

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

**DIOVANE DE CASTRO DA SILVA**

**DESENVOLVIMENTO DE ENSAIO DINAMOMÉTRICO EM ESCALA REDUZIDA**  
**PARA SISTEMA DE FREIO DE SAPATA FERROVIÁRIA**

**CAXIAS DO SUL**

**2019**

**DIOVANE DE CASTRO DA SILVA**

**DESENVOLVIMENTO DE ENSAIO DINAMOMÉTRICO EM ESCALA REDUZIDA  
PARA SISTEMA DE FREIO DE SAPATA FERROVIÁRIA**

Trabalho de conclusão do curso, apresentada à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Controle de Sistemas Mecânicos.

Orientador: Prof. Me. Victor Hugo Velasquez Acosta

**CAXIAS DO SUL**

**2019**

**DIOVANE DE CASTRO DA SILVA**

**DESENVOLVIMENTO DE ENSAIO DINAMOMÉTRICO EM ESCALA REDUZIDA  
PARA SISTEMA DE FREIO DE SAPATA FERROVIÁRIA**

Trabalho de conclusão do curso, apresentada à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Controle de Sistemas Mecânicos.

**Aprovado em:** 20 / 11 / 2019.

**Banca Examinadora**

Prof. Me. Victor Hugo Velasquez Acosta  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Sérgio da Silva Kucera  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Adelair Lino Colombo  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Celso (*in memorian*) e Joseli e aos demais familiares pelos ensinamentos que proporcionaram o meu crescimento pessoal e moldaram o meu caráter, seguindo valores de ética, respeito e humildade.

A minha esposa Roberta, aos filhos Henrique e Valentina, pelo incentivo e compreensão desta etapa de formação acadêmica, muitas vezes sendo privados de minha presença, mas acima de tudo companheiros nessa trajetória.

Aos meus amigos e colegas profissionais, que de alguma forma deram sua parcela de contribuição.

À empresa FRAS-LE que proporcionou a realização desse projeto.

Agradeço, em especial, ao professor Victor Hugo, pelo crédito e orientação no desenvolvimento deste trabalho.

## RESUMO

Este trabalho destinou-se ao desenvolvimento de ensaio em escala reduzida para um sistema de freio de sapata ferroviária, e para tal foram realizadas pesquisas bibliográficas sobre os fenômenos de ensaios em escala, construindo alternativa de protótipo e analisando sua aplicabilidade em testes realizados em dinamômetros inerciais. Foram realizados ensaios baseados na Norma AAR M-926/2015 em sistema de freio protótipo, com adequação de parâmetros e do equipamento de ensaio, para permitir correlação com a escala real. Os parâmetros correlacionados foram a velocidade, a carga e a força de atuação. Para simulação em escala reduzida foi utilizada a mesma velocidade de escorregamento e a mesma pressão específica de contato do conjunto sapata de freio/roda. Nos ensaios realizados, percebeu-se que os resultados do coeficiente de atrito foram compatíveis para o material que utiliza resina seca na sua composição, enquanto que o material com resina líquida apresentou valores menores, influenciado pelo maior aquecimento do disco de freio. Buscou-se manter a mesma temperatura entre os ensaios, porém essa foi a principal dificuldade encontrada. De forma geral, o trabalho apresentou resultados satisfatórios no atendimento aos objetivos propostos.

**Palavras-chave:** Sapata ferroviária. Dinamômetro inercial. Ensaio em escala.

## ABSTRACT

This work was aimed at the development of a small scale test for a railway shoe brake system. Bibliographic research on the scale test phenomena was carried out, building a prototype alternative and analysing its applicability in tests performed on inertial dynamometers. Tests were performed base on AAR Standard M-926/2015 in prototype brake system, with adequacy of parameters and test equipment, to allow correlation with the actual scale. The correlated parameters were speed, load and acting force. For reduced-scale simulation, the same slip speed and specific contact pressure of the brake shoe/whell assembly was used. In the tests performed, it was noticed that results of the coeficiente of friction were compatible for the material that uses dry resine in its composition, while the material with liquid resine presented lower values, influenced by the higher brake disc heating. Tried to maintain the same temperature between trials, but this was the main difficulty encountered. In general, the work presented satisfactory results in meeting the proposed objectives.

**Keywords:** Railway shoe. Inertial dynamometer. Scale test.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Esquema simplificado do freio a ar automático .....                    | 16 |
| Figura 2 – Cilindro alavanca, contra sapata e sapata .....                        | 16 |
| Figura 3 – Sapata de freio ferroviário .....                                      | 17 |
| Figura 4 – Forças que atuam nas rodas durante a frenagem .....                    | 21 |
| Figura 5 – Distribuição de temperatura de uma roda .....                          | 26 |
| Figura 6 – Roda ferroviária com manchas térmicas .....                            | 27 |
| Figura 7 – Esquema de um dinamômetro inercial .....                               | 28 |
| Figura 8 – Dinamômetro inercial em escala real .....                              | 29 |
| Figura 9 – Máquina de ensaio Fast .....   | 31 |
| Figura 10 – Máquina de ensaio Chase .....   | 31 |
| Figura 11 – Máquina de ensaio Krauss .....  | 32 |
| Figura 12 – Fluxograma de materiais e métodos .....                               | 34 |
| Figura 13 – Sistema de freio automotivo .....                                     | 35 |
| Figura 14 – Disco de freio maciço de aço 1065 .....                               | 36 |
| Figura 15 – Amostra do material de atrito retirada da sapata ferroviária .....    | 36 |
| Figura 16 – Dinamômetro inercial para ensaio em escala reduzida .....             | 37 |
| Figura 17 – Resultado dos ensaios de rampa pesada para o material NAF/049 .....   | 41 |
| Figura 18 – Temperatura dos ensaios de rampa pesada para o material NAF/049 ..... | 41 |
| Figura 19 – Resultado dos ensaios de parada leve para o material NAF/049 .....    | 42 |
| Figura 20 – Fotografia das amostras após ensaio em escala reduzida .....          | 42 |
| Figura 21 – Resultado dos ensaios de rampa pesada para o material AF/557 .....    | 43 |
| Figura 22 – Temperatura dos ensaios de rampa pesada para o material AF/557 .....  | 43 |
| Figura 23 – Resultado dos ensaios de parada leve para o material AF/557 .....     | 44 |
| Figura 24 – Fotografia das amostras após ensaio em escala reduzida .....          | 44 |
| Figura 25 – Amostras originais após ensaio em escala real .....                   | 45 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 1 – Classificação das rodas ferroviárias segundo a utilização .....    | 20 |
| Quadro 2 – Comportamento da sapata de freio conforme parâmetros da roda ..... | 33 |



## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Características de diversas sapatas de freio .....        | 19 |
| Tabela 2 – Composição química do aço das rodas ferroviárias .....    | 20 |
| Tabela 3 – Especificação de dureza das rodas ferroviárias .....      | 20 |
| Tabela 4 – Especificação do disco de freio para escala reduzida..... | 35 |
| Tabela 5 – Dados técnicos do dinamômetro 2470.....                   | 37 |
| Tabela 6 – Procedimento de ensaio adaptado da AAR M-926/2015.....    | 38 |
| Tabela 7 – Dados comparativos entre os sistemas de freio .....       | 39 |
| Tabela 8 – Valores das velocidades correlacionadas .....             | 40 |
| Tabela 9 – Valores das forças correlacionadas .....                  | 40 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|      |  |
|------|--|
| AAR  | <i>Association of American Railroads</i> |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| RBC  | Rede Brasileira de Calibração            |
| UIC  | <i>International Union of Railways</i>   |

## SUMÁRIO

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                    | <b>12</b> |
| 1.1      | AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO .....              | 12        |
| 1.2      | JUSTIFICATIVA DO TRABALHO .....                            | 13        |
| 1.3      | OBJETIVOS.....   | 13        |
| 1.3.1    | <b>Objetivo geral.....</b>                                 | <b>13</b> |
| 1.3.2    | <b>Objetivos específicos.....</b>                          | <b>14</b> |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>                          | <b>15</b> |
| 2.1      | TIPOS DE SISTEMA DE FREIO FERROVIÁRIO.....                 | 15        |
| 2.1.1    | <b>Freio a ar direto .....</b>                             | <b>15</b> |
| 2.1.2    | <b>Freio a ar automático .....</b>                         | <b>15</b> |
| 2.2      | FREIO DE ATRITO NA SUPERFÍCIE DE ROLAMENTO DA RODA.....    | 16        |
| 2.3      | MATERIAL DE ATRITO DA SAPATA DE FREIO .....                | 17        |
| 2.3.1    | <b>Composição dos materiais de atrito .....</b>            | <b>17</b> |
| 2.3.2    | <b>Características do material de atrito .....</b>         | <b>18</b> |
| 2.4      | CARACTERÍSTICAS DAS RODAS .....                            | 19        |
| 2.4.1    | <b>Material das rodas .....</b>                            | <b>19</b> |
| 2.5      | FORÇAS ATUANTES NO PROCESSO DE FRENAGEM .....              | 21        |
| 2.5.1    | <b>Força de frenagem .....</b>                             | <b>21</b> |
| 2.5.2    | <b>Taxa de frenagem .....</b>                              | <b>22</b> |
| 2.5.3    | <b>Força de desaceleração.....</b>                         | <b>22</b> |
| 2.5.4    | <b>Taxa de desaceleração .....</b>                         | <b>23</b> |
| 2.6      | VARIÁVEIS QUE AFETAM O ATRITO E O DESGASTE.....            | 23        |
| 2.6.1    | <b>Mecanismos de desgaste e atrito.....</b>                | <b>23</b> |
| 2.6.2    | <b>Velocidade de escorregamento .....</b>                  | <b>24</b> |
| 2.6.3    | <b>Pressão específica de contato .....</b>                 | <b>25</b> |
| 2.6.4    | <b>Temperatura .....</b>                                   | <b>25</b> |
| 2.7      | DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA NA RODA.....                   | 26        |
| 2.8      | DINAMÔMETRO PARA ENSAIOS DE RODAS E SAPATAS DE FREIO ..... | 27        |
| 2.8.1    | <b>Características do dinamômetro inercial .....</b>       | <b>27</b> |
| 2.8.2    | <b>Sistema de comando e aquisição de dados .....</b>       | <b>29</b> |
| 2.8.3    | <b>Instrumentação e calibração.....</b>                    | <b>30</b> |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.9      | PROCEDIMENTO DE ENSAIO .....  | 30        |
| 2.10     | ENSAIO EM ESCALA REDUZIDA .....                                     | 30        |
| 2.11     | CORRELAÇÃO DE ENSAIOS .....   | 32        |
| 2.12     | INTERAÇÕES ENTRE OS FENÔMENOS EM ESCALA .....                       | 33        |
| <b>3</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                                     | <b>34</b> |
| 3.1      | MATERIAIS .....   | 34        |
| 3.1.1    | Sistema de freio para teste em escala reduzida.....                 | 34        |
| 3.1.2    | Disco de freio simulando a roda ferroviária .....                   | 35        |
| 3.1.3    | Amostra do material de atrito .....                                 | 36        |
| 3.1.4    | Equipamento para ensaio em escala reduzida .....                    | 37        |
| 3.1.5    | Instrumentação do ensaio em dinamômetro .....                       | 38        |
| 3.2      | MÉTODOS.....  | 38        |
| 3.2.1    | Procedimento de ensaio para escala reduzida .....                   | 38        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                                | <b>39</b> |
| 4.1      | CORRELAÇÃO ENTRE AS VELOCIDADES .....                               | 39        |
| 4.2      | CORRELAÇÃO ENTRE AS FORÇAS DE ATUAÇÃO.....                          | 40        |
| 4.3      | RESULTADO DOS ENSAIOS PARA O MATERIAL NAF/049 .....                 | 41        |
| 4.4      | RESULTADO DOS ENSAIOS PARA O MATERIAL AF/557 .....                  | 43        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES.....</b>  | <b>46</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>47</b> |
|          | <b>APÊNDICE A – MEMÓRIA DE CÁLCULO CORRELAÇÃO VELOCIDADE .</b>      | <b>50</b> |
|          | <b>APÊNDICE B – MEMÓRIA DE CÁLCULO CORRELAÇÃO FORÇA .....</b>       | <b>51</b> |
|          | <b>APÊNDICE C – DADOS DO GRÁFICO DA FIGURA 17 .....</b>             | <b>52</b> |
|          | <b>APÊNDICE D – DADOS DO GRÁFICO DA FIGURA 18.....</b>              | <b>53</b> |
|          | <b>APÊNDICE E – DADOS DO GRÁFICO DA FIGURA 19 .....</b>             | <b>54</b> |
|          | <b>APÊNDICE F – DADOS DO GRÁFICO DA FIGURA 21 .....</b>             | <b>55</b> |
|          | <b>APÊNDICE G – DADOS DO GRÁFICO DA FIGURA 22.....</b>              | <b>56</b> |
|          | <b>APÊNDICE H – DADOS DO GRÁFICO DA FIGURA 23.....</b>              | <b>57</b> |
|          | <b>ANEXO A – DADOS DA CALIBRAÇÃO DO DINAMÔMETRO .....</b>           | <b>58</b> |
|          | <b>ANEXO B – ESPECTROMETRIA DISCO DE FREIO EM ESC. REDUZIDA... </b> | <b>59</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente o transporte ferroviário de carga utiliza vagões com maior tonelagem por eixo, levando cada vez mais carga útil, melhorando a eficiência operacional. Porém, isso exige uma modernização no sistema de frenagem para suprir às exigências na diminuição do intervalo entre composições e o aumento da velocidade.

Os freios são dispositivos desenvolvidos para permitir o controle do movimento de rotação da roda de um veículo, máquina ou equipamento, de modo a retardar ou mesmo interromper esse movimento (DIULGHEROGLO, 2010).

O sistema de freio tipo sapata ferroviária atua diretamente sobre a superfície de rolamento da roda, efetuando o controle da transformação da energia cinética em térmica, que é dissipada na forma de calor.

No projeto de um sistema, especial atenção deve ser dada ao comportamento das sapatas de freio, com relação à variação do coeficiente de atrito em função da temperatura. O objetivo é manter o valor da temperatura abaixo da condição limite que os materiais construtivos dos componentes suportam, garantindo assim a integridade dos elementos envolvidos na frenagem, quando submetidos a condições severas de aquecimento.

O conhecimento dos parâmetros de comportamento do sistema de freio é importante, pois levando-os em conta juntamente com as características físicas e operacionais do trecho em questão, pode-se buscar maneiras de melhorar o desempenho de um determinado material rodante que opera nesse trecho (ROMANO, 2003).

### 1.1 AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

O estudo foi desenvolvido no Laboratório Físico do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da empresa Fras-le S/A. Para elaboração do trabalho tive contato direto com as áreas de Engenharias de Aplicação e do Produto.

A empresa Fras-le S/A oferece soluções a diversos segmentos do mercado de materiais de fricção, produzindo variada linha de itens através das suas unidades fabris espalhadas pelo mundo. Sua unidade matriz é situada em Caxias do Sul – RS, onde possui o moderno Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, com equipamentos capazes de garantir a qualidade exigida pelas principais montadoras de veículos e pelo mercado de reposição, possibilitando a geração de produtos com alta performance.

