



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS CARACTERÍSTICAS
SUPERFICIAIS DE MATERIAIS DE ATRITO, PARÂMETROS DE
OPERAÇÃO E DESEMPENHO NA FRENAGEM DE UM VEÍCULO
AUTOMOTIVO POR MEIO DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS**

RAFAEL LUCAS MACHADO PINTO

Belo Horizonte

2020

Rafael Lucas Machado Pinto

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS CARACTERÍSTICAS
SUPERFICIAIS DE MATERIAIS DE ATRITO, PARÂMETROS DE
OPERAÇÃO E DESEMPENHO NA FRENAGEM DE UM VEÍCULO
AUTOMOTIVO POR MEIO DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto e Sistemas

Orientador: Dr. Juan Carlos Horta Gutiérrez

Belo Horizonte

2020

P659a	<p>Pinto, Rafael Lucas Machado. Análise estatística das características superficiais de materiais de atrito, parâmetros de operação e desempenho na frenagem de um veículo automotivo por meio de ensaios experimentais [recurso eletrônico] / Rafael Lucas Machado Pinto. - 2020. 1 recurso online (200 f.: il., color.): pdf.</p> <p>Orientador: Juan Carlos Horta Gutiérrez.</p> <p>Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 192-200.</p> <p>Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Estatística – Análise - Teses. 3. Desgaste mecânico – Teses. 4. Automóveis – Freios – Teses. I. Gutiérrez, Juan Carlos Horta. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p>
CDU: 621(043)	



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

**"ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS MATERIAIS DE ATRITO, PARÂMETROS DE OPERAÇÃO E DESEMPENHO
NA FRENAGEM DE UM VEÍCULO AUTOMOTIVO POR MEIO DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS"**

RAFAEL LUCAS MACHADO PINTO

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dr. Juan Carlos Horta Gutierrez (orientador-Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Marcelo Araújo Câmara (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Juan Carlos Campos Rubio (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Pedro Paiva Brito (Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais/PUC-Minas), Dr. Girley Ferreira Rodrigues (Universidade Estadual de Minas Gerais/UEMG) e Dr. Robson Bruno Dutra Pereira (Universidade Federal de São João Del-Rei/UFSJ) como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Doutor em Engenharia Mecânica", na área de concentração de "Projeto e Sistemas".

Tese aprovada no dia 11 de dezembro de 2020.

Por:



Documento assinado eletronicamente por **Juan Carlos Horta Gutierrez, Subcoordenador(a)**, em 23/12/2020, às 10:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Paiva Brito, Usuário Externo**, em 23/12/2020, às 14:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Juan Carlos Campos Rubio, Membro de comissão**, em 23/12/2020, às 17:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Araujo Camara, Professor do Magistério Superior**, em 23/12/2020, às 17:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Girley Ferreira Rodrigues, Usuário Externo**, em 30/12/2020, às 11:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Robson Bruno Dutra Pereira, Usuário Externo**, em 07/01/2021, às 11:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0488199** e o código CRC **ECBB70C2**.

Dedico este trabalho a Deus, aos meus pais, Eustáquio e Maria do Carmo,

Aos meus irmãos, Manoel e Jardel, e à Dimária.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser a minha fortaleza em todos os momentos. A São Miguel Arcanjo e a Nossa Senhora Aparecida, pela proteção e bênçãos.

Ao meu pai Eustáquio e à minha mãe Maria do Carmo, por sempre estarem presentes, se preocuparem e me darem amor e força sempre.

Aos meus irmãos Manoel e Jardel pela amizade e companheirismo.

À Dimária, pelo amor, companheirismo e por me dar forças.

Aos meus familiares e amigos, pelas palavras de incentivo.

Ao meu orientador, professor Dr. Juan Carlos Horta Gutiérrez, por acreditar no meu trabalho, paciência e conselhos.

Aos Professores Dr. Juan Carlos Campos Rubio e Dr. Paulo Eustáquio de Faria, por me ajudarem nesta caminhada.

Aos meus companheiros professores do Departamento de Engenharia de Produção do ICEA/UFOP, obrigado pela confiança depositada durante o meu doutorado.

Ao Firmino pela ajuda com os dados experimentais.

Ao Ms. Jordani, do laboratório de Microscopia da Unifei campus Itabira, pela grande ajuda na obtenção das análises MEV e EDS.

*“Em tudo dai graças, pois esta é a vontade de
Deus em Cristo Jesus para convosco.”*

1 Tessalonicenses 5:18

RESUMO

Este trabalho objetiva realizar caracterização dos platôs formados na superfície de materiais de atrito de freio, correlacionando-os com as propriedades tribológicas e térmicas alcançadas em diferentes condições de frenagem do veículo. Para isso foram executados experimentos tanto em veículo, sob condições reais de operação de frenagem, quanto em bancada de ensaios de sistemas de freio. Características dos platôs formados nas superfícies dos materiais de atrito, submetidos a diferentes condições operacionais em veículo real, foram analisadas em laboratório e correlacionadas com variáveis de desempenho durante a frenagem, caracterizadas por meio do coeficiente de atrito na interface do par tribológico e da temperatura. Já os ensaios conduzidos em bancada foram efetuados para analisar o desempenho do sistema de freio em relação às variáveis temperatura, coeficiente de atrito e desgaste. Para tanto, foi utilizada uma técnica de otimização para selecionar os níveis dos parâmetros que otimizam o desempenho do sistema de freio analisado e dois modelos de previsão do comportamento destas variáveis. Como resultados, constatou-se, por meio de ensaios em veículo real, que existe uma significativa correlação estatística entre as características dos platôs formados na superfície do material de atrito, parâmetros de rugosidade superficial do material de atrito e variáveis de desempenho durante a frenagem. Não foram verificadas diferenças nas composições químicas dos platôs entre os dois tipos de ensaios em veículo. Já para ensaios conduzidos em bancada, foi observado que o planejamento experimental proposto, combinado com uma técnica de otimização, possibilitou a seleção dos melhores níveis dos fatores envolvidos durante o processo de frenagem. Além disso, observou-se que tanto o modelo de predição por regressão múltipla (MRM), quanto por redes neurais artificiais (RNA) são viáveis para predição do comportamento das variáveis de desempenho da frenagem, o que pode contribuir para melhorar o projeto, o desempenho, a confiabilidade e a manutenção de sistemas de freio.

Palavras-chave: Frenagem, atrito, análise estatística, platôs, *fade*.

ABSTRACT

This work aims to characterize the plateaus formed on the surface of brake friction materials, correlating them with the tribological and thermal properties achieved in different vehicle braking conditions. For that, experiments were carried out both in vehicle, under real conditions of braking operation, and in the test bench of brake systems. Characteristics of the plateaus formed on the friction material surfaces, submitted to different operating conditions in a real vehicle, were analyzed in the laboratory and correlated with performance variables during braking, characterized by the friction coefficient at the interface of the tribological pair and the temperature. The tests carried out on the bench were performed to analyze the performance of the brake system in relation to the variables of temperature, friction and wear. For that, an optimization technique was used to select the levels of the parameters that optimize the performance of the analyzed brake system and two models to predict the behavior of these variables. As a result, it was found, through tests in a real vehicle, that there is a significant statistical correlation between the characteristics of the plateaus formed on the surface of the friction material, parameters of surface roughness of the friction material and performance variables during braking. There were no differences in the chemical compositions of the plateaus between the two types of vehicle tests. For tests conducted on bench, it was observed that the proposed experimental planning, combined with an optimization technique, made it possible to select the best levels of the factors involved during the braking process. In addition, it was observed that both the multiple regression prediction model (MRM) and artificial neural networks (RNA) are feasible for predicting the behavior of the braking performance variables, which can contribute to improving the project, the performance, reliability and maintenance of brake systems.

Key words: Braking, friction, statistical analysis, plateaus, fade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Perdas de energia em um automóvel.	34
Figura 2.2: Equema representativo dos modos de desgaste.	35
Figura 2.3: Equema representativo da adesão	36
Figura 2.4: Abrasão o a) por penetração de partículas duras; b) por asperidades duras	37
Figura 2.5: Tipos de sistemas de transmissão de energia em freios: (a) Freio mecânico; (b) Freio hidráulico; (c) Freio pneumático; (d) Freio elétrico.	39
Figura 2.6: Diagrama do sistema de freio mais utilizado no Brasil.	40
Figura 2.7: Transferência de carga dinâmica durante a frenagem.	40
Figura 2.8: Componentes de um Freio a Disco.	43
Figura 2.9: Pastilha de freio e suas camadas constituintes.....	44
Figura 2.10: (a) Freio a disco do tipo Cáliper Fixo e (b) Cáliper Flutuante.	44
Figura 2.11: (a) Disco de freio sólido, (b) disco de freio ventilado, (c) disco de freio ventilado e com superfície ranhurada e (d) disco de freio ventilado e com superfície furada.	47
Figura 2.12: Mudança na distorção térmica no disco de freio em relação ao tempo	48
Figura 2.13: Diagrama de Dinamômetro Inercial.....	62
Figura 2.14: (a) Variação da velocidade de escorregamento em sistemas de freio a disco, (b) Variação da velocidade de escorregamento em sistemas a tambor.	66
Figura 2.15: Coef. de atrito x velocidade de escorregamento para diferentes materiais	67
Figura 2.16: Coeficiente de atrito e desgaste em função da velocidade de escorregamento – pastilha de freio NAO.....	68
Figura 2.17: Micrografias da superfície de pastilhas NAO ensaiadas sob diferentes velocidades	68
Figura 2.18: Coeficiente de atrito e desgaste em função da velocidade de escorregamento – pastilha de freio SM	69
Figura 2.19: Micrografias da superfície de pastilhas SM sob diferentes velocidades	69
Figura 2.20: Coeficiente de atrito e desgaste em função da pressão de contato – pastilha de freio NÃO.....	73
Figura 2.21: Micrografias da superfície de pastilhas NAO sob diferentes pressões.....	73
Figura 2.22: Coeficiente de atrito e desgaste em função da pressão de contato – pastilha de freio SM	74
Figura 2.23: a) Coeficiente de atrito e desgaste em função da pressão da temperatura – b) pastilha NAO contendo fibras de aço e a micrografia da superfície desgastada	76
Figura 2.24: Coeficiente de atrito e desgaste em função da pressão da temperatura - pastilha SM contendo fibras de aço.....	77
Figura 2.25: perfil do par pastilha-disco e, à direita, uma pequena seção ampliada.	80
Figura 2.26: seção do sistema de freio em diferentes momentos $t_0 < t_1 < t_2$: crescimento de um platô.	81

Figura 2.27. (a) Imagem de microscopia eletrônica de varredura de uma pastilha de freio desgastada (direção de deslizamento: esquerda → direita). (b) Imagem de microscópio confocal de uma pastilha de freio desgastada (direção de deslizamento: topo → baixo).....	81
Figura 2.28: seção do sistema de freio em diferentes momentos $t_3 < t_4 < t_5$: destruição de um platô.	82
Figura 2.29: Contato pastilha/disco: (a) constituintes da pastilha nova; (b) formação de um platô; (c) crescimento do platô e aumento da instabilidade; (d) destruição de um platô.....	83
Figura 2.30: Platôs de contato na superfície em uma pastilha de freio orgânica. A superfície ranhurada típica dos platôs de contato é visível no detalhe ampliado.	84
Figura 2.31: Platôs na superfície em uma pastilha de freio orgânica após frear em (a) baixa pressão e temperatura do freio e (b) alta pressão e temperatura.....	84
Figura 2.32: Visão geral da área de uma pastilha de freio e sua divisão em platôs de contato e áreas de contato real dentro de um platô.	85
Figura 2.33: Contato pastilha/disco: sentido do deslizamento com a formação dos platôs primário e platôs secundários.....	86
Figura 2.34: Três zooms consecutivos da superfície de contato da pastilha caracterizada por platôs de contato.	89
Figura. 2.35: Platôs formados em uma pastilha de freio orgânica: percebe-se que dois platôs primários suportam o platô secundário. Em (a) tem-se a imagem do MEV por elétrons secundários (secondary electron - SE), que permite uma visão topográfica da superfície. Em (b), imagem obtidas por elétrons retroespalhados (backscattered electrons - BSE) – que fornece um contraste da composição do material.....	89
Figura 2.36: Variações da superfície de contato.....	93
Figura 3.1: Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa.....	95
Figura 3.2: Banco de ensaio de freios.....	99
Figura 3.3 - Circuito hidropneumático do banco de ensaio de freios.....	100
Figura 3.4 - Dinamômetro: FF - força de frenagem; rf - raio de atuação do freio a disco; FCC - força na célula de carga; ra - comprimento da alavanca.....	101
Figura 3.5 - Diagrama do sistema de aquisição de dados.....	102
Figura 3.6 - Diagrama do sistema de aquisição de dados para experimentos em veículo.....	105
Figura 3.7: Representação dos ensaios em veículo: (a) descida de serra simulada e (b) condição severa de frenagem em superfície plana – frenagem de emergência.....	111
Figura 3.8: exemplo de amostra retirada de uma pastilha de freio e rugosímetro Taylor Hobson Precision, modelo Surtronic 25.....	113
Figura 3.9: Identificação dos platôs de contato por meio do software <i>Quantikov</i> e a saída com os parâmetros geométricos gerados.....	115
Figura 3.10: Arquitetura – algoritmo <i>On Line Backprop – Rand</i>	123
Figura 3.11: Processo de Aprendizagem da RNA.....	124
Figura 4.1: Gráficos de Resíduos para a variável resposta coeficiente de atrito.....	127
Figura 4.2: Gráfico de interação para a variável resposta coeficiente de atrito.....	128
Figura 4.3: Gráfico de interação para a variável resposta temperatura.....	129

Figura 4.4: Gráfico de interação para a variável resposta desgaste das Pastilhas de Freio.....	129
Figura 4.5: Resultados da otimização.....	135
Figura 4.6: Configuração da RNA	136
Figura 4.7: Erro RMS para treinamento da RNA	136
Figura 4.8: Gráfico de interação para a Coeficiente de atrito.....	139
Figura 4.9: Gráfico de interação para a Temperatura Final.	140
Figura 4.10: Gráfico de interação para o Desgaste.	140
Figura 4.11: Otimização global para os ensaios de 10cv.....	144
Figura 4.12: Influência da temperatura no coeficiente de atrito.....	145
Figuras 4.13: Temperatura e coeficiente de atrito em função do número de frenagens ao longo do décimo ciclo de frenagem – ensaios 3cv, disco novo, pastilha nova, p=0,10MPa	147
Figuras 4.14: Temperatura e coeficiente de atrito em função do número de frenagens ao longo do décimo ciclo de frenagem - ensaios 3cv, disco e pastilha assentada, p=0,15MPa	147
Figuras 4.15: Temperatura e coeficiente de atrito em função do número de frenagens ao longo do décimo ciclo de frenagem – ensaio 10cv, v=60km/h, p=0,67MPa	148
Figuras 4.16: Temperatura e coeficiente de atrito em função do número de frenagens ao longo do décimo ciclo de frenagem – ensaio 10cv, v=95km/h, p=2,67MPa	148
Figura 4.17: Coef. de atrito e temperatura x número de frenagens – 80 a 40 km/h.....	151
Figura 4.18: Coef. de atrito x temperatura - 80 a 40km/h.....	151
Figura 4.19: Coef. de atrito e temperatura x número de frenagens – 60 a 40 km/h.....	152
Figura 4.20: Coef. de atrito x temperatura - 60 a 40km/h.....	152
Figura 4.21: Coef. de atrito e temperatura x número de frenagens – 60 a 40 km/h.....	153
Figura 4.22: Coef. de atrito x temperatura - 70 a 40km/h.....	153
Figura 4.23: Coef. de atrito e temperatura x número de frenagens – 80 a 0 km/h – sequência 1.	154
Figura 4.24: Coef. de atrito x temperatura - 80 a 0 Km/h – sequência 1.....	155
Figura 4.25: Coef. de atrito e temperatura x número de frenagens – 80 a 0 km/h – sequência 2	155
Figura 4.26: Coef. de atrito x temperatura - 80 a 0 km/h – sequência 2	156
Figura 4.27: Coef. de atrito e temperatura - 80 a 0 km/h – sequência 3.....	156
Figura 4.28: Coef. de atrito x temperatura - 80 a 0 km/h – sequência 3	157
Figura 4.29: coeficiente de atrito entre uma pastilha e um disco que possui uma região com acabado mais grosseiro obtida através de jateamento de areia.	161
Figura 4.30: Região crítica - Distribuição de probabilidade t	163
Figura 4.31: Gráficos de Efeitos principais	164
Figura 4.32: Imagens obtidos pelo MEV - 25x - para pastilha nova: a) SE; b) BSE – 25x.....	166
Figura 4.33: Imagens obtidos pelo MEV - 500x - para pastilha nova: a) SE; b) BSE	167
Figura 4.34: Espectro EDS de toda a amostra – pastilha nova.....	167
Figura 4.35: Imagens MEV - 25x - para pastilha descida de serra: a) SE; b) BSE.....	168

Figura 4.36: Imagens MEV - 500x -para pastilha descida de serra: a) SE; b) BSE.....	169
Figura 4.37: Espectro EDS de toda a amostra – pastilha ensaio descida de serra.....	170
Figura 4.38: Análise EDS realizada em diferentes pontos em uma amostra submetida ao ensaio de descida de serra.	170
Figura 4.39: Imagens obtidos pelo MEV - 25x - para pastilha sob frenagem de emergência: a) SE; b) BSE.....	172
Figura 4.40: Imagens obtidos pelo MEV - 500x - para pastilha sob frenagem de emergência: a) SE; b) BSE.....	174
Figura 4.41: Espectro EDS de toda a amostra – pastilha ensaio frenagem de emergência.....	174
Figura 4.42: Análise EDS realizada em diferentes pontos em uma amostra submetida ao ensaio de descida de serra.	175
Figura 4.43: Análise EDS realizada em platôs primários: a) ensaio de descida de serra simulada. b) ensaio de frenagem de emergência.....	175
Figura 4.44: Análise EDS realizada em platôs primários - ensaio de descida de serra. a) SE; b) BSE	177
Figura 4.45: Mecanismos de desgaste - ensaio de descida de serra. a)SE; b) BSE.	179
Figura 4.46: Mecanismos de desgaste – frenagem de emergência. a) SE; b) BSE	179
Figura 4.47: Topografia da superfície - amostra da pastilha nova	181
Figura 4.48: Topografia da superfície - amostra ensaio descida de serra.....	182
Figura 4.49: Topografia da superfície - amostra ensaio frenagem de emergência	182

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Classificação dos tipos de dano superficial.	34
Tabela 2.2: Comparativo as entre características das máquinas de caracterização de materiais de fricção.....	63
Tabela 3.1: Níveis dos fatores Controláveis – ensaios em bancada com potência de 3cv	108
Tabela 3.2: Níveis dos fatores Controláveis – ensaios em bancada com potência de 10cv	109
Tabela 3.3: Variáveis utilizadas para análise dos experimentos em veículo	111
Tabela 3.4: Técnicas de análise laboratorial aplicadas em materiais de atrito.....	114
Tabela 3.5: Tabela ANOVA para 1 fator	117
Tabela 3.6: Interpretação dos valores de coeficiente de correlação	119
Tabela 4.1:P-valores ANOVA para as variáveis respostas	127
Tabela 4.2: -Coeficientes e P-valores para os modelos de regressão	130
Tabela 4.3: Resumo dos modelos de predição e otimização de cada variável resposta	131
Tabela 4.4: Resultado do treinamento da Rede Neural.....	136
Tabela 4.5: Comparação entres valores preditos pelos modelos de regressão e de redes neurais – potência motora de 3v	137
Tabela 4.6: P-valores ANOVA para as variáveis respostas	139
Tabela 4.7: Coeficientes e P-valores para os modelos de regressão	141
Tabela 4.8: Resumo dos modelos de predição e otimização de cada variável resposta	143
Tabela 4.9: Comparação entres valores preditos pelos modelos de regressão e de redes neurais – potência motora de 10cv	146
Tabela 4.10: Estatística descritiva – ensaios descida de serra simulada.....	154
Tabela 4.11: Estatística descritiva – ensaios frenagem de emergência.....	157
Tabela 4.12: Razões F e R	158
Tabela 4.13: Matriz de correlações entre as variáveis analisadas	159
Tabela 4.14: Resumo dos resultados do teste t	162
Tabela 4.15: Composições dos platôs primários selecionados na Figura 4.43.	176
Tabela 4.16: Teste t – composição platôs primários.....	176
Tabela 4.17: Composições dos platôs secundários selecionados na Figura 4.44.	177
Tabela 4.18: Teste – composição platôs secundários	178
Tabela 4.19: – Resumo – parâmetros de rugosidade tridimensional	182

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	<i>Anti-lock braking system</i>
ANOVA	<i>Analysis of variance</i>
BSE	<i>Backscattered electrons</i>
CVT	<i>Continuously variable transmission</i>
DRX	Difratometria de raios X
DS	Ensaio de descida de serra simulada
EDS	<i>Energy Dispersive X-ray Spectrometry</i>
EM	Ensaio de frenagem de emergência
Fast	<i>Friction Assessment and Screening Test</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
FIB	<i>Focused Ion Beam</i>
MCA	<i>Mobile cellular automata</i>
MCDM	<i>Multiple criteria decision model</i>
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MRM	Modelo de regressão múltipla
NAO	<i>No asbestos organic</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
SM	Semi-metálicos
TGA	<i>Thermogravimetric analysis</i>
XRF	<i>X-ray fluorescence</i>
R_a	Média aritmética dos desvios da superfície [μm]
RNA	Rede neural artificial
R_z	Média dos cinco maiores picos e maiores vales de um perfil [μm]
R_t	Altura máxima de rugosidade [μm]
S_a	Desvio do plano médio de rugosidade [μm]
SE	<i>Secondary electron</i>
S_v	Profundidade máxima do vale [μm]
S_z	Média aritmética dos cinco picos mais altos e os vales mais profundos da área de varredura [μm]
SIM	<i>Scanning Ion Microscopy</i>
Sku	Distribuição e forma dos picos na superfície
Smr	Relação de área do material (%);
Smc	Relação de área do material inverso [μm]
Sp	Altura máxima do pico [μm]

Sq Desvio das alturas dos picos em relação ao plano médio [μm]
Ssk Grau de simetria das alturas de uma superfície sobre um plano médio

LISTA DE SÍMBOLOS

A_0	Área aparente de contato pastilha/disco (mm^2)
A_i	área dos elementos medidos (mm^2)
A_R	Área real de contato pastilha/disco (mm^2)
a	Número de tratamentos ou níveis do fator
b_f	Braço de força da manete de freio [m]
b_r	Braço de resistência da manete [m]
F	Razão fade
F_a	Força de atrito [kgf]
F_{cc}	Força medida na célula de carga [kgf]
F_f	Força de frenagem [kgf]
F_i	Fator de forma ou esfericidade
$F_{\alpha, V1, V2}$	Valor limite da região crítica – distribuição F
F_0	Valor calculado da estatística do teste F
F_{RS}	Força imposta ao solo pela roda durante a frenagem
j	Índice que representa os coeficientes de regressão
k	Índice que representa as variáveis regressoras
n	Número de observações em cada tratamento
N	Força normal [kgf]
N_t	Número total de observações
P	Pressão de contato [MPa]
P_i	Perímetro dos elementos medidos
P_P	Pressão pneumática [bar]
R	Razão recuperação
r	Coeficiente de correlação linear amostral
r_{at}	Raio do pistão do atuador pneumático [m]
r_p	Raio da partícula, [mm]
r_{pp}	Raio do pistão da pinça, [m]
r_{cm}	Raio do cilindro mestre, [m]
$SQ_{tratamentos}$	Soma dos quadrados do tratamentos
SQ_E	Soma dos quadrados dos erros
SQ_t	Soma dos quadrados totais
Y	Variável dependente ou resposta
$\bar{y}_i.$	Média das observações do i -ésimo tratamento
$\bar{y}.. =$	Média global de todas as observações

y_{ij}	j -ésima observação do i -ésimo tratamento
W	Comprimento de contato, [mm]
τ_{\max}	Tensão máxima de cisalhamento do material [MPa]
μ	Coefficiente de atrito na interface pastilha/disco
μ_A	Componente adesiva do atrito
μ_{abr}	Componente abrasiva do atrito
μ_{ad}	Componente do atrito abrasivo por asperidades duras
$\mu_F 100^\circ\text{C}$	<i>Coefficiente de atrito a 100°C – fade</i>
$\mu_F 350^\circ\text{C}$	<i>Coefficiente de atrito a 350°C – fade</i>
μ_{pp}	Componente do atrito abrasivo por penetração de partículas
$\mu_R 100^\circ\text{C}$	Coefficiente de atrito a 100°C – recuperação
ρ	Coefficiente de correlação linear populacional
α	Nível de significância estatística
θ	Ângulo de ponta da asperidade [°]
β_0	Interseção da superfície de resposta ou plano
β_j	Coefficientes de regressão
ε	Termo de erro aleatório do modelo de regressão

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT	10
LISTA DE FIGURAS.....	11
LISTA DE TABELAS.....	15
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	16
LISTA DE SÍMBOLOS	18
1 INTRODUÇÃO.....	23
1.1 Justificativa	26
1.2 Objetivos.....	28
1.2.1 Objetivo Geral.....	28
1.2.2 Objetivos Específicos.....	28
1.3 Estrutura do Trabalho	29
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE.....	31
2.1 Tribologia.....	31
2.1.1 Atrito no dia-a-dia.....	32
2.1.2 Importância da tribologia.....	33
2.1.3 Modos de desgaste	35
2.2 Sistemas de Freio e Frenagem	38
2.2.1 Funções de um sistema de frenagem	41
2.2.2 Sistemas de Freio a Disco	42
2.3 Problemas térmicos em sistemas de freio.....	48
2.4 Materiais utilizados na fabricação de pastilhas e lonas de freios.....	50
2.5 Estado da Arte – Materiais de atrito	55
2.6 Máquinas para ensaios de frenagem	61
2.7 Variáveis que afetam o atrito e o desgaste	64
2.7.1 Velocidade de Escorregamento	66
2.7.2 Pressão de Contato	70
2.7.3 Temperatura e atrito	74
2.8 Formação dos Platôs	78
2.9 Estado da arte sobre platôs	86
2.10 Conclusões do Capítulo de Revisão Bibliográfica e Estado da Arte.....	94
3 MATERIAIS E MÉTODOS	95
3.1. Fluxograma Metodológico da Pesquisa	95
3.2. Ensaio em bancada	97
3.2.1 Descrição da máquina de ensaio de frenagem	98
3.2.2 Principais Componentes do banco de ensaio de freios.....	100

3.2.3 Instrumentação	102
3.2.4 Cálculo da força normal, força de frenagem e coeficiente de atrito	103
3.3 Descrição dos ensaios realizados em veículo	105
3.3.1 Instrumentos utilizados nos ensaios em veículo.....	105
3.4 Procedimentos de Ensaios de Frenagem	106
3.4.1 Procedimento de Krauss – Banco de Ensaios	106
3.4.2 Planejamento Experimental – Ensaios em Bancada	107
3.4.3 Procedimento para os experimentos executados em veículo.....	109
3.4.4 Planejamento Experimental – Ensaios em veículo.....	110
3.5 Seleção das técnicas de análise Laboratorial do Material de atrito	113
3.6 Métodos e Procedimentos de análise de dados utilizados	116
3.6.1 Análise de Variância (ANOVA).....	116
3.6.2 Análise de Correlação.....	118
3.6.3 Modelo de Regressão Múltipla (MRM)	120
3.6.4 Redes neurais artificiais	121
3.6.4.1 Rede Neural <i>Qwiknet</i> V2.23.....	121
3.6.5 Razões Fade (F) e Recuperação (R)	124
4 RESULTADOS	126
4.1 Ensaios em Bancada	126
4.1.1 Influência do tipo de disco, pastilha e pressão de acionamento do sistema de freio – potência de 3cv.....	126
4.1.1.1 Otimização Global.....	133
4.1.1.2 RNA- ensaios potência de 3cv	135
4.1.2 Análise da Velocidade Inicial de Frenagem e Pressão de Contato – potência motora de 10cv	138
4.1.2.1 Otimização Global.....	143
4.1.3 Identificação do efeito <i>fade</i>	146
4.2 Ensaios em veículo.....	150
4.2.1 Ensaios em descida de serra	150
4.2.2 Frenagem de emergência	154
4.3 Análise de Correlação entre as variáveis	158
4.4 Resultados Encontrados – Teste t	162
4.5 Análise das Micrografias obtidas por (MEV).....	165
4.5.1 Amostras retiradas de pastilhas novas.....	165
4.5.2 Ensaios Descida de Serra.....	167
4.5.3 Ensaios Frenagem de Emergência	172
4.6 Análise das superfícies das amostras por meio de Perfilometria.....	181

5 CONCLUSÕES.....	185
6 ARTIGOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS DURANTE O DOUTORADO	191
REFERÊNCIAS	192

1 INTRODUÇÃO

O grande avanço tecnológico experimentado pela indústria automotiva nas últimas décadas tornou possível dimensionar veículos com grande potência, capazes de atingir velocidades mais elevadas e também com capacidade de transportar maiores cargas. Um dos grandes desafios da indústria de manufatura de veículos é relativo ao desempenho de frenagem. Trata-se de um dos fatores de segurança essenciais em um veículo, seja quando o sistema de freio é submetido a uma parada de emergência, seja quando necessita-se ajustar a velocidade do veículo às condições de tráfego.

lombriller (2002) ressalta que é de fundamental importância a acuracidade na análise e desenvolvimento do sistema de freios, considerando todos os aspectos envolvidos em seu comportamento, incluindo o térmico. Desta forma, a fim de melhorar o desempenho deste importante sistema veicular sem inviabilizá-lo economicamente, é preciso buscar: redução de custos, aperfeiçoamento do projeto e produção, redução do tempo de desenvolvimento e diversificação dos produtos. De acordo com Ma *et. al.* (2018) materiais de atrito para freios demandam tempo elevado de desenvolvimento e custo, pois precisam ser analisados em uma série de testes em máquinas de ensaio e em veículos para obterem certificação.

A finalidade principal de um freio automotivo é reduzir a velocidade. Segundo Bosh (2005), sistemas de freio tem por objetivo reduzir ou manter a velocidade de um veículo, levá-lo à imobilidade ou mantê-lo imóvel. Xiao *et al.* (2016) mencionam que o freio de fricção funciona como uma garantia indispensável para o funcionamento regular e operação de segurança de veículos e equipamentos industriais.

Segundo Bosh (2005), o princípio básico envolvido em um sistema de freio é o atrito, por meio da conversão da energia mecânica em, principalmente, energia térmica, gerando dissipação térmica, o que provoca aquecimento do freio e impõe a necessidade de dissipar o excesso de calor do sistema. Outras formas de energia também podem ser geradas neste processo de conversão, como a energia acústica. O aquecimento excessivo durante o processo de frenagem

pode resultar em mau funcionamento do sistema de freio. Durante as frenagens de emergência, a dissipação de energia em uma pastilha de freio pode ultrapassar facilmente 30 kW. Surge, dessa forma, um grande desafio em se projetar materiais de fricção capazes de manter o desempenho do sistema de freio em níveis estáveis, ou que suas variações sejam minimizadas, durante a frenagem.

De acordo com Kakad e Moree (2017) os sistemas de freios a disco são componentes de segurança críticos cujo desempenho depende fortemente das condições de contato na interface pastilha-disco. A entrada no sistema de frenagem é uma força direta aplicada no pedal ou alavanca de freio pelo condutor, o que promove transferência de torque de frenagem para as rodas do veículo. Quando o motorista pisa no pedal do freio, o fluido hidráulico é empurrado contra o pistão da pinça, o que, por sua vez, força as pastilhas de freio contra o disco. Esse acionamento também pode ser pneumático, mecânico ou eletromagnético.

O disco de freio geralmente é feito de ferro fundido, mas pode ser, em alguns casos, feito de compósitos, como os reforçados com carbono/carbono ou matriz cerâmica. Ele está conectado à roda ou ao eixo. Para parar a roda, o material de fricção, sob a forma de pastilhas de freio, é forçado mecânica, hidráulica, pneumática ou eletromagneticamente ao se encostar firmemente em ambos os lados do disco. O atrito faz com que o disco da roda diminua a velocidade ou pare. Dukkupati *et al.* (2008) ressaltam que este torque de frenagem pode impedir a rotação das rodas ou regular o escorregamento das mesmas, o que resultará em altas forças de atrito entre os pneus e a estrada, com consequente redução de velocidade do veículo.

Segundo Erikson, Bergman e Jacobson (2002) e Singh *et. al.* (2017), as exigências sobre o comportamento de fricção em sistema de freios são altas e múltiplas. O coeficiente de atrito deve ser relativamente alto e, o mais importante, manter-se estável independentemente da temperatura, umidade, tempo de uso, grau de desgaste e corrosão, presença de sujeira e pulverização de água da estrada, etc. Além desses requisitos de segurança, exige-se minimização do

desgaste dos componentes e alto conforto como, por exemplo, a ausência de vibração e ruído. (ANOOP, NATARAJAN e KUMARESH, 2009).

lombriller (2002) ressalta que os engenheiros projetistas devem sempre ter em vista as seguintes exigências para um sistema de freios: alta eficiência, pequena histerese, alto fator de freio, redução do *fade* (perda momentânea de capacidade/poder de frenagem em função da elevação da temperatura), boas características de resposta, grande vida útil do material de fricção, redução de peso e facilidade de manutenção. Destaca ainda que, em um projeto otimizado de um sistema de freio, as dimensões e a energia térmica do freio são limitados pelo espaço disponível e peso máximo do veículo. A elevada importância técnica deste sistema de fricção e suas significativas diferenças da maioria das outras situações de contato tribológico motiva um estudo sobre a natureza particular do contato tribológico em freios veiculares.

Conforme Neis, Ferreira e Lorini (2011), os fabricantes de sistemas de freio mostraram particular interesse em analisar o desempenho de materiais de atrito a temperaturas elevadas (principalmente acima de 300°C). Nessas condições, pode ocorrer uma redução do coeficiente de atrito, um efeito conhecido como *fade*. Rehkopf e Halderman (2006), Limpert (2011), Bulthé *et al.* (2008), Mutlu (2009), Neis (2012), Sugoço, Mutlu e Sugoço (2016) caracterizam este efeito como uma perda da eficiência do freio a temperaturas elevadas. O *fade* é indesejável e pode colocar o motorista em perigo, especialmente em situações extremas, como a condução em descida prolongada.

Dessa forma, esta pesquisa busca um melhor entendimento do fenômeno *fade*, que é um dos maiores problemas térmicos experimentados pelos sistemas de frenagem. Passada a etapa de *fade*, espera-se que bons materiais tenham a capacidade de recuperar suas propriedades originais. Entretanto, surgem as seguintes perguntas-problema: após enfrentar diversas etapas *fade*, o material de fricção continua se recuperando completamente? Quais os principais mecanismos de desgaste presentes na superfície das pastilhas de freio após sucessivos ciclos de frenagem? O processo de frenagem promove alterações físicas e químicas na superfície das pastilhas? Existe correlação estatística entre características do desgaste do material de atrito e medidas de desempenho da

frenagem? Técnicas estatísticas, de predição e de otimização podem contribuir para processos de decisão quanto à escolha dos parâmetros operacionais e materiais em sistemas de freio?

Neste estudo, buscar-se-á conduzir ensaios de frenagem tanto em veículo real quanto em bancada de ensaios de freios. Através dos experimentos em veículo real almeja-se analisar as propriedades do material, principalmente quanto à caracterização física e química da superfície dos materiais de atrito de freio, correlacionando-as com as propriedades tribológicas e térmicas alcançadas em diferentes condições de frenagem do veículo. Para tanto, será necessária a utilização de técnicas estatísticas como a análise de correlação e a análise de variância (ANOVA).

Já por meio dos experimentos em bancada, pretende-se combinar técnicas de planejamento de experimentos, otimização e predição aplicadas às variáveis de desempenho temperatura, coeficiente de atrito e desgaste das pastilhas de freio. Além disso, por meio destes ensaios em bancada buscar-se-á identificar e analisar a influência da variação da temperatura no coeficiente de atrito durante a frenagem, contribuindo para melhorar o entendimento de problemas térmicos relacionados a sistemas de freio como, por exemplo, o *fade*.

Dessa forma, este conjunto de características desenvolvidas, com enfoque principal na utilização de técnicas estatísticas e ferramentas de otimização e predição, tornam o estudo único, não sendo encontrado nos levantamentos bibliográficos realizados trabalhos similares que contemplem todos estes assuntos simultaneamente.

1.1 Justificativa

Aleksendric´ e Barton (2009) mencionam que o desempenho de um freio automotivo é resultado de complexos fenômenos inter-relacionados que ocorrem na interface pastilha-disco, que são afetados pelas propriedades termoquímicas dos componentes dos materiais de atrito, propriedades dos discos e dos regimes de operação do sistema de freio. Segundo Singh *et. al.* (2017), a condição de contato é ainda mais complexa pelo fato dos materiais de atrito serem compósitos poliméricos que podem conter mais de 20 diferentes constituintes,

podendo ser significativamente afetada pela grande diversidade das propriedades mecânicas dos mesmos. Segundo Xiao *et al* (2016), o desempenho do atrito e do desgaste dos materiais de atrito são afetados, principalmente, por: propriedades materiais, condições de frenagem, condições de contorno, condições superficiais do par tribológico e parâmetros estruturais.

Processos tribológicos ocorrem na superfície de contato entre pastilha e disco, relacionado a questões de diferentes áreas de conhecimento, como mecânica, termodinâmica e química. A situação da superfície de contato ainda não é muito conhecida a fundo, conforme descrito por Cirovic e Aleksendric´ (2011). A área de contato real entre pastilha e disco é muito pequena comparada à área de contato aparente, sendo altamente dependente das mudanças de pressão de contato, temperatura, deformação e desgaste. As subseqüentes deformações termomecânicas entre as superfícies de atrito modificam o perfil do contato. Logo, a distribuição de pressão sofre modificações, alterando-se também a distribuição de temperatura gerada ao longo do processo de frenagem.

Segundo Talati e Jalalifar (2009), freios a disco tem sido amplamente utilizados em veículos leves devido ao bom desempenho apresentando por esse tipo de sistema durante o processo de frenagem. Limpert (2011) ressalta que um sistema de freio a disco apresenta como grande vantagem a capacidade de operar com pequeno efeito *fade* a temperaturas elevadas. Repetidas frenagens levam ao aumento da temperatura de vários componentes do freio veicular, ocasionando redução do desempenho da frenagem. Altas temperaturas durante a frenagem podem causar efeito *fade* de frenagem, desgaste prematuro, vaporização do fluido de freio, trincas térmicas e vibrações excitadas termicamente. Dessa forma, é de extrema importância compreender e prever o comportamento do crescimento da temperatura de um determinado sistema de freio e assegurar seu desempenho térmico de maneira clara durante a frenagem.

Nesse contexto, este estudo justifica-se pelo fato de que, conhecendo-se o comportamento das principais variáveis envolvidas, das características dos materiais utilizados, bem como dos parâmetros de operação durante a frenagem, torna-se possível avaliar e comparar o desempenho destes materiais por meio de medidas de desempenho, como a temperatura, coeficiente de atrito e

desgaste do par tribológico utilizado no sistema de freio. Utilizando-se técnicas estatísticas, combinadas com modelos de previsão e de técnicas de otimização torna-se possível tomar decisões quanto aos critérios de escolha dos materiais de fricção e de parâmetros de operação envolvidos durante a frenagem.

Já a análise da correlação entre medidas de desempenho, características dos platôs formados na superfície e parâmetros de rugosidade superficial justificam-se por contribuírem para a compreensão do relacionamento e da influência produzida por cada variável no desempenho da frenagem, nos mecanismos de desgaste e nos fenômenos relacionados à frenagem, como o *fade*. Dessa forma, o uso combinado destas diferentes técnicas de análises envolvendo testes de frenagem tanto em condições reais de aplicação quanto em banco de ensaios justificam o desenvolvimento deste estudo, pois podem contribuir para melhorias no projeto, segurança, desempenho confiabilidade e manutenção neste primordial dispositivo de segurança veicular, e definindo o caráter inédito do presente trabalho.

Segundo Dukkupati *et al.*, (2008) a expectativa direta dos sistemas de freio é evitar acidentes de trânsito. Portanto, rigorosas avaliações quanto aos parâmetros que influenciam a frenagem podem minimizar a probabilidade de falha, principalmente quando o sistema de freio fica submetido a condições extremas de aplicação, como em uma frenagem de emergência.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Realizar e analisar, por meios de técnicas estatísticas, de otimização e de predição, experimentos em banco de ensaios de freios e em veículo real, sujeitos a diferentes condições operacionais, para buscar identificar possíveis alterações nas características superficiais do material de atrito de freio e suas possíveis correlações com as variáveis de desempenho do veículo durante a frenagem.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar ensaios de frenagem em veículo real em duas diferentes condições de operação e analisar o comportamento da temperatura, do

coeficiente de atrito e de características dos platôs formados na superfície das pastilhas de freio utilizadas;

- Empregar as técnicas estatísticas análise de correlação, ANOVA e gráficos de efeitos principais para verificar o relacionamento entre as variáveis medidas, bem como suas significâncias estatísticas.
- Efetuar análise das superfícies desgastadas via microscopia eletrônica de varredura (MEV), caracterização química semi-quantitativa por meio de espectroscopia de energia dispersiva (EDS), medição de parâmetros de rugosidade superficial para analisar propriedades dos platôs formados na superfície da pastilha de freios e correlacioná-las com os resultados de coeficiente de atrito em ensaios realizados em veículo real;
- Analisar mecanismos de desgaste gerados durante os testes de frenagem utilizando-se MEV e EDS;
- Correlacionar os resultados estatísticos obtidos com os resultados similares encontrados na literatura publicada sobre o assunto;
- Apresentar os efeitos da pressão de contato, velocidade inicial de frenagem e do tempo de utilização de discos e pastilhas nas variáveis de desempenho temperatura, coeficiente de atrito e desgaste das pastilhas por meio de ensaios realizados em bancada;
- Aplicar o algoritmo *desirability* para seleção dos níveis dos fatores analisados que maximizam o desempenho do sistema de freio;
- Obter modelos de regressão múltipla e por redes neurais artificiais para predição do comportamento do coeficiente de atrito, temperatura e desgaste das pastilhas de freio.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este estudo está estruturado em 6 capítulos, em que no capítulo 1 é feita a introdução ao estudo e apresentadas as justificativas e os objetivos da pesquisa.

No capítulo 2 é desenvolvida a revisão bibliográfica e o estado da arte sobre tribologia aplicada a sistemas de freios, materiais de atrito, variáveis que

influenciam o desempenho de frenagem, máquinas para realização de ensaios e dinâmica dos platôs na interface de atrito.

O capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada para realização dos ensaios experimentais e obtenção dos dados para análise. São descritas, também, as variáveis a serem medidas, as variáveis resposta analisadas bem como as técnicas de medições e as ferramentas estatísticas, de otimização e de predição empregadas para este fim.

O capítulo 4 descreve os resultados dos experimentos para as diferentes condições operacionais ensaiadas, a aplicação de técnicas estatísticas para análise dos resultados, as correlações de desempenho e análise física e química dos materiais de atrito analisados.

O capítulo 5 aponta as conclusões do estudo e as sugestões para o desenvolvimento de futuros trabalhos relacionados.

O capítulo 6 menciona os artigos publicados e submetidos até o momento durante o doutorado.

Por fim, são apresentadas as referências de todas as bibliografias e normas consultadas para a elaboração do presente estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE

Neste capítulo são apresentados, por meio da revisão bibliográfica, os conceitos que estão envolvidos na elaboração do presente estudo. Desta forma, objetiva-se, por meio deste capítulo, buscar embasamento na literatura das definições dos principais termos relacionados ao estudo de sistemas de freio a disco, as variáveis e os mecanismos que influenciam no seu desempenho durante a frenagem.

2.1 Tribologia

O termo tribologia é derivado da palavra grega Tribos, que significa atrito ou fricção, e sua tradução literal seria “ciência do atrito”. Pela definição da norma ASTM G40-15 (2015) e Jost (1966), tribologia é a ciência e a tecnologia de interação de superfícies em movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionadas. De acordo com Hutchings (1992) e Neis (2012), trata-se de uma definição ampla e que evidencia o interesse em atrito e desgaste de materiais, cuja importância é multidisciplinar envolvendo as áreas física, química, engenharia, mecânica, metalúrgica, ciência dos materiais, termodinâmica, estática e dinâmica, metrologia, etc.

A humanidade vem utilizando soluções práticas relativas à tribologia de longa data, como por exemplo, a descoberta do fogo pelo homem mediante o calor gerado pelo atrito entre pedaços de madeira ou pelo faiscamento proveniente da colisão entre pedras. A descoberta da roda também ilustra o interesse do homem na redução do atrito durante o movimento.

Conforme Blau (2008), pensadores como Hero, Da Vinci, Hooke, Newton, Euler e Coulomb consideravam o atrito, mas uma descrição completa de suas causas fundamentais em um único modelo quantitativo, que se aplicaria a qualquer situação de atrito, ainda permanece evasivo. Diversos autores vem realizando pesquisas com o objetivo de modelar o atrito e o desgaste durante o processos de frenagens, conforme mostram algumas publicações (Dmitriev e Osterle, 2010; Eriksson, Bergman e Jacobson, 1999; Eriksson, Lord e Jacobson, 2001; Ostermeyer, 2001; Ostremeyer e Muller, 2008). O fato de que tanto esforço empreendido tenha falhado em discernir de maneira única a natureza

fundamental do atrito está relacionado às variáveis complexas e interativas que influenciam estes sistemas de avaliação, o que desafia uma definição única e simples. Neis (2012) sugere que por este motivo modelos de atrito e/ou desgaste dos materiais se limitam a descrever um dado comportamento (como, por exemplo, os efeitos *stick-slip* e *brake squeal*) de determinado material para condições bem específicas de aplicação.

2.1.1 Atrito no dia-a-dia

De acordo com Xiao *et al.* (2016) (2005), o atrito é um processo em que a energia cinética é convertida em outras formas de energia, tais com térmica, acústica e mecânica. O balanço desta dissipação de energia é dependente das propriedades dos materiais e do contato tribológico entre os mesmos. Além destes fatores, as geometrias das partes em contato, o meio ambiente, carga aplicada e a existência ou não de um terceiro corpo entre os materiais em contato também influenciam o atrito. Todos estes elementos compõem o denominado sistema tribológico.

O atrito pode ser definido como uma força de resistência desenvolvida quando há movimento relativo entre dois corpos sólidos, entre um gás e um sólido, entre um líquido e um sólido, ou em função de dissipação de energia interna. Já segundo Rabinowicz (2013), atrito é a resistência ao movimento que existe quando um objeto sólido é movido tangencialmente em relação a uma superfície de contato, ou quando ocorre uma tentativa de realizar este movimento. Em uma definição quantitativa, o atrito é representado como uma força, denominada força de atrito, que é proporcional à força normal aplicada entre os corpos em contato. A partir da razão entre força de atrito e a força normal define-se uma grandeza adimensional denominada coeficiente de atrito.

Hutchings (1992) ressalta que quando duas superfícies deslizam uma sobre a outra com movimento relativo, a energia de atrito é dissipada por meio de deformações nas camadas superficiais por mecanismos elásticos, plásticos, viscoelásticos e/ou por meio de microfraturas de partículas da superfície sob cisalhamento ou uniões entre interfaces adesivas, além da possibilidade de ação de um eventual terceiro corpo (ou filme de fricção) presente entre as superfícies de contato. Segundo com Al-Bender e Swevers (2008) os mecanismos básicos

de atrito quando duas superfícies estão sob o regime de deslizamento são adesão, abrasão e deformação plástica.

Segundo Al-Bender e Swevers (2008) o mecanismo de adesão está relacionado à força de cisalhamento que surge quando as superfícies estão relativamente próximas umas das outras, onde as forças de ligação metálicas, covalente e de Van der Waals são consideradas. Esse fenômeno pode ocorrer com ou sem carga, e a força adesiva dependerá da proximidade entre superfícies, potencial de adsorção superficial do material e da natureza e afinidade entre as superfícies. Já a deformação plástica é proveniente de forças decorrentes de deformações geométricas entre as asperezas das superfícies quando as mesmas deslizam umas sobre as outras. Quando asperezas entram em contato, ocorrem deformações elásticas e plásticas para acomodar a tensão. É muito complexo mensurar a atuação de cada um destes mecanismos para a força global de atrito. O comportamento do coeficiente de atrito deve-se à interação dinâmica entre esses mecanismos.

Hutchings (1992) ressalta que as morfologias dos danos nas superfícies postas em contato apresentam o resultado do tribocontato, normalmente aplicado em consecutivas etapas e por diferentes micromecanismos em regime acumulativo. Em geral, uma superfície que sofreu desgaste não apresenta um único modo de dano, mas uma combinação de vários mecanismos simultâneos. A Tabela 2.1 ilustra uma classificação a respeito dos tipos de dano superficial.

2.1.2. Importância da tribologia

Do ponto de vista econômico, Dowson (1979) relata que a importância da tribologia está relacionado ao fato de que aproximadamente 30% da energia gerada na indústria é dissipada em processos relacionados a fricção. Dentro da indústria de automóveis, um dos maiores desafios concentra-se na otimização do consumo de combustíveis, e a obtenção deste objetivo pode ser por meio da redução da energia dissipada por meio da fricção. De acordo com Hinrichs e Kleinback (2000), a distribuição de perdas de energia em um veículo é ilustrada pela Figura 2.1

Tabela 2.1: Classificação dos tipos de dano superficial.

Tipo de dano na superfície	Resultado do tribocontato
Sem troca de material	Causado pela alteração microestrutural, como envelhecimento, têmpera, recristalização, transformação de fase, entre outros.
	Caracterizado pela deformação plástica da camada superficial localizada ou extensa
	Trincas causadas por excesso de tensões, variações térmicas cíclicas ou tensões induzidas mecanicamente.
Com troca de material (desgaste)	Perda de material (desgaste) na região da superfície de contato gerando <i>debris</i> , removidos por meio de fratura por cisalhamento, extrusão, formação de plaquetas, corte, fratura frágil, fratura por fadiga, dissolução química e difusão.
Com ganho de material	Transferência de material provindo da superfície oposta de contato, depósito de partículas perdidas, entre outros.
	Material proveniente da degradação pelas reações químicas (corrosão) com o ambiente ou pela superfície oposta de contato.

Fonte: ASM Handbook (1991)



Figura 2.1: Perdas de energia em um automóvel.

Fonte: Adaptado de Hinrichs e Kleinback, 2000.

Blau (2008) relata que fenômenos relacionados ao atrito apresentam um elevado custo para a sociedade. Eles tem benefícios, como frear veículos em movimento para evitar acidentes, mortes, ferimentos e danos materiais. Entretanto, possui também consideráveis efeitos negativos, como “roubar” de máquinas considerável quantidade de energia que poderia ser utilizada para produzir trabalho útil. Apesar do custo exato ser difícil de ser mensurado, Rabinowicz (1986) realizou uma estimativa dos recursos desperdiçados em interfaces nos

Estados Unidos no ano de 1985. O autor ressalta que o entendimento e o controle do atrito tem grande consequências econômicas e representou, no ano estudado, uma perda por atrito estimada em cerca de 6% do produto interno bruto americano.

