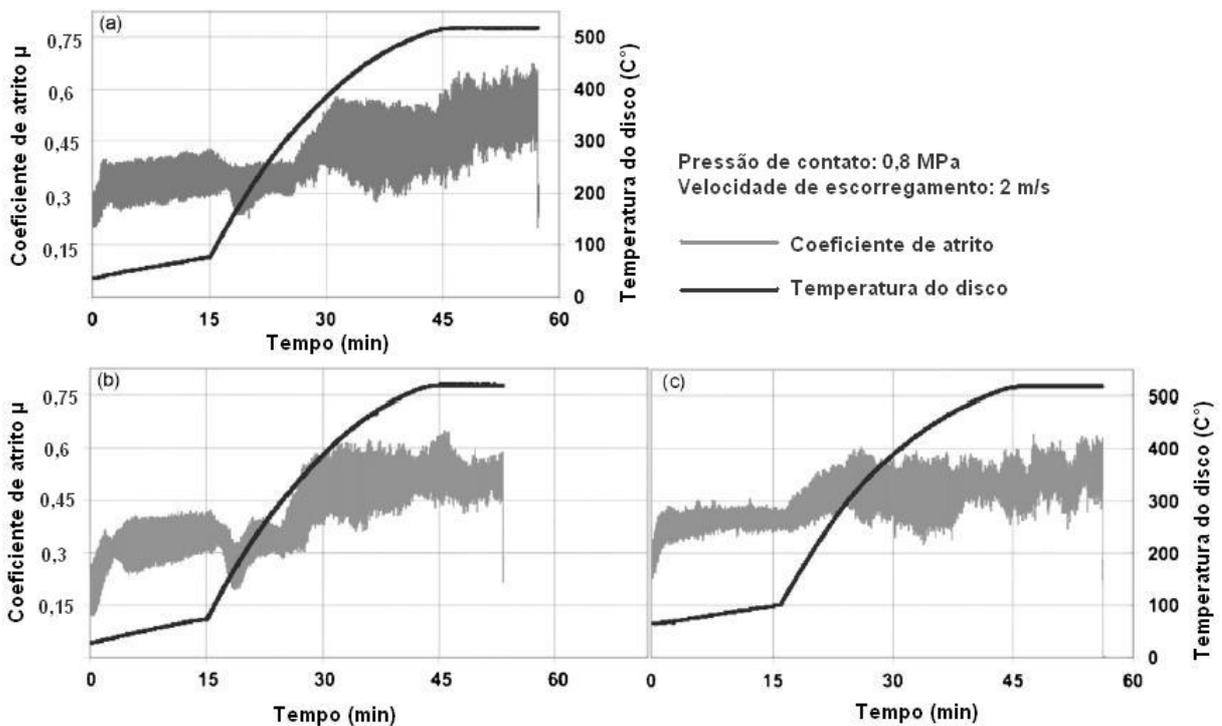


Figura 3.5 – Liberação de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  e variação de massa, utilizando TGA. [Adaptado de Cristol-Bulthé et al., 2008].

Para verificação da influência da temperatura sobre o atrito, os referidos ensaios foram realizados com duas amostras, sendo aplicados a mesma velocidade de escorregamento de 2 m/s e uma pressão de contato de 0,8 MPa. Quanto à temperatura de ensaio, os autores dividiram em três etapas: a primeira de 15 minutos sem aquecimento externo a partir da temperatura ambiente; a segunda de 30 minutos com aquecimento até atingir 515°C; e por fim a Etapa 3, com 15 minutos com temperatura constante de 515°C.

Os autores verificaram que ao atingir os valores térmicos máximos definidos, o material apresenta uma mudança de desempenho em relação ao coeficiente de atrito, observável em frenagens posteriores utilizando a mesma amostra (Figura 3.6). Essa peculiaridade é possível devido ao fato de o desgaste ser acentuado em altas temperaturas [Cristol-Bulthé et al., 2007, Rhee e Schwartz, 1979].



**Figura 3.6 – (a) comportamento do atrito ao atingir 515°C pela primeira vez para primeira amostra; (b) comportamento do atrito ao atingir 515°C pela primeira vez para segunda amostra e (c), comportamento do atrito ao atingir 515°C pela segunda vez para segunda amostra. [Adaptado de Cristol-Bulthé et al., 2008].**

Neis et al., 2009 constatou que, ao medir o atrito em condições de até 250°C, o coeficiente de atrito aumenta em até 40% com o aquecimento controlado da frenagem. Para frenagens acima de 300°C, o sistema de freio apresenta uma queda no coeficiente de atrito.

Esse fenômeno é conhecido na literatura como *fade* [Birch, 1999, Ostermeyer, 2001 e Ostermeyer, 2003].

Para medição de temperatura, a técnica mais utilizada é através da colocação de um ou mais termopares a uma determinada distância no interior do rotor, alinhado com a pista de rolagem da pastilha. Apesar de ser um método de relativa facilidade de implantação, tem a desvantagem de não informar a temperatura instantânea na superfície de contato do par de fricção. Outros autores apresentam formas alternativas de medição, como por exemplo, a técnica do termopar exposto [Qi e Day, 2006 e Degenstein, 2007], onde a medição é feita na interface de contato disco-pastilha; e termografia [Dillenburg, 2007], em que um termógrafo é direcionado à superfície a ser medida e o faz através da radiação emitida pelo corpo em questão.

A comparação da diferença entre as temperaturas medidas em função do local de medição é fornecida por Newman et al., 1983, como pode ser observado na Figura 3.7.

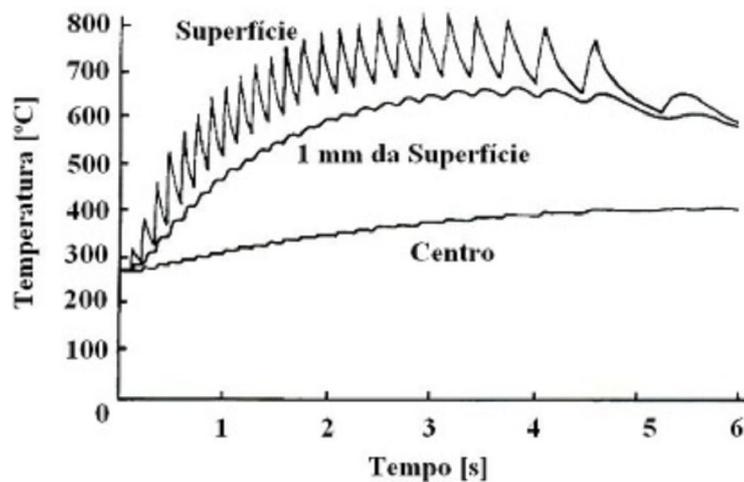


Figura 3.7 – Temperaturas estimadas em função da distância da superfície de contato. [Adaptado de Neuman et al., 1983].

### 3.5 Mecanismo de Atrito de Materiais de Fricção

Eriksson e Jacobsson, 2000, Ostermeyer, 2001, Eriksson et al., 2002 e Ostermeyer 2003, descrevem o mecanismo de atrito de materiais de fricção em cinco etapas:

a) a pastilha, feita principalmente de materiais poliméricos e algumas partículas duras (fibras metálicas, por exemplo), entra em contato com o disco, que está em movimento. Esse primeiro contato entre as duas superfícies produz partículas de desgaste (Figura 3.8). Esses

fragmentos se movem através da zona de contato, aderindo-se parcialmente a superfície do disco, e retornando a referida zona algum tempo depois.

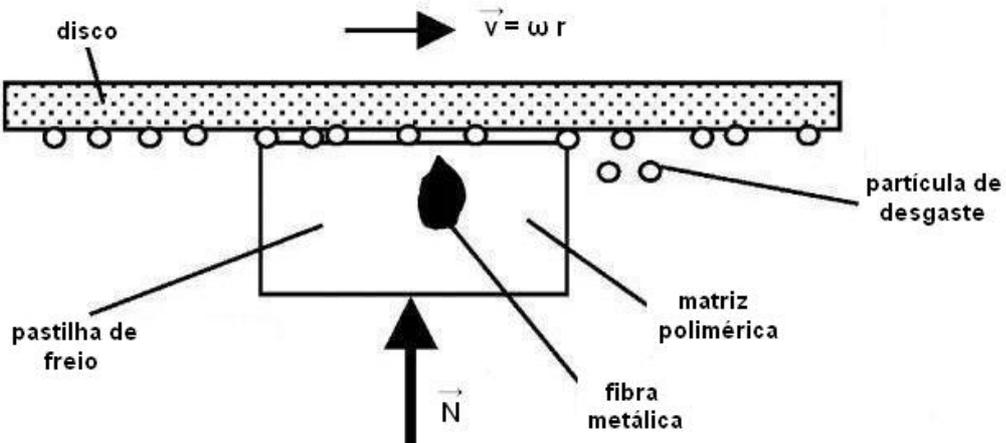


Figura 3.8 – Contato inicial entre pastilha e disco de freio e seus elementos. [Adaptado de Ostermeyer, 2003].

b) quando essas partículas duras alcançam a superfície pelo desgaste da matriz, o fluxo das partículas de desgaste será perturbado enquanto que as fibras metálicas são espremidas contra a matriz polimérica ao seu redor, já que esta é mais macia e diminuída pelo desgaste. Nesse momento essas partículas duras ainda não apresentam desgaste (Figura 3.9);

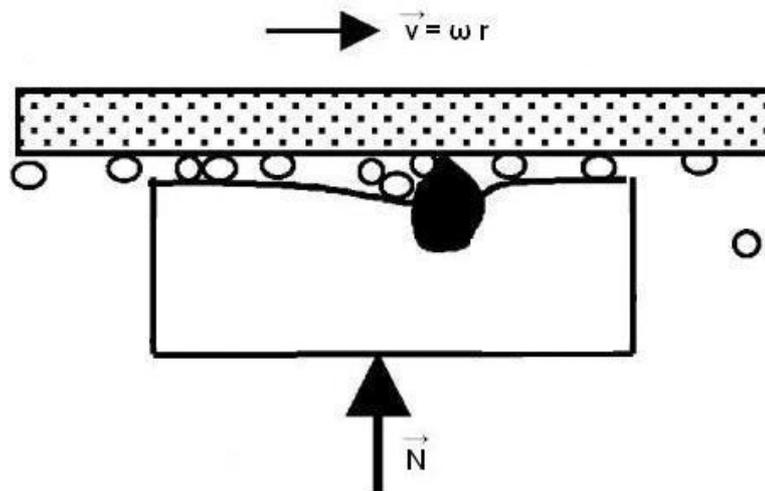


Figura 3.9 – Contato entre as partículas duras (fibras metálicas) e o rotor durante o processo de frenagem. [Adaptado de Ostermeyer, 2003].

c) a tensão normal e tangencial, assim como a produção de calor entre as partículas duras e o disco, irá aumentar (Figura 3.10). Essa combinação de aquecimento local e tensões permitem

a fundição das partículas de desgaste com as fibras metálicas (Figura 3.11). Esse processo resulta na formação de platôs de contato, fazendo crescer a força de atrito.

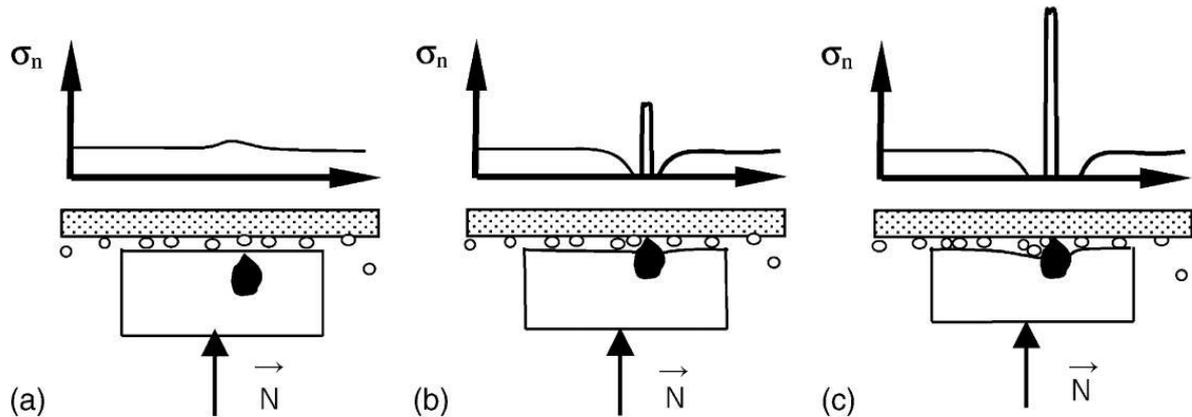


Figura 3.10 – Aumento da tensão normal (a) antes e, (b) e (c) durante o contato da fibra metálica com o disco. [Adaptado de Ostremeyer, 2003].

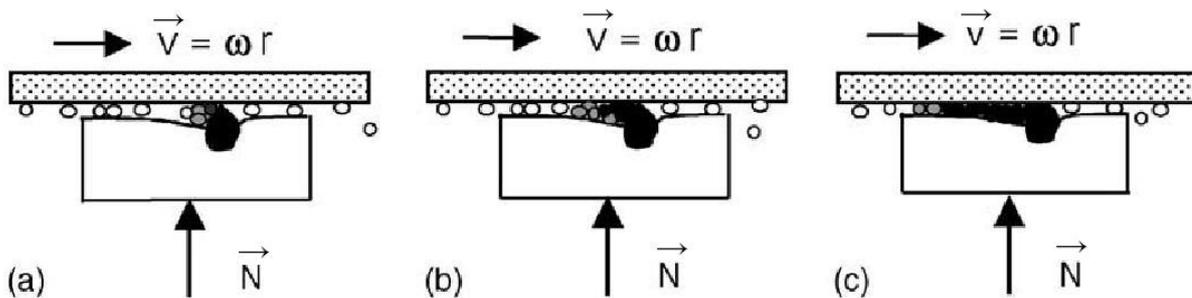


Figura 3.11 – Processo de fundição entre as partículas duras e de desgaste, (a), (b) e (c). [Adaptado de Ostremeyer, 2003].

**d)** os platôs de contato formados são divididos em dois tipos: primários e secundários. Os platôs primários são formados pelas fibras metálicas desgastadas devido ao contato com o disco. Os platôs secundários são constituídos pelas partículas de desgaste fundidas com as fibras metálicas. Pode-se assim dizer que os platôs secundários não existiriam sem o apoio estrutural dos platôs primários (Figura 3.12).

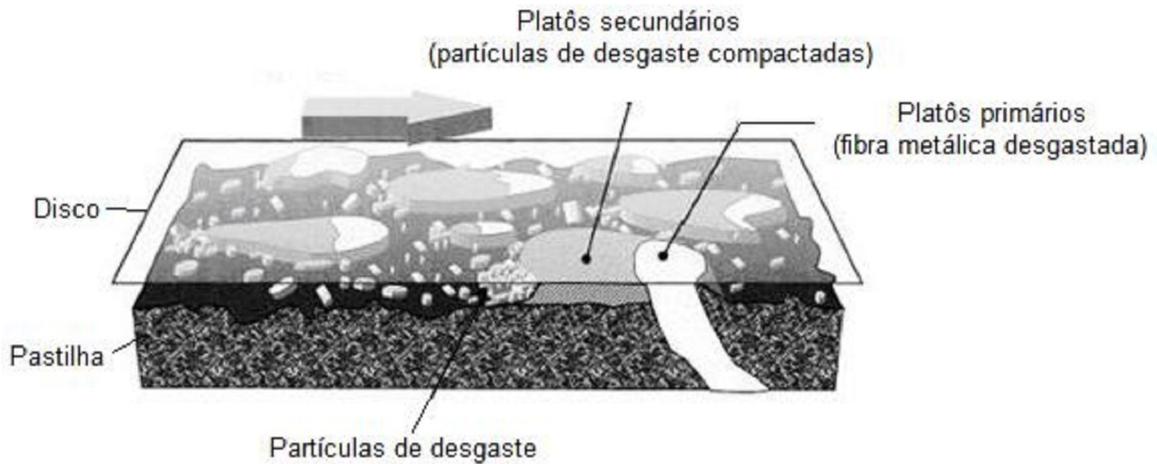


Figura 3.12 – Platôs primários e platôs secundários de contato. [Adaptado de Eriksson e Jacobsson, 2000].

e) o desgaste das fibras metálicas e sua vizinhança, estresse térmico, histórico de cargas e a rugosidade do disco resultam em trincas, que encurtam a vida útil dos platôs de contato. Parte dessas inclusões flui para fora da zona de contato junto com outras partículas de desgaste ou iniciam o surgimento de outros platôs em alguma outra posição do contato (Figura 3.13).

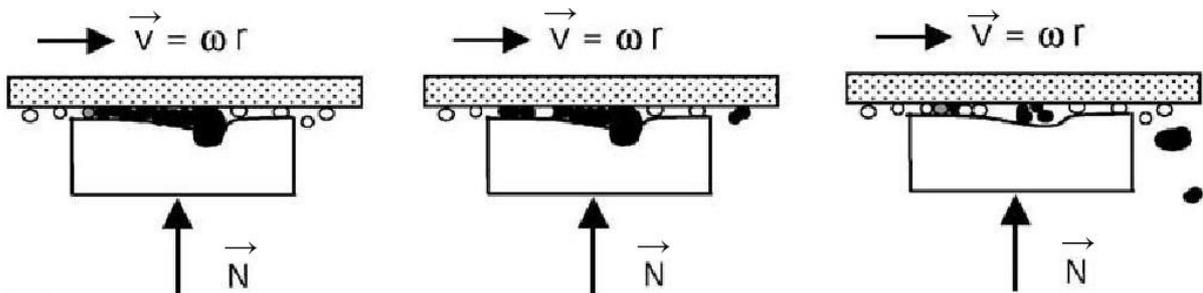


Figura 3.13 – Fim da vida útil de um platô de contato e fluxo para fora da zona de contato. [Adaptado de Ostermeyer, 2003].

### 3.6 Procedimentos de Ensaios

Caracterizar um material de atrito é medir seu comportamento frente às diferentes variáveis de operação (pressão de contato, velocidade de escorregamento e temperatura) e desgaste. Para tal, utilizam-se procedimentos de ensaio que têm como principais funções pesquisa, desenvolvimento, qualificação, controle de qualidade, aprovação e desempenho em serviço [Rusnak et al., 1970]. Existem diversas metodologias de ensaio, sendo que até algumas montadoras de automóveis desenvolvem procedimentos próprios para certificarem os materiais de atrito que fazem parte de seu produto final.

Um procedimento de ensaio geralmente divide-se em etapas, que por suas vez decompõem-se em frenagens, nas quais são definidas as variáveis de frenagem. Essa estrutura geral dos procedimentos de ensaio pode ser vista na Figura 3.14.

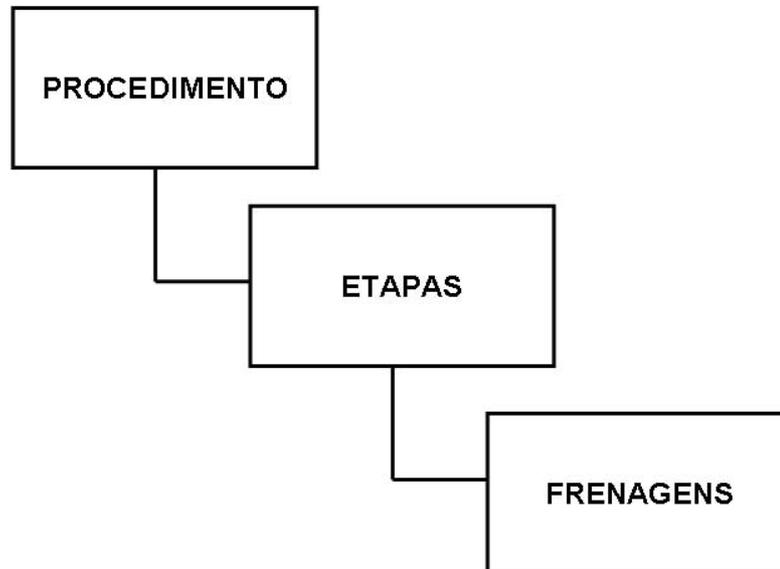


Figura 3.14 – Estrutura geral dos procedimentos de ensaio.