## 1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

A empresa Fras-le traz no seu planejamento estratégico o propósito de investir em tecnologia para o desenvolvimento de sapatas ferroviárias. Sua alta direção destaca:

Diante da expansão do setor metro ferroviário no país, com a construção de novas linhas para trens e metrô, e a demanda por produtos de alta performance, a Fras-le apresenta soluções desenvolvidas por sua especializada engenharia. Em seu Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, a empresa conta com dinamômetro destinado a testes para o mercado ferroviário, que a qualifica como fornecedora para o atendimento às rigorosas exigências do setor. A Fras-le é a única empresa privada no Brasil a possuir dinamômetro específico para testes deste segmento (EMPRESAS RANDON, 2015, p.01).

Para o desenvolvimento de novas sapatas ferroviárias o ensaio realizado em escala real no dinamômetro inercial torna-se muito demorado, atrasando em muito a obtenção dos resultados e, em casos não assertivos, o desprendimento de energia (mão de obra, hora máquina, insumos, tempo...) é considerável, acarretando em um custo financeiro elevado.

Com o intuito de minimizar esse impacto foi proposta a simulação do ensaio em escala reduzida. Essa inovação iria trazer benefícios ímpares para a empresa e o mercado, visto que o produto se tornaria mais competitivo. Buscar maior capacitação profissional e aptidões, me incentivaram a desenvolver esse trabalho com o empenho em demonstrar valor, qualificação e capacidade de contribuir de maneira destacada para a minha área de atuação.

Como a produção científica tem como objetivo apropriar-se da realidade para melhor analisá-la e, posteriormente, produzir transformações, a discussão sobre os ensaios em escala reduzida, além de aspecto prático muito relevante, reveste-se de importância para o meio acadêmico. Para o curso de Engenharia Mecânica e a área de conhecimento, pesquisas e trabalhos sobre ensaios sustentáveis na área ferroviária são cada vez mais necessários e pertinentes.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver ensaio dinamométrico em escala reduzida para caracterização de materiais de atrito aplicados a sapatas ferroviárias.

### 1.3.2 Objetivos específicos

Em complementação ao objetivo geral foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) compreender sobre ensaios em escala;
- b) comparar sistema de freio modelo *versus* protótipo;
- c) determinar as variáveis e os parâmetros que influenciam no processo;
- d) interpretar as interações dos fenômenos em escala reduzida;
- e) definir equipamento, testar sistemas e concluir resultados em escala reduzida.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Pode-se definir o freio de atrito como o dispositivo que converte em calor parte da energia cinética e potencial de um veículo, dissipando a energia para o meio ambiente (ROZA, 1989).

### **2.1 TIPOS DE SISTEMA DE FREIO FERROVIÁRIO**

O sistema de freio pneumático com a utilização de sapatas de material de atrito é o mais utilizado no transporte ferroviário de passageiros e cargas. Seu uso deve-se à enorme segurança no processo de frenagem, devido ao controle no processo de aplicação através de equipamentos eletrônicos e pela facilidade e baixo custo na geração e armazenamento do ar comprimido.

#### **2.1.1 Freio a ar direto**

O primeiro tipo de freio a ar direto foi desenvolvido por Westinghouse em 1869, sendo atualmente utilizado somente como freio auxiliar ao automático em ferrovias com fortes e longas rampas. Sua aplicação é de forma manual via alavanca, onde os cilindros de freio atuam forçando a sapata sobre a superfície de rolamento da roda. Pelo fato de ser manual possui a desvantagem de ser um sistema ultrapassado e limitado, não possuindo dispositivos antifalhas (ROMANO, 2003).

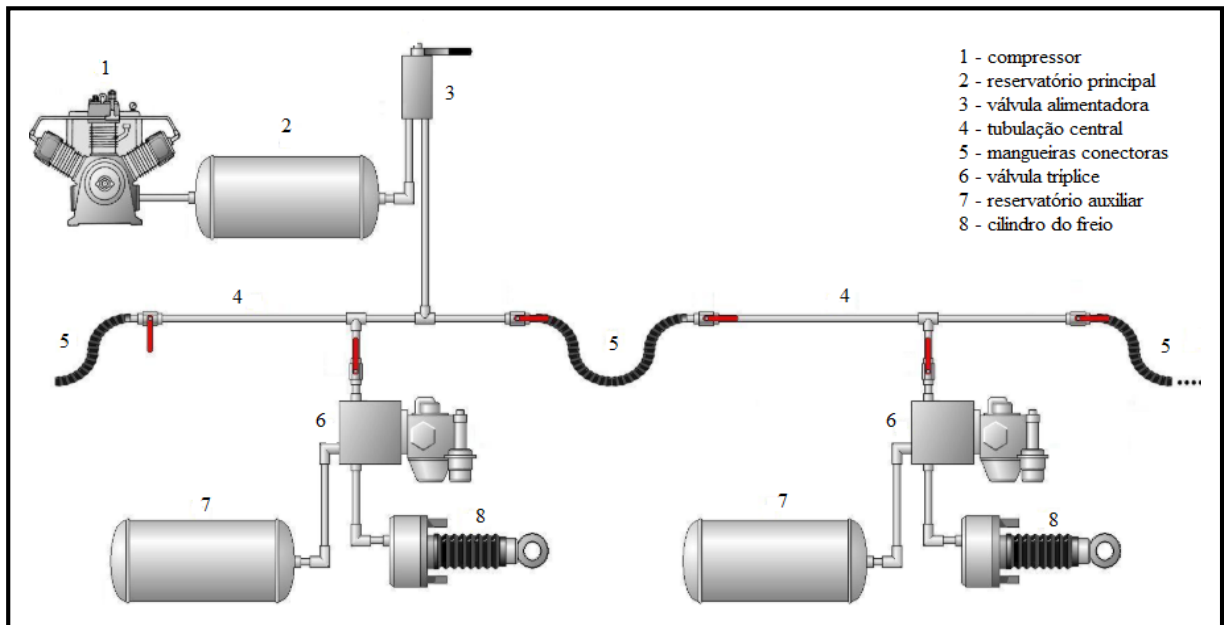
#### **2.1.2 Freio a ar automático**

Um grande avanço foi o desenvolvimento, pelo mesmo Westinghouse, em 1872, do freio a ar automático, que evoluiu durante os anos contemplando o compressor de ar, os reservatórios principal e auxiliar, as válvulas, as tubulações e mangueiras, o cilindro de freio e a timoneria (conjunto de alavancas mecânicas responsável pela transferência dos esforços), conforme ilustrado na Figura 1. Sua principal característica é a de atuação independente para cada truque, de forma automática e a prova de falha, garantindo segurança operacional. Também foi impulsionador da fabricação de trens mais longos, pois cada vagão carrega consigo reservatório auxiliar com o ar comprimido necessário para a sua própria frenagem. Além do



reservatório auxiliar, uma válvula de controle, conhecida como válvula tríplice, garante as funções básicas de carregamento do sistema, aplicação e alívio do freio (ROMANO, 2003).

Figura 1 - Esquema simplificado do freio a ar automático

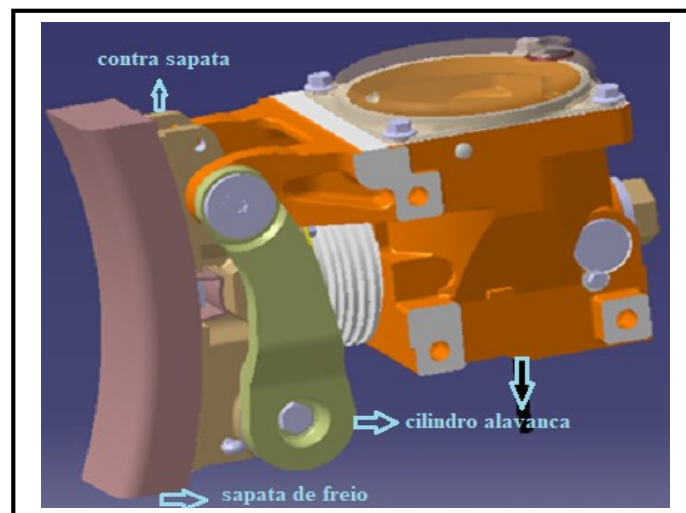


Fonte: Romano (2003)

## 2.2 FREIO DE ATRITO NA SUPERFÍCIE DE ROLAMENTO DA RODA

A Figura 2 mostra o sistema que as composições ferroviárias atuais utilizam para aplicação de frenagem diretamente na roda, através de um conjunto compacto de cilindro alavanca, contra sapata e sapata de freio.

Figura 2 - Cilindro alavanca, contra sapata e sapata de freio



Fonte: SAB Wabco (2004)

## 2.3 MATERIAL DE ATRITO DA SAPATA DE FREIO

Após a proibição da utilização do amianto no processo de fabricação de sapatas de freio, devido aos riscos à saúde, a indústria de materiais de fricção se reinventou na pesquisa e desenvolvimento de novos materiais para suprir às exigências do mercado e satisfazer às características de aplicações dos freios ferroviários. O tipo de material que mais se utiliza é o sintético, ilustrado na Figura 3 (SOUZA, 2004).

Figura 3 - Sapata de freio ferroviário



Fonte: o autor (2019)

### 2.3.1 Composição dos materiais de atrito

Basicamente os materiais de atrito são formado por três grupos de matérias-primas:

- a) as fibras: utilizadas como material atritante, devido à grande resistência em altas temperaturas, à corrosão e a ataques químicos;
- b) a resina: é o material aglutinante que garante boa estabilidade, dureza e resistência à compressão;
- c) os aditivos: usados como dissipadores de calor, lubrificantes, redutores de ruído e estabilizantes do coeficiente de atrito.

O segredo em desenvolver um material com qualidade está na manipulação dessas matérias-primas, ajustando os percentuais de seus principais componentes, acompanhado por método de processamento adequado (ROMANO, 2003).

### 2.3.2 Características do material de atrito

O desenvolvimento de um material de atrito utiliza o coeficiente de atrito como principal parâmetro de controle, pois seus valores podem variar de acordo com a necessidade especificada em cada projeto. “O coeficiente de atrito é o fator mais importante num material de atrito. Seu valor deve manter-se praticamente constante, para uma determinada faixa de temperatura” (ROMANO, 2003, p. 23).

O material de atrito deve apresentar outras características importantes para o seu perfeito funcionamento, destacando-se:

- a) *fade*: em temperaturas elevadas o material tende a reduzir o seu coeficiente de atrito e essa redução deve-se manter dentro de limites toleráveis para que não ocorra um baixo desempenho no momento da frenagem;
- b) recuperação: o coeficiente de atrito deve retornar ao seu valor inicial após passar por uma etapa de *fade*;
- c) resistência mecânica: os materiais de atrito devem possuir resistência mecânica suficiente para suportar os esforços;
- d) estabilidade dimensional: todo material de atrito aquecido e resfriado deve manter sua forma original;
- e) durabilidade: o desgaste do material de atrito é necessário para a renovação de sua superfície, porém deve ser mínimo para não comprometer sua durabilidade;
- f) conforto: o material de atrito não pode ser fonte geradora de ruído e vibrações, se possível deve minimizar esses efeitos no sistema de freio.

O efeito da temperatura é o maior implicador na redução de eficiência e aumento do desgaste em materiais de atrito. Esse efeito está diretamente associado às condições de utilização do conjunto de freio, que dependem do condutor e das condições do veículo. Quanto mais em condições severas o sistema de freio atuar, maior será sua perda de rendimento e vida útil (ROMANO, 2003).

A estabilidade do coeficiente de atrito é fator determinante no comportamento da frenagem, pois nem sempre um alto atrito é recomendado, já que paradas bruscas também representam perigo. A Tabela 1 mostra valores comparativos entre sapatas de freio de diferentes compósitos.

Tabela 1 - Características de diversas sapatas de freio

|                                  | Sapata de freio alto atrito | Sapata de freio baixo atrito | Sapata de freio em ferro fundido nodular | Sapata de freio especial |
|----------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--|--------------------------|
| Coefficiente de atrito ( $\mu$ ) | 0,25 - 0,37                 | 0,10 - 0,25                  | 0,10 - 0,25                              | 0,07 - 0,15              |
| Desgaste (relativo ao FoFo)      | 0,20 - 0,30                 | 0,20 - 0,30                  | 1  | 0,20                     |
| Cond. térmica (kW/mK)            | 0,12 - 0,29                 | 0,16 - 0,33                  | 0,46 - 0,62                              | 0,08 - 0,16              |
| Res. a compressão (MPa)          | 70 - 150                    | 70 - 200                     | 150 - 400                                | 100 - 250                |
| Dureza Shore (HS)                | 35 - 60                     | 35 - 60                      | 40 - 60                                  | 40 - 70                  |

Fonte: Adaptado de Souza (2004)

## 2.4 CARACTERÍSTICAS DAS RODAS

Característica única do sistema ferroviário, as rodas desempenham papel fundamental no sistema de freio, “as rodas têm a função primária de suportar o peso bruto e guiar o veículo ferroviário sobre os trilhos, devem suportar também os altos esforços e elevadas temperaturas originadas pela frenagem” (ROMANO, 2003, p. 26).

### 2.4.1 Material das rodas

No Brasil as rodas são fabricadas em aço 1045 a 1080, seguindo as especificações das normas AAR M-107 ou UIC 812-3.

Com a peculiaridade da roda integrar o sistema de frenagem em uma ferrovia, ela é impactante no desempenho do freio. As tensões residuais e fadigas térmicas à que as rodas estão sujeitas, bem como o gradiente de dissipação de calor, influenciam na eficiência da frenagem (SOUZA, 2004).

No processo de fabricação das rodas ferroviárias a dureza superficial é uma das principais variáveis que necessitam de um controle rigoroso. O Quadro 1 apresenta a classificação das rodas ferroviárias, de acordo com a sua utilização e a necessidade de tratamento térmico. Na Tabela 2 é descrito o percentual dos elementos da composição química do material das rodas, de acordo com a sua classificação.

Quadro 1 - Classificação das rodas ferroviárias segundo a utilização

| Classe da roda | Tratamento térmico | Utilização  |
|----------------|--------------------|---|
| U              | Não                | Serviços gerais, onde uma roda não tratada é suficiente |
| L              | Sim                | Alta velocidade e baixa carga por roda                  |
| A              | Sim                | Alta velocidade e moderada carga por roda               |
| B              | Sim                | Alta velocidade e alta carga por roda                   |
| C              | Sim                | Condição leve de frenagem e alta carga por roda         |

Fonte: Adaptado de Romano (2003)

Tabela 2 - Composição química do aço das rodas ferroviárias

|      | Classe         |           |             |             |      |
|------|----------------|-----------|-------------|-------------|------|
|      | U              | L         | A           | B           | C    |
| % C  | 0,65 - 0,80    | máx. 0,47 | 0,47 - 0,57 | 0,57 - 0,67 | 0,65 |
| % Mn | 0,60 a 0,85    |           |             |             |      |
| % P  | No máximo 0,05 |           |             |             |      |
| % S  | No máximo 0,05 |           |             |             |      |
| % Si | No mínimo 0,15 |           |             |             |      |
| % Fe | O restante     |           |             |             |      |

Fonte: Romano (2003)

A Tabela 3 define a especificação de dureza das rodas ferroviárias conforme a sua classificação.