Holmberg e Erdemir (2017) realizaram uma pesquisa relacionada a cálculos do impacto do atrito e do desgaste no consumo de energia, custos econômicos e emissões de CO₂, em escala global. Foram considerados quatro principais setores consumidores de energia: transporte, manufatura, geração de energia e residencial. Os autores estimaram que 23% do consumo total de energia do mundo se origina de contatos tribológicos e que as perdas de energia devido ao atrito e desgaste poderiam ser reduzidas, aproveitando novas tecnologias de superfície, materiais e lubrificação para redução de atrito e proteção contra desgaste, em 40% a longo prazo (15 anos) e 18% no curto prazo (8 anos). Em termos ambientais e econômicos, a implementação de tecnologias tribológicas avançadas poderia reduzir as emissões de até 1460Mt de CO₂ e economias de custo de 970 milhões de euros a longo prazo, respectivamente.

2.1.3 Modos de desgaste

A norma ASTM G40-15 (2015) define desgaste como a alteração de uma superfície por perda ou deslocamento progressivo de material devido ao movimento relativo entre esta superfície e uma ou mais substâncias de contato. De acordo com Kato (2001), tradicionalmente são aceitos quatro modos de desgaste, que estão representados na Figura 2.2.



Figura 2.2: Esquema representativo dos modos de desgaste.

Fonte: Kato (2001).

O desgaste adesivo, conforme descrito por Kato (2001), se origina quando a ligação adesiva entre as superfícies é suficientemente forte para resistir ao deslizamento. É causado pela união pontual entre superfícies sólidas em

contato. Como resultado dessa adesão, uma deformação plástica é causada na região de contato, devido ao deslizamento relativo entre as superfícies, gerando uma trinca que pode se propagar e levar à geração de um terceiro corpo e uma transferência de material entre as superfícies ou perda de uma delas. Rabinowicz (1995) ressalta que a interação entre as superfícies depende da temperatura, do tempo de contato e da afinidade química entre as superfícies. Hutchings (1992) ilustra a interação por adesão ilustrada pela Figura 2.3, e define, matematicamente, a componente adesiva do atrito por meio da equação 2.1.

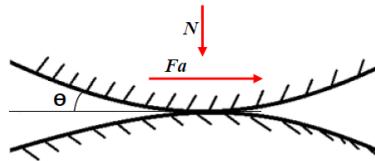


Figura 2.3: Esquema representativo da adesão.

Fonte: Hutchings (1992).

$$\mu_A = \frac{F_a}{N} = \frac{\tau_{max} \cdot A_R}{P_R \cdot A_0} \quad (2.1)$$

Onde:

μ_A : componente adesiva;

F_a : força de atrito, [kgf];

N : força normal, [kgf];

τ_{max} : tensão de cisalhamento máxima do material, [MPa];

A_0 : área de contato aparente, [m²];

A_R : área de contato real, [m²];

P_R : pressão sobre a área de contato real, [Pa].

O desgaste abrasivo, conforme definição da norma ASTM G40-15 (2015), é o processo em que o movimento relativo de partículas duras forçadas contra uma superfície sólida causa alteração desta. Essas partículas duras podem estar incorporadas em uma ou ambas as superfícies em movimento relativo, por exemplo, um mineral tal como sílica ou alumina. Também podem ser originadas pelo desgaste endurecido ou pela entrada acidental de partículas duras, como sujeira de fora do sistema tribológico. Esse tipo de desgaste ocorre em função do formato e da dureza dos materiais em contato.

De acordo com Hutchings (1992) e Stachowiak e Batchelor (2005) a componente abrasiva do atrito é mais predominante em baixas temperaturas. Blau (2008) considera que o mecanismo de desgaste abrasivo pode ser por penetração de partículas duras, quando uma superfície macia contendo partículas duras desliza sobre outra superfície de menor dureza, por asperidades duras, onde uma superfície de alta dureza e rugosa desliza sobre uma superfície de menor dureza, produzindo nela diversas ranhuras. A Figura 2.4 ilustra, respectivamente, essas duas formas de desgaste abrasivo. Já as equações 2.2 e 2.3 representam, matematicamente, essas duas componentes da abrasão.

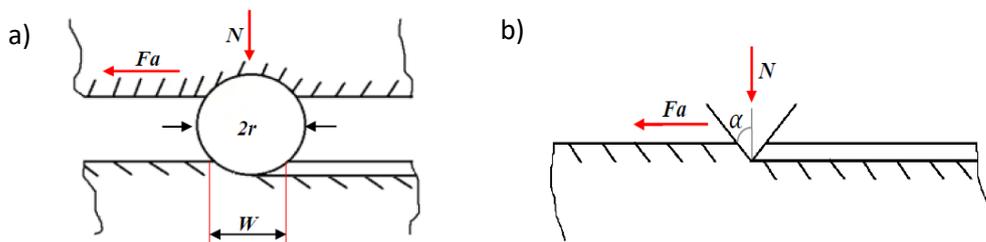


Figura 2.4: Abrasão a) por penetração de partículas duras; b) por asperidades duras.

$$\mu_{PP} = \frac{2}{\pi} \left\{ \left(\frac{2r_p}{w} \right)^2 \cdot \text{sen}^{-1} \frac{w}{2r_p} - \sqrt{\left(\frac{2r_p}{w} \right)^2 - 1} \right\} \quad (2.2)$$

$$\mu_{AD} = \frac{2}{\pi} * \cot \theta \quad (2.3)$$

Onde:

μ_{pp} : componente de abrasão por penetração de partículas;

r_p : raio da partícula, [mm];

w : comprimento de contato, [mm].

μ_{ad} : componente de abrasão por asperidades duras;

θ : ângulo de ponta da asperidade, [°].

O desgaste ocasionado pelo alto número de repetições do movimento é denominado desgaste por fadiga, caracterizado quando partículas são extraídas por variações de tensões cíclicas. Stachowiak e Batchelor (2005) salientam que no mecanismo por fadiga superficial, o carregamento cíclico gerado por movimento relativo entre superfícies como rolamento, riscamento ou impacto de

partículas gera um nível de concentração de tensões que gera deformação plástica pontual e posterior nucleação de trincas superficiais ou subsuperficiais. Posteriormente, estas trincas contribuem para o destacamento de fragmentos de material por delaminação.

Já no desgaste corrosivo, segundo Kato (2001), são formados produtos de reação devido às interações químicas e eletroquímicas. Essas reações são conhecidas como reações triboquímicas e produzem uma intercamada na superfície que depois é removida.

2.2 Sistemas de Freio e Frenagem

Horta Gutiérrez *et al.* (2013) ressalta que os automóveis e os veículos de transporte passaram por diversas mudanças e aprimoramentos ao longo dos anos, com o objetivo de proporcionar uma locomoção mais confortável e segura. Machado Pinto *et al.* (2017-a) relata que esses avanços tecnológicos experimentados pelo setor automotivo propiciaram que os veículos tornassem cada vez mais velozes e com maiores capacidades de transporte de carga, o que acarretou, também, maior demanda em termos de freios mais eficientes.

Segundo Bosh (2005), os sistemas de freio automotivos podem ser classificados em freios de serviço, que são usados para frenagens normais; freios secundários ou de emergência, que são usados caso ocorra uma falha nos freios de serviço; freio de estacionamento, que é usado para manter o veículo estacionado e freio auxiliar. Os principais componentes de um sistema de freio veicular são citados por Eriksson (2000):

- **Rotor** – componente que é fixado junto à roda. Por receber grande parte da energia térmica da frenagem, o seu projeto precisa levar em consideração alternativas para dissipar esta energia. Os principais tipos de rotores são os tambores e os discos de freio.
- **Material de fricção** – componente do par de fricção que é pressionado contra o rotor durante a frenagem.
- **Sistema hidráulico ou pneumático** – conjunto de componentes responsáveis pela condução da energia desde o ponto de aplicação do esforço de frenagem até os freios nas rodas. Acumuladores de energia

localizados dentro deste sistema são parte do sistema de transmissão de energia.

Relativo ao meio de transmissão de energia, Limpert (2011) classifica as alternativas pelas quais a energia é transmitida da fonte de aplicação de energia ao freio de roda como:

- **Freios mecânicos** – o projeto envolve apenas dispositivos mecânicos, como hastes, alavancas, cabos ou cames, utilizados para transmitir energia ao dispositivo de freio. São muito utilizados em freios de estacionamento.
- **Freios Hidráulicos** – utilizam um fluido como meio de transmissão de energia para o sistema de frenagem;
- **Freios Pneumáticos** – usam o ar para transmitir energia ao freio. Em aplicações automotivas utiliza-se ar pressurizado. Uma aplicação de sistemas de freios a vácuo ocorre em trens.
- **Freios elétricos** – empregam corrente elétrica como meio de transmissão de energia aos freios de roda.
- **Freios mistos** – utilizam dois ou mais meios de transmissão de energia à frenagem. Freios a ar, por exemplo, usam ar comprimido para transmitir energia do reservatório de armazenagem de ar comprimido à câmara de frenagens, e meios mecânicos, como hastes, roletes e cames para transmitir energia da câmara até sapatas ou pastilhas de freio.

A Figura 2.5 apresenta diferentes tipos de classificação de freio segundo o meio de transmissão de energia.

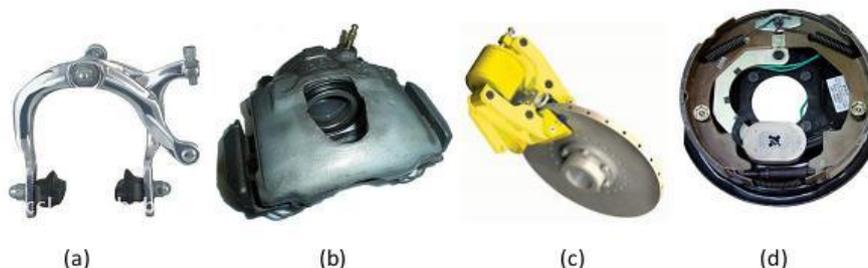


Figura 2.5: Tipos de sistemas de transmissão de energia em freios: (a) Freio mecânico; (b) Freio hidráulico; (c) Freio pneumático; (d) Freio elétrico.

Fonte: Adaptado de Abreu (2013).

Limpert (2011) ressalta que os freios de atrito veiculares podem ser agrupados em duas classes: freios a tambor e a disco. A grande maioria dos automóveis produzidos no Brasil atualmente (aproximadamente 90%) possui freio a tambor no eixo traseiro e freios a disco no eixo dianteiro, conforme pode ser observado na Figura 2.6. Isto deve-se ao fato de que, durante a frenagem, conforme citado por Paz (1970) e Diulgheroglo (2010), a concentração de peso do veículo é transferida para as rodas dianteiras (cerca de 70% do esforço requerido durante a frenagem), de forma que o sistema de freio necessite de mais potência no eixo dianteiro. A Figura 2.7 ilustra a transferência dinâmica de carga decorrente do processo de frenagem.

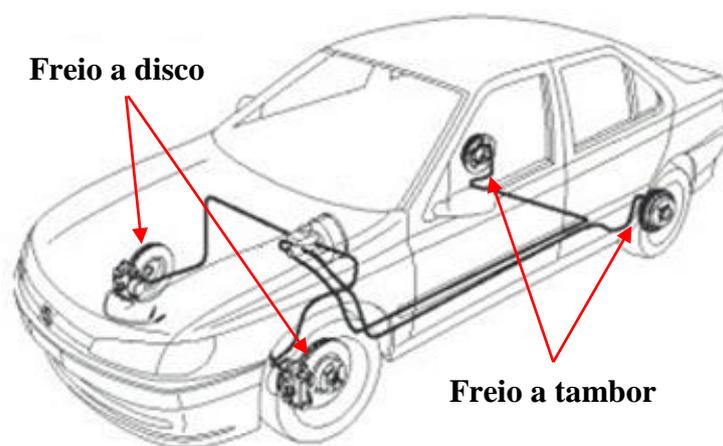


Figura 2.6: Diagrama do sistema de freio mais utilizado no Brasil.

Fonte: adaptado de Menezes (2016).

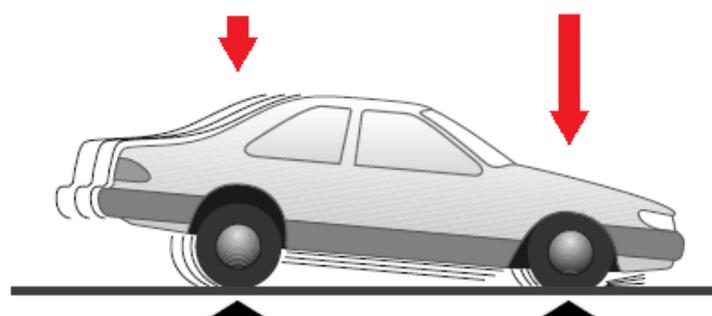


Figura 2.7: Transferência de carga dinâmica durante a frenagem.

Fonte: adaptado de Menezes (2016).

Sistemas de freio a disco são mais robustos e permitem uma frenagem mais estável. Além disso, conforme ressaltado por Rehkopf e Halderman (2006), o efeito *fade* (perda da eficiência do freio em função da elevação da temperatura) torna-se mais acentuado em freios a tambor, pelo fato da estrutura fechada deste tipo de freio oferecer maior resistência para a dissipação do calor se comparada aos sistemas de freio a disco. Segundo o mesmo autor, a dilatação do tambor de freio, devido ao aumento da temperatura, faz com que ele distancie-se das lonas, necessitando de um maior curso no pedal de freio para proporcionar o torque de frenagem.

2.2.1 Funções de um sistema de frenagem

De acordo com Limpert (2011), um veículo mantém-se conectado à estrada devido às forças de aderência produzidas pelos pneus. Todas as forças de frenagem, direção ou aceleração devem ser geradas pela área do pneu em contato com a superfície da estrada. Somente forças iguais ou menores que o produto da força normal pelo coeficiente de atrito entre o pneu e a estrada podem ser transmitidas pelos pneus e rodas. Mesmo o sistema ideal de frenagem não pode utilizar mais aderência que a provida entre pneus e estrada.

Segundo Barros *et al.* (2016) a operação dos sistemas de freios automotivos por atrito ocorre em função do contato entre um elemento fixo (pastilha ou lona de freio) e um elemento rotativo (disco de freio ou tambor). Este último componente está ligado à roda do veículo. O contato de atrito entre a pastilha e o disco produz a força necessária para reduzir a velocidade do veículo, convertendo a energia cinética em calor e também vibração e ruído. Como as superfícies estão sujeitas a movimentos de deslizamento, elas podem sofrer desgaste. Assim, uma substituição periódica de pastilhas de freio é necessária. (MACHADO PINTO *et al.*, 2017-b).

Ainda conforme Limpert (2011), a operação segura de um veículo motorizado requer contínuo ajuste de sua velocidade às mudanças das condições de tráfego. Os freios, pneus e o sistema de direção são os mais importantes componentes de segurança de um veículo motor. Eles podem garantir segurança sob uma variedade de condições de operação, incluindo condições escorregadias, estradas molhadas ou secas, quando um veículo está levemente

ou totalmente carregado, quando a frenagem ocorre em linha reta ou em curva, com lonas e pastilhas de freio novas ou usadas, com freios úmidos ou secos, quando aplicado por condutor novo ou experiente, durante a frenagem em estradas lisas ou ásperas, ou quando o veículo estiver puxando um reboque.

O uso geral dos freios pode ser formulado em termos de três funções básicas que um sistema de frenagem deve fornecer:

- **Desacelerar um veículo, incluindo sua parada.** Envolve a mudança/transformação da energia cinética e potencial em energia térmica. Segundo Limpert (2011), um engenheiro de projeto de freio deve considerar os seguintes fatores na etapa de desenvolvimento: estabilidade de frenagem, distribuição de força no freio, atrito entre pneu e estrada, modulação da força no pedal, distância de parada, perda de eficiência do freio em função do superaquecimento do sistema (efeito *fade*) e desgaste do freio.
- **Manter a velocidade de um veículo durante uma operação de descida.** Manter a velocidade do veículo em uma colina envolve a transformação de energia potencial em energia térmica. Considerações importantes são temperatura do freio, efeito *fade*, vaporização do fluido de freio em freios hidráulicos, ajuste do ar de freio.
- **Garantir o veículo parado.** Utilizando-se o freio de estacionamento, tem a função de segurar um veículo em uma vaga. Entretanto, para que um freio de estacionamento possa ser usado para desacelerar um veículo em uma emergência, fatores térmicos e dinâmicos do veículo precisam ser considerados pelo engenheiro de projeto.

2.2.2. Sistemas de Freio a Disco

Utilizam pastilhas de freio que são pressionadas axialmente contra o rotor, que no caso é um disco de freio. Rehkopf e Halderman (2006) afirmam que freios a disco são geralmente utilizados nas rodas dianteiras por promoverem maior eficiência de frenagem. Entretanto, em alguns casos, podem ser utilizados em todas as rodas de um veículo. A Figura 2.8 ilustra os principais componentes de um sistema de freio a disco.

a) Pastilha de Freios - De acordo com Xiao *et. al.* (2016) pastilhas de freio são fabricadas de material de fricção e devem ser capazes de suportar e realizar a transformação da energia cinética em calor. A seção 2.4 abordará com mais detalhes os materiais utilizados em materiais de atrito. Para Ostermeyer e Muller (2008) pastilhas de freio devem manter suas propriedades mecânicas em altas temperaturas, uma vez que sistemas de freio aquecem quando acionados. Pastilhas de freio são produzidas utilizando-se materiais compósitos.

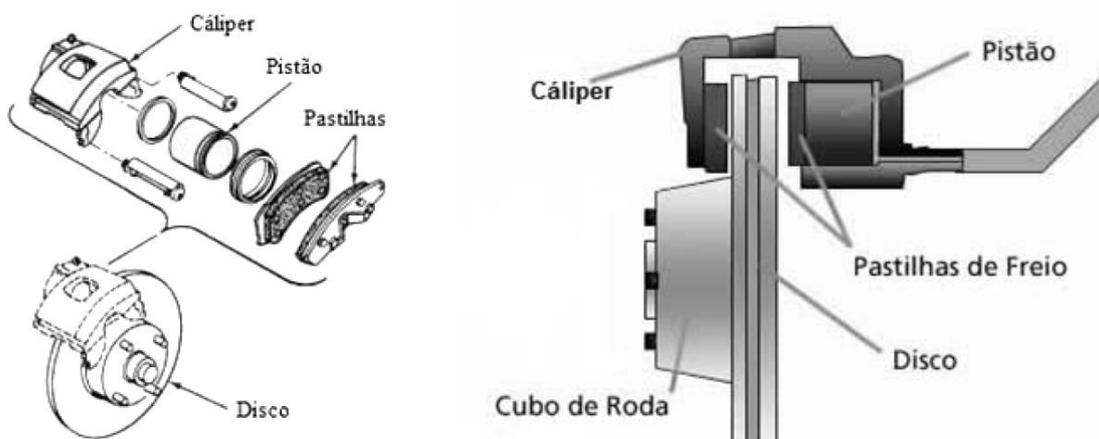


Figura 2.8: Componentes de um Freio a Disco.

Fonte: Adaptado de KRUZE (2009).

Segundo Brembo (1997), as pastilhas de freio são compostas pelas seguintes camadas, ilustradas pela Figura 2.9: material de fricção, que entra em contato com a superfície do disco de freio; um substrato ou material de fundo, que tem a função de melhorar a ancoragem mecânica entre o adesivo e o material de fricção, além de melhorar a absorção de vibrações geradas no processo de frenagem; um adesivo responsável pela fixação do material de fricção ao suporte metálico; suporte metálico responsável pela distribuição da força proveniente do pistão de freio sobre o material de fricção.

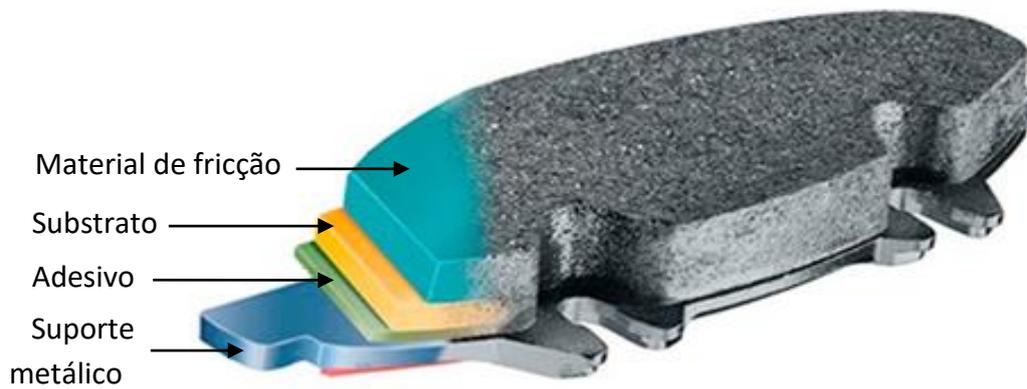


Figura 2.9: Pastilha de freio e suas camadas constituintes.

Fonte: Adaptado de Menezes (2016).

b) Cáliper - Cáliper é um mecanismo que contém as pastilhas e o pistão. De acordo com Bosh (2005), o cáliper precisa ser capaz de resistir às elevadas pressões nos sistemas hidráulicos e às forças axiais e tangenciais produzidas na frenagem. Conforme menciona Paz (1970), os cálipers são fabricados em ferro fundido nodular.

Segundo Limpert (2011), a busca por um compromisso entre desempenho, dimensões, conforto, peso e custos levaram ao desenvolvimento de dois tipos de cálipers: fixos e flutuantes. A Figura 2.10 ilustra esses dois sistemas.

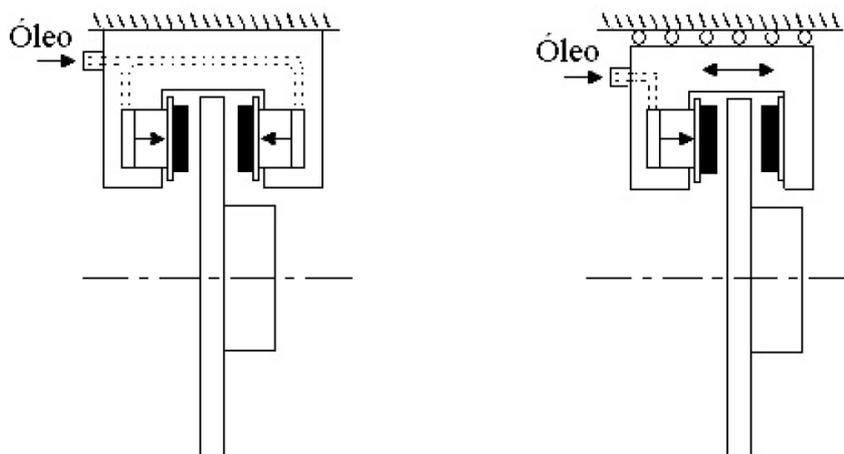


Figura 2.10: (a) Freio a disco do tipo Cáliper Fixo e (b) Cáliper Flutuante.

Fonte: Adaptado de INFANTINI (2008).

Cáliper fixo, representado pela Fig. 2.10(a), é rigidamente fixado à suspensão e tem no mínimo 2 pistões opostos que são ativados pelo mesmo circuito hidráulico (BREMBO, 1997). Esse tipo de cáliper é, incidentemente, sempre hidráulico. A pressão hidráulica do sistema é exercida inicialmente no primeiro pistão, que avança em direção ao disco. Somente após o primeiro pistão entrar em contato com o disco é que o pistão oposto é acionado, fornecendo o momento de força de frenagem. O movimento real é mínimo, na ordem de poucos décimos de milímetros.

Já o sistema de freio a disco por cáliper flutuante, ilustrado pela Fig. 2.10(b), possui pistões apenas do lado interno do cáliper. Nesse sistema, quando a pressão é aplicada o pistão avança até a pastilha de freio entrar em contato com o disco. Nesse ponto, o cáliper desloca-se por meio de guias que, por reação à força aplicada pelo pistão na pastilha interna, retraíndo-se, a pastilha externa automaticamente exerce contato com o disco, promovendo a ação de frenagem. Conforme Limpert (2011), este tipo de cáliper normalmente tem somente um pistão, que pode ser controlado hidraulicamente ou pneumaticamente (no caso de freios de caminhões pesados). Alguns cálipers flutuantes tem 2 pistões, mas ambos estão localizados do mesmo lado.

Comparando-se os dois tipos de sistemas de freio a disco, o cáliper flutuante apresenta o comprimento do curso duas vezes maior, gera mais ruído porque é menos rígido, causando mais vibração, (BREMBO, 1997). Este tipo de cáliper é menos eficiente se comparado ao cáliper fixo, pois parte da força é absorvida pela deformação elástica do seu corpo. Em altas temperaturas, esta diferença torna-se mais evidente. Segundo Rehkopf e Halderman (2006), o sistema de cáliper fixo apresenta distribuição de pressão mais uniforme nas pastilhas, sendo o desgaste da pastilha mais regular. Com relação ao custo, o cáliper fixo é mais caro em relação ao flutuante.

O sistema por cáliper flutuante é o mais utilizado em freios a disco para carros de passeio, enquanto que o sistema por cáliper fixo é mais utilizado em veículos pesados e de competição, (REHKOPF e HALDERMAN, 2006).

Limpert (2011) destaca que quando o sistema de freio atinge altas temperaturas (acima de 300°C), começa a ocorrer perda da eficiência da frenagem devido à

redução das forças de atrito entre o material de fricção e o rotor, em virtude da redução do coeficiente de atrito. Este problema é o chamado efeito *fade*.

c) Pistão de Freio - É o elemento responsável por transmitir força para a pastilha. De acordo com Rehkopf e Halderman (2006) ele é acionado por pressão hidráulica nos sistemas hidráulicos e por um sistema mecânico de alavanca nos sistemas mecânicos.

d) Disco - O disco é o rotor ou elemento rotativo de um sistema de freio a disco. É geralmente fabricado em ferro fundido cinzento, conforme citado por Haynes Publishing (1999). Polleto *et. al.* (2018) salienta que a escolha pelo ferro fundido cinzento ocorre pelo fato deste material possuir boas propriedades térmicas, resistência ao desgaste, resistência mecânica e propriedades de amortecimento por um custo competitivo. Alterações na composição da formulação do ferro fundido, conforme relatado por Grabiec (2014), e tratamentos térmicos, citado por Straffelini *et. al.* (2016), são realizados para melhorar as propriedades do disco.

Segundo Brembo (1997) a superfície do disco, além de suportar a fricção da pastilha para reduzir a rotação do disco, acaba absorvendo grande parte do calor gerado durante a frenagem. Por apresentarem uma estrutura aberta, o fluxo de ar facilita o seu resfriamento.

A Figura 2.11 ilustra algumas alternativas de geometrias utilizadas nos discos freio. A Figura 2.11 (a) representa um disco de freio sólido, que é a solução mais simples e mais utilizada nos veículos de passeio. A Figura 2.11 (b) representa um disco de freio ventilado, que permite uma troca térmica mais rápida. A Figura 2.11 (c) ilustra um disco de freio ventilado e com superfície ranhurada, que, segundo Diulgheroglo (2010) permite melhor limpeza da superfície de atrito, eliminação de filme de água e eliminação de gases que surgem devido às altas temperaturas geradas nessa superfície. Já a Figura 2.11 (d) representa um disco de freio ventilado e com superfície furada, que permite melhor troca gasosa e saída de resíduos, devido aos gases liberados e as partículas geradas pelas pastilhas de freio quando solicitadas ao extremo, melhor escoamento da água quando o veículo trafega em pista úmida. Entretanto, Bosh (2005), salienta que os furos reduzem a superfície de contato do disco com a pastilha, o que provoca

redução na força de atrito. Os discos de freios representados em (b), (c) e (d) são empregados para otimizar a capacidade de resfriamento e desempenho dos disco de freio.

De acordo com Gao e Lin (2002), freios a disco são amplamente usados para reduzir velocidade devido às suas características de estabilidade durante a frenagem, confiabilidade e a capacidade de promover uma ampla faixa de torque ao freio. Ao longo da frenagem, todos os parâmetros do processo (velocidade, carga, temperatura, características tribológicas e físico-químicas do material do par pastilha-disco, e as condições de contato) variam com o tempo.

O calor gerado por atrito na interface do rotor (disco) e as pastilhas pode causar aumento de temperatura. Particularmente, a temperatura pode exceder o valor crítico para um dado material, causando superaquecimento do sistema, especialmente do fluido de freio e material de fricção (pastilhas), o que leva a efeitos indesejáveis. A próxima seção abordará alguns problemas térmicos provenientes da operação de sistemas de freio.

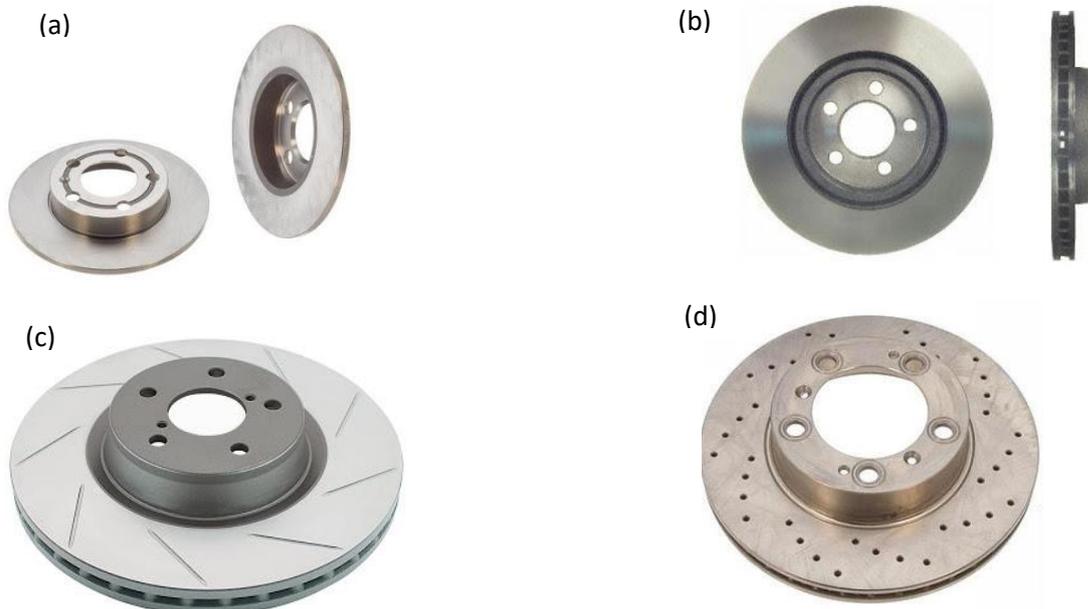


Figura 2.11: (a) Disco de freio sólido, (b) disco de freio ventilado, (c) disco de freio ventilado e com superfície ranhurada e (d) disco de freio ventilado e com superfície furada.

Fonte: Adaptado de SHARP (2013).

2.3 Problemas térmicos em sistemas de freio

Durante o processo de frenagem, a ação de pressionar as pastilhas de freio contra o disco pode promover superaquecimento do disco de freio, ocasionando alguns efeitos que reduzem a segurança veicular. Os principais problemas térmicos relacionados aos sistemas de freios são:

a) Fade - ou problema de fadiga térmica, é o efeito da redução momentânea do coeficiente de atrito entre disco e pastilha, provocada pela elevação da temperatura dos sistema durante o processo de frenagem. Segundo Neis (2012) e Machado Pinto *et. al.* (2019), em altas temperaturas (especialmente acima de 300°C), importantes mudanças químicas ocorrem no material de atrito. A degradação da resina fenólica pela oxidação de materiais voláteis é um dos mais importantes processos causados pela elevação da temperatura. Alguns óxidos possuem propriedades lubrificantes e podem causar redução no atrito, tornando o efeito *fade* mais perceptível.

b) Distorções cônicas – lombriller (2002) destaca que as distorções cônicas também promovem redução do contato entre disco e pastilha, especialmente sob condições de deslocamento urbano, pois modificam as condições de contato entre o disco e a pastilha e que pode promover instabilidade na frenagem. Yevtushenko e Yvanyk (1995) *apud* lombriller (2002) analisaram os efeitos do calor na distorção da interface do disco de freio na região de contato com as pastilhas. A Figura 2.12 representa os resultados do estudo, onde percebe-se que o aquecimento leva à distorção térmica, que sofre variação no tempo. Quanto maior o tempo de contato, maior a temperatura na interface de atrito.

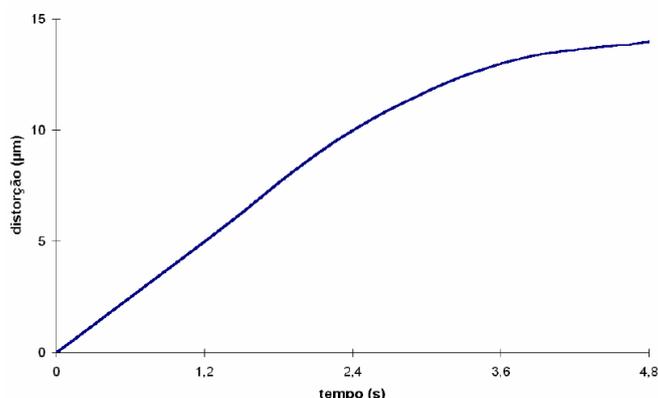


Figura 2.12: Mudança na distorção térmica no disco de freio em relação ao tempo.

Fonte: Adaptado de Yevtushenko e Yvanyk (1995).

c) Variação do fator de freio – Gillespie (1992) define o fator de freio como a razão entre a força de frenagem produzida na interface disco/pastilha e a força aplicada para comprimir as pastilhas contra o disco. O mesmo autor ressalta que algumas variáveis podem influenciá-lo, tais como a temperatura, pressão e a velocidade ao longo de uma frenagem. Iombriller (2002) observou que a temperatura é variável que mais influencia na redução do fator de freio. Como esta redução do fator de freio promove redução das forças de frenagem, o sistema de freio sofre perdas em seu poder de frenagem.

d) Pontos de aquecimento no disco – Iombriller (2002) ressalta que as altas temperaturas alcançadas em locais específicos no disco dão origem a pontos de aquecimento. Estes pontos são oriundos do processo de desgaste das pastilhas e, em menor proporção, do disco, em função do deslocamento de resíduos de desgaste com dureza mais elevada que os compõem. Além disso, promovem no disco transformações metalúrgicas e formação de martensita, levando a uma elevação de dureza nestes pontos de contato.

De acordo com Brezolin (2007), em temperaturas superiores à temperatura de transformação de fase do material do disco (aproximadamente 750°C), são geradas em uma espessura na ordem de micrometros, logo abaixo da superfície de contato do disco com a pastilha de freio. Neste pontos quentes, o gradiente de temperatura promove a deformação plástica na interface dos mesmos em relação à área em seu entorno. Com o resfriamento do disco, são geradas tensões residuais nestes pontos, o que, aliado à repetição de ciclos de carregamento e temperatura sobre estes pontos, pode levar à formação de trincas na interface destes pontos. Estas camadas formadas na interface pastilha-disco são denominadas platôs e serão mais detalhadas na seção 2.8.

e) Trincas no disco - Brezolin (2007) demonstrou que a geração de trincas térmicas está associada diretamente à característica de rigidez estrutural dos materiais de atrito, juntamente com deformações e fluxos de calor não uniformes dos discos de freio. O mesmo autor salienta que a utilização de sistemas de freios a disco em veículos comerciais submete os discos de freio a elevadas solicitações mecânicas e térmicas, se comparados ao emprego dos mesmos em veículos de passeio. Dessa forma, essas solicitações provocam o aparecimento

de trincas térmicas nos discos de freio, limitando a segurança do veículo, tempo de vida das pastilhas e o próprio disco de freio.

2.4 Materiais utilizados na fabricação de pastilhas e lonas de freios

De acordo com Dmitriev, Osterle e Klob (2008), os fabricantes de sistemas de freio a disco devem cumprir uma série de requisitos relativos ao material de fricção que não são fáceis de serem atendidas simultaneamente: (i) o coeficiente médio de atrito (μ) deve aproximar-se de 0,45 para automóveis de passageiros e 0,35 para aplicação ferroviária; (ii) $\Delta \mu$, ou seja, a variação de μ durante uma frenagem, deve ser próxima de zero; (iii) a taxa de desgaste da pastilha e do disco devem ser baixos; (iv) as matérias-primas utilizadas para a fabricação de pastilhas devem ser de baixo custo, mas não danosas para o meio ambiente; e (v) o ruído de frenagem e os resíduos gerados durante a frenagem devem ser minimizados. Portanto, as formulações de pastilhas tornam-se cada vez mais complexas.

Eriksson, Bergman e Jacobson (2002) ressaltam que as exigências sobre o comportamento de atrito são altas e múltiplas. Deve manter em um nível estável independentemente da temperatura, umidade, tempo de uso, grau de desgaste e corrosão, presença de sujeira e aspersão de água da estrada, etc. Para além destes requisitos de segurança, são exigidos requisitos de vida longa e elevado conforto, ou seja, ausência de vibração e ruído de frenagem.

Segundo Dmitriev e Osterle (2010), compreender os mecanismos básicos de fricção que ocorrem na interface entre a pastilha e o disco de freio rotativo ainda é desafiador. Considerações teóricas, bem como estudos experimentais, sugerem a formação de camadas superficiais com propriedades distintamente diferentes das propriedades dos materiais de base. A composição, a estrutura e a espessura das camadas modificadas dependem das propriedades do material inicial, das condições de carga, da temperatura e do ambiente em que o processo de atrito está ocorrendo. Apesar de tantos parâmetros que afetam a estrutura e as propriedades das camadas superficiais, os engenheiros automotivos exigem propriedades de fricção constantes ou pelo menos

previsíveis ao longo do tempo, mesmo em condições ambientais em mudança. Os altos requisitos operacionais e a demanda por preservação de determinados parâmetros do modo de fricção do sistema de freio, dentro dos limites de valores aceitáveis durante todo o procedimento de frenagem, levam a formulações complexas de pastilhas de freio de vários componentes. Os materiais das pastilhas são compósitos formados por uma matriz polimérica que geralmente contém mais de 20 ingredientes, como fibras de aço, latão e fragmentos de cobre, bem como vários materiais de enchimento, abrasivos e lubrificantes sólidos.

De acordo com Osterle e Dmitriev (2011), existe uma grande variedade de materiais de pastilhas de freio comercial. Todos têm um aspecto em comum: sua composição é complexa, e ainda não se sabe exatamente por que tantos constituintes diferentes são necessários. As formulações de pastilhas de freio ainda baseiam-se na experiência. A substituição de componentes críticos em relação a danos ambientais e à saúde é um grande problema. Um olhar mais atento sobre os aspectos ambientais dos resíduos de desgaste dos freios irá manifestar a necessidade de materiais de pastilhas "verdes" no futuro.

Polleto *et. al.* (2018) ressaltam que a ampla gama de combinações de materiais adicionados em um material de fricção é refletida em suas características de superfície, que apresentam uma morfologia e topografia muito complexas. Por esse motivo, é fácil entender como é difícil encontrar uma formulação ideal para materiais de fricção, ou seja, uma formulação que torne a pastilha ou revestimento de freio capaz de atender a todos os requisitos de fabricação (desempenho de atrito e desgaste, bem como conforto acústico).

Segundo Xiao *et al.* (2016), no passado, o amianto foi selecionado como fibra reforçada para a composição de materiais de atrito devido ao seu excelente desempenho quanto à baixa densidade, alto ponto de fusão, alto coeficiente de atrito, grande resistência mecânica e pequeno dano ao disco de freio. Entretanto, a baixa condutividade térmica tende a reduzir seu desempenho de atrito e aumentar o desgaste. Adicionalmente, foi provado que o amianto é cancerígeno para o sistema respiratório humano. Dessa forma, materiais de atrito que utilizam amianto tem sido removidos de fabricação gradativamente. Atualmente, a

maioria dos dispositivos de freio é feito com materiais de atrito sem amianto. Estes autores classificaram os materiais de atrito quanto à matriz material e quanto à fonte material.

Quanto à matriz material, Xiao *et al.* (2016) classificam os materiais de atrito em:

- **Matriz metálica** - dependendo da técnica de produção, a matriz metálica de material de atrito pode ser dividida em dois grupos: fundição e metalurgia do pó. O primeiro inclui aço, ferro fundido, bronze. Devido à sua fácil adesão e baixo coeficiente de atrito a altas temperaturas e velocidades, ele tem sido pouco empregado. Materiais de atrito por metalurgia do pó inclui, principalmente, uma base em ferro ou cobre. Depois de obter uma mistura uniforme, com aditivos de atrito, esses pós metálicos são prensados e sinterizados e formam os materiais de atrito por metalurgia do pó. Materiais de atrito baseados em ferro tem alta resistência à temperatura, dureza e estabilidade térmica. Enquanto que materiais de atrito baseados em cobre tem baixo, mas estável coeficiente de atrito. Esses têm grande condutividade térmica e resistência ao desgaste. Geralmente, materiais de atrito obtidos por metalurgia do pó podem ser aplicados em aviões, trens, caminhões e algumas máquinas pesadas, que exigem alta força de frenagem, e operam em velocidades extremamente elevadas.
- **Matriz semi-metálica** - os principais componentes do material de atrito da matriz semi-metálica são fibra de metal, fibra cerâmica e pó de cobre ou ferro. Materiais de atrito de matriz semi-metálica têm grande resistência ao calor, alta absorção de energia e excelentes propriedades tribológicas. No entanto, também possuem algumas falhas, como ruído de baixa frequência, oxidam facilmente e causam danos sérios no disco de freio. Atualmente, materiais de atrito de matriz semi-metálica vem sendo amplamente aplicados em automóveis, motocicletas e outros veículos leves.
- **Matriz não-metálica** - em um material de atrito de matriz não metálica, são usadas como aglutinantes resinas modificadas e borrachas, enquanto que fibras orgânicas (kevlar, carbono, etc.) ou materiais minerais

inorgânicos (vidro, wollastonita, etc.) são utilizadas como fibras reforçadas. Eles são solidificados por pressão a quente depois de uniformemente misturados com outros aditivos de atrito. Existe uma série de materiais de atrito de matriz não metálicos, dentre os quais os compósitos de carbono reforçados com fibras de carbono (CRFC) e matriz de cerâmica, que possuem excelentes propriedades tribológicas. Por exemplo, o material de atrito composto CRFC possui alta resistência e dureza, elevada estabilidade térmica e resistência ao desgaste. São usados, principalmente, em aviões e carros de corrida.

Já quanto à fonte do material, Xiao *et al.* (2016) ressaltam que dois tipos de materiais de fricção são mais utilizados nos freios atualmente: material de fricção por metalurgia de pó e material de fricção orgânica. No entanto, existem algumas diferenças entre os componentes desses dois tipos de material. O material de fricção da metalurgia do pó é feito principalmente da matriz, materiais de fortalecimento da matriz, agentes de incremento de fricção e materiais de lubrificação. A matriz e o material de fortalecimento da matriz incluem vários metais (Cu, Fe, etc.). O agente de incremento de fricção é usado para aumentar o coeficiente de atrito que inclui alguns óxidos ou carbonetos metálicos e não metálicos (SiO_2 , Al_2O_3 , etc.). Além disso, materiais de lubrificação, como MoS_2 , é frequentemente usado para melhorar a propriedade anti-eskorregamento e a resistência ao desgaste do material de fricção. O material de atrito orgânico foi amplamente utilizado devido ao seu método de preparação simples, excelentes propriedades tribológicas e por ser menos agressivo ao meio ambiente. Geralmente, o material de fricção orgânica consiste em material aglutinante, fibras reforçadas, aditivos de fricção e enchimentos.

Já Birch (1999) e Eriksson e Jacobson (2000) indicam que os materiais de fricção para freios veiculares são divididos em dois grupos: orgânicos e semi-metálicos. Nos materiais semi-metálicos (SM) há uma carga maior de compostos metálicos (fibras de aço) em sua constituição, que pode chegar a níveis de até 50% do material de formulação.

Birch (1999) realizou uma comparação entre os materiais orgânicos e semi-metálicos, obtendo as seguintes conclusões:

- **Materiais orgânicos** - apresentam menor custo, são menos abrasivos, o que gera menor desgaste do disco de freio, baixo ruído, bom coeficiente de atrito a frio sendo mais sensíveis ao efeito *fade*. São mais empregados em veículos leves e em mercados que priorizam o conforto da operação de frenagem, como por exemplo, o mercado americano;
- **Materiais semi-metálicos** - são mais caros, frágeis, apresentam baixo coeficiente de atrito a frio, são mais resistentes ao efeito *fade* e possuem maior vida útil. Por possuírem boas propriedades de dissipação de calor, são amplamente empregadas em aplicações mais severas, como em veículos grandes e em esportivos.

De acordo com Limpert (2011), Eriksson (2000) e Brembo (1997), pastilhas de freio são compósitos formados pela compactação de 10 a 20 materiais diferentes, que podem ser classificados em quatro grupos básicos:

a) Fibras – contribui para a rigidez, resistência mecânica, resistência ao desgaste e aumentam o coeficiente de atrito. Para materiais de fricção submetidos a elevadas temperaturas, as fibras também fornecem estabilidade térmica. Como exemplos de fibras têm-se fibras metálicas, de carbono, minerais e cerâmicas. O amianto, ou asbesto, também foi um tipo de fibra largamente utilizado, mas seu uso foi proibido na década de 1980. Quando reduzido a material particulado, gerado no processo de frenagem, e inalado, o amianto pode causar danos à saúde.

b) Carga – são minerais de baixo custo que contribuem para melhorar as características específicas do material de fricção, como resistência mecânica a elevadas temperaturas e condutividade térmicas. Além disso, são utilizadas como preenchimento, não influenciando no coeficiente de atrito do material de fricção. Desta forma, contribuem para reduzir custos e prolongar a vida útil da pastilha. Carbonato de cálcio, sulfeto de bário e sílica são exemplos de cargas. Diferentes minerais como mica e vermiculita são frequentemente empregados. O sulfato de bário é outro enchimento comumente usado.

c) Aglutinantes – são materiais ligantes que contribuem para unir os demais ingredientes do material de fricção. Podem ser adicionados elementos anti-ruído

junto aos aglutinantes. Como exemplos de materiais ligantes pode-se citar as resinas cresol, resinas fenólicas modificadas por elastômeros, fenol-formoldeído e novolak.

d) Modificadores de atrito – são materiais que melhoram as propriedades mecânicas e de desgaste, sendo utilizados para ajustar o coeficiente de atrito do material de fricção. Contribuem para a limpeza da superfície de atrito do disco de freio. Exemplos: latão, zinco, grafite, óxido de cobre, óxido de ferro, borracha de estireno butadieno. De acordo com Eriksson, Bergman e Jacobson (2002), partículas abrasivas, tipicamente a alumina e a sílica, aumentam o coeficiente de atrito e o desgaste do disco. O objetivo deste último é melhorar a superfície de fricção, removendo óxidos de ferro e outros filmes de superfície não desejados do disco.

2.5 Estado da Arte – Materiais de atrito

Várias Pesquisas estão sendo desenvolvidas nos últimos anos com o intuito de se obter novos materiais para fabricação de pastilhas e lonas de freio, como por exemplo os estudos de Satapathy e Bijwe (2004a), Hee e Filip (2005), Mutlu (2009), Ozturk *et al.* (2013), Sugoza, Mutlu e Sugoza (2016), Mahale, Bijwe e Sinha (2017), Leonardi *et. al.* (2018). Tais estudos buscam obter composições de materiais que apresentem melhores desempenhos em termos de eficiência durante a frenagem, maior durabilidade e conforto, bem como redução de custos. Para tanto, testes com estes novos materiais são conduzidos experimentalmente em máquinas de ensaios, com as do tipo Krauss, Fast e em Dinamômetros inerciais.

Muitos estudos sobre desgaste destes novos materiais também estão sendo conduzidos utilizando-se tribômetros do tipo pino sobre disco, como por exemplo o estudo de Verma *et al.* (2016), Leonardi *et. al.* (2018), Menapace *et. al.* (2018). Um grande número de estudos, como pode ser observado em Eriksson e Jacobsson (2000), Ostermeyer e Muller (2008), Deng *et. al.* (2010), Verma *et. al.* (2015), Barros *et. al.* (2016), dentre outros, vem utilizando para análise microestrutural destes materiais a microscopia eletrônica de varredura (MEV) e

a espectroscopia de energia dispersiva por raio-x (*Energy Dispersive X-ray Spectrometry* - EDS), para uma análise elementar ou caracterização química das amostras.

Satapathy e Bijwe (2004 a), avaliaram a influência de quatro fibras orgânicas selecionadas para composição das pastilhas de freio, a saber: Aramida (AF), PAN (poli-acril-nitrilo), carbono (CF) e celulose (SF), no comportamento em temperaturas elevadas (*fade*) e na revitalização a temperaturas mais baixas (recuperação). O compósito de origem, denominado N, não apresentava fibra orgânica. Os testes *fade* e de recuperação foram realizados em uma máquina do tipo Krauss, na qual a rotação do disco foi mantida fixa em 660 rpm como parte dos requisitos do teste padrão ECE R-90. A carga nas pastilhas foi manipulada mantendo-se a pressão aplicada em 1,82 MPa. Observou-se que o tipo de fibra influenciou significativamente o comportamento do coeficiente de atrito tanto na fase *fade* quanto na recuperação. O compósito à base de fibra de carbono apresentou a maior resistência ao *fade*, enquanto o compósito à base de fibra de celulose apresentou menor resistência. O comportamento de recuperação de todos os compósitos foi superior a 100% e a extensão dependeu do tipo de inclusão de fibra. Os compósitos contendo AF e SF apresentaram as maiores e as menores resistências ao desgaste, respectivamente, enquanto os melhores e os piores desempenhos quanto ao coeficiente de atrito médio (μ) foram registrados para os compostos à base de SF e CF, respectivamente. Análises por MEV das superfícies desgastadas mostraram-se úteis na correlação do desgaste dos compósitos com as mudanças topográficas nas superfícies.

Na segunda parte do estudo, Satapathy e Bijwe (2004b) aplicaram o Método MCDM (*Multiple criteria decision model*) – modelo de decisão multicritérios, que é usado para otimização de vários sistemas dependentes de critérios conflitantes. Os critérios utilizados para avaliar os 5 materiais estudados foram: desempenho na etapa *fade*, recuperação de desempenho, coeficiente de atrito médio, aumento da temperatura do disco e volume do desgaste. Desta forma, o objetivo era selecionar o material que melhor atendesse aos 5 critérios simultaneamente. Como resultados, verificou-se que o material de atrito baseado em fibra de carbono é considerado a opção que otimiza o desempenho geral, imediatamente seguido por um com base em PAN. O compósito à base de fibra

de aramida funcionou moderadamente. O material de atrito baseado em fibra de celulose foi considerado o de menor desempenho.