Quanto às etapas de frenagens, as principais e mais recorrentes na maioria dos procedimentos de ensaios existentes são [Infantini, 2008]:

- **assentamento:** etapa em que acontece a última cura do material e conseqüentemente o aumento da área de contato do par de fricção (ou área útil de frenagem). O parâmetro geralmente utilizado para determinar se o material pode ou não ser considerado assentado é o coeficiente de atrito, que tende a se estabilizar durante a frenagem.
- **caracterização:** etapas que são aplicadas alternadamente entre estágios de avaliação específica de alguma variável determinante durante o processo de frenagem (pressão, velocidade e temperatura). Através dessa etapa, se aplicada antes e/ou depois de uma condição especial, é possível comparar através de parâmetros semelhantes a verdadeira influência sobre o desempenho e capacidade de recuperação do atrito da amostra ensaiada;
- **etapas de pressão e velocidade:** etapas que tem como objetivo avaliar a influência específica das variáveis pressão de contato e velocidade de escorregamento no desempenho do material de atrito;

- **fade**: etapa do procedimento que tem como principal finalidade verificar a performance do material de atrito quando o mesmo é submetido a condições de temperatura consideradas elevadas (acima de 300°C, segundo Limpert, 1999).

Quanto às frenagens, podem ser divididas em:

- **frenagens com velocidade constante**: também conhecidas como frenagens em arrasto ou *drag*, são aquelas em que a velocidade de escorregamento não é alterada durante o contato entre material de atrito e rotor. Geralmente nesse tipo de frenagem, tempo de aplicação e temperatura definem o período de contato entre o par de fricção;
- **frenagens com desaceleração**: frenagens em que a velocidade de escorregamento diminui de um valor inicial para um final, através da desaceleração a qual o rotor é submetido. Nesse tipo de frenagem, o período em que o par de fricção permanece unido depende de parâmetros previamente definidos.

Entretanto, os procedimentos de ensaios só são possíveis de colocar em prática graças à existência de instrumentos específicos para esse fim, os quais serão brevemente abordados a seguir.

### 3.6.1 Máquinas de Ensaio de Materiais de Fricção

As máquinas para ensaios de materiais de fricção têm como finalidade testar e avaliar amostras em escala sem a necessidade de utilizar veículos reais, ou de realizar ensaios em escala reduzida. Existem vários tipos de equipamentos para medir o desempenho dos materiais de atrito usados em freios veiculares, cada um com seus procedimentos específicos de teste. Como exemplos mais comuns, têm-se máquinas do tipo FAST e dinamômetros inerciais [Zimmer, 1982]. O primeiro realiza a frenagem do tipo velocidade constante enquanto os dinamômetros inerciais são operados sob desaceleração, utilizando discos de inércia selecionados para simular as condições reais dos veículos.

Em máquinas do tipo FAST, é comum adotar-se o procedimento descrito por ABNT, 1998, o qual indica que um corpo de prova quadrado de 12,7 mm deve ser pressionado contra um disco de 179,3 mm de diâmetro e 38,1 mm de espessura. A rotação deve ser de 870 rpm e o raio efetivo de 76,2 mm. A frenagem é constante durante 90 minutos, sendo que no final desse período, a temperatura atingida é de 293°C, uma vez que a capacidade térmica do sistema é conhecida. Esse prévio conhecimento das características do ensaio permite uma

comparação de resultados entre diferentes tipos de materiais, tanto para atrito, como para o desgaste verificado através das variações geométricas da amostra. Outro ponto importante é que, como o sistema de freio é único, todo e qualquer resultado obtido é função apenas do material de atrito.

Nos dinamômetros inerciais, existem vários procedimentos de ensaio, mas em todos os sistemas de freio dos veículos (cáliper e disco, no caso de freio a disco) são ensaiados junto com o material de fricção. Dessa forma, os resultados obtidos não dependem apenas do material, mas também do sistema de freio testado. Entretanto, os resultados dos ensaios em dinamômetros inerciais são amplamente utilizados para testes de aceitação, pois é o que apresenta a melhor correlação com aqueles verificados nos veículos reais. Essa é a maneira que os fabricantes de veículo garantem a segurança dos novos automóveis durante a frenagem [Neis et al., 2009].

Nesse contexto, uma máquina conhecida como tribômetro vem se destacando como uma ferramenta bastante útil para auxiliar pesquisas e quantificar o comportamento do atrito frente a mudanças de composição química e parâmetros específicos de operação [Blau e McLaughlin 2003, Desplanques et al., 2006, Cristol-Bulthé et al., 2007, Lee et al., 2007, Cristol-Bulthé et al., 2008 e Neis et al., 2009]. O tribômetro utilizado no presente trabalho, bem como todas as suas principais características, é apresentado a seguir.

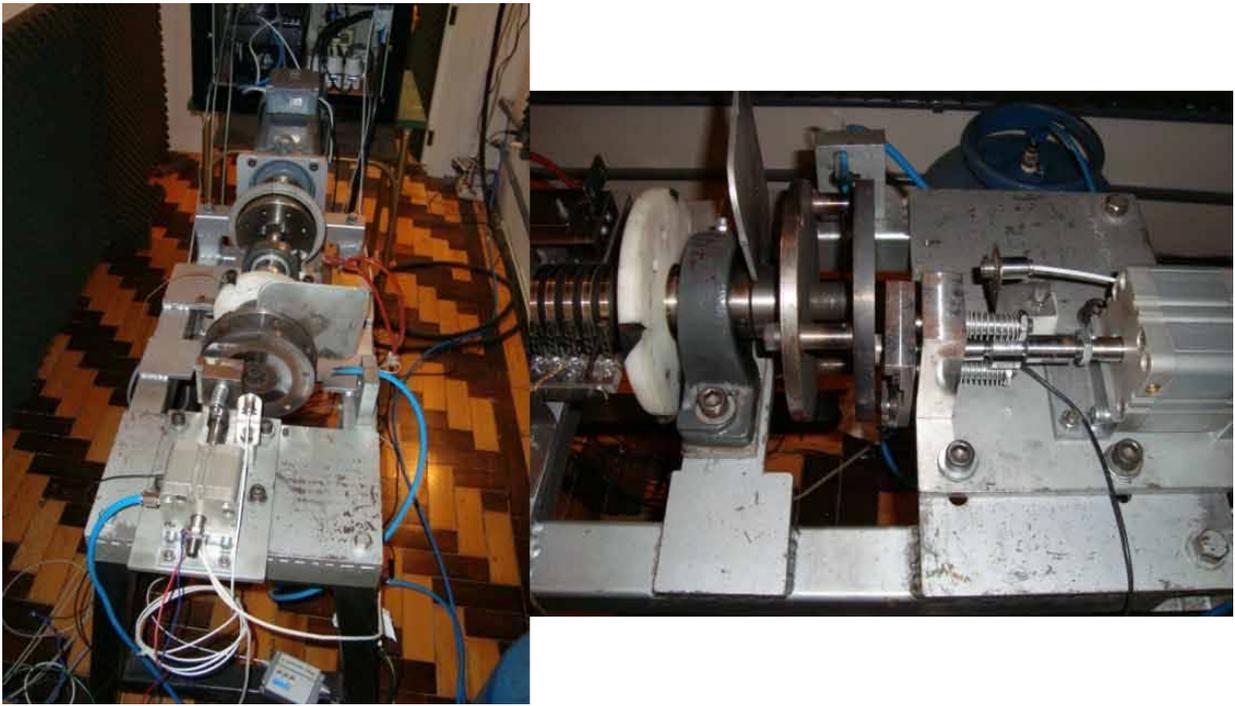
### **3.6.2 O Tribômetro**

O tribômetro em questão foi projetado e desenvolvido por Neis, 2008, tendo como principal objetivo servir como uma ferramenta simples para compreensão do comportamento do coeficiente de atrito frente às diferentes condições de operação (Figura 3.15). É basicamente um rotor vertical (disco) no qual uma amostra (material de atrito) é pressionada. Essa máquina é capaz de:

- utilizar em escala condições semelhantes às que ocorrem nos veículos, segundo levantamento de Infantini, 2008;
- controlar cada um dos parâmetros de operação durante os ensaios;
- realizar ensaios com um aparelho de atuação próprio, independente do sistema de freio. Dessa forma, um material de fricção pode ser diretamente comparado com outro, sem a influência do cáliper e do disco (no caso do freio a disco). Infantini, 2008, mostrou que um

mesmo material de fricção, quando ensaiado com diferentes sistemas de freio, apresenta desempenho distinto para cada frenagem;

- desempenhar ensaios em escala;
- realizar a troca de amostras e demais ajustes em um intervalo de tempo menor que cinco minutos;
- realizar frenagens tanto com velocidade constante (semelhante a FAST), quanto com desaceleração (semelhante ao dinamômetro inercial).



(a)

(b)

**Figura 3.15 – Tribômetro de Neis, 2008: (a) vista em perspectiva e (b) vista lateral de parte do equipamento.**

O disco de freio e a geometria do corpo de prova que devem ser utilizados também são definidos por Neis, 2008. O disco utilizado é do tipo sólido, fabricado com os mesmos materiais dos freios comerciais e tem suas dimensões detalhadamente especificadas na Figura 3.16. A geometria do corpo de prova definida e aconselhada por Neis, 2008 é mostrada na Figura 3.17.

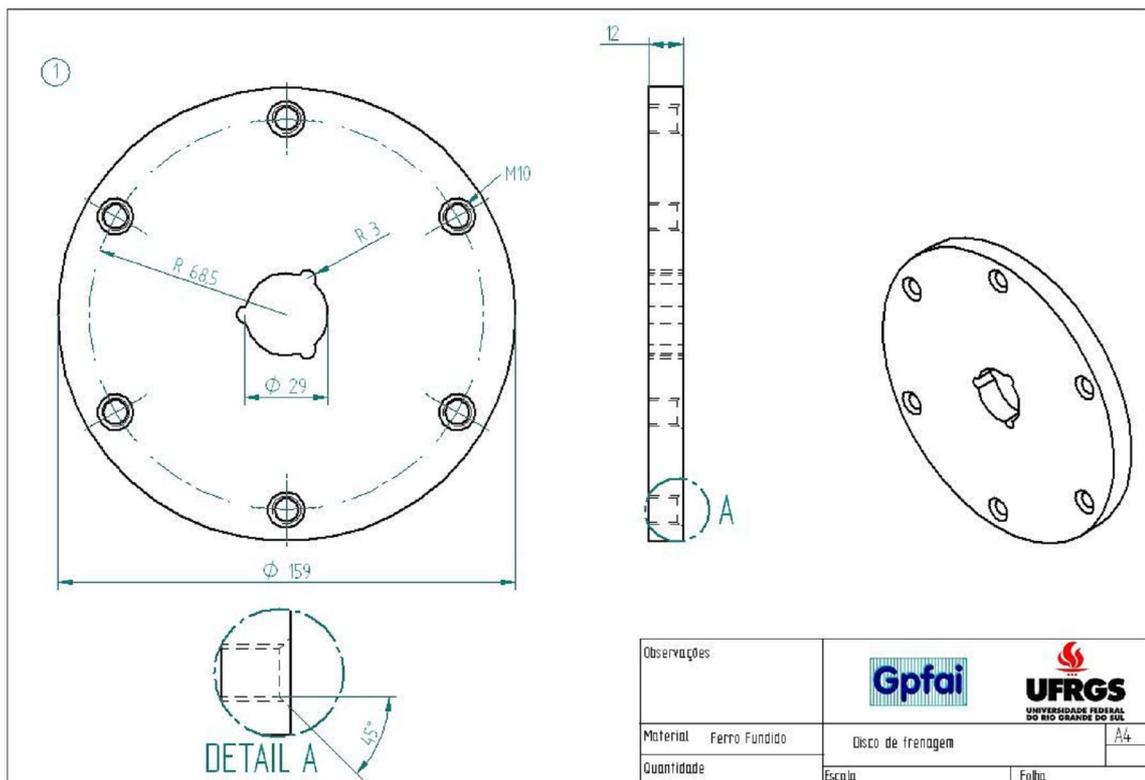


Figura 3.16 – Dimensões detalhadas do disco de freio do tribômetro de Neis, 2008. [Fonte: Neis, 2008].

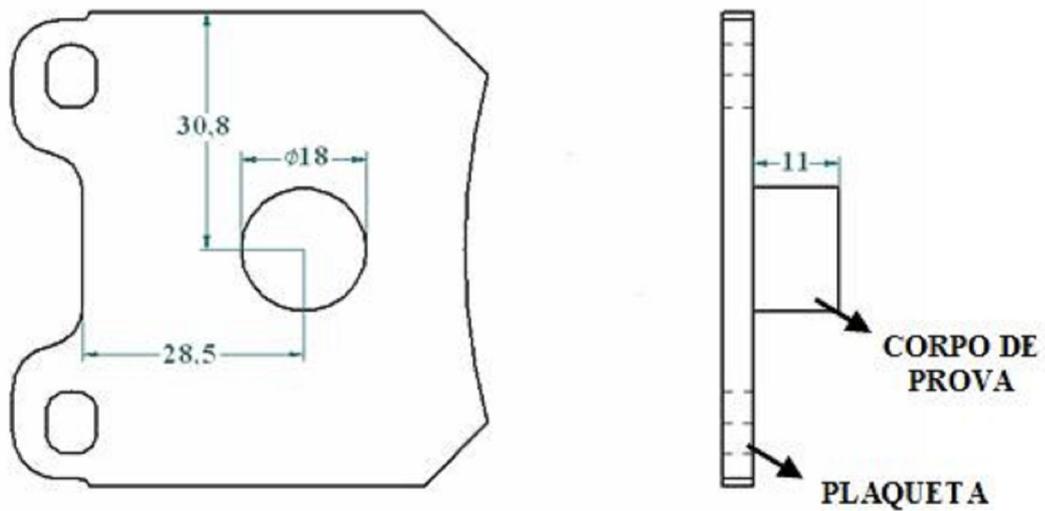


Figura 3.17 – Geometria do corpo de prova recomendada para utilização no tribômetro de Neis, 2008.

[Fonte: Neis, 2008].

### 3.6.3 Medição dos Parâmetros de Operação

O tribômetro em questão emprega vários sistemas e tecnologias para medição e aquisição dos dados que controlam a máquina [Neis, 2008]:

- **o sistema de atuação:** o pistão pneumático é controlado por uma válvula proporcional, controlando a pressão entre o intervalo de 0 a 0,6 MPa. Um medidor de pressão digital está instalado na entrada do pistão. A carga é medida por um transdutor de força instalado entre o cilindro e a amostra, com capacidade nominal de 5 kN. Um sistema de malha fechada foi usado para manter a carga ao longo do tempo constante, independente das flutuações da linha de pressão, efeitos de histerese mecânica, etc.
- **o sistema de rotação:** o eixo do servo motor é diretamente conectado ao eixo de rotação da máquina. O servo motor é controlado por um controlador de velocidade, e pode atingir rotações de até 4500 rpm. A potência total do motor é de 11 kW e seu torque nominal é de 30,5 N.m. Um transdutor de torque montado diretamente sobre o eixo mede, sem contato físico, o torque ao qual o eixo se submete durante a frenagem.
- **o sistema de controle de temperatura:** o sinal de entrada para temperatura é fornecido através de um termopar do tipo K, localizado a 4 mm da superfície disco e com raio efetivo de 40 mm.
- **o sistema de controle e aquisição:** consiste em uma placa de aquisição conectada ao computador capaz de processar dados de entrada e saída em tempo real. É responsável por todos os processos da máquina. Todos os parâmetros de ensaio são configurados e monitorados utilizando uma interface gráfica simples, própria da placa de aquisição.

As principais características de operação do tribômetro estão resumidamente especificadas na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1 – Características gerais de operação do tribômetro de Neis, 2008. [Adaptado de Neis, 2008].**

Carga normal [N]	0 a 1600
Torque [N.m]	até 30,5
Raio médio da pista de atrito [mm]	27 a 54
Rotação [rpm]	0 a 4500
Diâmetro do disco [mm]	159
Dimensões (Altura x Largura x Comprimento) [mm]	784 x 350 x 865

### 3.6.4 Medição do Atrito

A máquina projetada por Neis, 2008 funciona com a aplicação de força em apenas um lado do disco, diferentemente de algumas máquinas que aplicam força nos dois lados do rotor. Desse modo, o coeficiente de atrito é determinado de acordo com a Equação 3.1 [Neis, 2008].

$$\mu = \frac{M}{r_e F_N} \quad (3.1)$$

onde  $\mu$  representa o coeficiente de atrito,  $M$  representa o torque medido durante as frenagens [N.m],  $r_e$  representa o raio efetivo [m] e  $F_N$  representa a força normal aplicada [N]. A incerteza associada ao resultado do coeficiente de atrito é de 0,54% sobre o valor nominal do atrito, conforme estudo realizado por Santos, 2008. Segundo o mesmo autor, as incertezas associadas a medição da força de aplicação e do torque aplicado são, respectivamente 0,5% e 0,2%.

### 3.6.5 Medição da Temperatura

A incerteza associada a medição da temperatura através do termopar instalado no interior do disco é dado pela combinação das incertezas dos instrumentos de medição. O condicionador de sinais do termopar utilizado é o modelo TxRail, fabricado pela Novus, enquanto que o termopar é do tipo K. As incertezas dos instrumentos de medição são, respectivamente, 0,2% [Novus, 2010] e 0,75% [Webster, 1999]. Assim, a incerteza total da medição da temperatura é dada pela Equação 3.2:

$$U_T = \sqrt{(0,002)^2 + (0,0075)^2} = 0,0077 = 0,77\% \quad (3.2)$$

onde  $U_T$  representa a incerteza associada a medição de temperatura.

### 3.6.6 Medição da Velocidade de Escorregamento do Tribômetro

A velocidade de escorregamento do tribômetro, considerando a rotação de entrada previamente determinada, pode ser calculada através da Equação 3.3:

$$V = \frac{2\pi r_e N}{60} \quad (3.3)$$

onde  $V$  representa a velocidade de escorregamento [m/s],  $r_e$  representa o raio efetivo [m] e  $N$  representa a rotação fornecida pelo tribômetro [rpm].

## 4 ENSAIOS PRELIMINARES

Nesse capítulo, serão mostrados alguns experimentos preliminares que serviram de base para a determinação das etapas do procedimento de ensaio discutidas no Capítulo 5. As frenagens apresentadas foram realizadas com materiais de diferentes e desconhecidas formulações, e, para todos os casos, o raio efetivo e a taxa de aquisição é de 40 mm e 1 Hz, respectivamente. A geometria é a mesma definida por Neis, 2008 (Figura 3.17), obtida a partir de formatos comerciais.

