

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

UNIVERSIDAD CARLOS TERCERO DE MADRID

**ANÁLISE COMPARATIVA DO NÍVEL DE RUÍDO PRODUZIDO POR PASTILHAS DE
FREIO ORIGINAIS E DO MERCADO DE REPOSIÇÃO BRASILEIRO**

por

Carlos Corral Jódar

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, 15 de abril de 2015

**ANÁLISE COMPARATIVA DO NÍVEL DE RUÍDO PRODUZIDO POR PASTILHAS
DE FREIO ORIGINAIS E DO MERCADO DE REPOSIÇÃO BRASILEIRO**

por

Carlos Corral Jódar

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof.^a Dr.^a Thamy Cristina Hayashi

Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. André João de Souza

Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Prof.^a Dr.^a Cintia Petry Mazzaferro

Porto Alegre, 15 de Abril de 2015.

*À minha irmã Mariola,
pelo apoio incondicional demonstrado ao longo de todo meu curso.*

AGRADECIMENTOS

O primeiro e mais importante dos agradecimentos é para meus pais, por todos esses anos de apoio e compreensão, assim como pelo esforço realizado por se manterem sempre ao meu lado, apesar da distância.

Às minhas irmãs, Mariola e Ana, por me animarem e apoiarem nos momentos mais necessitados.

À minha namorada, Alana, por ser meu mais importante apoio nesta última etapa do curso, pela sua ajuda com a língua e tornar o mais fácil possível minha adaptação ao seu país.

A todos os meus colegas de curso, tanto de Madri quanto de Porto Alegre, pelo apoio demonstrado durante todos os anos do curso.

Ao meu tutor e orientador, o professor Patric, pela eterna disponibilidade e atenção oferecidas. Também por ter a paciência necessária para me orientar durante a realização do trabalho, apesar das dificuldades da língua.

À minha tutora do intercâmbio, professora Marta Argüeso, por tornar possível o estudo das matérias cursadas no presente intercâmbio.

Aos membros do LATRIB, por sua profissionalidade e disponibilidade, em especial à Jean Poletto, pelo auxílio no processamento dos dados.

À empresa Frás-le, assim como todas as fornecedoras dos materiais que tornaram possível o estudo realizado no presente trabalho.

E, por último, às universidades onde tive a possibilidade de estudar e aprender, a Universidad Carlos III de Madrid, a Universidade de Aveiro, e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CORRAL, C. “Análise comparativa do nível de ruído produzido por pastilhas de freio originais e do mercado de reposição brasileiro” 2015. 15 folhas. Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RESUMO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso apresenta um estudo sobre o nível de ruído produzido por algumas das pastilhas de freio mais comuns no mercado brasileiro. O modelo de pastilha de freio selecionado para este estudo é referente ao de um automóvel popular, que é líder de vendas no Brasil. O estudo consiste em um ensaio de frenagem realizado mediante o uso de um tribômetro especialmente desenvolvido para testes com materiais de fricção veiculares (pastilhas e lonas de freio) com posterior análise dos dados de atrito, vibração e frequência ressonante. O mesmo ensaio de frenagem é realizado quatro vezes: a primeira com a pastilha original do veículo e mais três com cada um dos diferentes modelos de pastilha adquiridos no mercado de reposição brasileiro. O presente trabalho está focado na análise do ruído gerado por cada pastilha devido à vibração produzida pelo atrito durante a frenagem. São determinadas as frequências de vibração emitidas por cada pastilha, bem como é realizada uma classificação dos materiais ensaiados segundo suas magnitudes de vibração. Entre os dados obtidos destacam-se as classificações de atrito e ruído das pastilhas, assim como os tipos de ruído presentes em cada material. Finalmente, é incluída a criação de um indicador de qualidade, baseado no atrito, na perda de massa e na vibração RMS. Com dito indicador, é realizada a classificação segundo a qualidade de cada pastilha e a posterior avaliação final de todos os parâmetros em relação ao custo, para ajudar na escolha de cada pastilha segundo os parâmetros requeridos. Os resultados obtidos mostram uma classificação do nível de ruído em ordem decrescente que fica da seguinte maneira: “Reposição 3” > “Original” > “Reposição 2” > “Reposição 1”.

PALAVRAS-CHAVE: ruído, pastilha, freio, tribômetro.

CORRAL, C. “**Comparative analysis of the noise level made by original brake pads and the ones from Brazilian market**”, 2015. 15 pages. Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ABSTRACT

The work presents an analysis about the noise level made by some of the most common brake pads in the Brazilian market. The model of brake pad chosen has been referenced to a popular car, which is the leading car in Brazil's automotive market. The methodology includes a set of braking tests performed on a laboratory-scale “tribômetro” especially designed for vehicular tests (brake pads and linings) and different friction, vibration and frequency data analysis. The same test has been performed four times: one in the original brake pad of the vehicle and three more in each different model found in the Brazilian market. This work is focused on analyzing each brake pad noise level, because of the vibration produced by the friction during the braking. The type of frequency of the brake pads is determined and ranked by the vibration values obtained. In the data obtained, are remarkable the classifications of friction and noise of the pads and the kind of noise present in each material. Finally, it's included the creation of a quality indicator, based in friction, mass loss and RMS vibration. With this indicator, is made the quality classification of each brake pad and the final evaluation of every parameter against the cost, to assist in the election of each pad depending the parameters required. The results obtained show a classification of the noise level, in the next order from the most to the less noise level: “Reposição 3” > “Original” > “Reposição 2” > “Reposição 1”.

KEYWORDS: noise, brake pad, brake, tribômetro.

CORRAL, C. “**Análisis comparativo del nivel de ruido producido por pastillas de freno originales y del mercado de reposición brasileño**”, 2015. 15 páginas. Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado presenta un estudio sobre el nivel de ruido de algunas de las pastillas de freno más comunes en el mercado brasileño. El modelo de pastilla seleccionado para el estudio ha sido la referente al de un automóvil popular, que es líder de ventas en Brasil. El estudio consta de un ensayo de frenado realizado mediante el uso de un tribómetro especialmente desarrollado para ensayos vehiculares (pastillas y lonas de freno), con posterior análisis de los datos de rozamiento, vibración y frecuencia resonante. Ha sido realizado un total de cuatro veces el mismo ensayo de frenado: una vez sobre las pastillas originales del vehículo y tres más sobre cada uno de los diferentes modelos de pastillas encontrados en el mercado de reposición brasileño. El estudio se centra en el análisis del ruido que produce cada pastilla, debido a la vibración producida por la fricción durante el frenado. Son determinados qué tipo de frecuencias emite cada pastilla, así como se realiza una clasificación según sus magnitudes de vibración. Entre los datos obtenidos destacan las clasificaciones de rozamiento y ruido de las pastillas, así como los tipos de ruido presentes en cada material. Finalmente, se incluye la creación de un indicador de calidad, basado en el rozamiento, la pérdida de masa y la vibración RMS. Con dicho indicador, es realizada la clasificación según la calidad de cada pastilla, y la posterior evaluación final de todos los parámetros en relación al coste, para auxiliar en la elección de cada pastilla según los criterios requeridos. Los resultados obtenidos muestran una clasificación del nivel de ruido en orden decreciente que queda de la siguiente forma: “Reposição 3” > “Original” > “Reposição 2” > “Reposição 1”.

PALABRAS CLAVE: ruido, pastilla, freno, tribómetro.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Objetivo geral	2
1.2.	Objetivos específicos	2
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1.	Sistema de freio	2
2.1.1.	Freio a disco	2
2.2.	Material de fricção	3
2.3.	Efeitos verificados em procedimentos de ensaio de frenagem.....	3
2.3.1.	Assentamento	3
2.3.2.	<i>Fade</i>	3
2.3.3.	Caracterização	3
2.4.	Ruído de freio.....	3
2.4.1.	Classificação do Ruído de Freios	3
2.4.2.	<i>Squeal e Bus Noise</i>	4
3.	METODOLOGIA E PROCEDIMENTO.....	4
3.1.	Materiais e métodos.....	4
3.1.1.	Tribômetro.....	4
3.1.2.	Amostras das pastilhas de freio	5
3.1.3.	Demais dispositivos empregados	5
3.2.	Descrição do procedimento de ensaio.....	6
4.	RESULTADOS.....	7
4.1.	Análise do atrito	7
4.1.1.	Assentamento	7
4.1.2.	<i>Fade</i>	8
4.1.3.	Caracterização	8
4.1.4.	Coeficientes de atrito resultantes.....	9
4.2.	Análise do ruído segundo a frequência	9
4.2.1	Metodologia de pós-processamento dos dados.....	9
4.2.2	Classificação do ruído segundo a frequência	9
4.3.	Quantificação da vibração.....	10
4.3.1.	Classificação do nível de vibração.....	10
4.4.	Determinação de qualidade - Indicador Q.....	11

4.5. Relação geral de dados de desempenho, ruído e custo.....	12
5. CONCLUSÕES.....	13
NORMAS	15
APÊNDICES.....	16

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Vista interior de um freio a disco	2
Figura 2.2 – Tribômetro do LATRIB do departamento de Energia Mecânica da UFRGS	5
Figura 2.3 – Esquema de instalação do acelerômetro	5
Figura 3.1 – Temperatura inicial de frenagem no disco durante o <i>fade</i>	7
Figura 4.1 – Evolução do coeficiente de atrito por frenagem no assentamento	7
Figura 4.2 – Pastilha e amostra “Reposição 2” com a camada de tinta	8
Figura 4.3 – Comparação da amostra com e sem camada de tinta	8
Figura 4.4 – Gráfico do coeficiente de atrito versus temperatura em cada ciclo da fase do <i>fade</i> da pastilha “Reposição 3.....	8
Figura 4.5 – Evolução do coeficiente de atrito por frenagem na caracterização	9
Gráficos de <i>fade</i>	Apêndice I
Gráficos do espectro de frequência	Apêndice II
Gráficos RMS	Apêndice III

