

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

AVALIAÇÃO DAS VARIAÇÕES NA FORÇA DE ATRITO DE MATERIAIS DE
FRICÇÃO UTILIZANDO UM TRIBÔMETRO

por

Tiago Roberto Borges de Moraes

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, maio de 2016

AVALIAÇÃO DAS VARIAÇÕES NA FORÇA DE ATRITO DE MATERIAIS DE
FRICÇÃO UTILIZANDO UM TRIBÔMETRO

por

Tiago Roberto Borges de Moraes
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: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Aprovada por:

Prof. Dr. André João de Souza, PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Luciano Tedesco Matozo, FTEC/FRAS-LE S/A

Prof. Dr. Patric Daniel Neis, PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 16 de maio de 2016

RESUMO

A demanda crescente por veículos mais confortáveis e mais seguros apresenta desafios à indústria. Os freios são um dos mais importantes sistemas de segurança dos veículos e também são frequentemente objeto de reclamações de consumidores por motivo de ruído. Os materiais de atrito empregados nos sistemas de freio devem apresentar desempenho satisfatório sob diferentes condições de temperatura e umidade, possuindo resistência à corrosão, longa vida útil, baixo custo e produzindo baixos níveis de ruído. Com o objetivo de caracterizar diferentes materiais quanto ao coeficiente de atrito e à produção de ruído, foram realizados ensaios de frenagem em diferentes condições utilizando um tribômetro. Esse equipamento possui sistemas de medição e controle capazes de registrar os coeficientes de atrito a cada frenagem simulada. O tribômetro também foi instrumentado com uma célula de carga capaz de medir variações da força de atrito. Os ensaios foram realizados em diferentes condições de temperatura e de intervalos de tempo entre as frenagens, alternando etapas quentes e frias. Durante o assentamento dos materiais, foram verificados diferentes comportamentos do coeficiente de atrito. Os materiais ensaiados apresentaram sensibilidade às variações de temperatura e de intervalos de tempo entre frenagens. Foi observada correlação entre as variações da força de atrito e o coeficiente de atrito. Também foram evidenciados os efeitos da velocidade de deslizamento sobre o espectro de frequências de variação da força de atrito.

Palavras-chave: freios; ruído; atrito; tribômetro.

ABSTRACT

The growing demand for more comfortable and safer vehicles comes up with new challenges to the industry. The brakes are one of the most important vehicle safety systems and are also often the subject of customer complaints about noise. The brake friction materials need to perform properly under different conditions of temperature and humidity, presenting resistance to corrosion, long life, low cost and producing low noise levels. In order to characterize the friction coefficient and noise generation of different friction materials, different conditions were tested using a tribometer. This equipment has measurement and control systems capable of record each brake stop friction coefficient. The tribometer was also instrumented with a load cell capable of measuring friction force variations. The tests were performed at different temperatures and time intervals between brake applications, alternating hot and cold stages. During the materials running-in, different behaviors of the friction coefficients were found. The friction materials tested showed sensitivity to temperature variations and time intervals between brake applications. There was a correlation between friction force variations and coefficient of friction. There were also effects of the slip speed on the frequency spectrum of the frictional force variations.

Keywords: brakes; noise; friction; tribometer.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	Objetivo geral	3
2.2	Objetivos específicos	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1	Tribologia	4
3.2	Sistemas de freios automotivos	5
3.3	Materiais de atrito	7
3.3.1	Materiais dos discos e tambores	7
3.3.2	Materiais de atrito das pastilhas e das lonas	7
3.3.3	Classificação dos materiais de atrito das pastilhas e lonas	8
3.4	Ensaio de materiais de atrito	9
3.5	Instrumentação para medições das grandezas relacionadas aos materiais de atrito	10
3.5.1	Medições de força e torque	11
3.5.2	Medições de vibrações	13
3.5.3	Medições e controle de temperatura	15
3.6	Vibrações em sistemas de freios automotivos	16
3.6.1	Classificação dos tipos de ruídos de freio	16
3.7	Fatores que influenciam o desempenho dos sistemas de freios	19
4	MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1	Equipamentos utilizados	22
4.2	Corpos de prova	25
4.3	Preparação do equipamento e dos corpos de prova	26
4.4	Procedimento experimental	27
4.5	Procedimento de análise dos resultados	29
4.5.1	Análise das etapas de sequências	29
4.5.2	Análise das etapas de frenagens	30
5	RESULTADOS	31
5.1	Análise do coeficiente de atrito	31
5.2	Análise das sequências	33
5.2.1	Análise das variações da força de atrito	33

5.2.2	Análise do coeficiente de atrito nas sequências.....	35
5.2.3	Análise correlação entre as variações da força de atrito e o coeficiente de atrito .	37
5.3	Análise das etapas de frenagens	38
5.3.1	Análise do espectro de frequência das variações da força de atrito.....	38
5.3.2	Relação da força dinâmica com a velocidade	41
6	CONCLUSÕES	43
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Ilustração dos dois principais sistemas de freio, o freio a disco e o freio a tambor [Franceschini, 2014].	5
Figura 3.2 – Disco de freio sólido (esquerda) e disco de freio ventilado (direita) [Matozo, 2006].	6
Figura 3.3 – Caliper fixo (esquerda) e caliper flutuante (direita) [Canali, 2002].	6
Figura 3.4 – Circuito de medição e controle de força aplicada sob o corpo de prova do tribômetro do Latrib da UFRGS [Neis, 2013].	12
Figura 3.5 – Circuito de medição e controle do torque de frenagem do tribômetro do Latrib da UFRGS [Neis, 2013].	12
Figura 3.6 – Configuração de acelerômetro piezoelétrico (Adaptado de Beckwith et al, 2007).	14
Figura 3.7 – Circuito de medição e controle da temperatura empregado no tribômetro do Latrib da UFRGS [Neis, 2013].	16
Figura 3.8 – Efeito <i>stick-slip</i> em sistema de freio, gerando <i>creep-groan</i> [Canali, 2002].	18
Figura 4.1 – Ilustração do tribômetro [cedido por Latrib].	22
Figura 4.2 – Diagrama esquemático do tribômetro [cedido por Latrib].	23
Figura 4.3 – Vista lateral do suporte do corpo de prova com transdutor de força.	23
Figura 4.4 – Bobina indutora à frente do rotor [cedido por Latrib].	24
Figura 4.5 – Instalação da mangueira de ar para resfriamento.	25
Figura 4.6 – Rotor (à esquerda) e corpo de prova (à direita).	25
Figura 4.7 – Preparação da superfície do disco [cedido por Latrib].	26
Figura 4.8 – Medição da rugosidade da superfície do disco [cedido por Latrib].	27
Figura 4.9 – Temperaturas médias ao longo dos ensaios.	29
Figura 5.1 – Coeficiente de atrito ao longo dos ensaios.	31
Figura 5.2 – Comportamento da força de atrito durante assentamento [Blau, 2006].	32
Figura 5.3 – Densidade espectral de energia da variação da força de atrito.	33
Figura 5.4 – Gradientes da densidade espectral de energia da variação da força de atrito.	34
Figura 5.5 – Coeficientes de atrito obtidos durante os experimentos.	35
Figura 5.6 – Gradientes dos coeficientes de atrito.	36
Figura 5.7 – Relação da densidade espectral de energia e coeficiente de atrito.	37

Figura 5.8 – Espectros de frequência da 15° frenagem da etapa 2.	38
Figura 5.9 – Potência espectral em baixas frequências da 15° frenagem da etapa 2.	39
Figura 5.10 – Espectro das frequências altas da 15° frenagem da etapa 2.	40
Figura 5.11 – Força dinâmica em função da velocidade da 15° frenagem da etapa 2 – baixas frequências.	41
Figura 5.12 – Força dinâmica em função da velocidade – altas frequências.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Composição dos corpos de prova.	26
Tabela 4.2 – Descrição dos ensaios.	28

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

FAST	Friction Assessment and Screening Test
Latrib	Laboratório de Tribologia
NAO	Non Asbestos Organic
PIB	Produto Interno Bruto
SAE	Society of Automotive Engineers
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

E	Densidade espectral de energia, N^4
f	Frequência, Hz
F_n	Força de atrito em base frequência, N^2
N	Quantidade de amostras
t	Tempo, s

1 INTRODUÇÃO

Os freios automotivos são um dos mais importantes sistemas de segurança dos veículos. Inicialmente, o desenvolvimento dos freios priorizava o desempenho e a confiabilidade. No entanto, a indústria passou a oferecer veículos mais confortáveis e outros aspectos passaram a orientar o desenvolvimento dos veículos, como a acústica e aspectos ambientais [Kinkaid et al, 2003].

Segundo Akay, 2002, em 1930 os freios automotivos seriam a causa de um dos dez principais problemas relacionados a ruídos na cidade de Nova York. Este problema gera custos de manutenção em garantia que alcançam um bilhão de dólares anuais na América do Norte. Kinkaid et al, 2003, afirma que os fabricantes de materiais de atrito para freios automotivos destinam até 50 % do orçamento de engenharia para tratar problemas relacionados a ruídos. Os ruídos produzidos pelo sistema de freios são frequentemente associados pelos consumidores a defeitos, mesmo que estes não percebam prejuízo ao desempenho ou a outras características, e isso gera demanda por manutenção ao longo da garantia do veículo [Oberst et al, 2008].

As vibrações produzidas pelo sistema de freio, e o conseqüente ruído, são tratados pela maior parte dos autores como problemas associados ao conforto. No entanto, Hochlenert et al, 2010, alertam para os efeitos da vibração sobre outros sistemas dos veículos. Segundo os autores, a vibração transmitida dos freios para as rodas pode causar fadiga e ruptura desse componente, especialmente em aros esportivos.

Segundo Sergienko, 2008, durante o atrito dos materiais de fricção dos freios automotivos, ocorrem micro-oscilações em uma ampla faixa de frequências. Essas micro-oscilações podem causar instabilidades no atrito, as quais constituem fonte de energia mecânica na forma de vibração. Quando as frequências naturais dos sistemas dos veículos coincidem com as produzidas pelas variações na força de atrito, ocorrem vibrações ressonantes, as quais são consideradas as principais causas de vibração e ruído nos sistemas de freio.

Além do conforto associado a baixos níveis de ruído, esses sistemas devem satisfazer a alguns requisitos dos consumidores, como segurança, durabilidade e baixo custo. Tais requisitos podem ser entendidos como elevado e constante coeficiente de fricção, mínima vibração e ruído, e baixa taxa de desgaste entre os materiais de fricção dos freios [Rhee et al, 1991].

O atrito é o processo pelo qual os sistemas de freios transformam a energia cinética dos veículos em outras formas de energia [Serbino, 2005]. A segurança veicular é dependente das propriedades dos materiais de atrito utilizados nos sistemas de freio, os quais devem manter desempenho estável com variações de temperatura, umidade, velocidade e de taxas de variação da velocidade [Rhee et al, 1991]. Segundo Kinkaid et al, 2003, esses materiais são submetidos em serviço a temperaturas de até 500 °C.

Os materiais de atrito são fabricados frequentemente por mais de 20 diferentes compostos e a sua interação tribológica com o disco de freio ainda não é completamente compreendida [Ostermeyer, 2003]. Segundo Desplanques et al, 2007, o desenvolvimento destes materiais é especialmente difícil em função de interações entre diferentes compostos e dos efeitos das características de vibração de diferentes componentes. Em função da dificuldade de analisar os efeitos isolados de cada componente, ainda é utilizada a experiência empírica dos fabricantes. Isso implica na necessidade de ensaios para avaliação experimental dos materiais de fricção em desenvolvimento.

Segundo Neis, 2008, até meados da década de 50, os materiais eram ensaiados em veículos reais que despendiam muito tempo de testes e acabavam se tornando muito caros e pouco eficazes devido às inúmeras variáveis ambientais e humanas envolvidas. Os equipamentos específicos para ensaios em materiais de fricção foram desenvolvidos para avaliação de amostras em escala, dispensando a instrumentação para ensaios em veículos. Existem diferentes tipos de equipamentos para estes fins, cada um com características específicas.

Em função da relevância do desempenho sob condições adversas dos sistemas de freio para a segurança veicular e da crescente exigência dos consumidores por veículos confortáveis, mostra-se necessária a caracterização dos materiais de atrito tanto em função do ruído quanto do atrito.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho de quatro materiais de atrito em ensaios de frenagem utilizando um tribômetro procurando caracterizar em diferentes condições de temperatura e intervalos de tempo entre frenagens.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o coeficiente de atrito dos materiais.
- Avaliar os efeitos da temperatura e do intervalo de tempo entre frenagens sobre as variações da força de atrito e sobre o coeficiente de atrito.
- Avaliar a relação entre o coeficiente de atrito e as variações da força de atrito.
- Caracterizar os materiais quanto ao espectro de frequência das variações da força de atrito.
- Avaliar a relação da velocidade de deslizamento com a intensidade das variações da força de atrito.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Tribologia

A palavra tribologia deriva do grego e significa ciência ou estudo do atrito. O termo foi utilizado pela primeira vez em 1966 em um estudo denominado relatório de Jost, o qual investigou o custo anual devido ao atrito e ao desgaste. Essa área do conhecimento é do interesse de químicos, de engenheiros, de metalurgistas, de físicos, entre outros. A tribologia é tão antiga quanto se tem registro. Claramente, a invenção da roda é um exemplo do esforço para reduzir o atrito de um movimento translacional [Halling, 1975].

Os governos dos países mais industrializados desenvolvem estratégias para a economia de energia. O relatório de Jost demonstrou os enormes desperdícios que ocorriam no Reino Unido. De forma semelhante, estudos apontaram os custos que poderiam ser evitados por meio da aplicação correta do conhecimento da tribologia em diversos países, como Estados Unidos e Alemanha. Uma estimativa conservadora elaborada por Jost em 2008 apontou que poderiam ser economizados valores equivalentes a 1,6% do PIB dos países [Halling, 1975].

Os primeiros trabalhos científicos desenvolvidos sobre tribologia iniciaram durante o renascimento (entre os anos de 1450 e 1600), com os estudos mais significativos conduzidos por Leonardo da Vinci (1452 – 1519). Os resultados mais importantes demonstravam que a força de atrito não dependia apenas da carga aplicada, mas também da área de contato. Robert Hooke (1635 – 1703) analisou processos relativos ao atrito de rolamento, apresentando conceitos sobre projeto de rolamentos, selos, materiais e lubrificantes. Guillaume Amontons apresentou em 1699 resultados experimentais e interpretações relativas ao atrito, definindo duas leis. A primeira estabelece a proporcionalidade direta entre força de atrito e carga aplicada, enquanto a segunda indica a independência entre força de atrito e área de contato. O matemático Leonard Euler (1707 – 1783) apresentou relevantes contribuições à tribologia, sendo a mais importante a definição dos coeficientes de atrito estático e dinâmico [Halling, 1975].

Charles-Augustin de Coulomb propôs no século 18 que a força de atrito seria independente da velocidade de deslizamento de superfícies em contato. Essas leis ainda são aceitas como princípios fundamentais da tribologia, embora estudos avançados identifiquem influência de diversos parâmetros sobre a força de atrito [Krim, 1996].

3.2 Sistemas de freios automotivos

O sistema de freio automotivo tem a função de desacelerar o veículo por meio da transformação de energia cinética em calor, dispersando esse calor no ambiente. São requisitos dos sistemas de freio a resistência à corrosão, baixo peso, durabilidade, baixa emissão de ruídos, estabilidade e baixo custo [Blau, 2001]. No entanto, pode ocorrer conversão parcial da energia absorvida pelo sistema de freio em vibração e ruído [Canali, 2002].

São utilizados dois tipos de sistemas de freios a fricção nos veículos de passeio e comerciais leves, sendo estes o sistema de freio a disco e o sistema de freio a tambor [Blau, 2001]. São apresentadas na Figura 3.1 vistas em corte do freio a disco para revelar as pastilhas e do freio a tambor para revelar as lonas.