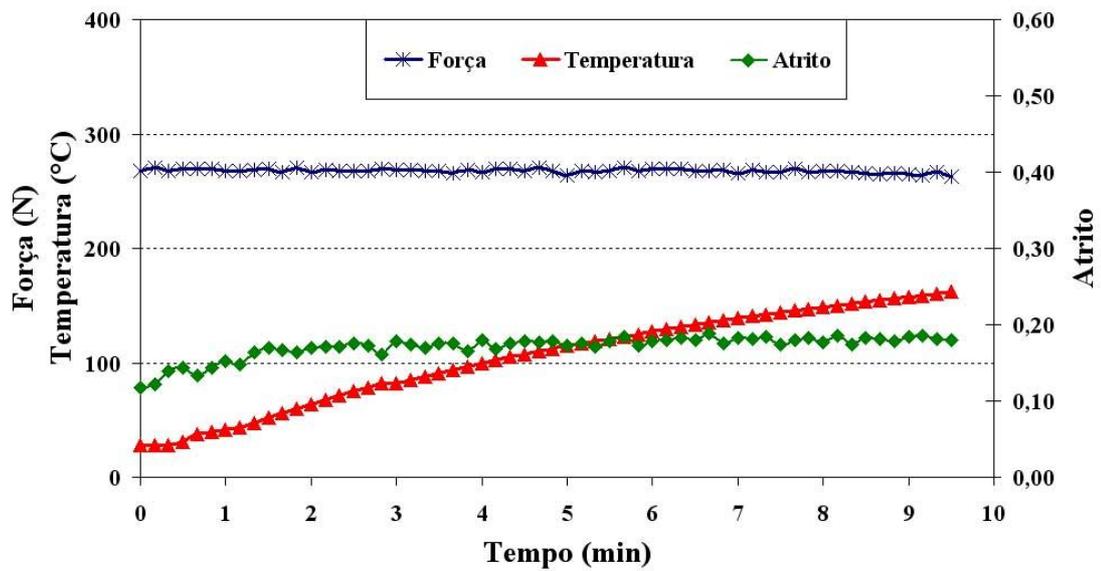
### 4.1 Frenagens Prévias de Assentamento

As frenagens prévias de assentamento foram realizadas utilizando dois materiais iguais, chamadas aqui de Amostra 1.1 e Amostra 1.2. Os parâmetros de frenagens foram semelhantes entre as amostras, diferindo-se apenas na força de aplicação. Esses parâmetros podem ser vistos na Tabela 4.1

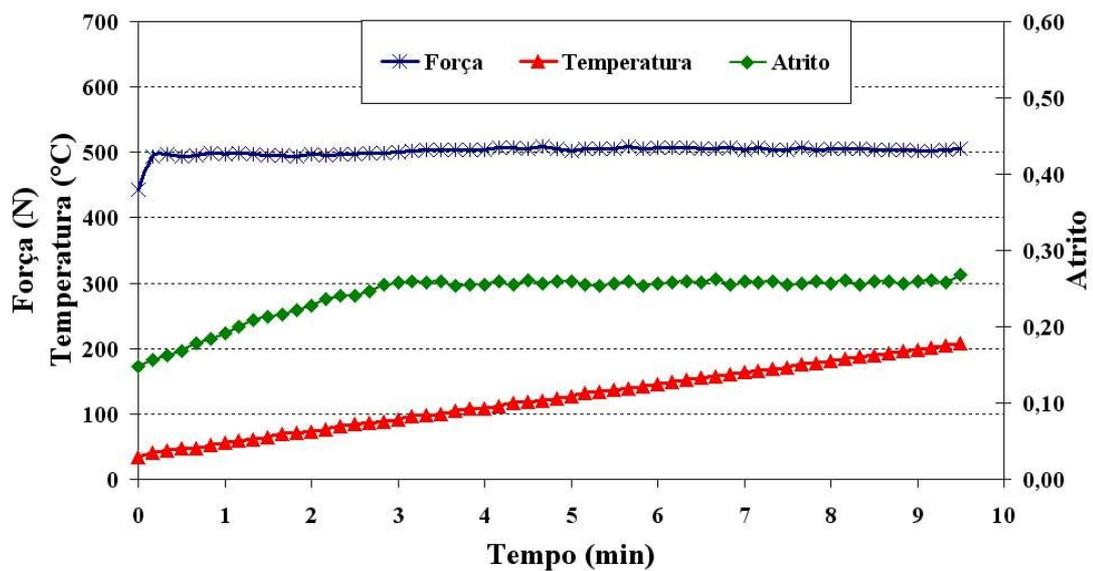
**Tabela 4.1 – Parâmetros utilizados para frenagens prévias.**

	Amostra 1.1	Amostra 1.2
Temperatura Inicial (°C)	Ambiente	
Temperatura Final (°C)	Livre	
Velocidade de Escorregamento (m/s)	2,1	
Força de Aplicação (N)	270	500
Duração da Frenagem	9,5	

Ao aplicar os parâmetros mostrados na Tabela 4.1, têm-se as curvas mostradas na Figura 4.1.



Amostra 1.1



Amostra 1.2

Figura 4.1 – Curvas de força, temperatura e atrito para as amostras utilizadas.

Observando-se as curvas da Figura 4.1, há a indicação de que o coeficiente de atrito tende a se estabilizar a partir do quarto minuto de frenagem para ambos os casos. Nas duas situações, as curvas de atrito iniciam em um patamar inferior e então apresentam um crescimento até se tornarem constantes, atingindo o objetivo de uma etapa de assentamento. Do ponto de vista prático, pode-se utilizar um tempo menor de frenagem e ainda assim atingir

a estabilidade do coeficiente de atrito. Outro ponto a ser observado, é que em nenhuma das frenagens a temperatura atinge valores maiores que 300°C, temperatura considerada elevada por Limpert, 1999.

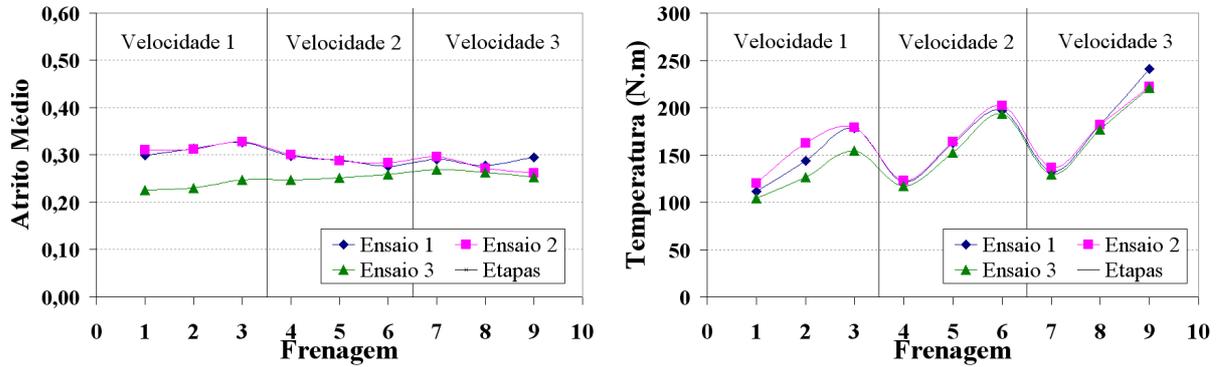
## 4.2 Frenagens Diversas

As frenagens mostradas a seguir serviram para que houvesse um prévio conhecimento da influência da força e velocidade de escorregamento do tribômetro em relação ao coeficiente de atrito das amostras, facilitando a escolha dos parâmetros das etapas discutidas no Capítulo 5. Essas frenagens fazem parte de um estudo realizado por Neis et al., 2009 para verificar a influência dos parâmetros de operação do tribômetro sobre o comportamento do atrito. Ao todo, utilizaram-se três amostras distintas (todas de formulação comercial) que serão chamadas doravante de amostras 2.1, 2.2 e 2.3. Para cada um dos corpos de prova, os estágios das frenagens foram divididos em três etapas de velocidade. Dentro dessas etapas, a força é gradativamente sendo elevada. Por fim, os corpos de prova foram submetidos três vezes a cada um dos estágios definidos. A Tabela 4.2 mostra de forma resumida os parâmetros e etapas das frenagens de velocidade e força.

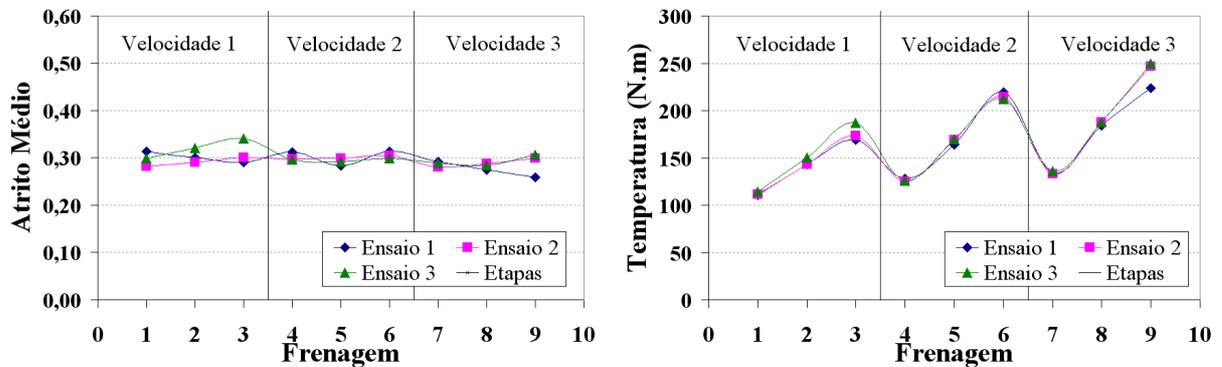
**Tabela 4.2 – Parâmetros utilizados para frenagens de velocidade e força.**

Estágio	Velocidade de escorregamento (m/s)	Força (N)	Temperatura inicial (°C)	Tempo (min)
1	2,1	200	100	3
		400		
		600		
2	3,1	200		
		400		
		600		
3	4,1	200		
		400		
		600		

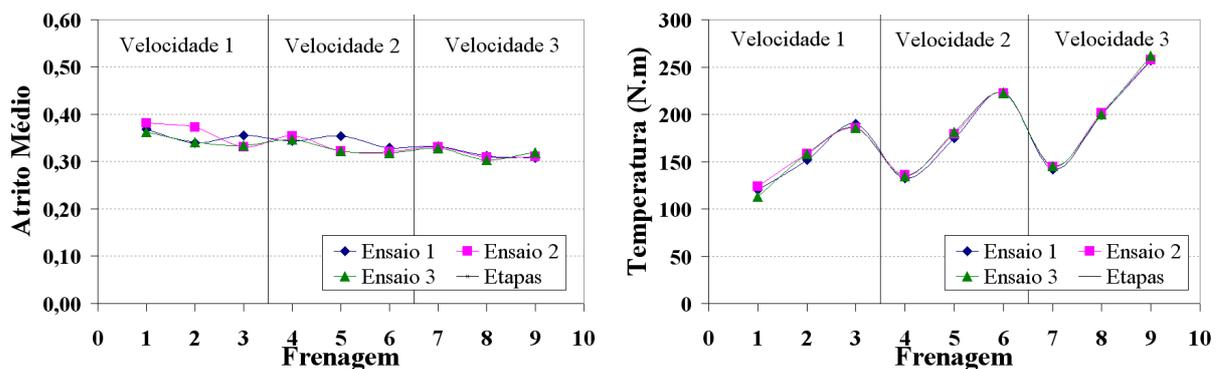
As curvas resultantes para coeficiente de atrito médio e temperatura final medida no disco podem ser observadas na Figura 4.2.



Amostra 2.1



Amostra 2.2



Amostra 2.3

Figura 4.2 – Curvas de Coeficiente de atrito médio e temperatura final para amostras utilizadas.

As curvas mostradas na Figura 4.2 indicam que, com o aumento da força, o coeficiente de atrito médio sofre alteração no comportamento, (com exceção do terceiro ensaio da amostra 2.1), tendendo a ficar menor. Em contrapartida, é possível verificar que a temperatura

fica mais elevada com o decorrer do ensaio. As curvas da Figura 4.2 mostram as temperaturas esperadas para cada uma das combinações de velocidade de escorregamento e força de aplicação.

## 5 PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Neste capítulo será descrito o procedimento proposto para verificação do comportamento do atrito dos materiais de fricção, utilizando frenagem do tipo velocidade constante e sob certas condições de temperatura.

Para idealização da estrutura básica do procedimento proposto, utilizou-se a seguinte lógica:

- como as amostras que serão utilizadas na metodologia são novas, é necessário que haja uma primeira etapa para que o atrito se estabilize, aumentando a área útil de contato do par de fricção. Assim, o procedimento iniciaria com uma etapa de assentamento;
- Cristól-Bulthé et al., 2008, verificaram que ao realizar frenagens com elevadas temperaturas em seqüência, o material de atrito tem seu comportamento modificado. O procedimento aqui proposto deve ser capaz de mostrar isso. Portanto, duas etapas de *fade* são necessárias, pois é o mesmo número de etapas utilizadas por Cristól-Bulthé et al., 2008;
- para cada etapa de *fade* realizada, é interessante verificar o poder de recuperação do material de atrito. Para isso, é preciso que etapas de caracterização sejam incluídas na estrutura do procedimento, possibilitando a comparação do desempenho do material antes e depois de cada uma das etapas de *fade*. Como foi definido no item anterior duas etapas de temperaturas, três etapas de caracterização tornam-se necessárias.

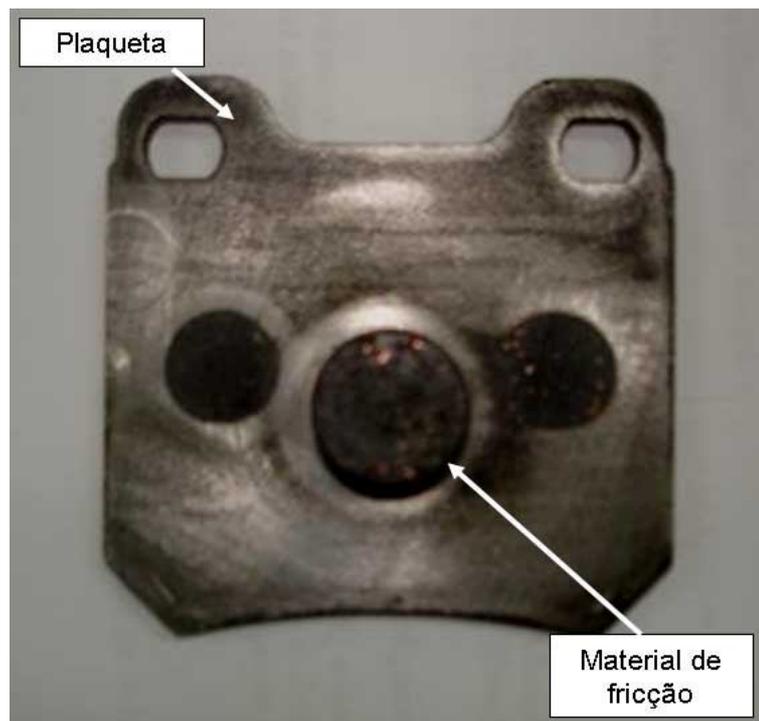
Assim, a estrutura básica do procedimento proposto pode ser vista na Figura 5.1.



Figura 5.1 – Estrutura básica do procedimento proposto.

Para determinação dos parâmetros de cada etapa do procedimento, foram utilizadas quatro amostras, sendo duas amostras de formulação comercial (do tipo semi-metálica) e duas de formulação experimental (NAO). Os corpos de prova comerciais são assim conhecidos pois sua formulação é mais completa, com cerca de vinte elementos selecionados de forma empírica. Por outro lado, as amostras experimentais possuem uma composição mais simples, com cerca de cinco elementos básicos selecionados para manter a amostra com as propriedades mínimas que um material de atrito necessita. No presente trabalho esses materiais comerciais serão denominados doravante como amostras A1 e A2, e os materiais experimentais de amostras B1 e B2.

Tanto os corpos de prova do grupo A quanto do grupo B foram usinados a partir de pastilhas com formato encontrado no comércio, estando de acordo com a geometria descrita por Neis, 2008 na Seção 3.6.2 (Figura 5.2).



**Figura 5.2 – Geometria das amostras utilizadas, conforme Neis, 2008.**

A utilização dos corpos de prova para determinação dos parâmetros finais das etapas do procedimento completo foi dada da seguinte forma: durante a etapa de assentamento todas as quatro amostras foram aproveitadas (amostras A1, A2, B1 e B2); entretanto, devido à ruptura do material de atrito da amostra A1 ao término da frenagem desse estágio, para as etapas de caracterização e *fade* utilizou-se apenas um exemplar de cada formulação (amostras

A2 e B2). A Tabela 5.1 mostra de forma resumida as etapas em que cada corpo de prova foi utilizado.

Durante todas as frenagens para determinação da configuração final do procedimento, utilizou-se uma taxa de aquisição de 1 Hz e um raio efetivo de 40 mm. Toda a preparação da máquina de ensaio utilizada, bem como o seu funcionamento correto também é descrita por Neis, 2008 e serviu de guia para o correto andamento das atividades de experimentação.

**Tabela 5.1 – Amostras utilizadas para definição de cada etapa do procedimento.**

		AMOSTRAS			
		Formulação Comercial		Formulação Experimental	
		A1	A2	B1	B2
ETAPA	Assentamento	✓	✓	✓	✓
	Caracterização	-	✓	-	✓
	Fade	-	✓	-	✓

A seguir, cada etapa será apresentada em seções específicas, mostrando sua respectiva configuração final.

## 5.1 Assentamento

O objetivo dessa etapa no procedimento de avaliação de atrito é fazer com que o material virgem – isto é, ainda não utilizado – atinja a estabilidade do seu coeficiente de atrito e, como consequência, aumente a área útil de contato entre o par de fricção.

Como a frenagem é do tipo velocidade constante, os parâmetros tempo de contato do par de fricção, força de aplicação e velocidade de escorregamento devem ser previamente determinados. Para tal, considerando os resultados da Figura 4.1, onde há a indicação de estabilização de atrito em tempo inferior a 4 min para diferentes forças aplicadas, determinou-se um tempo máximo de frenagem de 300 s (5 min), com o intuito de não tornar a etapa demasiadamente longa. A força de aplicação inicialmente escolhida foi de 500 N (cerca de 1/3 da força máxima permitida pelo tribômetro), e a velocidade de escorregamento de 2,1 m/s (ou 500 rpm fornecidos pelo tribômetro). A combinação desses três parâmetros (tempo de contato do par de fricção, força de aplicação e velocidade de escorregamento) não deve permitir que a

temperatura final medida pelo termopar no interior do rotor ultrapasse 300°C, valor considerado elevado por Limpert, 2009. Dessa forma, a etapa de assentamento não se aproximaria em termos de temperatura da etapa de *fade* do procedimento.

As curvas de atrito, força de aplicação e temperatura para todas as amostras submetidas a frenagem da etapa de assentamento podem ser vistas na Figura 5.3.

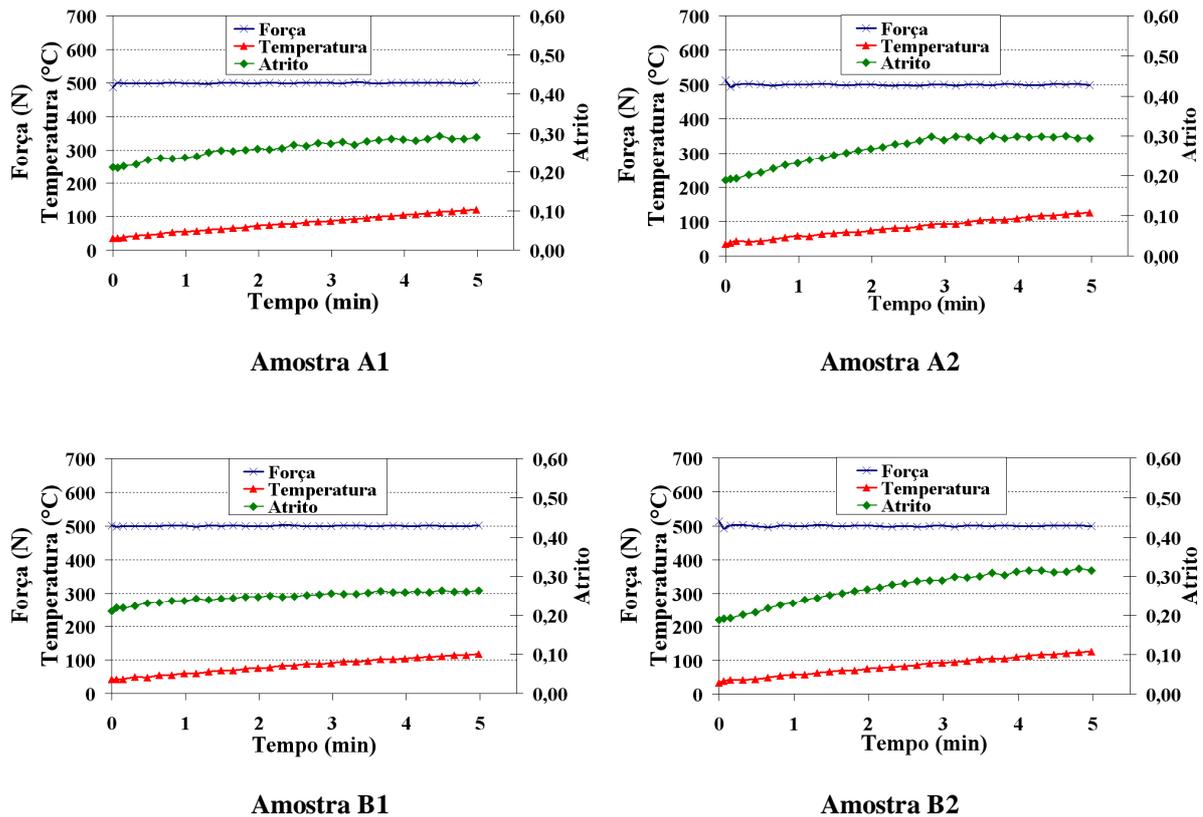


Figura 5.3 – Curvas de força de aplicação, temperatura e atrito para determinação da etapa de assentamento.