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação dos ruídos de freio	4
Tabela 3.1 – Parâmetros do ensaio	6
Tabela 4.1 – Coeficientes de atrito em cada fase e média global do coeficiente de atrito	9
Tabela 4.2 – Onze frequências ressonantes detectadas no estudo externo que foram filtradas do sistema na Análise Primária.....	9
Tabela 4.3 – Frequências que se destacaram, filtradas por meio da Análise Secundária	10
Tabela 4.4 – Descrição do ruído produzido em cada pastilha na Análise Primária	10
Tabela 4.5 – Descrição do ruído produzido em cada pastilha na análise secundária	11
Tabela 4.6 – Classificações das amostras segundo o nível de vibração	11
Tabela 4.7 – Perda de massa obtida pelas amostras	12
Tabela 4.8 – Dados a introduzir na equação do indicador Q de cada pastilha e resultado ..	12
Tabela 4.9 – Quadro de dados de desempenho e ruído de cada pastilha	13

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito (Brasil)
ECE	Comissão Econômica para Europa pelas Nações Unidas (Europa)
EUA	Estados Unidos da América
FFT	Transformada Rápida de Fourier
FMVSS	Padrões de Segurança Federais de Veículos Motorizados (EUA)
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Brasil)
ISO	Organização Internacional pela Standardização
LATRIB	Laboratório de Tribologia da Escola de Engenharia da UFRGS
NBR	Denominação de norma da ABNT
NHTSA	Administração de Segurança do Trânsito nas Rodovias Nacionais
OCP	Organismo de Certificação de Produto (Brasil)
RMS	Raiz da média quadrática
SAE	Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade
SBAC	Sistema Brasileiro de Avaliação da Conformidade
SI	Sistema Internacional de Unidades
UC3M	Universidad Carlos III de Madrid (Espanha)
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, foram obtidos avanços com relação ao desempenho das pastilhas de freio automotivas (atrimento e desgaste). Apesar disso, o ruído audível originado da vibração produzida pelo atrimento constitui um problema que ainda não foi plenamente resolvido pelos fabricantes de freios. Mesmo não sendo um fator determinante para o correto funcionamento do sistema de freios de um veículo, o nível de vibração produzido pela fricção é crucial para o alcance de níveis satisfatórios de conforto acústico dos motoristas, passageiros e das pessoas no entorno do veículo. Segundo Kinklaid et al, 2003, o ruído produzido na frenagem pode levar os donos de veículos a apresentarem queixas de garantia junto ao fabricante do automóvel.

Segundo Rhee et al, 1989, essa queixa acaba recaindo sobre o fabricante do material de fricção, podendo levar, em casos críticos, a quebras de contrato por parte da indústria automobilística, com relação ao fornecimento do produto de fricção pelo fabricante de pastilhas e lonas de freio. É por isso que os fabricantes de materiais de fricção e de sistemas de freio têm estudado de maneira mais intensa e efetiva o ruído, especialmente nas últimas três décadas.

Os órgãos governamentais de cada país estabeleceram normas próprias para regular o mercado automobilístico. Nos Estados Unidos, a *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) estabeleceu a norma *Federal Motor Vehicle Safety Standard* (FMVSS), que no Standard nº 135 trata da normativa sobre Sistemas de Freio em Veículos Ligeiros, ainda que sem mencionar níveis de ruído, nem detalhar as condições das pastilhas de freio [*U.S. Department Transportation*, 1999]. Na Comunidade Econômica Europeia, foi estabelecida a *Commission Directive 98/12/EC*, que aborda na normativa ECE R-90 os parâmetros para assegurar os critérios mínimos de segurança e eficiência nas pastilhas de freio [*Economic Commission for Europe of the United Nations*, 2009].

Particularmente no Brasil, o crescimento industrial no século XX fortaleceu a necessidade de criar instrumentos eficazes de controle que viessem a impulsionar e proteger produtores e consumidores [INMETRO, 2014]. O Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) também estabelece seu regulamento para sistemas de freio: o CONTRAN 777/93 e as Normas Técnicas NBR-10966, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que são baseadas, em parte, no regulamento europeu [Kawaguchi, H., 2005].

Em janeiro de 2014, o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior estabeleceu a Portaria nº 55, que inclui uma série de artigos, entre eles: a aprovação do chamado “Anexo Específico X”, no qual é possível encontrar a definição dos ensaios e amostragens para conjuntos e pastilhas de freio, os ensaios de manutenção, o selo de identificação da conformidade e as obrigações do fornecedor do produto [INMETRO, 2014]. Essa aprovação pressupõe uma padronização no mercado de reposição brasileiro no âmbito de materiais para sistemas de freio, bem como uma normativa a ser considerada por fabricantes e consumidores, pois, com o Anexo Específico X, pretende-se melhorar esses aspectos.

Conforme relato dos engenheiros de uma indústria fabricante de materiais de fricção para freios e dos professores do Laboratório de Tribologia (LATRIB) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), algumas vezes um material possui desempenho satisfatório em termos de nível de atrimento e desgaste, mas pode ser ruidoso ou vice-versa. É por esse motivo que se decidiu aprofundar o estudo sobre o nível de ruído produzido por pastilhas de freio de diferentes fabricantes, mantendo fixo o modelo de veículo no qual estes componentes são empregados.

Neste trabalho serão estudadas diferentes pastilhas de freio do mercado de reposição brasileiro para avaliar o nível de ruído que é produzido por cada uma.

1.1. Objetivo geral

Avaliar e classificar o nível de ruído produzido pelo atrito de uma pastilha de freio original e outras três pastilhas do mercado de reposição, as quais estão disponíveis no comércio local da cidade de Porto Alegre, RS, Brasil.

1.2. Objetivos específicos

- Definir o sistema de freio veicular e seus elementos mais importantes.
- Levantar, junto à literatura técnica da área, os tipos de ruídos de freios mais comuns em veículos.
- Definir os parâmetros dos testes experimentais de frenagem.
- Executar os testes de frenagem no tribômetro do LATRIB.
- Processar os dados dos testes experimentais.
- Avaliar e classificar os níveis de atrito e ruído de cada material.
- Definir um parâmetro de qualidade baseado no desempenho e no ruído da pastilha.
- Comparar as pastilhas segundo sua qualidade seu custo de aquisição.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Sistema de freio

Conforme a literatura técnica da área [Díaz et al, 2011], é denominado sistema de frenagem qualquer sistema que possa desacelerar ou reduzir o movimento de um veículo, diminuindo com isso sua energia cinética.

2.1.1. Freio a disco

Com o objetivo de conseguir maior transferência do calor produzido no sistema de freios, foram desenhados os freios a disco, que, na atualidade, são utilizados frequentemente em eixos dianteiros devido à maior transferência de carga no eixo anterior que no posterior durante o processo de frenagem [Díaz et al, 2011].

Nesse tipo de freio, a força de frenagem é obtida com a aplicação de forças axiais, de direção normal a um disco solidário com o eixo da roda. Um sistema de freios a disco é formado pelo rotor, que corresponde ao disco propriamente dito, o qual se encontra parafusado à roda, e pela pinça de freio, fixada à estrutura do veículo. A pinça ou cáliber de freios tem no seu interior um ou dois cilindros hidráulicos. Entre os cilindros e o disco interpõe-se uma pastilha de freio. A pastilha vai montada, de tal maneira que, quando a pressão hidráulica move os pistões dos cilindros, eles exercem uma força sobre a pastilha que, ao mesmo tempo, pressiona o disco, detendo seu movimento. [Díaz et al, 2011]. Na figura 2.1 é representado o esquema de um sistema de freio a disco.

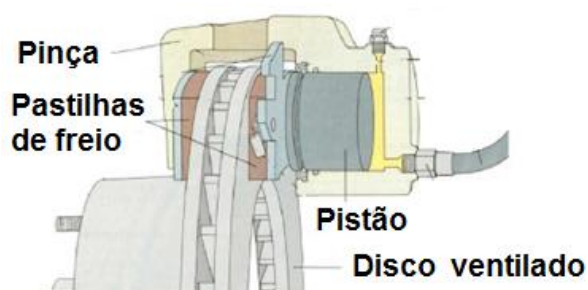


Figura 2.1 – Vista interior de um freio a disco. [Fonte: UC3M, 2010].

2.2. Material de fricção

Segundo Matozo, 2012, as condições operacionais a que o sistema de freio pode ser submetido são bastante variadas. Isso faz com que os materiais de fricção necessitem atender a uma ampla gama de requisitos, entre eles manter um coeficiente de atrito estável, ser pouco agressivo ao outro elemento do par tribológico (disco de freio), apresentar durabilidade adequada e ser capaz de minimizar a ocorrência de ruídos e vibrações do sistema de freio.

Conforme Nicholson, 1995, dessa forma os materiais de fricção utilizados pela indústria automobilística são compósitos constituídos de uma vasta gama de matérias primas de diferentes classes, que podem ser resumidas em cinco grandes grupos: aglomerantes, fibras, modificadores de atrito lubrificantes, modificadores de atrito abrasivos e cargas.

As pastilhas de freio são componentes mecânicos formados por fibras e material de atrito em forma de pó. Tipicamente, esses componentes são constituídos por mais de 20 ingredientes. Os fabricantes de materiais de fricção (pastilhas e lonas de freio) realizam diversos testes em laboratório para constituir a melhor pastilha segundo os parâmetros de resistência, durabilidade e economia. Normalmente apresentam um coeficiente de atrito entre 0,34 e 0,45 [Limpert, 1999].

2.3. Efeitos verificados em procedimentos de ensaio de frenagem

As nomenclaturas usuais da área relacionam os efeitos do atrito e tem procedimento de ensaio específico. Essas nomenclaturas são:

2.3.1. Assentamento

O assentamento é a etapa inicial, que visa a estabilização do atrito. Nessa etapa ocorre o ajuste geométrico, com o aumento da área de contato da pastilha sobre o disco. Isso se reflete no coeficiente de atrito, que aumenta [Neis, 2012].

2.3.2. Fade

Durante a aplicação dos freios, o aumento da temperatura (para valores superiores a 300°C) provoca mudanças, temporárias ou permanentes, nas propriedades de fricção do material empregado na fabricação das pastilhas de freio. Ao esfriá-los novamente, recuperam sua eficácia inicial, um efeito conhecido como recuperação. Esse fenômeno de perda momentânea da eficácia dos freios devido à alta temperatura denomina-se *fade* de material. Para diminuir esse tipo de problema, é necessário dissipar o calor dos freios de maneira eficiente [Díaz et al, 2011].