Tabela 3 - Especificação de dureza das rodas ferroviárias

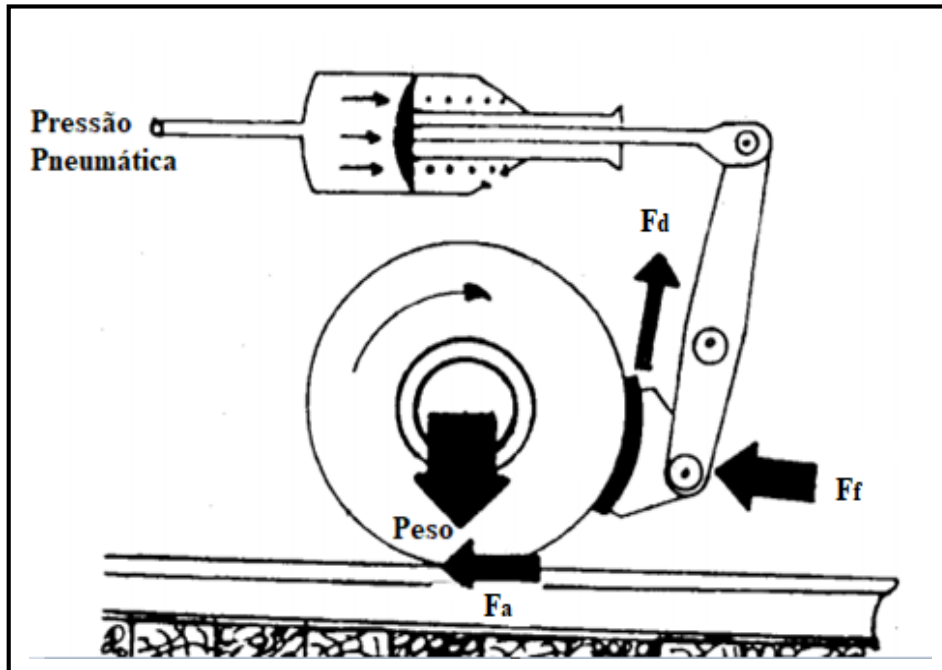
| Classe | Mínima (HB) | Máxima (HB) |
|--------|-------------|-------------|
| L      | 197         | 277         |
| A      | 255         | 321         |
| B      | 277         | 341         |
| C      | 321         | 363         |

Fonte: Romano (2003)

## 2.5 FORÇAS ATUANTES NO PROCESSO DE FRENAGEM

A partir do esquema da Figura 4, percebe-se que as forças atuantes no sistema de freio ferroviário estão diretamente relacionadas através dos coeficientes de atrito entre as superfícies (SOUZA, 2004).

Figura 4 - Forças que atuam nas rodas durante a frenagem



Fonte: Adaptado de Roza (1989)

onde:  $F_f$  é a força de frenagem [N];  
 $F_d$  é a força de desaceleração [N];  
 $F_a$  é a força de atrito roda-trilho [N].

### 2.5.1 Força de frenagem

Força produzida pelo cilindro de freio multiplicado pela relação do sistema de alavancas (timoneria), representada pela Equação 1:

$$F_f = P \cdot A_{pist} \cdot R \cdot E \cdot N \quad (1)$$

onde:  $F_f$  é a força de frenagem [N];  
 $P$  é a pressão no cilindro de freio [MPa];

$A_{\text{pist}}$  é a área do pistão do cilindro de freio [m<sup>2</sup>];

$R$  é o coeficiente de multiplicação da timoneria;

$E$  é a eficiência da timoneria, uma função exponencial da pressão do cilindro [%];

$N$  é o número de cilindros de freio.

### 2.5.2 Taxa de frenagem

A taxa de frenagem é o resultado da divisão da força de frenagem pelo peso do veículo. Expressando a taxa de frenagem em porcentagem obtém-se à Equação 2:

$$T_f = (F_f \cdot 100)/P_v \quad (2)$$

onde:  $F_f$  é a força de frenagem [N];

$p_v$  é o peso do veículo [N].

### 2.5.3 Força de desaceleração

A Equação 3 representa a força de desaceleração que vai parar o trem, que é igual ao produto da força de frenagem pelo coeficiente de atrito entre a sapata de freio e a roda:

$$F_d = F_f \cdot \mu \quad (3)$$

onde:  $F_d$  é a força de desaceleração [N];

$F_f$  é a força de frenagem [N];

$\mu$  é o coeficiente de atrito da sapata de freio com a roda.

A força de desaceleração aplicada em um veículo deve ser igual ou inferior ao valor de aderência, que é o peso do veículo multiplicado pelo coeficiente de atrito entre a roda e o trilho, representada pela Equação 4 e 5:

$$F_d \leq P_v \cdot \mu_{rt} \quad (4)$$

$$F_f \cdot \mu \leq P_v \cdot \mu_{rt} \quad (5)$$

onde:  $F_d$  é a força de desaceleração [N];

$F_f$  é a força de frenagem [N];

$P_v$  é o peso do veículo [N];

$\mu$  é o coeficiente de atrito sapata de freio com a roda;

$\mu_{rt}$  é o coeficiente de atrito roda - trilho.

De acordo com SOUZA (2004, p. 58) “observa-se que a força de aderência tem que ser maior ou igual à força de desaceleração, caso contrário, as rodas do trem deslizarão”.

#### 2.5.4 Taxa de desaceleração

A taxa de desaceleração é representada pela Equação 6:

$$\delta = (T_f \cdot \mu \cdot g) / 100 \quad (6)$$

onde:  $\delta$  é a taxa de desaceleração [ $m/s^2$ ];

$T_f$  é a taxa de frenagem [%];

$\mu$  é o coeficiente de atrito da sapata de freio com a roda;

$g$  é a aceleração da gravidade [ $m/s^2$ ].

## 2.6 VARIÁVEIS QUE AFETAM O ATRITO E O DESGASTE

O coeficiente de atrito e o desgaste são os principais parâmetros avaliados no desempenho, em correlações de ensaios em escala real e em escala reduzida, sendo diretamente dependentes das variáveis de velocidade de escorregamento, pressão específica de contato, tempo de aplicação e temperatura. Portanto, controlar essas variáveis são essenciais para uma perfeita correlação entre ensaios, tendo uma atenção especial à temperatura, pois esta é uma consequência das características mecânicas e térmicas do sistema de freio (INFANTINI, 2008).

### 2.6.1 Mecanismos de desgaste e atrito

O movimento frequente entre a superfície do material de atrito e a roda gera um desgaste progressivo, incorrendo mudanças na geometria e dimensões devido às deformações plásticas dos materiais. Pode-se destacar os principais tipos de desgaste:

- a) abrasão: ocorre quando partículas de elevada dureza são forçadas contra uma superfície sólida, podendo apresentar desgaste de dois corpos pela diferença de



dureza entre os materiais ou desgaste de três corpos quando partículas duras deslizam entre as superfícies (KRAGELSKII, 1965);

- b) adesão: picos de rugosidade em contato geram deformações plásticas devido ao calor gerado, levando a um arrancamento de partículas (BAYER, 2004);
- c) fadiga: ocorre devido a flutuações de tensões cíclicas, culminando em trincas na superfície do material (BAYER, 2004).

Definida em 1966 como a ciência que estuda as interações de superfícies, a Tribologia auxilia no entendimento do que envolve atrito, desgaste e lubrificação. Para tanto, pode-se definir o atrito como sendo o mecanismo pelo qual se desenvolvem forças de resistência ao deslizamento dos corpos em contato (HELMAN e CETLIN, 2005). Os principais fatores que influenciam no material de atrito podem ser classificados como:

- a) filme: acontece quando uma película se forma próxima à superfície de contato, e sua composição depende das condições de tempo, temperatura e pressão na interface. Essas condições são determinantes em análises de ensaios em escala reduzida (PRESTON e FORTHOFFER, 1971);
- b) histórico do material: o coeficiente de atrito dos materiais de fricção é diretamente influenciado pelas condições de operação, principalmente nas primeiras frenagens, decorrente de alterações químicas e vaporização de voláteis no material de atrito (ERIKSON, 2000);
- c) platôs: à medida que ocorre o desgaste da sapata de freio a área de contato varia, interferindo no valor de atrito. Com o desgaste lento os platôs primários se originam formando zonas de nucleação e a retirada das fases duras (OSTERMEYER, 2001).

## 2.6.2 Velocidade de escorregamento

Para o cálculo da velocidade angular da roda do veículo utiliza-se a Equação 7:

$$\omega = v/R_r \quad (7)$$

onde:  $v$  é a velocidade linear do veículo [m/s];

$R_r$  é o raio de rolamento da roda do veículo [m].

A velocidade de escorregamento ( $v'$ , em m/s) da pastilha de freio em escala deve ser igual à da pastilha de freio do veículo original, calculada através da Equação 8:

$$v' = \omega \cdot R_a \quad (8)$$

onde:  $\omega$  é a velocidade angular da roda do veículo [rad/s];

$R_a$  é o raio de atrito efetivo da pastilha de freio [m].

Estudos realizados em materiais de fricção indicam que o coeficiente de atrito é pouco influenciado pela variação da velocidade. Com o seu aumento há uma leve tendência de diminuição do valor do coeficiente de atrito (INFANTINI, 2008).

### 2.6.3 Pressão específica de contato

Para o ensaio em escala reduzida, a mesma pressão específica de contato ( $P_{esp}$ , em Pa) entre pastilha e disco do veículo original deve ser mantida, expressada pela Equação 9:

$$P_{esp} = F_f / A_{past} \quad (9)$$

onde:  $F_f$  é a força de atuação [N];

$A_{past}$  é a área da pastilha de freio [m<sup>2</sup>].

Enquanto que para o cálculo da pressão hidráulica de atuação da pinça de freio utiliza-se a Equação 10:

$$P_{esp} = F_f / A_{pist} \quad (10)$$

onde:  $F_f$  é a força de atuação [N];

$A_{pist}$  é a área do pistão de atuação [m<sup>2</sup>].

Ensaio comparativos realizados em dinamômetros mostram diferença nos resultados do coeficiente de atrito para valores de pressão. Para condições de pressão específica mais alta o coeficiente de atrito é menos constante em função do tempo e com tendência de diminuição do seu valor (SANTOS, 2003).

### 2.6.4 Temperatura

A temperatura é fator importante para estabelecer correlação entre ensaios, pois afeta diretamente o desempenho do material de fricção. Através de trabalhos experimentais,

simulações de elementos finitos e cálculos numéricos, estudos apontam que aproximadamente 80% do calor gerado na frenagem é absorvido pela roda ferroviária e o restante distribuído entre a sapata de freio e o meio ambiente (SANTOS e RODRIGUES FILHO, 1997).

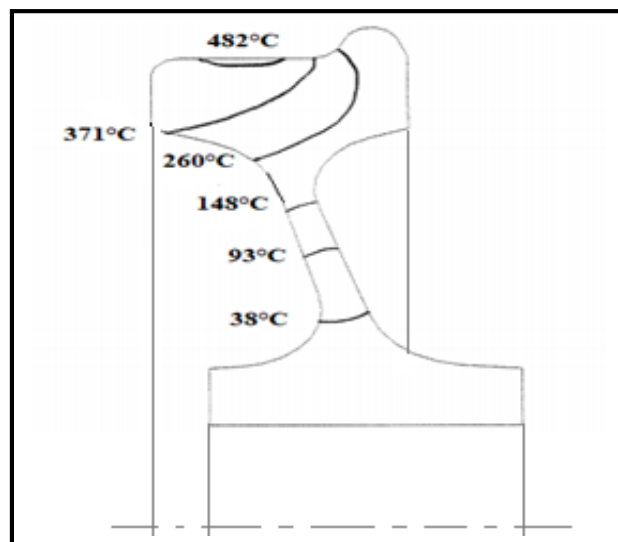
O excessivo acúmulo de calor na roda pode impactar numa série de problemas relacionados a falhas térmicas, tais como:

- a) cavitação: quando ocorre um descolamento localizado na superfície de rolamento em presença de martensita;
- b) escamação: falha causada por solicitações mecânicas a partir de temperaturas superiores a 500 °C, com diminuição do limite de resistência à tração;
- c) trinca térmica: surge devido ao superaquecimento em uma pequena seção do material da roda, causando transformações na estrutura do aço através da formação de martensita (MINICUCCI, 2011).

## 2.7 DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA NA RODA

Com o passar dos anos diversos estudos e experimentos foram realizados para conhecer, monitorar e buscar soluções para os problemas causados pelo aquecimento das rodas. Exemplo de distribuição de temperatura em roda de 33 polegadas é visto na Figura 5.

Figura 5 - Distribuição de temperatura de uma roda



Fonte: Wetenkamp e Kipp (1978)

Uma das principais consequências do processo de frenagem na superfície de rolamento da roda é a formação de pontos quentes (*“hot spots”*). Conforme demonstrado na Figura 6,

esses pontos apresentam uma maior concentração de carbono, elevando sua dureza superficial, e ficando suscetíveis ao surgimento de trincas térmicas (WETENKAMP, 1980).

Figura 6 - Roda ferroviária com manchas térmicas



Fonte: o autor (2019)

## 2.8 DINAMÔMETRO PARA ENSAIOS DE RODAS E SAPATAS DE FREIO

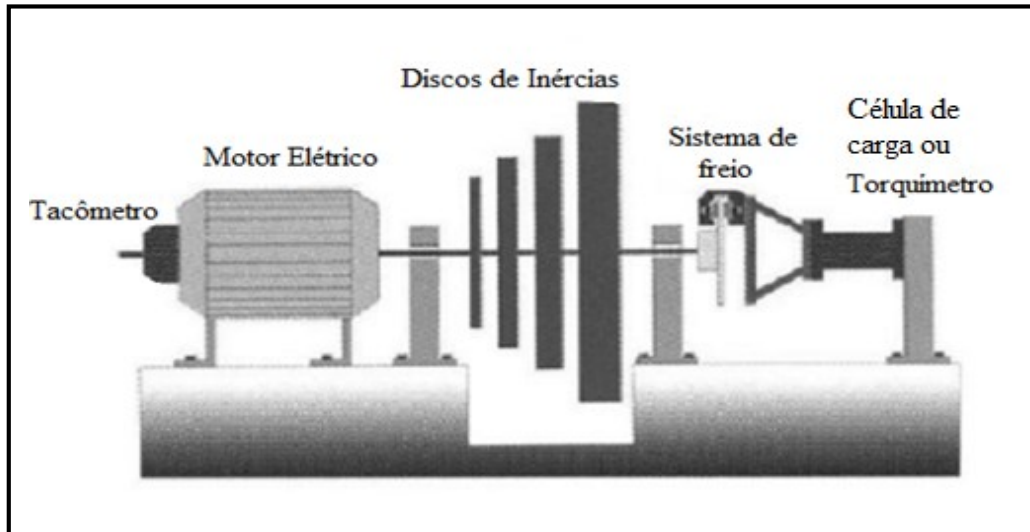
Com a crescente utilização do modal ferroviário, as grandes empresas do ramo necessitavam testar e simular condições reais. A partir de então surgiram os primeiros dinamômetros inerciais com a finalidade de simular as condições de trabalho de rodas e sapatas de freio, no intuito de conhecer e propor melhorias no desempenho desses itens e aumentar a segurança em serviço (BLAINE e CARPENTER, 1988).