Em relação à estabilização do atrito do material, uma análise visual das curvas indica que todas as amostras atingiram a estabilidade no máximo a partir do quarto minuto de frenagem. Entretanto, para verificar a validade da etapa de assentamento e a estabilidade do atrito é necessário um critério matemático que satisfaça esta condição. A solução proposta no presente trabalho é a criação desse critério (chamado de *critério de assentamento*), o qual é mostrado de forma ordenada a seguir:

- calcular a média aritmética do coeficiente de atrito a cada trinta aquisições (média móvel do atrito). Dessa forma, têm-se um valor para o intervalo entre os instantes 0 e 29 segundos,

outro entre 1 e 30 segundos e assim por diante. Para os últimos 30 segundos de cada frenagem, a média é calculada de acordo com a quantidade de dados remanescentes, começando com 30 valores, em seguida 29, 28 e assim sucessivamente até que o último valor considerado como média móvel é o próprio valor do coeficiente de atrito medido no final da frenagem. A Figura 5.4 mostra de forma esquemática a lógica de seleção dos dados de aquisição para cada valor de média móvel;

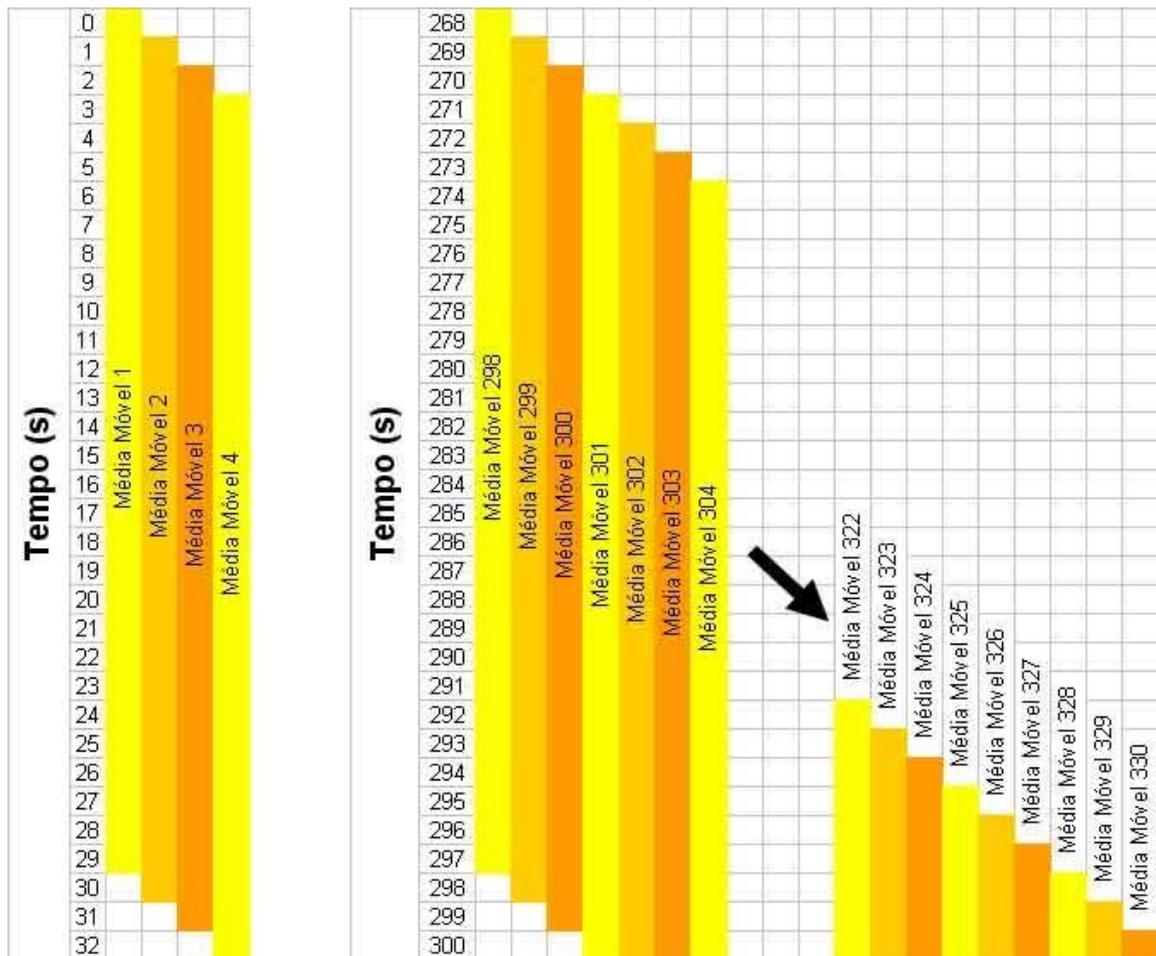


Figura 5.4 – Diagrama esquemático para cálculo das médias móveis para critério de assentamento.

- calcular a variação percentual que cada média móvel tem com o seu valor subsequente. Como exemplo, consideremos aqui que a média móvel entre o intervalo compreendido de 0 a 29 segundos e entre 1 a 30 segundos de uma amostra qualquer seja  $M_1$  e  $M_2$ , respectivamente. Assim, a variação (%) entre as médias móveis dos intervalos considerados pode ser calculada através da Equação 5.1:



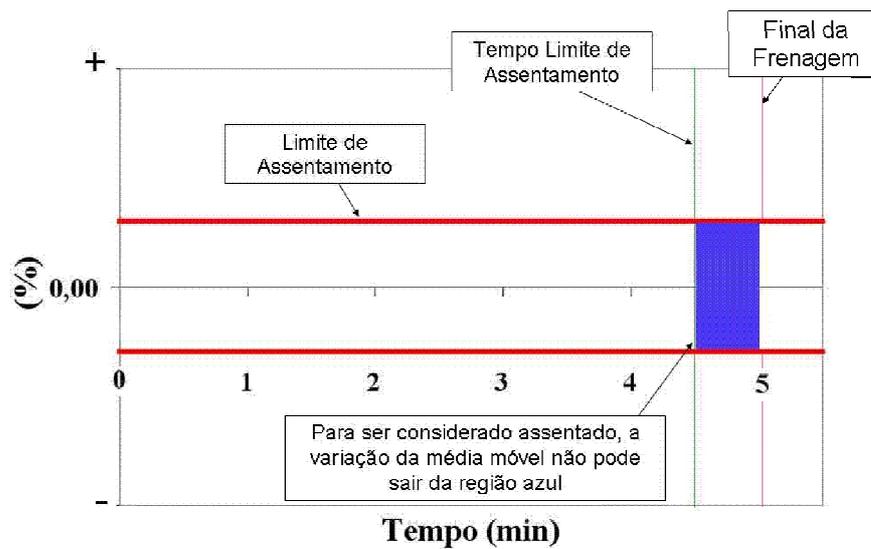


Figura 5.6 – Forma gráfica do critério de assentamento proposto.

Utilizando o critério proposto e determinando em um primeiro momento como *limite de assentamento* o valor de 0,15% (uma vez que não há base para comparação) e *tempo limite de assentamento* de 270 s (ou 4 min e 30 s, valor superior ao tempo estimado de assentamento das curvas da Figura 4.1), têm-se como resultado as curvas observadas na Figura 5.7.

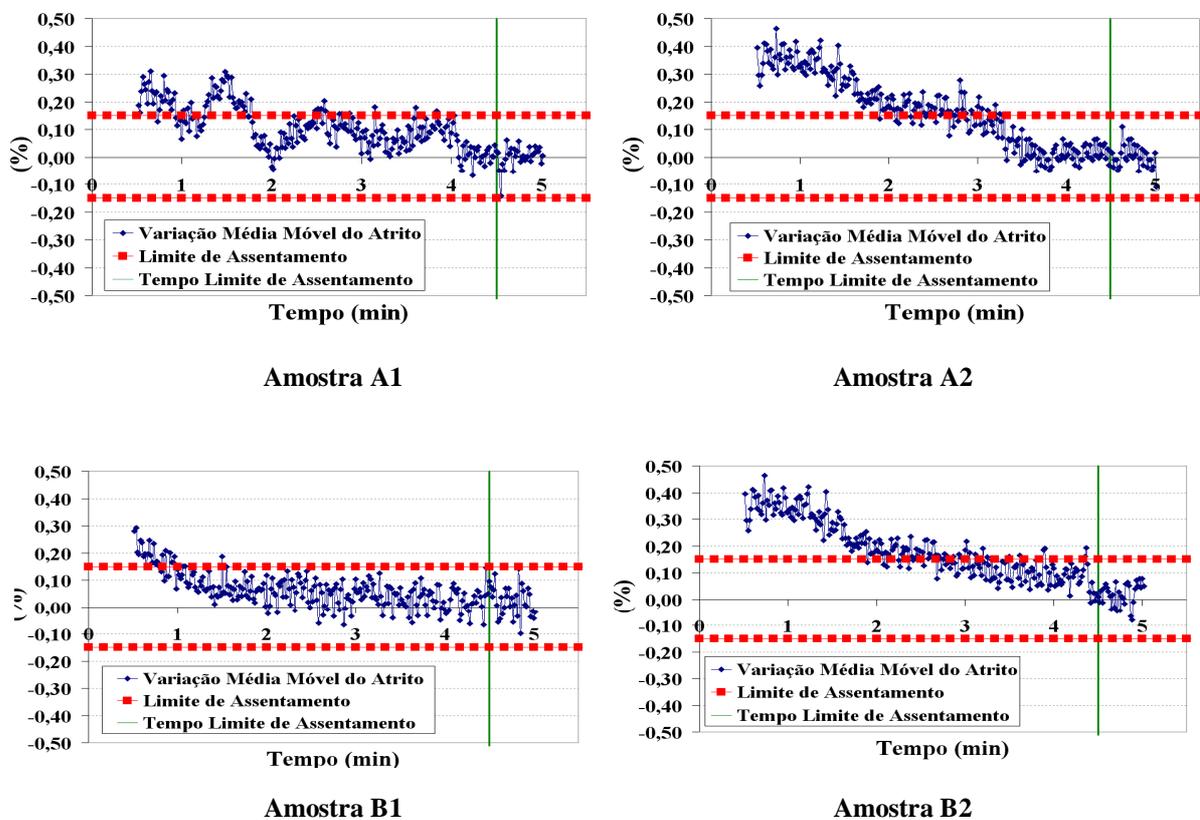


Figura 5.7 – Aplicação do critério de assentamento proposto para amostras utilizadas.

Observando os gráficos da Figura 5.7, nota-se que todas as amostras atingiram a estabilidade do atrito, segundo o critério adotado. A Tabela 5.2 mostra de forma resumida a aplicação do critério sugerido, bem como os resultados obtidos para as amostras A1, A2, B1 e B2.

**Tabela 5.2 – Aplicação do critério de assentamento proposto.**

Amostra	Limite de assentamento (%)	Tempo Limite de Assentamento	Estabilidade do atrito	Tempo para estabilização
A1	0,15	4 min e 30 s	Sim	3 min e 52 s
A2			Sim	3 min e 15 s
B1			Sim	1 min e 11 s
B2			Sim	4 min e 24 s

Uma vantagem ao utilizar esse critério é a possibilidade de alteração dos parâmetros, deixando-o mais ou menos conservador. Para isso, basta modificar o valor do *limite de assentamento* e/ou o *tempo limite de assentamento*. Como exemplos práticos, pode-se considerar a Figura 5.7 e utilizar os parâmetros *limite de assentamento* e *tempo limite de assentamento* como:

- 1º caso: 0,20% e 270 s (4 min e 30 s);
- 2º caso: 0,15% e 240 s (4 min).

Para o primeiro caso, todas as amostras podem ser consideradas assentadas, e em um tempo ainda menor. Entretanto, para o segundo caso, a amostra B2 não atingiria o regime de estabilidade de atrito. A Tabela 5.3 mostra os resultados para o critério de assentamento se considerado os dois exemplos de alteração de parâmetros.

**Tabela 5.3 – Modificação dos parâmetros do critério de assentamento proposto.**

	Amostra	Limite de assentamento (%)	Tempo Limite de Assentamento (s)	Estabilidade do atrito	Tempo para estabilização
1º Caso	A1	0,2	4 min e 30 s	Sim	2 min e 35 s
	A2			Sim	3 min e 2 s
	B1			Sim	55 s
	B2			Sim	3 min e 2 s
2º Caso	A1	0,15	4 min	Sim	3 min e 52 s
	A2			Sim	3 min e 15 s
	B1			Sim	1 min e 11 s
	B2			Não	4 min e 22 s

Em ambos os casos, as amostras comerciais apresentaram uma diferença no tempo de estabilização do atrito próxima aos 15%, enquanto que para as amostras experimentais essa

diferença foi de cerca de 65%. O provável motivo dessa diferença é que o material comercial apresenta maior quantidade de aditivos de fricção em sua formulação, o que auxilia na estabilização do atrito.

Para continuidade do trabalho, optou-se por utilizar os parâmetros iniciais escolhidos para o critério de assentamento descrito, uma vez que não há base para comparação de resultados.

Os parâmetros escolhidos até aqui para etapa de assentamento podem ser vistos na Tabela 5.4.

**Tabela 5.4 – Parâmetros para etapa de assentamento.**

Temperatura Inicial (°C)	Ambiente
Temperatura Final (°C)	Livre
Velocidade de Escorregamento (m/s)	2,1
Força de Aplicação (N)	500
Duração da Frenagem (min)	5
Limite de Assentamento (%)	0,15
Tempo Limite de Assentamento	4 min e 30 s

## 5.2 Caracterização

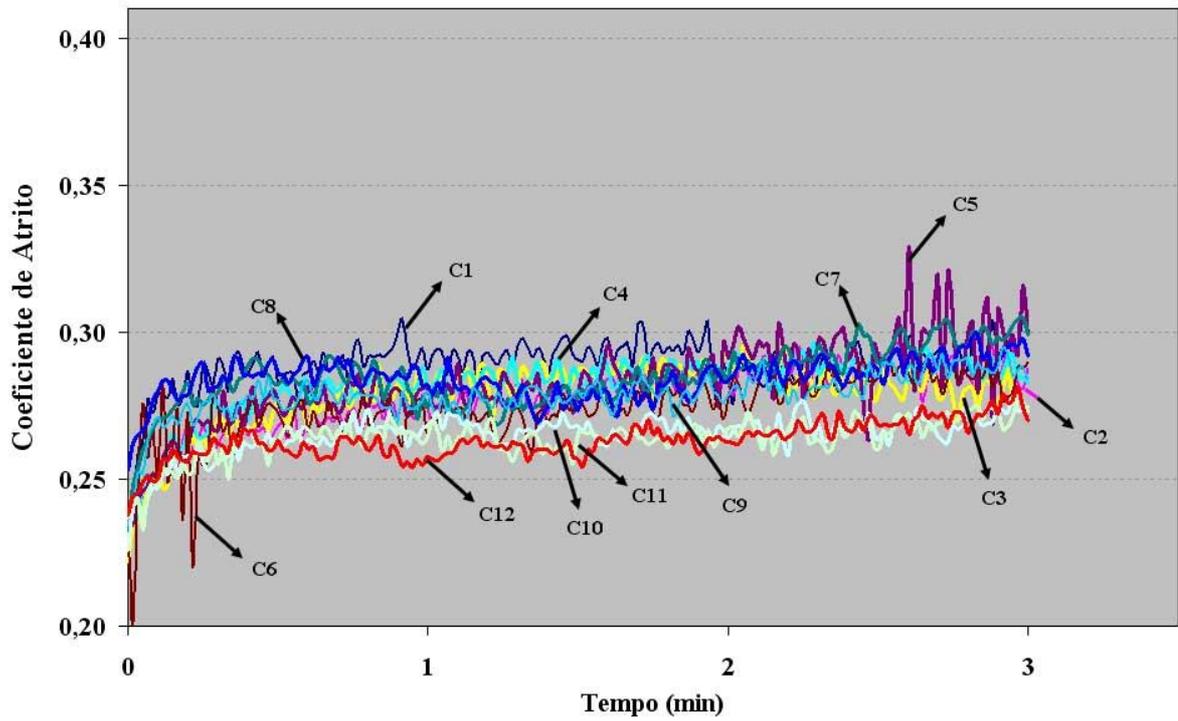
A etapa de caracterização se repete ao longo de todo o procedimento de ensaio e serve para verificar o comportamento do material de atrito após condições específicas ao qual é submetido.

Com o objetivo principal de simplificar o procedimento de ensaio e tendo em mente o fato de que as etapas de caracterização devem ser realizadas antes e depois de qualquer frenagem sob condições de temperaturas elevadas (*fade*), os parâmetros de operação desse estágio foram sugeridos como uma adaptação do passo de assentamento já definido anteriormente. A lógica é diminuir a força de frenagem e o seu tempo de aplicação, aumentando a velocidade de escorregamento.

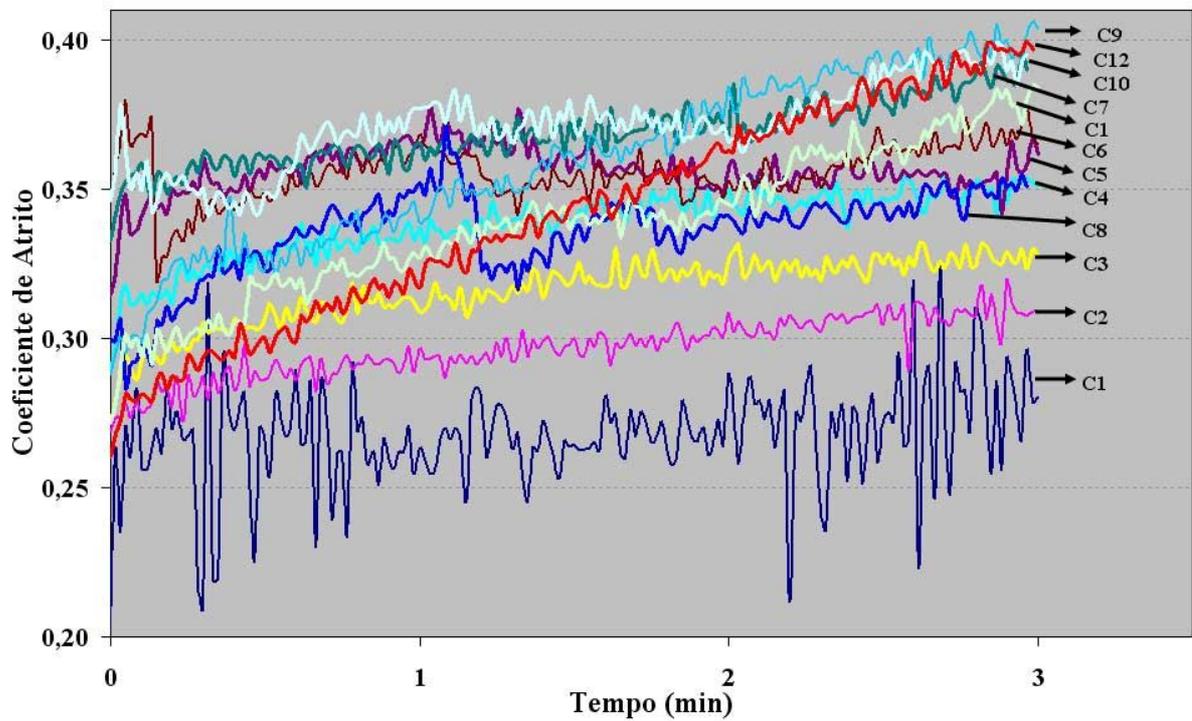
Os parâmetros iniciais definidos foram: velocidade de escorregamento de 3,14 m/s (ou 750 rpm para o tribômetro); força de aplicação de 400 N (1/4 da força máxima permitida pelo tribômetro) devido aos resultados da Figura 4.2, onde essa faixa de força apresentou a melhor correlação entre as três amostras e com temperatura final bem inferior a 300°C; tempo de aplicação de 180 s (3 min) e temperatura inicial de frenagem de 100°C. Esse último parâmetro foi assim escolhido para ficar semelhante a metodologia bastante usada pelos fabricantes de materiais de atrito [AK-MASTER, 1998 e Infantini, 2008]. Da mesma forma que para a etapa de assentamento, a soma de todos os efeitos dos parâmetros escolhidos não deve fazer com que a temperatura final medida no interior do rotor pelo termopar ultrapasse 300°C.

Como citado no início do presente capítulo, nesta etapa serão utilizados apenas um exemplar de cada formulação (amostra A2 comercial e amostra B2 experimental). Para garantir uma melhor análise do comportamento do coeficiente de atrito e verificar a repetibilidade dos valores de resposta do experimento, optou-se por reproduzir a frenagem mais de uma vez, até que o atrito mostrasse alguma espécie de repetição no comportamento. Ao todo foram repetidas 12 frenagens, sendo que as curvas obtidas dessas seqüências podem ser observadas na Figura 5.8.

Com o intuito de verificar se essa quantidade de repetições é suficiente para caracterizar os materiais, calculou-se a média e o desvio padrão do coeficiente de atrito para cada uma das frenagens de caracterização de ambas as amostras. Os resultados podem ser vistos na figura Figura 5.9, onde as barras verticais indicam que 95,4% das amostras estão contidas nessa faixa.