2.3.3. Caracterização

A caracterização é a etapa final, realizada para verificar o comportamento típico do material em condições brandas. O presente ensaio é realizado com velocidade em desaceleração da amostra contra o disco, situação descrita na norma ISO 26867, 2009 [Neis, 2012].

2.4. Ruído de freio

2.4.1. Classificação do Ruído de Freios

Não há uma classificação rígida de ruídos e fenômenos vibratórios, mas, em geral, a literatura costuma considerar os ruídos de freio como de baixa e alta frequência. Ruídos de baixa frequência geralmente ocorrem abaixo de 1kHz. São exemplos de ruídos de baixa frequência: *Bus Noise, Judder, Moan, Groan e Creep Groan*. Ruídos de alta frequência, como o *Squeal*, ocorrem a mais de 1kHz (Tabela 2.1). Há ainda autores que classificam os ruídos de baixa frequência como <500 Hz [Triches Jr et al, 2004].

Tabela 2.1 – Classificação dos ruídos de freio [Adaptado do Matozo, 2012].

Ruído	Descrição	Frequência
Bus Noise	Ruído de tipo <i>Squeal</i> em baixa frequência. Chamado assim pelo som que o ônibus produz quando desacelera e cessa seu movimento	<1 kHz
Creep Groan	Movimento intermitente em decorrência do fenômeno de <i>stick-slip</i> em baixíssimas velocidades, ocasionando a excitação de modos de vibração da suspensão e chassis do veículo. Manifesta-se na forma de ruídos e vibrações.	1-50 Hz
Groan	Ruído acompanhado de vibração e induzido por <i>stick-slip</i> . Ocorre durante a desaceleração do veículo.	50-200 Hz
Moan	Ruído de baixa frequência decorrente de vibrações de corpo rígido de componentes do sistema de freio e suspensão.	100-400 Hz
Judder	Ruído de baixa frequência acompanhado de vibração e induzido por deformações do disco de freio, decorrentes de desgaste desigual ou deformações térmicas.	20-100 Hz
Wire brush	Ruídos de múltiplas frequências.	8 - 20 kHz
Squeal	Ruído de alta frequência, decorrente de ressonâncias do sistema de freio.	1 - 20 kHz

2.4.2. *Squeal* e Bus Noise

Segundo Kinkaid et al, 2003, o ruído de *Squeal* é considerado um dos mais importantes, pois os maiores custos de garantia por parte dos fabricantes de automóveis estão relacionados a este ruído. O *Squeal* é um ruído de natureza randômica e frequência superior a 1000 Hz. A frequência de vibração do *Squeal* costuma ser fortemente dependente da frequência natural do rotor (disco de freio).

Maneiras de reduzir o *Squeal* são frequentemente associadas a aspectos relativos ao sistema de freio, como modificações na geometria do disco, sistema de fixação da pastilha, montagem do calíper [Neis, 2014]. Mas segundo Diao, 2013, apesar do enorme esforço dos engenheiros e estudiosos do assunto, os mecanismos de geração e medidas para controle do *Squeal* não estão totalmente esclarecidos.

Segundo Matozo, 2012, a detecção do *Squeal* é ainda potencializada devido ao intervalo de frequências no qual acontece, pois o ruído de fundo gerado por veículos é usualmente concentrado em frequências abaixo de 1 kHz. Devido à sua elevada amplitude, é incômodo não apenas a quem está no interior do veículo, mas também aos pedestres. Esse fato é facilmente distinguível pela situação à qual estão expostos os usuários de ônibus ao ouvir ruídos do tipo *Squeal* quando o veículo desacelera e cessa seu movimento. O *Squeal* nessa situação é chamado *Bus Noise*.

3. METODOLOGIA E PROCEDIMENTO

3.1. Materiais e métodos

3.1.1. Tribômetro

O tribômetro empregado no presente trabalho (Fig. 2.2) está disponível no Laboratório de Tribologia (LATRIB) do departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS.

Trata-se de um equipamento especialmente projetado para avaliar materiais de fricção veiculares e que, por isso, disponibiliza cargas e velocidades de rotação mais altas do que um tribômetro padrão.

O funcionamento ocorre da seguinte maneira: um corpo de prova, a amostra da pastilha, é pressionado com uma força (Tab 3.1) normal contra um disco que possui uma determinada rotação, formando uma superfície de fricção. São adquiridos dados da força normal ao rotor, velocidade de rotação e temperatura do disco (Tab 3.1). Esses dados são monitorados e controlados por um sistema de controle e automação. Os dados de vibração são analisados com a ajuda de um acelerômetro.

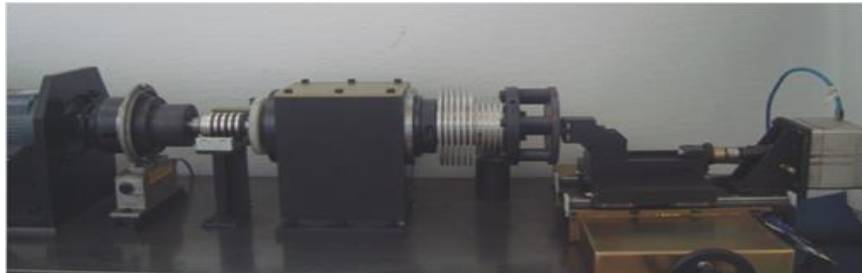


Figura 2.2 - Tribômetro do LATRIB do departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS [Neis, 2015].

Para medição da temperatura do disco de freio é utilizado um termopar fixo, tipo K, instalado a 1 mm da superfície do disco e disposto sobre o raio de deslizamento, que é de 40 mm. Esse é o método padrão recomendado pelas normas.

3.1.2. Amostras das pastilhas de freio

Para a realização do ensaio, foram utilizadas 4 pastilhas de freio de diferentes fabricantes. Todas pertencem a um veículo popular de grande vendagem no Brasil, sendo uma pastilha a original e as outras três pertencentes ao mercado de reposição. As pastilhas foram padronizadas como amostras de forma cilíndrica, com diâmetro de 18 mm (254 mm² de área nominal de contato).

Neste trabalho, as amostras foram nomeadas da seguinte forma: “Original”, “Reposição 1”, “Reposição 2” e “Reposição 3”.

3.1.3. Demais dispositivos empregados

Acelerômetro: este sensor foi utilizado no processo de frenagem, com a exceção da fase de *fade*. A função do acelerômetro é a de captar as vibrações produzidas pelo atrito entre a pastilha e o disco no eixo vertical. Foi instalado sobre o porta amostras (ver Figura 2.3), e não foi empregado no *fade* devido à elevada temperatura, que pode danificar o instrumento.

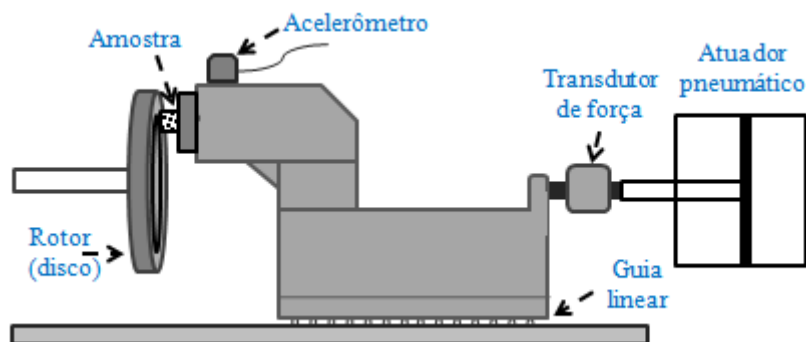


Figura 2.3 – Esquema de instalação do acelerômetro [Neis, 2015].

Aquecedor indutivo: usado para aquecer o disco de freio por meio de indução eletromagnética até a temperatura inicial de frenagem desejada, na fase dos ensaios de *fade*.

3.2. Descrição do procedimento de ensaio

O ensaio de frenagem visa a determinar, de maneira empírica, o ruído originado da vibração provocada pela fricção.

Os ensaios de frenagem no tribômetro foram conduzidos de acordo com os parâmetros operacionais descritos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Parâmetros do ensaio.

Parâmetro	Assentamento	Fade				Caracterização
Rotação inicial do disco [r.p.m.]	1840 (80 km/h)					
Rotação final do disco [r.p.m.]	0					
Tempo médio de parada [s]	10					
Força normal [N]	1200					
Temperatura inicial do disco [°C]	100	100	200	300	350	100
Número de frenagens	30	10	3	3	3	30
		4 repetições ou ciclos				

A avaliação experimental, da qual os ensaios no tribômetro são parte integrante, foi conduzido em 4 etapas:

Etapa 1. Preparação do material.

A amostra é montada no porta-amostra e o acelerômetro é fixado sobre esse dispositivo (Figura 2.3), de tal forma que possa medir as vibrações produzidas no eixo vertical “Y”, que é tangente ao disco (no mesmo sentido do vetor da força de atrito).

Etapa 2. Assentamento

Depois da primeira frenagem o disco alcança a temperatura de 100°C, por isso, essa temperatura é chamada de temperatura de gatilho dos ensaios. Durante essa fase, é realizado um total de 30 frenagens, onde a temperatura de gatilho é mantida fixa nos 100°C.

Etapa 3. Fade.

Nesta etapa a pastilha é submetida a um ensaio de *fading*. Essa fase consta de uma sucessão de 4 níveis de temperatura (Fig. 3.3), repetidos 4 vezes (4 ciclos).

O primeiro nível de temperatura é constituído de 10 frenagens executadas a uma temperatura inicial de 100 °C. O segundo nível de temperatura corresponde a uma temperatura inicial de 200 °C. Neste momento são realizadas 3 frenagens. No terceiro e quarto nível são realizadas 3 frenagens em cada nível, sendo as temperaturas iniciais de 300 e 350 °C, respectivamente. A transição entre 100 °C, 200 °C, 300 °C e 350 °C é feita a por meio do um aquecedor por indução eletromagnética.