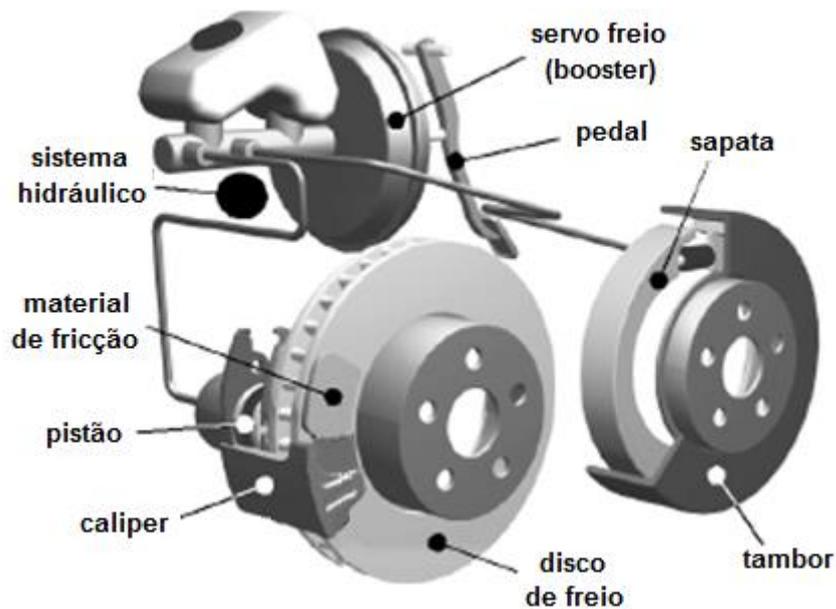


Figura 3.1 – Ilustração dos dois principais sistemas de freio, o freio a disco e o freio a tambor [Franceschini, 2014].

Os sistemas de freios de veículos leves são compostos, basicamente, pelas seguintes partes principais [Canali, 2002]:

- Acionamento, por exemplo, pedal de freio;
- Servo freio, ou sistema de energização, responsável por converter a força aplicada no pedal de freio em pressão hidráulica;
- Sistema hidráulico, responsável por distribuir a energia entre os componentes do sistema;

- Freio de roda, o qual possui mecanismo para pressionar as pastilhas contra o disco ou as lonas contra o tambor.

Os sistemas de freio a disco podem ser classificados de acordo com características do disco e do caliper. A Figura 3.2 apresenta discos de freio sólidos e ventilados e a Figura 3.3 apresenta caliper do tipo fixo e do tipo flutuante.

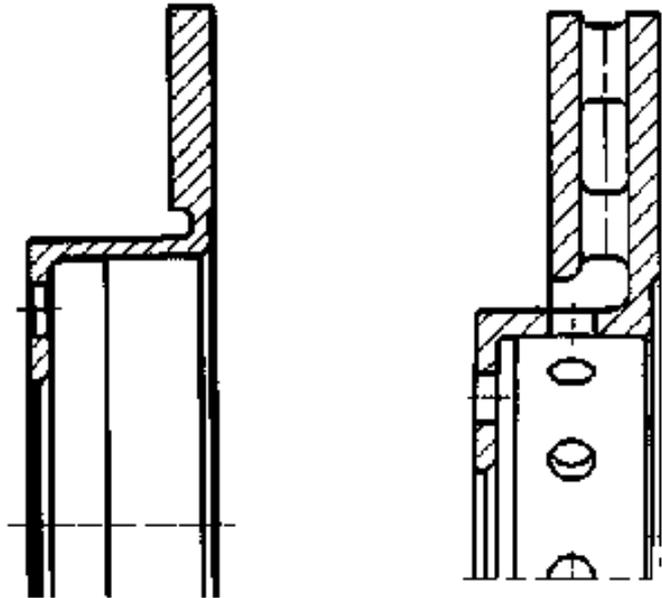


Figura 3.2 – Disco de freio sólido (esquerda) e disco de freio ventilado (direita) [Matozo, 2006].

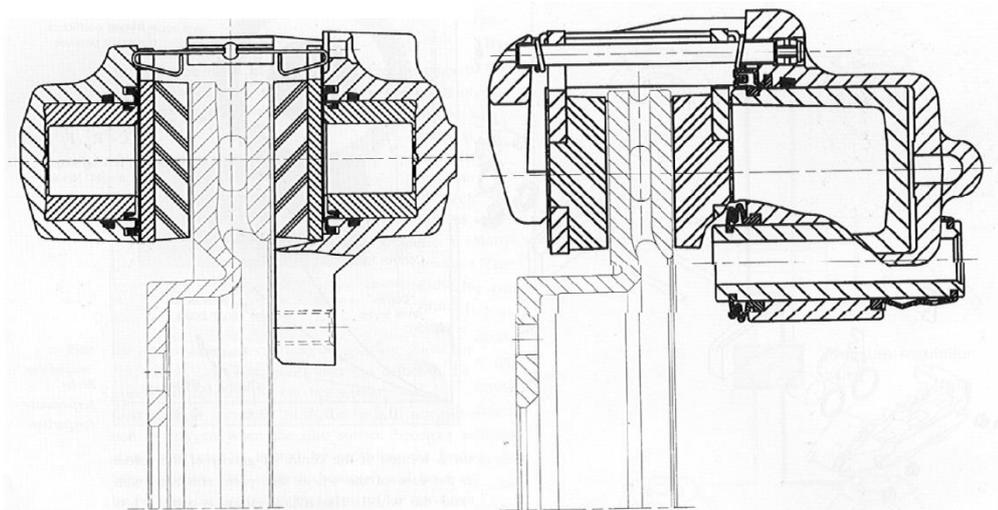


Figura 3.3 – Caliper fixo (esquerda) e caliper flutuante (direita) [Canali, 2002].

3.3 Materiais de atrito

3.3.1 Materiais dos discos e tambores

Os discos e tambores de freio são submetidos a temperaturas elevadas, da ordem de 500°C, em condições normais de uso, podendo alcançar 800°C em situações extremas. Em função das severas condições às quais são submetidos, os discos e tambores de freio devem suportar tanto os esforços mecânicos de frenagem quanto a dissipação do calor gerado pelo atrito. Em função disso, o material mais utilizado para fabricação de discos e tambores de freio é o ferro fundido cinzento [Matozo, 2006]. Este material se mostra adequado por satisfazer, a um custo baixo em relação aos demais materiais, as solicitações térmicas e mecânicas da aplicação.

Segundo Canali [2002], os materiais empregados nos discos e tambores de freio ainda devem apresentar as propriedades indicadas abaixo:

- Resistência ao desgaste provocado pela fricção das pastilhas ou das lonas.
- Usinabilidade, permitindo redução de custos na fabricação.
- Capacidade de amortecimento, para reduzir a propagação de vibrações geradas nas frenagens.

Em aplicações nas quais os custos não são fatores determinantes para a escolha dos materiais de atrito, a exemplo da fabricação de veículos esportivos e aeronaves, são utilizados discos de freio fabricados com materiais a base de fibras de carbono [Canali, 2002].

3.3.2 Materiais de atrito das pastilhas e das lonas

Os materiais de atrito utilizados nas pastilhas e lonas de freio possuem complexas combinações de matérias-primas. A composição é definida com o objetivo de produzir forças de atrito estáveis sob as diversas condições de uso do material [Canali, 2002]. Os materiais de atrito podem ser fabricados a partir de uma compactação a quente de uma mistura de 10 a 20 componentes, tipicamente [Eriksson e Staffan, 2000]. Esses componentes podem ser classificados conforme segue:

- Ligantes: responsáveis por aglutinar os componentes formando uma matriz termicamente estável. Resinas fenólicas termorrígidas são frequentemente utilizadas com a adição de borrachas para melhores propriedades de amortecimento.

- Materiais estruturais: para proporcionar resistência mecânica, são utilizadas fibras metálicas, de carbono, de vidro, de kevlar e, mais raramente, cerâmicas. Até a proibição nos EUA no ano de 1986, asbestos eram muito utilizados.
- Cargas: são utilizadas para preencher volume e reduzir custos dos materiais, assim como para conferir propriedades desejadas.
- Aditivos: são aplicados para controlar as propriedades relacionadas ao atrito do material, como a estabilidade do coeficiente de atrito e a taxa de desgaste dos materiais. São utilizados lubrificantes para garantir estabilidade do coeficiente de atrito, principalmente em altas temperaturas. Abrasivos, como alumina e sílica, são adicionados para aumentar o coeficiente de atrito e para limpeza das superfícies atritadas.

As composições dos materiais das pastilhas e das lonas, assim como detalhes dos processos de fabricação, são mantidas sob segredo pelos fabricantes. Desta forma, cada fabricante possui famílias de produtos com propriedades características [Canali, 2002].

3.3.3 Classificação dos materiais de atrito das pastilhas e lonas

Os materiais aplicados nas pastilhas e lonas podem ser classificados de acordo com as fibras presentes na sua composição.

Os materiais que utilizam quantidades elevadas de metais ferrosos são chamados de semi-metálicos ou “*low-met*”. A aplicação de lã de ferro na fabricação das pastilhas de freio confere ao material melhor capacidade de conduzir calor e aumenta a resistência mecânica. A utilização desse material propicia a ocorrência do atrito abrasivo, mecanismo que tende a desgastar o disco de freio, provocando oscilações no coeficiente de atrito e criando condições favoráveis para vibrações durante as frenagens. Os materiais de atrito semi-metálicos apresentam coeficientes de atrito geralmente elevados, em torno de 0,4 a 0,5, se adequando melhor a condições de direção europeias, em altas velocidades, em detrimento da preferência por materiais que produzam menos vibrações. Essas pastilhas são principalmente comercializadas no mercado brasileiro e europeu [Matozo, 2006].

O mercado asiático e norte-americano, no entanto, tende a preferir materiais de atrito da família denominada NAO (Non Asbestos Organic), os quais não contam com materiais ferrosos na sua composição. Em vez disso, é aplicado cobre, metal de elevado custo, o que apresenta limitação à sua ampla utilização. Também são aplicadas fibras mais nobres, como aramida, para garantir resistência mecânica. O mecanismo predominante é o atrito por adesão,

o que garante a estabilidade do coeficiente de atrito, com valor igual ou inferior a 0,35 [Matozo, 2006].

3.4 Ensaios de materiais de atrito

A realização de ensaios de materiais de atrito em laboratório apresenta diversas vantagens sobre a realização de ensaios em campo com veículos. A utilização de veículos nos ensaios de materiais de atrito está sujeita a interferências do sistema de suspensão ou mesmo da distribuição de massa do veículo [Timte, 2000].

Os ensaios em laboratório apresentam vantagens como a maior facilidade de instrumentação, o controle mais preciso das condições de ensaio, o menor tempo envolvido e a redução dos custos operacional.

Os equipamentos para ensaios de materiais de atrito para freios mais utilizados são apresentados abaixo:

- **Dinamômetro inercial:** é o equipamento mais utilizado e consiste de um ou mais discos de inércia, os quais são conectados a um motor elétrico e, na outra extremidade, a um eixo, no qual é instalado um disco ou tambor de freio. Neste equipamento, é utilizado o caliper ou as lonas de freio originais do veículo de interesse. Com a variação da inércia, é possível equiparar as condições de ensaio às quais o sistema de freio é submetido em determinado modelo de veículo. Este equipamento é frequentemente utilizado em dois modos de ensaio, o modo em que o motor é desacoplado dos discos de inércia, permitindo que o sistema de freio dissipe a energia cinética, e o modo de arraste, no qual o motor permanece acionado, mantendo a velocidade constante durante a frenagem.

Os principais parâmetros medidos durante os ensaios são a pressão de acionamento do freio, o torque frenante e a velocidade angular do disco ou tambor.

O dinamômetro inercial é o tipo de equipamento que permite melhor avaliação do conjunto de disco e pastilha ou tambor e lonas, não permitindo análise individualizada dos componentes [Neis, 2013].

- **Máquina Chase:** utiliza um corpo de prova com área de 1 pol^2 pressionado contra um tambor cujo raio de escorregamento é de 279 mm para avaliar o coeficiente de atrito dos materiais. Este equipamento permite a realização de ensaios com entrada constante (força normal aplicada sobre os materiais de atrito). O movimento relativo entre o

corpo de prova e o disco é proporcionado por um motor elétrico, não utilizando discos de inércia [Neis, 2008].

- Máquina FAST (Friction Assessment and Screening Test): utiliza um pequeno corpo de prova, quadrado, de lado 12,7 mm, pressionado contra um disco com velocidade angular de 870 rpm, com raio de escorregamento de 76,2 mm. De forma semelhante à máquina Chase, utiliza um motor elétrico [Neis, 2008].
- Máquina Krauss: de forma semelhante ao dinamômetro, utiliza componentes de freio originais dos veículos, diferenciando-se pela não utilização de discos de inércia [Neis, 2008].
- Tribômetro: podem ser classificados de acordo com o movimento relativo que produzem entre os materiais de atrito, se alternativo ou rotativo; em aplicações genéricas, são utilizados para determinação de parâmetros do atrito e do desgaste de materiais metálicos, plásticos ou cerâmicos. Embora não caracterizados na literatura, existem tribômetros especializados para ensaios em materiais de atrito de freios automotivos. Esse tipo de tribômetro utiliza corpos de prova geralmente planos, em vez de esféricos, e também se diferencia por aplicar forças mais intensas e por realizar os ensaios com desaceleração do rotor, de forma semelhante a uma frenagem veicular [Neis, 2013].

É uma prática comum a realização de uma etapa de assentamento dos materiais de atrito antes da realização de ensaios. Logo após o início da fricção dos materiais, observam-se flutuações temporárias na força de atrito, na temperatura e na taxa de desgaste. Este procedimento permite a formação do filme de fricção, a remoção de óxidos e a estabilização da área de contato e da rugosidade das superfícies dos materiais de atrito. O assentamento também é uma prática recomendada para os veículos novos ou que tiveram intervenção no sistema de freios. Os fabricantes de veículos recomendam condução em baixas velocidades nos primeiros 100 km. Antes da realização de ensaios de materiais de atrito, também é recomendável executar o aquecimento do equipamento, com o objetivo de obter melhor desempenho dos mancais e demais componentes, contribuindo para a exatidão dos resultados [Blau, 2006].

3.5 Instrumentação para medições das grandezas relacionadas aos materiais de atrito

Os instrumentos de medição utilizados nas medições relacionadas aos materiais de atrito de sistemas de freios automotivos são apresentados a seguir:

3.5.1 Medições de força e torque

As medições de força são realizadas por sistemas de medição que utilizam células de carga com transdutores do tipo *strain-gages* e do tipo piezelétricos.

- Células de carga com *strain-gages*

Esse tipo de célula de carga é composta por uma peça que, ao ser submetida a um esforço mecânico, apresenta uma deformação proporcional, a qual é medida por meio de sensores de deflexão instalados. Esses sensores, instalados sobre componente mecânico de rigidez conhecida, apresentam variações na resistência elétrica proporcional ao esforço mecânico, permitindo a medição da grandeza de interesse, seja esta força, torque ou pressão. As dimensões e a forma do componente elástico determinam a faixa de medição, a linearidade e a sensibilidade do transdutor. Este componente pode apresentar forma de viga, barra, anel, cilindro, teias de cisalhamento e diversas outras para fins específicos [Dally et al, 1984]. Os sensores de deflexão do tipo *strain-gage* são fixados em regiões dos componentes elásticos que maximizem a sensibilidade. Após a fixação, esses sensores passam a ser submetidos às mesmas deformações do componente elástico, permitindo que se realize a medição [Beckwith et al, 2007].

Os *strain-gages* possuem um condutor metálico que, ao serem submetidos a um esticamento, além da variação do comprimento, apresentam uma redução na seção transversal, alterando a resistência elétrica. A relação entre a variação do comprimento e a variação na seção transversal é dada pelo *gage-factor* do sensor, o qual é unicamente dependente do coeficiente de Poisson do material condutor [Beckwith et al, 2007].

As células de carga são construídas frequentemente utilizando quatro *strain-gages* cada uma. Dessa forma, é possível duplicar ou quadruplicar a sensibilidade do transdutor, assim como compensar os efeitos da temperatura sobre os *strain-gages*. Para isso, os *strain-gages* são conectados para formar a ponte de Wheatstone. Essa ponte, quando alimentada com tensão elétrica, produz um sinal de tensão, facilitando a transmissão e o tratamento do sinal de deformação [Beckwith et al, 2007].