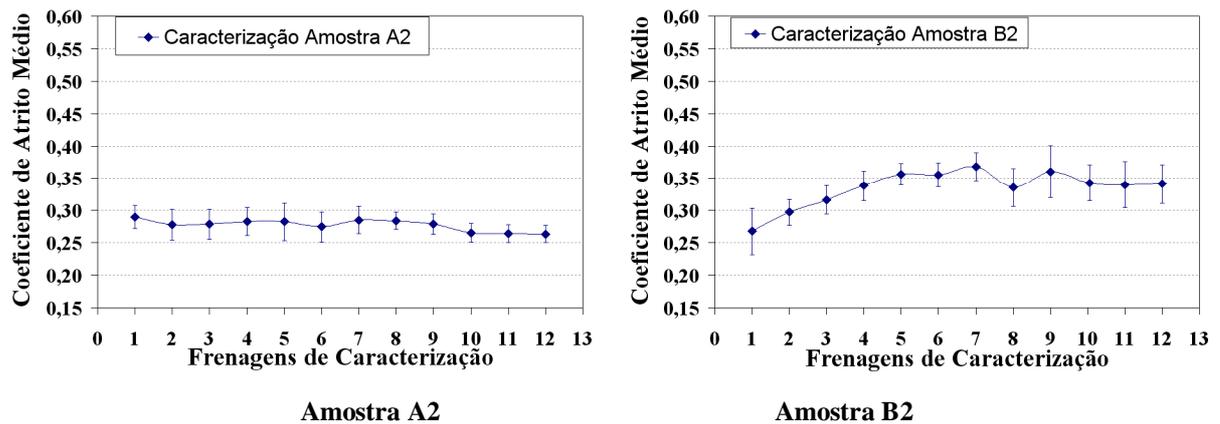


Amostra A2



Amostra B2

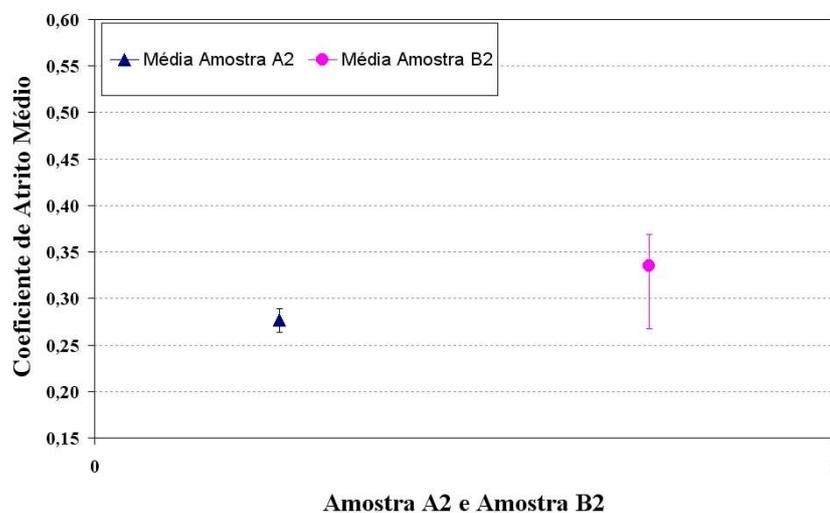
Figura 5.8 – Sequência de frenagens de caracterização para amostras utilizadas.



**Figura 5.9 – Atrito médio das frenagens de caracterização para amostras utilizadas.**

A Figura 5.9 mostra que foi pertinente a repetição das frenagens de caracterização para verificar o comportamento e a capacidade de recuperação ou adaptação do material de atrito. A partir da décima frenagem para ambas as amostras, o coeficiente de atrito mostra uma tendência de estabilização do atrito.

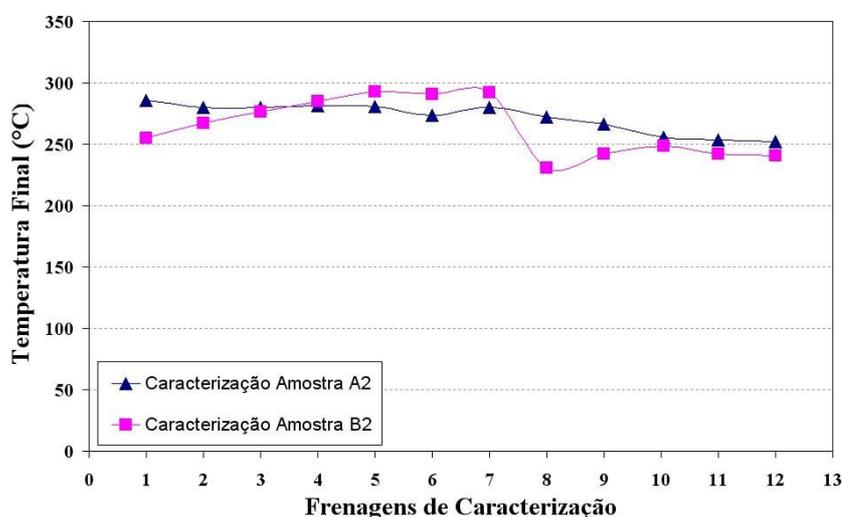
Se apenas uma frenagem fosse considerada, o resultado seria incompleto e passível de subjetividade, como no caso da amostra B2, em que a curva do coeficiente de atrito médio mostrou-se muito mais dispersa que a verificada para a amostra A2. Para comprovar isso, calculou-se a média dos coeficientes de atrito de todas as frenagens mostrados na Figura 5.9, tanto para amostra A2 como para B2. O resultado pode ser conferido na Figura 5.10, onde as barras verticais indicam a diferença entre a média do coeficiente de atrito e o valor máximo e mínimo verificado na Figura 5.9.



**Figura 5.10 – Verificação da dispersão das curvas de caracterização para amostras utilizadas.**

Baseando-se nas frenagens para caracterização realizadas até aqui, conclui-se que a escolha de 12 frenagens para cada etapa de caracterização se mostrou adequada para o propósito do trabalho, visto que a partir da décima frenagem há uma tendência de estabilização do atrito. Assim, o material de atrito atingiria um número de frenagens mínimo suficiente para mostrar seu poder de recuperação entre cada etapa de *fade*.

As temperaturas medidas pelo termopar localizado no interior do rotor ao término das frenagens são mostradas na Figura 5.11, com incerteza de medição de  $\pm 0,77\%$ . Considerando o limite previamente estipulado de  $300^{\circ}\text{C}$ , nenhuma frenagem atingiu esse valor, indicando novamente que os parâmetros escolhidos mostraram-se satisfatórios.



**Figura 5.11 – Curvas de temperatura da etapa de caracterização para amostras utilizadas.**

Os parâmetros definidos até aqui para cada uma das etapas de caracterização podem ser vistos, de forma resumida, na Tabela 5.5.

**Tabela 5.5 – Parâmetros para etapas de caracterização.**

Temperatura Inicial ( $^{\circ}\text{C}$ )	100
Temperatura Final ( $^{\circ}\text{C}$ )	Livre
Velocidade de Escorregamento (m/s)	3,14
Força de Aplicação (N)	400
Total de Frenagens	12
Duração da Frenagem	3 min

### 5.3 Fade

A etapa de *fade* serve para avaliar a resposta do atrito quando o material é submetido a frenagens que resultam em altas temperaturas no par de fricção, sendo de grande importância na avaliação final do material. Um exemplo prático é o que acontece com um veículo em uma descida de serra, onde os freios são bastante acionados durante longos períodos. O objetivo da etapa de *fade* no procedimento proposto é avaliar como o material se comporta quando submetido a frenagens em arrasto que atinjam 515°C, mesma temperatura atingida por Cristól-Bulthé et al., 2008.

Para a definição dos parâmetros a serem utilizados, têm-se como objetivo empregar valores que diferenciem a etapa de *fade* das demais e que garantam uma temperatura final medida de 515°C no interior do disco. Como considerações iniciais, definiram-se:

- velocidade de escorregamento de 4,1 m/s (equivalente a 1000 rpm para o tribômetro): quanto maior a velocidade, maior a temperatura atingida durante a frenagem, gerando maior possibilidade de alcançar 515°C ao término da etapa;
- temperatura inicial de frenagem de 150°C: como a etapa de *fade* serve para simular, por exemplo, uma descida de serra, a temperatura inicial de frenagem na grande maioria dos casos é bem maior que a ambiental. Esse valor também tem como função diminuir o tempo total de frenagem, devido a menor diferença entre temperatura final e inicial.

Nesse caso, não é necessário definir-se tempo de aplicação para frenagem, uma vez que quem indica o momento em que a etapa termina é a temperatura final atingida. Para a determinação da força de aplicação a ser utilizada durante a etapa de *fade*, ensaiaram-se as amostras A2 e B2 com forças distintas e constantes, de 1600 N e 700 N respectivamente. A escolha da força próximo ao valor limite nominal da máquina para amostra A2 deveu-se ao fato de que esta apresentou valores de coeficiente de atrito menores que a amostra B2 durante o estudo da etapa de caracterização. As curvas para força, atrito e temperatura de ambas as amostras podem ser vistas na Figura 5.12.

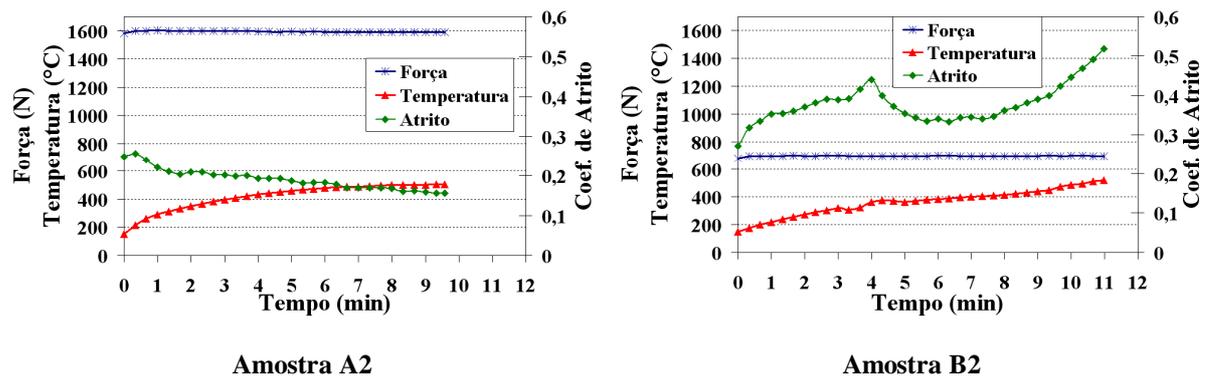


Figura 5.12 – Curvas de força, temperatura e atrito para as amostras utilizadas.

De acordo com as curvas resultantes para as frenagens das amostras A2 e B2, pode-se verificar que a amostra B2 atingiu a temperatura desejada de 515°C com a força aplicada de 700 N após cerca de 11 min; observou-se também um coeficiente de atrito de inclinação positiva até a temperatura de 380°C, quando um período decrescente tem início e logo torna-se crescente novamente, a partir do sexto minuto. Em contrapartida, a amostra de formulação comercial A2 (com força de aplicação de 1600 N) tem uma curva de atrito totalmente decrescente, atingindo a temperatura de 505°C a partir do oitavo minuto de frenagem e mantendo-se inalterada até próximo ao décimo minuto, momento em que o contato do par de fricção foi interrompido. Isso novamente remete ao fato de que a amostra A2 tem um coeficiente de atrito menor que a amostra B2. Assim, concluiu-se que, dado os resultados apresentados, a força não se mostra uma variável confiável como parâmetro fixo da etapa de *fade* do procedimento, pois não possibilitou o cumprimento do objetivo principal – atingir a temperatura final de 515°C – dificultando a comparação entre as amostras.

Para contornar esse problema, uma solução possível é dada graças a uma característica original do projeto do tribômetro, que é a possibilidade de controle do torque aplicado durante a frenagem. Dessa forma, ao invés da força, o torque seria um parâmetro de aplicação constante durante o contato entre o par de fricção. Teoricamente, a quantidade de energia entregue ao sistema é a mesma durante a frenagem e é dada pela Equação 5.2:

$$P = M \cdot \omega \quad (5.2)$$

onde P representa a potência fornecida (W), M representa o torque fornecido pelo tribômetro (N.m) e  $\omega$  representa a velocidade angular do rotor (rad/s). Assim, com a mesma

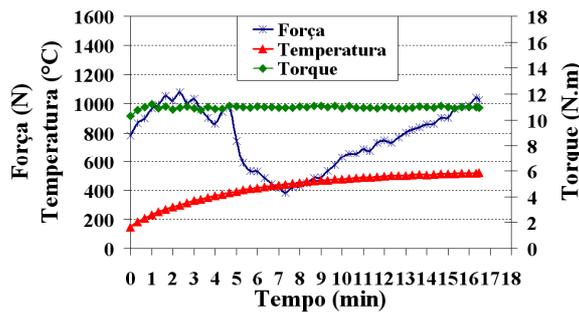
quantidade de energia sendo entregue ao sistema, a temperatura final esperada será atingida no mesmo intervalo de tempo independente do material de fricção.

Para definição do parâmetro torque padrão no procedimento completo de avaliação do atrito, resolveu-se então ensaiar a amostra A2 com os mesmos parâmetros definidos anteriormente, entretanto sob a aplicação de diferentes valores constantes de torque, ao invés da força. A escolha desse modelo em específico deveu-se ao fato do mesmo não ter atingido a temperatura final esperada durante a frenagem com força constante.

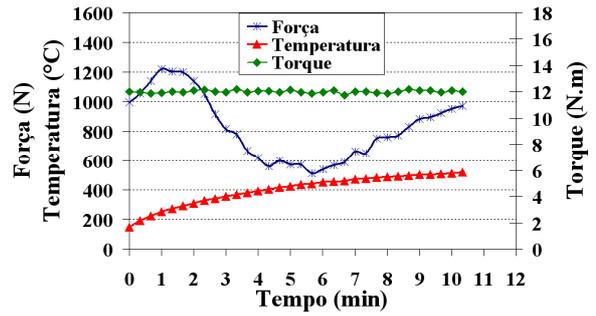
O menor valor de torque testado foi de 11 N.m, valor próximo ao intermediário às médias de torque de ambas as amostras (12,3 N.m para amostra A2 e 10,8 N.m para amostra B2) medidos nas frenagens com força constante. O valor máximo de torque aplicado será definido pela capacidade da máquina, isto é, será dependente da máxima força produzida pelo cilindro.

As curvas resultantes de força variável e torque constante para a amostra A2 podem ser vistas na Figura 5.13. Para frenagem com torque constante de 16 N.m, antes do segundo minuto o tribômetro atingiu a força máxima permitida de 1600 N e, para garantir que a máquina não fosse danificada, o experimento foi interrompido. Dessa forma, definiu-se por motivos de segurança como o limite máximo de torque a ser considerado no procedimento o valor de 15 N.m.

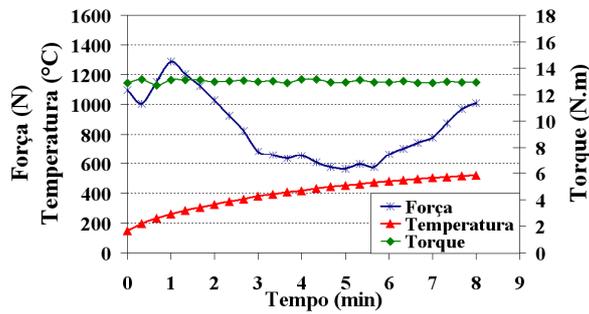
Para cada valor de torque constante aplicado, a força, que é uma variável livre, atinge um valor máximo. Nesse mesmo instante, o coeficiente de atrito, que tem uma relação inversamente proporcional à força, chega ao seu menor patamar durante a frenagem. Seguindo essa lógica, é possível determinar (através da Equação 3.1) para cada valor de torque constante e força máxima permitida pelo tribômetro de 1600 N, qual é o valor de coeficiente de atrito mínimo possível para que um material possa ser ensaiado sob as condições estabelecidas na etapa de *fade*. Assim, haveria um valor limite mínimo para o coeficiente de atrito do material para essa faixa de torque constante que garantiria o sucesso da etapa.



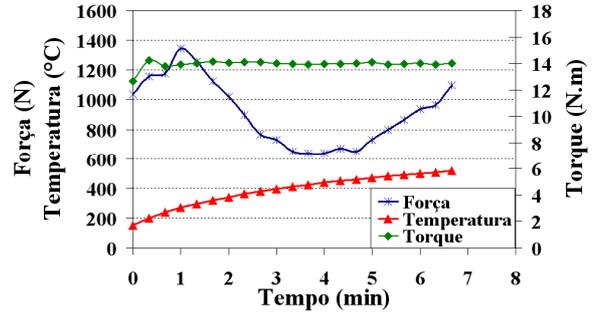
Torque de 11 N.m



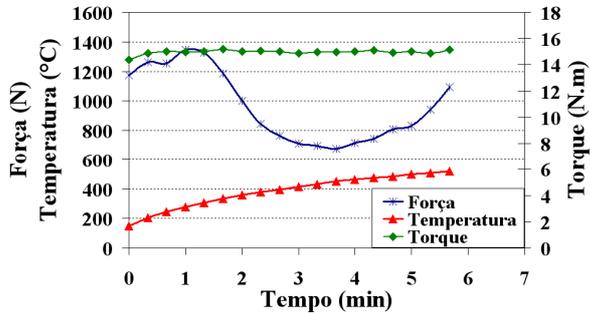
Torque de 12 N.m



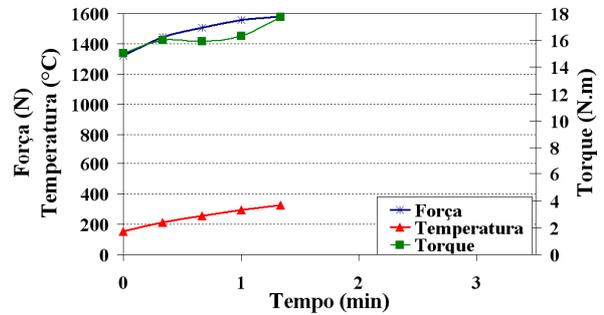
Torque de 13 N.m



Torque de 14 N.m



Torque de 15 N.m



Torque de 16 N.m

Figura 5.13 – Curvas de força, temperatura e torque constante para amostra A2.

Todos os valores relevantes de forças medidas e coeficientes de atrito calculados para os valores de torque mostrados na Figura 5.13 podem ser visualizados na Tabela 5.6. Nessa mesma tabela encontram-se os valores de coeficiente de atrito mínimo permitidos durante a etapa de *fade* quando aplicado a força máxima fornecida pelo tribômetro.

**Tabela 5.6 – Valores de atrito mínimo, força máxima, tempo total de frenagem e atrito mínimo permitido para curvas de torque constante.**

Curva de torque (N.m)	Atrito mínimo medido	Força máxima de aplicação medida [N]	Tempo total de frenagem	Atrito mínimo calculado permitido com F=1600 N
11	0,25	1082	16 min e 30 s	0,18
12	0,24	1250	10 min e 36 s	0,19
13	0,25	1294	8 min e 20 s	0,21
14	0,26	1354	6 min e 48 s	0,22
15	0,27	1383	5 min e 42 s	0,24

Para o procedimento proposto, definiu-se preliminarmente que o torque constante de 13 N.m seria mais adequado, pois:

- a força máxima medida para a amostra A2 foi próxima de 1300 N, permitindo uma margem de segurança próxima de 20% no valor da força máxima do tribômetro;
- o tempo total de frenagem foi de cerca de oito minutos. Com valores de torque inferiores, o tempo da frenagem seria muito longo. Valores superiores acarretam em forças maiores de aplicação, já discutido no item anterior;
- o coeficiente de atrito mínimo das amostras que serão posteriormente utilizadas para aplicação não é conhecido. Uma vez que um torque constante de 13 N.m resulta em um atrito mínimo de 0,21 (equivalente à média dos valores calculados citados na Tabela 5.6), considerou-se esse valor como parâmetro inicial.

Para fins de análise da influência de uma frenagem em alta temperatura sobre a amostra ensaiada, definiu-se que seriam realizadas duas etapas de *fade* no procedimento final de avaliação de material de atrito. O objetivo é verificar a diferença no comportamento do atrito entre a primeira e segunda etapa de *fade*, assim como no trabalho de Cristól-Bulthé et al., 2008. Os parâmetros preliminarmente definidos para essa etapa podem ser vistos, de forma resumida, na Tabela 5.7.