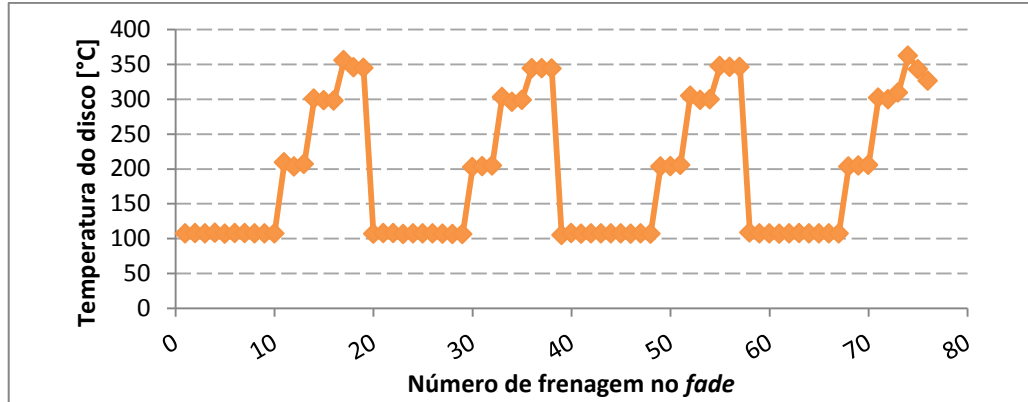


Figura 3.3 – Temperatura inicial de frenagem no disco durante o *fade* (retirado do ensaio).

Etapa 4. Caracterização.

A última etapa, chamada fase de caracterização, é uma repetição da segunda, para comprovar que o material da pastilha é capaz de recuperar suas propriedades. São realizadas outras 30 frenagens, finalizando os testes.

4. RESULTADOS

4.1. Análise do atrito

4.1.1. Assentamento

Nos dados obtidos na análise dos ensaios, pode-se observar o comportamento típico de um assentamento, em que o atrito vai aumentando seu valor até chegar a um valor e permanecer constante (Fig. 4.1). Conforme vão se realizando as frenagens, a amostra se ajusta geometricamente, ou seja, vai aumentando o contato da superfície com o disco, alcançando-se um valor de coeficiente de atrito que será relativamente constante.

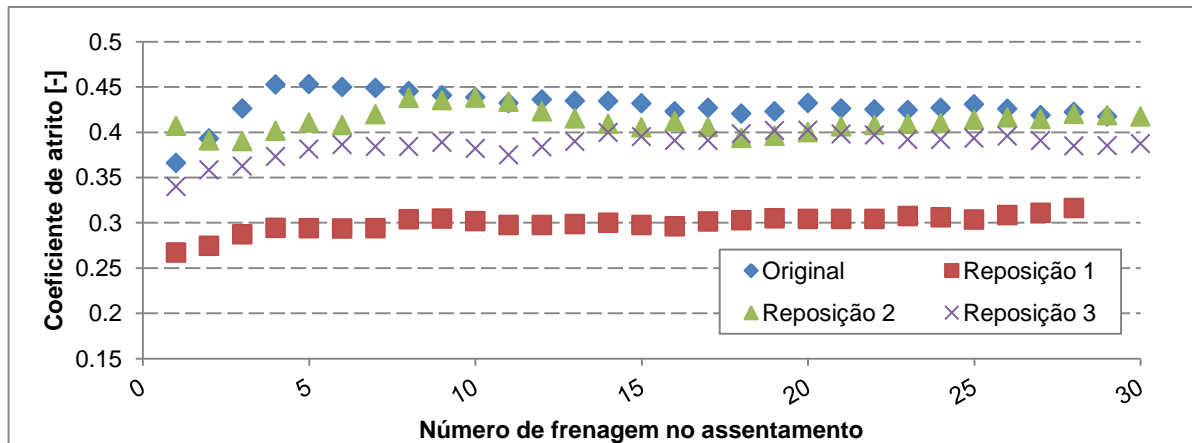


Figura 4.1 – Evolução do coeficiente de atrito por frenagem na fase de assentamento

Observando o gráfico, pode-se ver uma pequena anomalia na curva de atrito da amostra “Reposição 2”, em que o coeficiente de atrito é mais elevado na primeira aplicação de frenagem. Esse efeito é devido à camada de tinta azul sobre a superfície dessa amostra (Fig. 4.2), a qual modifica levemente os valores do atrito nas primeiras aplicações de frenagem. Essa camada de tinta azul é um composto a base de titânio que tem atrito

diferenciado em relação ao material da pastilha, proporcionando melhor sensibilidade e maior segurança desde as primeiras frenagens [Honeywell, 2013]. É do mesmo fabricante que a pastilha e é colocada de propósito. Na Figura 4.3 pode-se observar a diferença entre a amostra “Reposição 2” (com a camada de tinta), e outra amostra sem tinta.

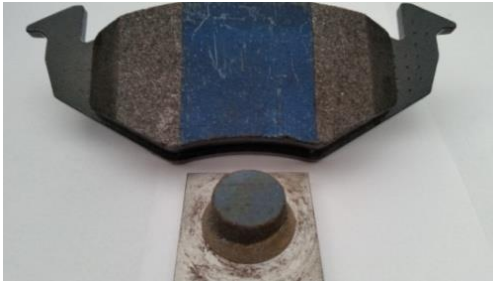


Figura 4.2 – Pastilha e amostra “Reposição 2” com a camada de tinta.

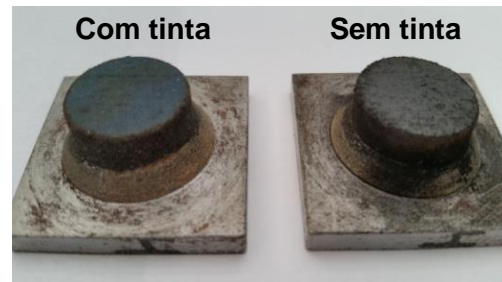


Figura 4.3 – Comparação da amostra com e sem camada de tinta.

4.1.2. Fade

Para analisar a fase de *fade*, foram realizados 4 gráficos (Figura 4.4 e Apêndice I), um para cada material, em que são indicados os 4 ciclos de frenagem, respectivamente. Os 10 primeiros pontos do gráfico correspondem a 10 frenagens a 100 °C. Os 3 pontos seguintes correspondem ao valor médio do atrito a 200 °C, 300 °C e 350 °C. Esses pontos são repetidos 4 vezes, uma vez a cada ciclo.

Dessa forma, é possível comparar o comportamento de cada material durante a etapa de *fade*, assim como comparar o comportamento do mesmo material em cada ciclo.

Conforme observado nos gráficos, e de acordo com Breuer e Bill, 2004, é possível verificar que, com o aumento da temperatura, o coeficiente de atrito de cada material diminui. Esse efeito é especialmente pronunciado com relação ao material de “Reposição 3” (Figura 4.4) .

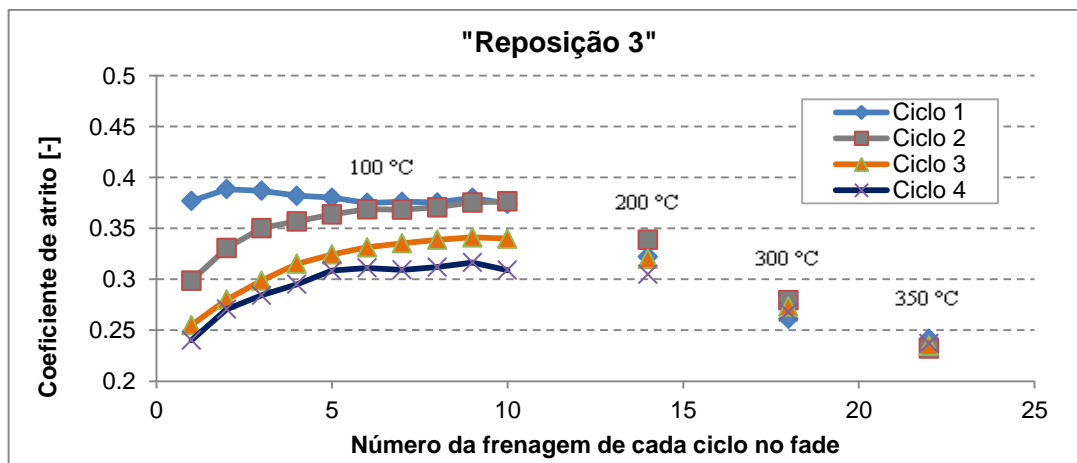


Figura 4.4 - Gráfico do coeficiente de atrito versus temperatura em cada ciclo da fase do *fade* da pastilha “Reposição 3”.

4.1.3. Caracterização

Na caracterização é verificada a mesma evolução do coeficiente de atrito que ocorreu durante o assentamento (Fig.4.5), em que se observa claramente uma distribuição crescente nas primeiras frenagens até alcançar um valor constante. Esse comportamento

ocorre porque o material tem sofrido uma mudança de suas propriedades durante o *fade* e agora possui tendência a recuperar e elevar seus valores de atrito.

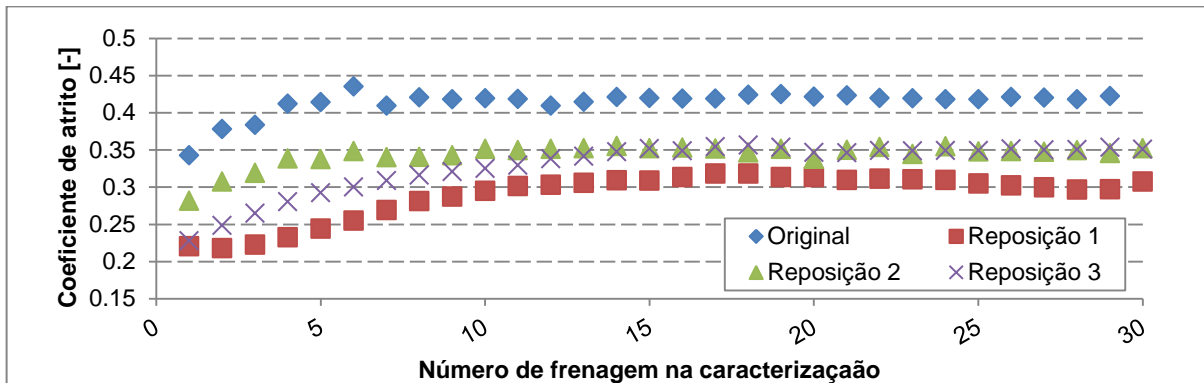


Figura 4.5 – Evolução do coeficiente de atrito por frenagem na fase de caracterização.