Verma *et al.* (2016) analisaram o comportamento tribológico de um material de pastilha de freio comercial por meio de testes de desgaste sob condições de deslizamento a seco utilizando-se um tribômetro rotativo do tipo pino sobre disco. Os testes de desgaste foram realizados nas seguintes temperaturas do disco de ferro fundido: 25, 170, 200, 250, 300 e 350 °C. O foco deste trabalho foi estudar como a evolução térmica dos componentes do material de atrito, em particular a decomposição do aglutinante orgânico, influencia os principais mecanismos de desgaste. Estes foram inferidos a partir das análises das pistas de desgaste resultantes após os testes na superfície do pino e espécimes de disco. A espectroscopia Raman e o MEV, juntamente com EDS, foram as principais ferramentas experimentais utilizadas para esse fim. As seguintes conclusões principais podem ser extraídas deste trabalho:

- De acordo com os resultados da TGA (análise termogravimétrica) e de acordo com os dados da literatura, a decomposição térmica do aglutinante fenólico no material de fricção ocorre em duas etapas principais. Uma primeira pequena redução de massa (0,04%) aparece a 90 °C e a decomposição principal (3,77%) começa a cerca de 280°C com uma taxa de decomposição máxima a 415°C;
- Em altas temperaturas, produtos carbonáceos estão presentes em superfícies desgastadas das espécimes de pinos, conforme demonstrado pelos resultados da espectroscopia Raman. Estes produtos carbonáceos são o resultado da decomposição térmica do aglutinante fenólico presente no material do pino, embora a influência do aquecimento por fricção e tensões de cisalhamento associados aos testes tribológicos certamente tenham influenciado a cinética de decomposição;
- Uma transição na taxa de desgaste leve a severo é observada quando a temperatura do disco é aumentada de 170°C para 200°C. O regime de desgaste leve é determinado pela presença de uma camada de fricção estável formada na superfície do pino. Esta camada possui uma microestrutura compósita padrão, composta pelos chamados platôs

primários e secundários. Os primeiros são feitos de componentes de pinos duros e resistentes, como partículas cerâmicas e fibras metálicas, que sobressaem da sua superfície após o início dos ensaios. Os platôs secundários resultam da acumulação de resíduos de desgaste, também provenientes da tribo-oxidação do disco, que em condições favoráveis formam uma camada compacta e protetora.

- Em particular, quase nenhum platô secundário se forma na superfície do pino a 350°C e ocorre um desgaste abrasivo importante do disco, conforme provado pelo aumento dos valores do coeficiente de atrito;
- Em geral, a composição das camadas de fricção observadas em diferentes temperaturas e sua estabilidade são fundamentais para inferir a composição das partículas e fragmentos emitidos por esse tipo de sistema tribológico.

Hee e Filip (2005) analisaram as características de fricção e desgaste de dois materiais de atrito, sendo que o primeiro material contém 25% em peso de cinzas volantes e 14 ingredientes adicionais. O segundo é reformulado pela adição de titanato de potássio (material que apresenta baixa condutividade térmica, visando proporcionar maior estabilidade térmica) em sua composição. O desempenho e o desgaste dos materiais de teste foram comparados com a pastilha de freio do equipamento original, que serviu de referência. O custo de produção foi reduzido pela substituição de ingredientes caros por cinzas volantes de baixo custo. Para tanto, os ensaios foram conduzidos utilizando-se a máquina de teste *Fast (Friction Assessment and Screening Test)* e um dinamômetro inercial automotivo de freio a disco. O coeficiente de atrito, a taxa de desgaste e as superfícies de atrito foram examinados para interpretar o desempenho dos dois materiais de fricção. As superfícies de fricção das amostras foram investigadas por microscopia de luz, varredura e microscopia eletrônica de transmissão, e também por análise EDS. Os autores observaram que o desempenho da frenagem depende fortemente do filme de fricção gerado na superfície de atrito. A composição química e microestrutural deste filme difere da formulação do par de atrito, sendo também dependente do ambiente e das condições de teste aplicado. A análise dos resultados experimentais mostrou que o material de atrito contendo titanato de potássio melhorou

significativamente a estabilidade do coeficiente de atrito, efeito *fade*, resistência mecânica e produção de menor desgaste do disco de freio.

Mutlu (2009) realizou uma investigação de novos materiais para substituir o amianto. Neste estudo, o uso do pó de palha de arroz (RSD) e do pó de casca de arroz (RHD) foram estudados para avaliar as propriedades tribológicas em pastilhas de freio. RSD e RHD possuem sílica em sua composição, o que proporciona aos materiais das pastilhas um comportamento semelhante à cerâmica. Para obter RSD e RHD, palha de arroz e casca de arroz foram granulados depois de terem sido secos. Diferentes quantidades de RSD e RHD foram incluídas na mistura da pastilha de freio junto com os outros ingredientes regulares. Estas pastilhas de freio recém-formuladas foram testadas em uma máquina de ensaios FAST. O coeficiente de atrito, a taxa de desgaste e análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) para superfícies de atrito foram examinadas para avaliar o desempenho dessas amostras. O autor chegou às seguintes conclusões: os resultados experimentais mostraram que a camada de fricção, com o uso de RHD, melhorou significativamente o desempenho geral, com redução do efeito *fade* e estabilização do coeficiente de atrito; as taxas de desgaste aumentaram ligeiramente com 20% de RSD e RHD e alguns micro vazios e microfissuras são observados na superfície desgastada; o maior coeficiente de atrito médio foi observado nas amostras com 20% de RHD e o desvio padrão apresentou uma amplitude aceitável para todas as especificações; a topografia e composição química da superfície de atrito afetam fortemente o desempenho de atrito na interface; O autor concluiu que RSD e RHD podem ser efetivamente usados em formulações de pastilhas de freio quando adequadamente combinadas com outros aditivos.

Sugozo, Mutlu e Sugozo (2016), a fim de melhorar o desempenho de pastilhas de freio, adicionaram Ulexita, um mineral borato hidratado de sódio e cálcio, foi adicionado em compósitos fenólicos e as propriedades tribológicas de tal revestimento de freio foram investigadas. Ulexita é um mineral com boas propriedades quanto à resistência à abrasão e ao calor. Nos estudos experimentais, obteve-se a variação do coeficiente de atrito, a taxa de desgaste específica, a densidade e a dureza das amostras. Além disso, caracterizações microestruturais de pastilhas de frenagem foram analisadas usando MEV. Como

resultados, observaram que a inclusão de Ulexita contribui para o aumento do coeficiente de atrito, pois melhorou as propriedades da camada de fricção.

Mahale, Bijwe e Sinha (2017) elaboraram dois materiais, com composições semelhantes, variando-se o tamanho das partículas de titanato de potássio. Os resultados foram comparados com um material de referência sem titanato de potássio. Os parâmetros de desempenho analisados foram o desempenho e variação do coeficiente de atrito, redução e recuperação do coeficiente de atrito e análise da superfície desgastada por meio de MEV e EDS. Os resultados mostraram que quase todos os parâmetros de desempenho foram significativamente e benéficamente afetados com o acréscimo de titanato de potássio.

Leonardi *et. al.* (2018) e Menapace *et. al.* (2018) desenvolveram pesquisas com o objetivo de estabelecer uma abordagem para o desenvolvimento de materiais de fricção livres de cobre, que oferecem menos riscos à saúde e ao meio ambiente. Os primeiros autores analisaram dois tipos de materiais: um obtido apenas pela remoção do cobre em relação ao material de referência considerado e a outro cujo percentual das fibras de cobre removidas foi substituído por fibras de aço. O material cujo cobre foi removido apresentou maior desgaste e menor coeficiente de atrito em relação ao material de referência. Já o material cujo cobre foi substituído pelo ferro apresentou taxas de desgaste maiores nos testes curtos. No entanto, quando o estado estacionário é atingido, após a formação de uma camada de atrito estável, o desgaste das fibras de aço torna-se quase insignificante, enquanto adquire mais importância o seu papel como platô primário. Nesta fase, as fibras de aço atuam como as fibras de cobre e formam os planaltos primários. Já no segundo estudo, os autores buscaram substituir o cobre por materiais nos quais a barita é um dos principais componentes. Foi observado que as camadas de fricção que se formaram na superfície das amostras, embora com mecanismos diferentes dependendo da composição do material, asseguraram um comportamento relativamente estável da temperatura e do coeficiente de atrito, durante os testes.

2.6 Máquinas para ensaios de frenagem

Limpert (2011) afirma que devido a questões financeiras e disponibilidade de tempo, somente os melhores materiais são testados nos veículos. Antes disto, os materiais de fricção são submetidos a testes em máquinas para sua caracterização, buscando-se um modelo que permita testar os materiais com a máxima aproximação possível das condições reais de operação de um sistema de frenagem, e que seja economicamente viável.

Zimmer (1982) menciona que os principais equipamentos utilizados para caracterização de materiais de fricção são o dinamômetro inercial, *Chase*, *Fast* e *Krauss*, sendo que o primeiro é o que melhor reproduz as condições de frenagem em um sistema de freio veicular. Além disso, Brembo (1997) salienta que os dinamômetros inerciais são os mais utilizados e difundidos para a realização de teste de freios. Logo, o princípio de funcionamento desta máquina será detalhado.

Um dinamômetro inercial é composto por um motor elétrico capaz de controlar a variação de velocidade dos discos de inércia em rotação e, mais especificamente, da velocidade máxima de rotação correspondente à velocidade máxima do veículo em que o freio é testado. Com o auxílio dos discos de inércia é fornecido à máquina um valor de energia cinética idêntico à suprida pelo motor à parte do veículo afetado pelo freio testado (Brembo, 1997). Normalmente, certo número de volantes com diferente inércias são avaliados para que seja possível selecionar aquele que melhor reproduza a inércia total necessária. O disco de freio é fixado no final do eixo. Utiliza-se o sistema de freio original do veículo, em que o calíper é fixado na bancada, muitas vezes utilizando o próprio eixo do veículo testado. A Figura 2.13 ilustra um típico dinamômetro inercial.

Zimmer (1982) destaca que o motor acelera os discos de inércia até a velocidade desejada e durante a aplicação do freio é desligado, de forma a permitir que o freio desacelere os discos de inércia. Ainda, segundo Zimmer (1982) os dinamômetros inerciais são utilizados para realizar o último estágio de ensaios que antecedem os testes dos freios nos veículos. Preston e Forthofer (1971) afirmam que a grande desvantagem do dinamômetro é o elevado custo. Sanders

et al. (2001) ressaltam uma outra desvantagem dos dinamômetros inerciais: geram um resultado para o coeficiente de atrito que é dependente do sistema de freio (em cada ensaio se obtém o desempenho do material de fricção para o sistema de freio ensaiado). Dessa forma, caso seja necessário avaliar a utilização do mesmo material em outro sistema de freio, um novo ensaio deve ser realizado no dinamômetro com o respectivo sistema de freio, o que aumenta o tempo e a frequência dos ensaios.

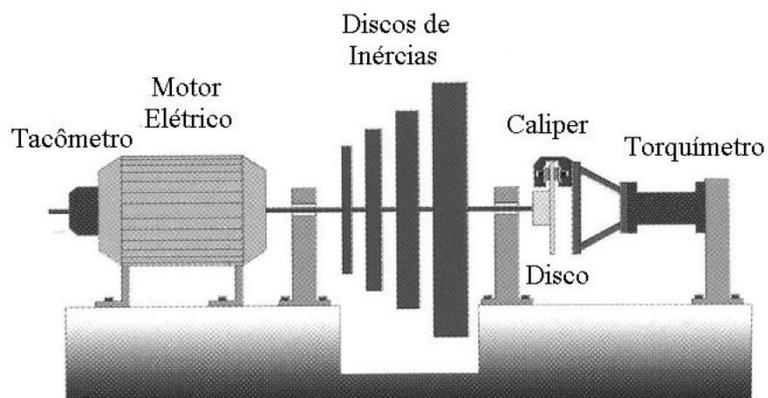


Figura 2.13: Diagrama de Dinamômetro Inercial.

Fonte: Adaptado de BREMBO (1997).

De acordo com Zimmer (1982) as máquinas *Chase* e *Fast* são muito utilizadas no controle de qualidade. Na primeira, o corpo de prova é pressionado contra um tambor cuja temperatura é controlada por resistências elétricas e um sistema de ventilação. Já na segunda, o corpo de prova é pressionado contra um disco em um ensaio com duração de 90 minutos. Normalmente, a máquina *Fast* opera a atrito constante, podendo também trabalhar a pressão constante.

Ainda segundo Zimmer (1982) a máquina *Krauss* assemelha-se a um dinamômetro, mas não possui discos de inércia. Utiliza o sistema de freio original do veículo, que é montado na máquina. Pode ser utilizado no desenvolvimento de novos materiais de fricção e no controle da qualidade.

A Tabela 2.2 compara as principais características abordadas por Zimmer (1982) *apud* Infantini (2008), a respeito das máquinas utilizadas para caracterizar materiais de fricção.

Tabela 2.2: Comparativo as entre características das máquinas de caracterização de materiais de fricção.

Tipo de Máquina	Componentes			Tempo de Teste (tempo de preparação incluso)	Vantagens	Desvantagens
	Sistema de Freio	Pastilha	Disco			
Dinamômetro	Original	original	original	10h	resultados significantes	alto custo e tempo de teste longo
Chase	suporte da máquina	corpo de prova 1"x1"	disco da máquina	7,5h	baixo custo	tempo de teste longo e não compatível com resultados de veículo
Fast	suporte da máquina	corpo de prova 0,5"x0,5"	disco da máquina	7,5h	baixo custo	
Krauss	Original	original	original	3h	resultados significantes	-

Fonte: Zimmer (1982) *apud* Infantini (2008).

Neis, Ferreira e Lorini (2011) desenvolveram um tribômetro de laboratório para realizar testes de frenagem em alta temperatura (*fade*). Resultados obtidos em um dinamômetro de freio de escala completa, que foram executados de acordo com o procedimento padrão AK Master, foram usados como referência. Em primeiro lugar, os parâmetros operacionais da máquina em escala de laboratório e em escala completa foram ajustados. Em segundo, uma boa correlação entre os resultados térmicos de ambas as máquinas foi apontada. Para isso, vários fatores foram testados no tribômetro: mudanças na área de contato aparente das amostras, espessura do disco (4 e 6mm) e presença de isolamento térmico em sua superfície traseira do disco do tribômetro. De acordo com a metodologia adotada, o aumento da área de contato das amostras, a espessura do disco e a presença de isolamento térmico na superfície traseira do disco contribuem para uma melhor correlação térmica entre os resultados do dinamômetro de freio e do tribômetro de escala. As diferenças no comportamento térmico ocorreram principalmente devido à maior massa térmica relacionada ao dinamômetro de

freio, onde as partes metálicas (eixo, parafusos, estrutura, etc.) são maiores do que na tribômetro de escala e tornam o efeito da inércia térmica mais significativo na máquina em grande escala.

Ainda segundo Neis, Ferreira e Lorini (2011), os efeitos isolados de cada fator no comportamento térmico dos testes do tribômetro foram: (1) O aumento na área de contato das amostras promove aumento do ganho de temperatura; (2) A presença do isolante térmico na superfície traseira do disco do tribômetro aumenta o ganho de temperatura; (3) O aumento da espessura do disco do tribômetro reduz a magnitude do ganho de temperatura em todas as paradas, principalmente durante o início (primeiras paradas) do ciclo *fade*; (4) Os resultados de fricção, produzidos a partir de tribômetro e dinamômetro, apresentam aproximadamente as mesmas tendências, principalmente durante a primeira metade das frenagens devido, principalmente, à melhor correlação térmica nesta fase. Uma boa correlação na magnitude do coeficiente de atrito foi encontrada entre as duas curvas quando uma variabilidade de 6% no coeficiente de atrito foi considerada.

2.7 Variáveis que afetam o atrito e o desgaste

Segundo Xiao *et. al.* (2016) os parâmetros a serem considerados para avaliar o desempenho de materiais de fricção veicular são o coeficiente de atrito e o desgaste. Sanders *et al.* (2001) enfatiza que o coeficiente de atrito depende principalmente das seguintes variáveis:

- Velocidade de escorregamento;
- Pressão de contato;
- Temperatura na interface do par de fricção.

De acordo com Xiao *et. al.* (2016) a velocidade de escorregamento e a pressão de contato podem ser diretamente controladas na máquina de ensaio, diferentemente da temperatura, que é consequência destes parâmetros bem como das características mecânicas e térmicas do sistema. Outros autores, como Blau e Mclaughlin (2003), citam que, além das três variáveis supracitadas, a umidade relativa do ar também afeta o desempenho dos sistemas de freio.

Para Xiao *et al.* (2016) as investigações sobre o comportamento de fricção e desgaste dos materiais de atrito para freios devem ser valiosos para controlar o atrito, reduzir o desgaste e contribuir para o desenvolvimento de novos materiais de atrito otimizados, melhorando a confiabilidade da frenagem. Estes autores verificaram que o comportamento de fricção e desgaste dos materiais de atrito do freio são principalmente afetados pelos seguintes fatores:

- Características do material: propriedades físicas, químicas e mecânicas dos materiais de fricção;
- Condições de frenagem: pressão, velocidade inicial, tempo e aumento de temperatura na frenagem;
- Condições ambientais: temperatura ambiente, umidade, fluxo de ar;
- Condições de superfície: rugosidade da superfície, propriedade de contato;
- Parâmetros estruturais: forma, tamanho e modalidade de contato do par de freio.

Além das propriedades inerentes aos materiais de fricção, as condições de frenagem são geralmente consideradas como um dos fatores externos mais importantes. As pesquisas existentes focam principalmente nos seguintes fatores influentes: temperatura, pressão de contato e velocidade de escorregamento entre o par de atrito. Segundo Xiao *et al.* (2016), por um lado, esses fatores têm influências mais óbvias sobre o desempenho do atrito e desgaste dos materiais de fricção. Por outro lado, outros fatores não podem ser facilmente ou claramente detectados devido à limitação de teorias e tecnologias existentes. Além disso, as leis e mecanismos de influência das condições de frenagem na metalurgia do pó (materiais semi-metálico – SM) e materiais de fricção orgânica sem amianto (NAO) não são os mesmos por causa das diferenças entre seus elementos constituintes. Portanto, as influências desses três principais fatores no comportamento de fricção e desgaste desses dois tipos de materiais de fricção de freio (SM e NAO) serão abordados nos subtópicos seguintes.

2.7.1 Velocidade de Escorregamento

De acordo com Infantini (2008) a velocidade de escorregamento tem efeito pouco significativo sobre o desempenho dos sistemas de freio. Em função da geometria da pastilha de freio em sistemas a disco, há uma variação da velocidade tangencial de escorregamento ao longo do seu raio, conforme observado na Figura 2.14 (a). O mesmo efeito não acontece em freios a tambor pois as lonas são aplicadas contra um tambor cilíndrico de raio constante, conforme ilustra a Figura 2.14 (b).

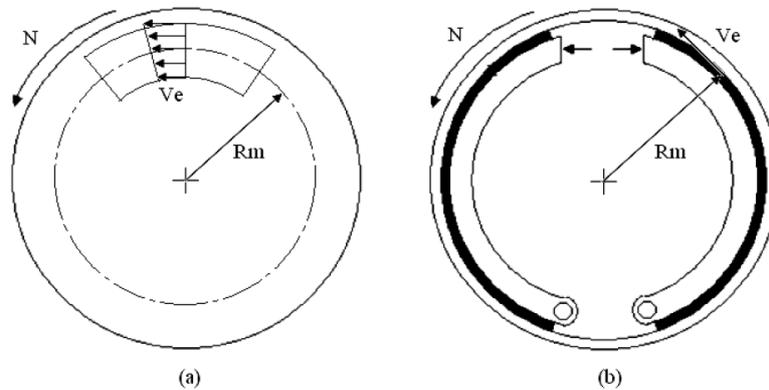


Figura 2.14: (a) Variação da velocidade de escorregamento em sistemas de freio a disco, (b) Variação da velocidade de escorregamento em sistemas a tambor.

Fonte: adaptado de Infantini (2008).

Conforme Wilson e Bowsher (1971) variações na velocidade de escorregamento de $\pm 23\%$ em relação à média não afetam significativamente o coeficiente de atrito, conforme ilustra a Figura 2.15. Tais autores afirmam que a variação do atrito nos materiais de fricção, em função de variações da velocidade de escorregamento, é de no máximo 0,05.

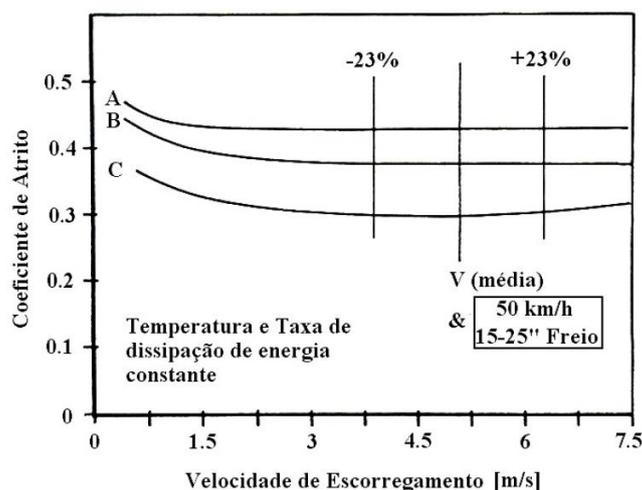


Figura 2.15: Coef. de atrito x velocidade de escorregamento para diferentes materiais.
Fonte: adaptado de WILSON e BOWSHER (1971).

Deng *et. al.* (2010) estudaram o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste de um material de atrito orgânico sem amianto – NAO (compósito C-C-SiC) em diferentes velocidades iniciais de frenagem. A Figura 2.16 ilustra os resultados obtidos e a Fig. 2.17 mostra as imagens de microscopia óptica da superfície desgastada para diferentes valores de velocidade. A diferença de comportamento do atrito e desgaste sob diferentes velocidades de frenagem vem principalmente da temperatura na interface. Sob a frenagem com baixa velocidade, os filmes de fricção ainda não foram formados. A umidade e oxigênio absorvidos lubrificam a interface de contato para causar um baixo coeficiente de atrito e taxa de desgaste. Quando a velocidade inicial da frenagem aumenta, uma temperatura mais alta promoverá a evaporação da umidade. Além disso, mais asperidades serão deformadas, desgastadas e fraturadas para formar filmes de fricção, que adicionam-se à área de contato real e resultam em um incremento de coeficiente de atrito. No entanto, com um aumento adicional na velocidade inicial de frenagem, a temperatura da superfície pode ser alta o suficiente para que o material de superfície seja decomposto termicamente, o que resultará na rápida diminuição do coeficiente de atrito e, como consequência, um aumento na taxa de desgaste.

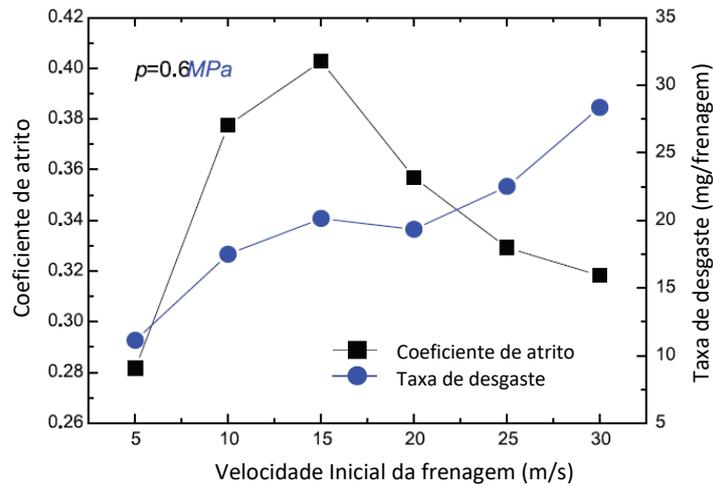


Figura 2.16: Coeficiente de atrito e desgaste em função da velocidade de escorregamento – pastilha de freio NAO.

Fonte: adaptado de Deng *et al.* (2010).

Já Han *et al.* (2011) investigaram o atrito e desgaste em materiais de atrito produzidos pelo processo de metalurgia do pó (material classificado como semi-metálico-SM), contendo 6% de SiO₂. Os resultados obtidos e as micrografias obtidas no MEV resultantes são ilustradas pelas Figuras 2.18 e 2.19, respectivamente.

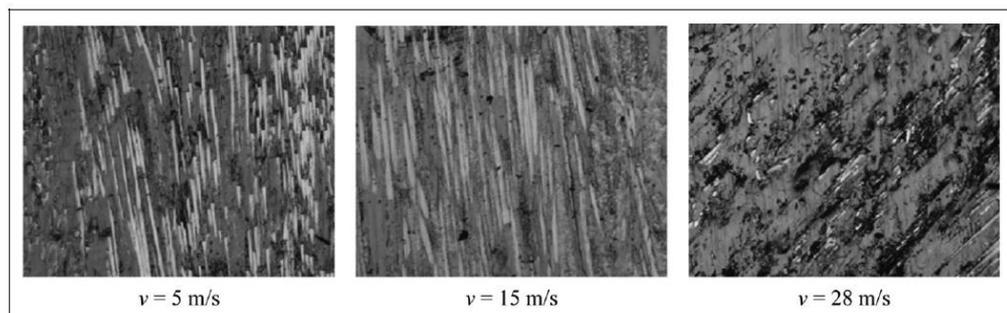


Figura 2.17: Micrografias da superfície de pastilhas NAO ensaiadas sob diferentes velocidades.

Fonte: adaptado de Deng *et al.* (2010).

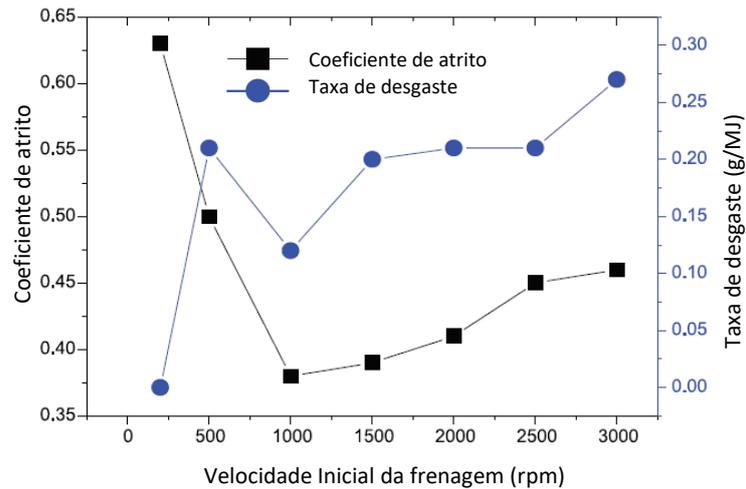


Figura 2.18: Coeficiente de atrito e desgaste em função da velocidade de escorregamento – pastilha de freio SM.

Fonte: adaptado de Han *et al.* (2011).

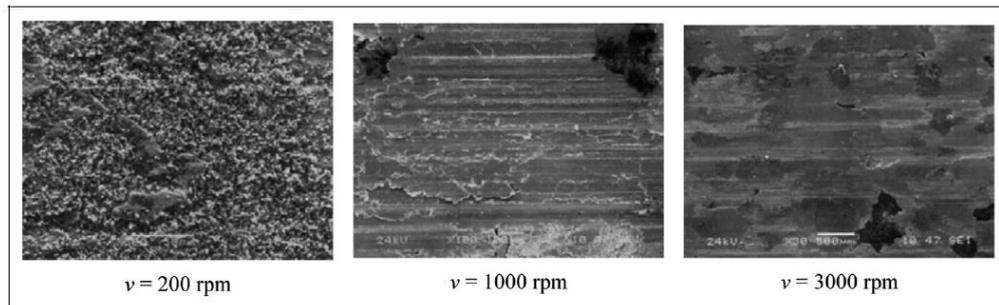


Figura 2.19: Micrografias da superfície de pastilhas SM sob diferentes velocidades.

Fonte: adaptado de Han *et al.* (2011).

Nota-se, pela análise dos resultados obtidos, um comportamento do atrito e do desgaste extremamente diferente entre os materiais de atrito da metalurgia do pó (SM) e do orgânico (NAO). Han *et al.*(2011) verificaram que com o incremento da velocidade inicial de frenagem, o coeficiente de atrito diminui primeiro e depois aumenta ligeiramente. A taxa de desgaste aumenta antes que a velocidade atinja 500 rpm, diminui quando a velocidade muda de 500 para 1000 rpm, e depois aumenta ligeiramente novamente. Ao analisar os mecanismos de atrito, os autores perceberam que o filme desenvolvido na superfície de atrito tem um efeito importante no atrito na interface. Quando a velocidade é <500 rpm, existem alguns detritos granulados, o que torna o coeficiente de fricção relativamente elevado. Então, com o aumento da velocidade, os

detritos se tornam bastante densos e têm um papel de lubrificação. Assim, o coeficiente de atrito diminui e mantém-se em um valor baixo.

2.7.2 Pressão de Contato

Brezolin (2007) menciona que a pressão de contato é influenciada pelo desgaste, geometria da pastilha de freio, posição do pistão de freio em relação à pastilha, deformações da pastilha e do disco de freio e pela carga imposta ao sistema pelo condutor do veículo por meio da pressão hidráulica do sistema.

De acordo com Xiao *et al.* (2016), a pressão de contato afeta o atrito e o desgaste devido ao tamanho e deformação da área de contato real. De acordo com a tribologia moderna, a força de atrito depende do tamanho da área de contato real. O número e o tamanho dos pontos de contato aumentarão com o aumento da pressão de contato. Se o contato entre a interface for plástico, o coeficiente de fricção será independente da pressão de contato. No entanto, o contato é realmente elástico-plástico. Além disso, a pressão de contato também afetará outros fatores, como temperatura e lubrificação. Uma vez que a área de contato real não é proporcional à pressão de contato, o coeficiente de atrito não é proporcional à pressão de contato.

Ainda conforme Xiao *et al.* (2016), a abordagem de influência da pressão de contato no comportamento do atrito e do desgaste dos materiais de atrito podem ser atribuído às mudanças da área de contato real do par de atrito e pela geração de filmes de fricção, que por sua vez influenciam a organização do material de atrito e alteram o tipo de desgaste. Sob uma baixa pressão de contato, os filmes de fricção são difíceis de se formarem na interface. Com a crescente pressão de contato, as asperezas distribuídas na interface de contato são deformadas e quebradas para formar alguns resíduos de desgaste. Esses detritos são facilmente quebrados para formar alguns filmes granulares soltos, que promovem aumento da área de contato real. Em seguida e como consequência, a resistência à fricção é reforçada, o que resulta em um incremento do coeficiente de atrito. Quando a pressão de contato aumenta para um valor maior, mais detritos serão formados, incorporados, empilhados e preenchidos na superfície desgastada para gerar filmes mais granulares. Gradualmente, esses filmes granulares soltos podem se conectar

para formar uma película densa com uma área maior. O filme de fricção atua como uma película de lubrificação na interface, o que reduz a força dos materiais da matriz para diminuir o coeficiente de atrito. Além disso, mais calor será gerado sob uma pressão de contato mais elevada, o que gradativamente prejudica a estrutura do material para aumentar o desgaste por oxidação do material de atrito.

Osterle e Dmitriev (2016) ressaltam que estes filmes de fricção formados durante vários eventos de frenagem e presos de alguma forma na interface entre a pastilha e o disco, são compostos dos seguintes componentes: Fe_3O_4 nanocristalino como principal constituinte, nanopartículas de grafite e outros ingredientes macios distribuídos homogeneamente na magnetita e, eventualmente, abrasivos do tamanho submicrométricos, como ZrO_2 ou Al_2O_3 , também incorporados na matriz à base de magnetita. Uma descrição generalizada da estrutura do terceiro corpo seria: Uma certa quantidade de nanoinclusões moles ($d < 10$ nm) e algumas inclusões duras maiores (50–100 nm) são distribuídas homogeneamente em um aglomerado de nanopartículas de óxido quebradiço. Osterle e Dmitriev (2016) também citam que as partículas de cobre precisam de consideração especial, sendo que a grande maioria dos filmes são constituídos por cobre metálico e apenas raramente são observadas partículas de óxido de cobre. A princípio, partículas metálicas macias podem adotar a função de lubrificantes sólidos, como grafite ou sulfetos metálicos.

Jang *et al.* (2004) e Singh *et al.* (2017) afirmam que a formação de filmes de fricção exerce influência direta no desempenho da frenagem e contribui para preservar a integridade do disco de freio, pois impede o contato direto entre o material de atrito (pastilha ou lona de freio) e o rotor (disco ou tambor de freio). A estabilidade do coeficiente de atrito, bem como a redução de ruído e vibração, também são características importantes associadas ao terceiro corpo. Tais filmes na superfície de atrito podem ser divididos em quatro grupos:

- Filmes de oxidação – proveniente da reação entre a superfície do disco de freio com moléculas de oxigênio no ar, sendo propícios para superar a adesão gerada pelo contato entre as matrizes metálicas. O filme de oxidação apresenta pouca resistência e possui características rígidas e

quebradiças, sendo facilmente quebrado, gerando partículas abrasivas que prejudicam ainda a superfície de atrito.

- Filme lubrificante - nas condições de atrito a seco, devido à alta temperatura gerada durante o deslizamento, os metais de baixo ponto de fusão provenientes da composição da pastilha de freio são liquefeitos a temperaturas elevadas e a decomposição térmica do aglutinante orgânico produz líquido, de modo que a expansão do ponto de lubrificação forma um filme local lubrificante.
- Filmes de gases amortecedores - durante o processo de frenagem, quando a temperatura da superfície de contato é superior a 220°C, uma grande quantidade de gases (CO, CO₂, CH₄, etc.) é gerada devido à decomposição da resina fenólica da pastilha freio e a película de óxido na superfície do disco pode absorver facilmente o gás, formando assim uma camada superficial de atrito local.
- Filme de transferência - no processo de atrito entre o material da resina fenólica da pastilha e o disco de freio, a transferência ocorre do material da resina fenólica para a superfície do disco de freio e forma gradualmente um filme de transferência contínuo com certa espessura. Esse filme de transferência contínuo favorece a redução do desgaste do disco de freio. A camada de óxido metálico na superfície do material de resina fenólica e o filme de transferência na superfície do disco de freio influenciam-se mutuamente. A formação e a fratura da película de transferência também são condições importantes para os mecanismos adesão e desgaste abrasivo.

Bao *et al.* (2012) estudaram os comportamentos de atrito e desgaste de um material de fricção orgânico sem amianto sob diferentes pressões de frenagem. As variações do coeficiente de atrito e da taxa de desgaste são mostradas na Figura 2.20, e as imagens obtidas via MEV da superfície desgastada são mostradas na Figura 2.21. Nota-se que o coeficiente de atrito aumenta primeiro e depois cai com a pressão de contato crescente. No entanto, a taxa de desgaste continua aumentando com a crescente pressão de contato.

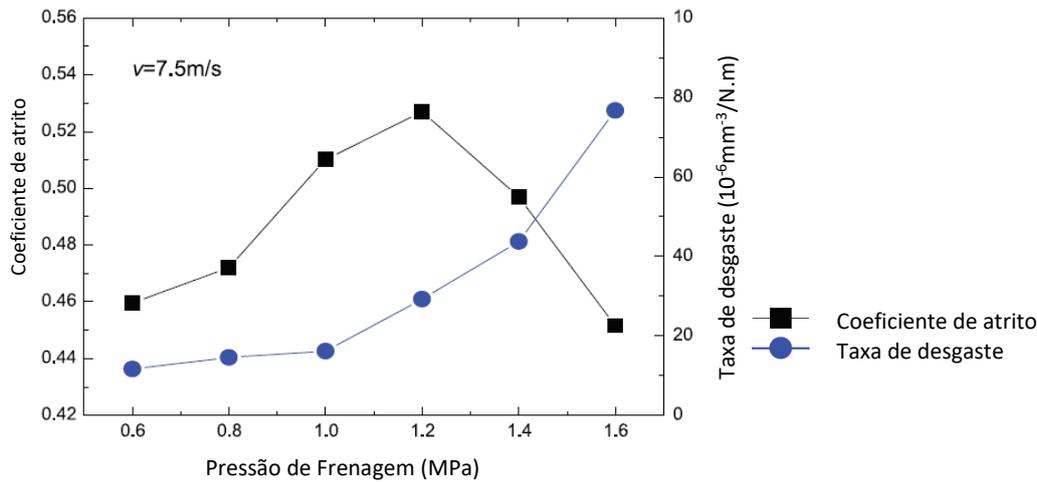


Figura 2.20: Coeficiente de atrito e desgaste em função da pressão de contato – pastilha de freio NAO.

Fonte: Bao *et al.* (2012).

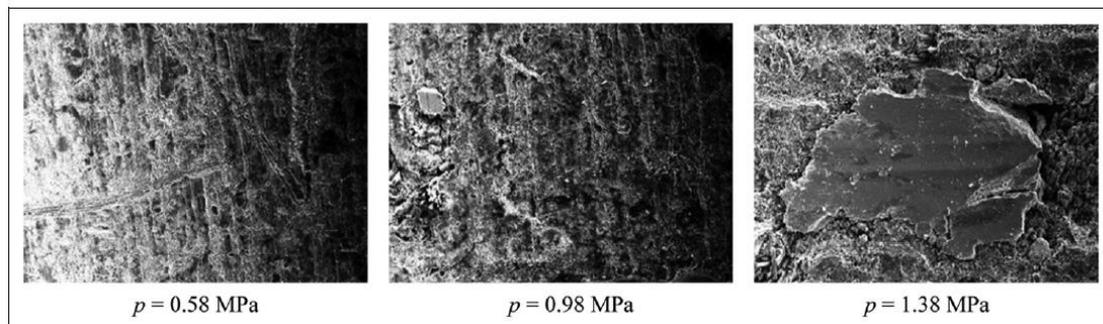


Figura 2.21: Micrografias da superfície de pastilhas NAO sob diferentes pressões.

Fonte: Bao *et al.* (2012).

Wang *et al.* (2008) investigaram a variação do coeficiente de atrito e taxa de desgaste de um material SM à base de cobre, produzido por metalurgia do pó, para o freio de trem quando a pressão de contato aumentou de 0,49 para 0,98 MPa, enquanto a velocidade foi mantida constante. A Figura 2.22 ilustra os resultados obtidos. Quando a pressão de contato estiver dentro de uma faixa baixa, o aumento de temperatura não será óbvio, e a força do material da matriz diminui ligeiramente; então, o coeficiente de atrito é relativamente alto. Com um aumento adicional na pressão de contato, a temperatura aumentará gradualmente, o que diminui a força dos materiais da matriz. Assim, o coeficiente de atrito diminui continuamente, e a taxa de desgaste continua aumentando.

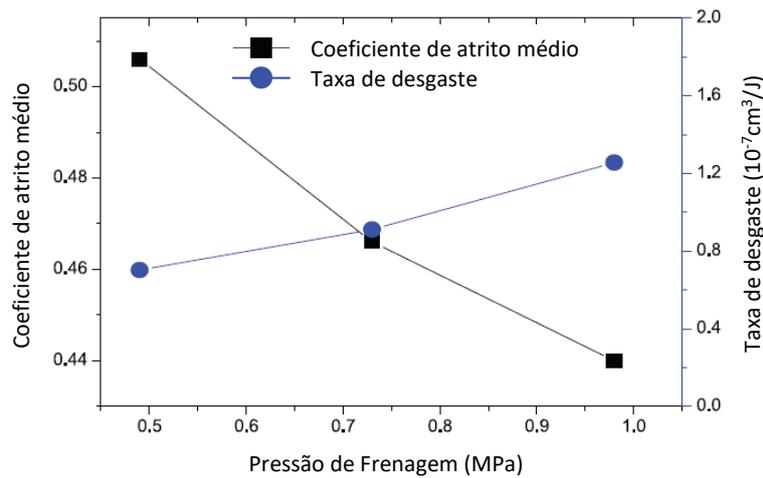


Figura 2.22: Coeficiente de atrito e desgaste em função da pressão de contato – pastilha de freio SM.

Fonte: Wang *et al.* (2008).

2.7.3 Temperatura e atrito

Segundo Bao *et al.* (2011), a frenagem pode ser considerada como um processo de transferência de energia cinética em energia térmica. O calor de fricção provoca um aumento de temperatura que, conseqüentemente, afeta o atrito e o desgaste.

De acordo com Liu (2009) a temperatura da superfície não é uniformemente distribuída na interface. A temperatura das asperezas pode ser muito maior do que a da superfície, que então forma zonas locais de alta temperatura, chamados de pontos quentes. O calor de atrito afeta a oxidação, a resistência térmica e a plasticidade do material de atrito. Causa a mudança na microestrutura da superfície (difusão e adsorção de moléculas ou átomos na interface de atrito) e transformação da fase estrutural de materiais de atrito. Também pode afetar a lubrificação da interface para trazer uma mudança qualitativa nas características de interação na interface.

Conforme Parmigiani e Timothy (2000) e Rumold e Swift (2002), a geração de calor acontece de forma não uniforme nas superfícies de contato do par de fricção pelo fato que a temperatura pontual gerada é proporcional à pressão de contato naquele ponto. A temperatura durante a frenagem dos discos de freio veiculares não é uniformemente distribuída devido a várias razões, como expansão térmica e imperfeições na geometria. O resultado da interação do calor

gerado por atrito, distorção termoplástica e contato elástico, conhecido como instabilidade termoelástica, é concentrada em uma ou mais regiões da superfície do disco, causando significativo gradiente de aquecimento, que poderiam causar transformações martensíticas e geração de trincas, conforme demonstrado por Anderson e Knapp (1990).

Bushan (2013) afirma que os mecanismos de atrito e desgaste são alterados sob diferentes temperaturas. A uma temperatura baixa, as asperidades duras, pequenos detritos e partículas em forma de fragmento existem na interface de contato. As asperidades duras podem ser embutidas em uma matriz mais macia, o que resulta em um fluxo plástico, chamado efeito de sulco. Segundo Kim e Jang (2000), com o aumento da pressão e velocidade inicial de frenagem, a temperatura aumentará e resultará em vários fenômenos. Em primeiro lugar, a resina da matriz pode ser amaciada e até mesmo carbonizada perdendo sua força de adesão. As fibras reforçadas são então arrancadas e arrastadas da matriz, e filmes de fricção são formados na superfície de atrito.

Segundo Kim e Jang (2000), os filmes de fricção são deformados, fraturados e fragmentados para formar pequenos detritos que diminuem a estabilidade do atrito, aumentam o desgaste e, às vezes, causam fortes vibrações e altos ruídos. Uma vez que a superfície excede a temperatura de decomposição térmica do material de fricção, o fenômeno *fade* ocorrerá e o coeficiente de atrito conseqüentemente diminuirá. Além disso, a decomposição térmica do material orgânico liberará gases para gerar filmes de gases amortecedores o que contribui muito para a diminuição do coeficiente de atrito. O fenômeno de cavitação causa a eliminação de detritos granulares ou de fragmentos de partículas, o que reduz o torque de frenagem.

De acordo com Xiao *et al.* (2016), com o aumento da temperatura, de uma maneira geral, o coeficiente de atrito aumenta gradualmente. No entanto, depois de atingir uma certa temperatura, o coeficiente de atrito pode cair repentinamente. Já a taxa de desgaste aumenta continuamente conforme a temperatura aumenta.

Ozturk *et al.* (2013) estudaram a influência da temperatura no comportamento de atrito e desgaste de quatro materiais de fricção com diferentes fibras reforçadas: fibra cerâmica, fibra de lã de rocha, fibra de vidro e fibra de aço, respectivamente. Verificou-se que os comportamentos de fricção e desgaste destes quatro materiais de atrito têm leis de influência semelhantes com a temperatura. Por exemplo, a variação do coeficiente de atrito e da taxa de desgaste com a temperatura para o material de fricção preenchido com fibra de aço é mostrada na Fig. 2.23 (a). A micrografia obtida pelo MEV da superfície desgastada após ensaios de frenagem a 200 e 350°C são mostrados na Figura 2.23 (b). Nota-se que o coeficiente de atrito aumenta com o aumento da temperatura até 300°C. Entretanto, a taxa de desgaste aumenta consideravelmente com o aumento da temperatura, o que demonstra que o desgaste do material de atrito é mais severo com o aumento da temperatura.

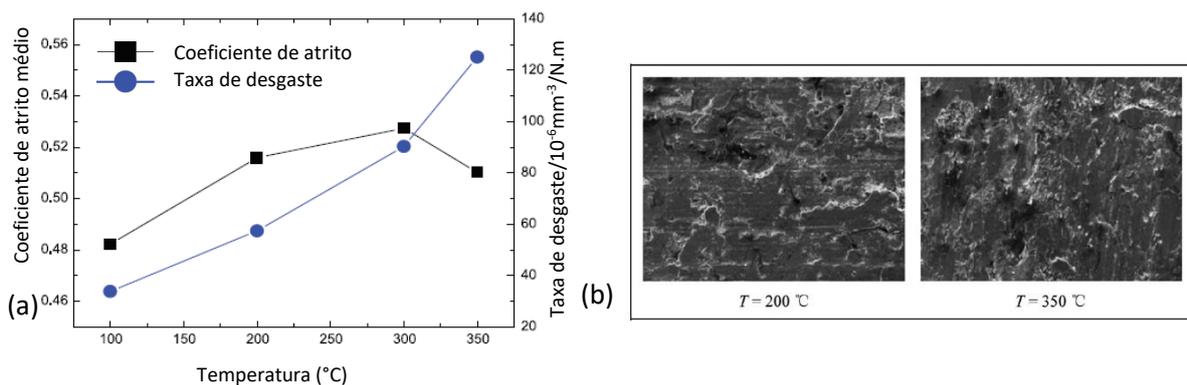


Figura 2.23: a) Coeficiente de atrito e desgaste em função da temperatura – b) pastilha NAO contendo fibras de aço e a micrografia da superfície desgastada.

Fonte: Ozturk *et al.* (2013).

Em comparação com os materiais de fricção orgânicos sem amianto (NAO), as leis de influência da temperatura sobre o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste dos materiais semi-metálicos (SM) de metalurgia do pó são completamente diferentes. Por exemplo, Chen *et al* (2004) investigaram o efeito da temperatura da superfície de contato no comportamento do atrito de um material de fricção em metal à base de ferro. Verificou-se que o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste diminuem inicialmente e, em seguida, aumentam com o aumento de temperatura, conforme mostrado na Figura 2.24.

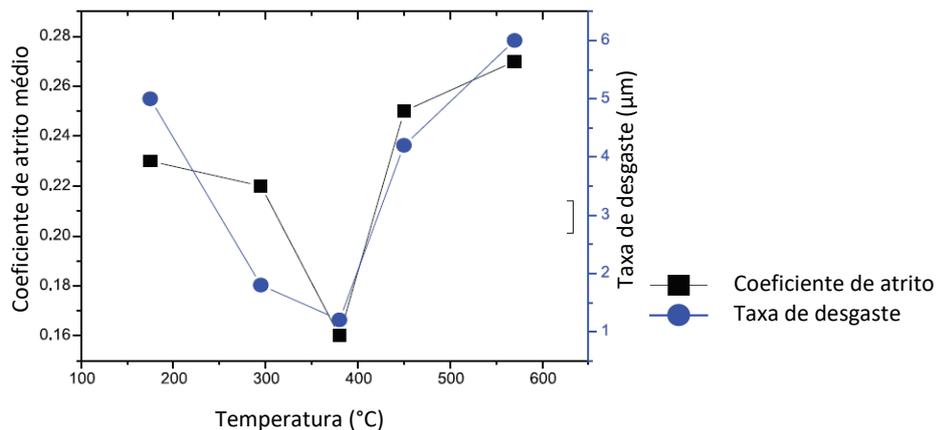


Figura 2.24: Coeficiente de atrito e desgaste em função da pressão da temperatura - pastilha SM contendo fibras de aço.

Fonte: Chen *et al* (2004).

Chen *et al* (2004) salienta que, em geral, para materiais SM, o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste diminuem no período inicial. No entanto, após a temperatura atingir um certo valor, tanto o coeficiente de atrito quanto a taxa de desgaste começam a aumentar com o aumento de temperatura. Quando a temperatura está dentro de uma faixa baixa, os impactos na interface do par de atrito começam a atuar mecanicamente. Como consequência, resíduos de desgaste são gerados na interface pastilha/disco, o que resulta em um aumento do coeficiente de atrito e da taxa de desgaste. Com o aumento da temperatura, a interface de atrito é oxidada, formando filmes de oxidação, o que é benéfico para proteger o material de fricção do contato com as asperidades do disco de freio. Os filmes de oxidação também têm efeitos significativos na lubrificação. Assim, tanto o coeficiente de atrito como a taxa de desgaste diminuem continuamente. Quando a temperatura continua aumentando, esses filmes serão destruídos, produzindo partículas abrasivas duras. Como consequência, o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste aumentam gradativamente.

Gao e Lin (2002), formularam um modelo analítico para determinação da distribuição de temperatura na superfície de contato do par de fricção de um sistema de freio a disco. Foi utilizada uma técnica de elementos finitos transiente para caracterização da temperatura do disco de freio com apropriadas condições de fronteira térmica, assumindo que a pressão no freio é uniformemente

distribuída na área de contato do disco e pastilhas e que os materiais do disco e pastilha são homogêneos e suas propriedades térmicas são invariáveis com a temperatura. Os resultados numéricos mostram que as características operacionais do freio exercem influência na distribuição de temperatura na superfície e na temperatura máxima de contato do par de fricção.

2.8 Formação dos Platôs

A evidência experimental de manchas na escala mesoscópica (que são os platôs de contato) em superfícies de pastilhas de freio tem sido frequentemente demonstrada por Microscopia eletrônica de varredura (MEV) (ERIKSSON, BERGMAN e JACOBSON, 1999; ERIKSSON e JACOBSON, 2000; ERIKSSON *et al.*, 2001; ERIKSSON, BERGMAN e JACOBSON, 2002; FILIP, WEISS e RAFAJA, 2002; OSTERLE, W., URBAN, 2004; KEMMER, 2002; JACOBSON, 2006; OSTERMEYER e MULLER, 2008; NEIS *et al.*, 2017; YOON *et al.* 2012). Além disso, as partículas de desgaste foram coletadas e fotografadas com MEV, conforme divulgado por Kukutschová *et al.* (2010). Esses autores mediram as distribuições de tamanho de partícula de desgaste durante os testes em dinamômetro. A distribuição de tamanho das partículas de desgaste de tamanho nanométrico também desempenham um papel importante durante a frenagem automotiva.

De acordo com Xiao *et al.* (2016), ao acionar o freio, as superfícies rugosas da pastilha e do disco de freio são submetidas ao deslizamento. Como o disco de freio possui dureza mais elevada que a da pastilha e gira a alta velocidade, alguns materiais de fricção são removidos por corte, formando resíduos de desgaste. Ostermeyer (2001) salienta que o atrito é influenciado pelo desgaste, sendo que os constituintes mais duros presentes nas pastilhas são os maiores responsáveis pelo aumento do atrito (maiores tensões normais). À medida que ocorre desgaste da pastilha (e, em menor intensidade, também do disco), a área de contato desses constituintes duros das pastilhas com o disco varia, interferindo no valor de atrito. Como resultados das subseqüentes aplicações do freio, veios de material duro são removidos e novos veios surgem, originando, desta forma, os platôs de contato, que apresentam dureza mais elevada do que

a pastilha de freio, conforme demonstrado por Eriksson (2000) e Neis *et. al.* (2017).