**Tabela 5.7 – Parâmetros definidos para frenagens de *fade*.**

Temperatura Inicial (°C)	150
Temperatura Final (°C)	515
Velocidade de Escorregamento (m/s)	4,1
Torque de Aplicação (N.m)	13
Duração da Frenagem	Estimado em cerca de 8 min e 20 s

## 6 APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO PROPOSTO

Para a aplicação do método de verificação do coeficiente de atrito proposto neste trabalho, foram preparadas seis amostras, com geometria semelhante à Figura 5.2. Desse total de espécimes, têm-se três formulações distintas para pastilhas de freio:

- dois exemplares são similares às do grupo B (amostra B1 e B2 do Capítulo 5) e serão chamadas de amostra B3 e amostra B4.
- quatro exemplares de formulação comercial, entretanto distintas entre si. Para o propósito do trabalho, serão chamadas de amostras do grupo C (amostra C1 e C2) e amostras do grupo D (amostra D1 e D2). Todas são consideradas semi-metálicas.

Os resultados obtidos foram divididos em duas partes, sendo que primeiramente é apresentada e discutida apenas a etapa de assentamento e o seu respectivo critério adotado. A seguir, o ensaio completo é apresentado, onde todas as etapas de caracterização e *fade* são analisadas.

### 6.1.1 Assentamento

As curvas de assentamento para todas as amostras utilizando os critérios definidos na Seção 5.1 podem ser vistas na Figura 6.1. De acordo com a Figura 6.1, nota-se que as amostras do mesmo grupo apresentam comportamentos semelhantes. Pode-se verificar que o material do grupo B apresentou coeficiente de atrito maior que os dos grupos C e D, e conseqüente temperatura final mais elevada. Todas as curvas de temperatura mantiveram-se abaixo dos 300°C, critério utilizado na seção 5.1 para determinar os parâmetros da etapa de assentamento.

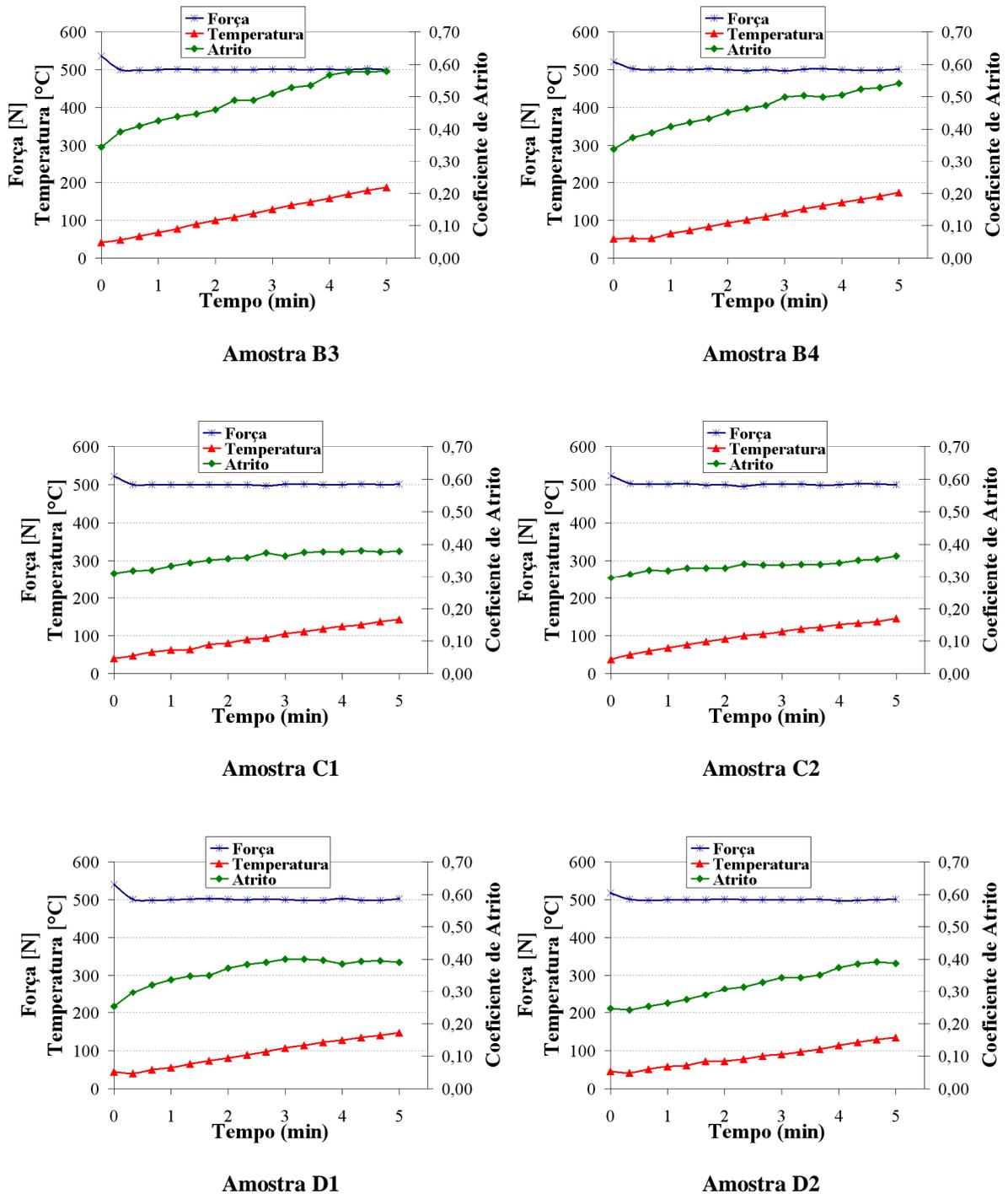


Figura 6.1 – Curvas de assentamento para as amostras utilizadas.

Para verificar se as amostras em questão podem ser consideradas assentadas, aplicou-se então sobre os resultados extraídos das frenagens da primeira etapa do procedimento o critério proposto na Seção 5.1. O resultado pode ser visto na Figura 6.2.

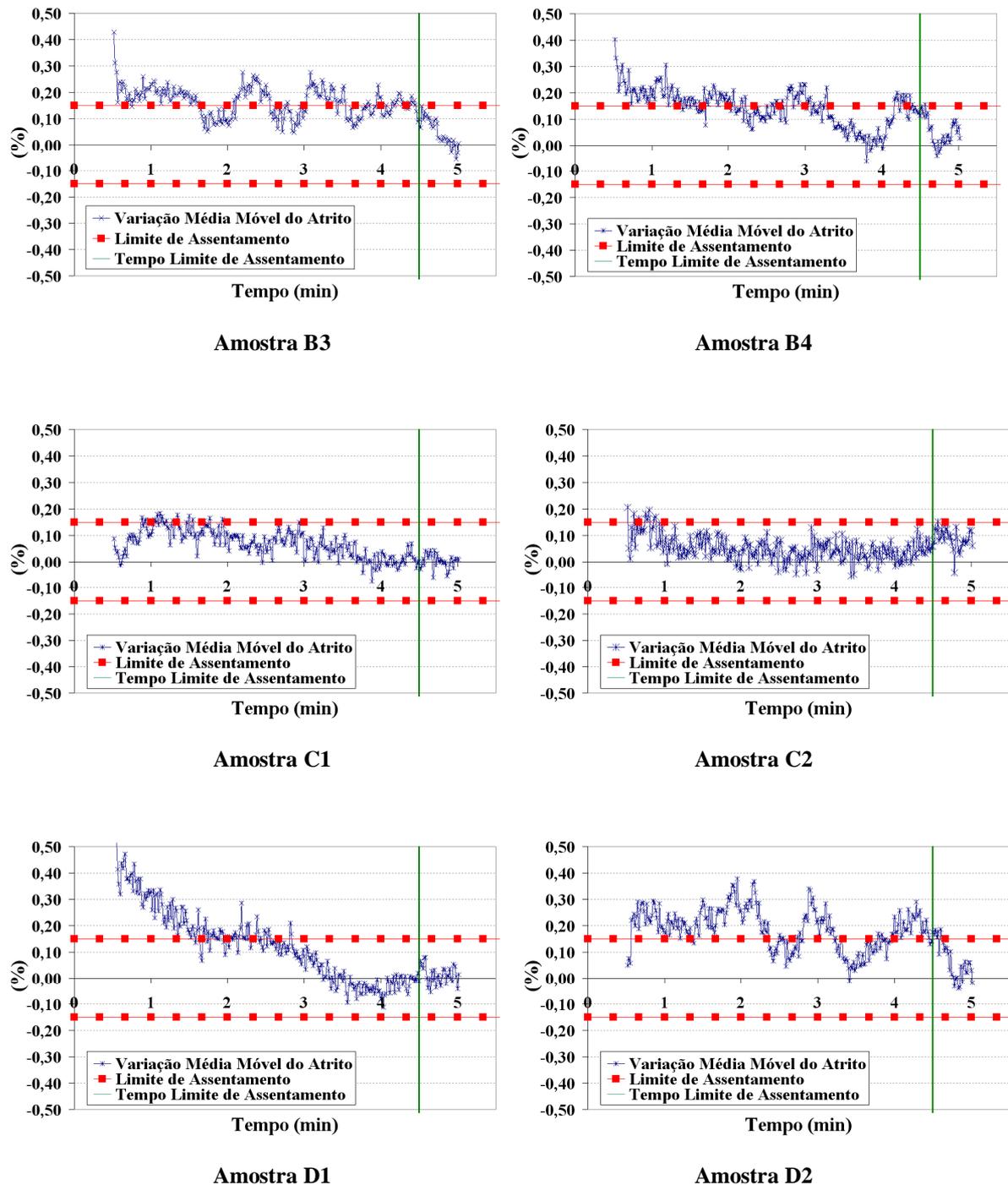


Figura 6.2 – Curvas de aplicação do critério proposto para as amostras utilizadas.

De acordo com a Figura 6.2 pode-se dizer que para o critério de assentamento proposto e seus parâmetros escolhidos, apenas a amostra D2 apresentou variação da média móvel do atrito que extrapolasse os limites estabelecidos. Portanto essa amostra não pode ser considerada assentada. Mas, para fins deste trabalho, esse modelo não foi descartado do restante do experimento.

A Tabela 6.1 apresenta de forma resumida os resultados da etapa de assentamento de todas as amostras utilizadas.

**Tabela 6.1 – Resultado para aplicação do critério de assentamento para amostras utilizadas.**

Amostra	Atrito Médio	Desvio Padrão	Atrito Final	Temperatura Final (°C)	Assentamento
B3	0,49	0,06	0,58	187	Sim
B4	0,46	0,05	0,54	173	Sim
C1	0,36	0,02	0,38	143	Sim
C2	0,33	0,01	0,36	145	Sim
D1	0,37	0,04	0,39	147	Sim
D2	0,32	0,05	0,39	135	Não

Considerando a etapa de assentamento até aqui, há dois pontos a serem destacados:

- a amostra D2 não pôde ser considerada assentada devido aos parâmetros escolhidos para o critério de assentamento. Se fosse considerado um *limite de assentamento* maior (como 0,20%, por exemplo), esse corpo de prova poderia ser considerado estável;
- além da própria amostra D2, os resultados de atrito das amostras B3 e B4 (Figura 6.1) visualmente não indicam que esses corpos de prova estão totalmente estabilizados, mesmo com o critério proposto indicando o contrário. As curvas para esses dois corpos de prova têm um comportamento diferente das amostras de formulação experimental B1 e B2 utilizados na Seção 5.1 para determinação da etapa de assentamento. A prova disso é o valor de coeficiente de atrito final calculado, maior para amostras B3 e B4 que os verificados para B1 e B2.

Para contornar essa situação, uma solução poderia ser alterar os parâmetros do critério de assentamento. Entretanto, as curvas de atrito de algumas amostras ainda assim não apresentariam um comportamento considerado adequado para garantir a estabilidade. Por isso, o mais indicado nessa situação é aumentar o tempo de frenagem. A sugestão do presente trabalho seria a alteração dos valores definidos na Seção 5.1 de 5 para 10 min, visto que os resultados da Figura 4.1 mostra que essa alteração dos parâmetros não extrapola os limites definidos na Seção 5.1. Dessa forma, tanto a curva de atrito de cada material quanto o critério proposto atestariam a estabilidade do material.

### 6.1.2 Etapas de Caracterização e *Fade*.

Após a etapa de assentamento, parte-se para o estágio do procedimento em que é feita a caracterização e avaliação da resposta dos materiais sob condições rigorosas de temperatura. Assim, têm-se a aplicação completa da metodologia proposta. Tanto para as etapas de caracterização como para as de *fade*, os parâmetros definidos na seção 5.2 e 5.3 foram rigorosamente respeitados.

Primeiramente, é feita uma análise geral do atrito para todas as amostras, a fim de verificar a eficácia da metodologia proposta. Assim, as Figuras 6.3, 6.6 e 6.9 mostram as curvas de atrito médio para as amostras utilizadas durante todo o ensaio. Nas barras verticais, indica-se o desvio padrão do atrito de cada uma das frenagens realizadas, indicando que 68% dos valores do atrito estão contidos nessa faixa. As Figuras 6.4, 6.7 e 6.10 mostram as temperaturas finais medidas pelo termopar no interior do disco de freio. As Figuras 6.5 (a) e (b), 6.8 (a) e (b) e 6.11 (a) e (b) mostram os resultados para temperatura e coeficiente de atrito durante as duas etapas de *fade* específicas para cada uma das amostras consideradas.

Para as amostras B3 e B4 (Figura 6.3) o coeficiente de atrito calculado para as etapas de caracterização fica menor após cada etapa de *fade*. Pode-se notar também que após a segunda etapa de *fade*, as duas amostras apresentam curvas similares. A Figura 6.4, por sua vez, mostra que as curvas de temperatura têm um comportamento correspondente com as curvas de atrito. Em suma, quanto maior o coeficiente de atrito maior a temperatura registrada pelo termopar.

Quando consideradas apenas as etapas com temperaturas elevadas, percebe-se que o valor do coeficiente de atrito médio é semelhante entre as amostras (Figura 6.5 (a) e (b)). Nesse caso, os valores de atrito para o primeiro *fade* são menores que os verificados para o segundo *fade*. Em nenhum momento o valor do coeficiente de atrito atingiu valores inferiores aos indicados na Tabela 5.6 para o torque constante de 13 N.m.

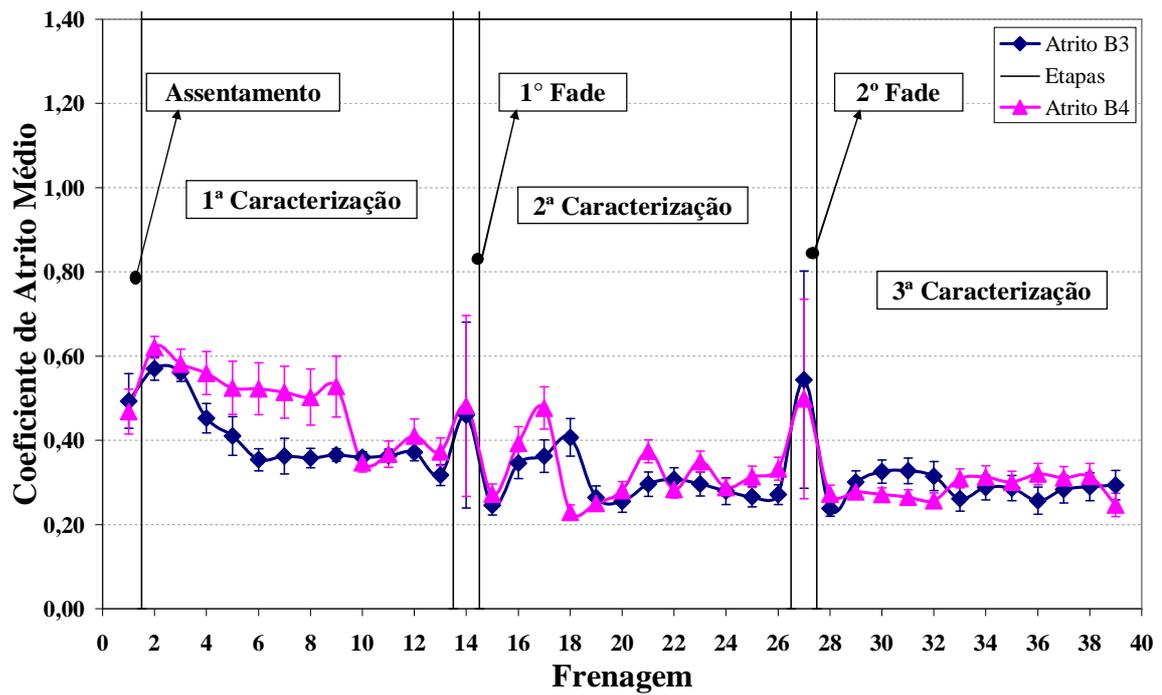


Figura 6.3 – Coeficiente de atrito médio para amostras B3 e B4.

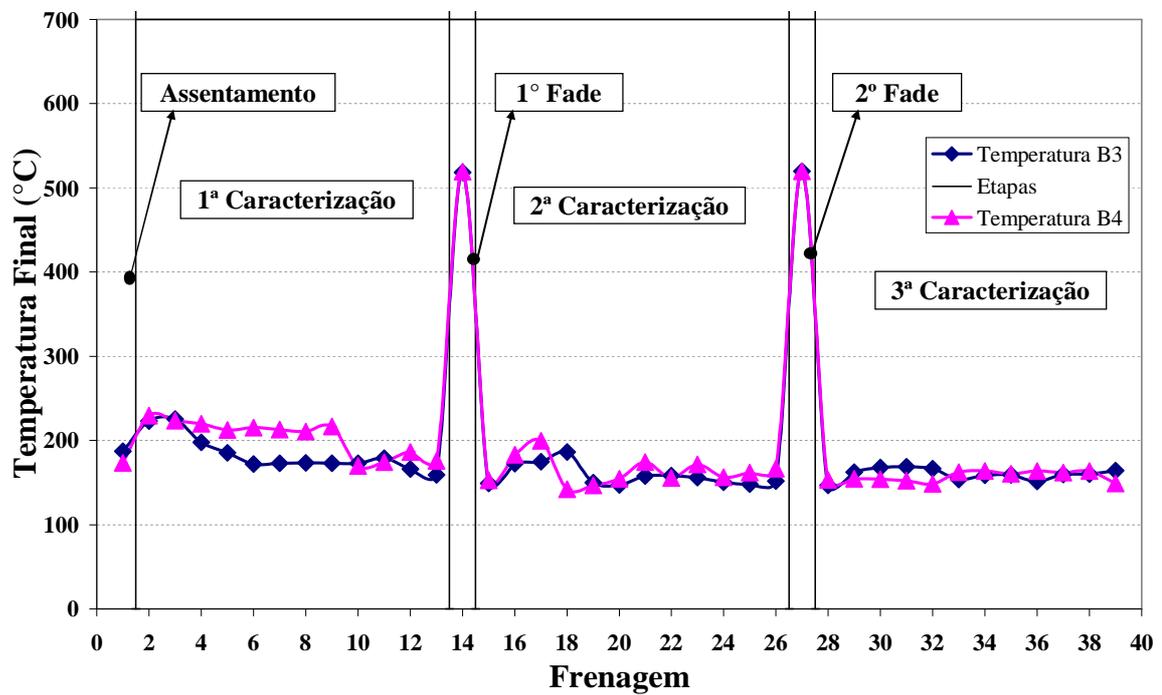
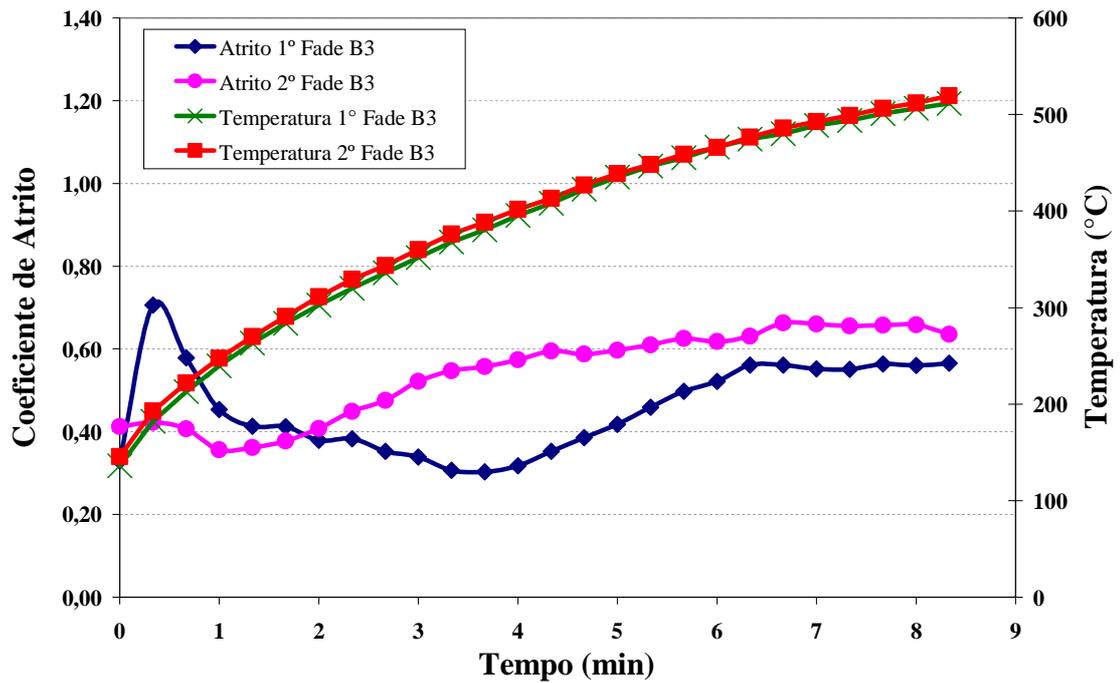
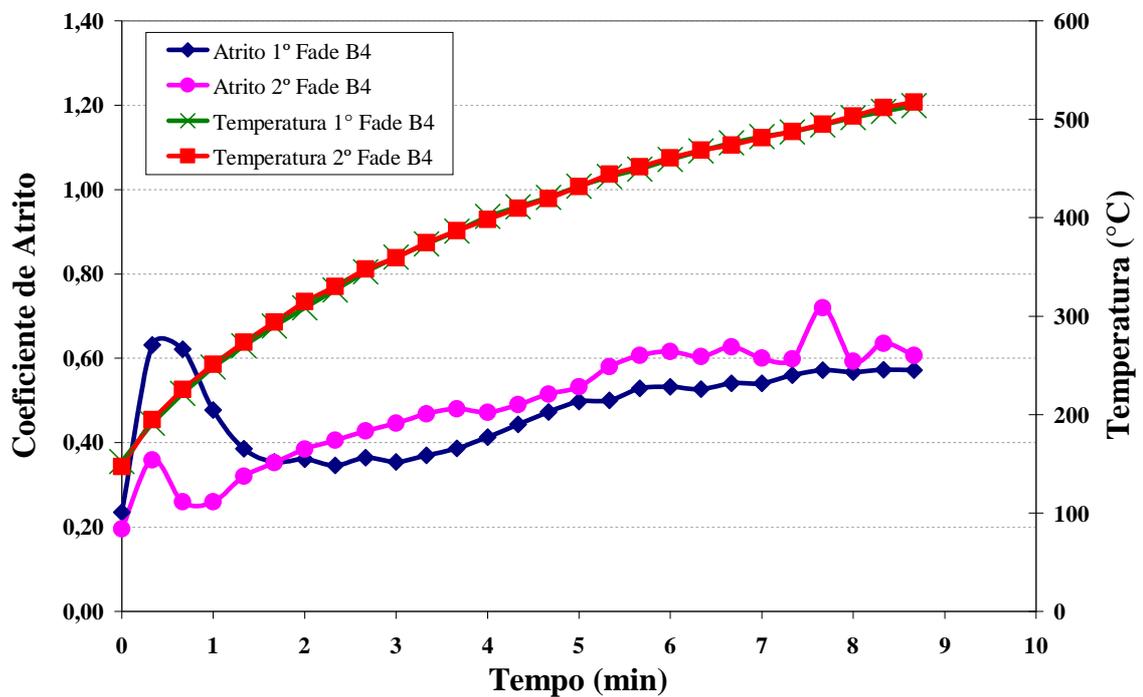