Com os ensaios em dinamômetros, foi possível caracterizar os materiais de atrito para atender com melhor eficiência às condições usuais, reduzindo consideravelmente a carga térmica nas rodas e a construção de carros e vagões com maior peso e capacidade de transporte (SANTOS, 2003).

### 2.8.1 Características do dinamômetro inercial

Conforme ilustrado na Figura 7, basicamente, um dinamômetro inercial possui discos de inércia acoplados a um motor elétrico e a um sistema de freio que, controlados por *software*, são capazes de reproduzir a velocidade e a carga do veículo, condicionando aplicações de frenagens e posterior análises dos dados gerados (SILVA, 2013).

Figura 7 - Esquema de um dinamômetro inercial



Fonte: Infantini (2008)

Sendo assim, o dinamômetro é o que melhor reproduz as condições de frenagem e os procedimentos de pista de um veículo, no caso em estudo, da ferrovia (INFANTINI, 2008).

O momento de inércia em um dinamômetro pode ser expresso pela Equação 11:

$$I = \frac{1}{2} m \cdot r^2 \quad (11)$$

onde:  $I$  é o momento de inércia [ $\text{kgm}^2$ ];  
 $m$  é a massa dos discos de inércia [ $\text{kg}$ ];  
 $r$  é o raio dos discos de inércia [ $\text{m}$ ].

A energia cinética de rotação é expressa na Equação 12:

$$E_c = \frac{1}{2} I \cdot \omega^2 \quad (12)$$

onde:  $E_c$  é a energia cinética de rotação [ $\text{J}$ ];  
 $I$  é o momento de inércia [ $\text{kgm}^2$ ];  
 $\omega$  é a velocidade angular da roda do veículo [ $\text{rad/s}$ ].

A Equação 13 expressa o coeficiente de atrito calculado no ensaio de dinamômetro:

$$\mu = T / (2 \cdot R_a \cdot A_{past} \cdot P_{esp}) \quad (13)$$

onde:  $T$  é o torque gerado na frenagem [ $\text{Nm}$ ];

$R_a$  é o raio de atrito efetivo da pastilha de freio [m];

$A_{past}$  é a área da pastilha de freio [m<sup>2</sup>];

$P_{esp}$  é a pressão específica de contato na pastilha de freio [N/m<sup>2</sup>].

Como ilustrado na Figura 8, o dinamômetro inercial é perfeitamente capaz de simular em ambiente controlado a energia cinética do veículo em movimento (BREZOLIN, 2007).

Figura 8 - Dinamômetro inercial em escala real



Fonte: o autor (2019)

### 2.8.2 Sistema de comando e aquisição de dados

O dinamômetro é equipado com um sistema de comando e aquisição de dados que consiste num esquema integrado de *software* e *hardware* para medir, transportar e converter as informações captadas no momento da frenagem.

Geralmente este sistema é composto pelos seguintes subsistemas:

- a) transdutores: são usados para detectar deslocamento, temperatura, velocidade e força (ROCHA, 2013);
- b) condicionamento de sinal: converte um sinal de forma adequada para interligar com outros elementos (PINTO, 2005);
- c) *hardware*: é o dispositivo de aquisição de dados que faz a conversão dos sinais elétricos (OLIVEIRA, 2013);
- d) *software*: é a estrutura numérica baseada em comandos, instruções lógicas e funções matemáticas que armazenam os dados adquiridos (GESTEIRA, 2014).

### 2.8.3 Instrumentação e calibração

Para a atuação e medição das grandezas envolvidas no processo de frenagem de um dinamômetro, há diversos instrumentos capazes de controlar e medir os fenômenos envolvidos no processo. Podem ser destacados os sistemas de aquisição de temperatura, de rotação, de força de atrito, bem como sistemas de comando de acionamento do freio e motor elétrico (CAIXETA, 2017).

Todo dispositivo utilizado para medições críticas de processo deve ser checado periodicamente para verificar se continua a mostrar a exatidão necessária e garantir a qualidade da medição. Portanto, os dispositivos de medição do dinamômetro, são calibrados com padrões rastreáveis RBC e verificados se os valores encontrados são aceitáveis para o processo, demonstrado no Anexo A para o dinamômetro em escala reduzida.

## 2.9 PROCEDIMENTO DE ENSAIO

O procedimento de ensaio em dinamômetro é baseado na norma M-926/2015 da Associação Americana de Ferrovias (AAR, 2015) e suas principais etapas são:

- a) assentamento: nessa etapa são feitas frenagens pouco agressivas, com o objetivo de promover que a região de contato da sapata de freio com a roda seja maior que 95% ;
- b) ensaio de rampa: com velocidade constante aplica-se força por um determinado tempo, para que seja possível determinar o coeficiente de atrito da sapata e o seu desempenho;
- c) ensaio de parada: são alternadas as velocidades, aplicando-se força constante na sapata de freio.

Um sistema de exaustão é utilizado para circular o ar através da roda e sapata de freio simulando o movimento do vagão durante o ensaio e auxiliando na troca de calor e diminuição da temperatura da roda (SANTOS, 2003).

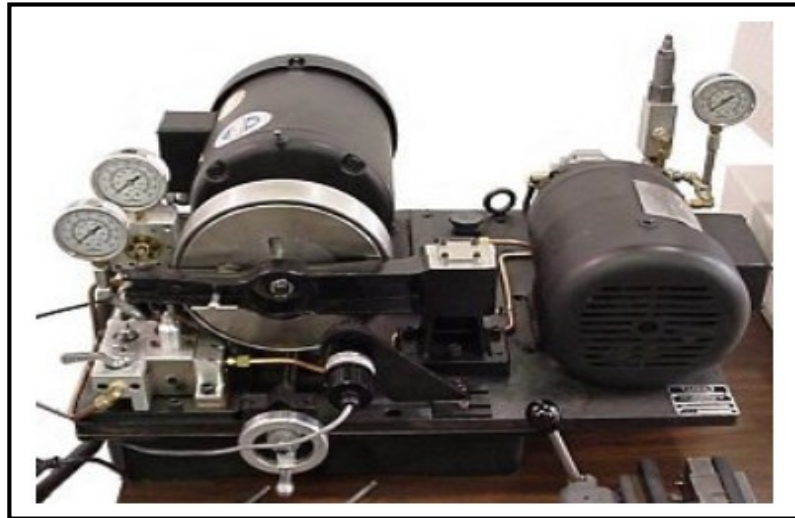
## 2.10 ENSAIO EM ESCALA REDUZIDA

Testes em veículos são requeridos para certificação do produto final. Em virtude de razões financeiras e disponibilidade de tempo, ensaios em escala reduzida são utilizados para caracterização dos materiais de fricção (RHEE e SCHWARTZ, 1979).

SANTOS (2016) destaca e detalha que, dentre as bancadas para testar tribologicamente materiais de fricção, com o objetivo de medir a variação do coeficiente de atrito em função da temperatura, as mais comuns, que são utilizadas pela Fras-le, são:

- a) máquina de ensaio Fast (Figura 9): realiza ensaio pressionando o corpo de prova contra um disco de ferro fundido. Normalmente é utilizado, para caracterização do atrito e triagem de materiais na fase inicial de desenvolvimento;

Figura 9 – Máquina de ensaio Fast



Fonte: o autor (2019)

- b) máquina de ensaio Chase (Figura 10): concebido, pela SAE, onde um corpo de prova é pressionado contra um tambor de ferro fundido, tendo a temperatura controlada por sistema de aquecimento elétrico e ventilação forçada;

Figura 10 – Máquina de ensaio Chase



Fonte: o autor (2019)



- c) máquina de ensaio *Krauss* (Figura 11): desenvolvida para ensaios em automóveis de passageiro, não possui discos de inércia e simula condições com velocidade constante;

Figura 11 – Máquina de ensaio Krauss



Fonte: o autor (2019)

- d) dinamômetro inercial: utiliza o sistema de freio em escala real, com parâmetros e condições de ensaio que simulam a aplicação do veículo, conforme ilustrado anteriormente na Figura 8.

## 2.11 CORRELAÇÃO DE ENSAIOS

No caso do ensaio *Fast*, devido à utilização de um corpo de prova em dimensões muito reduzidas (12,7 x 12,7 mm) e não possuir discos de inércia, os resultados não replicam a utilização na estrada, servindo mais para comparativo entre materiais (SANTOS, 2016).

Para os ensaios *Chase* em corpo de prova de 25,4 x 25,4 mm, tem-se também implicações semelhantes aos citados no ensaio *Fast*. Conforme INFANTINI (2008, p. 16) “o pequeno tamanho do corpo de prova pode fornecer resultados enganosos se comparados com os resultados obtidos em um sistema de freio original”.

Quando se analisa os resultados do ensaio *Krauss*, percebe-se elevado grau de acuracidade em testes repetitivos (INFANTINI, 2008). Porém, para ensaios específicos de sapata de freio ferroviária, os resultados mostram grande dispersão para os valores de desgaste, já para o coeficiente de atrito é possível obter valores compatíveis (SANTOS, 2003).

O dinamômetro inercial foi o que apresentou as melhores correlações referentes aos resultados de coeficiente de atrito, pois a taxa de aumento de temperatura é mais próxima das observadas nos freios dos veículos (INFANTINI, 2008).

Dado que os métodos referidos apresentam limitações, é difícil determinar testes de laboratório, que de uma forma consistente, reproduzam os resultados obtidos em um veículo real (SANTOS, 2016).

## 2.12 INTERAÇÕES ENTRE OS FENÔMENOS EM ESCALA

A temperatura é a variável que tem maior importância no desempenho do sistema de freio e também a de mais difícil controle, pois é consequência dos parâmetros de pressão, carga e velocidade, além de que apresenta comportamento diferente de acordo com os materiais de fricção empregados (INFANTINI, 2008). O coeficiente de atrito sofre diminuição acentuada nas condições de temperaturas elevadas (SANTOS, 2003).

No Quadro 2 é possível verificar as tendências gerais de comportamento do coeficiente de atrito e do desgaste na sapata de freio em função das características da roda.

Quadro 2 – Comportamento da sapata de freio conforme parâmetros da roda

| Roda ferroviária |                     | Sapata de freio       |          |
|------------------|---------------------|-----------------------|----------|
|                  |                     | Coeficiente de atrito | Desgaste |
| ↑                | Temperatura         | ↓                     | ↑        |
| ↑                | Pressão de contato  | ↓                     | ↑        |
| ↑                | Velocidade          | ↓                     | ↑        |
| ↑                | Carga (massa)       | ↓                     | ↑        |
| ↑                | Cond. Ambientais    | ↓                     | ↑        |
| ↑                | Dureza              | ↓↑                    | ↑        |
| ↑                | Picos de rugosidade | ↓↑                    | ↑        |
| ↑                | Reatividade química | ↓↑                    | ↑        |

Fonte: Adaptado de Santos (2003)

onde: ↑ significa aumento;

↓ significa diminuição;

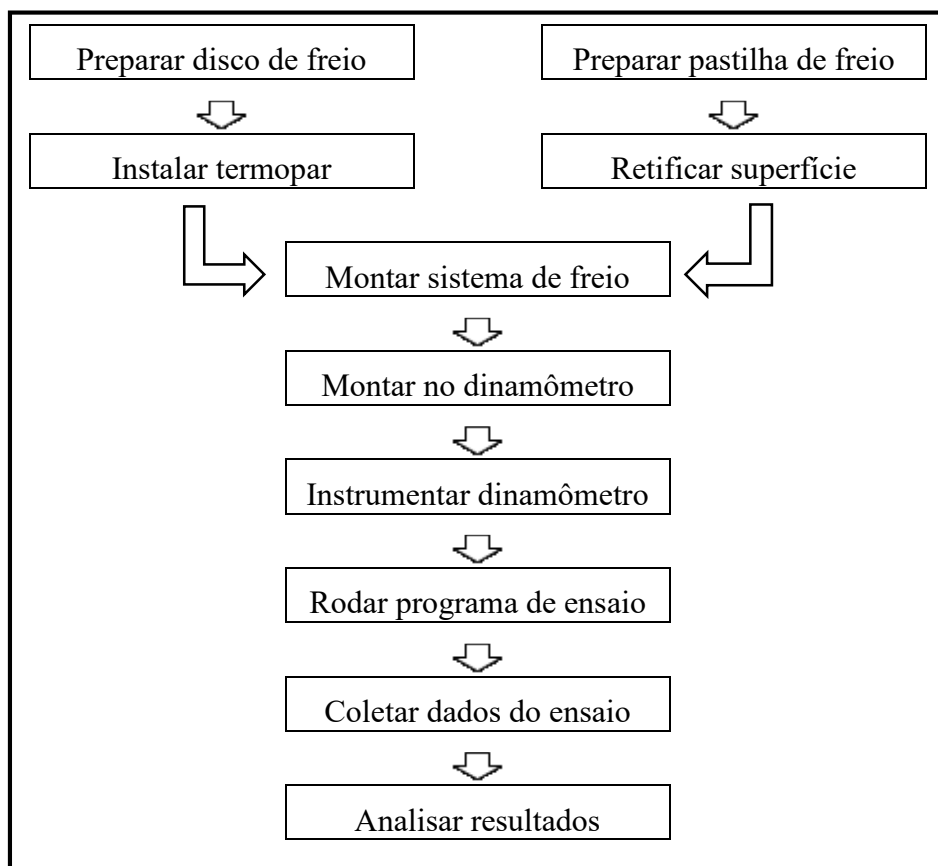
↓↑ significa variação.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizados oito ensaios em escala reduzida, quatro ensaios utilizando o material de atrito NAF/049 e quatro ensaios com o material AF/557. Para cada ensaio foi utilizado disco de freio novo, em sistema de freio de veículo automotivo, onde foi possível correlacionar parâmetros com o sistema de freio em escala real e replicar procedimento de ensaio.

É apresentado fluxograma dos materiais e métodos utilizados, conforme Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma de materiais e métodos



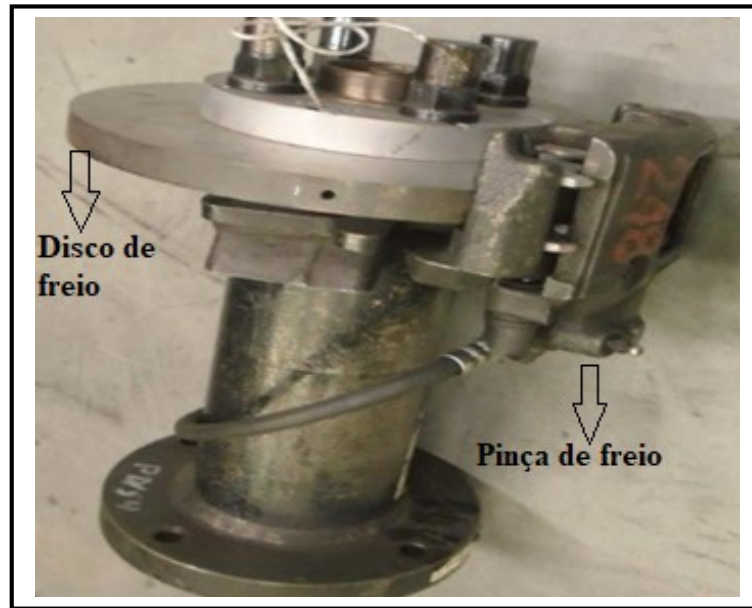
Fonte: o autor (2019)

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 Sistema de freio para teste em escala reduzida

Foi utilizado um sistema de freio automotivo do veículo VW Gol, adaptado para montagem em dinamômetro, conforme Figura 13. Seus principais componentes são a pinça de freio, o disco, as pastilhas, o rolamento e o cubo de roda.