4.1.4. Coeficientes de atrito resultantes

Na Tabela 4.1 são mostrados os valores de atrito em cada fase, assim como a média global do coeficiente de atrito.

Tabela 4.1 – Coeficientes de atrito em cada fase e média global do coeficiente de atrito (ordem decrescente de valor médio de atrito).

Fases do ensaio		Original	Reposição 1	Reposição 2	Reposição 3
Assentamento		0,429	0,299	0,412	0,386
Fade	Ciclo 1	0,409	0,301	0,411	0,355
	Ciclo 2	0,407	0,281	0,390	0,339
	Ciclo 3	0,402	0,278	0,343	0,307
	Ciclo 4	0,398	0,264	0,347	0,29
Caracterização		0,414	0,289	0,343	0,328
Média global do coeficiente de atrito [adm]		0,410 (1°)	0,285 (4°)	0,374 (2°)	0,334 (3°)

4.2. Análise do ruído segundo a frequência

4.2.1 Metodologia de pós-processamento dos dados

Durante o atrito ocorrem várias micro oscilações na superfície de contato. A amplitude dessas micro oscilações pode aumentar sob determinadas condições e resultar em instabilidade de atrito. Esta instabilidade provoca o surgimento de vibrações induzidas por fricção na interface do atrito. Quando as frequências dos modos de vibração e as vibrações forçadas do sistema coincidem, as vibrações ressonantes são consideradas as principais causas de vibração e ruído em sistemas de atrito [Matozo, 2012].

Num estudo prévio dos investigadores do LATRIB, foram detectadas 11 frequências ressonantes no tribômetro. No presente estudo, foi realizado um primeiro processamento dos dados na chamada “Análise Primária”, mediante uma transformada rápida de Fourier do sinal de aceleração no domínio no tempo. Nessa análise, foram eliminadas mediante um filtro aplicado no sinal no domínio do tempo as 11 frequências ressonantes do sistema mecânico (encontradas no estudo prévio) e suas correspondentes harmônicas (Tab 4.2). Apesar desse levantamento prévio de frequências, foi observada ainda a repetição de uma série de frequências abaixo de 1kHz, as quais dificultavam a classificação das amostras segundo sua frequência. Esse fato provocou a realização da chamada “Análise Secundária”,

em que foram processados os dados novamente e, além das frequências filtradas na “Análise Primária”, foi aplicado outro filtro. Por meio do segundo filtro, foram removidas todas as frequências abaixo de 1 kHz e acima de 7,81 kHz, sendo este último valor o resultado de $20\text{kHz}/2,56$, que tem por finalidade evitar o efeito *aliasing* das medições.

Tabela 4.2 – Onze frequências ressonantes detectadas no estudo externo que foram filtradas do sistema durante a “Análise Primária”.

Frequência [Hz]	Largura de banda [Hz]	Número de frequências harmônicas filtradas
41	2	16
60	2	3
88	0,5	7
98	2	6
100	1	3
140	3	8
170	3	6
258	2	2
282	4	1
340	3	9
343,5	5	8

Na Tabela 4.3 é possível observar as frequências que se destacaram (maior energia dentro do espectro), as quais foram filtradas na “Análise Secundária”. Visto que essas frequências se repetem em todas as amostras, provavelmente são frequências naturais do sistema mecânico da máquina. Note que, com a finalidade de remover as frequências abaixo apresentadas, foi empregado um filtro de corte (passa alta) para as frequências abaixo de 1 kHz, o qual eliminou todas as frequências menores do que 1 kHz.

Tabela 4.3 – Frequências que se destacaram, filtradas por meio da “Análise Secundária”.

Pastilha	Fase	Frequências fundamentais destacadas [Hz]					
Original	Assentamento	55			280	550	825
	Caracterização	55			280	550	825
Reposição 1	Assentamento	55	110	222			
	Caracterização	55	110	222			
Reposição 2	Assentamento	55	110	222	280	550	825
	Caracterização	55	115	222		550	825
Reposição 3	Assentamento	55	115	222			
	Caracterização	55	115	222			

4.2.2 Classificação do ruído segundo a frequência

Para avaliação de ruído em pastilhas de freio, a maioria dos grandes fabricantes mundiais baseia-se num procedimento que se tornou difundido para avaliação de ruído em dinamômetro na indústria automotiva atual: o SAE J2521 [Matozo, 2012]. Os resultados do tribômetro podem ser utilizados como um indicativo para o nível de ruído da pastilha, da mesma forma como é feito com o dinamômetro através do ensaio SAE J2521. Porém, em se tratando de uma avaliação definitiva, a “palavra final” é o ensaio no veículo.

Após cada processo de filtragem (primária e secundária), foram obtidos os espectros de frequência, que visaram determinar os possíveis tipos de ruído produzido por cada amostra na análise primária e, posteriormente, na secundária.

Análise Primária

Observando os gráficos (Apêndice II) com as 11 frequências da Tabela 4.2 eliminadas na filtragem, tem-se que as vibrações de maior energia se concentraram no espectro abaixo dos 1 kHz, assim como entre os 3 kHz e 6,5 kHz. Os valores obtidos no espectro de frequência abaixo de 1 kHz refletem a possível existência de *Bus Noise, Creep Groan, Groan, Moan e/ou Judder* em todos os materiais analisados, assim como os valores de frequências entre 3 kHz e 6 kHz indicam a possível existência de *Squeal* (Tab 4.4).

Tabela 4.4 – Descrição do ruído produzido em cada amostra na caracterização de “Análise Primária”.

Pastilha	Original	Reposição 1	Reposição 2	Reposição 3
Possível ruído segundo o espectro de frequência	<i>Bus Noise, Creep Groan, Groan, Moan e Judder</i>	<i>Bus Noise, Creep Groan, Groan, Moan e Judder</i>	<i>Bus Noise, Creep Groan, Groan, Moan, Judder e Squeal</i>	<i>Bus Noise, Creep Groan, Groan, Moan, Judder e Squeal</i>

Análise Secundária

Observando novamente os gráficos (Apêndice II) com as frequências da Tabela 4.2 (11 principais frequências) eliminadas na filtragem, bem como todas as frequências abaixo de 1 kHz e acima de 7,81 kHz, observa-se que, por meio da Análise Secundária, as frequências mais destacáveis foram removidas. Isso ocorreu porque a maioria delas se encontrava abaixo de 1 kHz. Dessa forma, o único ruído possível segundo os gráficos de frequência do Apêndice II da Análise Secundária pode ser classificado como *Squeal*, conforme resume a Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Descrição do ruído produzido em cada amostra na caracterização da “Análise secundária”.

Pastilha	Original	Reposição 1	Reposição 2	Reposição 3
Possível ruído segundo o espectro de frequência	<i>Squeal</i>	-	<i>Squeal</i>	<i>Squeal</i>

Apesar dos resultados obtidos, Matozo 2012, destaca que o *Squeal*, devido à sua elevada amplitude, pode chegar a ultrapassar os 100dB, sendo um ruído altamente destacável e audível. Contudo, essa característica audível não foi percebida durante o ensaio. Por isso, não é possível afirmar que os valores de frequências encontrados em cada análise (primária e secundária) sejam efetivamente o ruído de *Squeal*.

4.3. Quantificação da vibração

Com a finalidade de atribuir um nível de vibração a cada material, estes são analisados segundo sua potência RMS. O valor RMS (*Root Mean Square*) de um conjunto de valores é a raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos valores originais. Com esse parâmetro é avaliado o nível de energia de vibração presente no ensaio de cada amostra.

Os valores de RMS do sinal no domínio do tempo servem exclusivamente para realizar uma classificação do nível do ruído produzido por cada amostra.

4.3.1. Classificação do nível de vibração

Realizou-se uma classificação das amostras segundo o nível de vibração em 4 momentos diferentes: assentamento e caracterização da “Análise Primária” e assentamento e caracterização da “Análise Secundária”. Na Tabela 4.6 são apresentados os valores obtidos.

Tabela 4.6 – Classificações das amostras segundo o nível de vibração (ordem decrescente de ruído).

Nome da Pastilha	Nível de RMS na “Análise Primária” (m/s ²)		Nível de RMS na “Análise Secundária” (m/s ²)	
	Assentamento	Caracterização	Assentamento	Caracterização
Original	4,85 (1º)	3,98 (2º)	4,35 (1º)	2,20 (2º)
Reposição 1	1,44 (4º)	1,20 (4º)	1,38 (3º)	1,08 (4º)
Reposição 2	2,14 (3º)	2,01 (3º)	1,23 (4º)	1,98 (3º)
Reposição 3	4,02 (2º)	4,13 (1º)	4,23 (2º)	4,36 (1º)

Como o estado final das pastilhas de freio utilizadas em veículo é equivalente ao estado da fase de caracterização, os gráficos do Apêndice III apresentam os resultados dessa fase, apenas.

4.4. Determinação de qualidade - Indicador Q

Para criar um indicador de qualidade das pastilhas de freio, é importante considerar elementos tais como atrito e desgaste na parte do desempenho e valores RMS para ponderar a vibração produzida pelas pastilhas. No presente trabalho, foram utilizados os dados de desgaste (Tab 4.7) medidos e apresentados por Krummel, 2014, cujo autor baseou-se nos mesmos experimentos aqui tratados.

Tabela 4.7 – Perda de massa obtida pelas amostras [Adaptado: Krummel, 2014].

Características de desempenho	Original	Reposição 1	Reposição 2	Reposição 3
Desgaste sob as condições do ensaio [g]	0,37	0,16	0,29	0,36

Conforme a literatura da área [Rabinowicz, 1995; Sextro, 2007], é esperado que o desgaste seja maior nos materiais cujo atrito é mais elevado, e menor naqueles que apresentam menor atrito, uma vez que a mesma força normal foi empregada em todos ensaios.