Figura 6.4 – Temperatura final do disco para amostra B3 e B4.



(a)



(b)

Figura 6.5 – Curvas de atrito e temperatura durante as etapas de *fade* para amostras (a) B3 e (b) B4.

Para espécimes C1 e C2, assim como visto na Figura 6.6, o coeficiente de atrito médio apresenta variação de comportamento. A cada etapa de *fade* realizada, o atrito fica menor para a amostra C1 e maior para a amostra C2. A Figura 6.7 mostra a relação direta da temperatura com a sua respectiva curva de atrito, da mesma forma que o resultado obtido para amostras do grupo B.

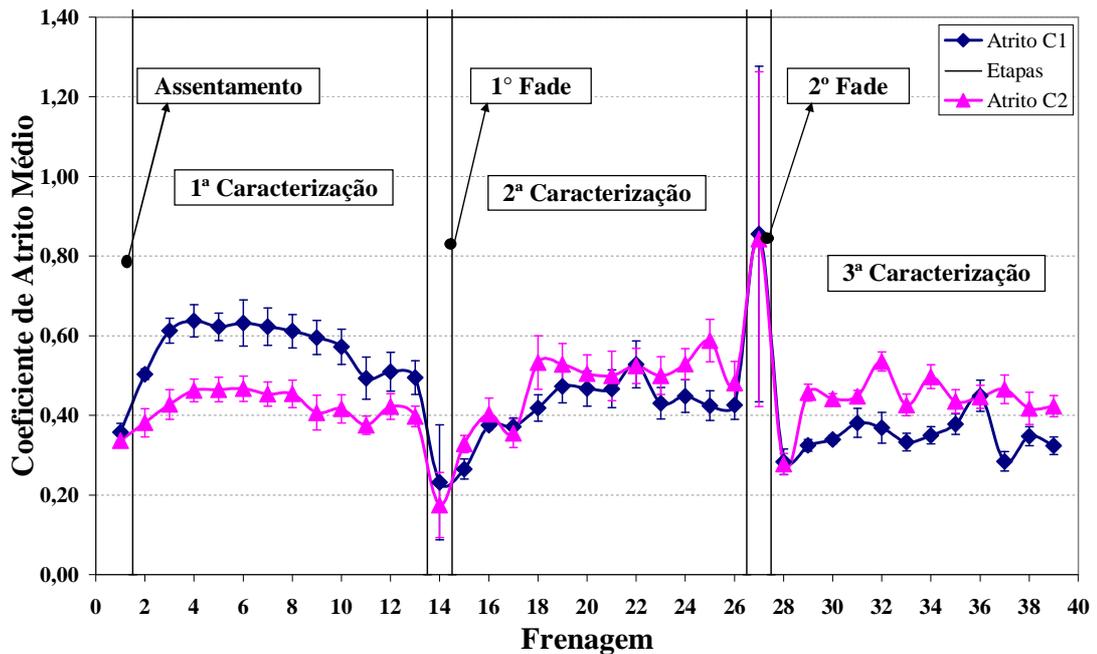


Figura 6.6 – Coeficiente de atrito médio para amostras C1 e C2.

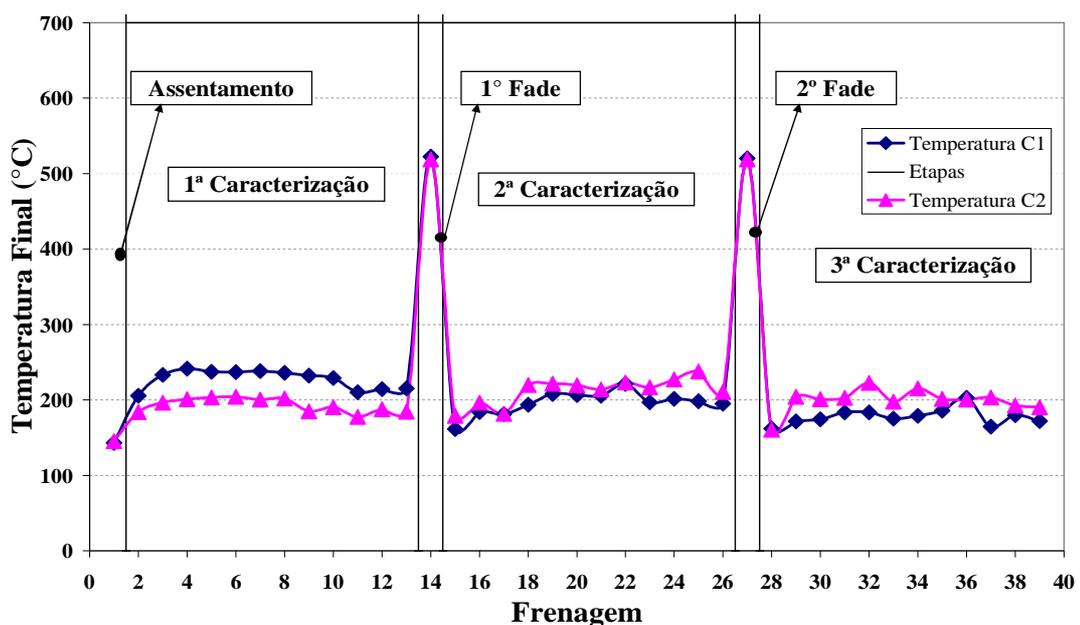


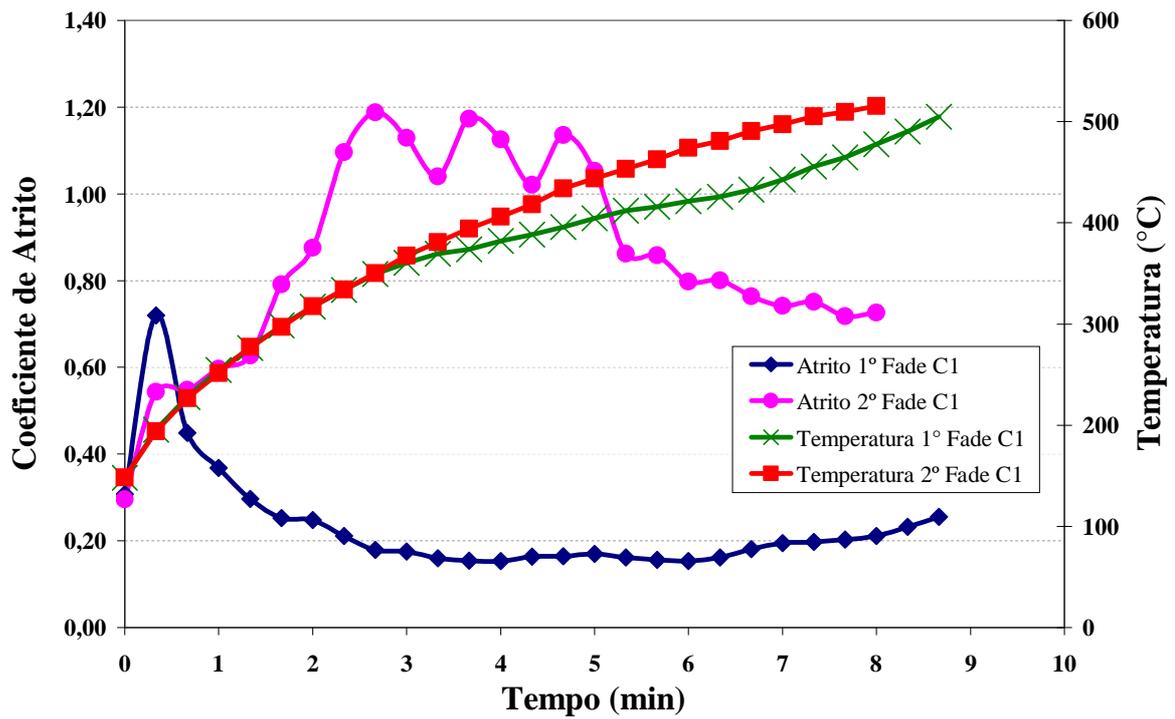
Figura 6.7 – Temperatura final do disco para amostra C1 e C2.

A Figura 6.8 (a) e (b) atesta que o comportamento do coeficiente de atrito para cada etapa de *fade* é similar, mesmo com a amostra C2 levando quase dois minutos a mais para atingir 515°C. Isto foi causado pelo mínimo valor do coeficiente de atrito do material calculado durante o procedimento, fazendo com que o tribômetro não conseguisse compensar com a força disponível. Isto indica que a escolha de 13 N.m como parâmetro de torque constante para essas amostras não foi adequada. De acordo com a Tabela 5.6, o parâmetro ideal para esses corpos de prova deveria ter sido de 11 N.m, o qual engloba o valor de atrito mínimo quando atingida a marca de 1600 N de força aplicada pelo tribômetro.

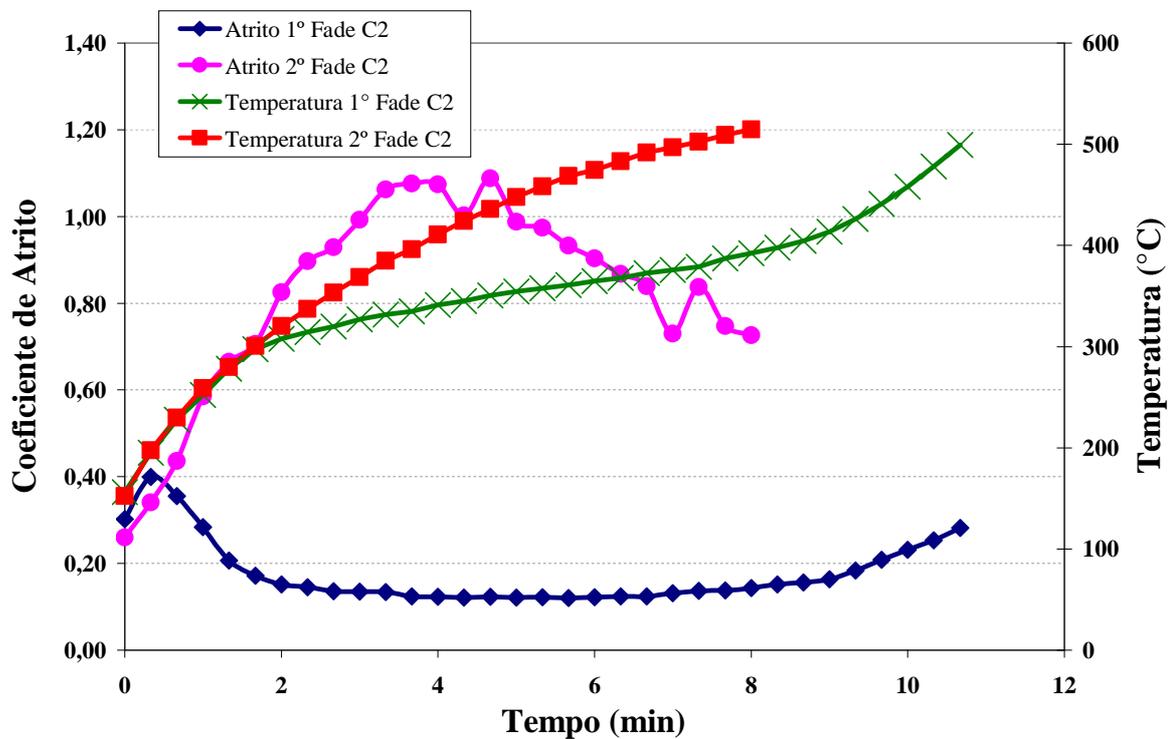
Entretanto, para efeitos de comparação ainda é válido, pois ocorreu para as duas amostras do grupo C analisadas. Para esse grupo de amostras, o valor de coeficiente de atrito médio é menor na primeira frenagem de *fade* que na segunda.

Para as amostras do grupo D, a Figura 6.9 mostra os resultados para coeficiente de atrito. Nesse caso, pode-se notar uma queda no valor do coeficiente de atrito médio para as etapas de caracterização conforme as etapas de *fade* vão se sucedendo. A Figura 6.10 mostra, assim como para amostras dos grupos B e C, que quanto maior o atrito calculado, maior a temperatura medida pelo termopar.

Quando consideradas apenas as etapas com temperaturas elevadas, percebe-se que o valor do coeficiente de atrito médio é semelhante entre as amostras (Figura 6.11 (a) e (b)). Novamente, os valores de atrito para a primeira frenagem de *fade* são menores que os verificados para a segunda frenagem. Para essas amostras, os valores de coeficiente de atrito não extrapolaram os limites permitidos para essa faixa de torque constante.



(a)



(b)

Figura 6.8 – Curvas de atrito e temperatura durante as etapas de *fade* para amostras (a) C1 e (b) C2.

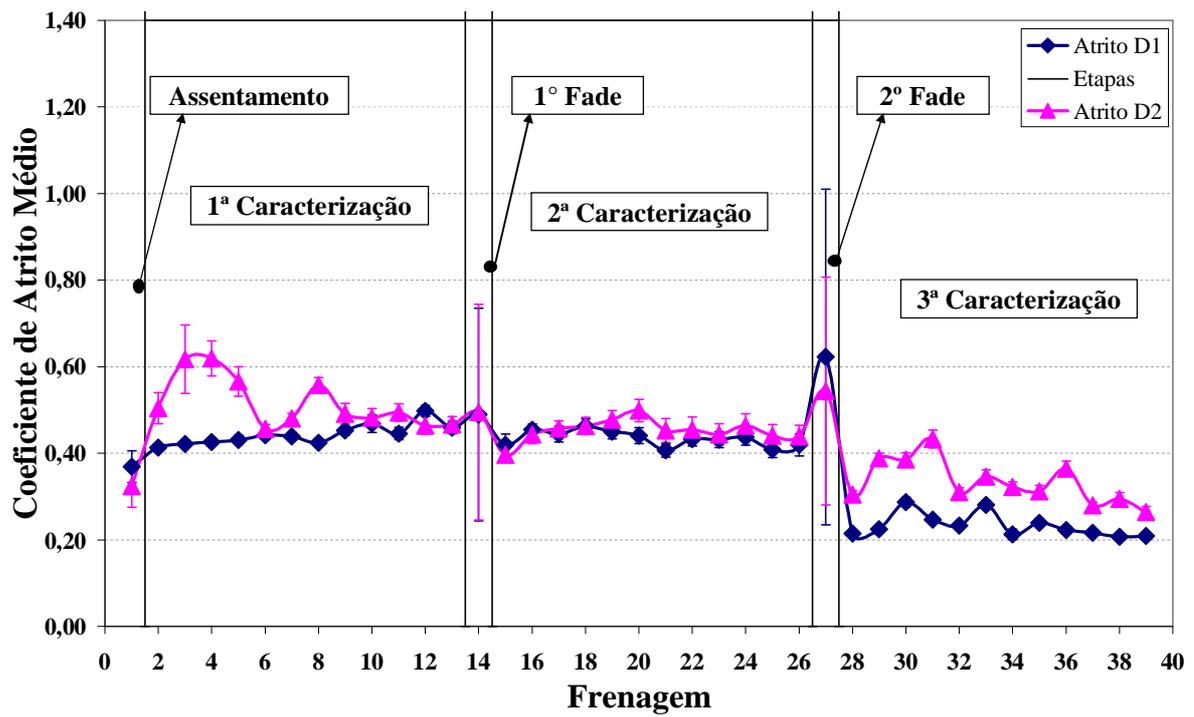


Figura 6.9 – Coeficiente de atrito médio para amostras D1 e D2.