Figura 13 – Sistema de freio automotivo



Fonte: o autor (2019)

### 3.1.2 Disco de freio simulando a roda ferroviária

Foi utilizado disco de freio maciço de aço 1065 classe C, com a composição química, processo de tratamento térmico e dureza superficial da roda ferroviária, descritos na Tabela 4. Para cada ensaio realizado utilizou-se disco de freio com dimensional de  $\varnothing 240 \times 20$  mm. No disco foi instalado termopar para medição da temperatura, embutido no centro da pista de rodagem. Não houve reaproveitamento do mesmo disco de freio para mais ensaios, pois isso implicaria em uma nova variável na análise.

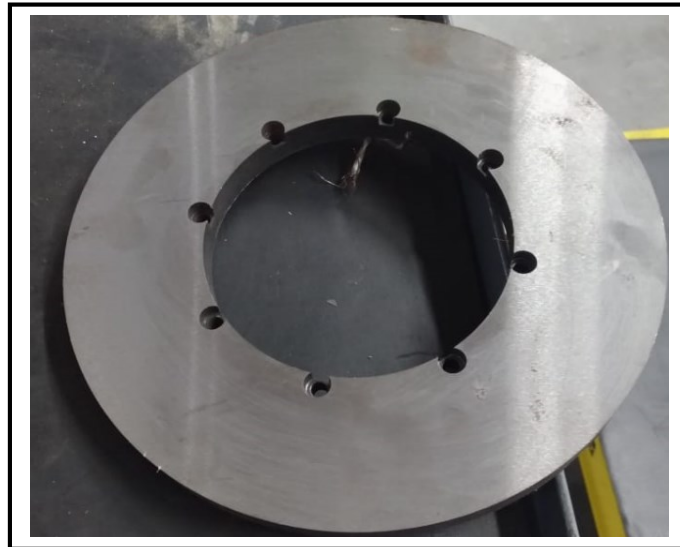
Tabela 4 – Especificação do disco de freio para escala reduzida

| Disco de freio de aço 1065 – classe C |                                 |
|---------------------------------------|---------------------------------|
| Rugosidade superficial                | < 3,00 $\mu\text{m}$            |
| Dureza superficial                    | 321-363 HB                      |
| Tratamento térmico                    |                                 |
| Austenitização                        | 830 °C – 1 h 22 min             |
| Têmpera em água<br>Auto revenimento   | 7 s<br>até temperatura ambiente |

Fonte: Adaptado de Minicucci (2011)

A Figura 14 mostra o disco de freio utilizado em escala reduzida, simulando a roda ferroviária, sua composição química foi verificada conforme o Anexo B.

Figura 14 – Disco de freio maciço de aço 1065



Fonte: o autor (2019)

### 3.1.3 Amostra do material de atrito

Como percebido na pesquisa bibliográfica o comportamento do material da sapata de freio, devido à diversidade das composições químicas, influencia diretamente nos resultados do ensaio. Portanto, para evitar essa influência na variação dos resultados, foram utilizados dois tipos de materiais para validação do método. Os materiais testados foram o NAF/049, fabricado com resina líquida, e o AF/557, que possui na sua composição resina seca.

A amostra no formato de pastilha de freio foi retirada da sapata ferroviária, de acordo com a Figura 15, passando por processo de retífica para garantir a planicidade entre suas faces.

Figura 15 – Amostra do material de atrito retirada da sapata ferroviária



Fonte: o autor (2019)

### 3.1.4 Equipamento para ensaio em escala reduzida

Para realização dos ensaios foi utilizado o dinamômetro inercial da linha automotiva, modelo 2470, conforme Figura 16.

Figura 16 – Dinamômetro inercial para ensaio em escala reduzida



Fonte: o autor (2019)

Os dados técnicos do equipamento utilizado, que são limitadores de algumas aplicações, são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Dados técnicos do dinamômetro 2470

|                 |      |                  |
|-----------------|------|------------------|
| Velocidade máx. | 1500 | rpm              |
| Pressão máx.    | 180  | bar              |
| Torque máx.     | 1500 | Nm               |
| Inércia máx.    | 120  | kgm <sup>2</sup> |

Fonte: o autor (2019)

### 3.1.5 Instrumentação do ensaio em dinamômetro

Os seguintes instrumentos foram utilizados para controle e monitoramento do ensaio:

- a) temperatura: utilizado termopar de contato tipo K, embutido no disco de freio;
- b) pressão: utilizado transdutor de pressão marca Honeywell 0-2500 psi;
- c) força: para medição da força foi utilizada célula de carga tração/compressão Honeywell 50 kN;
- d) velocidade: controlada através de *encoder* Gurley instalado no eixo rotacional do motor de acionamento;
- e) sistema de refrigeração: foi utilizado um ventilador siroco para o sistema de freio;
- f) sistema de controle: foi realizado através de *software* comercial DasyLab.

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 Procedimento de ensaio para escala reduzida

O procedimento de ensaio utilizado foi baseado na norma AAR M-926/2015 e adaptado para escala reduzida, simulando as etapas descritas na Tabela 6.

Tabela 6 – Procedimento de ensaio adaptado da AAR M-926/2015

| Etapa        | Velocidade (km/h)  | Pressão de acionamento escala reduzida (bar) | Tempo (min) |
|--------------|--|--|-------------|
| Assentamento | 32   | 2  | 45          |
| Rampa pesada | 32   | 4,5  | 45          |
| Parada leve  | 96 – 0<br>64 – 0<br>64 – 0<br>96 – 0<br>96 – 0<br>64 – 0 | 10,3   | -           |

Fonte: o autor (2019)

A etapa de assentamento foi realizada para garantir a máxima área de contato entre pastilha e disco. Enquanto na etapa de rampa pesada e parada leve verificou-se a variação do coeficiente de atrito conforme aumento da temperatura e alternância da velocidade.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados comparativos entre os sistemas de freio que serviram de base para os cálculos de correlação são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados comparativos entre os sistemas de freio

| Sistema de freio | Raio de rolamento (m) | Raio de atrito efetivo (m) | Área da pastilha (m <sup>2</sup> ) | Ø pistão (m) | Nº pistões | Inércia (kgm <sup>2</sup> ) |
|------------------|-----------------------|----------------------------|------------------------------------|--------------|------------|-----------------------------|
| Escala reduzida  | 0,280                 | 0,096                      | 0,0019                             | 0,048        | 1          | 27,3                        |
| Escala real      | 0,419                 | 0,419                      | 0,0298                             | 0,100        | 1          | 3105                        |

Fonte: o autor (2019)

### 4.1 CORRELAÇÃO ENTRE AS VELOCIDADES

A partir da Equação 7 obteve-se a velocidade angular da roda do veículo original. Com isso foi definida a velocidade de escorregamento da sapata de freio em relação à roda ferroviária, através da Equação 8. Essa velocidade de escorregamento foi um dos parâmetros de entrada para o ensaio, ou seja, a partir dela foram calculadas as rotações para as etapas do ensaio em escala reduzida.

Em determinadas etapas a rotação encontrada foi maior que a capacidade do equipamento, devido a essa condição, foi utilizada a relação entre as velocidades angulares dos diferentes sistemas de freio, e definido um fator de correção de 2,17 para o ajuste das rotações em escala reduzida. Essa velocidade corrigida foi adotada nas etapas do ensaio em escala reduzida, permitindo adequação aos limites do equipamento.

A correlação de velocidades é mostrada na Tabela 8 e detalhada no Apêndice A, onde a transformação da velocidade linear para rotacional é realizada através da Equação 14:

$$V = (v \cdot 60) / (2 \cdot \pi \cdot R_r \cdot 3.6) \quad (14)$$

onde:  $V$  é a velocidade [rpm];

$v$  é a velocidade linear do veículo [km/h];

$R_r$  é o raio de rolamento da roda do veículo [m].



Tabela 8 – Valores das velocidades correlacionadas

| Etapa do ensaio | AAR M-926                      | Veículo original           | Escala reduzida            |                            |
|-----------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|                 | Velocidade especificada (km/h) | Velocidade calculada (rpm) | Velocidade calculada (rpm) | Velocidade corrigida (rpm) |
| Assentamento    | 32                             | 203                        | 880                        | 405                        |
| Rampa pesada    | 32                             | 203                        | 880                        | 405                        |
| Parada leve     | 96                             | 608                        | 2640                       | 1216                       |
|                 | 64                             | 405                        | 1760                       | 811                        |

Fonte: o autor (2019)

#### 4.2 CORRELAÇÃO ENTRE AS FORÇAS DE ATUAÇÃO

Foi calculada a pressão específica de contato da sapata de freio do veículo original utilizando a Equação 9. A partir dela foi calculada a força de atuação do sistema de freio em escala reduzida, determinando assim a pressão hidráulica necessária para o acionamento, visto que o equipamento utilizado para os ensaios em escala reduzida tem atuação hidráulica, diferentemente do equipamento em escala real que controla o valor de força através de atuação pneumática. Os valores de correlação são demonstrados na Tabela 9 e detalhados conforme o Apêndice B.

Tabela 9 – Valores das forças correlacionadas

| Etapa do ensaio | AAR M-926              | Veículo original     | Escala reduzida      |                          |
|-----------------|------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|
|                 | Força especificada (N) | Força de atuação (N) | Força de atuação (N) | Pressão hidráulica (bar) |
| Assentamento    | 2800                   | 2800                 | 400                  | 2                        |
| Rampa pesada    | 6499                   | 6499                 | 800                  | 4,5                      |
| Parada leve     | 14746                  | 14746                | 1900                 | 10,3                     |

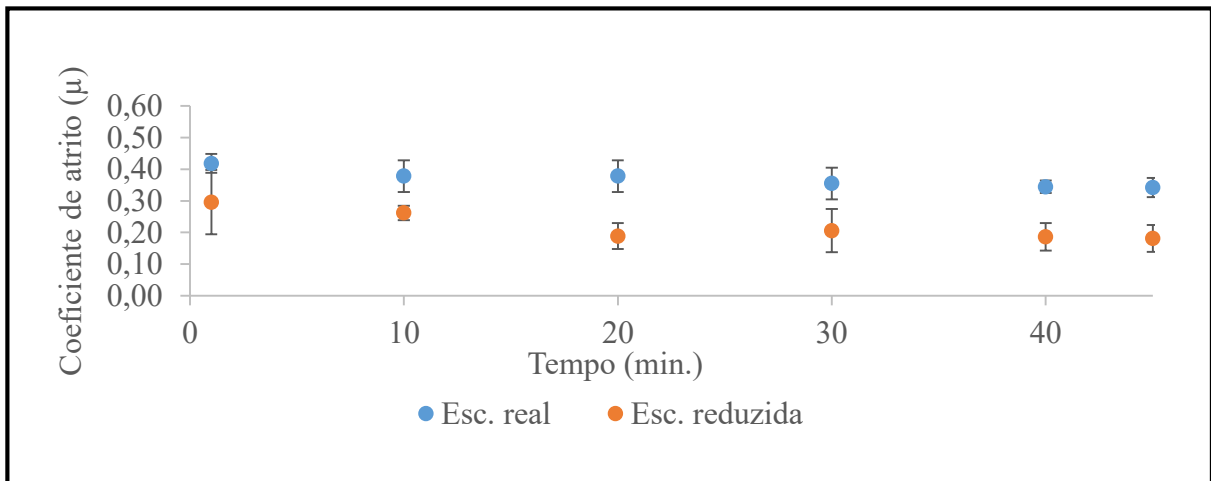
Fonte: o autor (2019)

### 4.3 RESULTADO DOS ENSAIOS PARA O MATERIAL NAF/049

Conforme os dados do Apêndice C, os resultados da etapa de rampa pesada são apresentados na Figura 17. Para o ensaio em escala reduzida percebe-se valores do coeficiente de atrito menores do que o ensaio em escala real, com comportamento linear e ligeiramente decrescente ao longo do tempo.

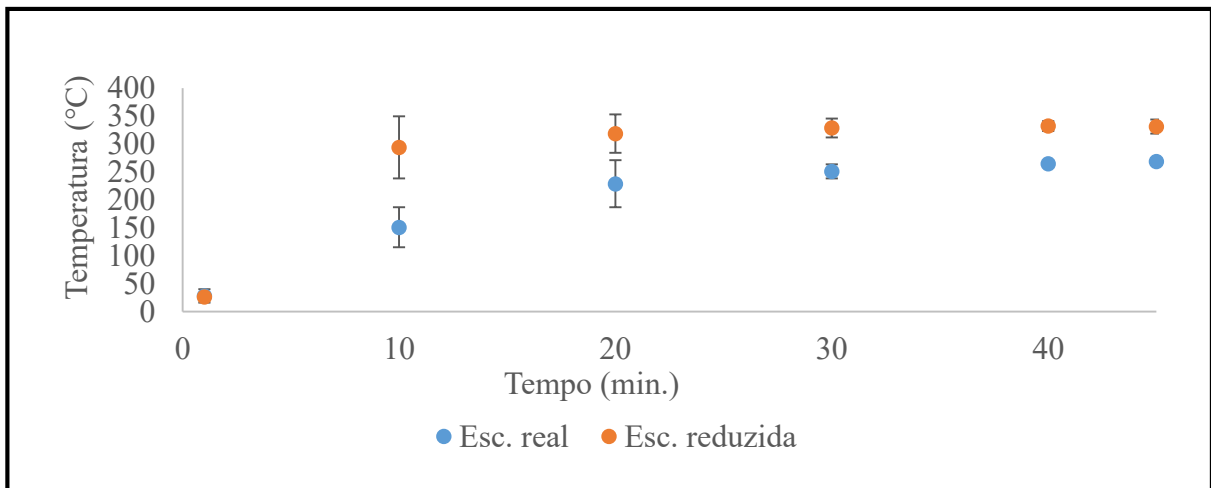
A Figura 18 apresenta os valores de temperatura, conforme dados do Apêndice D. No ensaio em escala reduzida houve maior aquecimento, o que explica o menor coeficiente de atrito. O material NAF/049 apresentou níveis de atrito menores, influenciado pelo aumento da temperatura, e tendência de estabilidade da temperatura conforme o aumento do tempo.