As células de carga são aplicadas em um sistema de medição que, programado com os dados do transdutor, converte o sinal de tensão em valores de força. Um exemplo da aplicação deste sistema de medição em um tribômetro é apresentado na Figura 3.4.

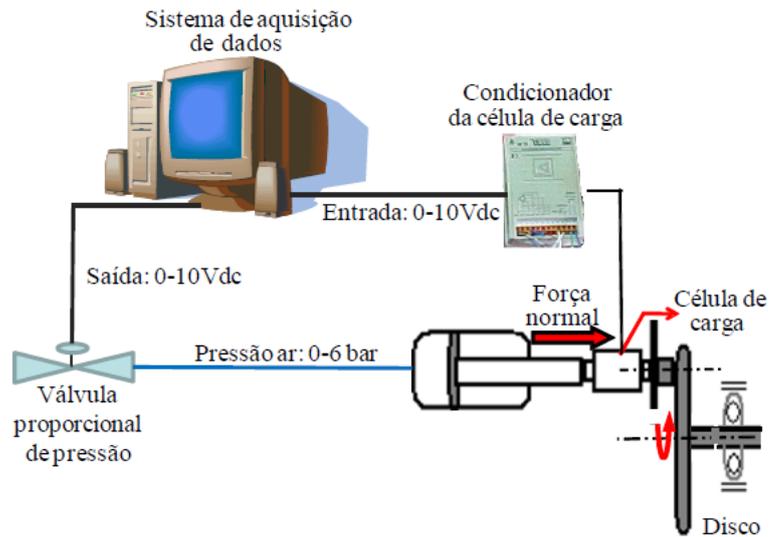


Figura 3.4 – Circuito de medição e controle de força aplicada sob o corpo de prova do tribômetro do Latrib da UFRGS [Neis, 2013].

As células de carga para medição de torque apresentam características semelhantes às utilizadas para medir forças. No entanto, é frequente a necessidade de medir torques sobre eixos em rotação. Para isto, são utilizados anéis de deslizamento em contato com escovas elétricas, permitindo a transmissão do sinal de tensão elétrica durante a rotação do eixo, assim como é aplicada comunicação sem contato, por meio de ondas de rádio [Beckwith et al, 2007].

A Figura 3.5 ilustra o sistema de medição de torque do tribômetro do Latrib da UFRGS, com transmissão do sinal de torque por ondas de rádio entre o transdutor e uma antena.

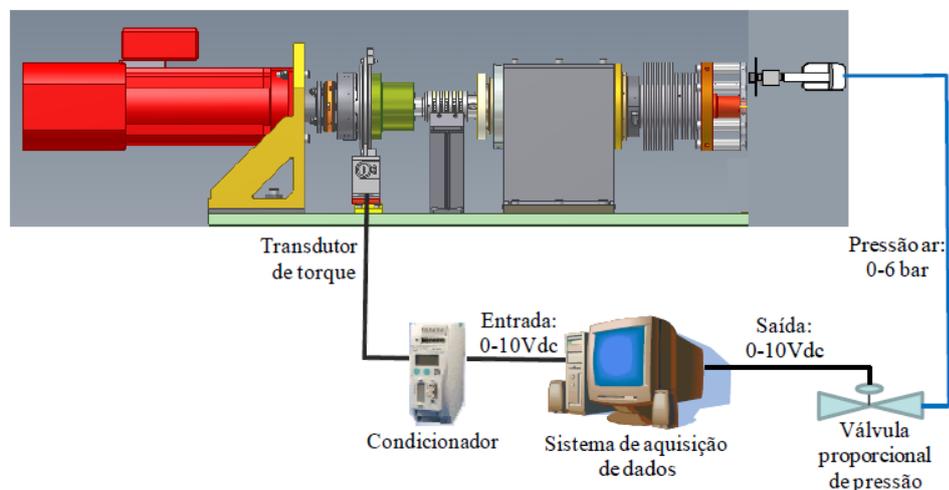


Figura 3.5 – Circuito de medição e controle do torque de frenagem do tribômetro do Latrib da UFRGS [Neis, 2013].

- Células de carga piezelétricas

Alguns materiais possuem a capacidade de gerar cargas elétricas quando submetidos a uma deformação mecânica, ou, de forma inversa, variar as suas dimensões quando aplicada tensão elétrica. Isso é conhecido como efeito piezelétrico. Alguns materiais notáveis com essas propriedades são o quartzo, o sal de Rochelle, o titanato de bário polarizado, o fosfato dihidrogenado de amônio, alguns polímeros e até mesmo o açúcar comum. Quando deformados, os materiais piezelétricos produzem uma carga elétrica, a qual é armazenada pela capacitância inerente ao material. No entanto, como qualquer capacitor, esses materiais apresentam a tendência de perder a energia armazenada com o tempo, o que torna as células de carga piezelétricas mais adequadas para medições dinâmicas do que medições estáticas. Além das medições de força dinâmica, os transdutores piezelétricos são utilizados em medições de rugosidade, de torque, de pressão, de movimento e medições acústicas [Beckwith et al, 2007].

3.5.2 Medições de vibrações

As vibrações são caracterizadas por deslocamentos no tempo de forma repetitiva. As vibrações podem ser quantificadas por meio de quatro grandezas: deslocamento, velocidade, aceleração e variação da aceleração. Também são características das vibrações a frequência, a amplitude e a forma de onda. Eventos únicos, transientes, com o movimento decaindo ou sendo amortecido com o tempo são denominados choques. No caso de choques repetitivos, os deslocamentos em função do tempo apresentam características de vibração. As medições básicas de vibração consistem em registrar o comportamento no tempo da amplitude, velocidade ou aceleração, sendo posteriormente processadas para prover informações quanto à frequência e amplitude [Beckwith et al, 2007].

O termo acelerômetro é aplicado aos transdutores utilizados nas medições de aceleração. Esses transdutores são muito utilizados em função da alta sensibilidade, da robustez e do seu tamanho reduzido. São construídos com uma massa sísmica suportada pelo elemento piezelétrico, conforme ilustra a Figura 3.6.

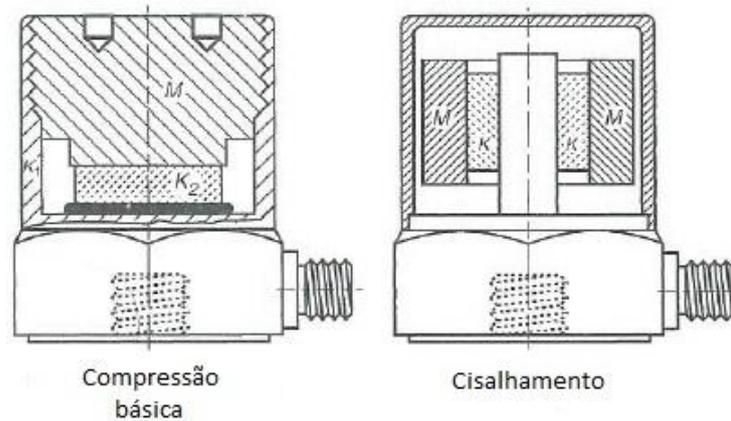


Figura 3.6 – Configuração de acelerômetro piezoelétrico (Adaptado de Beckwith et al, 2007).

Para que se obtenha medições confiáveis, os acelerômetros devem ser aplicados sob vibrações de frequências até 40% da sua frequência natural [Beckwith et al, 2007].

Os dados de vibrações são frequentemente analisados em base frequência. Dessa forma, podem ser produzidos gráficos de amplitude em função da frequência, permitindo identificação imediata de importantes características das vibrações medidas. Com a ampla utilização de computadores e microprocessadores na análise de sinais, tornou-se necessário tratar dados de forma discreta ao longo do tempo. Por meio de conversores analógico-digitais, o sinal contínuo produzido pelos sensores é discretizado a uma certa taxa de amostragem. A maior frequência possível de ser medida sob uma determinada taxa de amostragem é conhecida como frequência de *Nyquist*, a qual corresponde à metade da taxa de amostragem. Caso o sinal medido apresente frequências superiores à frequência de *Nyquist*, ocorrem problemas como o *aliasing*. Dessa forma, a análise em base frequência passa a apresentar informações incorretas, como a supressão de informações de vibração ou a adição de frequências que não estão presentes no sinal medido [Beckwith et al, 2007].

Uma ferramenta frequentemente utilizada para análise de sinais não estacionários são os diagramas conhecidos como espectrogramas. Os valores são indicados sobre os eixos tempo e frequência, usualmente apresentando a intensidade da densidade de energia por meio de cores. Essa representação permite avaliar visualmente as variações da energia do sinal ao longo do tempo e das frequências. Essa técnica é largamente utilizada na caracterização de sinais acústicos [Oliveira, 2007].

A energia associada a um sinal periódico em base frequência pode ser relacionada à energia de um sinal em base tempo, por meio do teorema de Parseval, apresentado abaixo [Moses e Stoica, 2005]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |X(f)|^2 df \quad (3.1)$$

Onde $X(f)$ é a transformada de Fourier de $x(t)$, t é o tempo, em s, e f é a frequência, em Hz.

3.5.3 Medições e controle de temperatura

Entre os princípios de medição de temperatura, destacam-se as medições realizadas por meio de sensores eletrônicos, como os termômetros por resistência elétrica, os termopares e os sensores por junções de semicondutores, principalmente nos casos em que a medição é integrada a um sistema de controle. Entre esses, se destacam os termopares, os quais apresentam amplas faixas de medição de temperatura, baixo custo e dimensões reduzidas [Beckwith et al, 2007].

Os termopares são baseados no efeito Seebeck, o qual gera uma diferença de potencial elétrico entre dois metais unidos em duas juntas mantidas a diferentes temperaturas. Os termopares são construídos com combinações específicas de materiais, de forma a obter sensores com sensibilidade e faixa de medição adequadas à aplicação, resistentes à oxidação e com as demais propriedades desejadas. Os termopares devem ser utilizados em conjunto com um instrumento eletrônico que, programado com valores característicos do par de materiais aplicados, converte o sinal de tensão elétrica em valor de temperatura. Esses instrumentos ainda são capazes de condicionar e amplificar o sinal, além de emular eletronicamente uma das juntas necessárias para a medição [Beckwith et al, 2007].

A norma SAE J661, 1997, estabelece os procedimentos para o controle de qualidade dos materiais de fricção utilizados em sistemas de freios automotivos. Nessa norma recomenda a utilização de termopares capazes de fornecer medições com incerteza igual ou inferior a 2% do valor de fundo de escala, instalados dentro do tambor de freio.

A Figura 3.7 ilustra o sistema de medição e controle de temperatura do tribômetro do Latrib da UFRGS.

amplitude de vibração atinge um limite, controlado pelo amortecimento do sistema. Crolla e Lang, 1991, afirmam ainda que os problemas de ruído e vibração em sistemas de freios são divididos basicamente em dois tipos fundamentais: vibração (*judder*) e ruído (de baixa e de alta frequência), mas inevitavelmente, alguns problemas de ruídos e vibrações de freio não se encaixam perfeitamente nestas categorias. De acordo com Matozo, 2006, as principais categorias de ruídos de freio são: *creep-groan*, *groan*, *moan*, *wire-brush* e *squeal*.

- Vibrações (*judder*)

É um tipo de ruído associado à variação da espessura do disco. A *judder* são resultantes de vibrações forçadas, que dependem diretamente da frequência de vibração sobre a velocidade de rotação do disco de freio e, conseqüentemente, da velocidade do veículo. A frequência de *judder* reduz, portanto, durante a aplicação dos freios na desaceleração, embora o efeito possa atingir intensidade máxima ao longo de estreitas faixas de frequências fixas devido à amplificação de ressonâncias da suspensão da estrutura do veículo. A variedade de formas de *judder* reside nos vários mecanismos através dos quais a não uniformidade da força de atrito é produzida [Crolla, 1991]. As vibrações geradas nos freios se propagam pela estrutura do veículo e podem ser sentidas pelos ocupantes, afetando o conforto.

Duas categorias principais aparecem na literatura sob a definição adequada de *judder*:

Cold judder: é o termo utilizado para descrever o *judder* sob condições de temperatura inicial de frenagem que não são elevadas o suficiente para provocar deformações no disco, alterações químicas geradas termicamente no par de atrito, ou instabilidade térmica do freio. Este efeito ocorre geralmente em temperaturas inferiores a 100 °C. Esta categoria de *judder* inclui não uniformidades na espessura, na forma ou na superfície de atrito do disco, causadas por desvios de planicidade com origem na fabricação ou pelo desgaste irregular do componente [Canali, 2002].

Hot judder: é o termo usado para o *judder* em condições de temperatura de frenagem acima do limite do cold *judder*. Esta categoria inclui mecanismos diferentes de excitação tal como a distorção de disco em temperaturas elevadas, depósitos excessivos de material de fricção sobre o disco que levam formação de um filme irregular no disco, pontos quentes resultando em transformações na microestrutura do material [Canali, 2002].

Segundo Canali, 2002, *judder* pode ainda ser classificado com relação à ordem de frequência em que se manifesta (*low order judder* ou *high order judder*).

- Ruídos de freio de baixa frequência

Ruídos de baixa frequência geralmente se manifestam na forma de som, em frequências de até 1000 Hz. A seguir são apresentados algumas classificações de tipos de ruído de baixa frequência que se manifestam em sistemas de freios.

Creep-groan: vibração decorrente do fenômeno de *stick-slip* em baixíssimas velocidades e baixas pressões aplicadas. A Figura 3.8 ilustra marcas deixadas em um disco de freio umedecido devidas ao efeito *stick-slip*.

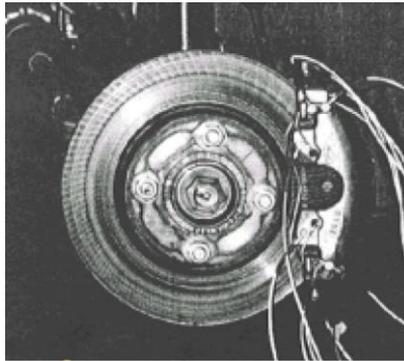


Figura 3.8 – Efeito *stick-slip* em sistema de freio, gerando *creep-groan* [Canali, 2002].

O fenômeno do *stick-slip* ocorre frequentemente na transição entre veículo parado e iniciando o movimento, ocasionando a excitação dos modos de vibração da suspensão e chassi do veículo. O *creep-groan* manifesta-se na forma de ruídos e vibrações. Ocorre na faixa de vibração de 20 a 200 Hz [Canali, 2002].

Groan: vibração que envolve ressonância do freio e do eixo do veículo. Geralmente abaixo de 100 Hz e ocorre ao final da frenagem, já em baixa velocidade e está associado ao fenômeno do *stick-slip*, ou à diminuição do coeficiente de atrito com a velocidade [Canali, 2002]. Segundo Sergienko et al, 2008, o *groan* é gerado quando o freio é gradualmente liberado e um torque de arrasto é simultaneamente aplicado sobre a roda. A pressão aplicada nas pastilhas de freio reduz, enquanto o torque na roda ultrapassa a força de frenagem, fazendo assim a roda girar com o deslizamento.

Moan: refere-se a vibração e ruído de baixa frequência causada por vibração de corpo rígido de componentes do sistema de freio e suspensão. Varia de 100 Hz a 400 Hz durante a aplicação do freio a baixas velocidades [Matozo, 2006]. De acordo com Sergienko et al, 2008, o *moan* é gerado no movimento uniforme do carro em desaceleração (pressão constante sobre as pastilhas de freio). Assim como no caso do *groan*, no *moan* também ocorrem oscilações bruscas dos componentes do veículo que são acompanhadas por ruído.

- Ruído de freio de alta frequência

Neste tipo de ruído, as vibrações não se propagam através do eixo e de componentes da suspensão do veículo. O ruído gerado no freio é transmitido até o motorista principalmente através do ar. Destacam-se entre os ruídos de alta frequência o *squeal* e o *wire-brush*.

Squeal: é o tipo mais frequente de ruído de freio. Segundo Sergienko et al, 2008, o *squeal* é definido como um ruído com níveis extremamente elevados de pressão sonora gerada em frequências acima de 1 kHz, e é produzido por vibrações naturais do caliper ou do disco de freio excitado por micro-oscilações do atrito. A principal fonte de *squeal* é o disco de freio, cujas altas frequências de vibrações de flexão geram as ondas sonoras correspondentes. Segundo Kinkaid et al, 2005, o *squeal* apresenta as características abaixo:

- pode ocorrer em frequências distintas;
- a amplitude de vibração é da ordem de micrometros;
- o *squeal* ocorre em frequências ligeiramente abaixo das frequências naturais do disco;
- o aumento do coeficiente de atrito dinâmico contribui para a propensão a ocorrência de *squeal*.