Conforme Ostermeyer e Muller (2008), a existência dos platôs formados nas superfícies das pastilhas e do disco influencia fortemente o comportamento do atrito e desgaste dos pares de freio. Osterle *et al.* (2009) e Osterle e Urban (2006) salientam que a camada de fricção determina as características de atrito durante um processo de frenagem. As partículas produzidas nos processos de frenagem são liberadas no ar como material particulado, podendo ser depositadas nos componentes do sistema freio (incluindo o disco) ou cair na superfície de beira de estrada, gerando matéria depositada. Segundo Osterle e Urban (2006) estas partículas liberadas possuem tamanho inferior a 10nm, e que a composição dos platôs formados é determinada principalmente pelo lubrificante sólido, que é parte da formulação da pastilha de freio.

Jang *et al.* (2004) afirmam que a camada de fricção, além de exercer influência direta no desempenho de frenagem, contribui para preservar a integridade do disco de freio, pois impede o contato direto entre o material de atrito (pastilha ou lona de freio) e o rotor (disco ou tambor de freio). A estabilidade do coeficiente de atrito, bem como a redução de ruído e vibração, também são características importantes associadas ao terceiro corpo.

Segundo Muller e Ostermeyer (2007) e Ostermeyer e Muller (2008), os platôs têm sua origem nas heterogeneidades do material da pastilha. As pastilhas orgânicas convencionais sem amianto consistem em partículas duras (isto é, pós e fibras metálicas e orgânicas) embebidas em uma matriz polimérica bastante macia. Como resultado do contato deslizante entre a pastilha e o disco promovido pelo processo de frenagem, dois casos são possíveis:

1. Somente a matriz macia está em contato. Isto é unicamente o caso para pastilhas 'verdes' (novas);
2. Existe também contato entre as não-homogeneidades e o disco (caso geral).

O primeiro caso é ilustrado pela Figura 2.25. A parte principal dos resíduos é gerada a partir da matriz polimérica. Na pastilha de freio, as partículas de desgaste se movem por meio da zona de contato. Quando atingem a borda, uma fração destas partículas é liberada para o meio ambiente, enquanto que a outra

continua a experimentar os mecanismos de deformação, esmagamento, quebra e descamação repetidamente.

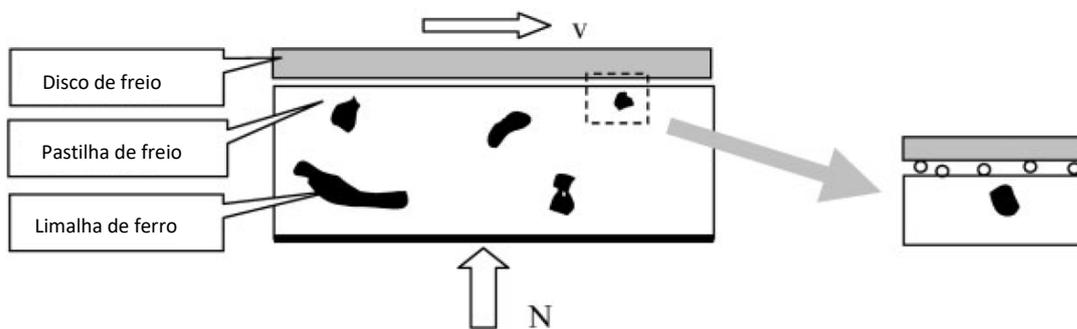


Figura 2.25: perfil do par pastilha-disco e, à direita, uma pequena seção ampliada.

Fonte: Adaptado de Ostermeyer e Muller (2008).

Segundo Ostermeyer e Muller (2008), dois eventos importantes acontecem quando, em função do desgaste da matriz polimérica, uma partícula de material duro, que compõe a formulação da pastilha com o objetivo de aumentar o atrito, atinge a superfície da pastilha de freio. O primeiro ocorre devido à maior taxa de desgaste da matriz polimérica, em que a partícula dura é pressionada contra a mesma, promovendo aumento da pressão normal local. O segundo ocorre devido à perturbação do fluxo de partículas de desgaste no limite na interface de contato. Como resultado do aumento das tensões locais e da temperatura nas áreas ao redor desta partícula dura, as partículas de desgaste que atingem essa região se aglomeram e se compactam no entorno da partícula dura. Os processos de fusão e de liga, como liga mecânica (*mechanical alloying*) e tribo-oxidação, determinam o desenvolvimento de um tribofilme de óxido duro e muito fino no topo (algumas análises indicam até mesmo a possibilidade de criar estruturas cerâmicas), denominados platôs, que crescem de forma contrária e perpendicular ao fluxo de partículas de desgaste, conforme pode ser observado pela Figura 2.26. Já a Figura 2.27 ilustra imagens de platôs formados em pastilhas de freio desgastadas obtidas por técnicas de microscopia.

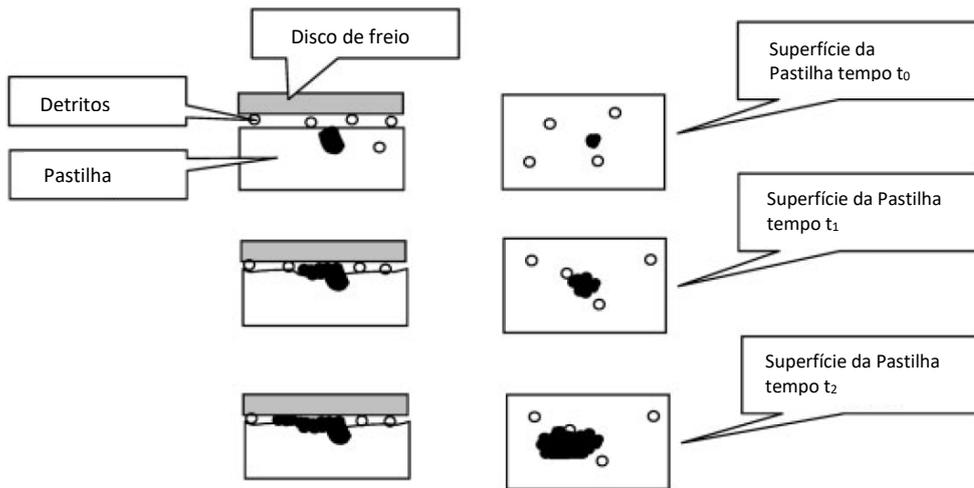


Figura 2.26: seção do sistema de freio em diferentes momentos $t_0 < t_1 < t_2$: crescimento de um platô.

Fonte: Adaptado de Ostermeyer e Muller (2008).

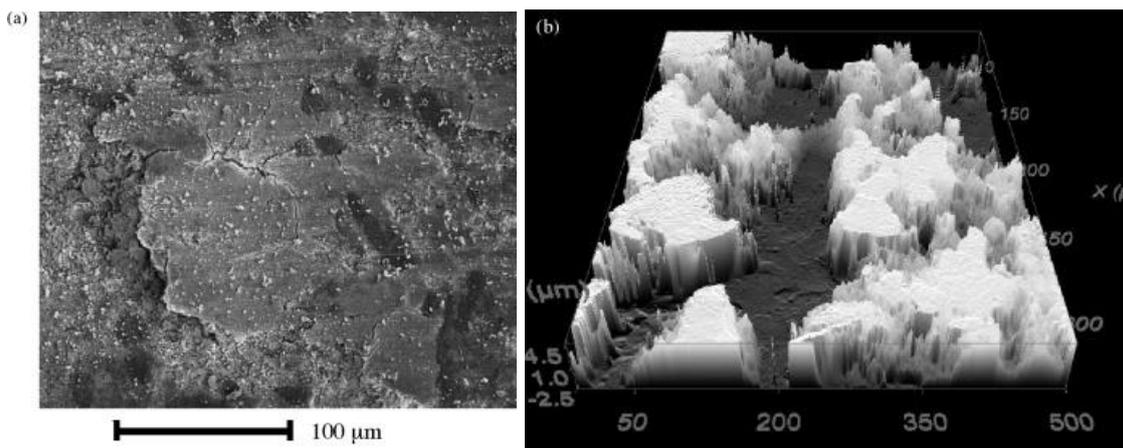


Figura 2.27. (a) Imagem de microscopia eletrônica de varredura de uma pastilha de freio desgastada (direção de deslizamento: esquerda → direita). (b) Imagem de microscópio confocal de uma pastilha de freio desgastada (direção de deslizamento: topo → baixo).

Fonte: Adaptado de Muller e Ostermeyer (2007)

Conforme Muller e Ostermeyer (2007) os platôs protegem a matriz polimérica contra o desgaste. O poder de atrito transmitido em um platô pode aumentar para um nível tal que promove desgaste do disco, tornando-se um problema. Por esse motivo, um lubrificante sólido é adicionado à composição da pastilha, limitando o desgaste abrasivo entre disco e pastilha.

O tempo de vida de um platô é limitado. O desgaste em torno dos mesmos, a geração de calor e tensões mecânicas reduzem a sua estabilidade. Além disso, a estrutura da aspereza do disco de freio impõe movimentos locais e vibrações dos platôs sobre a estrutura polimérica macia, levando também à propagação de fissuras. Esses efeitos resultam na destruição de parte dos platôs após um certo tempo (Figura 2.28). Além disso, a estrutura cultivada, juntamente com a partícula original, perderá seu “apoio” na matriz e, em certo ponto, todo o platô se rompe e deixa o sistema também.

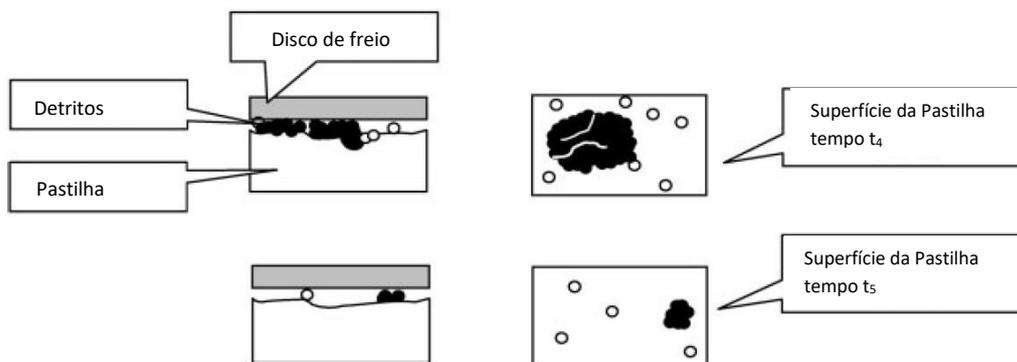


Figura 2.28: seção do sistema de freio em diferentes momentos $t_3 < t_4 < t_5$: destruição de um platô.

Fonte: Adaptado de Ostermeyer e Muller (2008).

Para resumir os processos supracitados, pode-se afirmar que a interface entre o disco e a pastilha é caracterizada pelo crescimento e destruição de zonas de contato que contém platôs, estruturas de alto desgaste e resistentes ao atrito, na superfície da matriz polimérica macia, conforme pode ser observado resumidamente na Figura 2.29. A parte principal da entrada de energia é dissipada por esses pontos de contato. Muller e Ostermeyer (2007) sugerem que o atrito é definido por um equilíbrio dinâmico entre os processos que geram e destroem estes platôs. Dessa forma, estes autores propõem que o atrito e o desgaste devem ser interpretados como medidas dinâmicas do processo e não como uma função estacionária, por exemplo, da força ou velocidade de escorregamento, mas determinado pelo histórico da carga e desgaste.

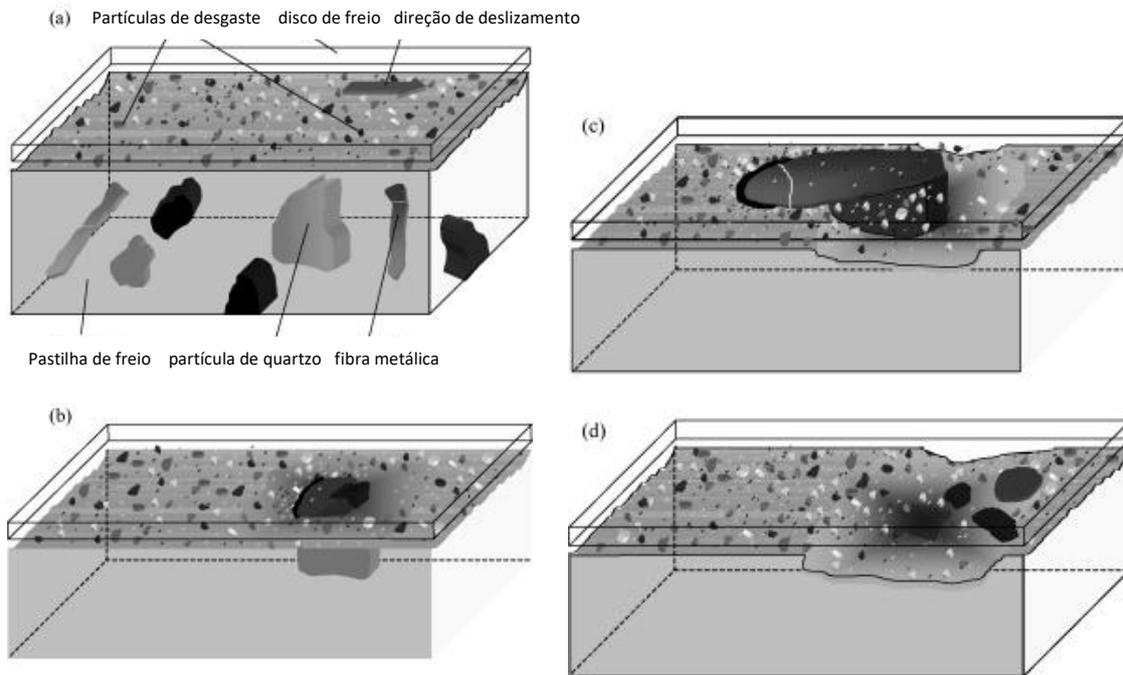


Figura 2.29: Contato pastilha/disco: (a) constituintes da pastilha nova; (b) formação de um platô; (c) crescimento do platô e aumento da instabilidade; (d) destruição de um platô.

Fonte: Adaptado de Muller e Ostermeyer (2007).

Eriksson (2000) mediu a dureza dos platôs para diferentes profundidades de indentação. O resultado foi que a dureza dos platôs para profundidades de recuo muito baixas estava na faixa das fibras metálicas e 20 vezes maior que a dureza do material da matriz. Desta forma, provaram a existência de camadas duras e finas, formando-se diante de uma partícula dura de pastilha de freio. Eriksson, Bergman e Jacobson (2002) salientam que a pressão média nos platôs é cerca de cinco vezes maior do que a pressão média na pastilha e as medições mostram que os platôs de contato tipicamente exibem valores de dureza consideravelmente mais altos do que a dureza média do material da pastilha de freio (por exemplo, 3000 MPa em comparação com 200 MPa). Isso se deve aos platôs tipicamente formados por fibras de metal envolvidas por constituintes mais compactos e mais macios.

De acordo com Eriksson e Jacobson (2000), os platôs podem ser vistos a olho nu como manchas brilhantes contra um fundo escuro. Um MEV ou um perfilômetro revela que os platôs apresentam tamanhos variados, tipicamente

entre 50 e 500 μm de diâmetro e alguns microns de altura. Eles podem ser definidos como as áreas da pastilha mostrando sinais de contato deslizante com o disco. Normalmente, esses sinais envolvem uma superfície relativamente plana com ranhuras rasas na direção de deslizamento, como pode ser observado na Figura 2.30. Em alguns casos, conforme observado por Eriksson, Lord e Jacobson (2001), em situações envolvendo altas temperaturas e altas pressões de freio, os platôs podem crescer até milímetros e cobrir a parte principal da pastilha, conforme observado na Figura 2.31.

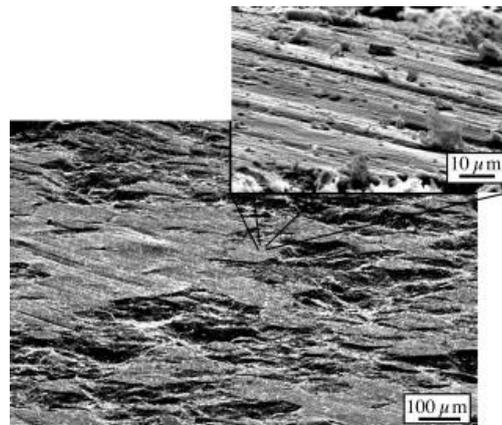


Figura 2.30: Platôs de contato na superfície em uma pastilha de freio orgânica. A superfície ranhurada típica dos platôs de contato é visível no detalhe ampliado.

Fonte: Adaptado de Eriksson e Jacobson (2000).

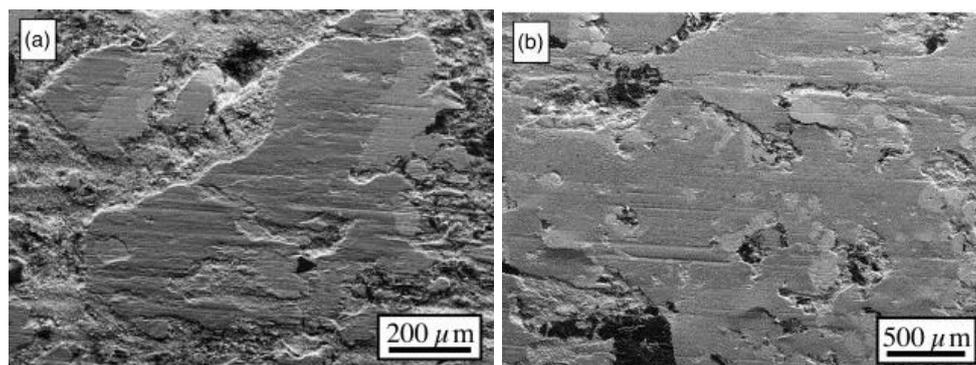


Figura 2.31: Platôs na superfície em uma pastilha de freio orgânica após frear em (a) baixa pressão e temperatura do freio e (b) alta pressão e temperatura.

Fonte: Adaptado de Eriksson e Jacobson (2000).

Segundo Eriksson e Jacobson (2000), como em todas as situações de contato deslizante, as forças de atrito são transferidas pela área de contato real. Devido à topografia das pastilhas de freio, a área de contato real é confinada dentro das platôs de contato, conforme observado na Figura 2.32. Porém, em um instante qualquer, a área de contato real é muito pequena em comparação com a área total dos platôs. A carga normal pode ser realizada por contato direto por meio destes contatos específicos com a superfície com o disco sólido, mas também por meio de partículas muito pequenas ou mais filmes contínuos, suficientemente finos para passar entre o platô e o disco. O tamanho e a composição dos platôs representam uma influência crucial no comportamento do atrito na interface pastilha/disco.

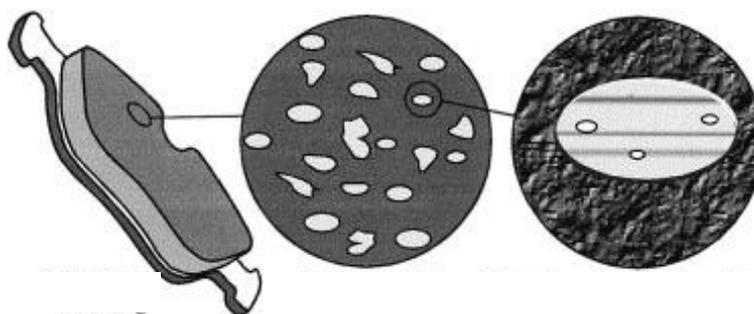


Figura 2.32: Visão geral da área de uma pastilha de freio e sua divisão em platôs de contato e áreas de contato real dentro de um platô.

Fonte: adaptado de Eriksson e Jacobson (2000).

Segundo Eriksson e Jacobson (2000) e Zula, Ghetiya, Pandya (2017) os platôs de contato são classificados em platôs primários e secundários. Os platôs primários se formam primeiro devido à menor taxa de remoção dos constituintes mecanicamente estáveis e resistentes ao desgaste da pastilha (normalmente, fibras, responsáveis por aumentar o atrito). Numa segunda etapa, essas partículas duras podem formar locais de nucleação para o crescimento de platôs secundários. Elevadas pressões, temperaturas e tensões cisalhantes compactam os resíduos gerados durante o processo de frenagem, originando os platôs secundários. Um conjunto de canais rasos é formado entre a pastilha e o disco, conforme pode ser observado na Figura 2.30.

Devido ao contato frequente contra o disco em movimento, os resíduos, sob a forma de pequenas partículas, circulam constantemente por estes canais. Ocasionalmente, parte deles se acumulam contra os platôs primários, ou

platôs secundários, se estes já existem. A Figura 2.33 ilustra a situação de contato pastilha/disco, onde é possível observar os platôs primário, os resíduos de desgaste formados a partir do deslizamento e a formação dos platôs secundários.

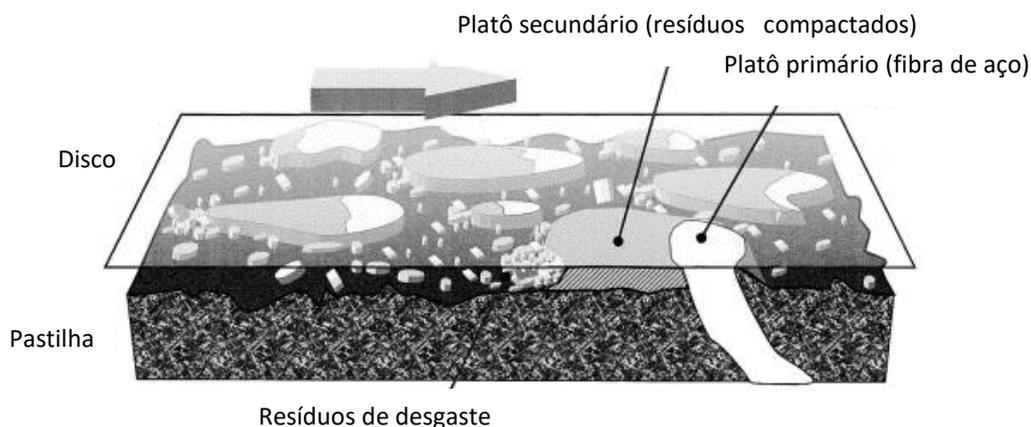


Figura 2.33: Contato pastilha/disco: sentido do deslizamento com a formação dos platôs primário e platôs secundários.

Fonte: adaptado de Ostermeyer e Mueller (2008).

2.9 Estado da arte sobre platôs

É consenso entre diversos autores, conforme pode ser observado nos resultados encontrados por Eriksson e Jacobson (2000), Osterle e Urban (2006), Eriksson *et al.* (2001), Eriksson, Bergman e Jacobson (2002), Dmitriev, Osterle e Klob (2008), Neis *et al.* (2017), Leonardi *et al.* (2018) dentre outros, que o contato real entre as pastilhas de freio e o disco consiste em uma série de pequenos platôs de contato e que o poder de atrito está concentrado nestas restritas regiões. Nessas publicações, é relatado que as características dos platôs de contato formados durante o processo de frenagem desempenham um papel importante no desempenho dos freios. Nessas camadas ocorrem processos de deformação, fratura, redução da rugosidade e mistura de massa intensiva. A formação da camada de fricção pode ser considerada como formação de um terceiro corpo por compactação de partículas de desgaste. As áreas de micro contato ou platôs de contato não são estáveis durante o estresse

tribológico, ocorrendo um equilíbrio dinâmico entre iniciação, crescimento e destruição de platôs de contato, conforme provado por Ostermeyer (2003).

Muitos estudos utilizaram tribômetro rotativo do tipo pino sobre disco para realização de ensaios experimentais envolvendo materiais de atrito de freios, conforme pode ser observado em Eriksson e Jacobson (2000), Eriksson *et al.* (2001), Verma *et al.* (2015), Verma *et al.* (2016), Federici *et al.* (2018). Eriksson *et al.* (2001) utilizou este tipo de ensaio para testar um material de pastilha compósita contra um disco de vidro e gravou em vídeo o desenvolvimento da situação de contato mesoscópico durante o teste. O estudo ilustra visualmente a dinâmica dos platôs (isto é, crescimento e destruição de platôs de contato), indicando que a localização do contato real é instável. A situação transitória resulta em aquecimento e deslocamento de pontos quentes locais nos corpos que interagem. O comportamento de fricção dos freios a disco é determinado pelas propriedades de um tribofilme nanocristalino de 100 nm de espessura que cobre as superfícies dos platôs de contato.

Esse tribofilme é formado pela combinação de deformação plástica, compactação, oxidação e mistura mecânica de partículas de desgaste. O tribofilme consiste principalmente em óxidos de ferro com um tamanho de grão de aproximadamente 10-100nm (OSTERLE e DMITRIEV, 2016). Resultados semelhantes foram encontrados por Eriksson e Jacobson (2000), que por meio de microscopia eletrônica de varredura de alta resolução, nanoindentação, análise de raios-x de dispersão de energia e perfilometria tridimensional usando interferometria óptica de luz branca observaram que muitas das características de fricção em pastilhas de freio orgânicas contra discos de ferro fundido podem ser explicadas pela estrutura de superfície complexa da pastilha, a abundante geração de resíduos de desgaste no sistema e a formação de platôs de contato.

Diversos estudos foram desenvolvidos (OSTERMEYER e MULLER, 2006; MULLER e OSTERMEYER, 2007; DMITRIEV, OSTERLE e KLOB, 2008; OSTERMEYER e MULLER, 2008; WAHLSTROM, 2015; WAHLSTROM, 2016) utilizando-se a técnica de autômatos celulares para simulação computacional das variações dinâmicas que o sistema tribológico de contato pastilha-disco está submetido.

A ideia básica do método numérico de Autômato Celular é que um continuum é discretizado em elementos de um tamanho escolhido, que são as células. Cada célula possui um conjunto de propriedades, que são modificadas por regras simples a cada passo. Essas regras são semelhantes para cada célula e dependem apenas das propriedades das células vizinhas. A vantagem de usar o Autômato Celular é que o tamanho dos elementos discretizados pode ser escolhido muito pequeno e o tempo de computação é aceitável, porque nenhum sistema de equação ou equações diferenciais precisam ser resolvidos. Assim, o usuário pode obter uma descrição detalhada de um processo dinâmico.

Dentro desse modelo por autômato celular, existem vários parâmetros que precisam ser quantificados, sendo que os principais são: (a) força normal e velocidade relativa; (b) parâmetros térmicos de materiais, tais como condutividade e capacidade térmica específica (c) configuração e distribuição de material duro na composição da pastilha de freio (para a criação dos platôs); (d) resistência ao desgaste da pastilha e do material do disco (para a geração de partículas de desgaste); (e) distribuição de partículas de desgaste (para o fluxo de desgaste de partículas); (f) parâmetros triboquímicos (para crescimento dos platôs); (g) parâmetros de estabilidade dos platôs (para destruição dos platôs). Como resultados, essa técnica contribui para encontrar uma simulação da composição e preparação do material das pastilhas para se formar platôs que promovam um coeficiente de atrito estável e que produzam o desgaste dos materiais de atrito nos níveis ideais para otimização do desempenho da frenagem (WAHLSTROM, 2017; OSTERLE e DMITRIEV, 2010; OSTERLE e DMITRIEV, 2011), simular os fenômenos de crescimento e destruição dos platôs em diferentes escalas de tempo, correlacionando-o com o fluxo de calor, o desgaste e a topografia superficial (OSTERMEYER e MULLER, 2006; OSTERMEYER e MULLER, 2007, OSTERMEYER e MULLER, 2008).

Eriksson e Jacobson (2000) demonstraram que os platôs geralmente apresentam sinais de desgaste e contato deslizante, incluindo um padrão de sulcos paralelos ao longo da direção de deslizamento, conforme pode ser observado na Figura 2.34. A nucleação das platôs de contato ocorre tipicamente onde as fibras metálicas saem da superfície, que são os platôs primários, com valores de dureza consideravelmente superiores à dureza média do compósito da

pastilha. O terceiro corpo se aglomera e é compactado em torno deste ponto mais duro, ampliando a área efetiva das platôs de contato, originando os platôs secundários, conforme pode ser observado na Figura 2.35. Uma análise EDS permite caracterizar essas áreas pela sua composição: uma porcentagem extremamente alta em carbono é identificada. A grafite é usada nas pastilhas automotivas para estabilizar o coeficiente de atrito.

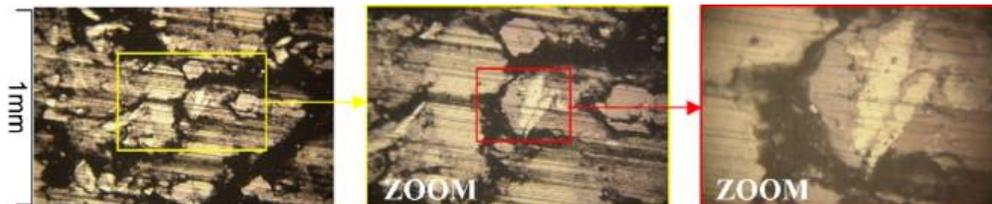


Figura 2.34: Três zooms consecutivos da superfície de contato da pastilha caracterizada por platôs de contato.

Fonte: adaptado de Eriksson e Jacobson (2000).

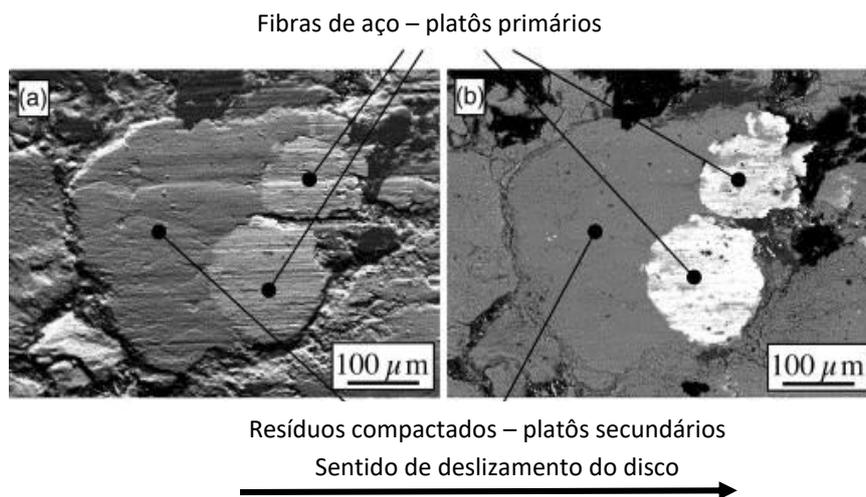


Figura. 2.35: Platôs formados em uma pastilha de freio orgânica: percebe-se que dois platôs primários suportam o platô secundário. Em (a) tem-se a imagem do MEV por elétrons secundários (*secondary electron* - SE), que permite uma visão topográfica da superfície. Em (b), imagem obtidas por elétrons retroespalhados (*backscattered electrons* - BSE) – que fornece um contraste da composição do material.

Fonte: Eriksson e Jacobson (2000).

Osterle e Urban (2006), investigaram as superfícies de uma pastilha e de um disco de freio durante experimentos no qual um coeficiente de atrito estável havia se desenvolvido. A técnica de feixe de íon focada (FIB) foi utilizada para revelar filmes de superfície induzidos e para a preparação transversal de camadas

superficiais. Informações adicionais foram obtidas por MEV/EDS de lamelas finas preparadas com a técnica FIB e por métodos analíticos de superfície (GDOS, XPS e RS). As áreas de contato microscópicas da pastilha apresentaram contraste brilhante na microscopia de varredura de íons (SIM). Isso foi atribuído a uma deformação plástica severa que finalmente conduziu a uma microestrutura nanocristalina. As partículas metálicas da pastilha, as chamadas áreas de platôs primários, foram principalmente cobertas com uma camada de óxido suave com menos de 1µm de espessura. Acima desta camada, uma fina camada (100 nm) de um filme parcialmente amorfo foi observado. Os autores concluem que existe definitivamente um terceiro corpo nas superfícies do par de atrito que compreende uma microestrutura nanocristalina. Dessa forma, investigações na escala nanométrica são essenciais para a compreensão do comportamento de fricção de tais contatos. As áreas de micro contato ou platôs de contato não serão estáveis durante o estresse tribológico, mas um equilíbrio dinâmico entre iniciação, crescimento e destruição de platôs de contato ocorrerá, conforme provado por Ostermeyer (2003).

Ostermeyer (2003) ainda ressalta que, além da mistura mecânica, a oxidação desempenha um papel importante durante a produção de resíduos de desgaste e formação da camada de fricção. Portanto, uma transição de partículas metálicas provenientes da superfície usinada severamente deformada para partículas de óxido deve ser levada em consideração para modelagem futura de platôs de contato. A composição dos filmes de fricção, tanto na pastilha quanto no disco, são determinados principalmente por lubrificantes sólidos que fazem parte da formulação da pastilha. A estrutura e a função de tais filmes ainda não são totalmente compreendidas.

Verma *et al.* (2015) investigaram as propriedades tribológicas e os mecanismos de desgaste do material de atrito de pastilhas de freio orgânicas sem amianto (NAO) comercial, deslizando contra um disco de ferro fundido utilizando espectroscopia de fluorescência de raios-x (XRF), perfilometria e análise via MEV e EDS. Como resultados, concluíram que o principal mecanismo de desgaste encontrado no disco foi a tribo-oxidação, com uma contribuição de adesão, sendo a hematita o principal óxido de ferro que é formado. Uma mistura

de abrasão e desgaste por fragmentação frágil é ativa na superfície da pastilha. Dois tipos de platôs secundários foram identificados:

a) platôs bem compactados, ricos em cobre e propensos a formar platôs bastante grandes como fragmentos;

b) platôs menos compactados, com menor teor de cobre e são propensos a formar fragmentos bastante pequenos.

Em particular, Verma *et al.* (2015) encontraram uma concentração mais elevada de cobre nos platôs secundários bem compactados. Desta forma, os autores acreditam que o cobre metálico é um componente essencial para a formação de platôs secundários compactados no pino. Quanto maior sua concentração, mais efetiva é a ação dessa camada na dinâmica de desgaste. Este resultado encontrado coincide com as descobertas obtidas por Lee e Filip (2013). Os autores realizaram testes em uma pastilha de referência contendo cobre e duas novas sem cobre. Eles observaram que as amostras sem a presença de cobre não eram capazes de formar nenhuma camada de atrito durante o deslizamento. Por outro lado, a camada de atrito na pastilha contendo cobre foi considerada responsável pela menor taxa de desgaste detectada. O cobre metálico desempenha um papel importante para uma melhor qualidade dos platôs secundários, no que diz respeito ao comportamento de desgaste.

Federici *et al.* (2018) utilizaram um tribômetro para estudar o comportamento do coeficiente de atrito estático e dinâmico de cinco materiais de atrito comerciais orgânicos e semi-metálicos contra um disco de ferro fundido, sob pressões de contato baixas, típicas de aplicação em sistemas de freio automotivo. A independência do coeficiente de atrito estático dos materiais e condições de operação encontrado foi atribuída à presença de contaminantes nas superfícies, que reduziu as energias superficiais e, portanto, o trabalho de adesão a pastilha e o disco. Já os resultados para o coeficiente de atrito cinéticos foram justificados considerando o teor de óxido de ferro nas camadas de fricção (e, em particular, nos platôs secundários), que desempenham um papel preponderante na determinação do trabalho de adesão, dada sua alta compatibilidade com o disco de ferro fundido.

Ma *et al.* (2018) estudaram e compararam as propriedades físicas, mecânicas e tribológicas de materiais de atrito para freios a partir da inclusão de fibras

reforçadas de aço, lã de rocha e lã de vidro. Utilizaram técnicas de MEV e EDS para analisar os mecanismos de desgaste após os materiais serem ensaiados. As formulações adequadas encontradas para a preparação do material continham 7,64% em peso de fibras de vidro, 20% em peso de fibras de lã de rocha e 7,64% em peso de fibras de aço.

Neis *et. al.* (2017) investigaram as estruturas existentes na superfície desgastada de uma pastilha de freio orgânica sem amianto (NAO) e uma semi-metálica (SM) utilizando microscopia óptica, microscopia confocal de varredura a laser, microindentação e segmentação da imagem. Os autores identificaram as seguintes estruturas nas superfícies das pastilhas estudadas: (i) platôs primários deformáveis e não deformáveis, (ii) platôs de contato secundário formados com e sem o suporte dos componentes estruturais das pastilhas (os platôs primários), e (iii) zonas elásticas altas. Esta última estrutura permanece em uma posição alta na topografia da superfície da pastilha e respondeu muito flexível às cargas aplicadas. Embora o material NAO selecionado neste estudo exibisse uma maior área de platôs de contato, seu coeficiente de atrito registrado nos testes foi menor em comparação com a pastilha de freio LM. Dado que a superfície do material NAO é caracterizada principalmente por platôs primários deformados e platôs secundários tipo II, é razoável supor que as forças de atrito produzidas por esses tipos de estruturas são menores em comparação com as geradas por platôs primários não deformados e platôs secundários tipo I, que foram formados principalmente na superfície do material SM selecionado neste trabalho. Barros *et. al.* (2016) desenvolveram um método para quantificar a porcentagem de cobertura da camada de atrito em uma superfície de disco de freio. Observaram que tanto materiais NAO quanto SM, apresentaram uma cobertura de camada de atrito heterogênea na superfície do disco. Comparando ambos os materiais, o SM revelou uma distribuição de cobertura de camada de atrito mais uniforme do que o NAO. Além disso, o aumento da força normal fez com que a cobertura da camada de atrito aumentasse para NAO e diminuísse no caso do SM. Sobre a morfologia dos platôs de contato, os resultados desta investigação mostraram que um aumento na força normal levou a um aumento no número e na fração de área dos platôs de contato para ambos os materiais

de freio. O número de platôs de contato encontrados para material NAO foi maior do que para material de freio SM.

Eriksson, Bergman e Jacobson (2002) realizaram um estudo sobre a situação de contato de pastilhas de freio orgânica contra discos de ferro fundido, com ênfase em mecanismos capazes de provocar variações de superfície de contato e as correspondentes variações do coeficiente de atrito. Devido às variações da superfície de contato descritas no estudo, os autores observaram que o coeficiente de atrito sofre alterações. Observaram que o coeficiente de atrito varia entre 0,3 e 0,6, devido a diferentes mecanismos, como: condições da superfície iniciais do disco, da pastilha e da adaptação geométrica necessária para compensar pequenas mudanças de posição e assentamento da pastilha. Pode-se afirmar que o atrito geralmente aumenta com o aumento da área de contato real. Os autores verificaram que as superfícies de contato entre a pastilha e o disco podem variar em relação ao tamanho, propriedades e composição. Essas variações são devidas a uma infinidade de processos que operam em diferentes escalas em tempo e tamanho. A Figura 2.36 ilustra a visão geral dos processos que os autores descrevem ao longo do estudo.

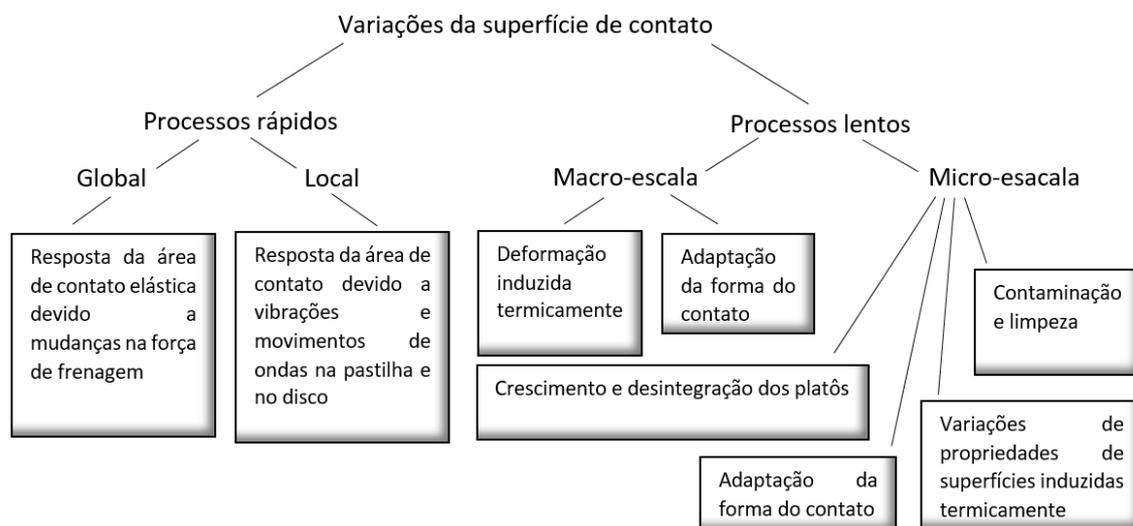


Figura 2.36: Variações da superfície de contato.

Fonte: Adaptado de Eriksson, Bergman e Jacobson (2002).

2.10 Conclusões do Capítulo de Revisão Bibliográfica e Estado da Arte

Nesse capítulo, foram apresentados a fundamentação teórica, dos temas relativos a esse estudo, e o estado da arte referente a materiais de atrito, problemas térmicos em freios, variáveis que influenciam o desempenho da frenagem, mudanças superficiais e dinâmica dos platôs em materiais de atrito de freio. Diante dos objetivos propostos para esta pesquisa, apresentados no capítulo 1, não foi encontrado nenhum trabalho que contemple todas as características desenvolvidas neste estudo. Portanto, isto define o caráter inédito desta pesquisa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentadas as metodologias utilizadas para realização dos ensaios experimentais e obtenção dos dados para análise. São descritas, também, as variáveis a serem medidas, as variáveis resposta analisadas bem como as técnicas de medições empregadas para este fim. Por fim, as técnicas de análise de dados empregadas neste estudo são apresentadas.

3.1 Fluxograma Metodológico da Pesquisa

A Figura 3.1 ilustra o fluxograma das atividades propostas a serem realizadas nesta pesquisa.

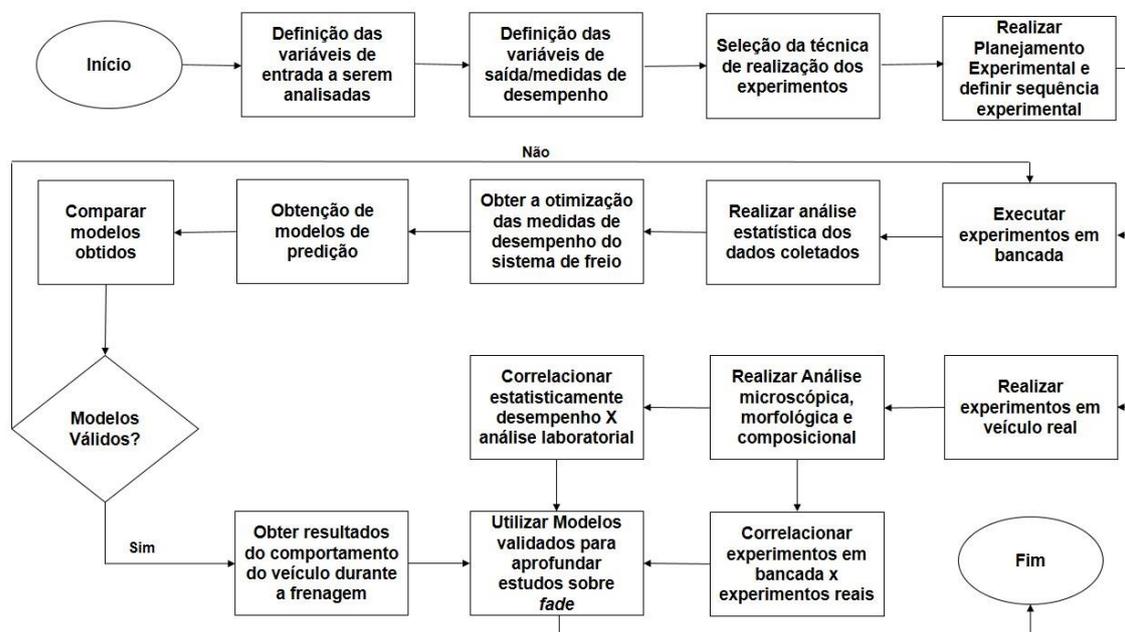


Figura 3.1: Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa.

Para alcançar os objetivos estabelecidos nessa pesquisa e compreender possíveis alterações nas propriedades do material de atrito da pastilha de freio e suas possíveis correlações com o desempenho durante a frenagem, sob diferentes condições operacionais, optou-se por estabelecer as seguintes etapas:

a) Projeto Experimental - utilizou-se a técnica de Planejamento de Experimentos para coleta e análise dos dados experimentais. Os testes foram conduzidos em bancada de ensaios e também em veículo, submetidos a condições reais de operação. Os ensaios em bancada foram utilizados para

otimização e seleção dos níveis dos fatores analisados, bem como compreender seus efeitos tribológicos e térmicos nos sistemas de freio. Já os ensaios em condições reais de operação foram empregados para analisar o comportamento do material de atrito, suas propriedades e correlações com o desempenho durante a frenagem.

b) Ensaios em veículo real – empregou-se as técnicas estatísticas análise de correlação, ANOVA e gráficos de efeitos principais para verificar o relacionamento entre as variáveis medidas, bem como suas significâncias estatísticas. Buscou-se analisar propriedades físicas e químicas dos platôs formados na superfície da pastilha de freio e correlacioná-las com os resultados das variáveis de desempenho coeficiente de atrito e de temperatura.

c) Ensaios em bancada – aplicou-se técnicas estatísticas de Planejamentos de Experimentos, otimização de múltiplas respostas e modelos de predição por regressão múltipla (MRM) e redes neurais artificiais (RNA). Buscou-se a aplicação de tais técnicas simultaneamente para: seleção dos níveis ótimos dos fatores envolvidos; predição do comportamento das variáveis de desempenho dos sistema de freio; analisar o efeito da temperatura no comportamento do sistema de freio.

c) Verificação do ajuste do modelo. Caso necessário, realizar ajustes no modelo como forma de validação do mesmo. Nesta etapa, serão utilizadas técnicas de Planejamento de Experimentos para condução e análise dos novos ensaios.

d) Modelo validado e correlações entre características da superfície dos materiais de atrito desgastados – para buscar compreender de forma mais aprofundada o efeito *fade*, analisando-se o histórico de frenagens do material de atrito, possíveis alterações físicas e químicas experimentadas pelo mesmo após sucessivas aplicações de frenagem e analisar suas correlações com as medidas de desempenho da frenagem.

Essa metodologia de aplicação de técnicas estatísticas combinadas com técnicas de otimização e de predição, para ensaios em bancada, bem como a análise de correlação entre características superficiais das pastilhas e medidas de desempenho, por meio de ensaios em veículo real, contribuem para o caráter

inédito desta pesquisa, uma vez que não foi encontrado na literatura estudos voltados para sistemas de freio que utilizem de tais técnicas simultaneamente.

3.2 Ensaaios em bancada

Ensaaios em laboratório são usualmente utilizados para analisar o desempenho de materiais de atrito de freio. Segundo Sanders *et al.* (2001), máquinas de ensaios de frenagem permitem que as propriedades dos materiais de fricção sejam mensuradas com maior precisão, reduzem o custo de máquina e permitem que o material de atrito seja ensaiado antes que o sistema de freio seja projetado. Tinte (2000) ressalta que a facilidade de instrumentação e controle mais preciso dos fatores relacionados como vantagens ao utilizar a metodologia de avaliação de frenagens por meio de bancadas em laboratório.

Optou-se por empregar experimentos em bancada para analisar o desempenho do sistema de freio em relação às variáveis de saída temperatura, coeficiente de atrito e desgaste. Para tanto, tais experimentos foram divididos em duas etapas experimentais. A primeira, conduzida utilizando-se uma potência motora de 3cv, buscou-se analisar o efeito dos fatores tipo de disco, pastilha e pressão de acionamento do freio no desempenho das variáveis de saída supracitadas. Como as temperaturas alcançadas nesta etapa não ultrapassaram 250°C, optou-se por realizar uma segunda etapa experimental utilizando-se uma potência motora de 10cv, em que o sistema de freio precisa converter uma maior quantidade de energia cinética para promover a frenagem, transformando-a, principalmente, em energia térmica. Dessa forma, buscou-se obter temperaturas na interface de atrito superiores a 300°C e tornar possível, também, analisar o efeito de temperaturas mais elevadas no comportamento do desempenho do sistema de freio. Nessa segunda etapa, analisou-se o efeito dos fatores pressão de contato e velocidade de escorregamento nas mesmas variáveis de saída.

Nessas duas etapas experimentais utilizou-se as técnicas estatísticas ANOVA e gráficos fatoriais para analisar os resultados obtidos. Foi utilizado o algoritmo *desirability*, e a ferramenta *Response Optimizer* do software *Minitab 18* para resolução, buscando-se selecionar os níveis dos fatores que otimizam o desempenho do sistema de freio quanto às três variáveis resposta analisadas. Isto permite a seleção dos melhores níveis dos fatores que otimizam de forma

global ou individual as variáveis resposta. Além disso, foram propostos 2 modelos para predição do comportamento destas medidas de desempenho: regressão múltipla (MRM) e redes neurais artificiais (RNA). O primeiro, por meio de regressão múltipla, foi empregada a técnica de estimativa dos coeficientes do modelo via mínimos quadrados ordinários e resolução por meio do software *Minitab* 18 para geração dos resultados. Já o segundo modelo, obtido por meio de redes neurais artificiais, utilizou-se o algoritmo *On Line Backprop – Rand*, e o software *Qwiknet* V.2.23 para resolução. A predição do comportamento das variáveis de resposta de um sistema de freio também contribui para análise de desempenho, desenvolvimento, seleção e manutenção de um determinado sistema de freio.

3.2.1 Descrição da máquina de ensaio de frenagem

Para os experimentos realizados em bancada, optou-se por conduzi-los utilizando-se a norma ABNT NBR 6143/1995 – Determinação do atrito e desgaste de pastilhas do freio a disco por meio da bancada de ensaios Krauss. O banco de ensaios utilizado neste estudo encontra-se instalado no Laboratório de Usinagem e Automação do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG. A configuração estrutural deste banco de ensaios passou por uma sequência de adaptações ao longo do tempo, em estudos anteriormente realizados por Caetano (2011), Abreu (2013), Machado Pinto (2014) e Menezes (2016).

O primeiro autor propôs a fabricação da versão inicial do banco de ensaios, dimensionando-o para simular os efeitos durante a frenagem para um automóvel de mil cilindradas, potência de 65cv a 6000rpm e peso de 830kg. Já o segundo autor atuou executando os ensaios baseados no procedimento de Krauss, descrita pela norma ABNT NBR 6143/1995, avaliando o efeito da força e rotação, emissão acústica, perda de massa, temperatura, fazendo também uma simulação computacional utilizando o Método de Elementos Fintos (*Finite Element Method – FEM*) para verificar o aquecimento do par pastilha/disco durante a frenagem.