Tanto os valores de atrito e desgaste quanto RMS foram incluídos na equação criada, que determina o valor do chamado Indicador Q (Equação 6.1). Esse indicador avalia de forma numérica a qualidade da pastilha, ponderando desempenho e ruído (vibração). Devido às diferenças unitárias de cada parâmetro (desgaste, atrito e ruído), é preciso fazer a normalização (escala de 1 a 10) com a finalidade de obter valores adimensionais para serem inseridos na Equação 6.1. O único parâmetro diretamente proporcional à qualidade é colocado no numerador da equação, enquanto os parâmetros inversamente proporcionais (desgaste e vibração RMS) são colocados no denominador.

$$Q = \frac{\mu}{(D+RMS)} [adm] \quad (6.1)$$

Onde:

- μ : Média global do coeficiente de atrito, normalizado [adm] (Tabela 4.1)
- D: Desgaste do material, normalizado [adm], (Tabela 4.7)
- RMS: Valor de RMS na caracterização da Análise Secundária, normalizado [adm] (Tabela 4.6)

A função do indicador Q é a de ajudar na escolha de um material, baseando-se especialmente na qualidade, dando-se preferência aos materiais com maior coeficiente de atrito e menores taxas de desgaste e vibração (RMS). Portanto, considerando pesos equivalentes e sem considerar o custo das pastilhas, o material mais satisfatório em relação à qualidade será aquele com maior Q (Tabela 4.8).

Tabela 4.8 – Dados a introduzir na equação do indicador Q de cada pastilha e resultado (ordem decrescente de Q).

	Original	Reposição 1	Reposição 2	Reposição 3
Desgaste [g]	0,37	0,16	0,29	0,36
Desgaste normalizado [adm]	10,00	4,32	7,84	9,73
Média global do coeficiente de atrito [adm]	0,41	0,28	0,37	0,33
Média global do coeficiente de atrito normalizado [adm]	10,00	6,95	9,12	8,15
RMS [m/s ²]	2,2	1,08	1,98	4,36
RMS normalizado [adm]	5,05	2,48	4,54	10
Indicador Q [adm]	0,66 (3°)	1,02 (1°)	0,74 (2°)	0,41 (4°)

4.5. Relação geral de dados de desempenho, ruído e custo

Na tabela 4.9 é apresentada uma relação de dados tanto de desempenho das amostras, quanto de ruído produzido no seu ensaio e o custo das pastilhas, com a finalidade de interpretar todos esses parâmetros de maneira simultânea em cada pastilha.

Tabela 4.9 – Quadro de dados de desempenho e ruído de cada pastilha.

Pastilha	Original		Reposição 1		Reposição 2		Reposição 3	
	Assentamento	Caracterização	Assentamento	Caracterização	Assentamento	Caracterização	Assentamento	Caracterização
RMS médio na análise primária [m/s ²]	4,85	3,98	1,44	1,20	2,14	2,01	4,02	4,13
RMS médio na análise secundária [m/s ²]	4,35	2,20	1,38	1,08	1,23	1,98	4,23	4,36
Possíveis tipos de ruído na caract. (“Análise Primária”)	<i>Bus Noise, Creep Groan, Groan, Moan e Judder</i>		<i>Bus Noise, Creep Groan, Groan, Moan e Judder</i>		<i>Bus Noise, Creep Groan, Groan, Moan, Judder e Squeal</i>		<i>Bus Noise, Creep Groan, Groan, Moan, Judder e Squeal</i>	
Possíveis tipos de ruídos na caract. (“Análise Secundária”)	<i>Squeal</i>		-		<i>Squeal</i>		<i>Squeal</i>	
Média global do coeficiente de atrito [adm]	0,410		0,285		0,374		0,334	
Desgaste [g] [Krummel, 2014]	0,37		0,16		0,29		0,36	
Indicador Q [adm]	0,66		1,02		0,74		0,41	
Custo da pastilha [R\$]	283		106		92		85	

A pastilha “Reposição 1” se apresenta como a primeira pastilha na classificação de qualidade, com valor de indicador Q de 1,02. Possui o menor valor médio de atrito (0,28), embora também sofra o menor desgaste (16 g). Ao ser a pastilha “menos ruidosa” ($RMS=1,08m/s^2$), é favorecida na hora de ser avaliada. Seu custo de R\$106,00 a situa como uma boa escolha na hora de optar por uma pastilha não ruidosa, com escasso desgaste, mas de baixo atrito.

A pastilha “Reposição 2” não se destaca em nenhum quesito, possuindo bons valores de atrito e desgaste (0,37 e 0,29 g respectivamente) e valores aceitáveis de vibração RMS (1,98 m/s^2). Seu indicador de qualidade ($Q = 0,74$) a situa como segunda pastilha na classificação. Entretanto, seu preço de R\$92,00 pode ser visto como fator positivo.

Considerando o atrito como parâmetro mais importante do desempenho das pastilhas, tem-se que a pastilha “Original” apresenta o melhor resultado, com valor de 0,41. Porém, com 0,37 g de perda de massa, oferece os piores resultados no quesito desgaste. Esses dois parâmetros, junto com a taxa de vibração (RMS) de 2,20 m/s^2 , posicionam-na como terceira pastilha na classificação de qualidade ($Q = 0,66$). No entanto, seu elevado custo (R\$283,00) pode ser um fator negativo na hora da escolha.

A mais ruidosa de todas, a pastilha “Reposição 3” (4,36 m/s^2 de RMS), aporta do mesmo modo um elevado valor de desgaste (0,36 g) e um mediano 0,33 de atrito. Estes valores a situam como a última pastilha na classificação de qualidade, com um valor de indicador Q de 0,40. Contudo, seu custo é o menor (R\$85,00).

5. CONCLUSÕES

- Foi explicada a necessidade de uma segunda análise de processamento de dados de frequência devido às frequências, possivelmente ressonantes, encontradas.
- Analisou-se o atrito em cada fase: assentamento, *fade* e caracterização. Do mesmo modo, foi obtida uma classificação do valor médio do coeficiente de atrito das pastilhas. A classificação segundo o atrito em ordem decrescente foi a seguinte: 1°) “Original”, 2°) “Reposição 2”, 3°) “Reposição 3” e 4°) “Reposição 1”.
- Foi analisado o ruído de cada material, por meio da frequência e a vibração RMS. Cada pastilha foi classificada segundo seu nível de vibração RMS, e foram sugeridos os possíveis tipos de ruído produzidos por cada amostra. A classificação das pastilhas segundo a taxa de vibração RMS em ordem decrescente foi: 1°) “Reposição 3”, 2°) “Original”, 3°) “Reposição 2” e 4°) “Reposição 1”.
- Criou-se um indicador de qualidade Q, com a finalidade de avaliar quantitativamente cada pastilha segundo sua qualidade, baseando-se nos parâmetros de atrito, desgaste e vibração RMS. A classificação segundo a qualidade em ordem decrescente ficou da seguinte maneira: 1°) “Reposição 1”, 2°) “Reposição 2”, 3°) “Original” e 4°) “Reposição 3”.
- Cada pastilha foi avaliada qualitativamente de maneira individual, analisando todos os parâmetros presentes nela, incluindo o custo, com a finalidade de ajudar na escolha de um material segundo os parâmetros avaliados (atrito, desgaste, RMS e custo).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BREUER, BERT; BILL, KARLHEINZ ”**Bremsenhandbuch – Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fahrdynamik**”; 2. Auflage, ATZ-MTZ-Fachbuch, Vieweg Verlag, 2004

DESPLANQUES, Y., ROUSSETTE, O.; DEGALLAIX, G.; COPIN, R.; BERTHIER, Y. “**Analysis of tribological behaviour of paddisc contact in railway braking**”. Part 1. Laboratory test development, compromises between actual and simulated tribological triplets” Wear 262, pp. 582-591, 2007.

DÍAZ, V.; GAUCHIA, A.; GARCÍA-POZUELO D.; LÓPEZ, B.; LÓPEZ, M.J.; OLMEDA, E.; FUENTES, J. “**Automóviles y ferrocarriles**”, Universidad Nacional de Educación a Distancia, 1st edition, p. 151-167, 2011.

FRANCESCHINI, J. “**Avaliação do fenômeno de Stick-Slip em materiais de fricção com utilização de um tribômetro**”. Dissertação de mestrado, 104 páginas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

FUADI, Z., MAEGAWA, S, NAKAMO, K., ADACHI, K. “**Map of low frequency stick-slip of a creep groan**”. Journal of Engineering Tribology, pp. 1235-1246, 2010.

HONEYWELL, “**Tecnologia de pastilhas de freio**”, disponível em: <http://www.bendixbr.com.br/tecnologia-pastilhas-freio-jurid-bendix/>, 2013.

INMETRO. **Histórico do INMETRO**. Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/inmetro/historico.asp>> acessado em 25 outubro de 2014.

KAWAGUCHI, H. “**Comparação da análise de conforto de frenagem subjetiva x objetiva de um veículo de passeio**”, Engenharia automotiva, Trabalho de Conclusão de Curso, pp 18, 2005. Universidade de São Paulo

KINKAID, N. M.; O'REILLY, O. M.; PAPADOPOULOS, P. “**Automotive Disc Brake Squeal**”. Journal of Sound and Vibration, Berkeley, n.267, p.105-166, 2003

KRUMMEL, D. C. “**Análise de desempenho entre pastilhas de freio do mercado de reposição e original**”, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

LIMPERT, R. “**Brake design and safety**”. 2. Ed. Warrendale - EUA: SAE International, 1999.

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

NEIS, P. D., “**Projeto e construção de um tribômetro com controle independente da temperatura do disco**”. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

NEIS, P. D., FERREIRA, N.F. “**Overview sobre ruído Stick-Slip e Squeal em freios**”, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

NEIS, P. D., FERREIRA, N.F., POLETTO, J. C., **“Comparative Evaluation between Original and After-market Brake Pads”**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

NICHOLSON, G., **“Facts About Friction”**, Gedoran, United Kingdom, 1995.