Wire brush: Possui este nome pela similaridade do som produzido por este tipo de vibração, como o de uma escova de aço esfregando em metal. É um tipo de ruído não ressonante, ao contrário do *squeal*. Se apresenta na faixa de frequência entre 8 e 20 kHz [Canali, 2002].

3.7 Fatores que influenciam o desempenho dos sistemas de freios

Com relação ao coeficiente de atrito e ao desgaste, o desempenho dos materiais de fricção utilizados em sistemas de freios automotivos é dependente da composição química e microestrutura dos dois materiais de atrito, assim como da velocidade de deslizamento, da pressão de contato, do filme de fricção, do histórico térmico dos materiais, das condições ambientais e da temperatura e rugosidade do disco. Materiais de baixa rugosidade tendem a apresentar maiores áreas de contato entre si, e, em função disso, apresentar coeficientes de atrito maiores [Neis, 2013].

Segundo Rhee e Schwartz, 1979, o desempenho dos materiais de atrito de sistemas de freios são afetados pela temperatura. Acima de 220 °C, a taxa de desgaste aumenta exponencialmente com a temperatura em função de mudança nos mecanismos de desgaste que deixam de ser abrasivos e, por adesão, passa a ser relacionados à decomposição dos

ingredientes poliméricos presentes nos materiais de fricção sob alta temperatura. Acima de 300 °C, ocorrem transformações químicas no material, como a degradação da resina fenólica, causando queda significativa no coeficiente de atrito. No entanto, este efeito tende a ser reduzido após alguns ciclos de aquecimento. Esse retorno do coeficiente de atrito a valores semelhantes aos originais é conhecido como recuperação [Bulthé et al, 2008]. Segundo Limpert, 1999, o fenômeno responsável pela redução do coeficiente de atrito dos materiais quando submetidos a temperaturas acima de 300 °C é conhecido como *fade*.

O filme tribológico formado durante o atrito dos materiais participa intensamente do processo de fricção. Este filme ocorre principalmente na faixa de temperatura entre 100 e 300 °C. O atrito sob temperaturas mais elevadas desfaz o filme, não permitindo ocorrência do *squeal* [Rhee et al, 1989].

Também são citados por Ericksson et al, 1999, os platôs formados na superfície dos materiais de atrito de pastilhas de freio. Se ressalta que os estudos indicaram que materiais com muitos platôs pequenos tendem a produzir mais *squeal* que materiais com poucos platôs grandes.

Estudos realizados por Godfrey, 1995, em um tribômetro verificaram a ocorrência de instabilidades e oscilações no coeficiente de atrito. O autor conclui que esses efeitos são função da rugosidade do disco e também da própria natureza do material de fricção. Ainda, segundo o estudo, materiais que liberam grande quantidade de resíduos e fragmentos também são aqueles que possuem maiores amplitudes de oscilação no sinal de atrito medido.

Nos casos de fricção sob baixas pressões de contato, condição na qual predomina a geração de vibrações por choques de saliências entre os materiais, os fatores predominantes para a geração da vibração e do conseqüente ruído são a rugosidade das superfícies e a velocidade de deslizamento [Abdelounis et al, 2010].

A área de contato efetivo entre as superfícies dos materiais de atrito tem influência tanto sobre o coeficiente de atrito quanto sobre a vibração produzida. Ensaio conduzidos por Bergman et al, 1999, utilizando discos de freio submetidos a jateamento, mostraram que a superfície mais rugosa, com pequena área em contato com a pastilha, proporciona baixo coeficiente de atrito e tende a produzir pouca vibração em atrito. Após diversas frenagens, com o desgaste das asperezas, redução da rugosidade e aumento da área de contato, observou-se aumento do coeficiente de atrito. Após atingido um valor crítico do coeficiente de atrito, aumentou drasticamente a frequência com que ocorriam vibrações intensas.

O intervalo de tempo entre frenagens é uma variável de influência sobre o coeficiente de atrito. Estudos conduzidos por Neis et al, 2012, concluíram que o tempo decorrido entre frenagens tem efeito sobre o coeficiente de atrito. Esse coeficiente sofreu redução após longos tempos de resfriamento entre frenagens.

Rusnak et al, 1970, relatam a importância do histórico de frenagens dos materiais de fricção para o seu desempenho. As temperaturas passadas dos materiais influenciam características da superfície e também de camadas abaixo da superfície. Um histórico de frenagens severas, e, por consequência, de altas temperaturas, pode resultar em uma superfície diferente da original, em função de transformações de fase e decomposição térmica do material de fricção. O envelhecimento dos componentes poliméricos dos materiais de fricção também apresenta efeitos significativos sobre o coeficiente de atrito.

Ostermeyer, 2003, associa a influência das temperaturas anteriores dos materiais de atrito sobre o coeficiente de atrito por meio da área de contato a nível microscópico. Eriksson et al, 2002, acrescentam que o histórico das frenagens anteriores também influencia a produção de ruído pelo material.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Equipamentos utilizados

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tribologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul utilizando o tribômetro ilustrado na Figura 4.1. Esse equipamento, desenvolvido por Neis (2008 e 2013), é utilizado para a avaliação do comportamento do material de fricção de sistemas de freio automotivos, simulando a dissipação de energia cinética de um veículo durante uma frenagem.



Figura 4.1 – Ilustração do tribômetro [Neis et al, 2016].

O tribômetro possui rotor construído em ferro fundido cinzento, mesmo material dos discos de freio automotivos. É utilizado um corpo de prova construído a partir dos materiais de pastilhas e de lonas de freio automotivas, cujas dimensões são adequadas para reproduzir as pressões de contato que ocorrem nos veículos [Neis, 2008].

O tribômetro é instrumentado com sensores de força, rotação, temperatura e torque, que são ligados a um sistema de aquisição e controle, por meio do qual é possível medir e controlar os principais parâmetros que influenciam na determinação do comportamento tribológico do material de fricção [Neis, 2008]. A Figura 4.2 apresenta o diagrama esquemático do tribômetro.

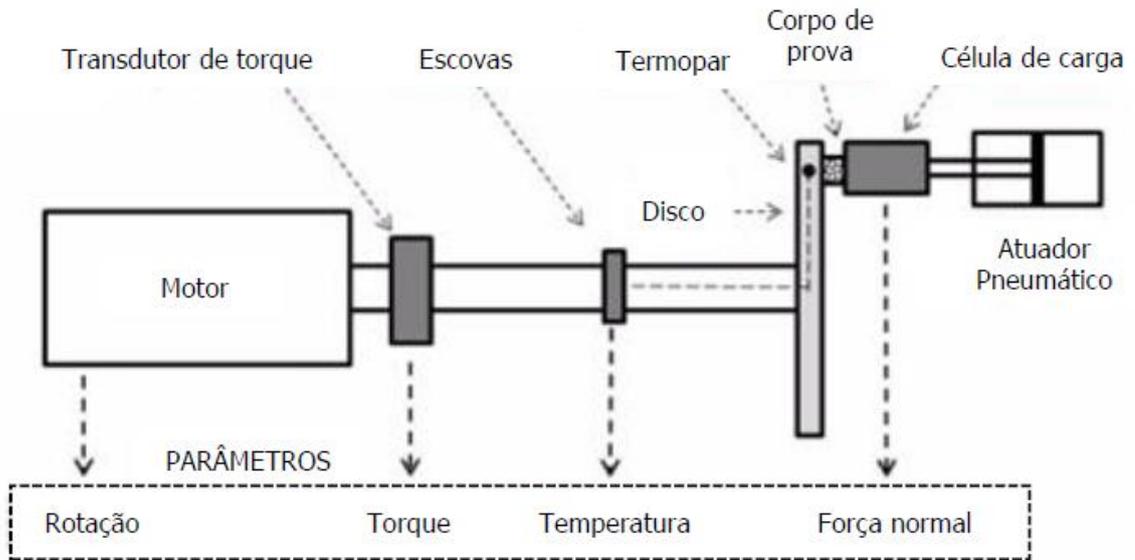


Figura 4.2 – Diagrama esquemático do tribômetro [Neis et al, 2016].

A temperatura do rotor é medida por um termopar tipo K, instalado dentro do disco, a uma distância de 3 mm da superfície de contato.

O tribômetro permite que o corpo de prova seja pressionado contra o rotor com uma força controlada. Esse sistema possui atuador pneumático, cuja pressão do ar comprimido é controlada de forma a aplicar uma força normal conhecida sobre o rotor.

O coeficiente de atrito dos materiais ensaiados é calculado a partir do torque medido, da força normal medida e da distância entre o centro do eixo do disco e o centro do corpo de prova.

O corpo de prova é instalado em um suporte rígido, ilustrado na Figura 4.3.



Figura 4.3 – Vista lateral do suporte do corpo de prova com transdutor de força.

A Figura 4.3 ilustra também o transdutor de força para a medição das variações da força de atrito produzida durante as simulações de frenagem, o qual foi acrescentado ao conjunto de instrumentos próprios do tribômetro. Esse transdutor é da marca Bruel & Kjaer, tipo 8230-002, com elemento piezelétrico de quartzo e de sensibilidade de 2,2 mV/N.

A aquisição dos dados de força foi realizada pelo sistema modelo Multi-Analyzer 3560C, da marca Bruel & Kjaer, e pelo *software* Pulse LabShop versão V12 instalado em um computador de uso geral. Os dados foram registrados no domínio frequência para cada intervalo de tempo de 0,1 s com resolução em frequência de 16 Hz e faixa de medição de até 32768 Hz.

O tribômetro permite a elevação da temperatura do rotor por meio de um aquecedor indutivo. O aquecimento por indução ocorre pelas correntes elétricas parasitas provocadas no rotor pela proximidade da bobina indutora [Neis, 2013]. A Figura 4.4 ilustra a bobina indutora posicionada à frente do rotor.



Figura 4.4 – Bobina indutora à frente do rotor [cedido por Latrib].

O tribômetro também possibilita o resfriamento do rotor. Esse resfriamento ocorre por um fluxo de ar forçado aplicado sobre a superfície traseira do componente. A vazão de ar é controlada por meio de uma válvula reguladora, operada pelo sistema de controle do tribômetro. A vazão de ar pode ser ajustada entre zero e 700 l/min [Neis, 2013]. A Figura 4.5 ilustra a instalação da mangueira que conduz o fluxo de ar.

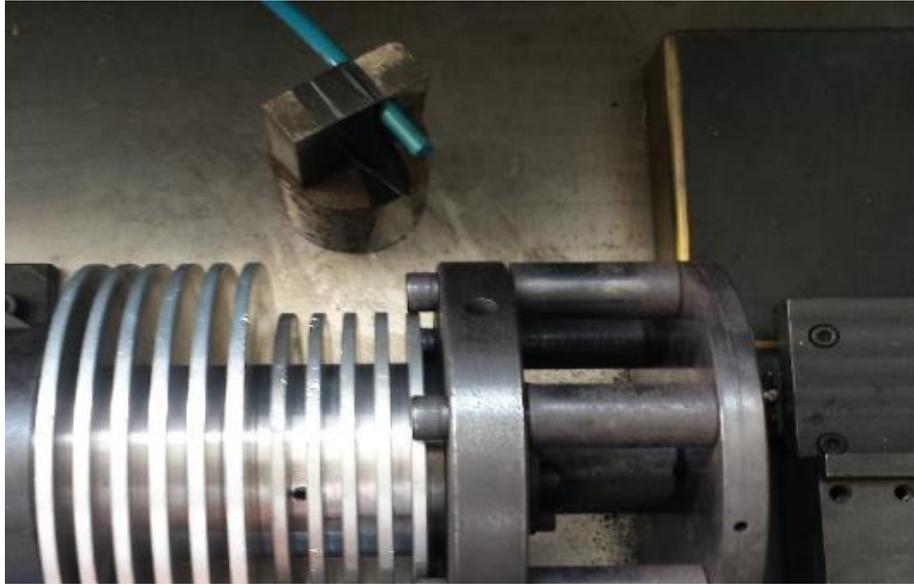


Figura 4.5 – Instalação da mangueira de ar para resfriamento.

4.2 Corpos de prova

O par tribológico utilizado nesse trabalho é composto dos seguintes materiais:

- Rotor de ferro fundido cinzento de diâmetro 159 mm e espessura de 12 mm;
- Corpo de prova com diâmetro de 18 mm.

A Figura 4.6 ilustra o rotor e o corpo de prova.

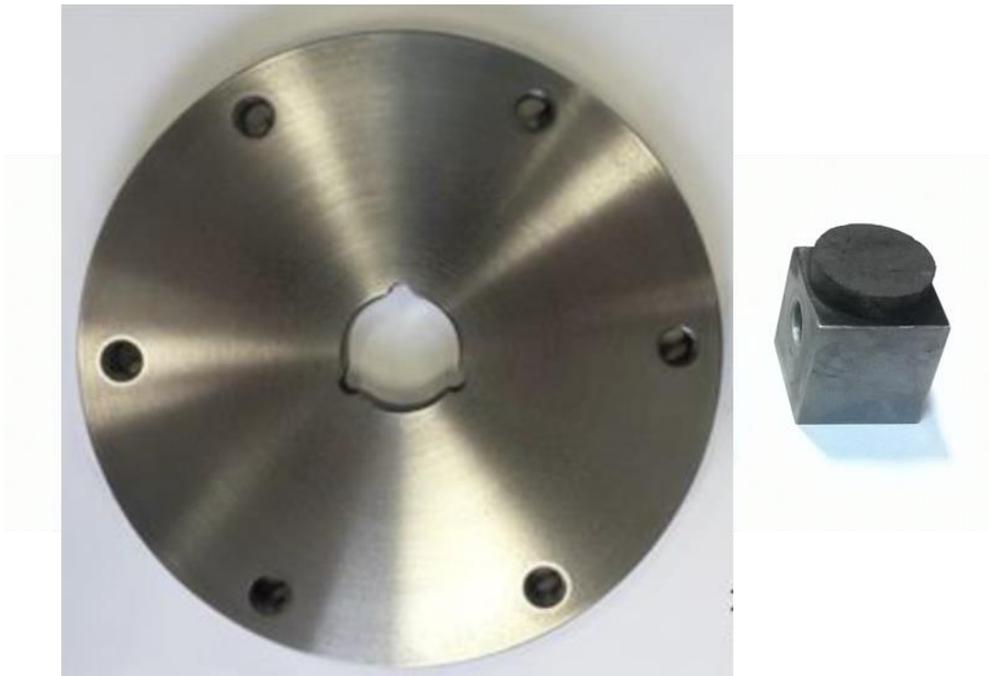


Figura 4.6 – Rotor (à esquerda) e corpo de prova (à direita).

Os corpos de prova são fixados sobre um bloco de alumínio, o qual permite a fixação no transdutor de força.

Foram ensaiados quatro diferentes materiais de fricção, cujas composições são apresentados na Tabela 4.1 que se segue.

Tabela 4.1 – Composição dos corpos de prova.

	Material 1	Material 2	Material 3	Material 4
Classificação	<i>Low-met</i>	<i>Low-met</i>	NAO	<i>Low-met</i>
Fibras ferrosas	15%	45%	0%	20%
Fibras não ferrosas	14%	5%	15%	5%
Aditivos orgânicos	6%	14%	12%	11%
Lubrificantes	35%	21%	13%	27%
Abrasivos	8%	7%	10%	4%
Agentes de enchimento	22%	8%	50%	33%

As fibras de reforço presentes nos materiais são de aço, de cobre e bronze e orgânicas. No material 2 e 4, predominam as fibras ferrosas, enquanto no material 1 são utilizadas em quantidades equivalentes de fibras ferrosas e não ferrosas. O material 3 não possui fibras de aço, apenas de cobre, bronze e orgânicas. Os aditivos orgânicos utilizados são resinas fenólicas, como ligantes em todos os materiais, além de borracha e outros.