Machado Pinto (2014), autor da presente pesquisa, realizou adaptações no banco de ensaios, equipando-o com um sistema de freios de motocicleta. O

critério de escolha adotado para equipar a máquina de frenagem com um sistema de freio de motocicleta deve-se ao fato dos parâmetros produzidos pela máquina para simular a frenagem, como torque e potência no eixo que contém o disco de freio, serem mais compatíveis com um veículo de menor porte. Segundo Abreu (2013), para simular com maior fidelidade o sistema de frenagem escolhido, seria ideal que se utilizasse um mecanismo com maior torque e inércia. Logo, a opção escolhida foi adaptar a máquina existente para receber um sistema de freio de um veículo com uma demanda de menor carga. Já Menezes (2016), realizou as últimas adaptações no banco de ensaios, aumentando a potência motora do equipamento (de forma a tornar possível levar o sistema a temperaturas mais elevadas e, conseqüentemente, analisar a influência de efeitos térmicos no desempenho do sistema de frenagem), fornecendo um sistema de transmissão continuamente variável – CVT (*continuously variable transmission*), e a automação do sistema de aquisição das variáveis de saída do sistema (temperatura e força de frenagem). A configuração atual do banco de ensaio de freios e o circuito hidropneumático estão ilustrados nas Figuras 3.2 e 3.3.

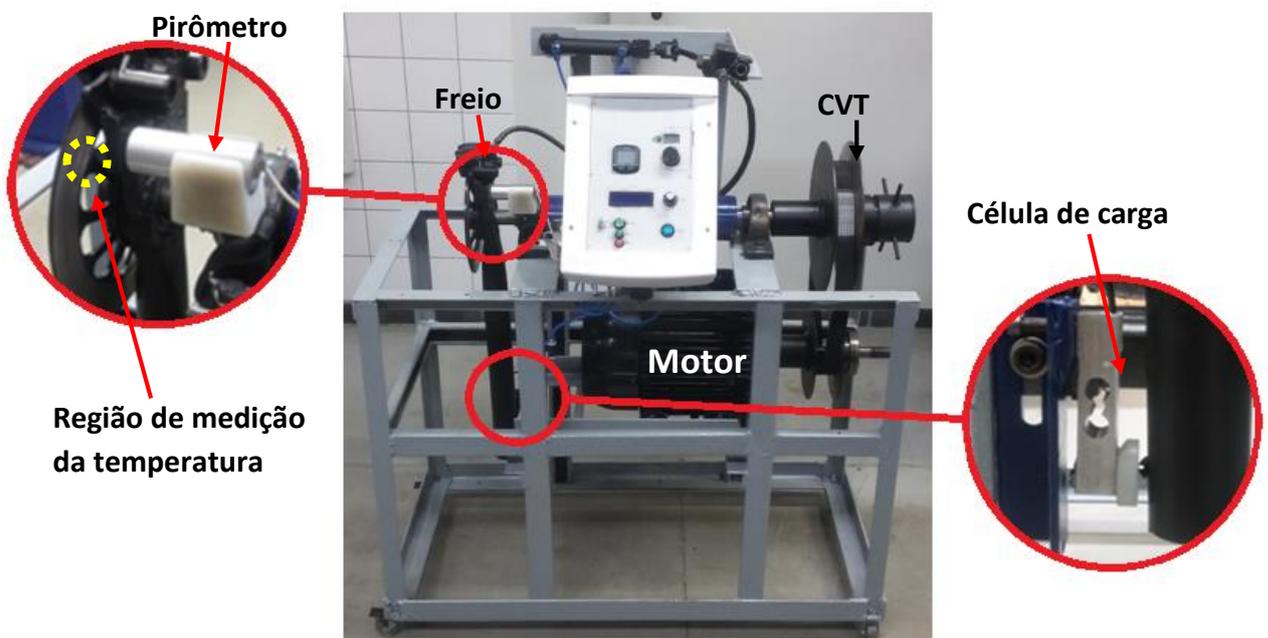


Figura 3.2: Banco de ensaio de freios.

Fonte: Adaptado de Menezes (2016).

Conforme ilustrado no diagrama da Figura 3.3, o banco de ensaios possui dois circuitos de energia: o circuito de energia mecânica, fornecida pelo motor elétrico ao disco de freio, e o circuito da energia de acionamento do sistema de freio, fornecida pelo compressor.

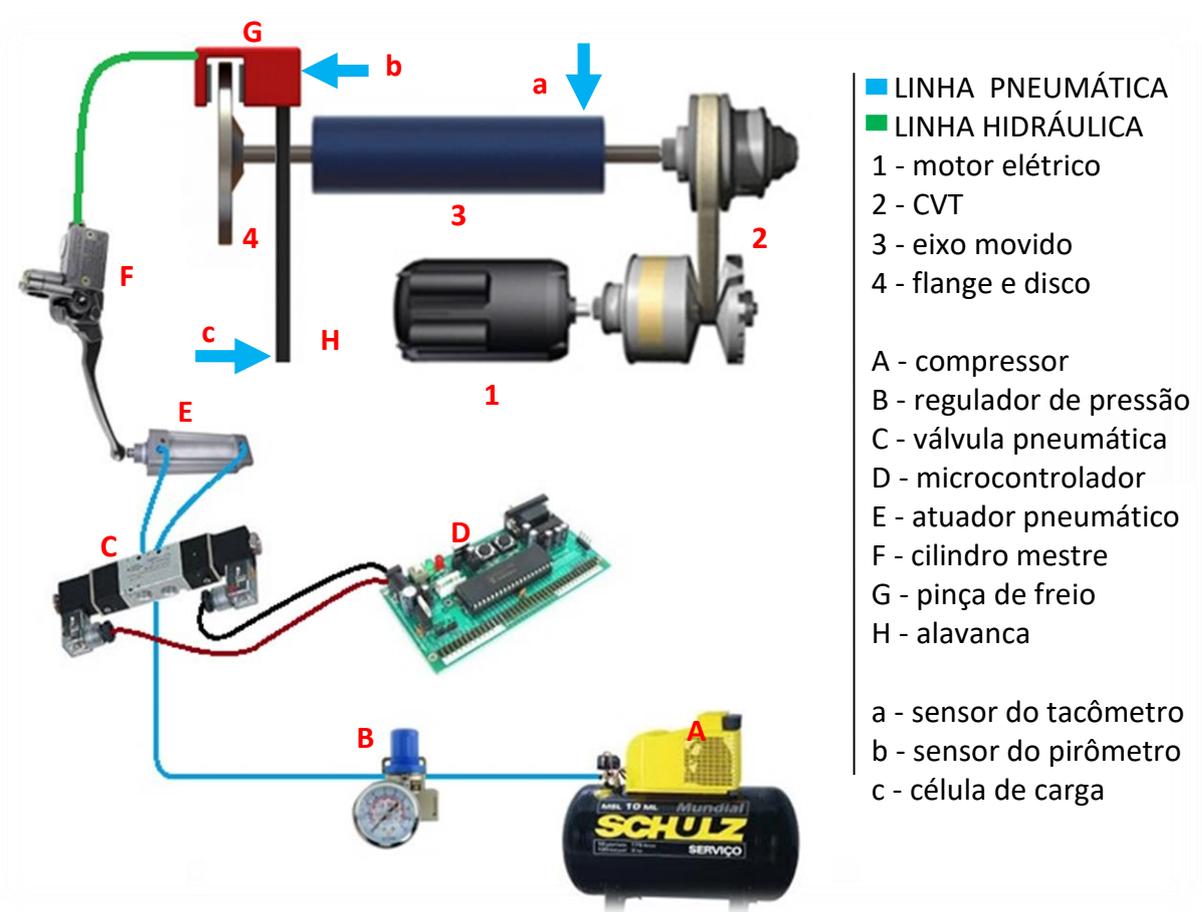


Figura 3.3 - Circuito hidropneumático do banco de ensaio de freios.

Fonte: Adaptado de Menezes (2016).

3.2.2 Principais Componentes do banco de ensaio de freios

Para fornecer a energia mecânica ao sistema, o banco de ensaios foi equipado, na primeira etapa dos experimentos em bancada, com um motor de 3 cv de potência. Na segunda etapa, foi utilizado um motor de 10 cv. Ambos motores utilizados são do tipo trifásico, tensão de 220V da marca *Weg Motors*. Já para transmitir a potência fornecida pelo motor até o eixo movido (que contém o disco de freio), além de ajustar a rotação do disco de freio, optou-se por selecionar uma transmissão do tipo CVT (MENEZES, 2016).

Para monitorar a força que produz a frenagem, o banco de ensaios foi equipado com um dinamômetro, baseado no princípio de funcionamento da alavanca. Segundo Menezes (2016), o cãliper foi instalado junto a essa alavanca e com a aplicação do freio, a força de atrito atua em sentido contrário ao movimento de rotação do disco de freio. Como consequência, o disco exerce uma força de reação igual e contrária sobre o conjunto cãliper-alavanca. Na extremidade da alavanca uma célula de carga foi instalada, impedindo a rotação do conjunto e, simultaneamente, monitorando a força aplicada. Logo, o valor da força de frenagem pode ser determinada pela aplicação do princípio da alavanca. A Figura 3.4 ilustra o dinamômetro presente no banco de ensaios.

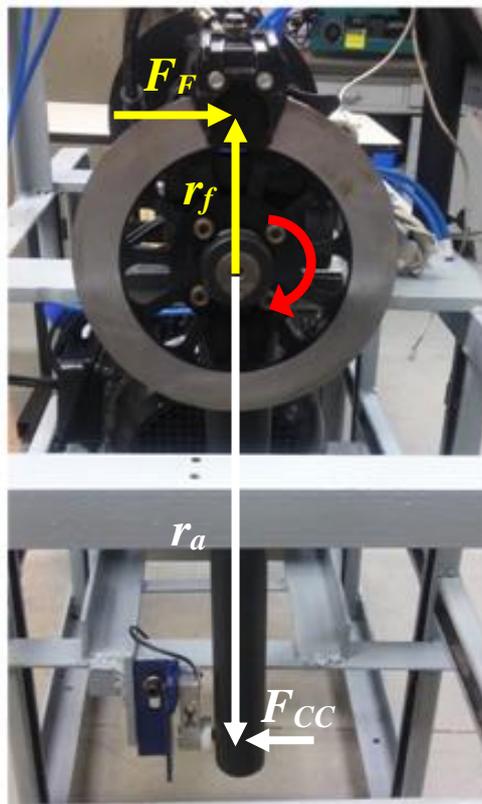


Figura 3.4 - Dinamômetro: F_F - força de frenagem; r_f - raio de atuação do freio a disco; F_{CC} - força na célula de carga; r_a - comprimento da alavanca.

Fonte: Adaptado de Menezes (2016).

Ainda de acordo com Menezes (2016), o circuito de energia de acionamento do freio fornece a capacidade de frenagem ao sistema, por meio de um compressor. O controle da força que aciona o freio acontece através do monitoramento da pressão da linha pneumática, uma vez que a manete de freio é acionada por um cilindro pneumático modelo DGS-25-80, marca *Festo Pneumatic*. O acionamento

do cilindro é realizado por meio de uma válvula de 5 vias, 2 posições, acionamento por duplo solenoide, marca WLA, modelo 4V320-08. Para medir a pressão pneumática, foi empregado um regulador de pressão da marca EMC, modelo AR 2000.

3.2.3 Instrumentação

A velocidade de rotação do eixo movido foi monitorada por meio de um Tacômetro da marca Assize, modelo AS-820. Já para a temperatura, foi utilizado um pirômetro digital com sistema infravermelho de captura, versão 380-EN-01, da marca *Infrared Thermometer*. Segundo Preston e Forthofer (1971), o gradiente de temperatura no disco é menor do que no material da pastilha. Dessa forma, a temperatura do disco é mais próxima da temperatura da interface de atrito. Portanto, o sensor de temperatura foi posicionado para monitorar a temperatura do disco de freio logo após o contato com as pastilhas. Na Figura 3.2 é possível perceber o posicionamento do pirômetro no banco de ensaios, bem como a célula de carga de 40 kgf na extremidade da alavanca suporte da pinça de freio.

O sistema de aquisição de dados utilizado nos experimentos é composto pelo pirômetro, pela célula de carga, pelo amplificador de sinal e pela placa de aquisição. O diagrama do sistema de aquisição de dados está ilustrado na Figura 3.5.



Figura 3.5 - Diagrama do sistema de aquisição de dados.

Fonte: Adaptado de Menezes (2016).

Para realizar a interface dos instrumentos com o computador, utilizou-se a placa de aquisição de dados NI 9215, que contém 4 canais de entrada analógica,

resolução de 16 bits, entrada $\pm 10,0$ V. O software *LabView* 2010 foi instalado para conectar a placa ao computador.

Dessa forma, a configuração atual da bancada de ensaios buscou reproduzir os mesmos efeitos produzidos em uma motocicleta comercial de baixa cilindrada. O sistema de freio utilizado atualmente corresponde ao de uma motocicleta com as seguintes características: motor de 4 tempos, refrigerado a ar, 125 cm³ de cilindradas, potência de 11,8 cv a 6800 rpm, torque de 0,816 Kgf.m a 6000 rpm. O câliper é do tipo móvel com um pistão de acionamento hidráulico e pastilhas de 39 mm de comprimento e 31 mm de largura. Os resultados obtidos podem ser correlacionados e validados para veículos de maior porte que também utilizam sistema de freio a disco, pois o princípio de funcionamento de um sistema de freios a disco de motocicletas é similar, mudando apenas a rigidez e a maior potência de frenagem envolvida. Como o interesse é o estudo da interface do par de atrito, envolvendo a influência de parâmetros operacionais no desempenho do atrito e nos mecanismos de desgaste, o banco de ensaios mostra-se válido para a condução dos experimentos.

3.2.4 Cálculo da força normal, força de frenagem e coeficiente de atrito

A obtenção da força normal sobre a pastilha de freio, força de frenagem e coeficiente de atrito podem ser obtidos por meio das informações geométricas construtivas do banco de ensaios e das variáveis coletadas pelos instrumentos de medição que equipam o banco de ensaios.

a) Força normal sobre a pastilha de freio - sendo o raio pistão do atuador pneumático, $r_{at}=0,0125$ m, o raio do pistão da pinça de freio, $r_{pp}=0,016$ m e o raio do cilindro mestre, $r_{cm}=0,006$ m, o braço de força da manete, $b_f=0,163$ m e o braço de resistência da manete, $b_r=0,02$ m, a força normal foi calculada aplicando-se a equação 3.1.

$$N = \mu \frac{b_f r_{at}^2 r_{pp}^2}{b_r r_{cm}^2} * P_p = (290 * P_p) \quad (3.1)$$

Onde:

N : força normal, [N];

b_f : braço de força da manete, [m];

b_r : braço de resistência da manete, [m];

r_{at} : raio do pistão do atuador pneumático, [m];

r_{pp} : raio do pistão da pinça, [m];

r_{cm} : raio do cilindro mestre, [m];

P_P : pressão pneumática, [Pa].

b) Força de frenagem - a força de frenagem foi obtida pelo princípio da alavanca, sendo o raio de atuação do freio, $r_f=0,095m$, o comprimento da alavanca, $r_a=0,5m$, a força de frenagem foi calculada aplicando-se a equação 3.2.

$$F_F = \frac{r_a}{r_f} F_{CC} = 5,26F_{CC} \quad (3.2)$$

Onde:

F_f : força de frenagem, [N];

F_{cc} : força medida na célula de carga, [N];

r_f : raio de atuação do freio, [m];

r_a : comprimento da alavanca, [m].

c) Coeficiente de atrito - a força de frenagem é obtida pela soma das forças de atrito que agem uma em cada face do disco. Portanto, para calcular a força de atrito na interface pastilhas/disco, a força de frenagem foi dividida por dois. Para calcular o coeficiente de atrito, a força de atrito foi dividida pela força normal, conforme a equação 3.3.

$$\mu = \frac{F_a}{N} = \frac{F_f}{2N} = \frac{5,26F_{cc}}{2N} = \frac{5,26F_{cc}}{580P_p} = 0,00907 \frac{F_{cc}}{P_p} \quad (3.3)$$

Onde,

F_{cc} : força medida na célula de carga, [N];

F_a : força de atrito, [N];

P_P : pressão pneumática, [Pa];

F_f : força de frenagem, [N];

μ : coeficiente de atrito na interface pastilha/disco.

N : força normal, [N];

3.3 Descrição dos ensaios realizados em veículo

Os ensaios de frenagem em veículo foram conduzidos em um campo de prova pertencente a uma grande montadora presente no mercado brasileiro do setor automotivo. Por motivos estratégicos e de segredo industrial, seu nome será mantido em sigilo. O veículo utilizado neste ensaio é equipado com freios a disco no eixo dianteiro e freio a tambor no traseiro. Os instrumentos instalados, de forma a possibilitar a obtenção da temperatura e do coeficiente de atrito na interface pastilha/disco, serão descritos no próximo tópico.

3.3.1 Instrumentos utilizados nos ensaios em veículo

Para monitorar a pressão hidráulica do freio foi empregado um sensor extensométrico de ponte completa da marca HBM, modelo P8AP. Esses sensores realizam a medição da pressão absoluta, e sua faixa de medição é 0 a 200 bar. Para monitorar a temperatura, foram utilizados termopares do tipo K (Cr-Al), com 3mm de diâmetro com ponta seca, pois evita quebras e facilita a montagem diretamente no veículo, e isolado com fibra de vidro (oferece maior maleabilidade). Esse tipo de termopar foi escolhido devido à sua grande faixa de trabalho, oferecendo uma maior margem de segurança. Todos os termopares foram inspecionados e testados. Para monitorar a desaceleração do veículo, foi instalado um acelerômetro *Silicon Designs Inc – Advanced Accelerometers*, Modelo SDI 2220-002.

O sistema de aquisição de dados utilizado nos experimentos é composto pelo termopar, pelo sensor de pressão, pelo acelerômetro e pela placa de aquisição. O diagrama do sistema de aquisição de dados está ilustrado na Figura 3.6.

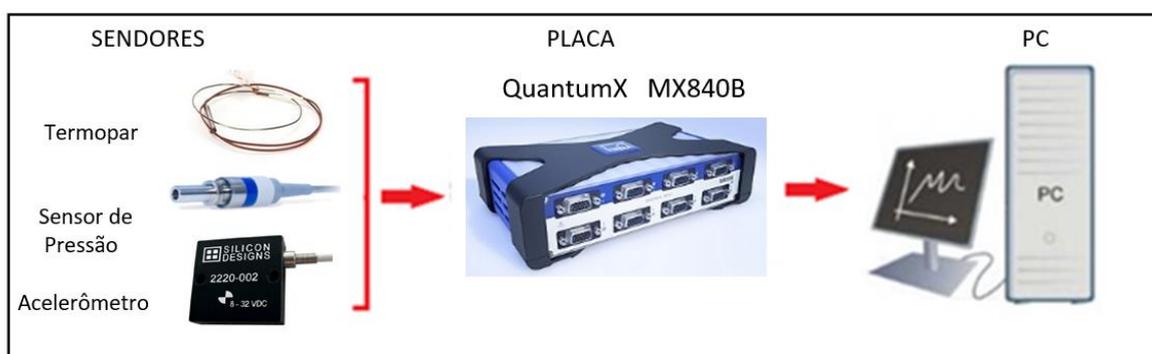


Figura 3.6 - Diagrama do sistema de aquisição de dados para experimentos em veículo.

As leituras dos sinais emitidos pelos instrumentos de medição empregados foram feitas utilizando-se um sistema de aquisição de dados da marca Quantum X Modelo MX840B. Essa placa, classificada como um amplificador universal, possui 8 canais, e sua comunicação a um computador ocorre via conexão *FastEthernet* (RJ-45).

Foram utilizados os softwares *Quantum X Assitant* e *Catman Easy* para possibilitar a aquisição e leitura dos dados em um computador. Enquanto o primeiro possibilitou a comunicação do DAQ da IBM, contemplando hardware e software para aquisição e armazenamento dos dados, o segundo foi empregado para leitura e interpretação dos sinais coletados.

3.4 Procedimentos de Ensaios de Frenagem

A fim de analisar o desempenho dos materiais de atrito durante o processo de frenagem, optou-se pela realização de procedimentos experimentais em um banco de ensaios, que simula as condições reais de frenagem, e também em um veículo, onde é possível analisar as condições reais de aplicação de um sistema de freios. Para o banco de ensaios, foi empregado o procedimento de Krauss, regido pela norma ABNT NBR-6143/1995 – Pastilhas de Freio a Disco – Determinação do atrito e desgaste por meio da Bancada de Ensaios Krauss. Já para os experimentos realizados em veículo, submetidos a todas condições reais de aplicação, também foram avaliadas duas situações distintas: uma relacionada com uma condição severa de frenagem em superfície plana levando o veículo até a parada, denominada frenagem de emergência, e outra relativa a uma descida de serra simulada em superfície plana, denominada frenagem moderada de longa duração. Os próximos subtópicos detalharão cada um destes procedimentos.

3.4.1 Procedimento de Krauss – Banco de Ensaios

Para a realização desses ensaios, utilizou-se como referência a norma ABNT NBR-6143/1995. Segundo essa norma, deve-se usar um disco de freio para cada qualidade de pastilha. O parâmetro de rugosidade Rz da flange do disco, sob contato com as pastilhas durante a frenagem, deve ser de no máximo 15 µm. Por isso, é necessário medir a rugosidade do disco. Foi empregado um

rugosímetro marca *Taylor Hobson Precision*, modelo *Surtronic 25*, para inspecionar a rugosidade do disco.

De acordo com a norma utilizada, o ensaio de frenagem deve ser realizado da seguinte forma:

- a) Cada frenagem deve ter duração de 5 segundos;
- b) O intervalo de tempo entre frenagens, ou seja, com o freio desaplicado, dever ser de 10 segundos;
- c) O experimento deve ser formado por 10 ciclos de frenagens, em que cada ciclo é constituído por 10 frenagens.

Ainda de acordo com a ABNT NBR-6143/1995, após ter instalado o par de pastilhas em seu alojamento na pinça de freio, inicia-se o ensaio com a fase de assentamento das pastilhas. A norma descreve que os três primeiros ciclos de frenagem são destinados ao assentamento das pastilhas de freio. De acordo com Zangiacomi (2002), a fase de assentamento das pastilhas é destinada para confirmar o posicionamento adequado das pastilhas e os seus respectivos funcionamentos. O ensaio é iniciado com o disco à temperatura ambiente ou à existente no mesmo, desde que inferior a 50°C, e, entre cada ciclo individual, o disco deve ser resfriado livremente para temperaturas abaixo de 100°C. Os sete ciclos de frenagem subsequentes aos de assentamento serão os utilizados para análise, caracterizando as sete réplicas experimentais.

3.4.2 Planejamento Experimental – Ensaio em Bancada

Para a primeira etapa experimental, o banco de ensaios foi impulsionado por um motor de 3cv de potência. Foi empregado um planejamento fatorial completo 2^3 , onde as três variáveis consideradas foram manipuladas em dois níveis cada. Para as variáveis tipo de disco e tipo de pastilha, definiu-se como nível baixo discos e pastilhas que já haviam sido submetidos a cinco ensaios completos de frenagens, denominados “assentados”. Já materiais novos configuram o nível alto desses dois fatores. Buscou-se, com o estudo desses dois fatores, analisar se há diferenças de desempenho nas propriedades térmicas e tribológicas do sistema de freio quanto ao nível de assentamento e desgaste do par tribológico (materiais em estado meia-vida possuem assentamento superior entre as superfícies de contato que promovem a frenagem). Todos os discos de freio

utilizados eram de ferro fundido cinzento e as pastilhas do tipo orgânica sem amianto. Já para o fator pressão de acionamento da manete de freio foi definido o nível alto 50% superior em relação ao nível baixo. O objetivo dessa variação dos níveis do fator pressão é analisar se o esforço feito pelo condutor para acionar o sistema de freio influencia nas propriedades térmicas e tribológicas do sistema de freio.

A Tabela 3.1 ilustra os níveis dos fatores para os experimentos realizados em bancada realizados com potência motora de 3cv. O software *Minitab* 18 foi utilizado para gerar o planejamento experimental e para obtenção dos resultados provenientes das técnicas estatísticas aplicadas a partir dos dados coletados.

Tabela 3.1: Níveis dos fatores Controláveis - ensaios em bancada com potência de 3cv.

Fatores Controláveis	Nível baixo	Nível alto
X1: Tipo de Disco	Assentado	Novo
X2: Tipo de Pastilha	Assentada	Nova
X3: Valor da Pressão	0,10 MPa	0,15 MPa

Foram analisadas três variáveis de saída: temperatura final em cada frenagem, coeficiente de atrito e desgaste do par de pastilhas de freio utilizadas, obtido pela subtração entre as médias de cinco medições das espessuras das pastilhas antes e após o ensaio. Utilizou-se um micrômetro com resolução de 0,01mm para se realizar tais medições. A temperatura final deve ser minimizada, pois o sistema de freio fica menos sujeito a perdas de eficiência devido a efeitos térmicos, como, por exemplo, o *fade*. O desgaste também é uma variável resposta de minimização, gerando menores custos com trocas e aquisições. Já o coeficiente de atrito é uma variável de maximização, pois quanto maior o seu valor melhor, por proporcionar uma maior efetividade do sistema de freio.

Já na segunda etapa experimental, realizada com potência motora de 10cv, os ensaios em bancada foram conduzidos para analisar a influência das variáveis pressão de contato e velocidade de escorregamento no comportamento das mesmas variáveis de desempenho utilizadas na primeira etapa experimental. Dessa forma, foi realizado um planejamento de Experimentos Fatoriais 2^2 , onde

as variáveis pressão de contato e velocidade de escorregamento foram alteradas em dois níveis cada. Para a variável relacionada com a energia fornecida ao acionamento do freio, foram escolhidos os valores de pressão pneumática de 0,25 e 1 bar, o que equivale a um pressão de contato de 0,67 e 2,67 MPa, respectivamente. Já para velocidade, definiu-se as velocidades de rotação do eixo que contém o disco de freio seriam de 500 e 800 rpm, o que equivale a uma velocidade linear do veículo de 60 e 95 km/h. Tais valores foram escolhidos por representarem um intervalo típico de velocidade para veículos em tráfego urbano. A Tabela 3.2 representa os níveis dos fatores empregados.

Tabela 3.2: Níveis dos fatores Controláveis - ensaios em bancada com potência de 10cv.

Fatores Controláveis	Nível baixo	Nível alto
X1: Velocidade Inicial da Frenagem [km/h]	60	95
X2: Pressão de Contato [Mpa]	0,67	2,67

3.4.3 Procedimento para os experimentos executados em veículo

Os ensaios em veículo foram realizados em uma pista de prova plana, e segmentados em dois tipos: experimentos com o objetivo de analisar o comportamento do sistema de freio similar ao experimentado em uma descida de serra, onde o freio é submetido a uma frenagem moderada de longa duração, e frenagens de emergência, cuja aplicação do freio é realizada de forma abrupta. Para os ensaios em veículo, os procedimentos empregados foram:

a) Experimento 1 - Descida de serra - foram realizados três ciclos, sendo o primeiro constituído por 60 frenagens de 60 a 40 km/h, o segundo por 60 frenagens de 70 a 40 km/h e o último também por 60 frenagens de 80 a 40 km/h. Em cada ciclo o tempo entre uma frenagem e outra foi de, aproximadamente 20 segundos. Antes de se iniciar o ensaio, foram feitas cinquenta aplicações de frenagens para o correto assentamento entre a pastilha e o disco. Entre um ciclo e outro foram realizadas doze aplicações de frenagens de recuperação.

b) Experimento 2 - condição severa de frenagem em uma superfície plana – frenagem de emergência - Consistiu em três ciclos com dez frenagens

sucessivas, com velocidade inicial de 80 km/h até a parada do veículo, com a máxima desaceleração e máxima de retomada do veículo: nesse teste o freio esquenta muito rapidamente e não há muito tempo de resfriamento do sistema.

Resumidamente, o procedimento para os testes realizados no veículo foi conduzido da seguinte forma:

- 1 - Assentamentos das pastilhas de freio realizando 50 frenagens, com veículo carregado;
 - 2 – Realização dos três ciclos de descida de serra com freio completo e veículo carregado;
 - 3 - Substituição das pastilhas de freio do veículo;
 - 4 – Realização do assentamento do novo jogo de pastilhas;
 - 5 – Realização do teste 80 a 0 km/h (frenagens de emergência) dez vezes;
 - 6 – Repetição do passo 5 mais 2 vezes após o sistema de freio esfriar a 100°C.
- A Figura 3.7 ilustra o esquema representativo dos experimentos realizados em veículo.

3.4.4 Planejamento Experimental – Ensaios em veículo

Conforme mencionado anteriormente, os ensaios realizados em veículo foram conduzidos a fim de possibilitar a análise das características dos platôs formados na superfície do material de atrito empregado e sua correlação com o desempenho durante a frenagem. Nesse estudo, foram empregadas as técnicas estatísticas análise de correlação, teste t e análise de variância (ANOVA) de um fator, tipo de operação de frenagem, alterada em dois níveis: descida de serra e frenagem de emergência. As variáveis resposta analisadas foram divididas em três grupos: medidas de desempenho da frenagem, características dos platôs e parâmetros de rugosidade da superfície da amostra. A Tabela 3.3 apresenta as variáveis de cada grupo.

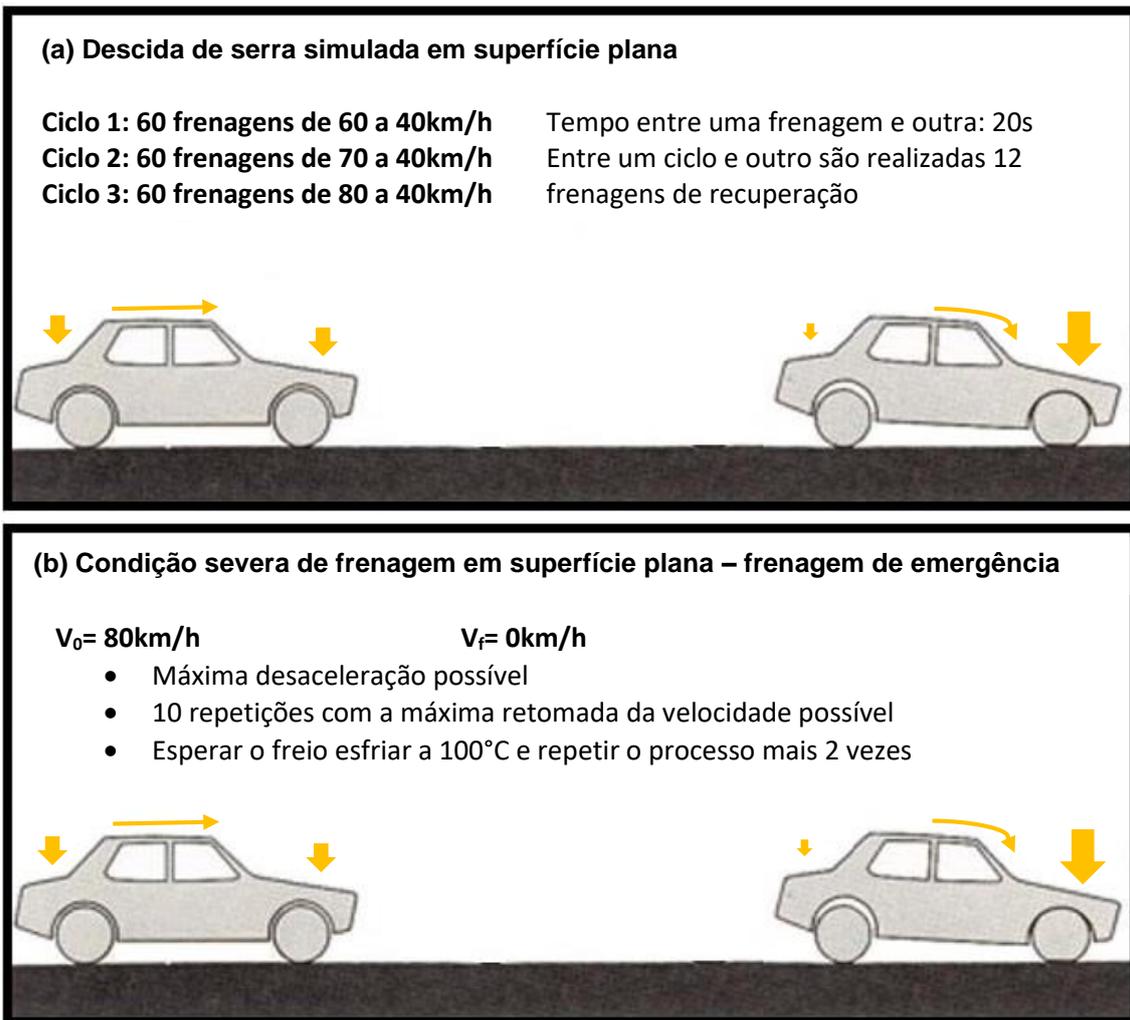


Figura 3.7: Representação dos ensaios em veículo: (a) descida de serra simulada e (b) condição severa de frenagem em superfície plana – frenagem de emergência.

Tabela 3.3: Variáveis utilizadas para análise dos experimentos em veículo.

Grupo de variáveis	Variáveis relacionada	Unidade
Medida de desempenho da Frenagem	Coefficiente de atrito	-
	Temperatura	$^\circ\text{C}$
Medidas das características dos platôs	Área relativa dos platôs	%
	Número médio de platôs	Quantidade de platôs
	Comprimento médio dos platôs	μm
	Diâmetro equivalente médio dos platôs	μm
	Perímetro médio	μm
	Fator de forma ou esfericidade	-
Parâmetros de rugosidade superficial das amostras	Ra	μm
	Rz	μm
	Rt	μm

As variáveis utilizadas para análise do desempenho da frenagem em veículo foram o coeficiente de atrito na interface pastilha/disco e a temperatura. Já o grupo de variáveis relacionados com as medidas das características dos platôs são a área relativa ocupada pelos platôs, número médio, comprimento médio, diâmetro equivalente médio, perímetro médio dos platôs nas amostras selecionadas, além do fator de forma ou esfericidade. A seção 3.5 apresentará a seleção das técnicas de análise para esta finalidade. De acordo com Pinto (1996), o fator de forma é determinado na fase de processamento das áreas A_i e perímetros P_i dos elementos utilizando-se a relação representada pela equação 3.4.

$$F_i = 4. \pi. \frac{A_i}{P_i} \quad (3.4)$$

Onde:

A_i = área dos elementos medidos

P_i = perímetro dos elementos medidos

Os valores de fator forma próximos a 1 indicam que a forma do elemento se assemelha a um círculo.

Já no grupo de variáveis relacionado aos aspectos de rugosidade superficial, os parâmetros selecionados foram: R_a , R_z e R_t . R_a é a média aritmética dos desvios do perfil da superfície, definido sobre um comprimento l de amostragem. R_z é a média de 5 amplitudes retiradas nos comprimentos de avaliação. Já o R_t é a altura máxima da rugosidade, isto é, a amplitude máxima entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação. A Figura 3.8 ilustra uma das amostras com suas respectivas dimensões e o rugosímetro utilizado para este procedimento. Foram feitas três medições, igualmente espaçadas, dos parâmetros de rugosidade em cada amostra. O rugosímetro utilizado foi o mesmo utilizado para a inspeção do disco de freio no banco de ensaios.



Figura 3.8: exemplo de amostra retirada de uma pastilha de freio e rugosímetro Taylor Hobson Precision, modelo Surtronic 25.

Foram analisados, por meio de perfilometria, os parâmetros de superfície 3D utilizando-se um perfilômetro T8000 da *HOMMELWERKE*, do Laboratório de Recobrimentos Tribológicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG. Foi utilizado o apalpador móvel *HOMMELWERKE TKU 300/600*. As dimensões da área varrida foram: comprimento de 2,98mm no eixo X, com 2981 pontos e espaçamento de 1,00 μ m; 3,00 mm no eixo Y com 26 linhas para a amostra nova com espaçamento de 0,120mm entre elas, e 30 linhas com espaçamento de 0,103mm entre elas para as amostras submetidas aos ensaios de descida de serra e de frenagem de emergência. Os parâmetros do perfil de rugosidade e as imagens foram geradas por meio do software *Turbo Wave* e *Hommelmap Expert 6.2*. Foram analisadas uma amostra nova, uma submetida ao ensaio de descida de serra e uma referente ao ensaio de frenagem de emergência.

3.5 Seleção das técnicas de análise Laboratorial do Material de atrito

A Tabela 3.4 relata alguns estudos das técnicas laboratoriais empregadas e os objetivos em se empregar tais técnicas. Esses estudos servirão de referência para selecionar as técnicas de análise a serem utilizadas nessa pesquisa.

Conforme observado por meio da análise da Tabela 3.4, a grande maioria dos trabalhos relativos à análise microestrutural dos materiais de atrito utilizam o MEV como técnica de análise das superfícies submetidas ao atrito durante a frenagem. Dessa forma, nessa pesquisa, optou-se por utilizar as técnicas de análise microscópica utilizando o MEV e também a análise EDS.

Tabela 3.4: Técnicas de análise laboratorial aplicadas em materiais de atrito.

Técnica Empregada para Análise	Metodologia e objetivos	Autores que empregaram esta técnica
Microscópio eletrônico de varredura (MEV)	Preparação das amostras para visualizar as estruturas em uma escala mesoscópica. Utiliza um feixe focalizado de elétrons para produzir imagens da amostra na câmara	Eriksson e Jacobson (2000) Massi, Berthier e Baillet (2008) Osterle e Urban (2006) Verma <i>et al.</i> (2015) Verma <i>et al.</i> (2016) Deng <i>et al.</i> (2010) Han <i>et al.</i> (2011) Bao <i>et al.</i> (2012) Kukutschová <i>et al.</i> (2010) Massi, Berthier e Baillet (2008) Barros <i>et al.</i> (2016) Ostermeyer e Muller (2008) Eriksson, Bergman e Jacobson, (2000); Eriksson, Bergman e Jacobson (2002) Filip, Weiss e Rafaja (2002) Osterle, Urban (2004) Kemmer (2002) Jacobson (2006)
Espectroscopia por dispersão de energia (EDS)	Técnica analítica usada para análise elementar ou caracterização química de uma amostra	Eriksson e Jacobson (2000) Osterle e Urban (2006) Verma <i>et al.</i> (2015) Verma <i>et al.</i> (2016)
Perfilômetro tridimensional	Instrumento para obtenção do perfil topográfico da superfície das pastilhas	Eriksson e Jacobson (2000)
Espectroscopia Raman	Técnica fotônica de alta resolução que pode proporcionar informação química e estrutural de qualquer material, composto orgânico ou inorgânico, permitindo sua identificação.	Verma <i>et al.</i> (2016) Osterle e Urban (2006)
FIB - feixe de íons focalizado	O funcionamento do FIB assemelha-se ao de um <u>microscópio eletrônico de varredura</u> (MEV). No entanto, enquanto um MEV utiliza um feixe de elétrons, uma configuração FIB usa um feixe de <u>íons</u> focalizado. Foi utilizado para revelar filmes de superfície induzidos e para a preparação transversal de camadas superficiais	Osterle e Urban (2006)
Análise termogravimétrica (TGA)	Técnica destrutiva no ramo de análises <u>térmicas</u> , na qual se monitora a variação da massa de uma amostra em função da temperatura ou do tempo em um ambiente de temperatura e atmosfera controladas.	Verma <i>et al.</i> (2016)
Métodos Analíticos de Superfície (GDOS, XPS e RS)	<u>Métodos analíticos de superfície para obter informações químicas de filmes finos formados sobre o disco de freio</u>	Osterle e Urban (2006)
Microscopia de varredura de íons (SIM).	<i>Scanning Ion Microscopy</i>	Osterle e Urban (2006)
Difratometria de raios X (DRX)	Para identificar as fases cristalinas presentes nos resíduos de desgaste	Verma <i>et al.</i> (2015)
Espectroscopia de fluorescência de raios-x (XRF)	Obtenção da composição elementar da pastilha de freio	Verma <i>et al.</i> (2015)

Para realizar as análise microscópicas das pastilhas estudadas, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca TESCAN, modelo VEGA 3,

com espectrômetro de energia dispersiva (EDS) acoplado, da marca Bruker, modelo XFlash. De forma a melhorar a condutividade na superfície, as amostras tiveram que passar por um processo de metalização, cujo recobrimento foi feito durante 40 segundos utilizando-se uma corrente de 20 mA com alvo de ouro. Para tanto, foi utilizada uma metalizadora da marca CRESSINGTON modelo CRESSINGTON 108.

Após a obtenção das imagens, buscou-se analisar características superficiais presentes nas mesmas. Essas características, conforme descritas na revisão bibliográfica, passam pela presença dos platôs de contato, vistos em escala mesoscópica. Dessa forma, optou-se por analisar os platôs de contato em termos da área relativa que ocupam nas amostras; o número, comprimento, diâmetro equivalente médio e perímetro médio dos platôs nas amostras e o fator de forma ou esfericidade. Essas características foram obtidas utilizando-se o software analisador microestrutural *Quantikov* versão 16.01. Para cada tipo de ensaio em veículo foram analisadas três imagens, utilizando-se uma aproximação de 25 e de 500 vezes. A Figura 3.9 ilustra uma das imagens que foram analisadas aplicando-se o software *Quantikov* e um exemplo de saída fornecido por este software. Em cada amostra foi analisada uma área de 10,5mm².

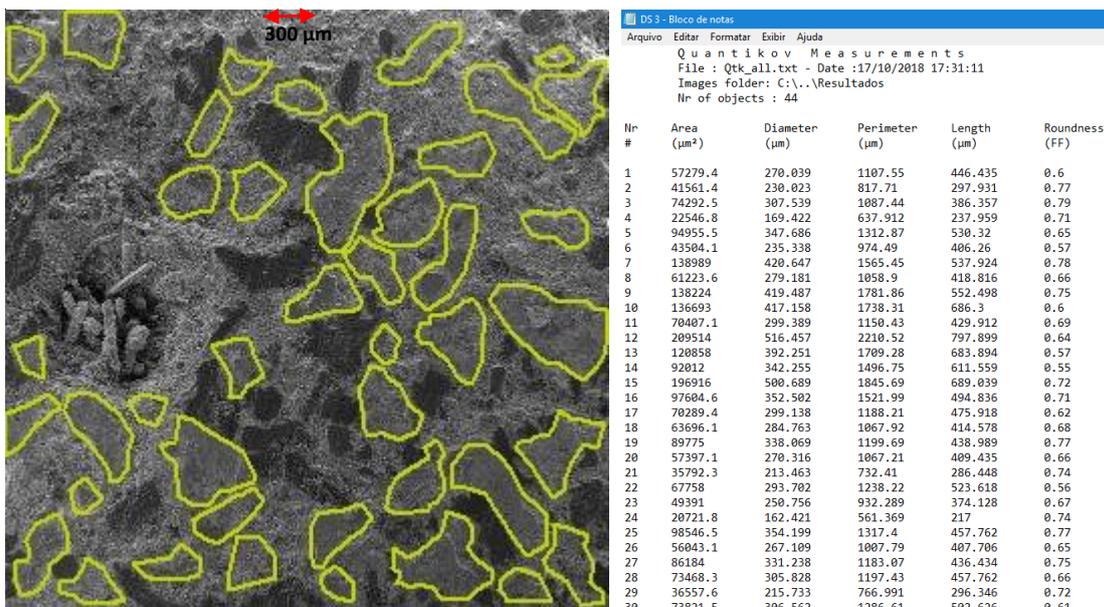


Figura 3.9: Identificação dos platôs de contato por meio do software *Quantikov* e a saída com os parâmetros geométricos gerados.

3.6 Métodos e Procedimentos de análise de dados utilizados

Após a realização dos experimentos, foi feito o teste estatístico dos dados analisados. As estatísticas de teste propostas na pesquisa são os testes T (t -test) e F (F -test) para a ANOVA (MONTGOMERY, 2017). Para analisar o relacionamento entre as as variáveis analisadas, foi proposta a análise de correlação. Já as técnicas utilizadas para previsão do comportamento das variáveis resposta foram modelos de regressão múltipla (MRM) e modelo de redes neurais artificiais (RNA).

3.6.1 Análise de Variância (ANOVA)

Com o objetivo de avaliar a significância dos efeitos de cada uma das variáveis analisadas nesse estudo, foi empregada a técnica análise de variância, também conhecida como ANOVA (*Analisis of Variance*). De acordo com Montgomery (2019), a ANOVA é uma abordagem utilizada para se comparar vários grupos de interesse, empregado para avaliar a importância de um ou mais fatores, comparando as médias de variáveis de resposta nos diferentes níveis desses fatores. Walpole *et. al.* (2009) salientam que a ANOVA é um conjunto de modelos estatísticos utilizados para analisar as diferenças entre as médias de dados agrupados (fatores) e suas interações. A hipótese de interesse na análise de variância é se as médias são iguais, ou seja:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k \quad (3.5)$$

Com a hipótese alternativa dada por:

$$H_a : \mu_i \neq \mu_j \text{ para algum } i \neq j \quad (3.6)$$

Para testar a evidência de que o efeito de cada fator é significativo (rejeição da hipótese nula), utiliza-se a distribuição F com V_1 e V_2 graus de liberdade e o mesmo nível de significância de 95% ($\alpha=0,05$). Considerando-se F_0 como o valor calculado do teste F e F_{α, V_1, V_2} o valor limite da região crítica com o nível de significância α adotado, o critério para rejeição da hipótese nula é $F_0 > F_{\alpha, V_1, V_2}$. Dessa forma, pode-se aceitar a hipótese de que o efeito do fator é significativo se o valor encontrado for maior que o limite da região crítica. Uma outra forma de tomar esta decisão é mediante utilização do p -valor. Os fatores ou interações

são considerados significativos quando apresentarem *p-valor* menor que o nível de significância α adotado.

Os cálculos para a obtenção da ANOVA são, geralmente, mostrados em uma tabela de análise de variância, tal como ilustrado na Tabela 3.5, que representa um experimento com um fator, que foi utilizado no presente estudo.

Tabela 3.5: Tabela ANOVA para 1 fator

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média Quadrática	F_0
Entre tratamentos	$SQ_{tratamentos}$	$a-1$	MQ_t	$F_0 = MQ_t / MQ_E$
Erro (dentro dos tratamentos)	SQ_E	$N_t - a$	MQ_E	
Total	SQ_t	$N_t - 1$		

Fonte: Adaptado de MONTGOMERY (2019).

Onde:

$SQ_{tratamentos}$ – soma dos quadrados do tratamentos

SQ_E – soma dos quadrados dos erros

SQ_t – soma dos quadrados totais

a – número de tratamentos ou níveis

n – número de observações em cada tratamento

$N_t = n * a$ – número total de observações

De acordo com Montgomery (2019), o valor F_0 foi calculado dividindo-se a média quadrática ajustada (MQ_i) de cada fator i ou tratamento pela Média Quadrática do Erro (MQ_E) dos respectivos fatores ou tratamentos, conforme ilustrado pela Equação 3.7. Já as equações 3.8 a 3.10 representam os cálculos para a obtenção das somas dos quadrados para a ANOVA com 1 fator.

$$F_0 = MQ_i / MQ_E \quad (3.7)$$

$$SQ_{tratamentos} = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_i - \bar{y}_{..})^2 \quad (3.8)$$

$$SQ_{erros} = SQ_t - SQ_{tratamentos} \quad (3.9)$$

$$SQ_t = n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 \quad (3.10)$$

Onde:

\bar{y}_i = média das observações do *i-ésimo* tratamento

\bar{y} = média global de todas as observações

y_{ij} = *j-ésima* observação do *i-ésimo* tratamento

De acordo com Walpole *et al* (2009), para se empregar a ANOVA, é necessário atender a alguns pressupostos estatísticos. A variável resposta deve ser do tipo contínua e pelo menos um fator categórico deve ser analisado, com dois ou mais níveis. As análises ANOVA exigem dados de populações normalmente distribuídas com variâncias iguais entre fatores.

3.6.2 Análise de Correlação

Na análise do relacionamento entre duas variáveis, a definição de correlação é de suma importância para o entendimento da variabilidade comum entre as variáveis. A análise de correlação avalia o grau de relacionamento linear entre duas variáveis. De acordo com Triola (1999), ao se considerar duas variáveis, o coeficiente de correlação linear amostral r mede o grau de relacionamento linear entre os dados emparelhados de x e y em uma amostra. Já Larson e Farber (2010) mencionam que o coeficiente de correlação mede o tipo e a força de uma correlação amostral entre duas variáveis, e o seu valor pode ser calculado pela equação 3.11

$$r = \frac{n \cdot \sum(x \cdot y) - (\sum x) \cdot (\sum y)}{\sqrt{n \cdot (\sum x^2) - (\sum x)^2} \cdot \sqrt{n \cdot (\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad (3.11)$$

Segundo Montgomery (2019) o coeficiente de correlação linear amostral r apresenta valores entre -1 e +1, sendo que valores próximos de -1 e +1 demonstram maior correlação e valores próximos de zero caracterizam-se pela ausência de correlação entre as duas variáveis x e y analisadas. A Tabela 3.6 demonstra uma forma de interpretação de uma correlação dado o seu valor numérico. Valores positivos de correlação indicam uma correlação direta; já os negativos, uma correlação inversa.

Tabela 3.6: Interpretação dos valores de coeficiente de correlação.

Valor de r (+ ou -)	Interpretação
0,00 a 0,19	Correlação bem fraca
0,20 a 0,39	Correlação fraca
0,40 a 0,69	Correlação moderada
0,70 a 0,89	Correlação forte
0,90 a 1,00	Correlação muito forte

Fonte: adaptado de Larson e Farber (2010).

Conforme Larson e Farber (2010), pode-se utilizar um teste de hipóteses para determinar se o coeficiente de correlação amostral r fornece evidência suficiente para concluir que o coeficiente de correlação ρ de uma população é significativo. A tomada de decisão envolve testar a hipótese $H_0: \rho=0$ (não há correlação) contra $H_1: \rho \neq 0$ (correlação significativa); sendo ρ o coeficiente de correlação da população. Rejeita-se H_0 caso o valor absoluto de t for maior que o valor crítico da tabela t *student*. Ao rejeitar H_0 , conclui-se que existe correlação linear significativa. Em caso contrário, não há evidências suficientes para apoiar a existência de correlação significativa. A Equação 3.12 apresenta a estatística do teste padronizada para verificação da significância da correlação ρ de uma população.

$$t = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}} \quad (3.12)$$

Onde n é o tamanho da amostra.

Uma outra forma de verificação da significância da correlação ρ de uma população é por meio da análise do p-valor, que foi utilizado nessa pesquisa. O p-valor é a probabilidade de que a estatística do teste tenha valor extremo em relação ao valor observado (estatística do teste) quando a hipótese nula H_0 é verdadeira (MONTGOMERY, 2019). Caso o p-valor seja menor que o nível de significância α considerado, então o valor calculado para a estatística do teste está na região crítica e, portanto, rejeita-se a hipótese nula H_0 . Quanto menor for o p-valor, menos provável seja a hipótese de aceitar H_0 e menor é a probabilidade de se cometer um erro do tipo I (rejeitar H_0 , dado que H_0 é verdadeira).