RABINOWICZ, R.; **Friction and Wear of Materials**, 2nd ed., Wiley, New York, 1995

RHEE, S. K., TSANG, H. S. e WANG, Y. S. **“Friction-Induced Noise and Vibration os Disc Brakes”**, Wear Vol. 133, pag 39, 1989.

SEXTRO, W, **Dynamical Contact Problems with Friction: Models, Methods, Experiments and Application**, 2nd ed., Springer, 2007.

TRICHES, M. Jr., GERGES S. N. Y. and JORDAN, R. **“Reduction of Squeal noise from disc brake systems using constrained layer damping”**, 2004.

UC3M, **“Teoría de vehículos”**, apontamentos da matéria, 2010

Yoon, S. W., Shin, M. W., W. G. Lee, Jang, H. **“Effect of surface contact conditions on the stick-slip behavior of brake friction material”** Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul, South Korea, 2012.

NORMAS

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, **“Portaria nº 55”**, Rio de Janeiro, 2014.

EUROPE. Regulation nº 90 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE). **“Uniform provisions concerning the approval of replacement brake lining assemblies and drum brake linings for power-driven vehicles and their trailers”**, Oct. 2009.

ISO 26867, Road vehicles -- Brake lining friction materials -- **Friction behaviour assessment for automotive brake systems**, 2009

SAE J2521, **Disc and Drum Brake Dynamometer Squeal Noise Test Procedure**

UNITED STATES. Department of Transportation. National Highway Traffic Safety Administration. **“Part 571. Standard 135. Federal Motor Vehicle Safety Standards”**, 1999.

Apêndice I – Gráficos de *fade*

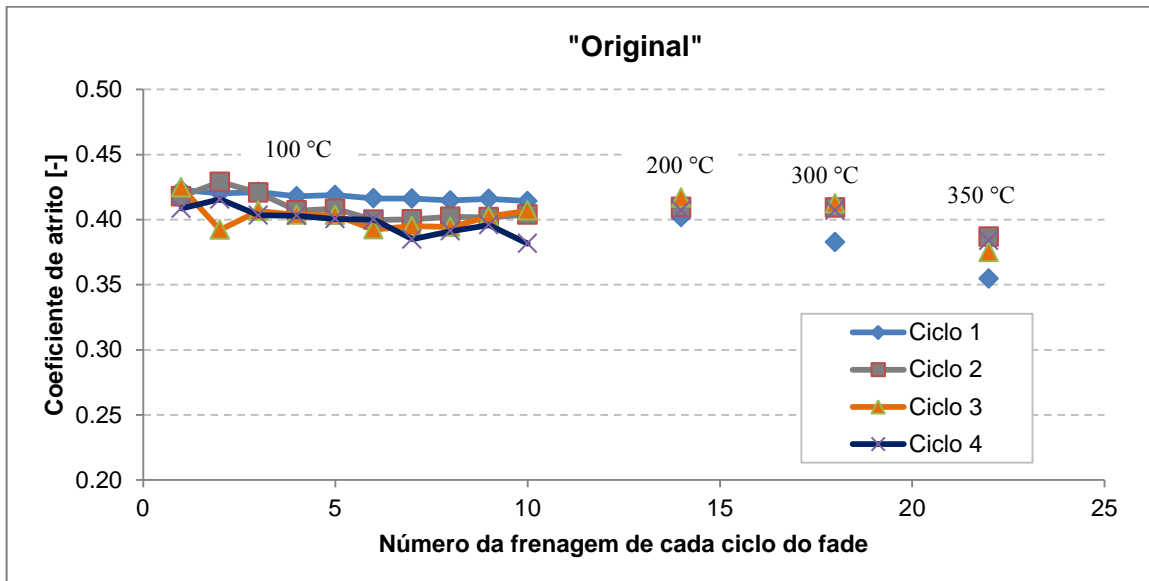


Gráfico do coeficiente de atrito versus temperatura em cada ciclo da fase do *fade* da pastilha "Original".

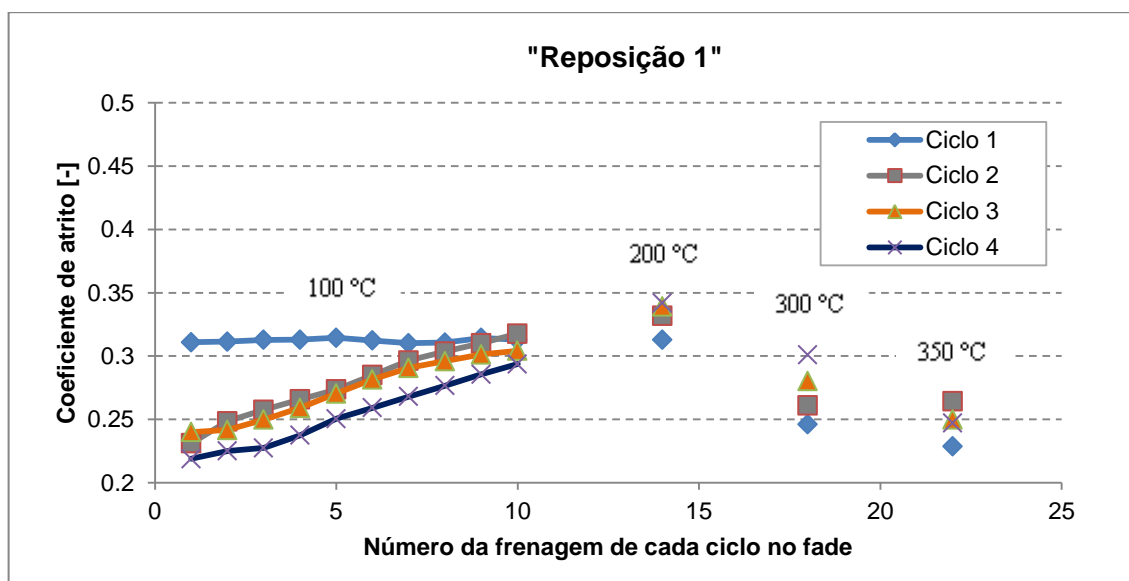


Gráfico do coeficiente de atrito versus temperatura em cada ciclo da fase do *fade* da pastilha "Reposição 1".

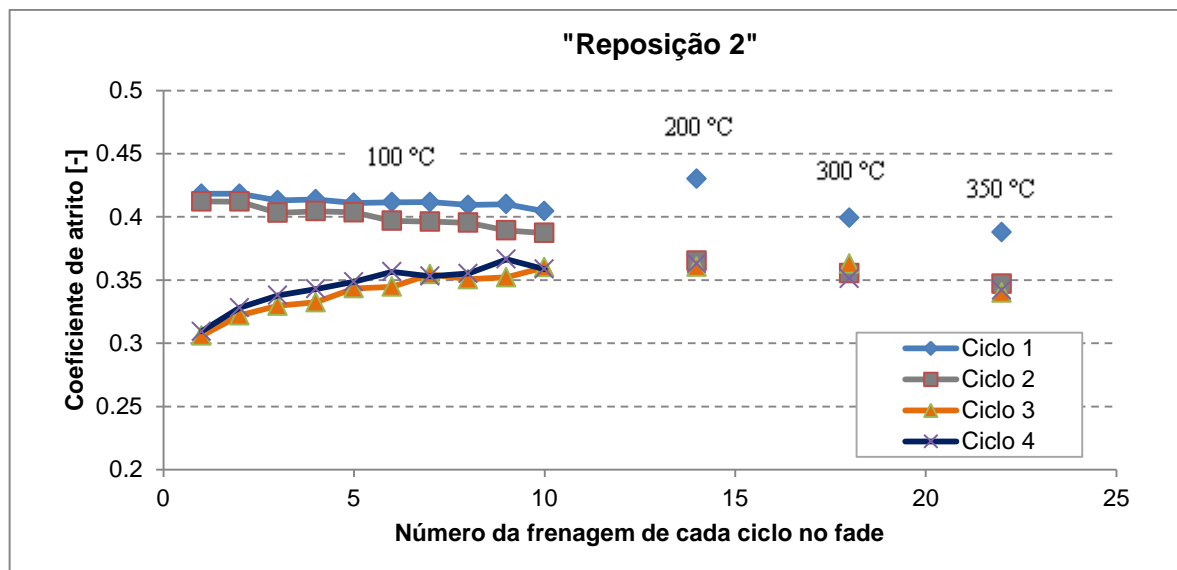
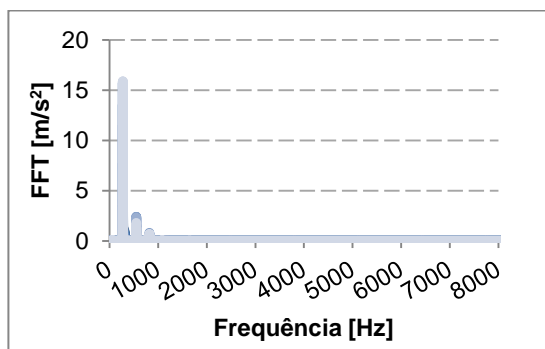
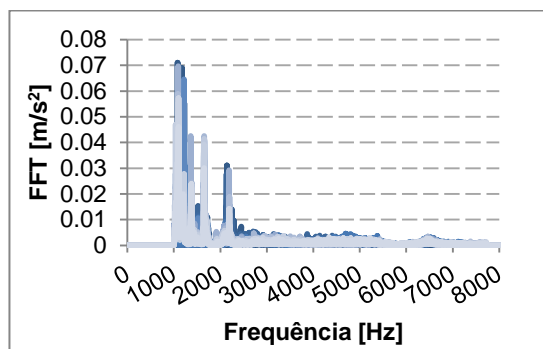


Gráfico do coeficiente de atrito versus temperatura em cada ciclo da fase do *fade* da pastilha "Reposição 2".