4.3 Preparação do equipamento e dos corpos de prova

O rotor do tribômetro tem a superfície preparada por meio de lixamento antes da realização dos ensaios com cada material. A granulometria dos abrasivos utilizados é de 280, 360, 400, 500, 600 e 1500. Cada lixa é utilizada em movimentos alternados, conforme ilustra a Figura 4.7.



Figura 4.7 – Preparação da superfície do disco [cedido por Latrib].

Após o lixamento é realizada a medição da rugosidade média (R_a) da superfície, por meio do rugosímetro portátil Mitutoyo SJ 210P, com resolução de $0,01 \mu\text{m}$. O procedimento de medição é ilustrado na Figura 4.8.

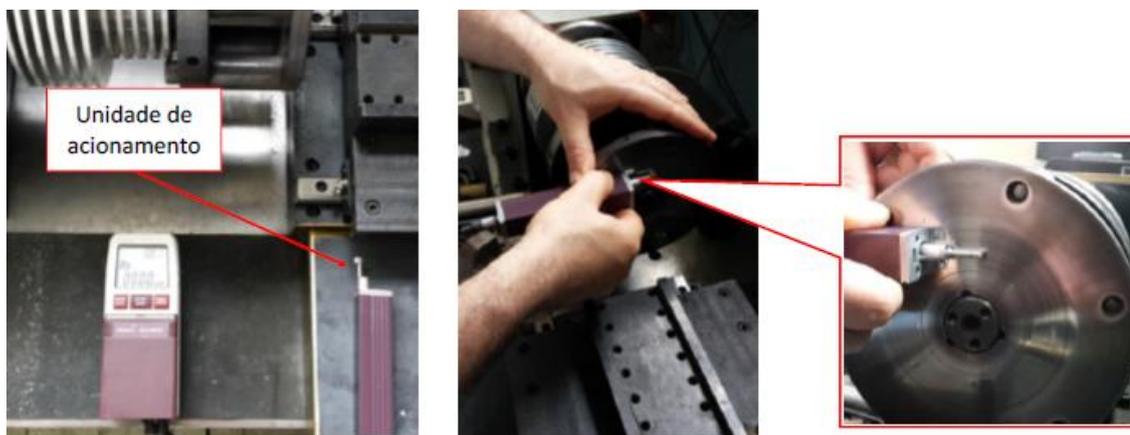


Figura 4.8 – Medição da rugosidade da superfície do disco [cedido por Latrib].

A preparação da superfície é considerada satisfatória quando a rugosidade R_a medida for igual ou inferior a $0,1 \mu\text{m}$ na direção circunferencial e a $0,2 \mu\text{m}$ na direção radial do disco.

Cada corpo de prova, após instalado no tribômetro, é submetido ao processo de assentamento, com o objetivo de estabilizar a área de contato dos materiais com o rotor. Esse processo consiste na realização de 30 frenagens com a força de contato entre o corpo de prova e o rotor de 600 N . A velocidade angular inicial de 1840 rpm é reduzida a 0 rpm em 10 s .

4.4 Procedimento experimental

Os ensaios foram realizados de forma a simular a frenagem de um veículo leve entre 90 e 0 km/h . Essa velocidade é equivalente à velocidade angular de 1840 rpm , utilizada nos ensaios. A força aplicada ao corpo de prova contra o rotor é de 600 N . A duração de cada ensaio é de 10 s .

Imediatamente após o assentamento dos materiais, se iniciou a realização dos ensaios, cuja descrição é apresentada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Descrição dos ensaios.

Etapa	Descrição	Quantidade	Temperatura inicial
1			100 °C
2			160 °C
3	Sequência I	5	Ambiente
4			200 °C
5			Ambiente
6			-
7			Frenagem I
8			100 °C
9			160 °C
10	Sequência II	5	Ambiente
11			200 °C
12			Ambiente
13			-
14			Frenagem II

A temperatura inicial é a temperatura do rotor no momento de início de cada uma das etapas, ou seja, é a condição para o início da etapa.

Nas frenagens I e II, foi utilizado gatilho de temperatura. Com esse recurso, cada uma das frenagens dessas etapas é iniciada somente quando o rotor atingir a temperatura programada.

Nas sequências, os ensaios são realizados com o menor tempo possível entre frenagens, sendo esse intervalo da ordem de 5 segundos.

Somente nas etapas 6 e 13 não houve controle da temperatura inicial, sendo as etapas iniciadas imediatamente após o término da anterior.

Para a elevação da temperatura do disco até 160 e 200 °C, foi utilizado o sistema de aquecimento indutivo. O resfriamento foi realizado aplicando-se o jato de ar comprimido na superfície do disco oposta à área de atrito. São consideradas como temperatura ambiente as temperaturas abaixo de 50 °C. O intervalo de tempo entre as etapas que necessitaram aquecimento ou resfriamento do rotor é da ordem de 5 minutos.

A Figura 4.9 ilustra as temperaturas médias durante a realização dos ensaios, para o assentamento e demais etapas.

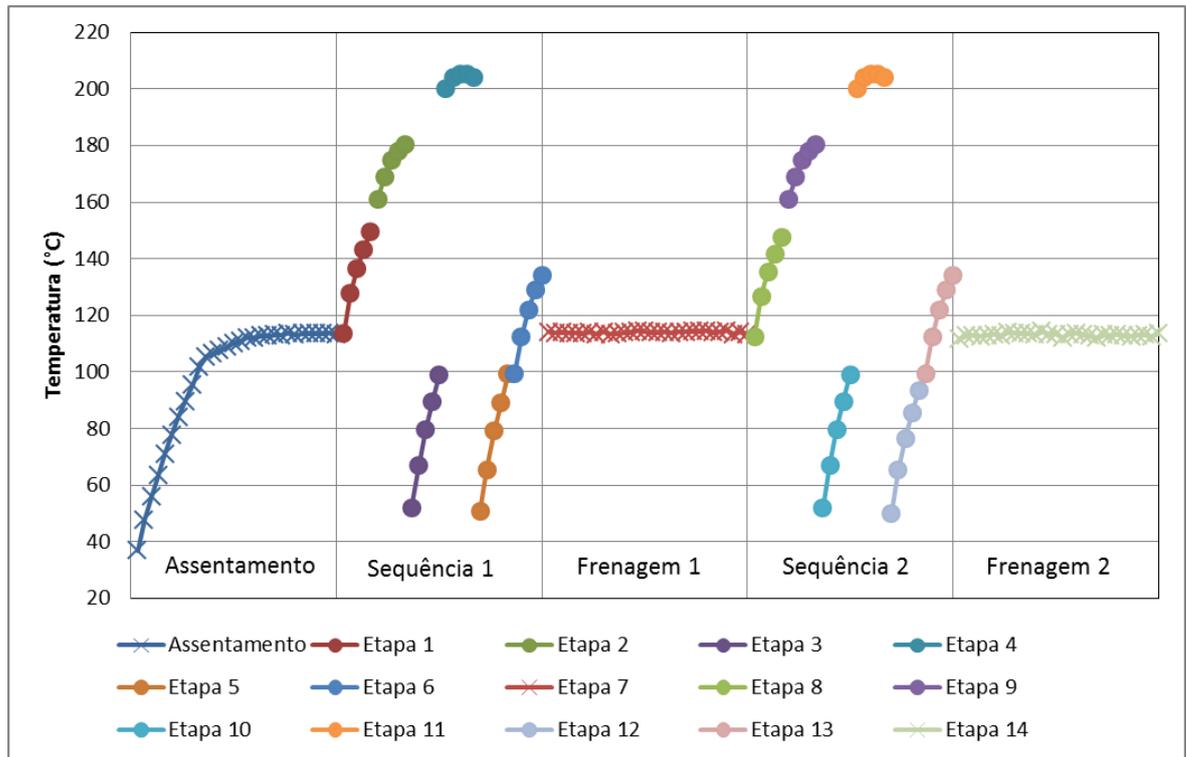


Figura 4.9 – Temperaturas médias ao longo dos ensaios.

4.5 Procedimento de análise dos resultados

A análise dos dados adquiridos durante as frenagens é realizada por meio de uma rotina específica desenvolvida no *software* Mathworks Matlab R2013a.

Os coeficientes de atrito registrados durante os ensaios foram plotados em um gráfico, segregando os valores medidos por etapa, para cada um dos materiais, permitindo a análise do comportamento dessa variável ao longo do assentamento e das etapas de frenagens 1 e 2.

Os dados das sequências 1 e 2 foram analisados com o objetivo de identificar os efeitos das temperaturas do rotor sobre as variações da força de atrito e sobre o coeficiente de atrito, enquanto os dados das frenagens foram analisados com vistas ao espectro de frequências das variações da força de atrito dos materiais.

4.5.1 Análise das etapas de sequências

Os efeitos das temperaturas do rotor sobre as variações da força de atrito foram analisados utilizando-se o cálculo da densidade espectral de energia dessas variações, por meio da equação abaixo:

$$E = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |F_n(\omega)|^2 \quad (4.1)$$

Onde E é a densidade espectral de energia, em Newton na quarta potência, N é a quantidade de valores de frequência e $F_n(\omega)$ são os valores das forças de atrito em base frequência, em Newton ao quadrado.

O uso da densidade espectral de energia permite a obtenção de valores que indicam a amplitude das variações da força de atrito no espectro de frequência, permitindo a comparação da intensidade registrada nas simulações de frenagens realizadas.

Para os conjuntos de cinco ensaios que compõe cada etapa das sequências, foi calculado o gradiente da densidade espectral de energia das variações da força de atrito. Por meio do método de mínimos quadrados, foi analisada a tendência de crescimento ou decréscimo da curva de ajuste dos pontos. A amplitude desse gradiente é calculada pela diferença entre o maior e o menor valor de densidade espectral de energia.

Os efeitos das temperaturas do rotor também foram analisados para o coeficiente de atrito. Foram calculados os gradientes desse coeficiente de forma semelhante à descrita para a densidade espectral de energia.

Foi analisada a correlação dos valores da densidade espectral de energia das variações da força de atrito com os valores do coeficiente de atrito, em diferentes condições de temperatura do rotor. É apresentada a curva que melhor se ajusta aos pontos, juntamente com o respectivo coeficiente de determinação R^2 .

4.5.2 Análise das etapas de frenagens

Foram plotados os espectros de frequência das variações da força de atrito para uma frenagem. Esses espectros foram divididos entre baixas e altas frequências, permitindo analisar as características das vibrações produzidas pelos diferentes materiais.

Para a análise da relação entre a intensidade das variações da força de atrito e a velocidade angular do rotor, foi calculada densidade espectral de energia das variações da força de atrito por meio da Equação (4.1), para cada intervalo de 0,1 s. Esses valores foram plotados em gráficos referentes às baixas e às altas frequências em função da velocidade angular do disco para cada um dos materiais e para cada etapa.

5 RESULTADOS

5.1 Análise do coeficiente de atrito

Os resultados para os coeficientes de atrito registrados durante o assentamento dos materiais e as etapas de frenagens são analisadas neste item. Os resultados para as etapas de sequências são analisadas no item seguinte.

A Figura 5.1 apresenta o comportamento do coeficiente de atrito ao longo dos ensaios.

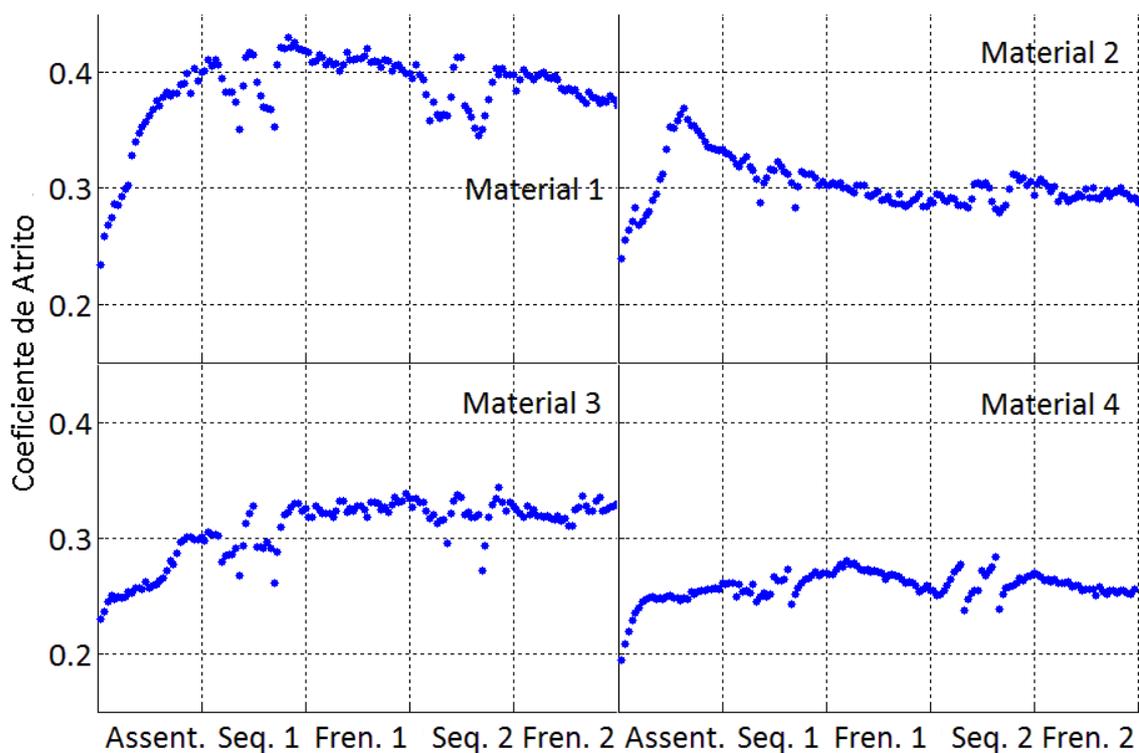


Figura 5.1 – Coeficiente de atrito ao longo dos ensaios.

Observa-se que os quatro materiais apresentam coeficientes de atrito inicialmente baixos, os quais se elevam ao longo do assentamento. O material 2 apresenta uma elevação do coeficiente de atrito antes da estabilização. Percebe-se que o material 4 atingiu mais rapidamente um valor estável do coeficiente de atrito em comparação com os demais materiais.

Segundo Blau, 2006, variações no coeficiente de atrito são comumente observados no início da fricção entre materiais sólidos. Quando submetidas ao atrito, duas superfícies entram em contato apenas nos pontos mais salientes, resultando em uma área de contato efetiva muito

pequena. Essas saliências são gradualmente removidas e a área de contato tende a aumentar. O autor apresenta oito comportamentos frequentes do valor do coeficiente de atrito durante o assentamento, conforme ilustra a

Figura 5.2.

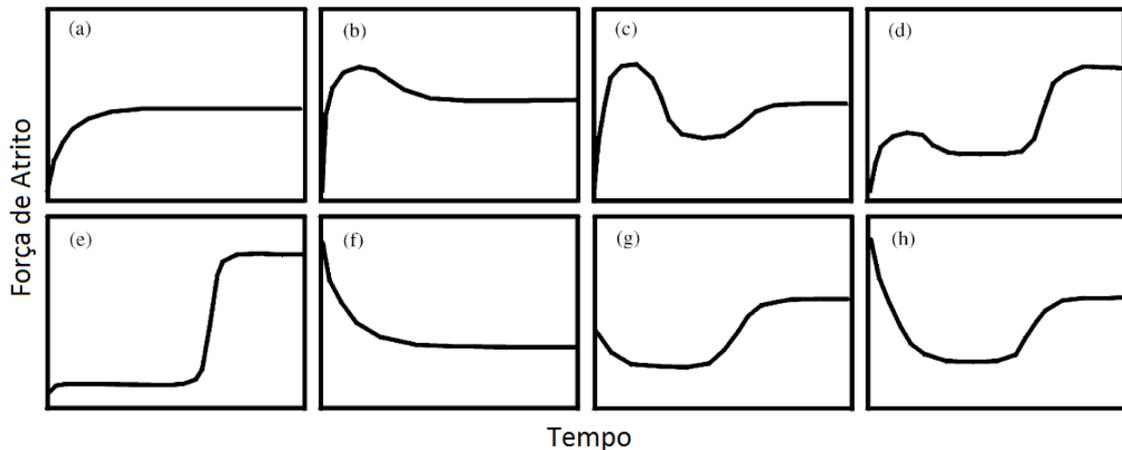


Figura 5.2 – Comportamento da força de atrito durante assentamento [Blau, 2006].