Figura 17 – Resultado dos ensaios de rampa pesada para o material NAF/049



Fonte: o autor (2019)

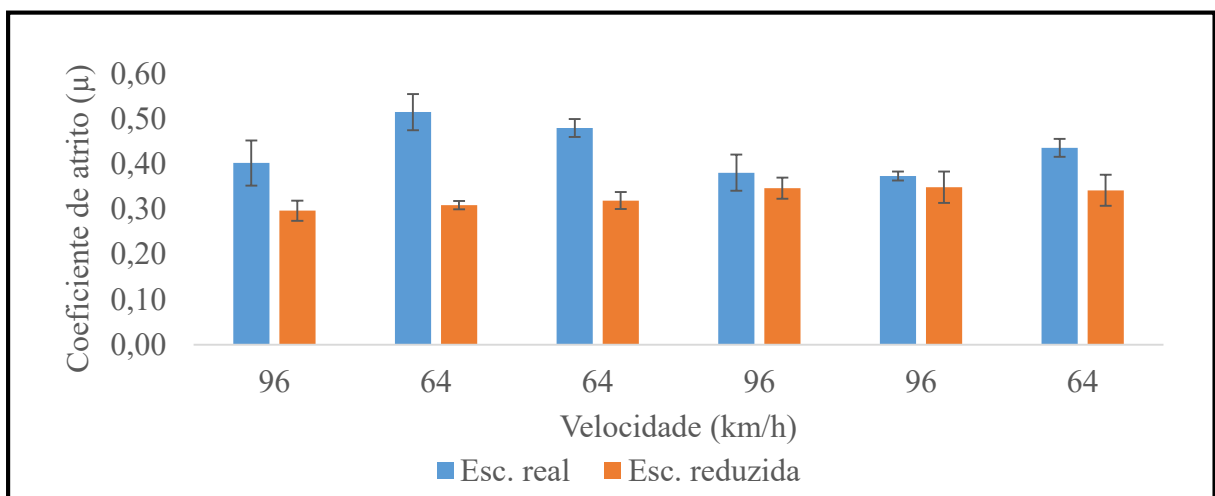
Figura 18 – Temperatura dos ensaios de rampa pesada para o material NAF/049



Fonte: o autor (2019)

No ensaio de parada leve com alternância de velocidades, a média dos resultados do coeficiente de atrito é apresentado na Figura 19, conforme dados do Apêndice E. Nota-se que os valores se aproximam do ensaio em escala real para a velocidade de 96 km/h, enquanto que para a velocidade de 64 km/h ocorreu diferença maior entre os ensaios comparativos. Para o ensaio em escala reduzida o coeficiente de atrito foi pouco influenciado pela variação da velocidade, com uma leve tendência de crescimento ao decorrer das etapas do ensaio. Isto reforça os resultados de testes encontrado por outros autores, conforme visto no capítulo 2.

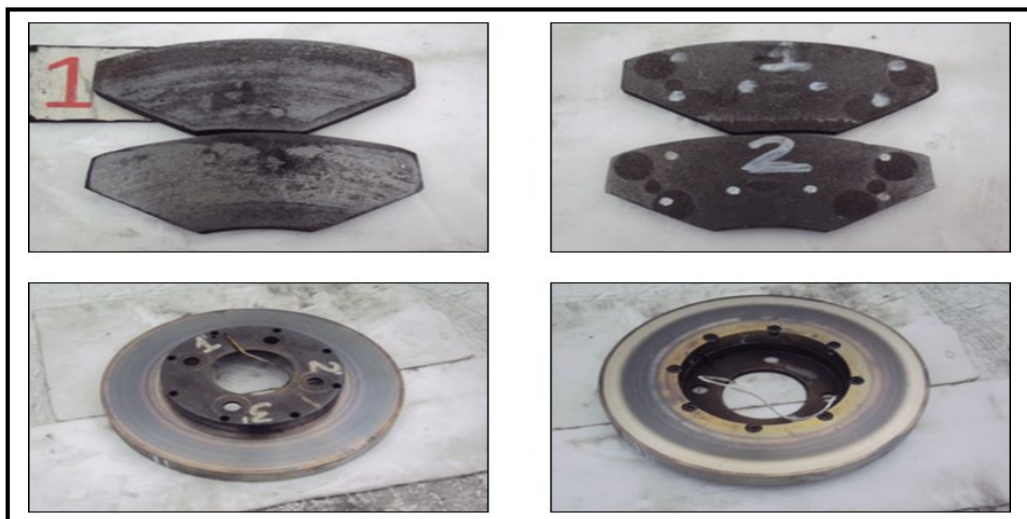
Figura 19 – Resultado dos ensaios de parada leve para o material NAF/049



Fonte: o autor (2019)

De acordo com a Figura 20, as amostras testadas não sofreram desgaste ou anomalias ao final do ensaio, nem houve agressão ou manchas térmicas no disco de freio.

Figura 20 – Fotografia das amostras após ensaio em escala reduzida



Fonte: o autor (2019)

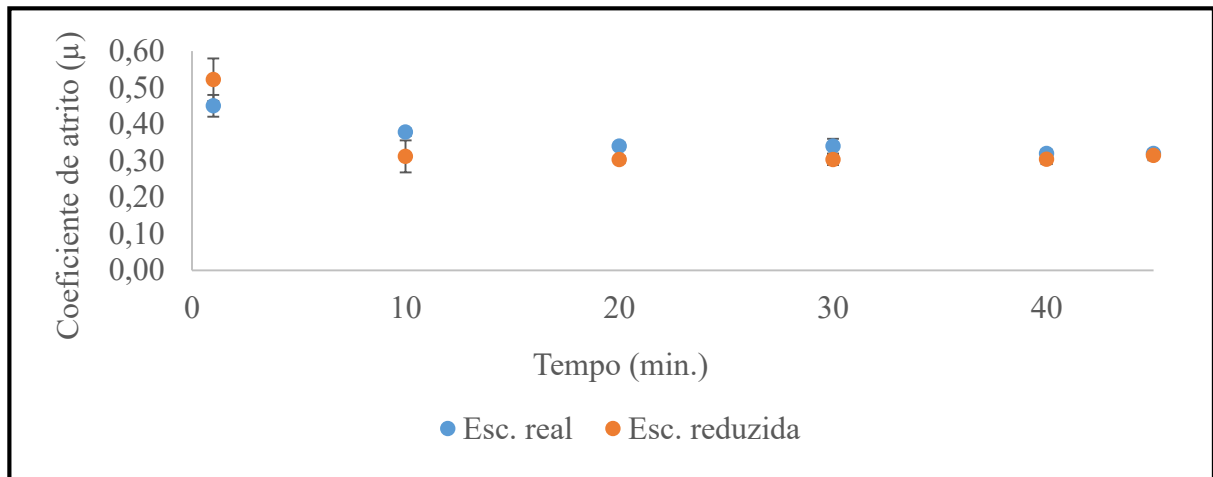
#### 4.4 RESULTADO DOS ENSAIOS PARA O MATERIAL AF/557

Para o material AF/557 na etapa de rampa pesada os resultados encontrados são verificados na Figura 21, baseados nos dados do Apêndice F.

O ensaio em escala reduzida apresentou valores de coeficiente de atrito próximos do ensaio em escala real, mesmo com temperaturas maiores, como pode ser visto na Figura 22 e dados do Apêndice G. A temperatura não influenciou no coeficiente de atrito, o que demonstra que esse material é menos instável à variação de temperatura.

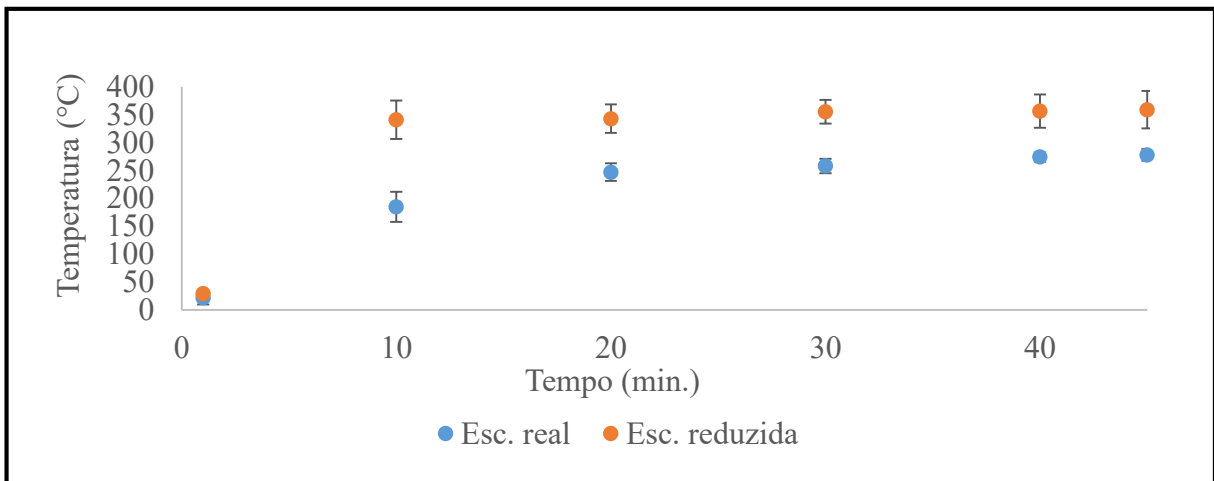
A etapa de rampa pesada reproduziu de forma consistente os resultados obtidos no ensaio em escala real.

Figura 21– Resultado dos ensaios de rampa pesada para o material AF/557



Fonte: o autor (2019)

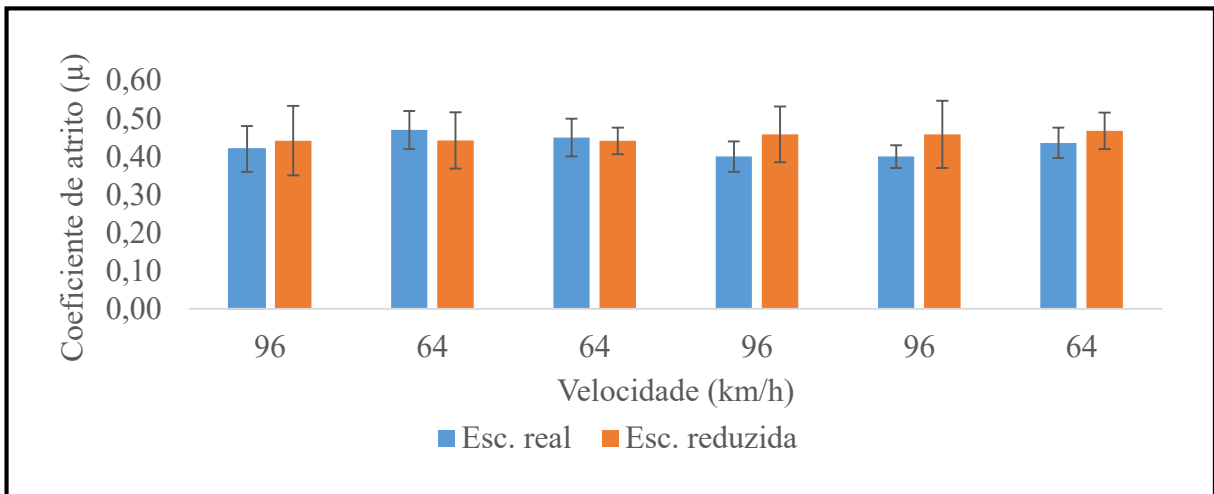
Figura 22 – Temperatura dos ensaios de rampa pesada para o material AF/557



Fonte: o autor (2019)

Na etapa de parada leve o nível de atrito sofreu pouca variação conforme alteração da velocidade, isto é percebido em ambos os ensaios. No ensaio em escala reduzida é possível verificar que na velocidade de 96 km/h há uma maior dispersão entre os resultados, enquanto que para a velocidade de 64 km/h tem-se resultados mais homogêneos, conforme ilustrado na Figura 23 e dados do Apêndice H.

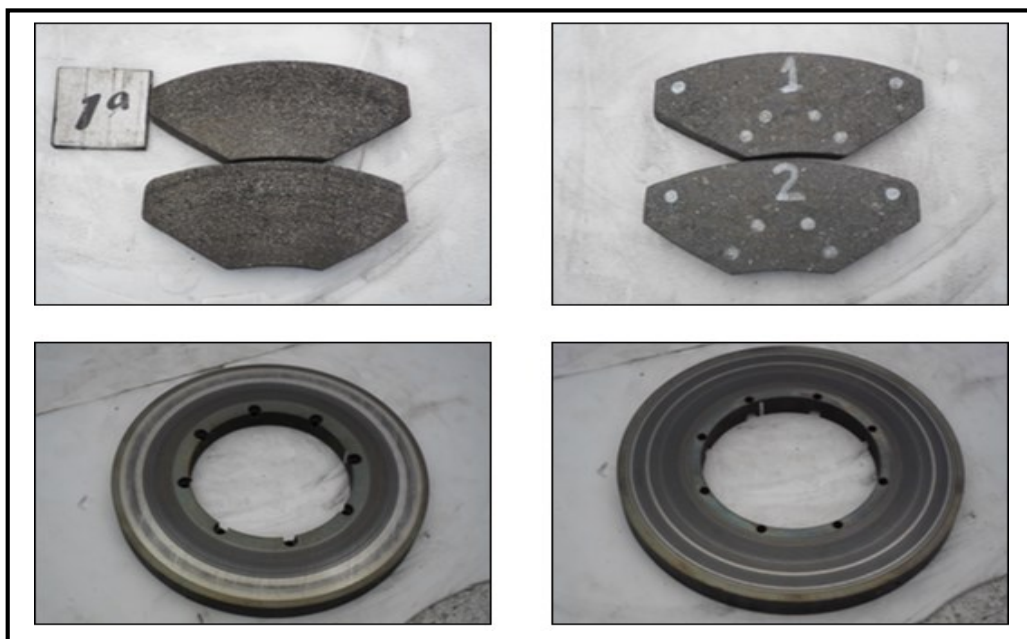
Figura 23 – Resultados dos ensaio de parada leve para o material AF/557



Fonte: o autor (2019)

O material AF/557 não agrediu o disco de freio, bem como, as pastilhas de freio não apresentaram nenhuma anomalia, conforme mostra a Figura 24.