3.6.3 Modelo de Regressão Múltipla (MRM)

De acordo com Montgomery (2017), o MRM é o modelo de regressão que possui mais de uma variável independente ou regresso, x . A variável dependente ou de resposta, Y , relaciona-se a K variáveis de entrada ou regressores. Matematicamente, tem-se:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_j x_k + \beta_1 x_1 x_2 + \dots + \beta_j x_k x_{k+1} + \varepsilon \quad (3.14)$$

Onde β_0 representa a interseção da superfície de resposta ou plano, os x_k são as k variáveis regressoras, os β_j são os j coeficientes de regressão e ε é o termo de erro aleatório. O termo de produto cruzado $\beta_j x_k x_{k+1}$ do modelo é a inserção do efeito de interação das variáveis independentes combinadas duas a duas.

O método de mínimos quadrados foi utilizado nesse estudo para estimar os j coeficientes dos MRM. Supondo-se que existem $n > k$ amostras e seja x_{ij} a i -ésima observação ou nível da variável x_j , a função dos mínimos quadrados é assim estabelecida por Montgomery (2017):

$$L = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij})^2, \quad i = 1, 2, \dots, n \text{ e } n > k \quad (3.15)$$

Onde L é o maior valor a ser minimizado em relação a $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{0k}$, nas $p=k+1$ equações normais de cada um dos coeficientes de regressão desconhecidos. A solução dessas equações normais geram os estimadores dos coeficientes do MRM. Essas equações podem ser resolvidas por diversos modelos matemáticos ou softwares, optando-se neste estudo pela utilização do software estatístico *Minitab 18*

Esses coeficientes foram empregados para modelagem computacional dos MRM para cada uma das variáveis resposta analisadas nos experimentos em bancada, aplicados com finalidade de previsão e otimização, onde foram usados para o desenvolvimento dos modelos de otimização de múltiplas respostas, conforme descrito por Montgomery (2017).

3.6.4 Redes neurais artificiais

De acordo com Corrar, Paulo e Filho (2012) a técnica de RNA é útil quando há a necessidade de se reconhecerem padrões a partir do acúmulo de experiências ou de exemplos, e cuja representação é complexa. Uma rede neural é capaz de “aprender” a partir de exemplos e informação captada em seu ambiente e de guardar o conhecimento adquirido, por meio da força da conexão entre os neurônios, que representam os elementos processadores, interligados entre si. Trata-se de um modelo de processamento de dados que emula uma rede de neurônios biológicos, capaz de recuperar rapidamente uma grande quantidade de dados e reconhecer padrões baseados na experiência. São sistemas que se adaptam utilizando uma abordagem de processamento distribuído, no qual os neurônios se comunicam por meio de uma rede de elos interconectados. Vem sendo empregada, por exemplo, no reconhecimento de padrões baseados na experiência, tanto para realizar as classificações, como para fazer previsões em inúmeras aplicações, como no controle de processos de manufatura e operação (EFE, 2011).

Xavier (2003) salienta que a maioria dos modelos de RNA está vinculado a alguma regra de treinamento, de tal forma que os pesos de suas conexões são ajustados de acordo com os padrões apresentados. Assim, a rede neural é capaz de extrair regras básicas a partir de dados reais. As arquiteturas das RNA's normalmente são organizadas em camadas, que são classificadas em três grupos:

- Camada de entrada: responsável por receber os padrões;
- Camadas intermediárias: onde ocorre a grande parte do processamento, por meio das conexões ponderadas, sendo consideradas como extratoras de características;
- Camada de saída: responsável por concluir o resultado final e apresentá-lo.

3.6.4.1 Rede Neural Qwiknet V2.23

Segundo Gongalves (2014) a Rede Neural executada no Qwiknet V.2.23 é chamada de “*Multilayer Perceptron*”, que é uma rede composta de diversas

camadas. De acordo com Xavier (2003) essa rede neural foi concebida para resolver problemas mais complexos, os quais não poderiam ser resolvidos pelo modelo de neurônio básico. Um único *perceptron* (neurônio) ou uma combinação das saídas de alguns *perceptrons* poderia realizar uma operação XOR, porém, seria incapaz de aprendê-la. Para isso são necessárias mais conexões, as quais só existem em uma rede de *perceptrons* dispostos em camadas. Ainda de acordo com Xavier (2003), os neurônios internos são de suma importância na RNA, pois foi provado que a falta destes inviabiliza a resolução de problemas linearmente não separáveis. Essa rede é composta por várias unidades de processamento, em que o funcionamento é simples. Essas unidades normalmente são conectadas por canais de comunicação que estão associados a determinados pesos. As unidades fazem operações somente sobre seus dados locais, recebidas pelas suas conexões. Dessa forma, o comportamento inteligente de uma RNA vem das interações entre as unidades de processamento da rede. Para projetar, treinar e testar redes neurais é necessário descrever os seguintes parâmetros:

- *Learning rate* - a taxa de aprendizado controla a taxa na qual a rede aprende. De uma maneira geral, quanto mais alta a taxa de aprendizado, mais rápido a rede aprende. Entretanto, se a taxa de aprendizado é muito alta, a rede pode ficar instável.
- *Momentum* - esse parâmetro controla a influência da última mudança de peso na atualização de peso atual. Normalmente, resulta em uma aprendizagem mais rápida, mas pode causar instabilidade em alguns casos se for muito grande.
- *Weights* - os campos Mínimo e Máximo permitem ao usuário fixar os mais baixos e as mais altas variâncias.

Nesse estudo, no processo de criação dos neurônios artificiais foi utilizado o algoritmo denominado *On Line Backprop – Rand*, uma variação do algoritmo retropropagação. Ainda segundo Gonçalves (2014), ele é baseado nos modelos de processamento distribuído paralelo propostos por Rumelhart *et al.* (1986). Neste, a propagação de informação por meio da rede ocorre da seguinte forma: os valores de entrada são transmitidos de uma camada para

a outra e transformados por meio de pesos de conexões entre os neurônios. A Figura 3.10, proposta por Corrar *et al.* (2009), ilustra este processo.

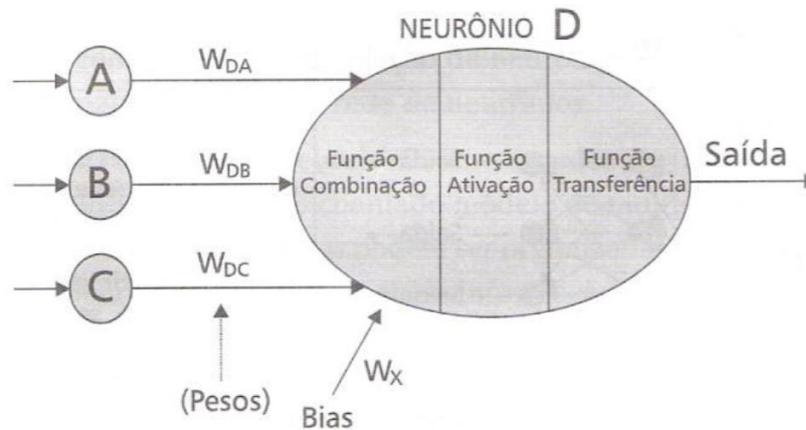


Figura 3.10: Arquitetura – algoritmo *On Line Backprop – Rand*.

Fonte: adaptador de Corrar *et al.* (2009).

O tipo de função combinação utilizada foi a soma ponderada, em que cada entrada x é multiplicada por seu respectivo peso (W) e esses produtos são somados, chegando-se a um único valor (Y), que representa o total das entradas ponderadas por seus pesos conforme a equação 3.15.

$$Y_j = \sum_j^n X_i \cdot W_{ij} \quad (3.15)$$

A função ativação utilizada foi a logística ou sigmóide, representada pela equação 3.16, que é uma função não linear.

$$Y(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (3.16)$$

Sendo x o resultado da função combinação, obtido anteriormente em Y_j . Já a função transferência foi utilizada somente como forma de transferir o valor da função ativação conforme o parâmetro limiar lógico. A Figura 3.11 representa o processo de aprendizagem.

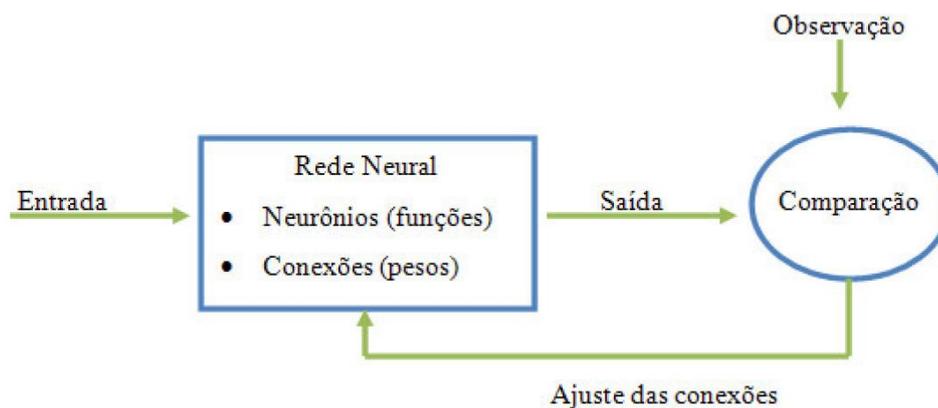


Figura 3.11: Processo de Aprendizagem da RNA.

Fonte: adaptado de Gonçalves (2014).

Segundo Xavier (2003), no software *Qwiknet* V2.23 (versão demonstração) é possível utilizar um máximo de 500 conjuntos de entradas para treinamento e somente uma camada oculta. O arquivo de treinamento, em formato texto, contém uma opção de preenchimento [INPUTS] seguida do número de entradas, e outra denominada [OUTPUTS] seguida do número de saídas, seguidas dos dados normalizados, separados por espaço ou quebra de linha.

De acordo com Corrar *et al.* (2012) dependendo do software utilizado, é necessário que os dados passem por um processo de padronização. Por causa das funções utilizadas no processamento dos dados, a rede trabalha melhor com valores que estejam entre zero e um. Para isso, nesse trabalho utilizou-se a seguinte forma de cálculo de padronização, representado pela equação 3.17.

$$y = \frac{(y_0 - y_{min})}{(y_{max} - y_{min})} \quad (3.17)$$

Onde y_0 é o valor a normalizar; y_{max} e y_{min} são valores mínimos e máximos entre os valores reais das variáveis.

3.6.5 Razões Fade (F) e Recuperação (R)

Ma *et. al.* (2018) calcularam as razões Fade (F) e Recuperação (R), utilizando-se as equações 3.18 e 3.19. Nessa metodologia o comportamento do sistema de freio é analisado entre 100°C (considerado a situação de “freio frio”) e 350°C (situação de “freio quente”),

$$F = \frac{\mu_{F\ 100^{\circ}C} - \mu_{F\ 350^{\circ}C}}{\mu_{F\ 100^{\circ}C}} \times 100\% \quad (3.18)$$

$$R = \frac{\mu_{R\ 100^{\circ}C}}{\mu_{F\ 100^{\circ}C}} \times 100\% \quad (3.19)$$

Onde:

$\mu_{F\ 100^{\circ}C}$ – coeficiente de atrito a 100°C – *fade*

$\mu_{F\ 350^{\circ}C}$ – coeficiente de atrito a 350°C – *fade*

$\mu_{R\ 100^{\circ}C}$ – coeficiente de atrito a 100°C – recuperação. Representa a recuperação do coeficiente de atrito de um ciclo de frenagem para o ciclo subsequente.

A razão *Fade* (F) caracteriza o percentual de alteração do coeficiente de atrito comparando-se seus valores às temperaturas de 100°C e 350°C. Já a razão de Recuperação (R) fornece o percentual de alteração do coeficiente de atrito, comparados à mesma temperatura de 100°C, entre ciclos subsequentes de frenagens. Essa razão verifica se o sistema de freio tem capacidade de recuperar sua capacidade de frenagem em relação a ciclos anteriores.

4 RESULTADOS

4.1 Ensaio em Bancada

Esta seção dedica-se à análise de ensaios em bancada de freios, por meio de uma abordagem envolvendo a utilização de técnicas estatísticas, de otimização e de previsão de variáveis relacionadas ao desempenho de sistemas de freio. Foi analisado, também, o efeito *fade* inerente à influência da temperatura no coeficiente de atrito.

4.1.1 Influência do tipo de disco, pastilha e pressão de acionamento do sistema de freio – potência de 3cv

Para realizar análise estatísticas dos dados por meio da ANOVA, é necessário verificar se o modelo atende aos pressupostos de normalidade e homocedasticidade. Para tanto, foram elaborados os gráficos residuais para cada variável resposta. A Figura 4.1 representa os gráficos de resíduos para a variável resposta coeficiente de atrito. Os gráficos demonstram que as pressuposições do modelo não são violadas. O gráfico de probabilidade normal mostra que os resíduos ajustam-se bem a uma reta, indicando que os mesmos seguem uma distribuição normal. Observa-se tal comportamento também analisando-se o histograma dos resíduos. O gráfico dos resíduos versus valores ajustados evidencia dispersão aleatória dos dados, o que indica uma variância constante dos resíduos, atendendo ao pressuposto de homocedasticidade. O gráfico também indica ausência de outliers. Já o gráfico dos resíduos versus ordem mostra que os resíduos parecem estar aleatoriamente distribuídos em torno de zero, o que indica independência dos dados com o tempo. O mesmo procedimento foi conduzido para analisar as variáveis resposta temperatura e desgaste, onde todos os pressupostos do modelo também foram atendidos.

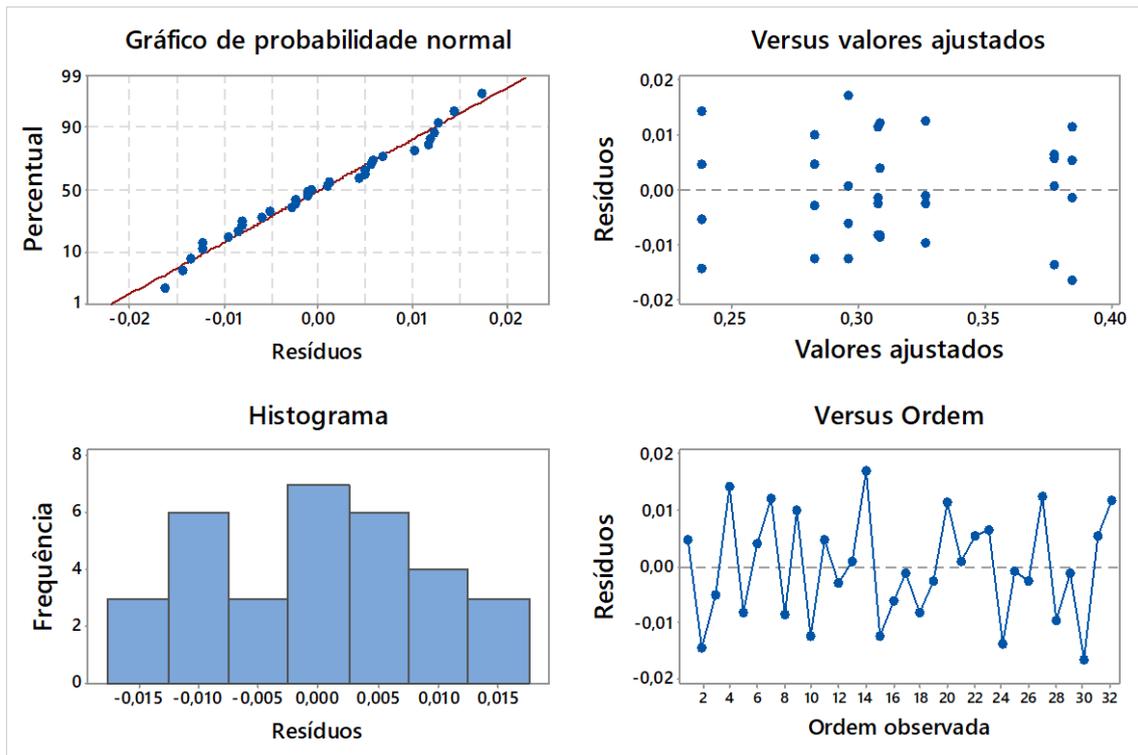


Figura 4.1: Gráficos de Resíduos para a variável resposta coeficiente de atrito.

A Tabela 4.1 apresenta os p-valores provenientes da ANOVA para as três variáveis resposta analisadas. Para o coeficiente de atrito, ao nível de significância $\alpha=0,05$, nota-se que somente a interação entre os fatores disco e pressão não promove mudança significativa nessa variável resposta, pois possui p-valor acima da significância considerada. Para a temperatura Final observou-se que todos os fatores e interações promovem modificações significativas. Já para o desgaste das pastilhas de freio, os p-valores foram todos acima do nível de significância considerado. Dessa forma, diferentes níveis dos fatores não promovem alterações significativas consideráveis para o desgaste.

Tabela 4.1:P-valores ANOVA para as variáveis respostas.

Resposta \ Componente	Temp. Final	Coefficiente de atrito	Desgaste
Disco	0,000	0,000	0,737
Pastilha	0,000	0,000	0,503
Pressão	0,000	0,001	0,187
Disco*Pastilha	0,024	0,006	0,187
Disco*Pressão	0,002	0,668	0,187
Pastilha*Pressão	0,000	0,000	0,737
Disco*Pastilha*Pressão	0,000	0,006	0,737
R²	96,92	95,95	91,10
R²adj	96,02	94,76	90,82

A Figura 4.2 ilustra os gráficos de interação para a variável resposta coeficiente de atrito. É possível observar que somente a interação entre os fatores disco e pressão não promove alterações significativas nessa variável resposta, pois se observa que as retas que representam os níveis desses fatores são paralelas. O coeficiente de atrito é maximizado quando o disco e a pastilha de freio são do tipo assentado e a pressão de acionamento é 0,15 MPa. Já a Figura 4.3 ilustra os gráficos de interação para a Temperatura. Percebe-se que todas as interações entre os fatores foram significativas e essa variável resposta foi minimizada quando os ensaios foram realizados utilizando-se disco de freio novo, a pastilha nova, e pressão de acionamento de 0,10 MPa. Já a Figura 4.4 representa o gráfico de efeitos principais para o desgaste. Esse possui função objetivo de minimização, pois quanto menor for o desgaste sofrido pelo material de atrito com o passar do tempo melhor, em função de uma maior durabilidade e redução de custos com substituições. Não é possível concluir que existem diferenças estatisticamente significativas no desgaste quando se altera os níveis dos fatores analisados, conforme observado na ANOVA representada pela Tabela 4.1.

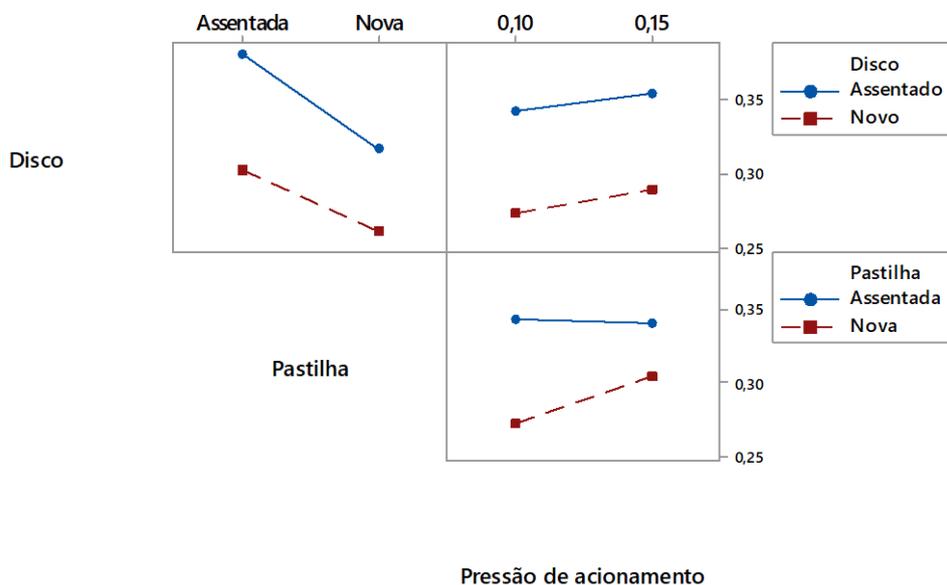


Figura 4.2: Gráfico de interação para a variável resposta coeficiente de atrito.

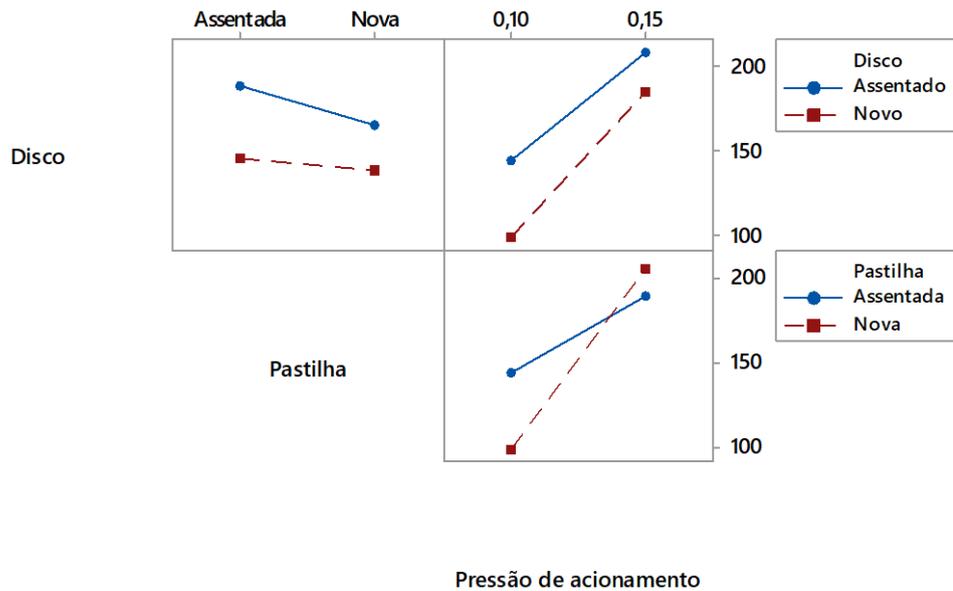


Figura 4.3: Gráfico de interação para a variável resposta temperatura.

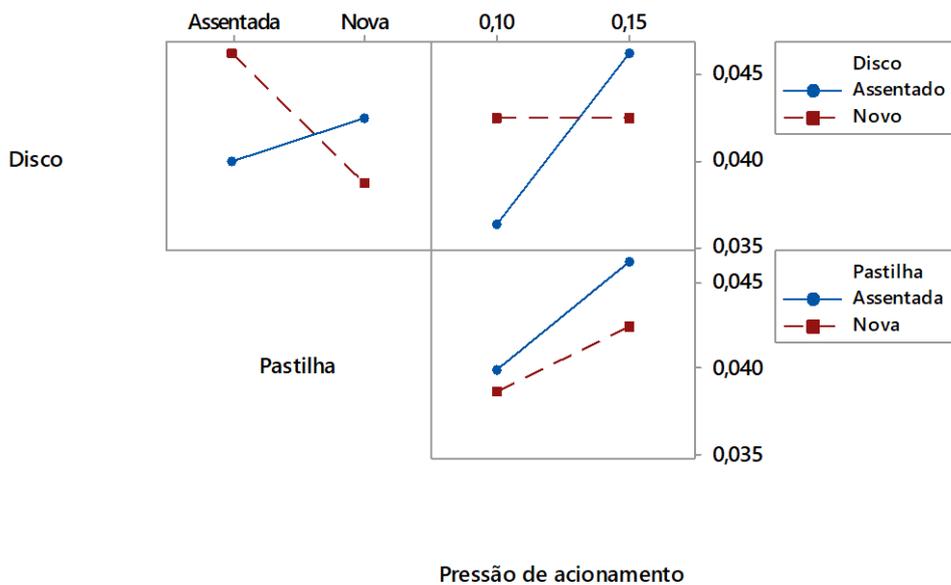


Figura 4.4: Gráfico de interação para a variável resposta desgaste das Pastilhas de Freio.

Foram elaborados modelos de regressão múltipla para prever o comportamento das três variáveis resposta em função dos fatores analisados, mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: -Coeficientes e P-valores para os modelos de regressão.

Resposta / Componente	Temp. Final	Coefficiente de atrito	Desgaste
Constante	181,25	0,37753	0,0419
	0,000	0,000	0,000
Disco	-74,00	-0,06898	0,01
	0,000	0,000	0,737
Pastilha	-73,00	-0,06995	0,025
	0,000	0,000	0,503
Pressão	14,75	0,00683	0,01
	0,000	0,001	0,187
Disco*Pastilha	54,75	-0,0001	-0,0075
	0,000	0,006	0,187
Disco*Pressão	61,50	-0,0194	-0,0075
	0,002	0,668	0,187
Pastilha*Pressão	99,75	0,0115	0,0000
	0,000	0,000	0,737
Disco*Pastilha*Pressão	-76,5	0,0453	-0,0050
	0,000	0,006	0,737
R²	96,92	95,95	91,10
R²adj	96,02	94,76	90,82

A Tabela 4.2 ilustra os coeficientes dos modelos de regressão, bem como os p-valores do teste estatístico para verificação da significância de cada componente. Somente os coeficientes do modelo de regressão cujos p-valores foram inferiores ao nível de significância considerado são utilizados para composição da equação de regressão. Para a temperatura final, por exemplo, o modelo de regressão foi capaz de explicar, aproximadamente, 96% da proporção da variabilidade dessa variável resposta ($R^2_{adj} = 96,02$). Como todos os componentes do modelo de regressão apresentaram p-valores inferiores a 0,05, a equação obtida contém todos os coeficientes, representada pela equação 4.1. O modelo de regressão obtido para prever o comportamento do coeficiente de atrito, cujos coeficientes estão representados na Tabela 4.2, é capaz de explicar, aproximadamente, 95% da proporção da variabilidade na resposta ($R^2_{adj}=94,76\%$). Já O modelo de regressão obtido para prever o comportamento do desgaste é capaz de explicar, aproximadamente 91% da proporção da variabilidade na resposta ($R^2_{adj}=90,82\%$).

$$Temperatura = 181,25 - 74*disco - 73*pastilha + 14,75*pressão + 54,75*disco*pastilha + 61,50*disco*pressão + 99,75*pastilha*pressão - 76,5*disco*pastilha*pressão \quad (4.1)$$

A Tabela 4.3 representa, resumidamente, os níveis dos fatores que otimizam cada variável resposta separadamente. Foram comparados também os valores médios obtidos nos ensaios com os valores preditos por meio do modelo de

regressão múltipla para os níveis ótimos de cada variável resposta. Foi observado um bom ajuste entre os valores preditos pelo modelo de regressão e os valores observados nos ensaios experimentais.

Tabela 4.3: Resumo dos modelos de predição e otimização de cada variável resposta.

Fatores Controláveis	Variáveis resposta		
	Y1: Temperatura	Y2: Coeficiente de atrito	Y3: Desgaste
Disco	Novo	Assentado	Indiferente
Pastilha	Novo	Assentada	Indiferente
Pressão	0,10 MPa	0,15 MPa	Indiferente
Percentual da variabilidade explicada pelo modelo (R ²)	96,92	95,95	91,1
Valor médio obtido	89°C	0,3875	0,041875 (média geral)
Valor predito	90°C	0,3775	0,0419 mm

Os resultados obtidos para as respostas coeficiente de atrito, temperatura e desgaste devem-se aos seguintes fatos:

Quanto ao tipo de disco de freio, o nível denominado assentado apresenta uma superfície mais polida que o disco novo, com menor presença de micro irregularidades do que em relação a um disco novo, aumentando, desta forma, a área de contato com as pastilhas. De acordo com Bergman *et al.* (1999) e Federici *et al.* (2006) a presença dessas micro “erosões” sobre a superfície do disco diminui a área de contato, o que causa redução no coeficiente de atrito. Consequentemente, a temperatura final aumenta utilizando-se um disco gasto, em função do aumento do coeficiente de atrito. Aqui como as temperaturas finais máximas não ultrapassaram 220°C, não se observou a presença de fadiga térmica no sistema de freio, uma vez que a estes níveis de temperatura não ocorre redução da eficiência da frenagem em decorrência da degradação térmica das pastilhas.

Quanto às pastilhas, as do tipo assentadas apresentam superfície de contato maior que as pastilhas novas. Segundo Horta Gutiérrez *et al.* (2013), pastilhas que apresentam elementos abrasivos mais desgastados estão sujeitas a uma

ação predominante do atrito entre os elementos e não a de cisalhamento por parte dos grãos abrasivos sobre o material do disco. Conseqüentemente, pastilhas assentadas aquecem mais e apresentam maiores coeficientes de atrito. Ostermeyer (2003) afirma que o histórico de utilização da pastilha determina o estado atual da área de contato a nível microscópico e, por consequência, o valor atual do coeficiente de atrito.

Maiores valores de pressão pneumática promovem maiores valores de força de deslocamento do cilindro pneumático. Como o cilindro pneumático é o responsável por acionar a manete de freio, maiores valores de pressão hidráulica são fornecidos ao sistema hidráulico, o que gera uma maior força normal de deslocamento das pastilhas de freio contra a superfície do disco. Logo, maiores valores de pressão pneumática levam a uma maior pressão de contato do par pastilha-disco e maiores temperaturas.

Bao *et. al.* (2012) observou que o coeficiente de atrito inicialmente aumenta à medida que a pressão de contato também aumenta, alcança um nível máximo e que, a partir de novos incrementos graduais da pressão de contato, ocorre redução do coeficiente de atrito. Esse decaimento está associado ao efeito da temperatura no coeficiente de atrito, tendo em vista que o aumento da pressão promove também elevação da temperatura. Uma vez que a temperatura da superfície excede a temperatura de decomposição térmica do material de fricção, o fenômeno *fade* ocorrerá e o coeficiente de atrito diminuirá conseqüentemente, conforme relatado por Kim e Jang (2000), Bushan (2013), Deng *et al.* (2010), dentre outros. Para os ensaios com potência motora de 3cv, as temperaturas alcançadas, abaixo de 220°C, foram inferiores à temperatura de decomposição térmica do material da pastilha. Portanto, o efeito da pressão de contato sobre o coeficiente de atrito para esses ensaios foram semelhantes aos observados por Bao *et. al.* (2012) para os valores iniciais de pressão de contato.

Bushan (2013) afirma que os mecanismos de atrito e desgaste são alterados sob diferentes temperaturas. A uma temperatura baixa, as asperidades duras, pequenos detritos e partículas em forma de fragmento existem na interface de contato. As asperidades duras podem ser embutidas em uma matriz mais macia, o que resulta em um fluxo plástico, chamado efeito de sulco. Segundo Kim e

Jang (2000) o efeito da elevação da temperatura pode resultar em vários fenômenos na interface de atrito. Em primeiro lugar, a resina da matriz pode ser amaciada e até mesmo carbonizada para perder sua força de adesão. As fibras reforçadas são então arrancadas e arrastadas da matriz, e filmes de fricção são formados na superfície de atrito. Os filmes de fricção são deformados, fraturados e fragmentados para formar pequenos detritos que diminuem a estabilidade do atrito, aumentam o desgaste e, às vezes, causam fortes vibrações e altos ruídos. Dessa forma, como as temperaturas alcançadas nesse experimento não promoveram degradação térmica do material das pastilhas, não foram observadas diferenças significativas no desgaste das pastilhas variando-se os níveis tipo de disco, pastilha e pressão de contato. Em termos práticos, a variação dos níveis dos fatores disco, pastilha e pressão não foram significativos para promover mudanças no desgaste das pastilhas, e esse resultado está atrelado ao fato de que o desgaste acentua-se a partir de valores de temperatura capazes de promover a degradação térmica das pastilhas, que não foram atingidas nessa primeira etapa experimental.

Com o intuito de encontrar a melhor combinação dos níveis de cada fator que otimize o desempenho global das múltiplas variáveis resposta envolvidas neste estudo, a próxima seção dedica-se à aplicação de uma técnica de otimização multi-objetivo.

4.1.1.1 Otimização Multi-objetivo

Os critérios para se encontrar as configurações globais ótimas dos fatores quando se utiliza a ferramenta *Response Optimizer* referente ao planejamento de experimentos fatoriais do software *Minitab 18* são baseados na função *desirability* individuais (d_i) e composta (D_i). Esse procedimento é equivalente à definição das funções objetivo em otimização. Diferentes configurações dos níveis dos fatores produzem um valor desta função entre 0 e 1. As configurações ótimas dos fatores são as que maximizam a função objetivo. O uso dessa ferramenta também requer a definição do intervalo de especificação para cada variável resposta, a importância relativa e os pesos de cada variável resposta. Definiu-se que todas as variáveis resposta apresentarão os mesmos níveis de importância relativa (IR) e os mesmos pesos (P).

Para a determinação do intervalo de especificação aceitável para a temperatura, Limpert (2011) ressalta que sistemas de freio quando alcançam temperaturas acima de 300°C ficam sujeitos ao efeito *fade*. Já Rhee e Schwartz (1979) destacam que até a temperatura de 220°C a taxa de desgaste dos materiais de fricção mantém-se razoavelmente constantes e, a partir de 220°C, essa taxa aumenta exponencialmente. Logo, a especificação escolhida foi de 50 a 220°C, com alvo de 100°C.

Neis (2012) desenvolveu um tribômetro para caracterização do efeito isolado da temperatura sobre o atrito medido em materiais de fricção utilizados em freios veiculares. Para temperaturas até 220°C, utilizando-se pastilhas de freio metálicas e não metálicas com dois diferentes diâmetros, obteve valores para o coeficiente de atrito variando de 0,30 a 0,45. Bode e Ostemeyer (2009) avaliaram o efeito do histórico térmico e de carga sobre o atrito ao longo de frenagens veiculares utilizando-se um dinamômetro. Os valores obtidos para o coeficiente de atrito, que variou, aproximadamente, de 0,30 a 0,5, ocorreu devido a mudanças do filme de fricção. Desta forma, foi definido que o intervalo de especificação para o coeficiente de atrito seria de 0,30 a 0,45. Alvo: 0,40.

Já para a variável resposta desgaste, não foram encontrados estudos que empregaram a mesma metodologia para medição do desgaste das pastilhas, realizado por meio da medição das diferenças de espessuras das pastilhas antes e após os ensaios. Para tanto, adotou-se como intervalo de especificação o limite inferior 0 e limite superior o terceiro quartil de todas as medições do desgaste nas pastilhas, 0,060 mm. Já o valor definido como alvo foi o valor médio dos desgastes: 0,042 mm.

A Figura 4.5 ilustra os resultados obtidos após a aplicação da técnica de otimização multi-objetivo. Pela Análise desta figura, o cenário ótimo (destaque na Figura 4.5 em letras vermelhas) apresentou a seguinte configuração quanto aos níveis dos fatores: disco de freio assentado, pastilha nova e pressão de acionamento de 0,10 MPa. Esse cenário ótimo apresentou como resultado de função *desirability* composta (D) o valor de 0,9258. Já os valores da função *desirability* individuais (d_i) para cada uma das variáveis resposta foram: 0,93125 para a temperatura; 0,94687 para o coeficiente de atrito; 0,90 para o desgaste.

Dessa forma, tanto as funções *desirability* composta e individuais apresentaram um atendimento igual ou superior 90% das especificações estabelecidas para cada resposta. Levando-se em consideração que existem variáveis resposta com funções objetivo conflitantes (temperatura e desgaste apresentam função objetivo de minimização, coeficiente de atrito de maximização) pode-se considerar que o resultado da otimização obtido foi satisfatório.

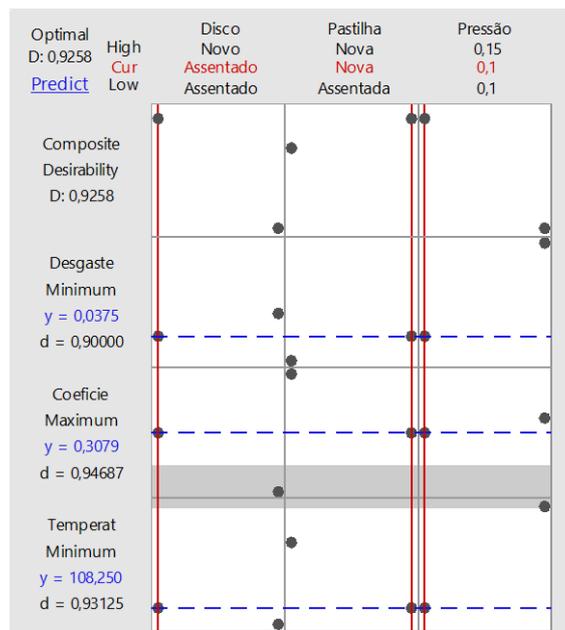


Figura 4.5: Resultados da otimização.

4.1.1.2 RNA- ensaios potência de 3cv

A obtenção dos níveis ótimos de operação de um sistema de freio pode ser importante para redução de custos (de projeto, operação, manutenção e fabricação), bem como otimizar o desempenho do sistema de freio. Utilizando-se esse resultado da otimização global, obtidos na seção 4.1.1.1, empregou-se os modelos de regressão obtidos, ilustrados pela Tabela 4.2, para prever o comportamento das três variáveis resposta. Foi empregado, também com objetivo de predição, um modelo de rede neural artificial (RNA) utilizando-se o *software Qwiknet V.2.23*. Dessa forma, buscou-se mostrar a aplicação de dois métodos distintos como forma de prever o comportamento das variáveis resposta estudadas. Esta seção dedica-se ao desenvolvimento de uma RNA para este problema.

A Figura 4.6 apresenta a RNA obtida nesta etapa experimental. Os quadrados representam as entradas e os círculos os neurônios da camada intermediária e de saída. Nesse estudo, optou-se por utilizar cinco neurônios na camada oculta.

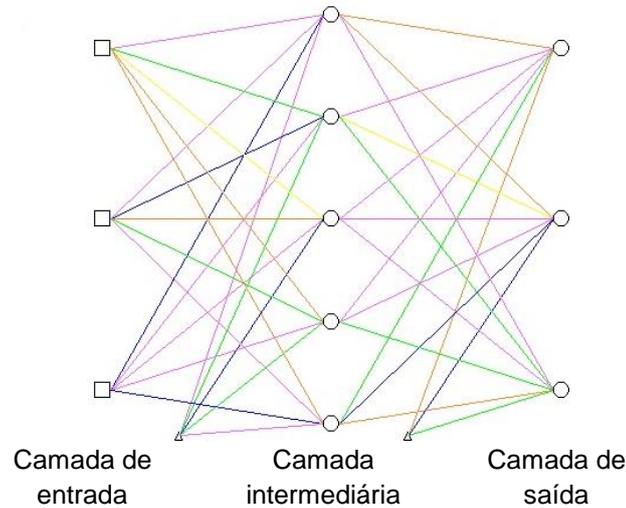


Figura 4.6: Configuração da RNA.

A Tabela 4.4 representa o Histórico de treinamento da RNA utilizando o algoritmo *Back-Propagation Rand*. Foram realizadas 1119 de treinamento entre as diferente combinações analisadas, obtendo-se um erro máximo de 0,1668 e um erro quadrático médio (rms) de 0,0815. A Figura 4.7 ilustra a evolução do erro rms com as épocas de treinamento. Como era de se esperar, à medida que se aumenta o número de interações, o erro rms diminui.

```

Training History
File Help

*****QuikNet_Training_History_Follows*****

*** Tue Feb 04 17:59:44 2020
Epochs          1 - 1119
Train_algorithm  Online Back-Propagation (Randomize)
Learning_Rate   0.1
Momentum        0
Input_Noise     0
Weight_Decay    0
Final_RMS_error 0.0814919
Final_Max_error -0.166812
Training_data_file C:\Users\rafae\Desktop\RNA freios\TREINO.txt
    
```

Tabela 4.4: Resultado do treinamento da Rede Neural.

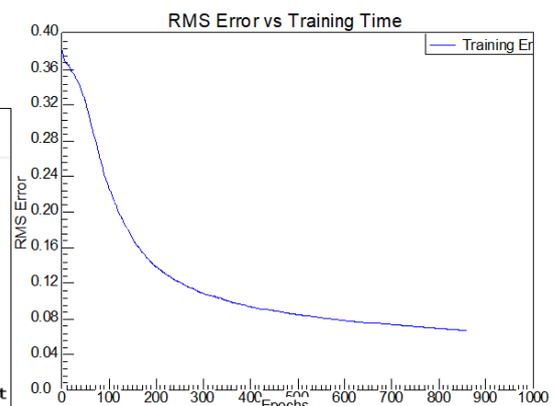


Figura 4.7: Erro RMS para treinamento da RNA.

Em seguida, gravou-se esses pesos da rede (parâmetros necessários para futuras utilizações desse treinamento). Nesse ponto, tem-se uma rede neural treinada para responder a qualquer entrada, dentro dos níveis estabelecidos, para prever o comportamento das variáveis resposta analisadas nesse estudo.

Após realizar o treinamento da rede, foi possível utilizá-la com outros conjuntos de dados como forma de se realizar a predição das variáveis resposta relativas ao desempenho do sistema de freio. Utilizou-se a combinação dos níveis dos fatores que otimizam o desempenho do sistema de freio, obtido na Figura 4.5. A Tabela 4.5 ilustra os resultados obtidos para o modelo de regressão MRM e também das RNAs. Observa-se que tanto o modelo de regressão múltipla, quanto o de RNA apresentaram valores próximos à média dos ensaios experimentais para os níveis dos fatores que otimizam o desempenho desse sistema de freios, sendo que o modelo de regressão apresentou valores preditos mais próximos dos valores médios obtidos experimentalmente. Dessa forma, conclui-se que ambos os modelos são satisfatórios para predição do comportamento das variáveis de desempenho deste sistema de freio em relação aos fatores analisados nesse estudo, com ligeira superioridade para o modelo de regressão.

Tabela 4.5: Comparação entres valores preditos pelos modelos de regressão e de redes neurais – potência motora de 3v.

Variável resposta analisada	Temperatura [°C]	Coefficiente de atrito	Desgaste [mm]
Função Objetivo	Minimização	Maximização	Minimização
Valor médio obtido nos ensaios	108,24	0,3078	0,042
Valor obtido no modelo de regressão	109,25	0,3076	0,042
Valor estimado pela RNA <i>Qwiknet</i>	110,80	0,3123	0,042

4.1.2 Análise da Velocidade Inicial de Frenagem e Pressão de Contato – potência motora de 10cv

Segundo Neis (2015), em altas temperaturas (especialmente acima de 300°C), importantes mudanças químicas ocorrem no material de atrito. A degradação da resina fenólica pela oxidação de materiais voláteis é um dos mais importantes processos causados pela elevação da temperatura. Alguns óxidos possuem propriedades lubrificantes e podem causar redução no atrito, tornando a fadiga térmica mais perceptível. Nessa etapa experimental, optou-se por conduzir os experimentos utilizando-se uma potência motora de 10cv, quando o sistema de freio precisa converter uma maior quantidade de energia cinética para promover a frenagem, convertendo-a em energia térmica. Dessa forma, buscou-se obter temperaturas na interface de atrito superiores a 300°C e tornar possível, também, analisar o efeito de temperaturas mais elevadas no desempenho do sistema de freio.

De acordo com Sanders *et al.* (2001), o coeficiente de atrito depende da velocidade, da pressão de contato e da temperatura na interface do par tribológico. A Temperatura, por sua vez, também depende dos níveis de velocidade e de pressão de contato. Optou-se por analisar a influência das variáveis de entrada pressão de contato e velocidade inicial da frenagem nas variáveis de saída coeficiente de atrito, temperatura e desgaste, as mesmas utilizadas para os ensaios de 3cv.

Foram verificados os pressupostos de normalidade e homocedasticidade para se analisar os dados por meio da ANOVA, onde se observou que as pressuposições do modelo não foram violadas para as três variáveis resposta. A Tabela 4.6 representa os resultados obtidos para a ANOVA. É possível concluir que a variável de entrada velocidade não promoveu alterações médias significativas na variável resposta temperatura. Já a pressão de contato e a interação entre os dois fatores foram significativos, ao nível de significância considerado, $\alpha=0,05$. Para o coeficiente de atrito e o desgaste, os dois fatores e a interação foram capazes de modificar significativamente estas duas variáveis resposta.

Tabela 4.6: P-valores ANOVA para as variáveis respostas.

Resposta Componente	Temp. Final	Coefficiente de atrito	Desgaste
Velocidade Inicial da frenagem	0,062	0,002	0,000
Pressão de contato	0,000	0,000	0,000
Velocidade*Pressão	0,045	0,009	0,000
R²	92,73	89,36	99,97
R²_{adj}	90,00	85,38	99,97

A Figura 4.8 ilustra o gráfico de interação proveniente da ANOVA para a coeficiente de atrito. Observa-se elevação do coeficiente de atrito com os níveis mais baixos tanto da velocidade, quanto da pressão de contato. Já por meio da Figura 4.9 é possível notar que a temperatura é mais elevada para o nível mais alto da pressão de contato e que não há efeito significativo da velocidade, coincidente com os resultados obtidos na Tabela 4.6.

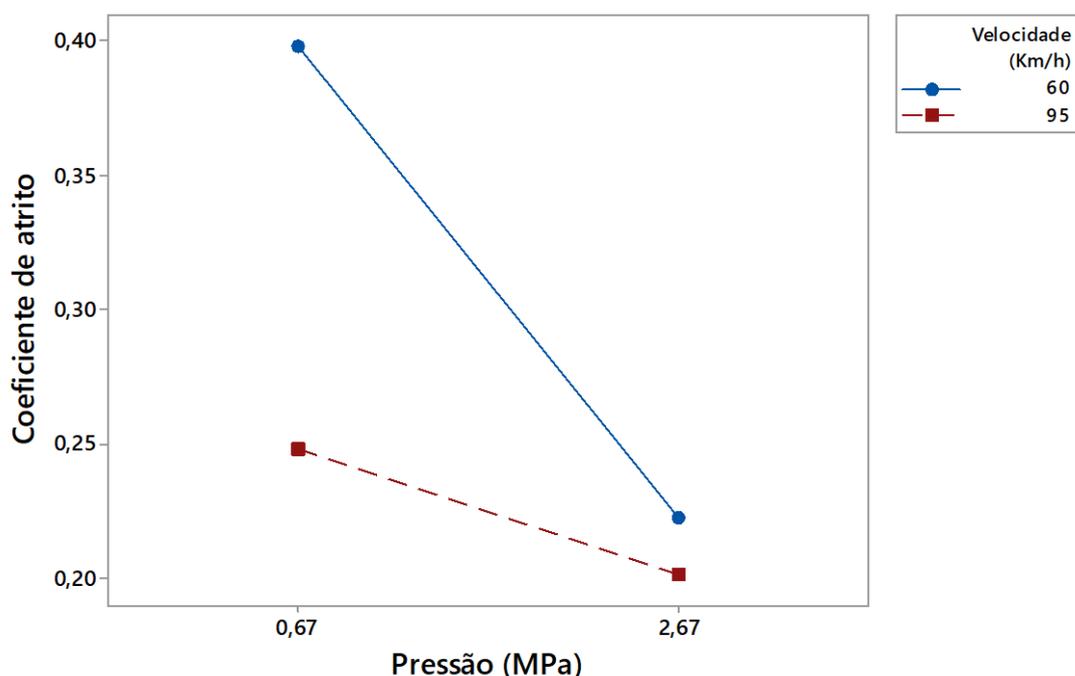


Figura 4.8: Gráfico de interação para a Coeficiente de atrito.

Já por meio da Figura 4.10 percebe-se um aumento do desgaste à medida que há um aumento tanto nos nível da velocidade, quanto da pressão de contato. Tais resultados coincidem com os encontrados por Deng *et al.* (2010), que também observaram um aumento da taxa de desgaste com o aumento da velocidade. Para a pressão de contato, os resultados encontrados coincidem

com os obtidos por Wang *et al.* (2008) e Bao *et al.* (2012), que notaram aumento da taxa de desgaste de pastilhas de freio com o aumento da pressão de contato.

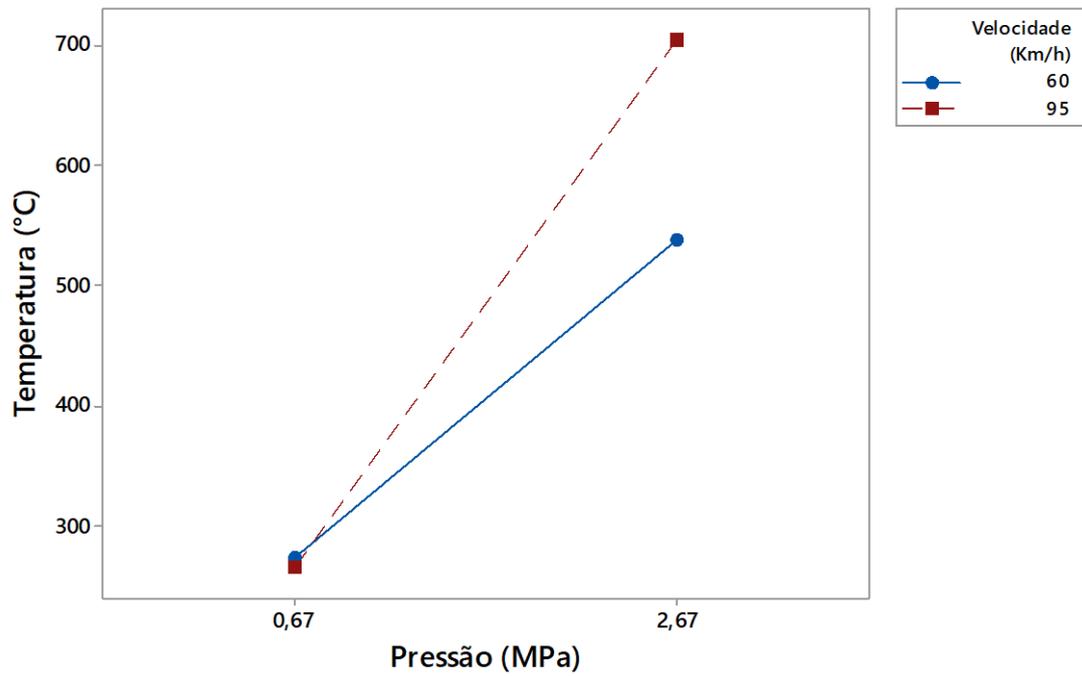


Figura 4.9: Gráfico de interação para a Temperatura Final.