O comportamento (a) da

Figura 5.2 é frequente no atrito não lubrificado de materiais metálicos que apresentam leve contaminação, corrosão ou líquidos adsorvidos nas superfícies, as quais são removidas ao longo da fricção dos materiais, permitindo o aumento do atrito por adesão. O aumento na força de atrito apresentada no comportamento (b) é frequentemente observado no atrito entre duas peças de aço e é devido à rugosidade inicial das superfícies. A redução após essa elevação ocorre em função da redução da rugosidade ou ao desenvolvimento de um filme de fricção.

Os materiais 1 e 4 apresentam, durante o assentamento, comportamento semelhante ao (a) da

Figura 5.2, enquanto os coeficientes de atrito do material 2 e do material 3 evoluíram de forma semelhante aos comportamentos (b) e (c), respectivamente.

Durante as frenagens, se verificam leves variações no coeficiente de atrito. Os materiais 1, 2 e 4 apresentam pequenas reduções no atrito médio das frenagens ao longo dessas etapas.

5.2 Análise das sequências

Neste item são analisados os coeficientes de atrito e as variações na força de atrito registrados ao longo das sequências. São apresentadas as densidades espectrais de energia associadas às variações da força de atrito, de forma a quantificar a intensidade das oscilações nessa força.

5.2.1 Análise das variações da força de atrito

A Figura 5.3 ilustra a densidade espectral de energia da variação da força de atrito nas etapas de sequências, as quais consistem na realização de 5 frenagens por etapa com curtos intervalos de tempo (em torno de 5 segundos). A temperatura média do rotor em cada ensaio é representada pela escala de cores, em graus Celsius.

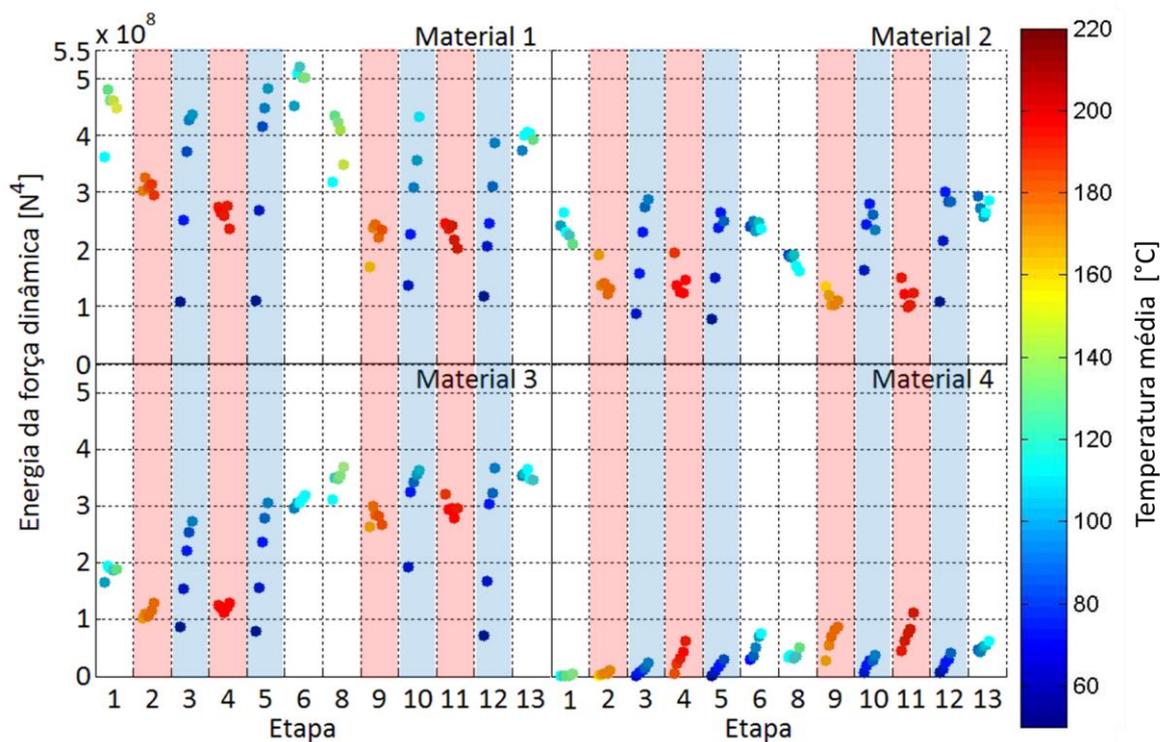


Figura 5.3 – Densidade espectral de energia da variação da força de atrito.

Observam-se menores oscilações na intensidade das variações da força de atrito nas etapas de alta temperatura do rotor (2, 4, 9 e 11), marcadas em vermelho na Figura 5.3, e de temperatura intermediária (1, 6, 8 e 13) para os materiais 1, 2 e 3. A exceção para esse comportamento é o material 4, o qual sofreu as maiores oscilações nas etapas quentes.

Após o resfriamento do rotor, reduzindo as temperaturas do rotor da ordem de 200 °C das etapas quentes para temperatura ambiente, foram realizadas as etapas de baixa temperatura do rotor (3, 5, 10 e 12), marcadas em azul na Figura 5.3. No início dessas etapas, identifica-se uma queda na densidade espectral de energia. Para os materiais 1, 2 e 3, essa queda foi seguida de uma intensa elevação. A influência observada das temperaturas anteriores sobre as variações da força de atrito concorda com os efeitos do histórico de temperatura dos materiais de atrito relatados por Eriksson, 2002.

As oscilações da densidade espectral de energia são quantificadas pelos gradientes apresentados na Figura 5.4.

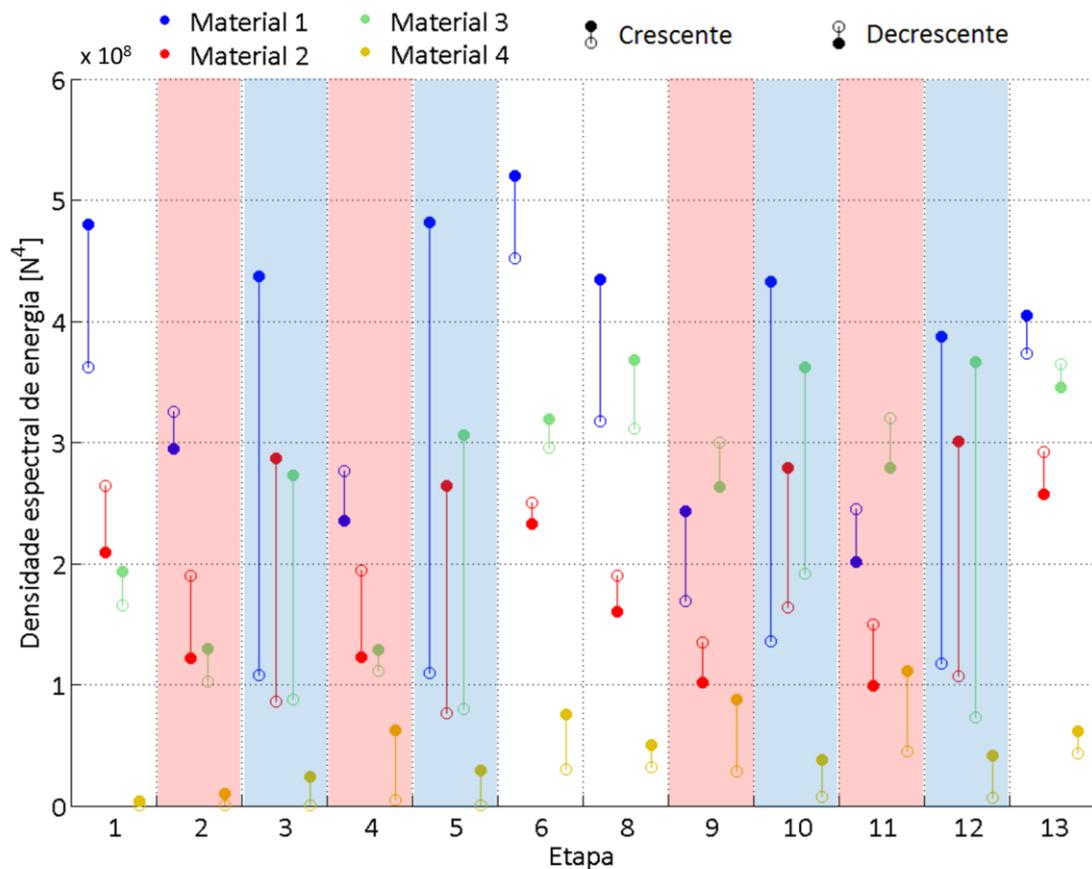


Figura 5.4 – Gradientes da densidade espectral de energia da variação da força de atrito.

Na Figura 5.4, o comprimento da linha que une os marcadores representa a intensidade do gradiente, calculada como a diferença entre os valores extremos da densidade espectral de energia em cada etapa. Os materiais são representados por diferentes cores. As etapas representadas com o marcador preenchido para cima apresentaram intensidades crescentes da

densidade espectral de energia, enquanto as representadas com o marcador vazado apresentaram gradiente negativo.

Após as frenagens das etapas quentes, observou-se uma redução na densidade espectral de energia das variações da força de atrito. As frenagens das etapas posteriores às etapas quentes apresentaram um gradiente crescente da densidade espectral de energia para todos os materiais. A intensidade dos gradientes é da ordem do valor médio da densidade espectral de energia das variações da força de atrito, sendo observados, no início das etapas frias, valores da densidade espectral de energia inferiores à metade do valor médio.

5.2.2 Análise do coeficiente de atrito nas sequências

De forma semelhante à densidade espectral de energia, o coeficiente de atrito também se mostra sensível ao histórico térmico do disco e do intervalo de tempo entre frenagens, conforme ilustra a Figura 5.5.

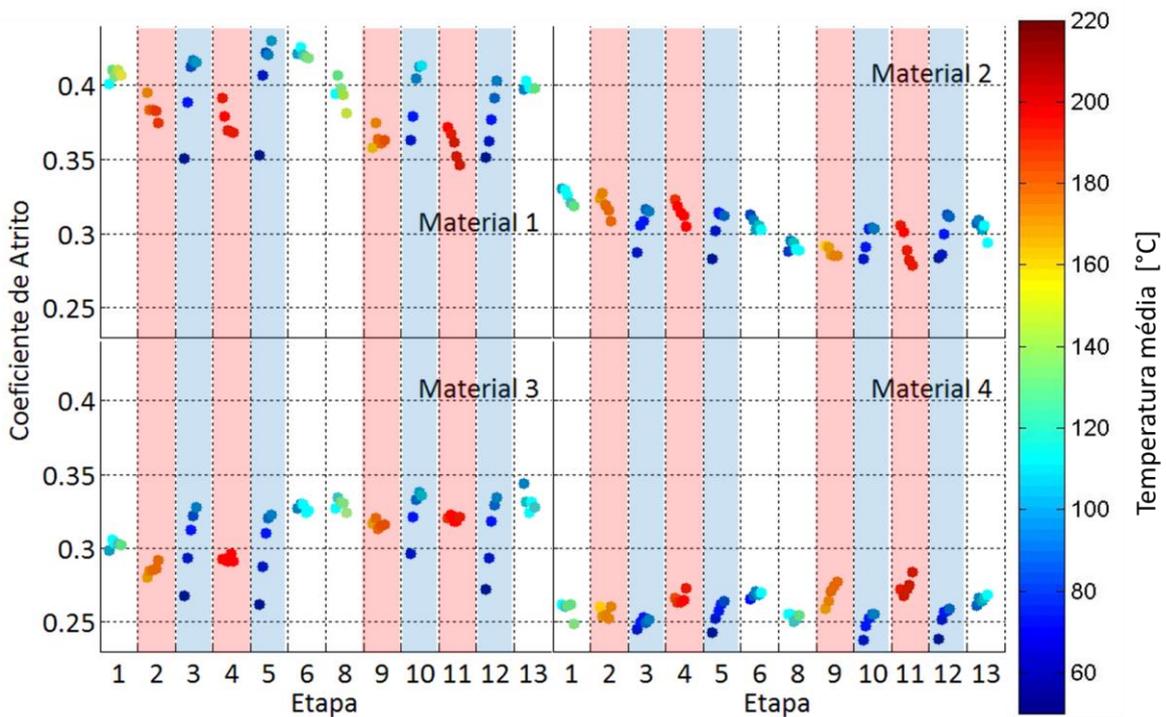


Figura 5.5 – Coeficientes de atrito obtidos durante os experimentos.

O material 3 apresentou valores estáveis do coeficiente de atrito ao longo das etapas quentes (2, 4, 9 e 11). Os materiais 1 e 2 apresentaram valores decrescentes, enquanto se observa uma elevação no coeficiente de atrito do material 4 ao longo dessas etapas. Os

maiores coeficientes de atrito do material 4 foram observados nas etapas quentes, comportamento que difere dos demais materiais.

De forma semelhante à observada para a densidade espectral de energia, os coeficientes de atrito das etapas frias (3, 5, 10 e 12) apresentaram valores inicialmente baixos para os quatro materiais, com forte elevação ao longo dessas etapas. Esses resultados concordam com os trabalhos de Rusnak, 1970, e Ostermeyer, 2003, quanto à influência das temperaturas anteriores dos materiais sobre o coeficiente de atrito.

Percebe-se nenhuma variação significativa do coeficiente de atrito nas etapas com temperaturas mais elevadas, ou seja, não foi verificado o efeito de fade do material e isso pode ser explicado pelas temperaturas do ensaio (máximo de 220°C). Porém, o efeito de recuperação foi percebido, situação em que o coeficiente de atrito se eleva nas frenagens posteriores às etapas quentes.

Os gradientes dessas variações nos coeficientes de atrito são quantificados na Figura 5.6.

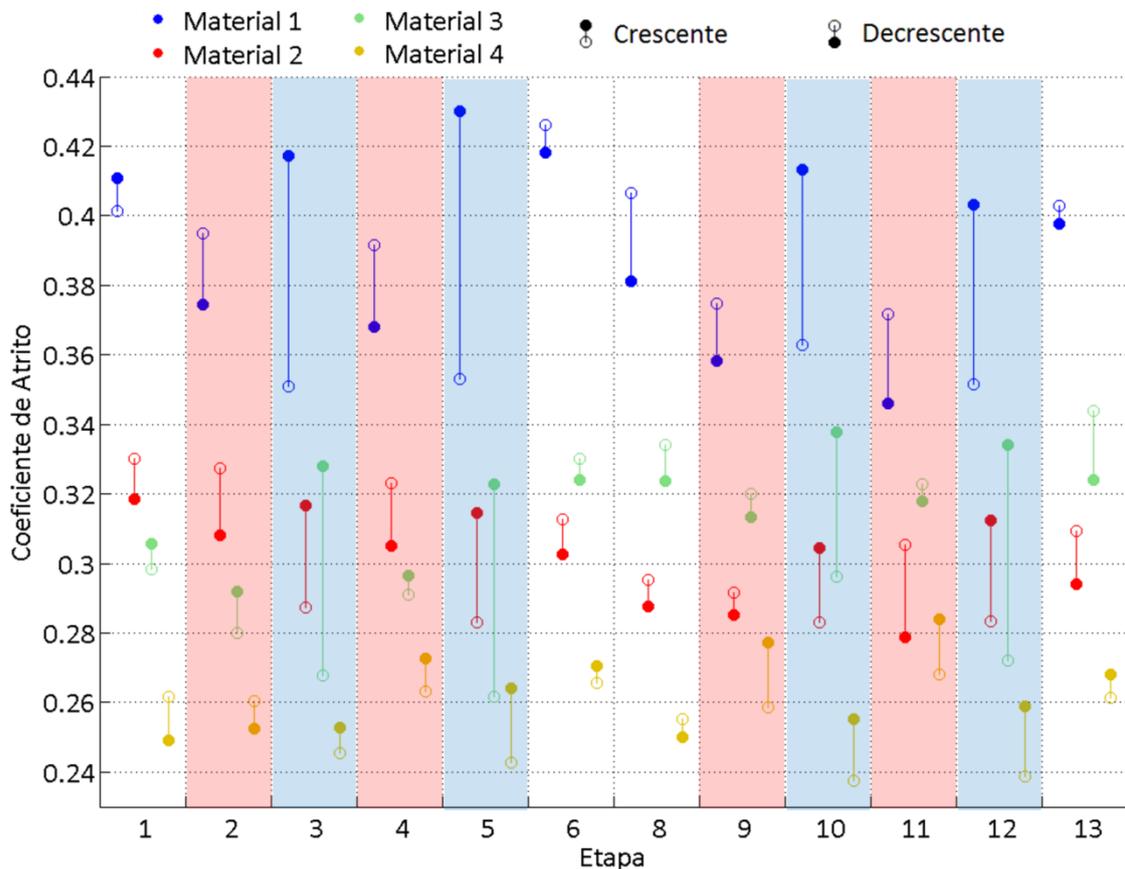


Figura 5.6 – Gradientes dos coeficientes de atrito.