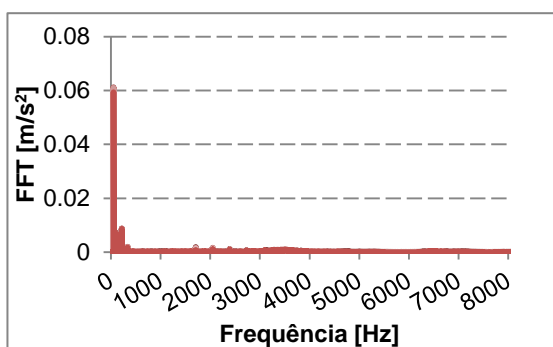
Apêndice II – Gráficos do espectro de frequência.



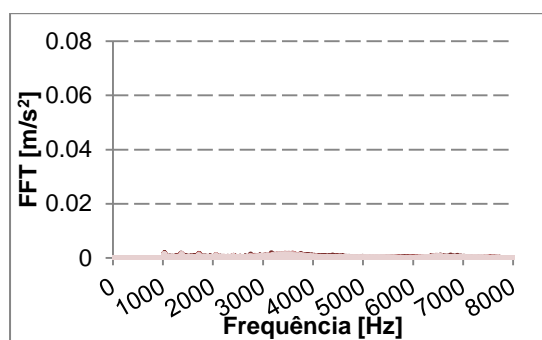
Espectro de frequências da pastilha "Original" na caracterização da análise primária.



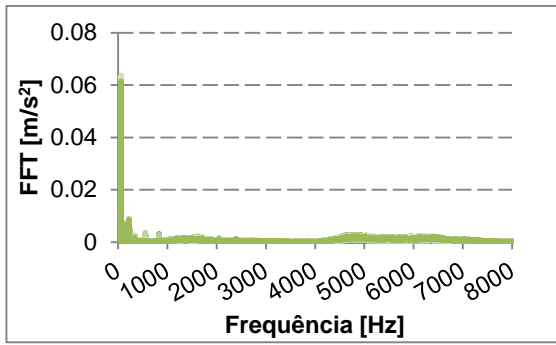
Espectro de frequências da pastilha "Original" na caracterização da análise secundária.



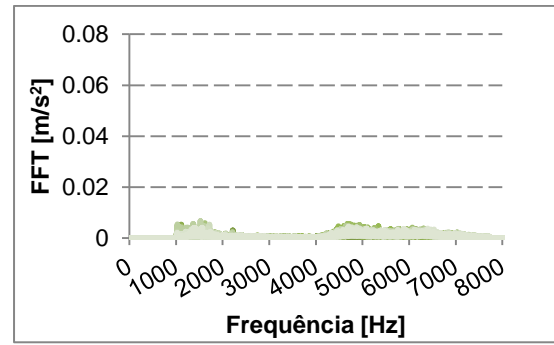
Espectro de frequências da pastilha "Reposição 1" na caracterização da análise primária.



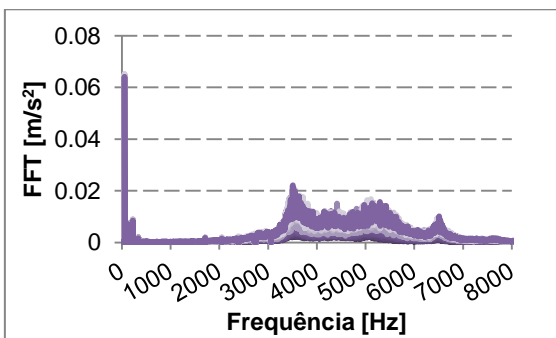
Espectro de frequências da pastilha "Reposição 1" na caracterização da análise secundária.



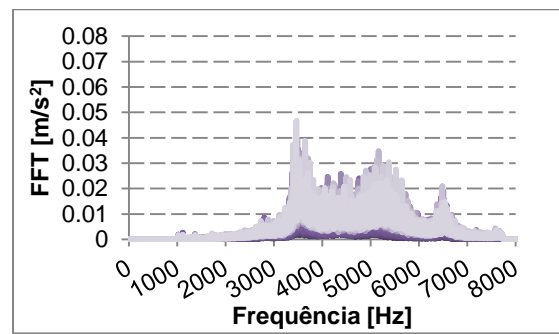
Espectro de frequências da pastilha “Reposição 2” na caracterização da análise primária.



Espectro de frequências da pastilha “Reposição 2” na caracterização da análise secundária.



Espectro de frequências da pastilha “Reposição 3” na caracterização da análise primária.



Espectro de frequências da pastilha “Reposição 3” na caracterização da análise secundária.

Apêndice III – Gráficos RMS

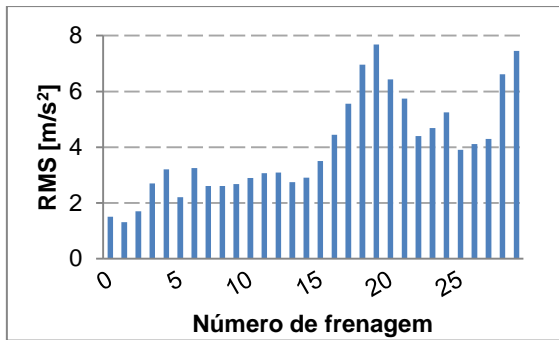


Gráfico RMS da pastilha original na fase de caracterização da análise primária.

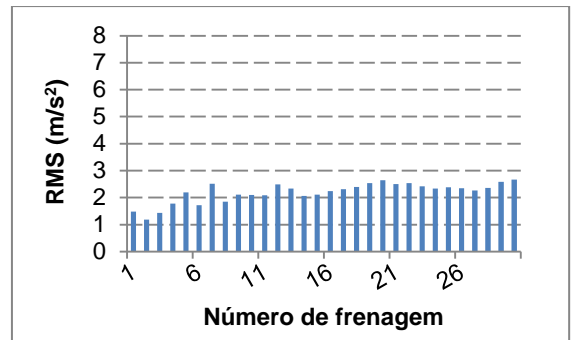


Gráfico RMS da pastilha original na fase de caracterização da análise secundária.

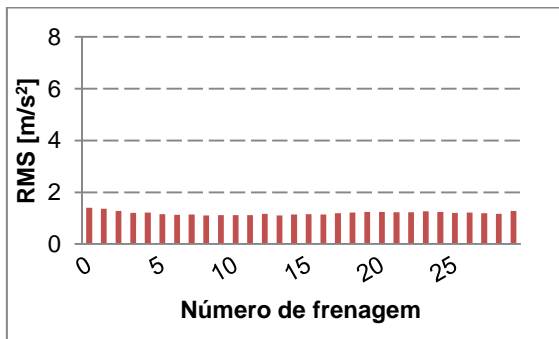


Gráfico RMS da pastilha "Reposição 1" na fase de caracterização da análise primária.

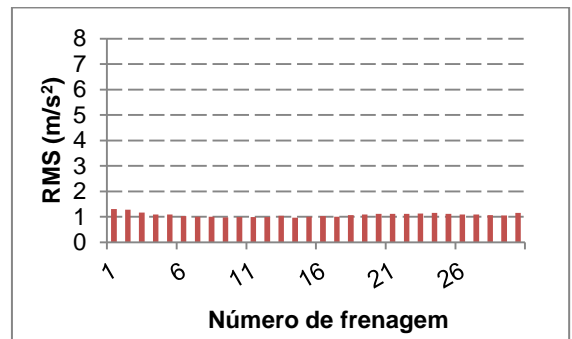


Gráfico RMS da pastilha "Reposição 1" na fase de caracterização da análise secundária.

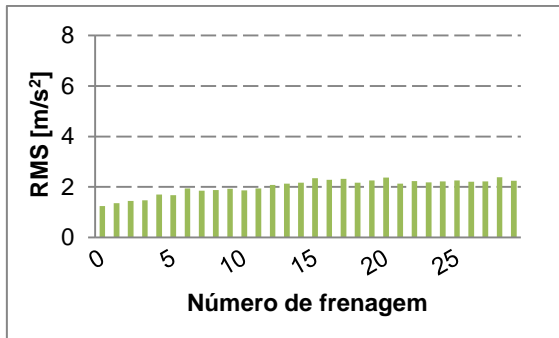


Gráfico RMS da pastilha "Reposição 2" na fase de caracterização da análise primária.

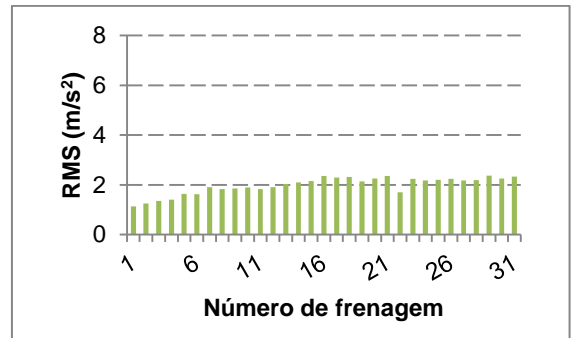


Gráfico RMS da pastilha "Reposição 2" na fase de caracterização da análise secundária.

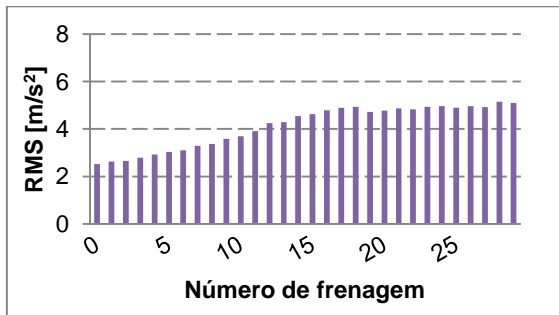


Gráfico RMS da pastilha "Reposição 3". na fase de caracterização da análise primária.

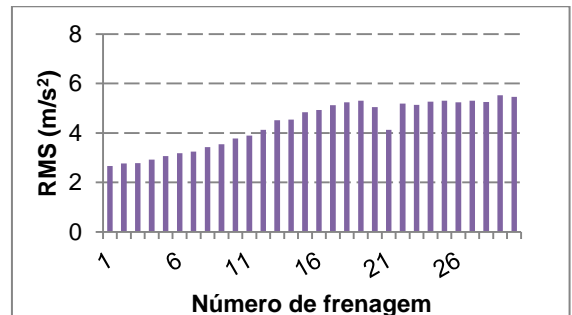


Gráfico RMS da pastilha "Reposição 3" na fase de caracterização da análise secundária.