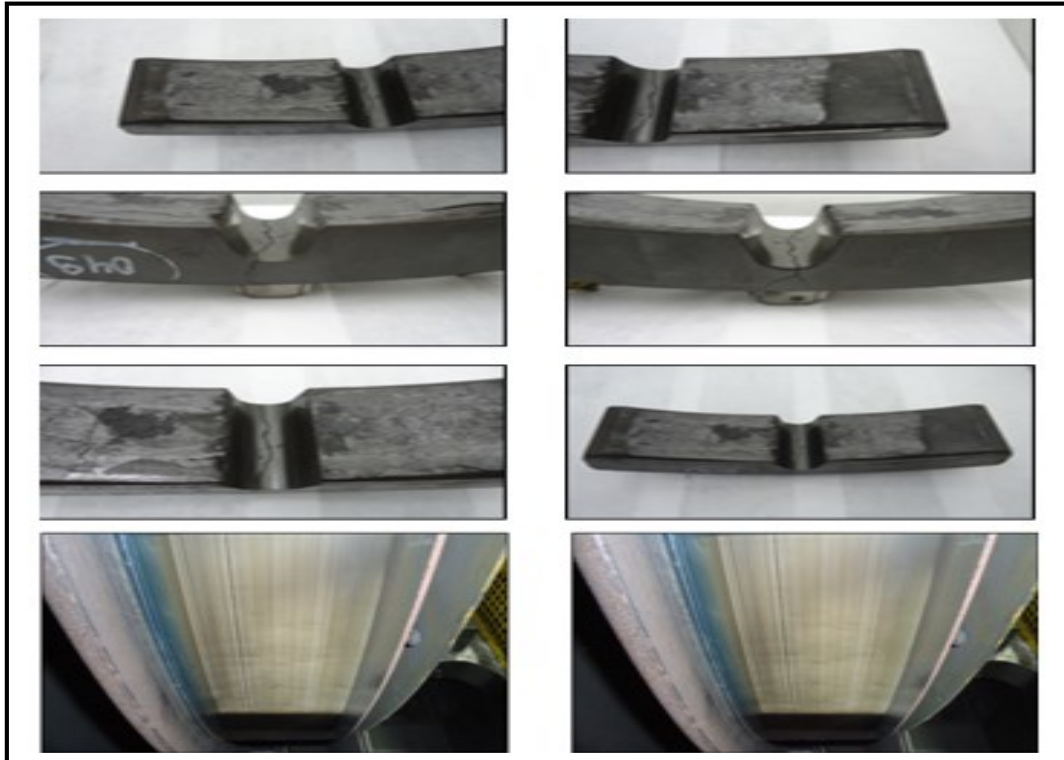
Figura 24 – Fotografia das amostras após ensaio em escala reduzida



Fonte: o autor (2019)

No ensaio em escala real, as amostras testadas apresentaram trincas, e não houve uma perfeita conformação da superfície da sapata de freio com a pista de rodagem da roda, contribuindo para uma área de contato entre superfícies menor, conforme visto na Figura 25.

Figura 25 – Amostras originais após ensaio em escala real



Fonte: o autor (2019)

Para os ensaios realizados não foi considerada a taxa de desgaste das amostras, visto que nos ensaios em escala real essa avaliação ficou comprometida pelo deslocamento e trincas no material de atrito da sapata ferroviária, decorrente das folgas do sistema que geram má distribuição de pressão.

Outra consideração importante é referente a instrumentação para coleta de temperatura. No ensaio em escala real essa coleta foi realizada através de termopar de contato na pista da roda, enquanto no ensaio em escala reduzida optou-se pela instalação do termopar embutido no disco de freio, pois representou uma melhor uniformidade na taxa de aquecimento.

Cada ensaio realizado levou aproximadamente dois dias, incluindo as preparações das amostras. Ao total foram realizados oito ensaios, sendo quatro para cada material, proporcionando resultados confiáveis e uma boa base de dados para análise.

## 5 CONCLUSÕES

Comparando os resultados do coeficiente de atrito, foi possível avaliar a utilização de um ensaio dinamométrico em escala reduzida, que permita análise adequada dos diversos materiais de atrito para sapata de freio ferroviária.

No ensaio de rampa pesada percebeu-se que, para ambos os materiais, os valores de coeficiente de atrito ficaram abaixo do ensaio em escala real, porém com a mesma tendência. Como os parâmetros de carga, pressão e velocidade não se alteram nessa etapa, foi possível concluir que o menor atrito do material foi influenciado pelo maior aquecimento do disco de freio. Há valores mais uniformes e próximos da escala real para o material AF/557. Isto permite concluir que o tipo de material de atrito é determinante para que se tenha uma boa correlação entre ensaios, ou seja, quanto menos instabilidade à temperatura o material tiver, maiores as possibilidades de replicar resultados em escala reduzida. Possivelmente ajuste nos parâmetros que determinam um menor aquecimento ou uma maior dissipação da temperatura promovam melhores resultados.

Para o ensaio de parada leve, obteve-se valores médios de coeficiente de atrito compatíveis com o ensaio em escala real. Isso demonstra que a correlação entre as velocidades e as forças de atuação dos diferentes sistemas está coerente.

Mediante esses resultados, comprovou-se que a temperatura é o parâmetro determinante para uma perfeita correlação entre ensaios. Quanto mais próxima dos valores do ensaio em escala real, mais assertivo será o resultado do coeficiente de atrito. Como os valores encontrados tem tendência semelhante ao ensaio em escala real, tanto o equipamento e sistema de freio utilizado, como o procedimento elaborado, possuem condições viáveis tem de atender aos objetivos propostos.

Como sugestão para trabalhos futuros pode-se alterar parâmetros de pressão e velocidade para obtenção de níveis de temperatura mais próximos do ensaio em escala real, bem como desenvolver estudo para verificação da influência da reutilização do disco de freio em diversos ensaios.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto 06:200.01-001, Sapata e sapatilha de composição fenólica para freio de carros de passageiro metro-ferroviário. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS. M-107/208 wheels, carbon steel. Washington, 2018.
- ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS. M-926 brake shoe, high-friction composition or metal type. Washington, 2015.
- BAYER, Raymond. **Mechanical wear fundamentals and testing, revised and expanded**. Ed. CRC Press, 2004.
- BLAINE, D. G.; CARPENTER, G. F. **Railroad wheel dynamometer**. A.S.M.E., American Society of Mechanical Engineers., 91st National Historic Mechanical Engineering Landmark. Chicago, 1988.
- BREZOLIN, André. **Estudo de geração de trincas térmicas em discos de freios de veículos comerciais**. Dissertação (Mestrado em Materiais) - Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2007.
- CAIXETA, Luiz Gustavo da Rocha. **Projeto de dinamômetro inercial automatizado para analisar o comportamento em desgaste de sistemas de freio de veículos leves**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade de Brasília. Brasília, 2017.
- DIULGHEROGLO, Pedro. **Fundamentos de freios e seus componentes**. Apostila curso, congresso SAE Brasil, São Paulo, 2010.
- EMPRESAS RANDON. Disponível em: <http://www.empresasrandon.com.br/pt/news/v/empresas-randon/negocios-nos-trilhos-2015-randon-e-fras-le>. Acesso em: 15/04/2019.
- ERIKSON, M. **Friction and contact phenomena of disc brakes related to squeal**. Thesis. Acta Universitatis Uppsala, 2000.
- FRAS-LE S/A. Software de calibração MK. Caxias do Sul, 2019.
- GESTEIRA, Luís Gabriel Guanabara. **Sistema de aquisição de dados baseado em Labview para um dinamômetro de chassi**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2014.
- HELMAN, H.; CETLIN, P. R. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. Ed. Artliber, 2005.
- INFANTINI, Mauricio Blanco. **Variáveis de desempenho dos sistemas de freio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.



KRAGELSKI, I.V. **Friction and wear**. Washington: Ed. Buther Worths, 1965.

MINICUCCI, Domingos José. **Rodas e eixos ferroviários: conceitos básicos**. São Paulo: MWL Brasil, 2011.

OLIVEIRA, Kledder Hugo Correia Pousas de. **Sistema de aquisição de dados e controle de processos: aplicações com Compactrio e Labview**. Monografia (Engenharia de Controle e Automação) - Universidade de Ouro Preto. Ouro Preto, 2013.

OSTERMEYER, G.P. **Friction and wear of brake systems**. Forschung im Ingenieurwesen, vol.66, pp. 267-272, 2001.

PINTO, Fábio da Costa. **Sistemas de automação e controle**. SENAI Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. Vitória Espirito Santo, 2005.

PRESTON, J.D.; FORTHOFFER, R.J. **Correlation of vehicle, dynamometer and other laboratory tests for brake friction materials**. Society of Automotive Engineers, 1971.

RHEE, S.K.; SCHWARTZ, H. W. **Test methods for automotive and truck friction materials**. American Society for Testing and Materials, pp.39-49, 1979.

ROCHA, Adson Ferreira da. **Tópicos em controle e automação**. Universidade de Brasília. Brasília, 2013.

ROMANO, Sergio José. **Comparação de Desempenho dos Sistemas de Freio de Atrito tipo Sapatilha-Disco e Sapata-Roda para Veículos Ferroviários de Carga**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003.

ROZA, Leopoldo Correa. **Freios ferroviários**. Apostila do Curso de Freios Ferroviários. Campinas: FEM/UNICAMP, 1989.

SAB WABCO. BFC Manual technical. Document MDE 00451-01, 2004.

SANTOS, Auteliano Antunes; RODRIGUES FILHO, Fausto. **Determinação do coeficiente global de transferência de calor em rodas ferroviárias**. XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – COBEM. Bauru, 1997.

SANTOS, Pedro Guilherme de Jesus Silva. **Caracterização mecânica e tribológica de materiais de atrito**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Coimbra, 2016.

SANTOS, Valdecir José dos. **Comparação do desempenho de materiais de sapatas ferroviárias em ensaios dinâmométricos e máquina krauss**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Unicamp. Campinas, 2003.

SILVA, Luiz Rafael Coelho da. **Caracterização da superfície de frenagem do tambor de freio de veículos comerciais após ensaios em dinamômetro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2013.

SOUZA, Rogério Eustáquio de. **Estudo do comportamento de sapatas de freio de resina fenólica, em frenagem por atrito de rodas metro ferroviárias.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - UEMG. Ouro Preto, 2004.

WETENKAMP, H. R.; ECK, B. J.; RHINE, P. E. **The influence of brake shoes on the temperature of wheels in railroad service.** Transactions of A.S.M.E, 1980.

WETENKAMP, H.R; KIPP, R.M. **Safe termal loads.** 6th Int. Wheelset Congress. Colorado Springs, 1978.

## APÊNDICE A – MEMÓRIA DE CÁLCULO CORRELAÇÃO VELOCIDADE

| <b>Real:</b>   | <b>Escala:</b>   |
|--|--|
| Trem 33"   | PD/28  |
| v [km/h] <input style="width: 50px;" type="text" value="32,0"/><br>v [rpm] <input style="width: 50px;" type="text" value="203"/>   | v [km/h] <input style="width: 50px;" type="text" value="92,9"/><br>v [rpm] <input style="width: 50px;" type="text" value="880"/>   |
| rr [m] <input style="width: 50px;" type="text" value="0,4190"/><br>ra [m] <input style="width: 50px;" type="text" value="0,4190"/>   | rr [m] <input style="width: 50px;" type="text" value="0,2800"/> pneu<br>ra [m] <input style="width: 50px;" type="text" value="0,0965"/>  |
| v [m/s] <input style="width: 50px;" type="text" value="8,9"/><br>w [rad/s] <input style="width: 50px;" type="text" value="21,2"/><br>v' [m/s] <input style="width: 50px;" type="text" value="8,89"/>   | v [m/s] <input style="width: 50px;" type="text" value="25,8"/><br>w [rad/s] <input style="width: 50px;" type="text" value="92,1"/><br>v' [m/s] <input style="width: 50px;" type="text" value="8,89"/> = Real   |
| v [km/h] <input style="width: 50px;" type="text" value="64,0"/><br>v [rpm] <input style="width: 50px;" type="text" value="405"/>   | v [km/h] <input style="width: 50px;" type="text" value="185,8"/><br>v [rpm] <input style="width: 50px;" type="text" value="1760"/>   |
| rr [m] <input style="width: 50px;" type="text" value="0,4190"/><br>ra [m] <input style="width: 50px;" type="text" value="0,4190"/>   | rr [m] <input style="width: 50px;" type="text" value="0,2800"/> pneu<br>ra [m] <input style="width: 50px;" type="text" value="0,0965"/>  |
| v [m/s] <input style="width: 50px;" type="text" value="17,8"/><br>w [rad/s] <input style="width: 50px;" type="text" value="42,4"/><br>v' [m/s] <input style="width: 50px;" type="text" value="17,78"/> | v [m/s] <input style="width: 50px;" type="text" value="51,6"/><br>w [rad/s] <input style="width: 50px;" type="text" value="184,2"/><br>v' [m/s] <input style="width: 50px;" type="text" value="17,78"/> = Real |
| v [km/h] <input style="width: 50px;" type="text" value="96,0"/><br>v [rpm] <input style="width: 50px;" type="text" value="608"/>   | v [km/h] <input style="width: 50px;" type="text" value="278,6"/><br>v [rpm] <input style="width: 50px;" type="text" value="2640"/>   |
| rr [m] <input style="width: 50px;" type="text" value="0,4190"/><br>ra [m] <input style="width: 50px;" type="text" value="0,4190"/>   | rr [m] <input style="width: 50px;" type="text" value="0,2800"/> pneu<br>ra [m] <input style="width: 50px;" type="text" value="0,0965"/>  |
| v [m/s] <input style="width: 50px;" type="text" value="26,7"/><br>w [rad/s] <input style="width: 50px;" type="text" value="63,6"/><br>v' [m/s] <input style="width: 50px;" type="text" value="26,67"/> | v [m/s] <input style="width: 50px;" type="text" value="77,4"/><br>w [rad/s] <input style="width: 50px;" type="text" value="276,3"/><br>v' [m/s] <input style="width: 50px;" type="text" value="26,67"/> = Real |

Fonte: o autor (2019)

## APÊNDICE B – MEMÓRIA DE CÁLCULO CORRELAÇÃO FORÇA

| Real:<br>Trem 33"   | Escala:<br>PD/28  |
|---|---|
| <div style="display: flex; justify-content: center; align-items: center; margin-bottom: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">297,50</div> <div style="margin: 0 5px;">→</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">18,75</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>A pastilha [cm<sup>2</sup>]</p> <p>A pastilha [m<sup>2</sup>]</p> <p>A pistão [m<sup>2</sup>]</p> <p>Força [kN]</p> <p>Pressão Específica [kN/m<sup>2</sup>]</p> <p>Pressão Específica [N/cm<sup>2</sup>]</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>A pastilha [cm<sup>2</sup>]</p> <p>A pastilha [m<sup>2</sup>]</p> <p>A pistão [m<sup>2</sup>]</p> <p>Pressão [bar]</p> <p>Força [kN]</p> <p>Pressão Específica [kN/m<sup>2</sup>]</p> </div> </div> | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>A pastilha [cm<sup>2</sup>]</p> <p>A pastilha [m<sup>2</sup>]</p> <p>A pistão [m<sup>2</sup>]</p> <p>Força [kN]</p> <p>Pressão Específica [kN/m<sup>2</sup>]</p> <p>Pressão Específica [N/cm<sup>2</sup>]</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>A pastilha [cm<sup>2</sup>]</p> <p>A pastilha [m<sup>2</sup>]</p> <p>A pistão [m<sup>2</sup>]</p> <p>Pressão [bar]</p> <p>Força [kN]</p> <p>Pressão Específica [kN/m<sup>2</sup>]</p> </div> </div> |
| <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>A pastilha [cm<sup>2</sup>]</p> <p>A pastilha [m<sup>2</sup>]</p> <p>A pistão [m<sup>2</sup>]</p> <p>Força [kN]</p> <p>Pressão Específica [kN/m<sup>2</sup>]</p> <p>Pressão Específica [N/cm<sup>2</sup>]</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>A pastilha [cm<sup>2</sup>]</p> <p>A pastilha [m<sup>2</sup>]</p> <p>A pistão [m<sup>2</sup>]</p> <p>Pressão [bar]</p> <p>Força [kN]</p> <p>Pressão Específica [kN/m<sup>2</sup>]</p> </div> </div>   | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>A pastilha [cm<sup>2</sup>]</p> <p>A pastilha [m<sup>2</sup>]</p> <p>A pistão [m<sup>2</sup>]</p> <p>Força [kN]</p> <p>Pressão Específica [kN/m<sup>2</sup>]</p> <p>Pressão Específica [N/cm<sup>2</sup>]</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>A pastilha [cm<sup>2</sup>]</p> <p>A pastilha [m<sup>2</sup>]</p> <p>A pistão [m<sup>2</sup>]</p> <p>Pressão [bar]</p> <p>Força [kN]</p> <p>Pressão Específica [kN/m<sup>2</sup>]</p> </div> </div> |
| <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>A pastilha [cm<sup>2</sup>]</p> <p>A pastilha [m<sup>2</sup>]</p> <p>A pistão [m<sup>2</sup>]</p> <p>Força [kN]</p> <p>Pressão Específica [kN/m<sup>2</sup>]</p> <p>Pressão Específica [N/cm<sup>2</sup>]</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>A pastilha [cm<sup>2</sup>]</p> <p>A pastilha [m<sup>2</sup>]</p> <p>A pistão [m<sup>2</sup>]</p> <p>Pressão [bar]</p> <p>Força [kN]</p> <p>Pressão Específica [kN/m<sup>2</sup>]</p> </div> </div>   | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>A pastilha [cm<sup>2</sup>]</p> <p>A pastilha [m<sup>2</sup>]</p> <p>A pistão [m<sup>2</sup>]</p> <p>Força [kN]</p> <p>Pressão Específica [kN/m<sup>2</sup>]</p> <p>Pressão Específica [N/cm<sup>2</sup>]</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>A pastilha [cm<sup>2</sup>]</p> <p>A pastilha [m<sup>2</sup>]</p> <p>A pistão [m<sup>2</sup>]</p> <p>Pressão [bar]</p> <p>Força [kN]</p> <p>Pressão Específica [kN/m<sup>2</sup>]</p> </div> </div> |