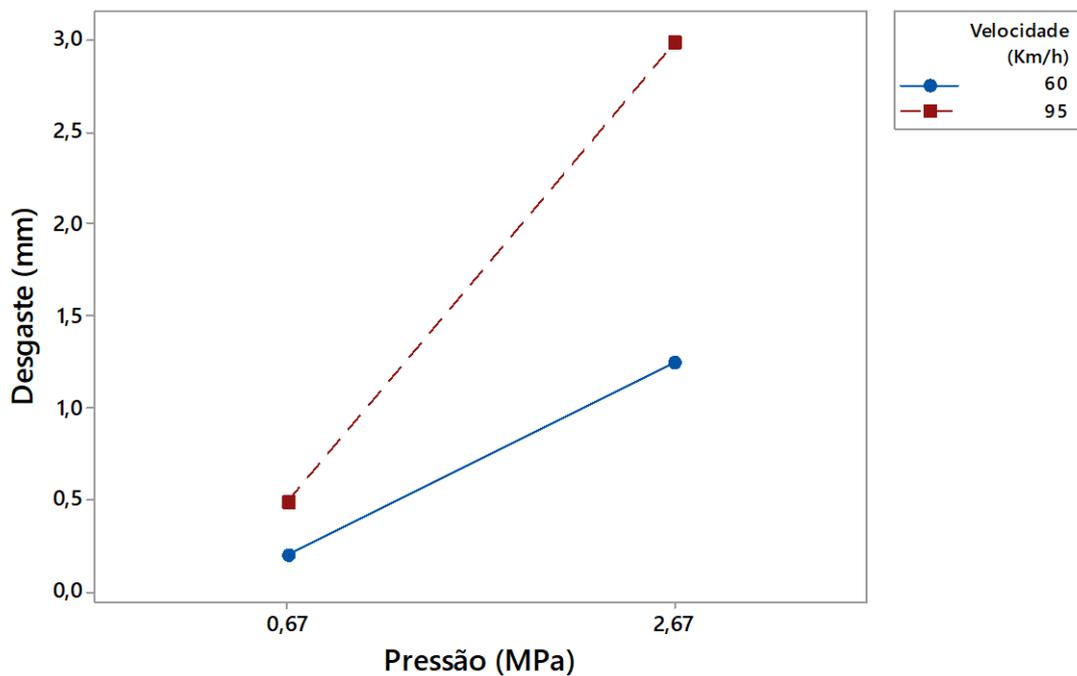


Figura 4.10: Gráfico de interação para o Desgaste.

Foram elaborados modelos de regressão múltipla para prever o comportamento das três variáveis resposta em função dos fatores analisados, cujos coeficientes são mostrados na Tabela 4.7. Para a temperatura final, o modelo obtido foi capaz de explicar 90% da variabilidade na predição ($R^2_{adj}= 90,00\%$). Para o coeficiente de atrito, o modelo apresentou capacidade de explicar, aproximadamente, 85% da proporção da variabilidade na resposta ($R^2_{adj}= 85,38\%$). Já para o desgaste, o modelo apresentou capacidade de predição de mais de 99% da variabilidade desta variável resposta.

Tabela 4.7: Coeficientes e P-valores para os modelos de regressão.

Resposta / Componente	Temp. Final	Coef. de atrito	Desgaste
Constante	445,5	0,26778	1,23169
	0,000	0,000	0,000
Velocidade Inicial da Frenagem	39,8	-0,04257	0,50831
	0,062	0,002	0,000
Pressão de contato	175,5	-0,05565	0,89002
	0,000	0,000	0,000
Velocidade*Pressão	43,5	0,03220	0,36331
	0,045	0,009	0,000
R²	92,73	89,36	99,97
R²_{adj}	90,00	85,38	99,97

Esses resultados obtidos devem-se aos seguintes fatos:

Deng *et al.* (2010) ressaltam que a diferença de comportamento do atrito e desgaste sob diferentes velocidades iniciais de frenagem vem principalmente da temperatura na interface. BLAU (2008), salienta que quanto maior o tempo de contato, maior será a adesão formada. Com um aumento adicional na velocidade inicial de frenagem, a velocidade de escorregamento entre o par tribológico também aumenta, promovendo redução do tempo de contato e, conseqüentemente, da quantidade de interações atômicas formadas, o que leva a uma redução da componente adesiva do atrito. A elevação de temperatura na superfície provocada pelo aumento da velocidade inicial de frenagem pode ser alta o suficiente para que o material da superfície seja decomposto termicamente, o que resulta na rápida diminuição do coeficiente de atrito e, como consequência, um aumento na taxa de desgaste. Esse parece ser o efeito quando se aumentou a velocidade de 60 para 95km/h, que provocou em uma elevação média da temperatura na interface de atrito, conforme pode ser

observado na Figura 4.9, resultando em redução do coeficiente de atrito, conforme ilustrado pela Figura 4.8.

Segundo Xiao *et al.* (2016), a abordagem de influência da pressão de contato no comportamento do atrito e do desgaste dos materiais de atrito pode ser atribuído às mudanças da área de contato real do par de atrito e pela geração de filmes de fricção, que por sua vez influenciam a organização do material de atrito e alteram o tipo de desgaste. Um aumento na pressão de contato provoca redução na componente adesiva do atrito, conforme observado na equação 2.1. Considerando-se a componente do desgaste abrasivo por penetração de partículas, representado pela equação 2.2, o aumento na pressão de contato leva a um aumento da penetração das partículas e, conseqüentemente, o comprimento de contato w , acarretando em redução do atrito abrasivo por penetração de partículas. Já levando-se em consideração a componente abrasiva por asperidades duras, um aumento na pressão de contato promove deformação dessas asperidades, aumentando o ângulo de ponta das asperidades (θ), reduzindo esta componente do atrito, conforme a equação 2.3. Como todas as componentes do atrito diminuem com o aumento da pressão, o coeficiente de atrito também diminui.

Sob uma baixa pressão de contato, os filmes de fricção são difíceis de se formarem na interface. Com a crescente pressão de contato, as asperezas distribuídas na interface de contato são deformadas e quebradas para formar alguns resíduos de desgaste. Esses detritos são facilmente quebrados para formar alguns filmes granulares soltos, que promovem aumento da área de contato real. Em seguida e como conseqüência, a resistência à fricção é reforçada, o que resulta em um incremento do coeficiente de atrito. Quando a pressão de contato aumenta para valores ainda maiores, mais detritos serão formados, incorporados, empilhados e preenchidos na superfície desgastada para gerar filmes mais granulares. Gradualmente, esses filmes granulares soltos podem se agrupar para formar uma película densa com uma área maior. O filme de fricção atua como uma película de lubrificação na interface, o que reduz a força dos materiais da matriz para diminuir o coeficiente de atrito. Além disso, mais calor será gerado sob uma pressão de contato mais

elevada, o que gradativamente prejudica a estrutura do material para aumentar o desgaste por oxidação do material de atrito. Dessa forma, observou-se um aumento do desgaste para pressões de contato de 2,67 MPa, como decorrência de uma maior geração de detritos de desgaste e da intensificação do processo de formação de filmes de fricção, que reduz a força dos materiais da matriz. Esse mecanismo ocorre com maior intensidade em função da elevação de temperatura para pressões mais elevadas, que nesse estudo foi observado para os ensaios conduzidos sob uma pressão de contato de 2,67 MPa.

A Tabela 4.8 representa, resumidamente, os níveis dos fatores que otimizam cada variável resposta separadamente. Foram comparados, também, os valores médios obtidos nos ensaios com os valores preditos por meio do modelo de regressão para os níveis ótimos. Foi observado um bom ajuste entre os valores preditos pelo modelo de regressão e os valores observados nos ensaios experimentais.

Tabela 4.8: Resumo dos modelos de predição e otimização de cada variável resposta.

Fatores Controláveis	Variáveis resposta		
	Y1: Temperatura [°C]	Y2: Coeficiente de atrito	Y3: Desgaste [mm]
Velocidade (m/s)	Indiferente	60	60
Pressão (MPa)	0,67	0,67	0,67
Percentual da variabilidade explicada pelo modelo (R²)	92,73	89,36	99,97
Valor médio obtido	270,03	0,398	0,20
Valor predito	273,5	0,3982	0,19667

Com o intuito de encontrar a melhor combinação dos níveis de cada fator que otimize o desempenho global das múltiplas variáveis resposta envolvidas neste estudo, a próxima secção dedica-se à aplicação de uma técnica de otimização multi-objetivo.

4.1.2.1 Otimização Multi-objetivo

Procedimento semelhante ao adotado para os ensaios de 3 cv foi empregado para os ensaios de 10cv. A definição dos parâmetros de especificação para as variáveis resposta temperatura e coeficiente de atrito foi a mesma adotada para a otimização realizada para os ensaios sob potência de 3cv. A Figura 4.11 ilustra o resultado desta otimização.

Pela Análise da Figura 4.10, o cenário ótimo apresentou a seguinte configuração quanto aos níveis dos fatores: velocidade inicial de 60km/h e pressão de contato de 0,67 MPa. Este cenário ótimo apresentou como resultado de função *desirability* composta (D) no valor de 0,5042. Já os valores da função *desirability* individuais (d_i) para cada uma das variáveis resposta foram: 0,13133 para a temperatura; 0,98199 para o coeficiente de atrito; 0,99411 para o desgaste.

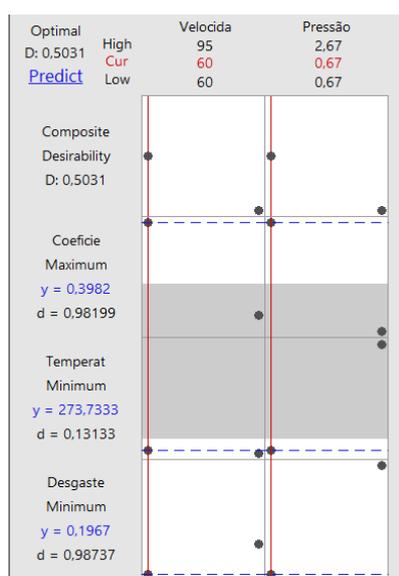


Figura 4.11: Otimização global para os ensaios de 10cv.

Nota-se que os requisitos para as funções objetivo do coeficiente de atrito e do desgaste foram atendidos em mais de 98%, comportamento não observado para a temperatura, que também penalizou o atendimento da função objetivo composta. Este resultado pode ser explicado pelo fato de que os ensaios conduzidos com o nível alto de pressão de contato (2,67 MPa) alcançaram temperaturas muito elevadas (média de 600°C), que muito extrapolaram o intervalo de especificação definido para a otimização da variável resposta temperatura (50° a 220°C), conforme pode ser observado na Figura 4.9,

submetendo o par tribológico a uma grande exigência térmica. Por se tratar de um regime bastante rigoroso em termos térmicos, observou-se que mesmo assim as pastilhas foram capazes de apresentar comportamento satisfatório para as variáveis de desempenho coeficiente de atrito e desgaste. Nota-se, por meio da Figura 4.10, que os ensaios com níveis mais elevados de pressão de contato apresentaram desgaste médio mais elevados nas pastilhas de freio, o que indica que a temperatura também influencia no desgaste.

Além disso, conforme pode ser observado na Figura 4.12, a temperatura influencia o comportamento do coeficiente de atrito. Por meio dessa figura, nota-se que os valores médios do coeficiente de atrito, sob cada combinação experimental, é fortemente influenciada pela temperatura. Dessa forma, percebe-se que a temperatura, além de ser influenciada pela velocidade e pela pressão de contato, é capaz de influenciar o comportamento tanto do desgaste, quanto do coeficiente de atrito.

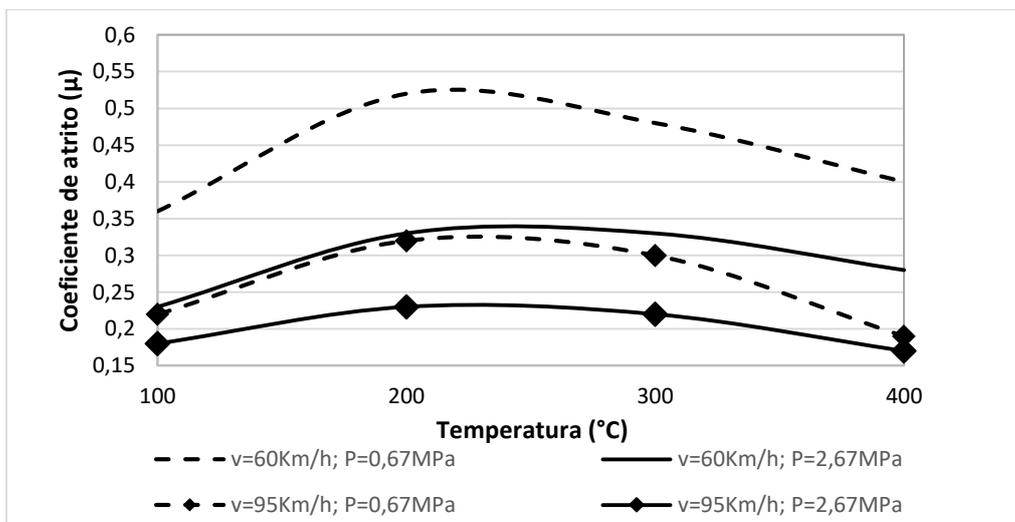


Figura 4.12: Influência da temperatura no coeficiente de atrito.

Utilizando-se esse resultado da otimização global, empregou-se os modelos de regressão obtidos para prever o comportamento das três variáveis resposta. Novamente foi empregado, também com objetivo de predição, um modelo de RNA utilizando-se o *software Qwiknet V.2.23*. Foram realizadas 909 épocas de treinamento entre as diferentes combinações analisadas, obtendo-se um erro máximo de 0,143947 e um erro quadrático médio (rms) de 0,0817932. Após o treinamento da RNA, a combinação ótima dos níveis dos fatores, obtidos na

seção 4.1.2.1, foi submetido ao processo de predição. Os resultados podem ser observados na Tabela 4.9, onde nota-se que tanto o modelo de regressão, quanto o modelo de RNA apresentaram resultados satisfatórios quanto à capacidade de predição das variáveis respostas temperatura, coeficiente de atrito e temperatura. Assim como obtido para os resultados dos ensaios com potência motora de 3cv, aqui também o modelo MRM apresentou capacidade de predição ligeiramente superior ao modelo de RNA.

Tabela 4.9: Comparação entres valores preditos pelos modelos de regressão e de redes neurais – potência motora de 10cv.

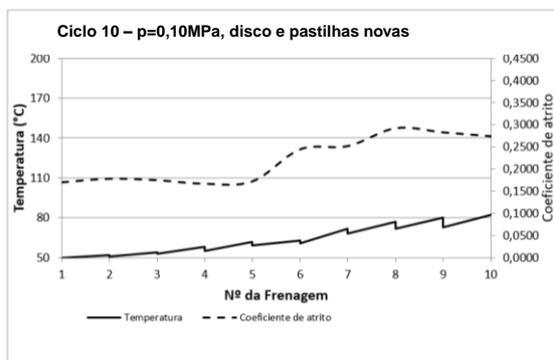
Variável resposta analisada	Temperatura [°C]	Coefficiente de atrito [-]	Desgaste [mm]
Função Objetivo	Minimização	Maximização	Minimização
Valor médio obtido no ensaio	270,03	0,398	0,20
Valor obtido no modelo de regressão	273,5	0,3982	0,19667
Valor estimado pela RNA <i>Qwiknet</i>	275.40	0,3876	0,1956

4.1.3. Identificação e análise do efeito *fade*

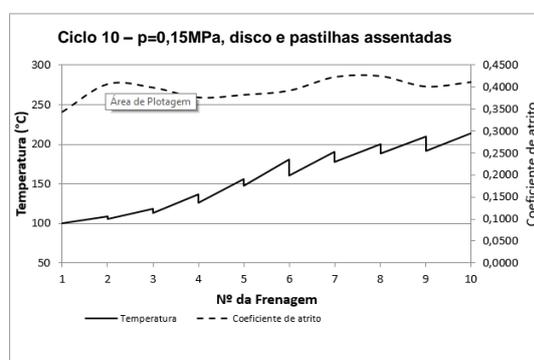
Em função dos experimentos da segunda etapa terem sido executados com um nível de potência motora mais do que triplicada em relação aos testes da primeira etapa, observou-se maiores valores de temperaturas finais nesses ensaios, ficando o sistema de freio mais suscetível à fadiga térmica.

As Figuras 4.13 e 4.14 ilustram gráficos de coeficiente de atrito e temperatura x número de frenagens para ensaios com potência motora de 3cv. É possível notar que a temperatura final de cada ciclo tende a ser crescente em concordância com o crescimento do número de frenagens e que os valores para o coeficiente de atrito apresentam também uma tendência crescente. Os valores obtidos para o coeficiente de atrito estão de acordo com os obtidos por Neis (2012) (0,30 a 0,45) e Bode e Ostermeyer (2009) (0,30 a 0,50) para esta faixa de temperatura. Essas figuras ilustram os ensaios que alcançaram, respectivamente, as menores (Figura 4.13 - disco e pastilhas novos, potência 0,10 MPa) e as maiores temperaturas (Figura 4.14 - disco e pastilhas assentadas, pressão 0,15 MPa) ao longo do décimo ciclo de frenagem. Nesses ensaios da primeira etapa, o *fade*

não foi observado, pois a temperatura máxima alcançada durante os experimentos não ultrapassou 220°C. As curvas que representam o coeficiente de atrito não apresentaram características do efeito *fade*, pois não foi notada redução significativa em seus valores ao longo dos ensaios.

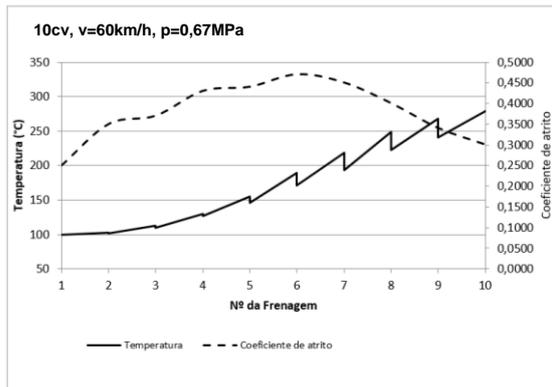


Figuras 4.13: Temperatura e coeficiente de atrito em função do número de frenagens ao longo do décimo ciclo de frenagem – ensaios 3cv, disco novo, pastilha nova, $p=0,10\text{MPa}$.

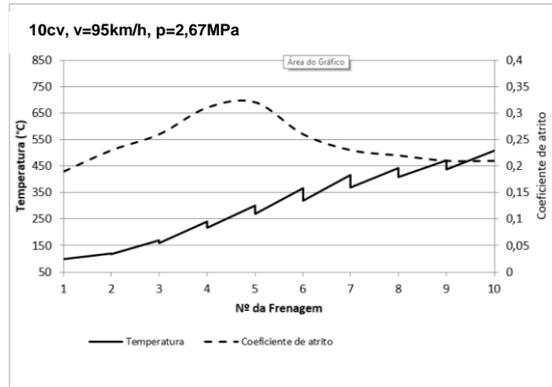


Figuras 4.14: Temperatura e coeficiente de atrito em função do número de frenagens ao longo do décimo ciclo de frenagem – ensaios 3cv, disco assentado, pastilha assentada, $p=0,15\text{MPa}$.

As Figuras 4.15 e 4.16 representam os ensaios conduzidos com potência motora de 10cv, utilizando-se pastilhas e discos novos, com os fatores velocidade inicial da frenagem e pressão de contato em seus níveis mais baixos e altos, respectivamente. Esses foram os ensaios que apresentaram, respectivamente, temperaturas mais baixas e elevadas ao longo do décimo ciclo de frenagem. Nas duas situações, observa-se que o coeficiente de atrito vai crescendo no início do ciclo de frenagem, atinge um valor máximo entre a quinta e sexta frenagem na Figura 4.15 (temperatura de, aproximadamente 250°C) e entre a quarta e quinta frenagem para a Figura 4.16 (aproximadamente 300°C) e, a partir deste ponto, o valor do coeficiente de atrito cai consideravelmente. Essa significativa redução do coeficiente de atrito com aumento da temperatura caracteriza o efeito *fade* nesse processo. A Figura 4.12 também ilustra a fadiga térmica promovida pela influência da temperatura no coeficiente de atrito médio para as condições experimentais analisadas nos testes sob potência motora de 10cv.



Figuras 4.15: Temperatura e coeficiente de atrito em função do número de frenagens ao longo do décimo ciclo de frenagem – ensaio 10cv, $v=60\text{km/h}$, $p=0,67\text{MPa}$.



Figuras 4.16: Temperatura e coeficiente de atrito em função do número de frenagens ao longo do décimo ciclo de frenagem – ensaio 10cv, $v=95\text{km/h}$, $p=2,67\text{MPa}$.

Segundo Limpert (2011) e Osterle *et al.* (2009), este efeito pode ser atribuído às transformações químicas que geralmente ocorrem em condições de mais altas temperaturas (degradação da resina fenólica e queima de materiais voláteis) presentes no material de formulação da pastilha de freio. Eddoumy *et al.* (2015) relataram a degradação térmica da resina fenólica em temperaturas elevadas. Os principais componentes emitidos durante a decomposição da resina fenólica a $230\text{-}450^\circ\text{C}$ são H_2O e CO_2 , correspondendo à decomposição do aglutinante e à oxidação do carbono. Bijwe *et al.* (2005) evidenciaram efeitos semelhantes, interpretados como a deterioração da resina nas pastilhas de freio durante a operação entre 300 e 400°C . Hong *et al.* (2009) investigaram o desgaste de três tipos diferentes de resina fenólica e observaram que até 200°C , o processo de desgaste depende da quebra de ligação de hidrogênio e, a temperaturas superiores a 300°C , a resina fenólica sofre quebra aleatória de cadeias poliméricas, oxidação e carbonização.

De acordo com Sugoço, Mutlu e Sugoço (2016) e Luo e Yang (2017), essa decomposição térmica promove formação de filmes nas superfícies de atrito, provenientes do processo regenerativo de fratura durante a frenagem, correspondente ao crescimento e destruição de platôs, conforme descrito por Eriksson e Jacobson (2000), Osterle e Urban (2006), Eriksson *et al.* (2001), Eriksson, Bergman e Jacobson (2002), Dmitriev, Osterle e Klob (2008), Neis

(2017), Leonardi *et. al.* (2018) dentre outros. Sugozi, Mutlu e Sugozi (2016) descrevem que, na escala mesoscópica, a degradação da resina até aproximadamente 100 μm aumenta a taxa de liberação dos platôs de contato, o que pode explicar a diminuição observada no coeficiente de atrito.

Conforme Luo e Yang (2017) a formação e a fratura do filme de oxidação e o filme de transferência são oriundos de desgaste por fricção e estão relacionadas à vida útil dos materiais de atrito. Já a formação do filme lubrificante e dos filmes de gases amortecedores afetam diretamente o coeficiente de fricção por meio de mudanças nos platôs de contato, influenciando assim o desempenho da frenagem.

A resina fenólica atua como aglutinante dos materiais constituintes da pastilha de freio, sendo o elemento que primeiro se desgasta durante a frenagem, por ser o material de menor dureza. Segundo Luo e Yang (2017), durante uma frenagem, quando a temperatura atinge um valor capaz de promover a decomposição térmica da resina fenólica, ocorre geração de grande quantidade de líquidos e gases. Esses fluidos atuam como um filme lubrificante durante a frenagem e a formação de filmes de gases amortecedores locais entre os pares de freio reduz a pressão de contato entre a pastilha e o disco, levando a uma redução gradual do coeficiente de atrito entre o par tribológico.

Observando-se as Figuras 4.15 e 4.16, nota-se que esse fenômeno de redução do coeficiente de atrito em função da elevação da temperatura iniciou-se para temperaturas entre 250 e 300°C, caracterizando o efeito *fade* durante o processo de frenagem. À medida que a temperatura aumenta, a decomposição térmica torna-se mais intensa, acentuando-se o processo de formação dos filmes de gases amortecedores.

Realizando-se uma abordagem da influência da temperatura por meio dos mecanismos de atrito e desgaste, Blau (2008) destaca que em temperaturas reduzidas a componente adesiva é pouco significativa, prevalecendo as componentes de abrasão. À medida que a temperatura aumenta em decorrência do processo de frenagem, as interações atômicas também aumentam, acentuando-se a contribuição da componente adesiva no coeficiente de atrito.

Entretanto, a elevação na temperatura provoca uma redução no limite de cisalhamento do material, tornando as superfícies mais dúcteis, promovendo redução da contribuição das componentes abrasiva. A componente adesiva também é prejudicada pelo aumento na ductilidade na área real de contato no par tribológico. Esse aumento da contribuição da componente adesiva, em que a elevação devido às interações atômicas superam as perdas devido ao aumento de ductilidade, ocorrem até o limite de temperatura que promove o início do processo de decomposição térmica do material de atrito. Em temperaturas acima desse limiar, a redução devido ao aumento na ductilidade das superfícies supera o aumento ocasionado pela elevação na taxa de formação das interações atômicas, resultando na diminuição do coeficiente de atrito e, conseqüentemente, promovendo a fadiga térmica, conforme observado nas Figuras 4.15 e 4.16.

4.2 Ensaio em veículo

Esta seção dedica-se à análise de ensaios de frenagem em veículo real realizados em pista de prova, onde se utilizou técnicas estatísticas para analisar a significância das variáveis envolvidas e suas correlações. Foram analisadas, também, imagens do material de atrito e estimativas de composições químicas, geradas por MEV, empregados em diferentes condições operacionais.

4.2.1 Ensaio em descida de serra

A Figura 4.17 ilustra o gráfico do coeficiente de atrito e da temperatura, em função do número de frenagens, para os ensaios de descida de serra com redução de velocidade de 80 a 40km/h. Por meio dessa figura é possível notar que o coeficiente de atrito começa a cair, aproximadamente, a partir da frenagem 5. Já o comportamento da curva da temperatura apresenta um aspecto crescente em função do número de frenagens. Por meio da Figura 4.18, que representa o coeficiente de atrito em função da temperatura, é possível notar que esta queda nos valores do coeficiente de atrito, que caracteriza a fadiga térmica, acontece em temperaturas entre 200 e 250°C. Deng *et al.* (2010) ressaltam que quando a temperatura da superfície alcança valores altos o suficiente para que o material de superfície seja decomposto termicamente, ocorrerá rápida diminuição do coeficiente de atrito e, como consequência, um aumento na taxa de desgaste.

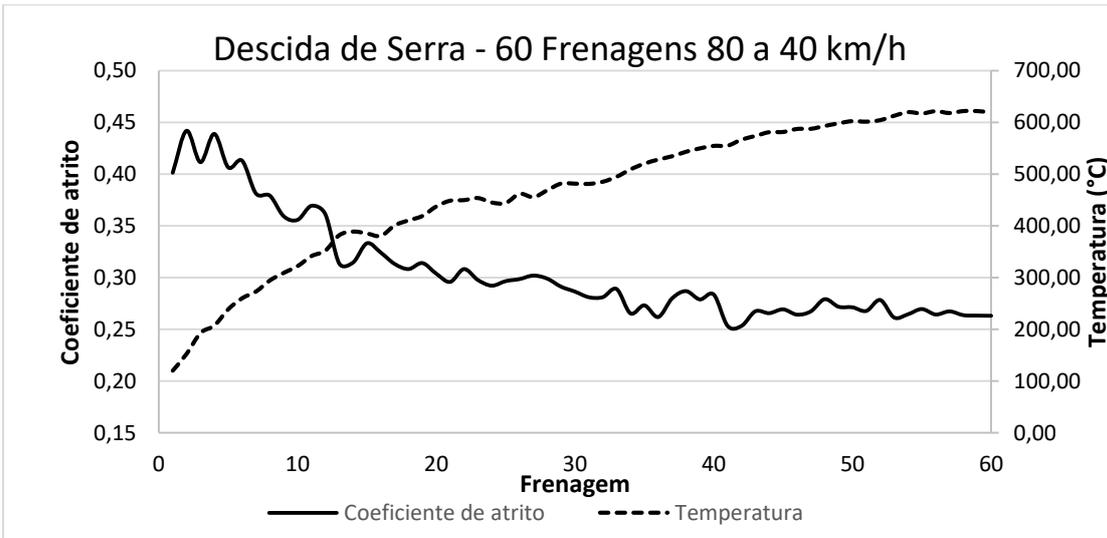


Figura 4.17: Coef. de atrito e temperatura x número de frenagens – 80 a 40 km/h.

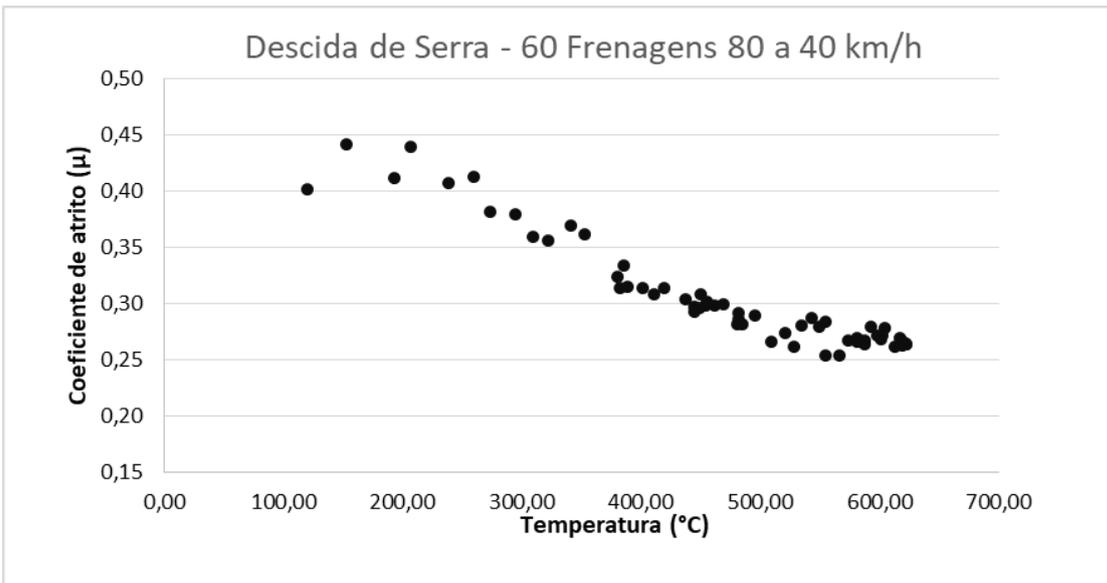


Figura 4.18: Coef. de atrito x temperatura - 80 a 40km/h.

O comportamento do coeficiente de atrito em função do número de frenagens e da temperatura apresentou a mesma tendência para as frenagens de 60 a 40 Km/h, ilustrado pelas Figuras 4.19 e 4.20, e as de 70 a 40km/h, representado pela Figura 4.21 e 4.22. As temperaturas alcançadas ao longo das frenagens foram maiores para os ensaios com maior redução de velocidade.

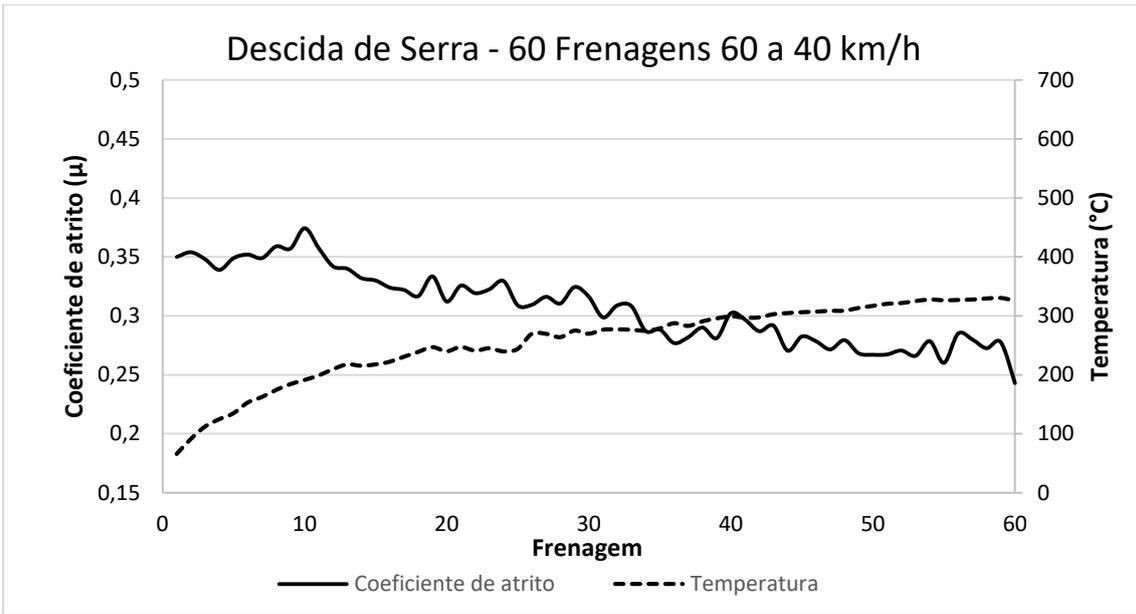


Figura 4.19: Coef. de atrito e temperatura x número de frenagens – 60 a 40 km/h.

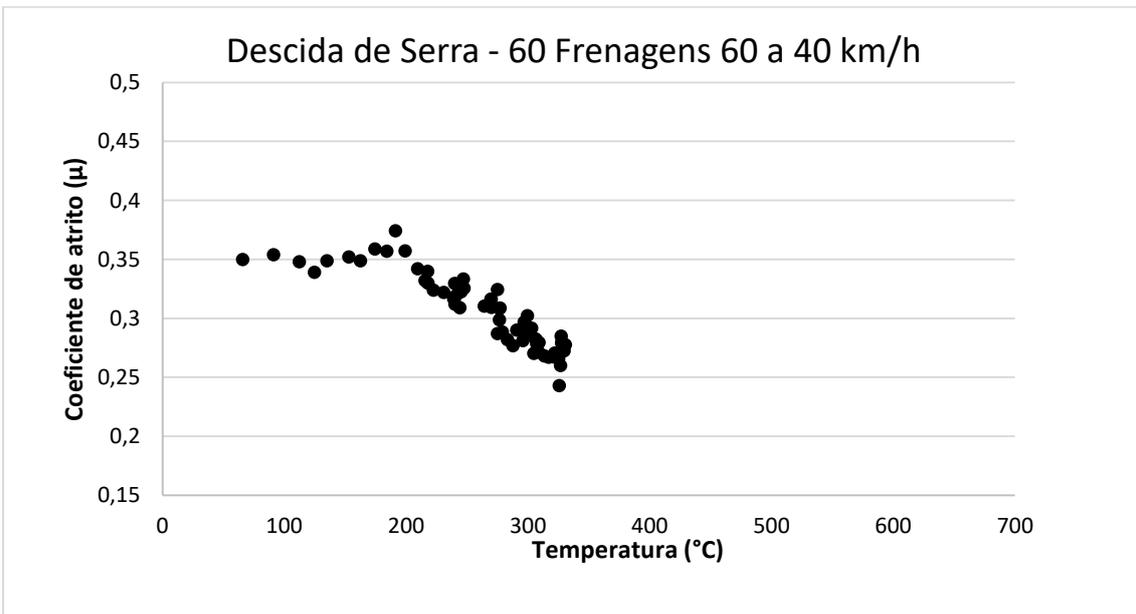


Figura 4.20: Coef. de atrito x temperatura - 60 a 40km/h.

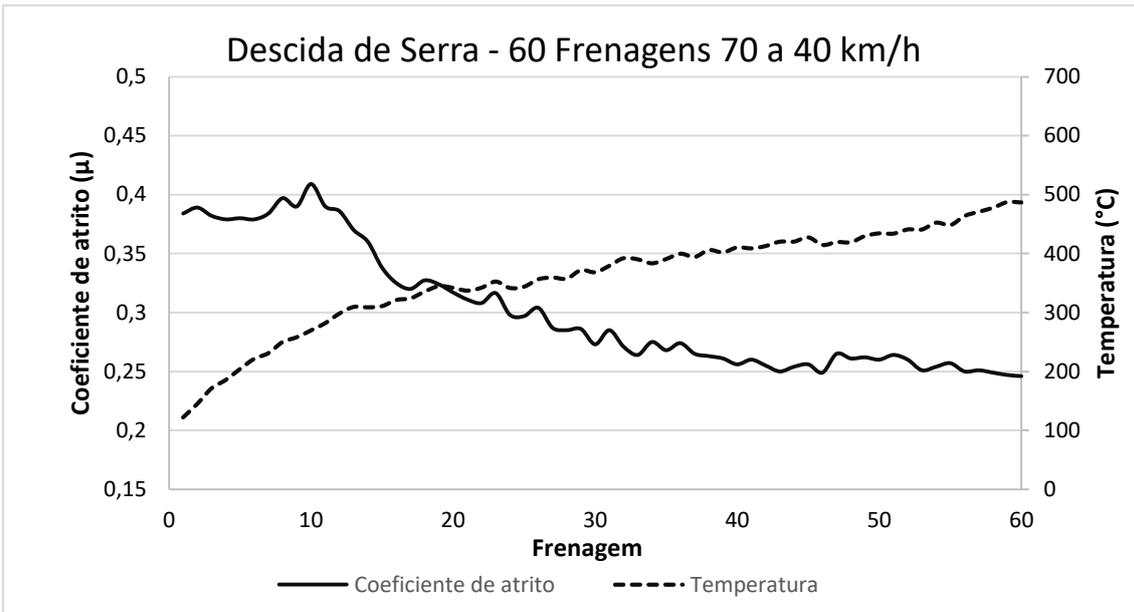


Figura 4.21: Coef. de atrito e temperatura x número de frenagens – 60 a 40 km/h.

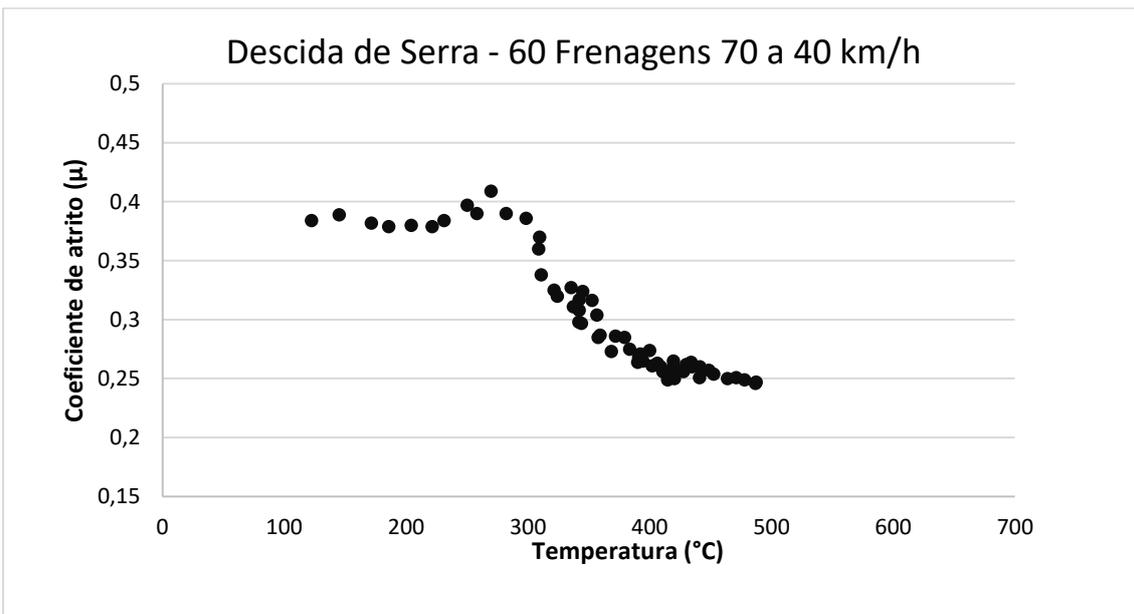


Figura 4.22: Coef. de atrito x temperatura - 70 a 40km/h.

A Tabela 4.10 representa a análise estatística descritiva para os três ensaios que simulam operações de frenagem em descida de serra. A variável resposta utilizada para avaliar o desempenho do sistema de freio foi o coeficiente de atrito na interface pastilhas/disco. Por meio dessa tabela é possível notar que o coeficiente de atrito médio para os três ensaios apresentou valores muito próximos (em torno de 0,30). Os ensaios cujas velocidades foram reduzidas de 80 a 40 km/h apresentaram a maior variabilidade entre os três, por apresentar

maior desvio padrão e amplitude, e o máximo valor do coeficiente de atrito (0,4420). Já os ensaios cujas velocidades foram reduzidas de 60 a 40km/h apresentaram a menor variabilidade e o menor valor mínimo encontrado para o coeficiente de atrito.

Tabela 4.10: Estatística descritiva – ensaios descida de serra simulada.

Ensaio	N	Média	Desvio - padrão	Variância	Coef. Variação	Mínimo	Máximo	Amplitude
Descida de Serra Simulada								
60-40 km/h	60	0,3070	0,0323	0,0010	10,5100	0,2430	0,3744	0,1314
70-40 km/h	60	0,3003	0,0399	0,0016	13,2718	0,2460	0,4090	0,1620
80-40 km/h	60	0,3054	0,0495	0,0025	16,2110	0,2533	0,4420	0,1887

4.2.2 Frenagem de emergência

A Figura 4.23 ilustra o gráfico do coeficiente de atrito e da temperatura em função do número de frenagens para a primeira sequência de frenagens de emergência. Por meio desta figura, é possível notar que o coeficiente de atrito começa a cair aproximadamente a partir da frenagem 4. Já o comportamento da curva da temperatura apresenta um aspecto crescente em função do número de frenagens. Já mediante a Figura 4.24, que representa o coeficiente de atrito em função da temperatura, é possível notar que esta queda nos valores do coeficiente de atrito também acontece em temperaturas entre 200 e 250°C, caracterizando o efeito *fade* durante as frenagens.

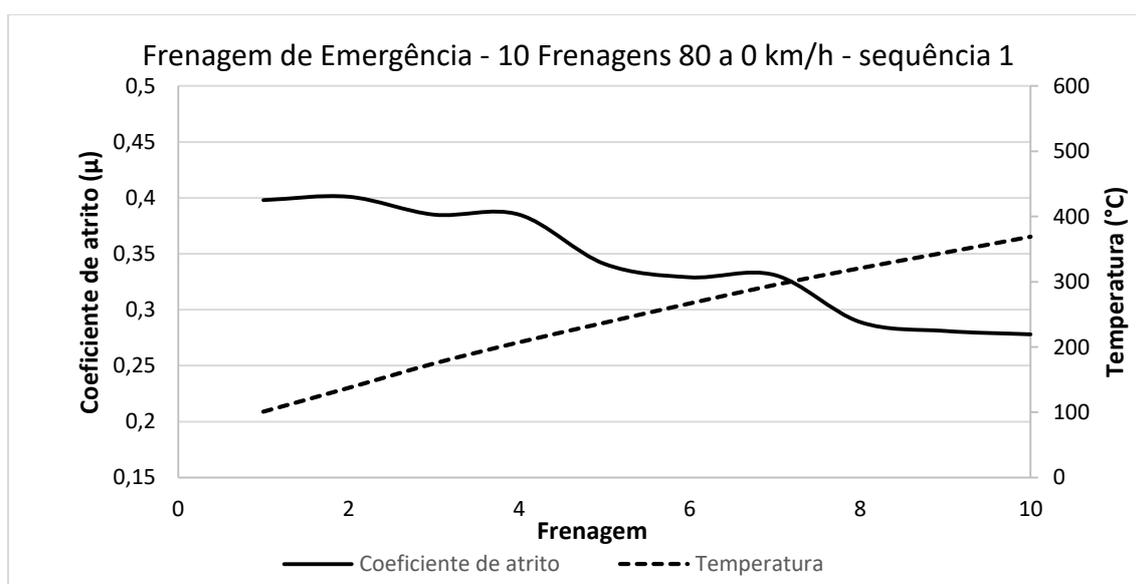


Figura 4.23: Coef. de atrito e temperatura x número de frenagens – 80 a 0 km/h – sequência 1.

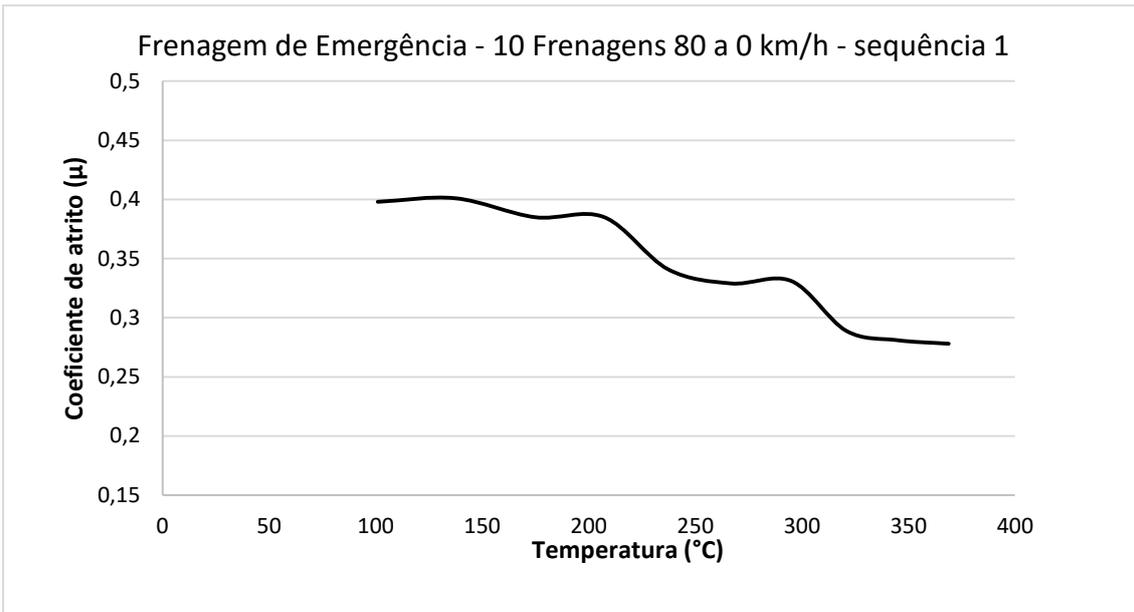


Figura 4.24: Coef. de atrito x temperatura - 80 a 0 Km/h – sequência 1.

O comportamento do coeficiente de atrito em função do número de frenagens e da temperatura apresentou a mesma tendência para as demais sequências de frenagens de emergência, representada pela Figuras 4.25 e 4.26, para a segunda sequência, e 4.27 e 4.28, para a terceira. Já as temperaturas alcançadas ao longo das frenagens apresentaram pouca variação. Além disso, praticamente não há queda de temperatura entre duas frenagens consecutivas, pois o tempo entre as mesmas é menor, conforme descrito no subtópico 3.4.3.

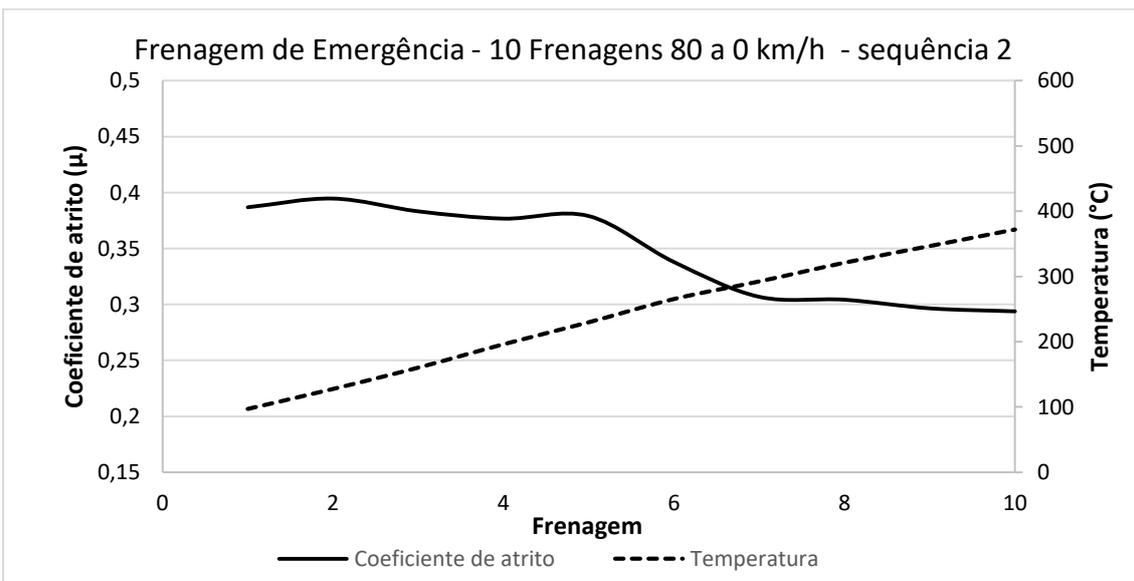


Figura 4.25: Coef. de atrito e temperatura x número de frenagens – 80 a 0 km/h – sequência 2.

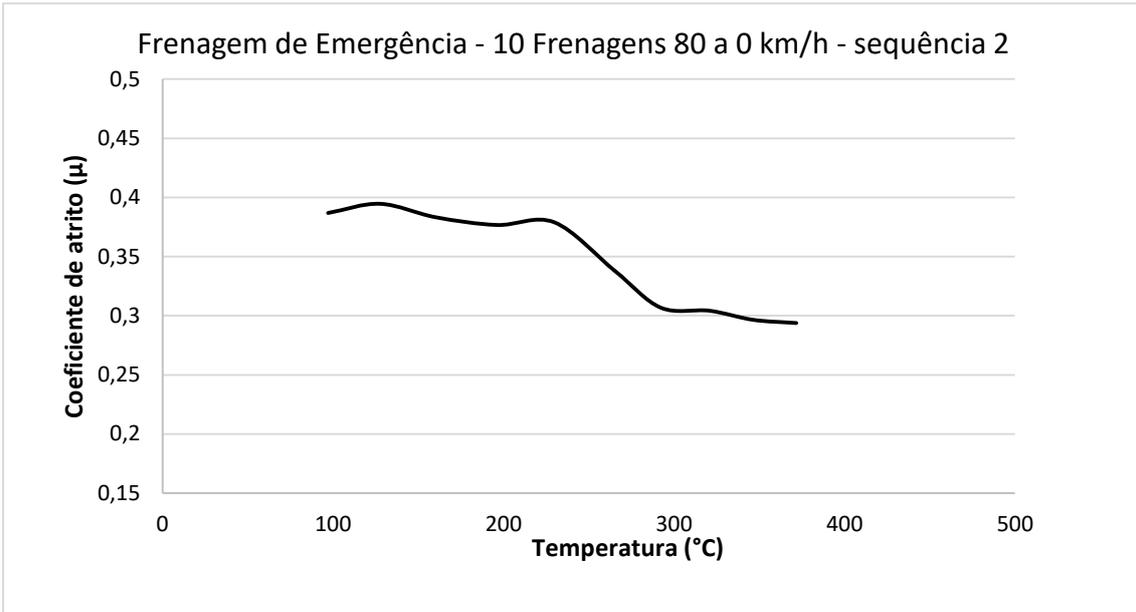


Figura 4.26: Coef. de atrito x temperatura - 80 a 0 km/h – sequência 2.