A intensidade do gradiente do coeficiente de atrito nas etapas frias apresentou valores entre 2 e 20% do valor médio desse coeficiente.

Nas etapas frias, o material 1 apresentou os maiores gradientes do coeficiente de atrito nas etapas frias. O material 3, apesar de possuir valor médio do coeficiente de atrito semelhante ao material 2, apresentou gradientes significativamente maiores. Nessas etapas, o material 4 apresentou os menores gradientes.

Nas etapas quentes, o material 4 apresentou comportamento oposto aos demais materiais: enquanto se observa um gradiente negativo do coeficiente de atrito dos materiais 1, 2 e 3 nessas etapas, o material 4 apresentou uma elevação.

5.2.3 Análise correlação entre as variações da força de atrito e o coeficiente de atrito

A Figura 5.7 abaixo apresenta a relação da densidade espectral de energia das variações da força de atrito com o coeficiente de atrito.

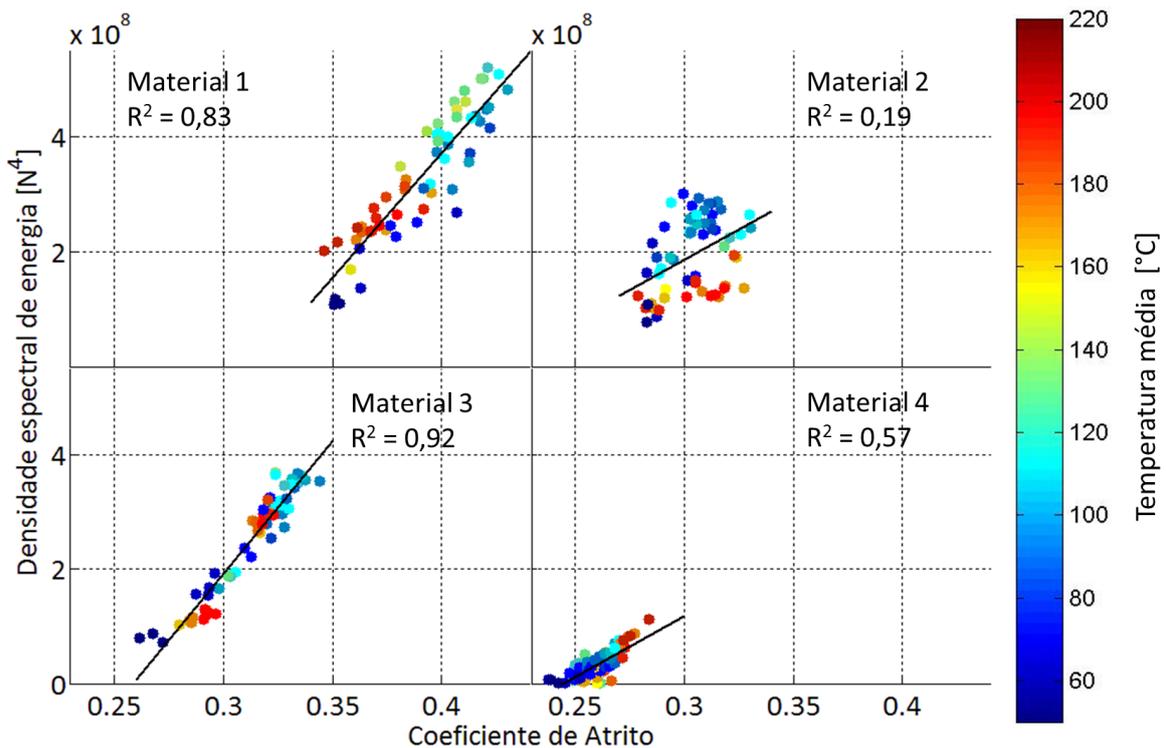


Figura 5.7 – Relação da densidade espectral de energia e coeficiente de atrito.

Observa-se, por meio do coeficiente de determinação R^2 , uma forte correlação entre a densidade espectral de energia da variação da força de atrito e o coeficiente de atrito para os materiais 1 e 3. O material 4 apresentou uma correlação moderada. O material 2 apresentou correlação desprezível em função de baixos valores da densidade espectral de energia nas

frenagens realizadas com altas temperaturas do rotor. Os valores do coeficiente de atrito desse material não sofreram redução nas etapas quentes com relação ao valor médio, no entanto, a densidade espectral de energia das variações da força de atrito apresentou valores relativamente baixos.

5.3 Análise das etapas de frenagens

Neste item são analisados os espectros de frequências das variações da força de atrito registrados ao longo das etapas 7 e 14.

5.3.1 Análise do espectro de frequência das variações da força de atrito

São observadas variações periódicas na força de atrito, ocorrendo de forma repetitiva nas frenagens. São apresentados espectros de frequência de apenas uma frenagem, a qual representa adequadamente o comportamento observado ao longo dos ensaios. A Figura 5.8 ilustra o espectro de frequência da 15ª frenagem da etapa frenagem II.

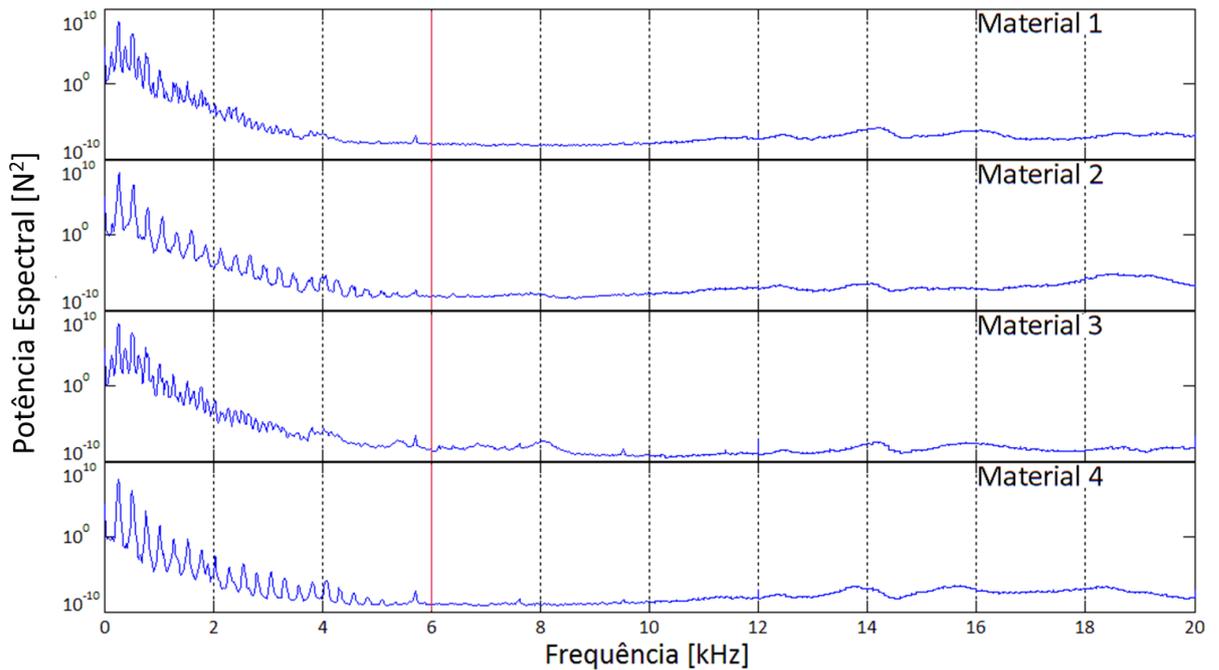


Figura 5.8 – Espectros de frequência da 15ª frenagem da etapa 2.

É possível observar elevadas potências no sinal das variações da força de atrito em baixas frequências. Essa potência espectral em baixas frequências apresenta picos de intensidade, os quais deixam de ser significativos a partir de 6 kHz.

Esses picos de intensidade e seus harmônicos descrevem uma interação entre as variações da força de atrito características de cada material com frequências naturais do tribômetro. A Figura 5.9 ilustra em detalhes esses picos de intensidade apresentados na Figura anterior.

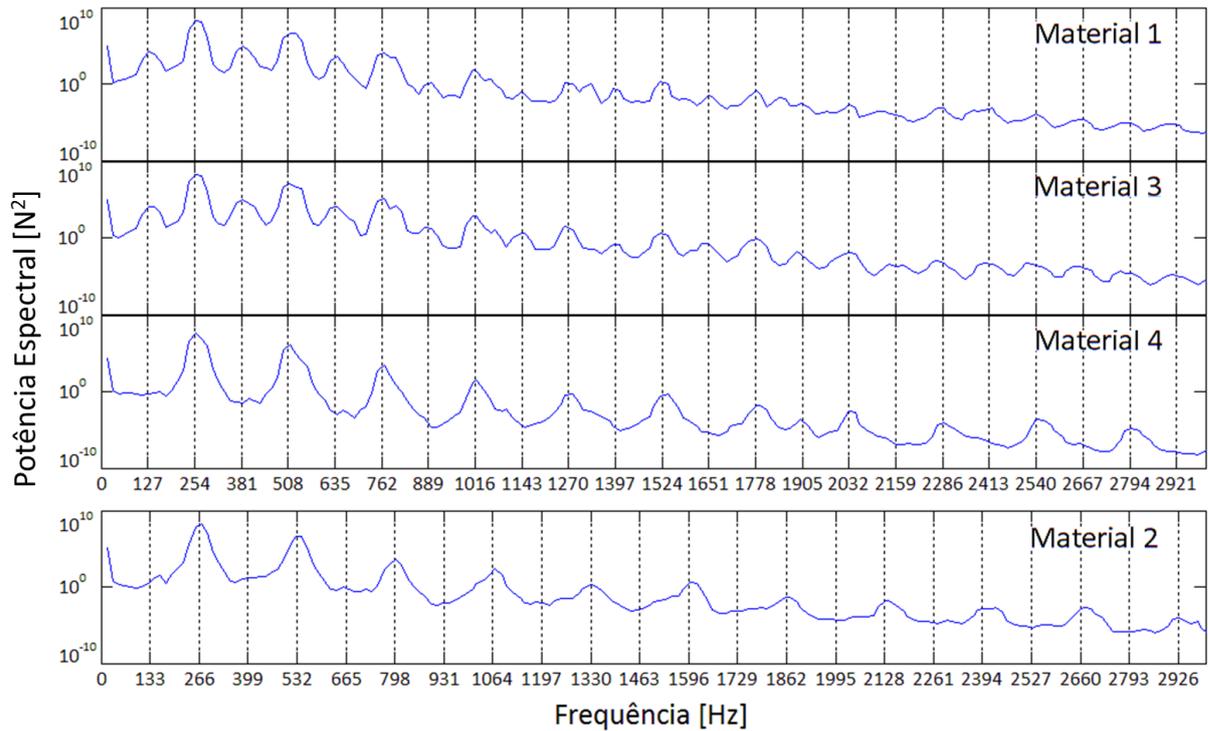


Figura 5.9 – Potência espectral em baixas frequências da 15ª frenagem da etapa 2.

Analisando a Figura 5.9, verifica-se que os materiais 1 e 3 apresentaram variações na força de atrito nas frequências múltiplas de 127 Hz, com as maiores intensidades nos múltiplos pares. No material 4, não se observam picos de intensidade na frequência 127 Hz e nos seus múltiplos ímpares. O material 2 apresentou comportamento semelhante ao material 4, com exceção da frequência dos picos de intensidade, que são múltiplos de 266 Hz (material 2), em vez de múltiplos de 254 Hz (material 4).

A Figura 5.10 ilustra o espectro de altas frequências da frenagem selecionada, em escala linear.

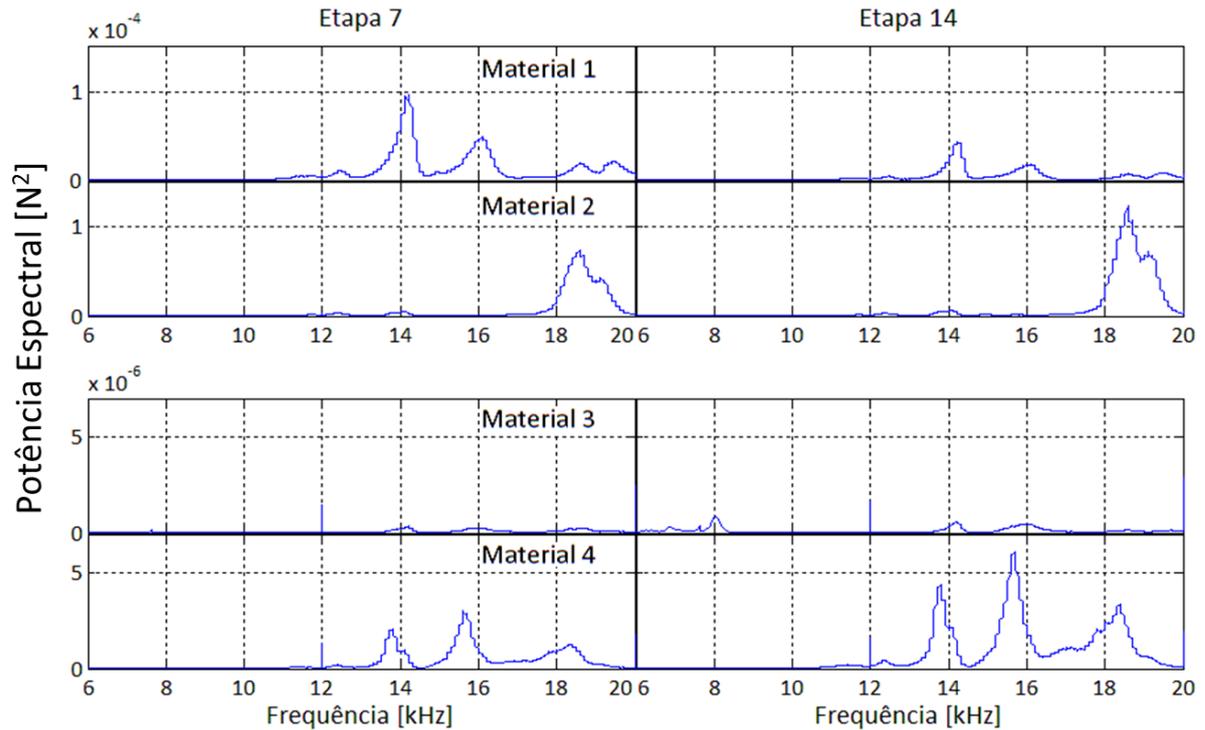


Figura 5.10 – Espectro das frequências altas da 15ª frenagem da etapa 2.

Os materiais 1 e 2 produziram forças dinâmicas em altas frequências de intensidades semelhantes, no entanto, com espectros de frequência distintos. O material 1 produziu forças dinâmicas mais intensas em torno das frequências 14 e 16 kHz, enquanto as forças dinâmicas mais significativas do material 2 foram produzidas entre 18 e 20 kHz. Os materiais 3 e 4 produziram forças dinâmicas em frequências semelhantes e com intensidades dentro da mesma ordem de grandeza entre si, no entanto significativamente menos intensas em comparação com os materiais 1 e 2.