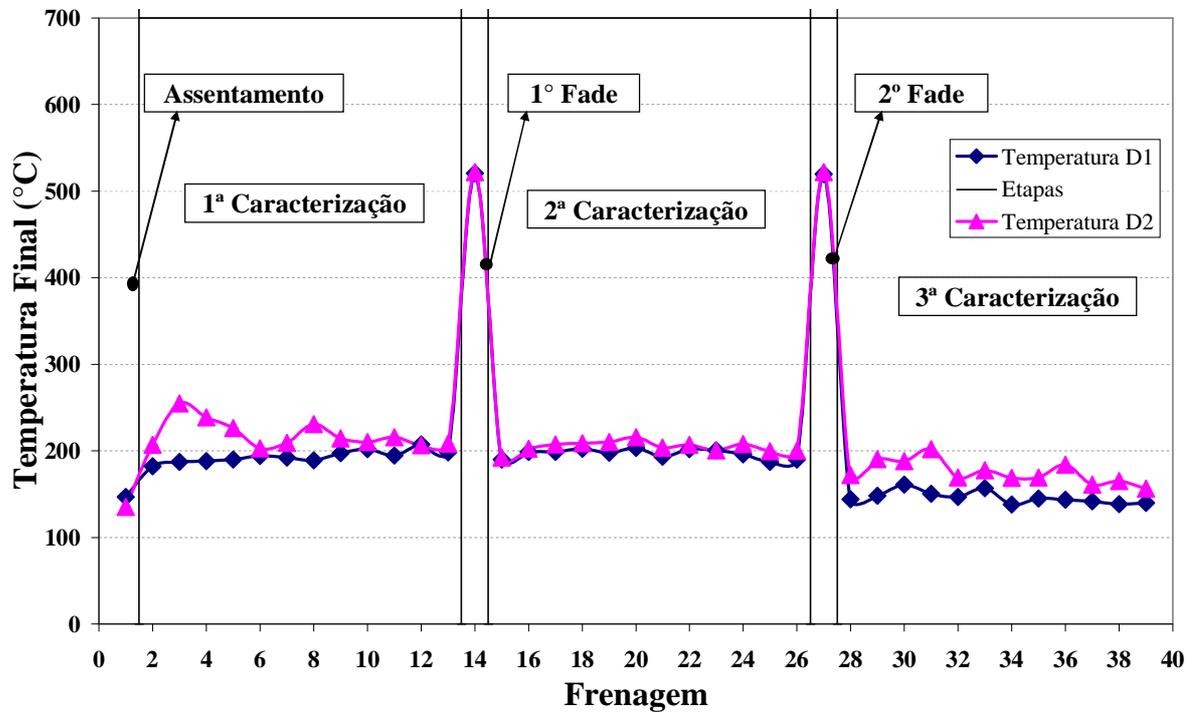
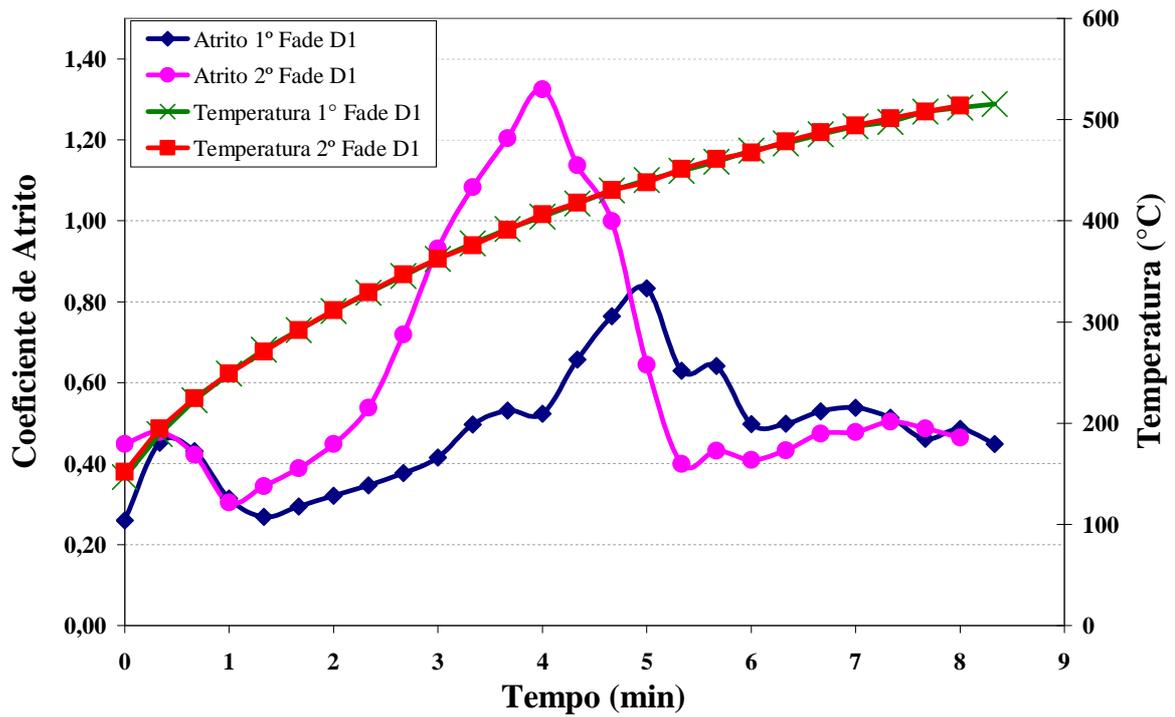
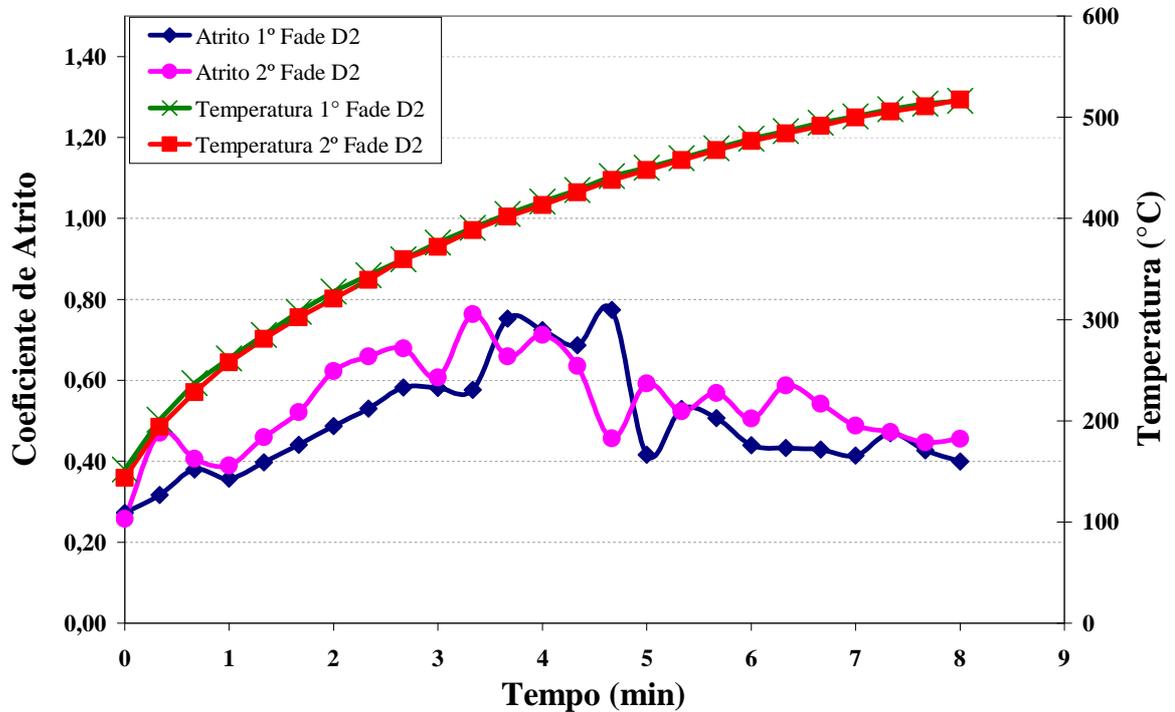


Figura 6.10 – Temperatura final do disco para amostra D1 e D2.



(a)



(b)

Figura 6.11 – Curvas de atrito e temperatura durante as etapas de *fade* para amostras (a) D1 e (b) D2.

Analisando separadamente cada etapa com temperatura elevada, o coeficiente de atrito de cada grupo de amostras durante as mesmas etapas de *fade* tem comportamento semelhante:

- para amostras do grupo B (Figura 6.5), as curvas de coeficiente de atrito do primeiro *fade* começam com um período de inclinação negativa e se tornam positivas após atingirem 350°C. Para o segundo *fade*, este período positivo inicia em 230°C.
- para amostras do grupo C (Figura 6.8), o coeficiente de atrito das curvas do primeiro *fade* começa com inclinação negativa, fica constante em 350°C e inicia seu período positivo em 440°C. Para o segundo *fade*, as curvas têm taxa positiva até 440°C e então o período de inclinação negativa começa.
- para amostras do grupo D (Figura 6.11), as curvas de fricção para o primeiro *fade* começam um período de crescimento positivo ao atingirem a temperatura de 250°C e que se torna negativo a partir de 440°C. Para o segundo *fade*, as curvas de atrito ficam positivas após 240°C até a temperatura de 440°C, quando outro período de taxa negativa começa e se mantém pelo resto da frenagem.

A Tabela 6.2 mostra de forma resumida e qualitativa o comportamento da curva de atrito para cada uma das etapas de *fade* das amostras estudadas.

**Tabela 6.2 - Comportamento qualitativo do coeficiente de atrito para as amostras utilizadas.**

Amostra	Etapa	Temperatura						
		200°C	230°C	240°C	250°C	350°C	440°C	515°C
Grupo B	1° Fade	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↑
	2° Fade	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Grupo C	1° Fade	↓	↓	↓	↓	→	↑	↑
	2° Fade	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↓
Grupo D	1° Fade	↓	↓	↓	↑	↑	↓	↓
	2° Fade	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↓

De uma forma geral, a etapa de caracterização se mostrou satisfatória para o propósito da metodologia desenvolvida até aqui. Entretanto, devido às curvas de *fade* para as amostras C1 e C2 (Figura 6.8), em que o atrito atingiu valores abaixo do indicado para a faixa de torque utilizado, o ideal é reconsiderar os parâmetros utilizados. A solução proposta é definir como

11 N.m o valor de torque constante das etapas de *fade* do procedimento, conforme resultados da Figura 5.13 e da Tabela 5.6.

## 7 VERSÃO FINAL DO PROCEDIMENTO PROPOSTO

De acordo com os resultados para o atrito mostrados, faz-se necessário algumas alterações nos parâmetros originais definidos no Capítulo 5 do presente trabalho. Assim, conforme já discutido nas Seções 6.1 (etapa de assentamento) e 6.2 (etapa de *fade*), os parâmetros finais reavaliados para a metodologia proposta podem ser vistos nas Tabelas 7.1 a 7.3. A estrutura do procedimento não foi alterada, permanecendo igual a mostrada na Figura 5.1.

**Tabela 7.1 – Parâmetros finais reavaliados para etapa de assentamento.**

Temperatura Inicial (°C)	Ambiente
Temperatura Final (°C)	Livre
Velocidade de Escorregamento (m/s)	2,1
Força de Aplicação (N)	500
Duração da Frenagem (min)	10
Limite de Assentamento (%)	0,15
Tempo Limite de Assentamento	4 min e 30 s

**Tabela 7.2 – Parâmetros finais reavaliados para etapas de caracterização.**

Temperatura Inicial (°C)	100
Temperatura Final (°C)	Livre
Velocidade de Escorregamento (m/s)	3,14
Força de Aplicação (N)	400
Total de Frenagens	12
Duração da Frenagem (min)	3

**Tabela 7.3 – Parâmetros finais reavaliados para etapas de *fade*.**

Temperatura Inicial (°C)	150
Temperatura Final (°C)	515
Velocidade de Escorregamento (m/s)	4,1
Torque de Aplicação (N.m)	11
Duração da Frenagem (min)	Estimado em cerca de 16 min e 30 s

## 8 CONCLUSÕES

O procedimento proposto com frenagem em arrasto e temperatura elevada apresenta em sua forma final três etapas distintas, todas determinadas a partir da revisão bibliográfica: uma etapa de assentamento para estabilização do atrito; duas etapas de *fade* para verificar eventuais diferenças de comportamento dos materiais; e três etapas de caracterização com o objetivo de verificar o poder de recuperação dos materiais entre os estágios de *fade*.

Tanto para determinação dos parâmetros de cada etapa quanto para aplicação do método para verificação do atrito foram utilizados materiais com diferentes formulações, sendo que:

- para a etapa de assentamento: os parâmetros preliminares escolhidos mostraram-se adequados em um primeiro momento, quando também desenvolveu-se um critério para verificação do assentamento das amostras a fim de comprovar matematicamente a estabilização do atrito. Entretanto, quando aplicado o procedimento para verificação do atrito, nem todas as amostras apresentaram a estabilidade de atrito exigida para uma metodologia de ensaio. Para satisfazer essa condição, definiu-se que tempo da frenagem de assentamento deve ser aumentado de 5 para 10 minutos, fazendo com que tanto a curva de atrito quanto o critério de assentamento proposto possam ser capazes de atestar a estabilidade do atrito de cada material;
- para etapa de caracterização: os parâmetros escolhidos inicialmente mantiveram-se abaixo da temperatura que a literatura indica como limiar para o início dos efeitos térmicos. Para garantir o sucesso dessa etapa, fez-se necessária a repetição das frenagens de caracterização até que houvesse uma tendência de estabilização do atrito por parte das amostras. Ao aplicar o método para verificação do atrito, constatou-se que os parâmetros preliminares mostraram-se adequados, sendo possível verificar o poder de recuperação do coeficiente de atrito das amostras. Sendo assim, não foi necessária nenhuma alteração dos parâmetros da etapa de caracterização para a versão final do procedimento proposto;
- para etapa de *fade*: durante a determinação dos parâmetros preliminares dessa etapa, constatou-se que a utilização do torque ao invés da força como valor constante se mostrou acertada, pois assim a temperatura final de frenagem definida será atingida em um mesmo intervalo de tempo para todas as amostras, independente do material submetido a frenagem. A combinação dos parâmetros preliminares se mostrou inicialmente adequada, visto que atingiu

a temperatura final pré-determinada. Ao aplicar o procedimento para verificação do atrito, constatou-se que o valor de torque preliminar de 13 N.m não se apresentou adequado, visto que para algumas amostras foram registrados valores de coeficiente de atrito menores que os 0,20 calculados quando aplicado a força máxima permitida pelo tribômetro de 1600 N. Isso indica que para uma melhor comparação entre materiais, o parâmetro mais apropriado para a versão final da metodologia proposta deve ser de torque constante de 11 N.m, pois assim o coeficiente de atrito mínimo medido para todas as amostras estariam nos limites definidos de acordo com a força máxima disponível pelo tribômetro.

De uma forma geral, ao reconsiderar os parâmetros de cada etapa da metodologia proposta, pode-se dizer que o procedimento final é válido, pois foi possível verificar diferenças de comportamento de materiais de atrito com diferentes formulações. A sua utilização juntamente com o tribômetro de Neis, 2008 formam uma importante ferramenta auxiliar para compreensão do processo de frenagem.

Ao aplicar o método para verificação do atrito das amostras, constatou-se que:

- quando comparadas as etapas de caracterização antes do primeiro *fade* e depois do segundo, as amostras também mostraram variação no coeficiente de atrito médio. Com exceção da amostra C2, todas as demais amostras apresentaram queda no coeficiente de atrito médio conforme as etapas de *fade* iam se sucedendo.
- as curvas de temperatura final do disco mostram que, para todas as amostras testadas, existem uma correlação com suas respectivas curvas de coeficiente de atrito médio. Desconsiderando as etapas de *fade*, onde a temperatura final de frenagem é controlada, todas as outras frenagens mostraram que altos coeficientes de atrito implicam em altas temperaturas finais medidas no disco de fricção.
- para as etapas de *fade*, notou-se que os valores de cada frenagem para sua etapa correspondente (ex: primeiro *fade* para o corpo de prova B3 com primeiro *fade* de B4) são semelhantes entre as amostras. Por outro lado, a diferença das frenagens entre o primeiro e o segundo *fade* são significativas. Em todos os casos, o coeficiente de atrito é menor para o primeiro *fade* do que para o segundo. Esse é o mesmo resultado obtido por Cristhól-Bulthé et al., 2008, e segundo esses mesmos autores, é devido a degradação das resinas fenólicas dos materiais de atrito.

- foi possível verificar o comportamento das curvas de coeficiente de atrito dentro de cada frenagem das etapas de *fade* para cada grupo de amostras. Entre amostras do mesmo grupo, o comportamento é semelhante, sendo possível a identificação dos períodos de inclinação positiva, negativa e constante.

## **9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Adaptação da metodologia de ensaio para frenagens com desaceleração;
- Ensaios com controle de temperatura;
- Testar o procedimento com uma gama maior de valores;
- Correlacionar resultados com dinamômetros inerciais;
- Construção de um banco de dados para materiais de atrito;

## 10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AK-MASTER STAND, “**In Brake German Procedures**”, 1998.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, “**Guarnições da Embreagem e do Freio - Material de Fricção do Tipo Orgânico - Verificação das Características de Fricção e Desgaste - Ensaio FAST – NBR 7813**”, Rio de Janeiro, 1998.

Birch, T. W., “**Automotive Braking Systems**”, Delmar, 1999.

Blau, P.J., McLaughlin, J.C., “**Effects of Water Films and Sliding Speed on the Frictional Behavior of Truck Disc Brake Materials**”, Tribology International 36, p. 709-715, 2003.

Cristol-Bulthé, A.-L., Desplanques, Y., Degallaix, G., “**Coupling Between Friction Physical Mechanisms and Transient Thermal Phenomena Involved in Pad-Disc Contact During Railway Braking**”, Wear 263 p. 1230-1242, 2007.

Cristol-Bulthé, A.L., Desplanques, Y., Degallaix, G., Berthier, Y., “**Mechanical and Chemical Investigation of the Temperature Influence on the Tribological Mechanisms occurring in OMC/Cast iron Friction Contact**”, Wear 264 p. 815-825, 2008.

Day, A. J., “**Drum Brake Interface Pressure Distributions**”, Journal of Automobile Engineering, p. 127-136, 1991.

Degenstein, T., Winner, H., “**New Methods of Force and Temperature Measurement in a Wheel Brake During the Braking Process**”, XXVII  $\mu$  Symposium, p. 164-188, 2007.

Department of Energy of USA, <http://www.newton.dep.anl.gov/askasci/phy00/phy00097.htm>, acessado em 18/05/2009.

Desplanques, Y., Roussette, O., Degallaix, G., M. Francois, Bulthé, A.-L., Sabatier, L., “**A Reduced-Scale Test for Pad-Disc Contact Tribological Analysis in Railway Braking**”, Wear 262 p. 218 – 219, 2006.

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 p. 582-591, 2007.

Kolluri, D., Ghosh, A. K., Bijwe, J., **“Analysis of Load-Speed Sensitivity of Friction Composites Based on Various Synthetic Graphites”**, Wear 266 p. 266–274, 2008.

Dillenburg, R. F., **“Avaliação do Contato entre Material de Fricção e Disco de Freio Com o Uso de Termografia”**, 23 folhas. Monografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

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

Eriksson M., Bergman F., Jacobson S., **“On the Nature of Tribological Contact in Automotive Brakes”**, Wear 252 p. 26-36, 2002.

Halliday, D., Resnick, R., Walker, J., **“Fundamentos de Física – Volume 1”**, LTC, Rio de Janeiro, 1996.

Infantini, M.B., **“Variáveis de Desempenho dos Sistemas de Freios”**, Dissertação de Mestrado, 96 folhas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

Lee K., Blau P.J., Truhan Jr. J.J., **“Effects of Moisture Adsorption on Laboratory Wear Measurements of Brake Friction Materials”**, Wear 262, p. 925-930, 2007.

Limpert, R., **“Brake Design and Safety”**, Society of Automotive Engineering, 1999.

Neis, P. D., **“Projeto e Construção de Um Tribômetro Para Estudos Relacionados a Materiais de Fricção Veiculares”**, Dissertação de Mestrado, 95 folhas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

Neis, P. D., Balotin, J. G., Ferreira, N. F., Soares, M. R., **“An Investigation of The Influence of The Operating Parameters on Braking Tests Results With Friction Materials Using a Tribometer”**, 9º SAE Brasil: International Brake Colloquium. SAE Paper 2009-01-13, 2009.

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.

Novus, <http://www.novus.com.br>, acessado em 16/04/2010.

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

Ostermeyer, G. P., "**On the Dynamics of the Friction Coefficient**", Wear 254, p. 852-858, 2003.

Preston, J.D, Forthofer, R.J., "**Correlation of Vehicle, Dynamometer and Other Laboratory Tests for Brake Friction Materials**", Society of Automotive Engineers 710250, 1971.

Qi, H. S.; Day, A. J., "**Investigation of Disc/Pad Interface Temperatures in Friction Braking**", Wear 262 , p. 505-513, 2006.

Rhee, S.K., Schwartz, H.W., "**Test Methods for Automotive and Truck Friction Materials**", American Society for Testing and Materials (ASTM), p. 39-49, 1979.

Rusnak R. M., Spurgeon W M., Aldrich F. W., "**Friction Material Testing**", Society of Automotive Engineers 700517, 1970.

Santos, F.S., "**Análise de Incertezas na Determinação do Coeficiente de Atrito de Materiais de Fricção Utilizando um Tribômetro**", 15 folhas. Monografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

Shigley J. E., Mischke C. R., Budynas R. G.; "**Projeto de Engenharia Mecânica**", Bookman, Porto Alegre, 2004.

Tirovic, M., Day A. J., "**Disc Brake Interface Pressure Distributions**", Journal of Automobile Engineering, p. 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 of Materials: International Conference on Wear of Materials , p. 129-137, 1985.

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

Wilson, A.J., Bowsher, G.T., "**Machine Testing for Brake Lining Classification**", Society of Automotive Engineers 710249, 1971.

Zimmer, D., "**ATE Friction Test Machine and Other Methods of Lining Screening**". Society of Automotive Engineers 820163, 1982.