Fonte: o autor (2019)

**APÊNDICE C – DADOS DO GRÁFICO DA FIGURA 16**

| ENSAIO RAMPA PESADA - MATERIAL NAF/049 |                        |                        |                        |                        |                        |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|  | Esc. real              | Esc. reduzida          |                        |                        |                        |
|  |                        | Ensaio 1               | Ensaio 2               | Ensaio 3               | Ensaio 4               |
| Tempo (min)                            | Coef. Atrito ( $\mu$ ) | Coef. Atrito ( $\mu$ ) | Coef. Atrito ( $\mu$ ) | Coef. Atrito ( $\mu$ ) | Coef. Atrito ( $\mu$ ) |
| 1                                      | 0,42                   | 0,44                   | 0,24                   | 0,30                   | 0,20                   |
| 10                                     | 0,38                   | 0,23                   | 0,26                   | 0,27                   | 0,28                   |
| 20                                     | 0,38                   | 0,15                   | 0,19                   | 0,17                   | 0,24                   |
| 30                                     | 0,35                   | 0,13                   | 0,29                   | 0,18                   | 0,23                   |
| 40                                     | 0,34                   | 0,13                   | 0,23                   | 0,17                   | 0,22                   |
| 45                                     | 0,34                   | 0,13                   | 0,23                   | 0,16                   | 0,19                   |

Fonte: o autor (2019)

**APÊNDICE D – DADOS DO GRÁFICO DA FIGURA 17**

| ENSAIO RAMPA PESADA - MATERIAL NAF/049 |            |               |            |            |            |
|--|------------|---------------|------------|------------|------------|
|  | Esc. real  | Esc. reduzida |            |            |            |
|  |            | Ensaio 1      | Ensaio 2   | Ensaio 3   | Ensaio 4   |
| Tempo (min)                            | Temp. (°C) | Temp. (°C)    | Temp. (°C) | Temp. (°C) | Temp. (°C) |
| 0                                      | 28,0       | 21,4          | 26,1       | 25,8       | 33,3       |
| 10                                     | 151,0      | 241,9         | 337,7      | 250,3      | 346,6      |
| 20                                     | 229,0      | 270,4         | 342,5      | 318,2      | 344,1      |
| 30                                     | 251,0      | 305,1         | 343,3      | 329,9      | 337,3      |
| 40                                     | 265,0      | 324,0         | 343,0      | 326,4      | 336,6      |
| 45                                     | 269,0      | 328,9         | 344,1      | 314,9      | 337,0      |

Fonte: o autor (2019)

**APÊNDICE E – DADOS DO GRÁFICO DA FIGURA 18**

| ENSAIO PARADA LEVE – MATERIAL NAF/049 |                        |                        |                        |                        |                        |
|---------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                                       | Esc. real              | Esc. reduzida          |                        |                        |                        |
|                                       |                        | Ensaio 1               | Ensaio 2               | Ensaio 3               | Ensaio 4               |
| Velocidade (km/h)                     | Coef. Atrito ( $\mu$ ) | Coef. Atrito ( $\mu$ ) | Coef. Atrito ( $\mu$ ) | Coef. Atrito ( $\mu$ ) | Coef. Atrito ( $\mu$ ) |
| 96                                    | 0,40                   | 0,32                   | 0,27                   | 0,31                   | 0,29                   |
| 64                                    | 0,51                   | 0,32                   | 0,31                   | 0,32                   | 0,30                   |
| 64                                    | 0,48                   | 0,33                   | 0,33                   | 0,32                   | 0,29                   |
| 96                                    | 0,38                   | 0,32                   | 0,37                   | 0,35                   | 0,34                   |
| 96                                    | 0,37                   | 0,30                   | 0,39                   | 0,35                   | 0,35                   |
| 64                                    | 0,44                   | 0,32                   | 0,39                   | 0,33                   | 0,33                   |

Fonte: o autor (2019)

**APÊNDICE F – DADOS DO GRÁFICO DA FIGURA 20**

| ENSAIO RAMPA PESADA - MATERIAL AF/557 |                        |                        |                        |                        |                        |
|---------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                                       | Esc. real              | Esc. reduzida          |                        |                        |                        |
|                                       |                        | Ensaio 1               | Ensaio 2               | Ensaio 3               | Ensaio 4               |
| Tempo (min)                           | Coef. Atrito ( $\mu$ ) | Coef. Atrito ( $\mu$ ) | Coef. Atrito ( $\mu$ ) | Coef. Atrito ( $\mu$ ) | Coef. Atrito ( $\mu$ ) |
| 1                                     | 0,45                   | 0,52                   | 0,59                   | 0,52                   | 0,45                   |
| 10                                    | 0,38                   | 0,35                   | 0,34                   | 0,30                   | 0,25                   |
| 20                                    | 0,34                   | 0,31                   | 0,31                   | 0,29                   | 0,30                   |
| 30                                    | 0,34                   | 0,31                   | 0,32                   | 0,28                   | 0,30                   |
| 40                                    | 0,32                   | 0,31                   | 0,32                   | 0,29                   | 0,29                   |
| 45                                    | 0,32                   | 0,32                   | 0,33                   | 0,30                   | 0,32                   |

Fonte: o autor (2019)



**APÊNDICE G – DADOS DO GRÁFICO DA FIGURA 21**

| ENSAIO RAMPA PESADA - MATERIAL AF/557 |            |               |            |            |            |
|---------------------------------------|------------|---------------|------------|------------|------------|
|                                       | Esc. real  | Esc. reduzida |            |            |            |
|                                       |            | Ensaio 1      | Ensaio 2   | Ensaio 3   | Ensaio 4   |
| Tempo (min)                           | Temp. (°C) | Temp. (°C)    | Temp. (°C) | Temp. (°C) | Temp. (°C) |
| 0                                     | 22,0       | 29,5          | 30,2       | 28,4       | 29,1       |
| 10                                    | 185,0      | 370,4         | 363,8      | 295,5      | 333,4      |
| 20                                    | 247,0      | 360,4         | 362,0      | 307,6      | 341,2      |
| 30                                    | 258,0      | 366,6         | 368,8      | 323,6      | 362,0      |
| 40                                    | 274,0      | 373,5         | 374,8      | 312,0      | 365,0      |
| 45                                    | 278,0      | 376,8         | 379,3      | 308,4      | 370,9      |

Fonte: o autor (2019)

**APÊNDICE H – DADOS DO GRÁFICO DA FIGURA 22**

| ENSAIO PARADA LEVE - MATERIAL AF/557 |                        |                        |                        |                        |                        |
|--------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                                      | Esc. real              | Esc. reduzida          |                        |                        |                        |
|                                      |                        | Ensaio 1               | Ensaio 2               | Ensaio 3               | Ensaio 4               |
| Velocidade (km/h)                    | Coef. Atrito ( $\mu$ ) | Coef. Atrito ( $\mu$ ) | Coef. Atrito ( $\mu$ ) | Coef. Atrito ( $\mu$ ) | Coef. Atrito ( $\mu$ ) |
| 96                                   | 0,42                   | 0,48                   | 0,52                   | 0,45                   | 0,31                   |
| 64                                   | 0,47                   | 0,47                   | 0,52                   | 0,44                   | 0,34                   |
| 64                                   | 0,45                   | 0,43                   | 0,49                   | 0,43                   | 0,41                   |
| 96                                   | 0,40                   | 0,45                   | 0,56                   | 0,44                   | 0,38                   |
| 96                                   | 0,40                   | 0,46                   | 0,57                   | 0,45                   | 0,35                   |
| 64                                   | 0,44                   | 0,49                   | 0,52                   | 0,45                   | 0,41                   |

Fonte: o autor (2019)

## ANEXO A – DADOS DA CALIBRAÇÃO DO DINAMÔMETRO

## CALIBRAÇÃO DE VELOCIDADE:

|   | Testado | Leit 1 | Leit 2 | Leit 3 | Média  | Desvio | Incerteza | Desv+Incert |
|---|---------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|-------------|
| 1 | 100     | 100    | 100    | 100    | 100    | 0      | 0,58      | 0,58        |
| 2 | 200     | 201    | 201    | 201    | 201    | -1,02  | 0,58      | 1,6         |
| 3 | 400     | 403    | 403    | 403    | 403    | -3,01  | 0,58      | 3,59        |
| 4 | 600     | 605    | 604    | 604    | 604,33 | -4,33  | 1,11      | 5,44        |
| 5 | 800     | 806    | 806    | 806    | 806    | -5,99  | 0,58      | 6,57        |
| 6 | 1000    | 1007   | 1007   | 1007   | 1007   | -6,97  | 0,58      | 7,55        |

## CALIBRAÇÃO DE TEMPERATURA:

|   | Padrão | Leit 1 | Leit 2 | Leit 3 | Média   | Padrão corr. | Desvio | Incerteza | Y <sub>eff</sub> | Sist+Incert |
|---|--------|--------|--------|--------|---------|--------------|--------|-----------|------------------|-------------|
| 1 | 100    | 98,7   | 98,8   | 98,7   | 98,733  | 100,4298418  | -1,697 | 0,62      | 168,3            | 2,317       |
| 2 | 200    | 198,6  | 198,6  | 198,5  | 198,567 | 200,4665187  | -1,9   | 0,62      | 168,3            | 2,52        |
| 3 | 300    | 298,5  | 298,5  | 298,6  | 298,533 | 300,5031956  | -1,97  | 0,62      | 168,3            | 2,59        |
| 4 | 500    | 498,4  | 498,4  | 498,3  | 498,367 | 500,5765494  | -2,21  | 0,62      | 168,3            | 2,83        |
| 5 | 600    | 598,3  | 598,4  | 598,4  | 598,367 | 600,6132263  | -2,247 | 0,62      | 168,3            | 2,867       |

## CALIBRAÇÃO DE PRESSÃO:

|   | Padrão | Leit 1 | Leit 2 | Leit 3 | Média   | Padrão corr. | Desvio | Incerteza | Y <sub>eff</sub> | Sist+Incert |
|---|--------|--------|--------|--------|---------|--------------|--------|-----------|------------------|-------------|
| 1 | 5      | 5,0    | 5,0    | 5,0    | 5       | 5,008600853  | -0,009 | 0,108     | 304,4            | 0,117       |
| 2 | 10     | 10,0   | 10,0   | 10,0   | 10      | 10,01919169  | -0,019 | 0,108     | 304,4            | 0,127       |
| 3 | 50     | 50,0   | 50     | 50     | 50      | 49,98658797  | 0,013  | 0,108     | 304,4            | 0,121       |
| 4 | 100    | 100,0  | 99,8   | 99,9   | 99,9    | 99,95885979  | -0,059 | 0,192     | 6,888            | 0,251       |
| 5 | 120    | 119,8  | 119,8  | 119,9  | 119,833 | 119,936221   | -0,103 | 0,133     | 24,57            | 0,236       |

**ANEXO B – ESPECTROMETRIA DISCO DE FREIO EM ESC. REDUZIDA**

|  |         |                         |         |         |         |         |         |         |
|--|---------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Método: Fe-10-F                        |         | 13/09/2019 09:19:36     |         |         |         |         |         |         |
| Comentário: Aço Baixa / Média Liga - F |         | 123448/07               |         |         |         |         |         |         |
| Análises singulares                    |         | Elementos: Concentração |         |         |         |         |         |         |
| Sample No:                             |         | Quality:                |         |         |         |         |         |         |
| Sample Id:                             |         |                         |         |         |         |         |         |         |
| Nr.                                    | C       | Si                      | Mn      | P       | S       | Cr      | Ni      | Mo      |
|  | %       | %                       | %       | %       | %       | %       | %       | %       |
| 1                                      | 0.63    | 0.247                   | 0.86    | 0.0036  | <0.0010 | 0.099   | 0.064   | 0.0097  |
| 2                                      | 0.65    | 0.253                   | 0.88    | 0.0041  | 0.0025  | 0.103   | 0.072   | 0.011   |
| Nr.                                    | Al      | Cu                      | Co      | Ti      | Nb      | V       | W       | Pb      |
|  | %       | %                       | %       | %       | %       | %       | %       | %       |
| 1                                      | 0.038   | <0.0010                 | <0.0015 | 0.0027  | <0.0030 | <0.0010 | <0.010  | <0.0030 |
| 2                                      | 0.045   | <0.0010                 | 0.0033  | 0.0056  | <0.0030 | <0.0010 | <0.010  | <0.0030 |
| Nr.                                    | B       | Sn                      | Zn      | As      | Bi      | Ca      | Ce      | Zr      |
|  | %       | %                       | %       | %       | %       | %       | %       | %       |
| 1                                      | <0.0005 | <0.0010                 | 0.0048  | 0.0013  | <0.0020 | 0.0040  | <0.0030 | <0.0015 |
| 2                                      | 0.0007  | <0.0010                 | 0.0059  | <0.0010 | <0.0020 | 0.0072  | <0.0030 | <0.0015 |
| Nr.                                    | La      | Fe                      |         |         |         |         |         |         |
|  | %       | %                       |         |         |         |         |         |         |
| 1                                      | <0.0010 | 98.0                    |         |         |         |         |         |         |
| 2                                      | <0.0010 | 98.0                    |         |         |         |         |         |         |

Fonte: Fras-le S/A (2019)