Se observa que o material que apresentou as mais intensas variações da força de atrito em altas frequências foi o material 2, seguido do 1, 4 e 3, respectivamente. Esses resultados diferem do observado para variações da força de atrito em baixas frequências, em que o material 1 apresentou as maiores variações, seguido dos materiais 3, 2 e 4, respectivamente. Esses mesmos materiais, em estudo sobre a propensão a produzir ruído em frenagens realizado por Poletto, 2015, nas seguintes intensidades, em ordem decrescente: 2, 1, 3 e 4, respeitada a diferença na codificação, concordando parcialmente com os resultados desse trabalho para a produção de variações da força de atrito em baixas frequências.

5.3.2 Relação da força dinâmica com a velocidade

A Figura 5.11 apresenta a intensidade das forças dinâmicas de baixa frequência (até 6 kHz) em função da velocidade angular do rotor durante o ensaio.

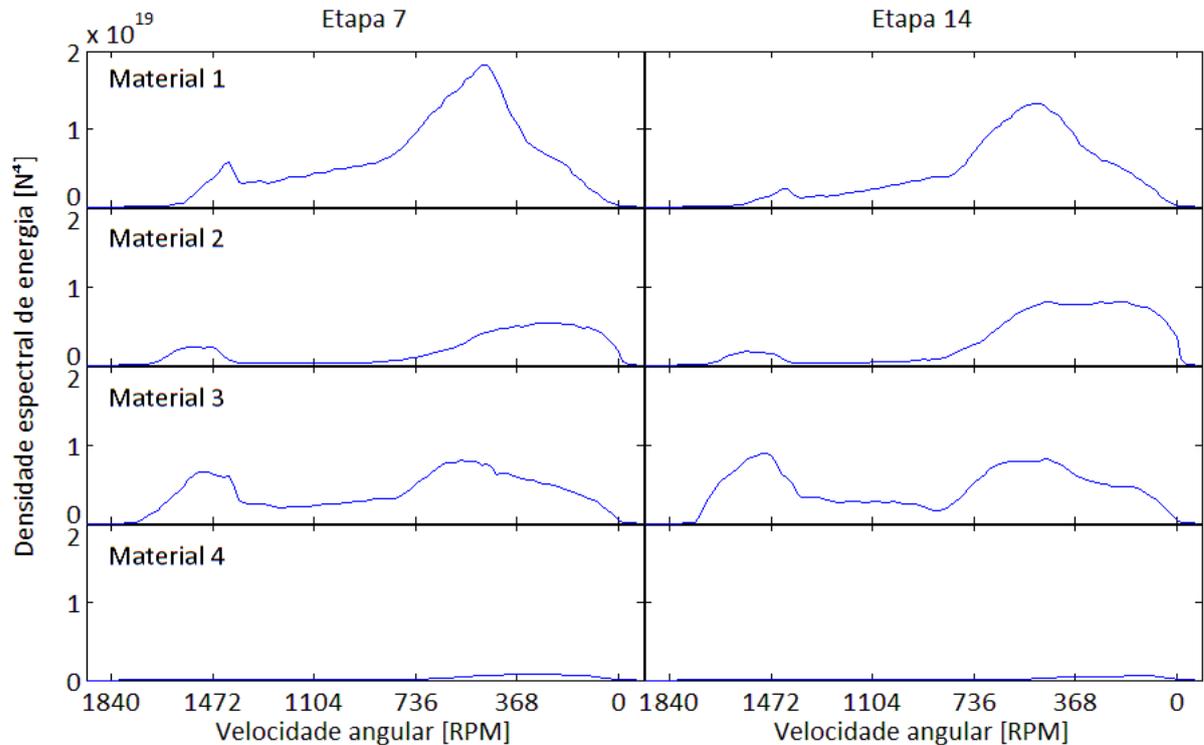


Figura 5.11 – Força dinâmica em função da velocidade da 15ª frenagem da etapa 2 – baixas frequências.

Observa-se que todos os materiais apresentam forças dinâmicas mais intensas com velocidades angulares baixas, próximo ao final dos ensaios. Esse comportamento sugere que as variações da força de atrito não são diretamente correlacionadas com a potência mecânica dissipada (definida como o produto da força de atrito pela velocidade de deslizamento). O aumento das vibrações no final das frenagens está relacionado a um melhor acoplamento entre as vibrações produzidas no contato do material de fricção contra o rotor e as frequências naturais do tribômetro, as quais são de aproximadamente 130 Hz.

A Figura 5.12 apresenta a intensidade das forças dinâmicas de alta frequência (acima de 6 kHz) em função da velocidade angular do rotor durante o ensaio.

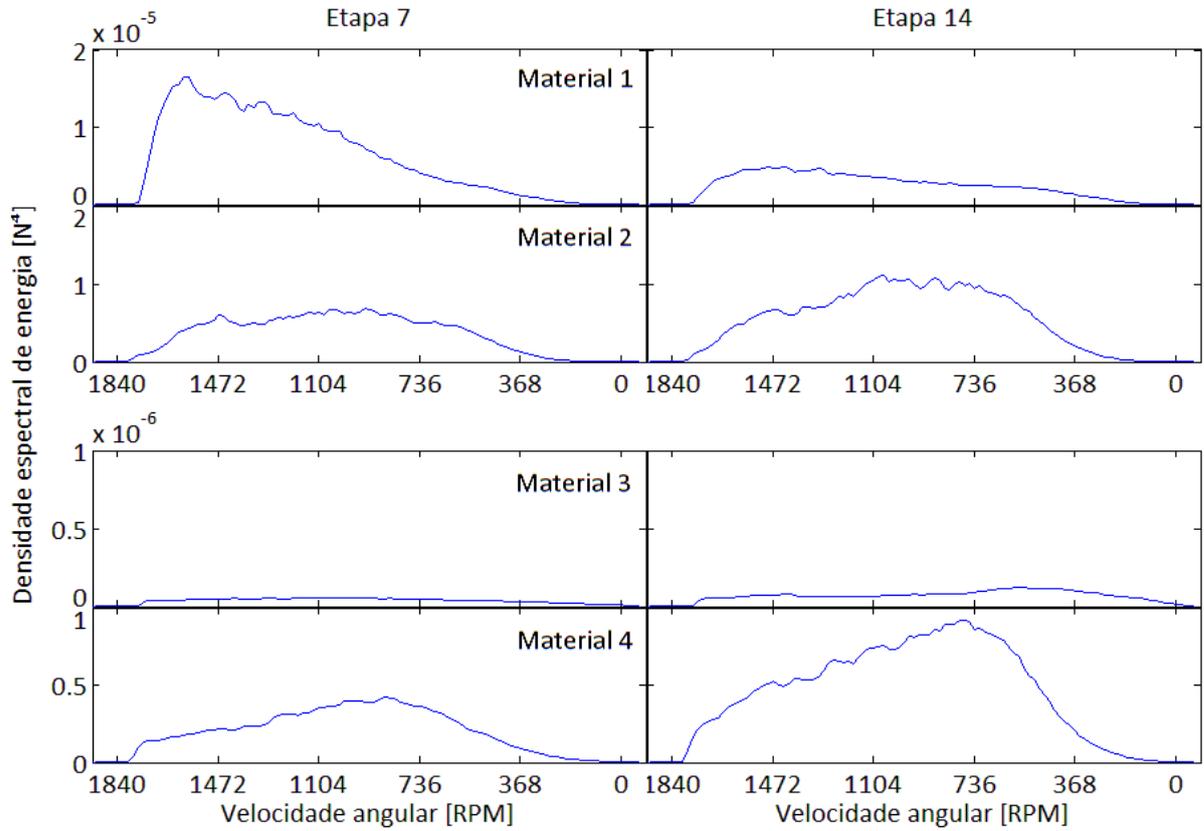


Figura 5.12 – Força dinâmica em função da velocidade – altas frequências.

As variações da força de atrito em altas frequências apresentaram um comportamento diferente das baixas frequências. O material 1 apresentou densidade espectral de energia decrescente ao longo do ensaio, ou seja, proporcional à velocidade angular do rotor. Os demais materiais apresentaram as maiores densidades espectrais de energia aproximadamente à metade do ensaio.

6 CONCLUSÕES

Foram observadas variações nos coeficientes de atrito ao longo do assentamento dos quatro materiais ensaiados. Os coeficientes de atrito apresentaram valores inicialmente baixos, os quais sofreram elevação gradual até atingirem valores estáveis. A elevação do coeficiente de atrito antes da estabilização do material 2 condiz com o relatado na literatura para a fricção de peças de aço, material que corresponde a 45% da composição do corpo de prova. Nas etapas de frenagens os coeficientes de atrito apresentaram pequenas variações.

A temperatura e o intervalo de tempo entre frenagens influenciaram fortemente as variações da força de atrito. Nas frenagens realizadas com altas temperaturas do disco foram observados pequenos gradientes dos valores das variações das forças de atrito. No entanto, nas etapas seguintes, de baixa temperatura do disco, foram verificados elevados gradientes, comprovando a influência prevista na bibliografia da temperatura anterior do disco e do intervalo de tempo entre frenagens sobre o desempenho em ruído, o qual é influenciado pelas intensidades das variações da força de atrito.

O coeficiente de atrito também se mostrou sensível às temperaturas anteriores do disco e do intervalo de tempo entre frenagens, de forma muito semelhante às variações da força de atrito, concordando com a literatura.

O coeficiente de atrito é diretamente proporcional às variações da força de atrito para três dos quatro materiais ensaiados. O material 2, que não apresentou essa correlação, produziu variações na força de atrito menos intensas para coeficientes de atrito relativamente elevados em altas temperaturas.

Os ensaios evidenciaram interação das variações da força de atrito com frequências naturais do tribômetro. Também foram observados diferentes espectros em altas frequências entre os materiais.

A velocidade de deslizamento tem efeito distinto sobre as variações da força de atrito quando estas são divididas em baixas e altas frequências. Para baixas frequências (menor que 6 kHz), as variações da força de atrito ocorrem predominantemente em baixas velocidades, enquanto que em altas frequências essas variações são mais uniformes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdelounis, H. B., Le Bot, A., Perret-Liaudet, J., Zahouani, H., **An experimental study on roughness noise of dry rough flat surfaces**, *Wear* 268 (2010) 335 – 345.

Akay, A., **Acoustics of friction**, *Journal of the Acoustical Society of America*, 111 (2002) 1525-1548.

Beckwith, T. G., Marangoni, R. D., Lienhard, J. H., **Mechanical measurements**, Pearson Prentice Hall, 768 páginas, Estados Unidos, 2007.

Bergman, F., Eriksson, M., Jacobson, S., **Influence of disc topography on generation of brake squeal**, *Wear* 225 (1999) 621 – 628.

Blau, P. J., **Compositions, functions, and testing of friction brake materials and their additives**, Oak Ridge National Laboratory, Metals and Ceramics Division. ORNL/TM-2001/64. Tennessee, USA, 2001.

Blau, P. J., **On the nature of running-in**, *Tribology International* 38 (2006) 1007 – 1012.

Bulthé, A-L. C., 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 (2008) 815 – 825.

Canali, R. J., **Determinação de propriedades físicas de diferentes materiais para discos e pastilhas de freio e relação destas propriedades com ruído**, Dissertação de Mestrado, 132 páginas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

Crolla, D. A., Lang, A. M., **Brake noise and vibration – the state of the art**, *Vehicle Tribology, Tribology Series* 18 (1991) 165 – 174.

Dally, J. W., Riley, W. F., McConnel, K. G., **Instrumentation for engineering measurements**, Wiley, 576 páginas, Estados Unidos, 1984.

Desplanques, Y., Roussette, O., Degallaix, G., Copin, R. and 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 (2007) 582 – 591.

Eriksson, M., Bergman, F., Jacobson, S., **Surface characterisation of brake pads after running under silent and squealing conditions**, *Wear* 232 (1999) 163 – 167.

Eriksson, M., Staffan, J., **Tribological surfaces of organic brake pads**, *Tribology international* 33.12 (2000) 817 – 827.

Eriksson, M., Bergman, F., Jacobson, S., **On the nature of tribological contact in automotive brakes**, *Wear* 252 (2002), 26 – 36.

Franceschini, J., **Avaliação do fenômeno stick-slip em materiais de fricção com utilização de um tribômetro**, Dissertação de Mestrado, 90 páginas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

Godfrey, D., **Friction oscillations with a pin-on-disc tribometer**, *Tribology International* 28 (1995) 119 – 126.

Halling, J., **A contribution to the theory of mechanical wear**, *Wear* 34.3 (1975) 239 – 249.

Hochlenert, D., Spelsberg-Korspeter, G., Hagedorn, P., **A note on safety-relevant vibrations induced by brake squeal**, *Journal of Sound and Vibration*, 329 (2010) 3867 – 3872.

Kinkaid, N. M., O'Reilly, O. M., Papadopoulos, P., **Automotive discbrake squeal**, *Journal of Sound and Vibration* 267 (2003) 105-166.

Kinkaid, N. M., O'Reilly, O. M., Papadopoulos, P., **On the transient dynamics of a multi-degree-of-freedom friction oscillator: a new mechanism for disc brake noise**, *Journal of sound and vibration* 287 (2005) 901 – 917.

Krim, J., **Friction at the atomic Scale**, *Scientific American* 275 (1996) 74 – 80.

Limpert, R. **Brake design and safety**. Second edition, SAE International, 1999.

Matozo, L. T., **Análise de materiais de fundo de alto amortecimento e de seus efeitos em pastilhas de freio**, Dissertação de Mestrado, 139 páginas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

Moses, R., Stoica, P., **Spectral analysis of signals**, Editora Prendice Hall, Estados Unidos, 2005.

Neis, P. D., **Projeto e construção de um tribômetro para estudos relacionados a materiais de atrito veiculares**, Dissertação de Mestrado, 95 páginas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

Neis, P. D., **Projeto e construção de um tribômetro com controle independente da temperatura do disco**, Tese de Doutorado, 130 páginas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

Neis, P. D., Schmidt E, Zanetti, G. L., Delgado, Y.P., De Baets P., Ferreira, N. F., **Relation between the cooling time and friction results in braking tests**, *International Journal Sustainable Construction & Design*, (2012) 156 – 164.

Neis, P. D., Ferreira, N. F., Poletto, J. C., Matozo, L. T., Masotti, D., **Quantification of brake creep groan in vehicle tests and its relation with stick-slip obtained in laboratory tests**, *Journal of Sound and Vibration*, 369 (2016) 63 – 76.

Oberst, S. M., Lai J. C., **A critical review on brake squeal and its treatment in practice**, Internoise 2008, Shanghai (2008).

Ostermeyer, G.P., **On the dynamics of the friction coefficient**, *Wear*, 254 (2003) 852 – 858.

Oliveira, H. M. D., **Análise de sinais para engenheiros**, Editora Brasport, Rio de Janeiro, 2007.

Polleto, J. C., **Avaliação de parâmetros para quantificação de ruído em freio em ensaios realizados em dinamômetro inercial**, Trabalho de Conclusão de Curso, 26 páginas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

Rhee, S. K., Schwartz, H. W., **Test methods for automotive and truck friction materials**, American Society for Testing and Materials, paper 701, 39 – 49, Philadelphia, 1979.

Rhee, S. K., Jacko, M. G., Tsang, P. H. S., **The role of friction film in friction, wear and noise of automotive brakes**, *Wear*, 246 (1991) 89 – 97.

Rhee, S. K., Tsang, P. H. S., Wang, Y. S., **Friction-induced noise and vibration of disc brakes**, *Wear*, 133 (1989) 39 – 45.

Rusnak, R. M., Spurgeon, W. M., Aldrich, F. W., **Friction material testing**, Society of Automotive Engineers, (1970) paper 700517.

SAE J661, **Brake lining quality test procedure**, SAE International, Estados Unidos, 8 páginas, 1997.

Serbino, E. M., **Um estudo dos mecanismos de desgaste em disco de freio automotivo ventilado de ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar**, Dissertação de Mestrado, 123 páginas, Universidade de São Paulo, 2005.

Sergienko, V. P., Bukharov, S. N., Kupreev, A. V., **Noise and vibration in brake systems of vehicles**, *Journal of Friction and Wear*, 29 (2008) 234 – 241.

Timte, M., **A comparison of lining output generated using AK-Master and FMVSS 105 simulation dynamometer procedures**, Society of Automotive Engineers, paper 2000-01-2777, (2000).