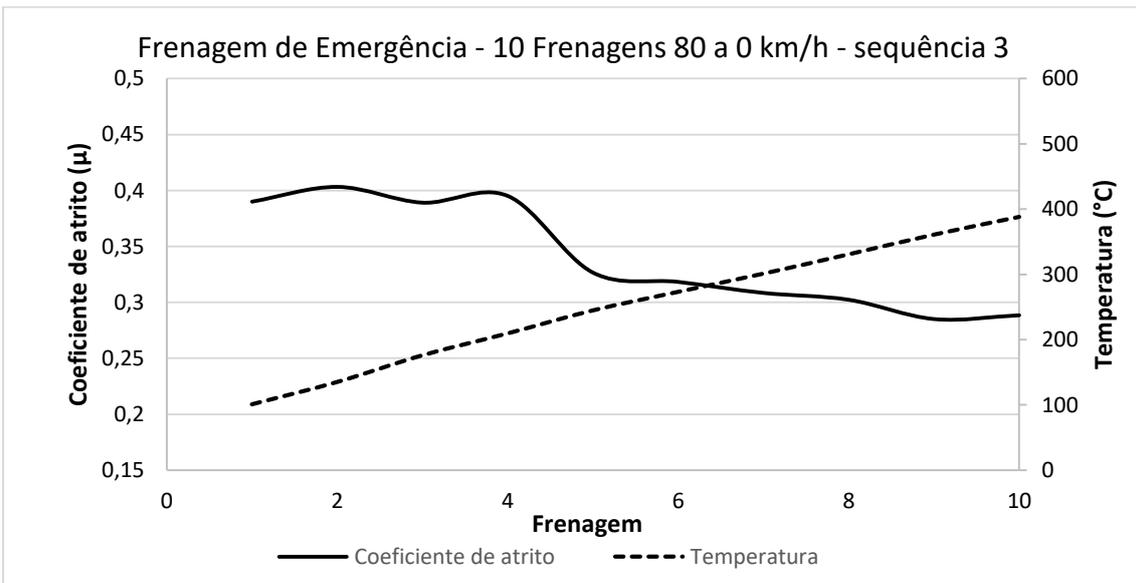


Figura 4.27: Coef. de atrito e temperatura x número de frenagens – 80 a 0 km/h – sequência 3.

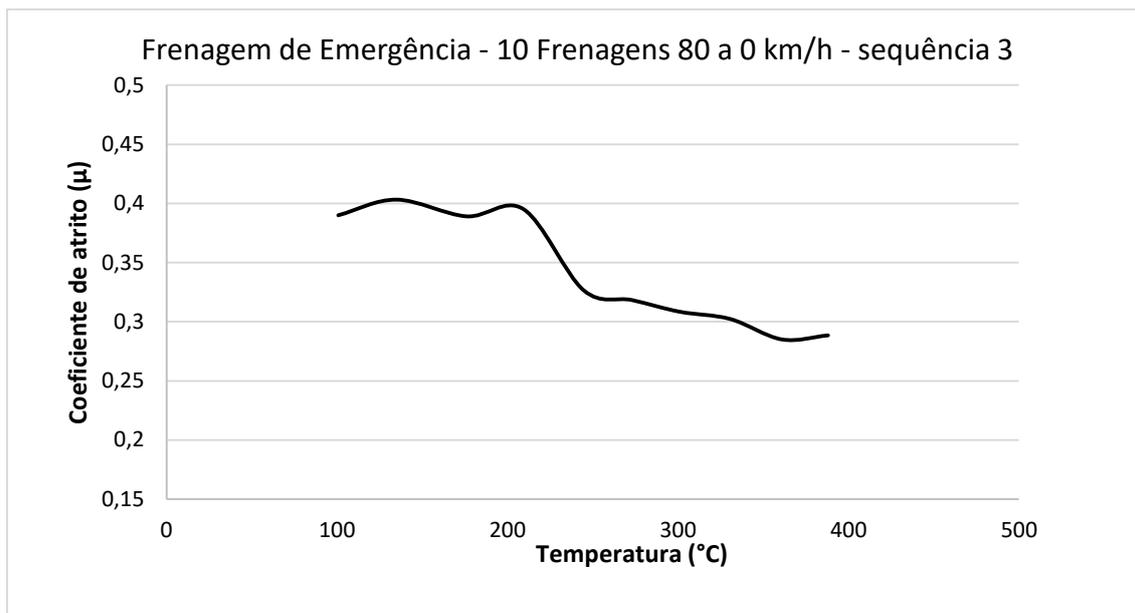


Figura 4.28: Coef. de atrito x temperatura - 80 a 0 km/h – sequência 3.

Já a Tabela 4.11 representa a estatística descritiva para os ensaios que simulam frenagens de emergência, em que o veículo é submetido a uma redução de velocidade de 80 a 0km/h com a máxima desaceleração possível. O coeficiente de atrito médio para os três ensaios apresentou valores muito próximos (0,34). A primeira sequência apresentou a maior variabilidade e o menor valor de coeficiente de atrito. Já no terceiro ensaio ocorreu o valor de máximo coeficiente de atrito.

Tabela 4.11: Estatística descritiva – ensaios frenagem de emergência.

Ensaio	N	Média	Desvio - padrão	Variância	Coef. Variação	Mínimo	Máximo	Amplitude
Frenagem de Emergência								
80-0km/h (1)	10	0,3418	0,0486	0,0024	14,2188	0,2780	0,4010	0,1230
80-0km/h (2)	10	0,3425	0,0353	0,0012	10,3066	0,2938	0,3946	0,1008
80-0km/h (3)	10	0,3392	0,0364	0,0013	10,7311	0,2850	0,4032	0,1182

Comparando-se os experimentos de frenagem de descida de serra e de emergência, nota-se que o segundo apresentou coeficiente de atrito médio e mínimo mais elevados. Calculando-se o percentual de redução do coeficiente de atrito, (amplitude x100%/coef. atrito máximo), como consequência da elevação da temperatura, os ensaios de frenagem de emergência apresentaram menores valores (redução média de 28,51%) em relação aos experimentos de descida de serra (redução média de 39,21%). Esse resultado decorre do fato de que os

ensaios de descida de serra alcançaram temperaturas finais mais elevadas, ficando o sistema de freio mais suscetível à fadiga térmica.

A Tabela 4.12 demonstra o percentual de redução do coeficiente de atrito e a aplicação das equações 3.18 e 3.19, que representam o cálculo das razões Fade (F) e Recuperação (R), propostos por Ma *et. al.* (2018), aos resultados desse estudo. Analisando-se o resultado da Razão F, nota-se que os ensaios de descida de serra e de emergência apresentaram valores próximos de redução do coeficiente de atrito quando o sistema de freio aquece de 100°C a 350°C (diminuição média de 22,5% e 21,8%, respectivamente). Dessa forma, a fadiga térmica experimentada pelo sistema de freio nas duas condições analisadas, considerando-se este intervalo de temperatura, foi semelhante.

Tabela 4.12: Razões F e R.

Ensaio	Percentual de redução do coef. de atrito	Razão F média	Razão R média
Descida de Serra	39,21%	22,5%	100,3%
Frenagem de Emergência	28,51%	21,8%	102,9%

Analisando-se a Razão R, percebe-se que nos dois tipos de ensaios o sistema de freio apresentou capacidade de recuperação média do coeficiente de atrito superior a 100%. Em termos práticos, para ambas condições ensaiadas, dado que ocorreu uma fadiga térmica dentro do intervalo de 100°C a 350°C em um determinado ciclo (ou sequência) de frenagem, o ciclo seguinte foi capaz de retomar o patamar de valor do coeficiente de atrito em relação ao início do ciclo anterior.

4.3 Análise de Correlação entre as variáveis

Com o objetivo de analisar o relacionamento entre as variáveis consideradas nesse estudo, foi estruturada uma matriz de correlações, representada pela Tabela 4.13. Cada interseção entre as variáveis nesta matriz é composta por dois valores: o primeiro é referente à correlação e o imediatamente abaixo deste

é o p-valor proveniente do teste de significância estatística para a correlação entre as duas variáveis. P-valores abaixo do nível de significância α considerado para análise (neste caso, $\alpha=0,05$) são considerados significativos para a correlação amostral representar a correlação populacional.

Tabela 4.13: Matriz de correlações entre as variáveis analisadas.

Matriz de correlações	Área Relativa	Número de Platôs	Comp. médio	Diâm. médio	Perím.	Fator de forma	Ra	Rz	Rt
Número de Platôs	-0,841								
	0,036								
Comp. Médio	0,943	-0,873							
	0,005	0,023							
Diâmetro médio	0,958	-0,951	0,923						
	0,003	0,004	0,009						
Perímetro	0,946	-0,952	0,916	0,997					
	0,004	0,002	0,010	0,000					
Fator de forma	-0,157	0,449	-0,231	-0,354	-0,379				
	0,034	0,037	0,025	0,049	0,046				
Ra	-0,969	0,905	-0,891	-0,985	-0,980	0,216			
	0,001	0,013	0,017	0,000	0,001	0,015			
Rz	-0,961	0,915	-0,885	-0,983	-0,975	0,204	0,998		
	0,002	0,011	0,019	0,000	0,001	0,039	0,000		
Rt	-0,924	0,930	-0,839	-0,974	-0,964	0,258	0,983	0,991	
	0,008	0,007	0,037	0,001	0,002	0,041	0,000	0,000	
Coef. Atrito	0,925	-0,971	0,922	0,990	0,950	-0,378	-0,966	-0,964	-0,954
	0,008	0,001	0,009	0,000	0,000	0,032	0,002	0,002	0,003

Observando-se a Tabela 4.13, nota-se que todos os p-valores do teste de significância estatística para a correlação entre as variáveis analisadas foram inferiores a $\alpha=0,05$, sendo essas correlações obtidas classificadas como significativas. Já por meio da análise dos valores das correlações, observou-se, exceto para a variável fator de forma ou esfericidade, que todas as correlações foram superiores a 0,8, sendo classificadas como correlações fortes ou muito fortes.

Considerando-se, inicialmente, a variável área relativa da amostra com presença de platôs de contato, percebe-se que a mesma está relacionada de maneira inversa com o número médio de platôs presentes nas amostras. Ou seja, para as amostras analisadas, quanto maior a área relativa menor foi o número médio de platôs. Já sua correlação com o comprimento, diâmetro equivalente e perímetro médio de cada platô é direta, ou seja, quanto maior a área relativa,

maior foi o tamanho médio dos platôs. Já a correlação da área relativa com os parâmetro de rugosidade R_a , R_z e R_t é inversa, ou seja, quanto maior a área relativa menores os valores desses parâmetros de rugosidade.

O número médio de platôs presentes nas amostras apresentou correlação inversa com o comprimento, diâmetro equivalente e perímetro médios de cada platô e direta com os parâmetros de rugosidade. Ou seja, para as amostras analisadas, quanto maior o número médio de platôs presentes nas amostras menor o comprimento, diâmetro equivalente e perímetro médios de cada platô naquelas amostras e maior a rugosidade da superfície das amostras. Todas as correlações encontradas entre os parâmetro de rugosidade foram positivas e muito fortes.

Já o fator de forma ou esfericidade não apresentou correlações significativas com as demais variáveis. Desse modo, o formato do platô com aspecto geométrico mais próximo ou distante de um círculo parece não ser significativo para influenciar nenhuma variável dos três grupos analisados.

Para a variável que avalia o desempenho do sistema de freio, o coeficiente de atrito, os valores das correlações com as demais variáveis estão destacadas na Tabela 4.13. Sua correlação é positiva com a área relativa da amostra com presença de platôs de contato, com o comprimento médio, diâmetro equivalente médio e o perímetro médio dos platôs. Ou seja, quanto maior a área relativa, comprimento, diâmetro e perímetro médios dos platô, maior o coeficiente de atrito para as amostras analisadas. Esse resultado está em conformidade com os descritos na literatura por Ericsson (2000) e Eriksson e Jacobson (2000). Segundo esses autores, considerando-se a situação da superfície de uma pastilha de freio nova, inicialmente mais áspera, ao acionar o freio, os platôs primários se formam, aumentando assim a possível área de contato real entre a pastilha e o disco. Além disso, à medida que a área de contato real aumenta e as superfícies sofrem desgaste, o elemento de contato elástico aumenta e, conseqüentemente, a área de contato real também aumenta. Ainda segundo os mesmos autores, espera-se que uma maior área de contato real para uma determinada carga aplicada nas pastilhas resulte em um coeficiente de atrito também mais elevado.

Já em relação ao número médio de platôs e aos parâmetros de rugosidade, o coeficiente de atrito na interface pastilha/disco apresentou correlação inversa. Ou seja, quanto mais rugosa a superfície, menor foi o coeficiente de atrito e maior o número de platôs presentes, porém esses platôs apresentaram menor comprimento médio. Esses resultados estão de acordo com a teoria descrita por Straffelini (2015) que afirma que superfícies mais lisas tendem a apresentar coeficientes de atrito mais elevados por causa do aumento da área de contato.

Eriksson, Bergman e Jacobson (2002) observaram que o coeficiente de atrito cai com o aumento da rugosidade superficial. Ao realizarem um experimento de frenagem utilizando-se um disco de freio em que apenas uma região do disco passou por um processo de jateamento de areia. Foi observado que, sob rotação constante em um banco de ensaios de freio, o coeficiente de atrito cai nos instantes em que a pastilha passa sobre o setor jateado, que apresentam menor área de contato, e retoma o patamar inicial após a passagem por esta região mais rugosa. A Figura 4.29 ilustra os resultados obtidos pelos autores. Conforme observado por Federici *et. al.* (2006) ao realizar experimentos variando-se a rugosidade do disco de freio, a extensão da camada de atrito aumenta à medida que a rugosidade diminui devido ao aumento na seção de suporte de carga, e a compactação dos platôs secundários também aumenta. Ambos os efeitos contribuem para aumentar a área real de contato, aumentando-se, assim, o coeficiente de atrito.

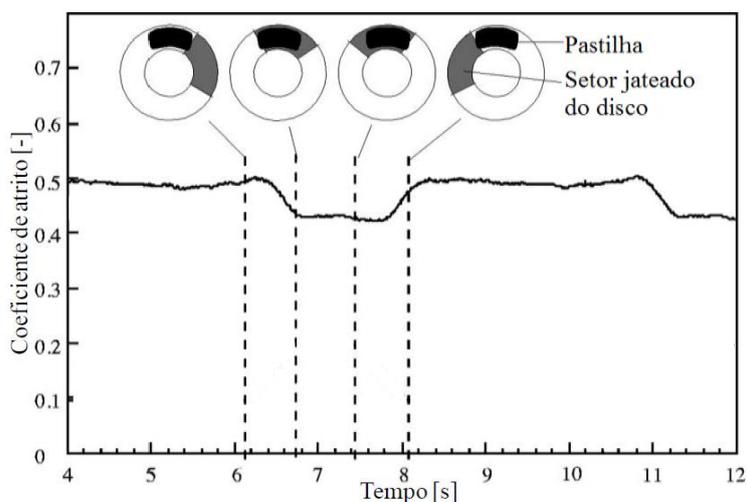


Figura 4.29: coeficiente de atrito entre uma pastilha e um disco que possui uma região com acabamento mais grosseiro obtida através de jateamento de areia.

Fonte: Adaptado de Eriksson, Bergman e Jacobson (2002).

4.4 Resultados Encontrados – Teste t

A Tabela 4.14 ilustra o resumo dos resultados obtidos por meio da aplicação do teste t para as variáveis resposta analisadas. Buscou-se verificar se as duas condições operacionais submetidas aos ensaios em veículo promoveram alterações significativas nessas variáveis de desempenho. Para todas as variáveis, os pressupostos de normalidade e independência foram atendidos. A variância entre os conjuntos de dados foram iguais para todas as variáveis, sendo aplicado o teste para variáveis independentes e variâncias iguais. Nessa tabela, são apresentados, para cada variável resposta, a estatística calculada t_0 e o p -valor. Para concluir se o fator analisado promove alterações significativas em cada variável resposta, pode-se comparar t_0 com os valores críticos. A Figura 4.30 representa a distribuição de probabilidade t , em que os valores críticos estabelecem a delimitação entre as regiões críticas e de aceitação da hipótese nula H_0 . A hipótese nula H_0 propõe igualdade entre as médias, já a hipótese alternativa, H_a , aponta que as médias são diferentes.

Tabela 4.14: Resumo dos resultados do teste t.

Variáveis Resposta	t_0	P-valor
Medida de desempenho da Frenagem		
Coeficiente Atrito	-16,32	0,004
Medidas das características dos platôs		
Área relativa dos platôs	-5,00	0,038
Número de platôs	6,33	0,024
Comprimento médio	-6,28	0,024
Diâmetro equivalente médio	-9,25	0,003
Perímetro médio	-11,44	0,001
Fator de forma ou esfericidade	0,80	0,485
Parâmetros de rugosidade superficial das amostras		
Ra	5,91	0,027
Rz	5,56	0,031
Rt	4,61	0,044

Analisando-se a Tabela 4.14, nota-se que o fator tipo de operação de frenagem somente não promoveu mudanças significativas na variável resposta fator de forma ou esfericidade, pois em todas demais as estatísticas calculadas t_0 encontram-se na região crítica, rejeitando-se a hipótese nula de que as médias são iguais. Outro critério de decisão é por meio da análise do p -valor. Como os

p -valores são inferiores ao nível de significância considerado ($\alpha=0,05$), exceto novamente para o fator de forma, o fator analisado promove mudanças significativas nas demais variáveis resposta. Dessa forma, para os ensaios realizados, as frenagens de descida de serra somente não apresentaram diferenças estatisticamente significativas para a resposta fator de forma ou esfericidade, para um intervalo de 95% de confiança, em relação aos ensaios de frenagens de emergência. Todas as demais variáveis resposta sofreram alterações significativas variando-se o tipo de operação de frenagem.

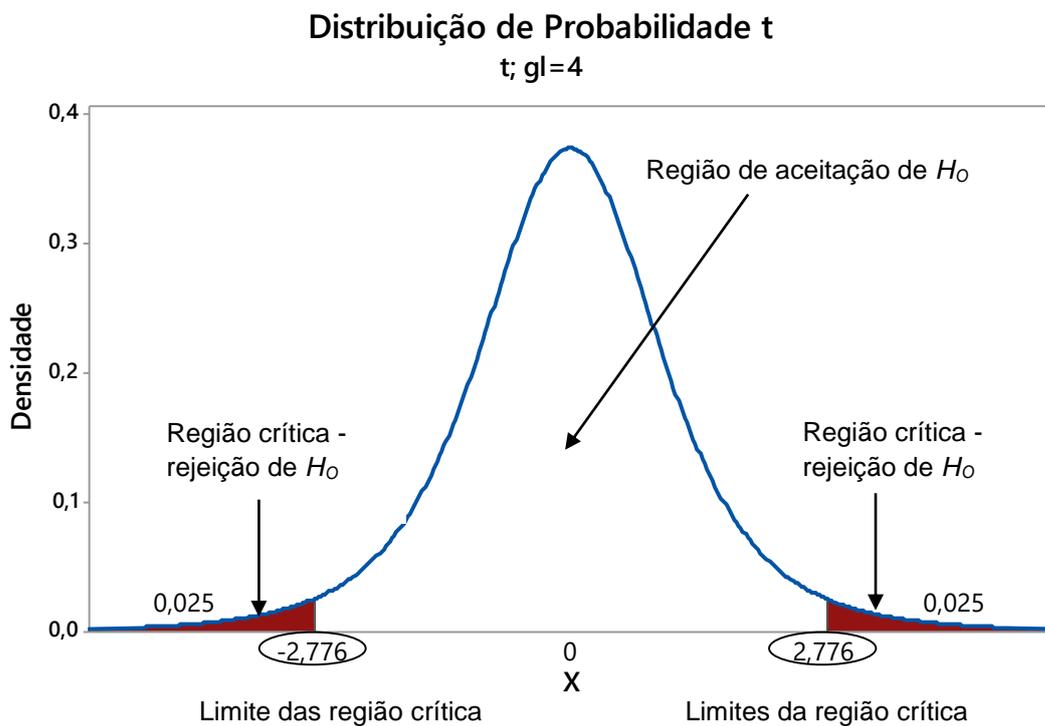


Figura 4.30: Região crítica - Distribuição de probabilidade t .

Essas alterações podem ser melhor visualizadas observando-se os gráficos de efeitos principais, ilustrados pela Figura 4.31. Por meio destes gráficos é possível notar que os ensaios de frenagens de emergência apresentaram coeficiente de atrito médio mais elevado, maior área relativa média com presença de platôs, maiores comprimento, diâmetro equivalente e perímetro médios dos platôs e menor número médio de platôs nas amostras analisadas.

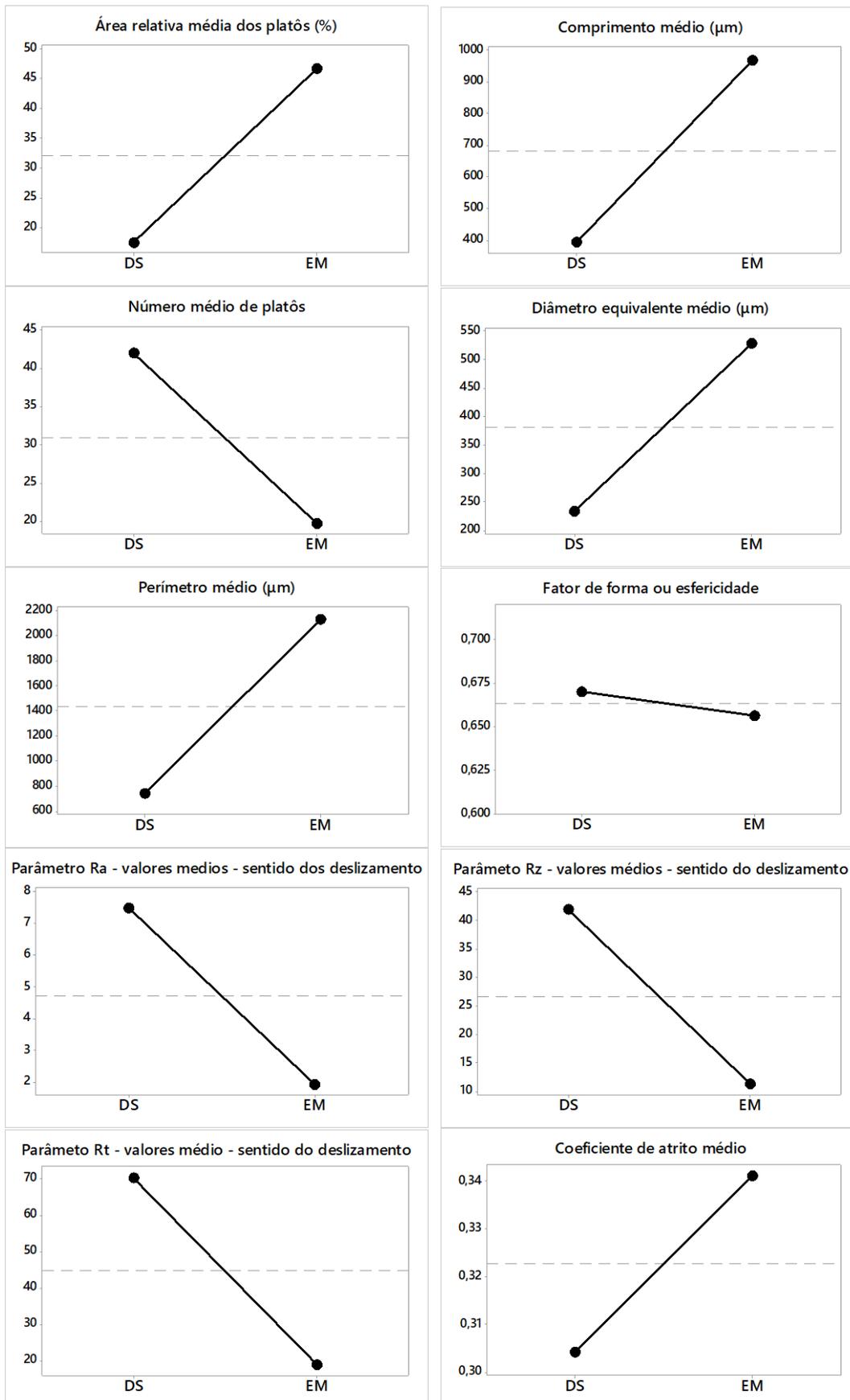


Figura 4.31: Gráficos de Efeitos principais.

Já a resposta fator de forma ou esfericidade pouco se alterou variando-se o tipo de operação de frenagem, o que está em conformidade com os resultados encontrados na análise de correlação e análise de variância. Com relação aos parâmetros de rugosidade superficial, nota-se que as amostras de pastilhas de freio submetidas aos ensaios de frenagem de emergência apresentaram menores valores dos parâmetros de rugosidade superficial Ra, Rz e Rt. A explicação para esse resultado pode estar relacionada com as medidas das características dos platôs: a área relativa média com presença de platôs das amostras para estes ensaios foram maiores se comparados às amostras das pastilhas utilizadas em ensaios de descida de serra. Como o poder de atrito acontece por meio dos platôs, conforme descrito por Ostermeyer e Muller (2008), este aumento de área de contato promove aumento do coeficiente de atrito. Segundo Deng *et al.* (2010), quando mais asperidades são deformadas, desgastadas e fraturadas para formar filmes de fricção, que adicionam-se à área de contato real, ocorre um incremento no coeficiente de atrito.

As temperaturas alcançadas pelos ensaios de frenagem de emergência foram inferiores em relação aos ensaios de descida de serra e, segundo Jang (2009), com o aumento da temperatura em função do atrito, a resina da matriz pode ser amaciada e até mesmo carbonizada para perder sua força de adesão. Como consequência, os filmes de fricção serão deformados, rachados e fragmentados para formar pequenos detritos que diminuem a estabilidade do atrito, aumentam o desgaste e, às vezes, causando fortes vibrações e altos ruídos. Uma vez que a temperatura da superfície excede a temperatura de decomposição térmica do material de fricção, o fenômeno *fade* ocorrerá e o coeficiente de atrito diminuirá conseqüentemente.

4.5 Análise das Micrografias obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

4.5.1 Amostras retiradas de pastilhas novas

Foram obtidas as microscopias das amostras utilizando-se duas ampliações: 25 e 500 vezes do tamanho original. Para possibilitar a realização de uma análise comparativa, foram obtidas as imagens da microscopia de pastilhas novas e das

submetidas aos dois tipo de operação de frenagem. Foram realizadas, também, algumas análises EDS destes materiais, com o objetivo de se obter uma estimativa semi-quantitativa da composição química. A Figura 4.32(a) ilustra as imagens do MEV por elétrons secundários (*secondary electron - SE*), que permite uma visão topográfica da superfície. Já em 4.32(b), imagem obtida por elétrons retroespalhados (*backscattered electrons - BSE*) para o material novo. A aproximação utilizada foi de 25 vezes.

Por meio da Figura 4.32, analisando-se inicialmente em (a), não há presença de superfícies planas características dos platôs, onde é possível perceber maiores irregularidades presentes na topografia superficial. Em (b), percebe-se a presença de fibras metálicas, que apresentam um aspecto mais brilhante em relação aos demais constituintes da pastilha. Já as regiões mais escuras formam a matriz polimérica do material.

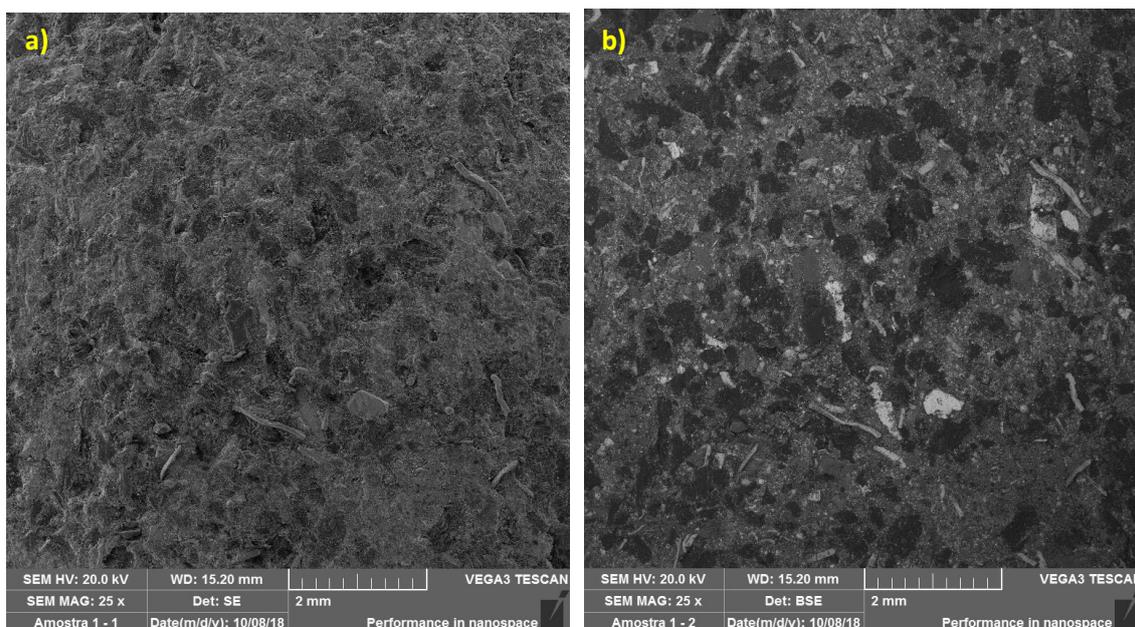


Figura 4.32: Imagens obtidos pelo MEV - 25x - para pastilha nova: a) SE; b) BSE – 25x.

Já a figura 4.33 representa uma micrografia da pastilha com uma aproximação de 500 vezes. Não há presença de platôs de contato em (a) e em (b) é possível ver com maiores detalhes os constituintes da pastilha, de forma especial as fibras metálicas. Esses constituintes serão os pontos de nucleação para a formação dos platôs durante as frenagens. Como o material ainda não foi utilizado, não há marcas características de deslizamento entre o par de atrito. Já os regiões mais escuras representam a matriz polimérica do material.

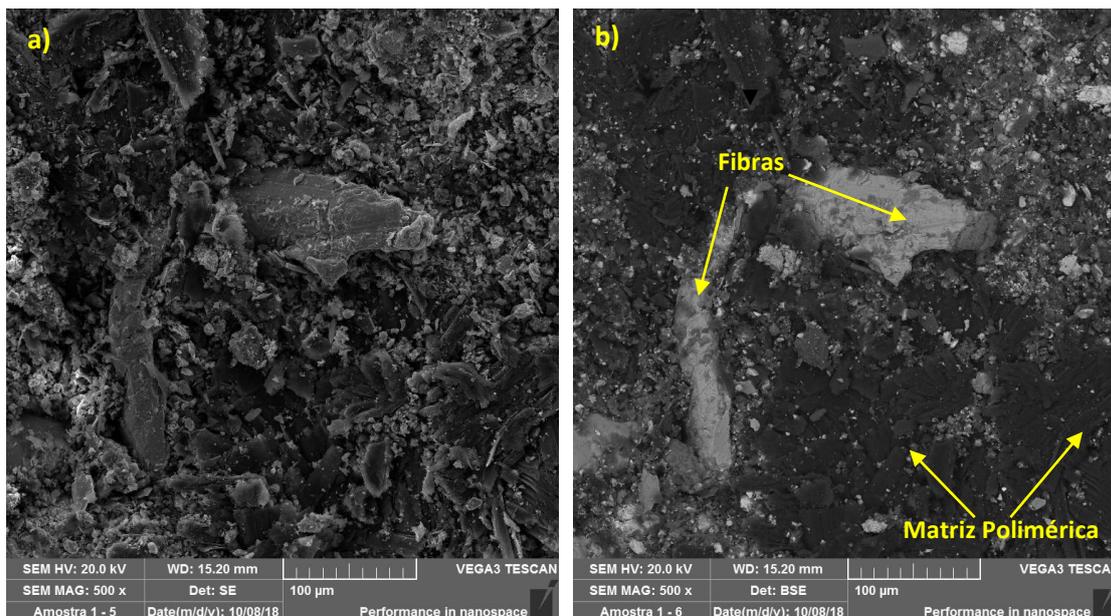


Figura 4.33: Imagens obtidos pelo MEV - 500x - para pastilha nova: a) SE; b) BSE.

A análise EDS, que representa uma estimativa semi-quantitativa da caracterização química de uma das amostras novas, é ilustrada pela Figura 4.34. Por meio desta figura é possível perceber que os principais elementos que compõe a pastilha são carbono, oxigênio, ferro e cobre.

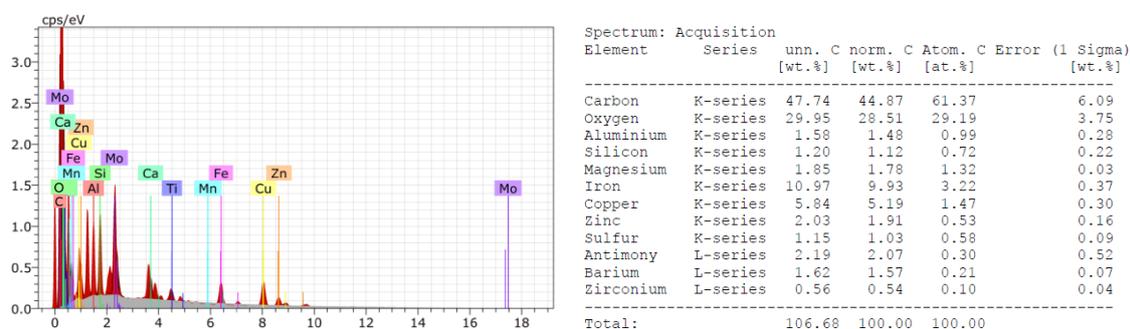


Figura 4.34: Espectro EDS de toda a amostra – pastilha nova.

4.5.2 Ensaios Descida de Serra

Após a realização dos ensaios em descida de serra, conforme procedimento descrito no tópico 3.4.3, foram preparadas amostras, retiradas da superfície das pastilhas, para a geração das micrografias utilizando-se o MEV. Foram adotadas as mesmas ampliações empregadas para as pastilhas novas analisadas no tópico anterior. A Figura 4.35 representa uma imagem da amostra com ampliação de 25 vezes. Diferentemente da pastilha nova, em 4.35(a) nota-se a presença de superfícies planas, que caracterizam os platôs de contato, formados

durante o processo de frenagem. Osterle e Urban (2006) ressaltam que camadas de atrito compactadas compreendem uma microestrutura nanocristalina e são observadas nas superfícies de ambas as partes do sistema tribológico: pastilha e disco. Uma vez que essas áreas são suaves e as áreas circundantes são ásperas, os autores afirmam que as primeiras são as áreas de contato portadoras de carga, que possuem poder de atrito. Osterle *et al* (2009) afirmam que a origem da formação do terceiro corpo durante o teste tribológico é o desgaste, que ocorre em diferentes escalas de tempo e por diferentes mecanismos. Um desses mecanismos é a deformação plástica severa na superfície do disco. Um segundo mecanismo de desgaste muito importante é a tribo-oxidação que, nos experimentos realizados por estes autores, conduziu à formação de óxido de ferro nano-cristalino.

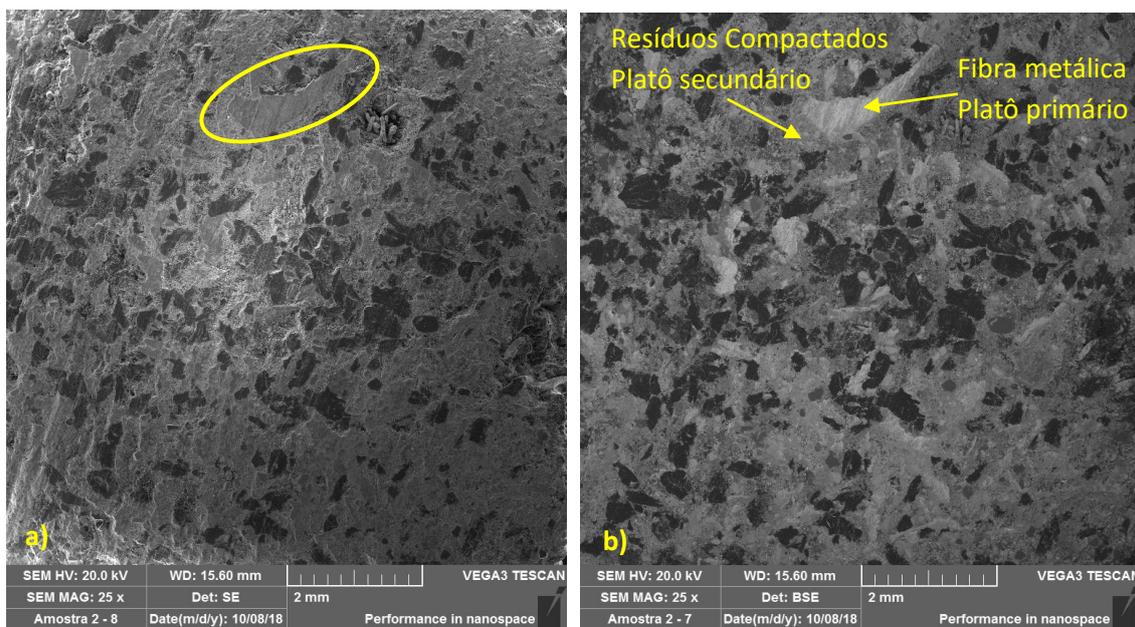


Figura 4.35: Imagens obtidos pelo MEV - 25x - para pastilha descida de serra: a) SE; b) BSE.

No detalhe da Figura 4.35 (a), exemplifica-se um dos platôs formados. Já em (b) na mesma região destacada, nota-se a presença de uma fibra metálica, que originou um platô primário. Ao redor dessa fibra, percebe-se a formação de um platô secundário, proveniente dos resíduos de desgaste compactados em torno desta fibra metálica. Segundo Verma *et. al.* (2015), os platôs primários derivam de uma menor taxa de remoção dos componentes mecanicamente estáveis e

resistentes ao desgaste do material da pastilha: partículas rígidas e fibras resistentes saindo da superfície das pastilhas quando começam a se desgastar. Esses platôs primários atuam como barreiras ao movimento das partículas de desgaste mais finas, que, portanto, tendem a parar e se acumular na interface com tais barreiras. Se essas partículas começam a ficar juntas, isso promove a formação dos platôs secundários, conforme relatado por Osterle *et al.* (2010), Eriksson, Bergman e Jacobson (2002). De acordo com Sugoço, Mutlu e Sugoço (2016) os platôs secundários do terceiro corpo são formados na superfície das pastilhas de freio por meio do acúmulo de resíduos de desgaste dos constituintes do material da pastilha que são compactados sob o efeito de pressão normal, tensão tangencial e calor proveniente do atrito.

A Figura 4.36 ilustra a ampliação de 500 vezes para a região destacada na Figura 4.35, onde é possível melhor visualizar a formação dos platôs primário e secundário. Nota-se, também, marcas de deslizamento em decorrência do processo de frenagem. Essas marcas foram geradas pela ação abrasiva dos “debris” (resíduos de desgaste) que, antes de serem removidos do sistema ou formarem novos platôs, atuam como partículas abrasivas sulcando as superfícies de desgaste. Percebe-se, também, que as áreas ao redor dos platôs de contato não mostram sinais de contato deslizante.

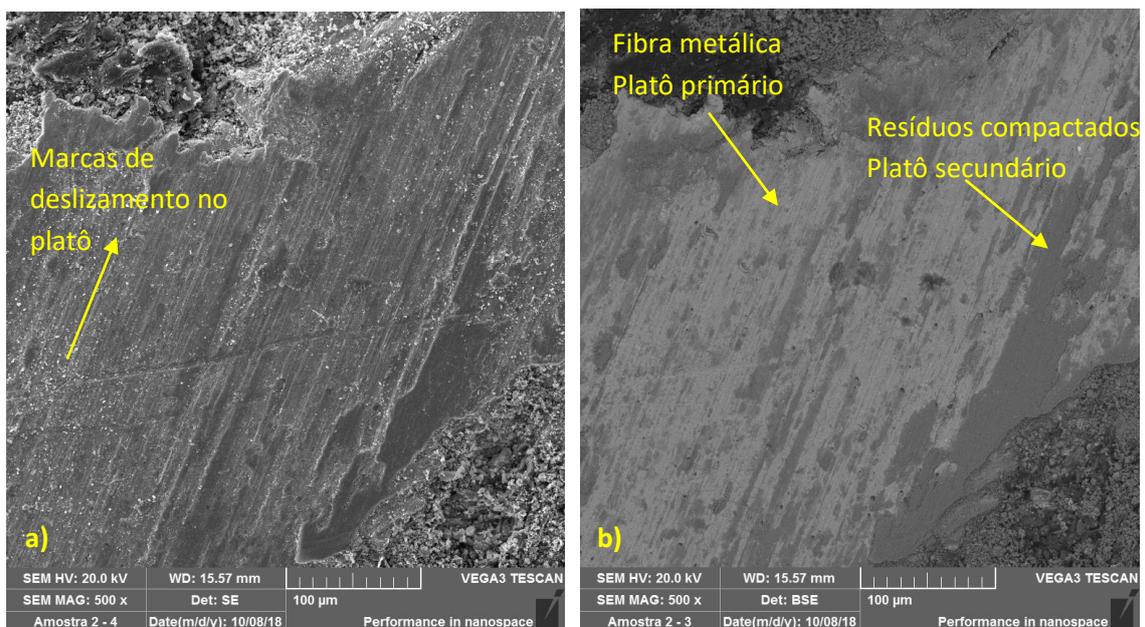


Figura 4.36: Imagens obtidos pelo MEV - 500x - para pastilha descida de serra: a) SE; b) BSE.

A Figura 4.37 representa uma estimativa semi-quantitativa da caracterização química de uma das amostras submetidas ao ensaio de descida de serra. Já a Figura 4.38 representa a espectrometria dispersiva de energia (EDS), que permite caracterizar em determinadas áreas da amostra a sua composição.

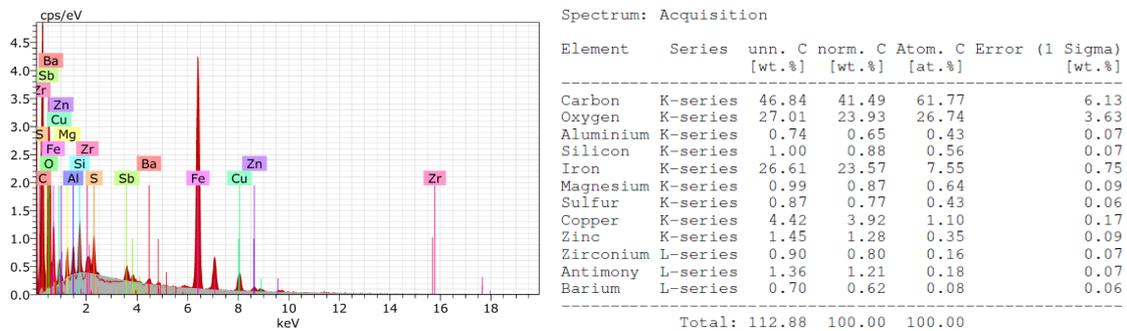


Figura 4.37: Espectro EDS de toda a amostra – pastilha ensaio descida de serra.

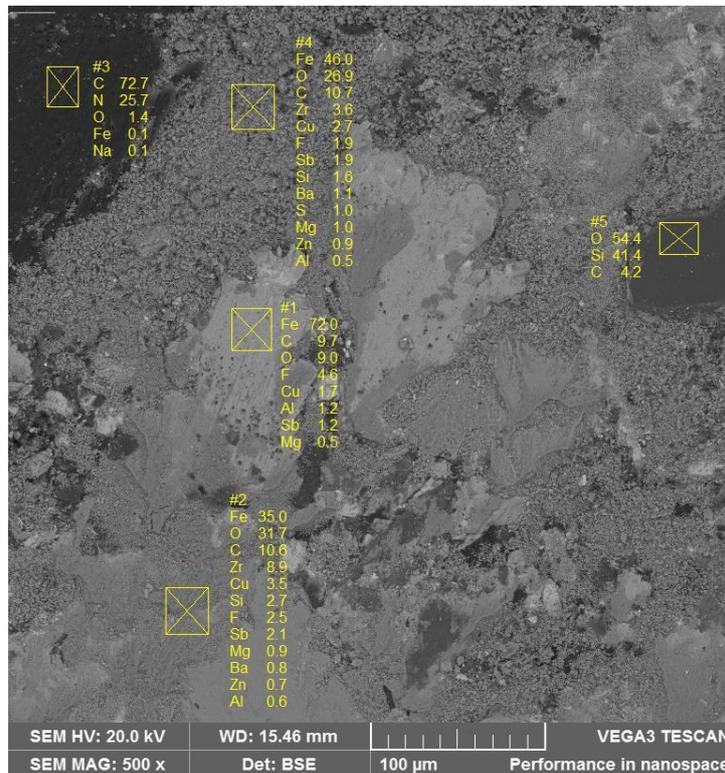


Figura 4.38: Análise EDS realizada em diferentes pontos em uma amostra submetida ao ensaio de descida de serra.

Conforme descrito por Wahlstrom *et. al.* (2017), a Figura 4.38 contém regiões típicas de platôs de contato. Nessa imagem, obtida pelo método BSE, conforme já mencionado, as regiões mais claras representam as fibras metálicas, como, por exemplo, o ponto #1 destacado. Essas regiões originam os platôs primários.

Nesses pontos, nota-se uma maior concentração do elemento ferro. Entretanto, percebe-se também a presença de carbono e oxigênio, que são provenientes do desgaste da matriz polimérica do material da pastilha. Segundo Hee e Filip (2005), a presença de oxigênio na camada de atrito indica que os elementos detectados são muito provavelmente na forma de partículas de óxidos, conforme já citado por Osterle *et al* (2009) e Verma (2016).

Conforme relatado por Osterle e Dmitriev (2016), a fase principal do terceiro corpo, que leva à formação dos tribofilmes, é o óxido de ferro Fe_3O_4 . Ainda segundo esses autores, embora o Fe_2O_3 possa às vezes também ser formado, há evidências de que o Fe_3O_4 seja a fase principal por um motivo simples: ao tocar em uma pastilha ou disco de freio usado, as mãos ficarão sujas na cor preta, sendo a cor sensível ao tipo de óxido. O Fe_3O_4 (magnetita) é preto e o Fe_2O_3 (hematita) é avermelhado ou pelo menos marrom. Embora, principalmente revelada apenas pelas técnicas TEM, a estrutura nanocristalina do terceiro corpo totalmente processado contenha outras espécies além do Fe_3O_4 .

De acordo com Eriksson (2000), a matriz polimérica da pastilha é um material aglutinante utilizado para unir os demais ingredientes do material de fricção, como por exemplo resinas cresol, resinas fenólicas, fenol formaldeído e novolack. Todos esses materiais possuem carbono e oxigênio em sua formulação. Verma *et al.* (2015) e Luo e Yang (2017) ressaltam que a decomposição térmica do aglutinante do material da pastilha já ocorre em temperaturas por volta de 220°C , sendo ainda mais severa a partir de 280°C . A região com aspecto de platôs secundário (ponto #2) apresentou composições mais significativas dos elementos ferro, carbono e oxigênio.

As regiões mais escuras (ponto #3 – Figura 4.38) representam a matriz polimérica do material, cuja composição é predominante em carbono. Segundo Eriksson e Jacobson (2000) e Osterle e Dmitriev (2016) a grafite é muito usada nas pastilhas de freio automotivas para estabilizar o coeficiente de atrito e também como um lubrificante. Já o Ponto #4 representam detritos de desgaste que, segundo Wahlstrom *et. al.* (2017), são provenientes tanto do material do disco quanto da pastilha. Essa região apresentou os elementos ferro, oxigênio e carbono como os mais representativos.

4.5.3 Ensaio Frenagem de Emergência

Após a realização dos ensaios submetidos às frenagens de emergência, conforme procedimento descrito no tópico 3.4.3, foram preparadas amostras, retiradas da superfície das pastilhas, para a geração das imagens por meio do MEV. A Figura 4.39 apresenta uma imagem da amostra com ampliação de 25 vezes. Em 4.39(a) nota-se a presença de superfícies planas, que caracterizam os platôs de contato, formados durante o processo de frenagem. Comparando esta imagem com a Figura 4.35(a), que representa a mesma ampliação de uma amostra submetida ao experimento de descida de serra, percebe-se a presença de platôs maiores e uma maior área relativa da amostra contendo platôs. Esse resultado coincide com os encontrados na análise de correlação e por meio dos gráficos de efeitos principais. Conforme observados nos tópicos 4.2.1 e 4.2.2, as temperaturas alcançadas nos experimentos em descida de serra foram mais elevadas.

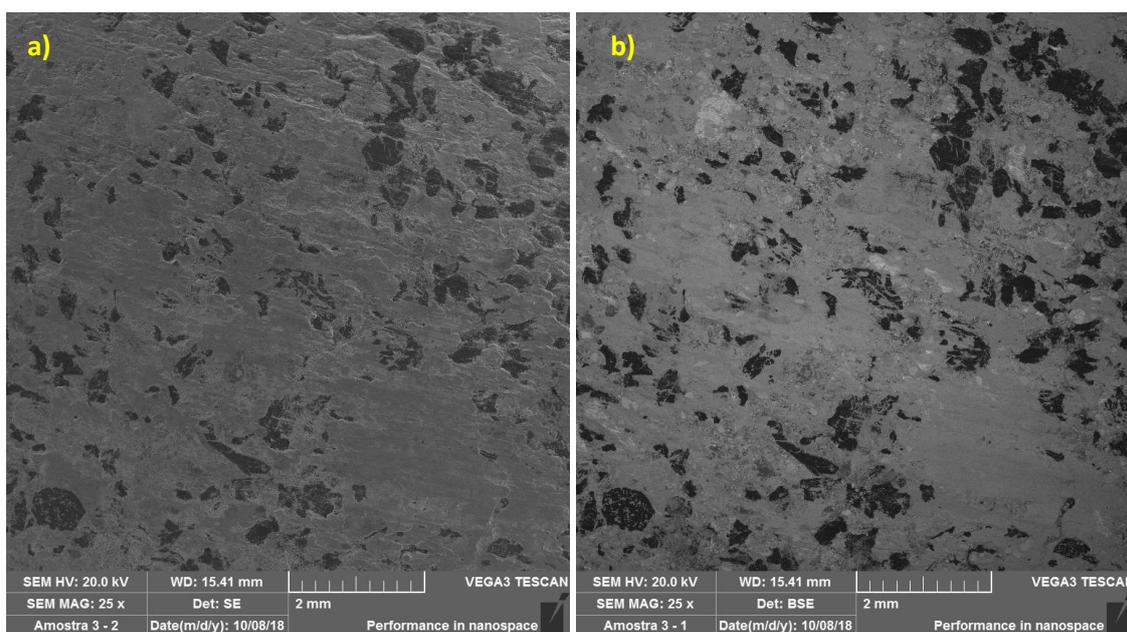


Figura 4.39: Imagens obtidos pelo MEV - 25x - para pastilha sob frenagem de emergência: a) SE; b) BSE.

Verma *et al.* (2016) menciona que em altas temperaturas, o desgaste severo é determinado pela decomposição da resina fenólica presente no material da pastilha, o que leva à baixa retenção de resíduos de desgaste e baixo tempo de permanência para a formação de camadas protetoras de desgaste efetiva. Dessa forma, a área relativa formada por platôs em temperaturas mais elevadas

é menor. Além disso, Wang *et al.* (2008) ressaltam que um aumento gradual da temperatura, principalmente acima da temperatura que provoca a fadiga térmica da pastilha, promove diminuição da força molecular entre os elementos constituintes dos materiais da matriz polimérica.

Foi observado, também, um coeficiente de atrito médio mais elevado nos experimentos em frenagem de emergência. Segundo Deng *et al.* (2010) um aumento adicional na temperatura da superfície pode ser alta o suficiente para que o material da superfície seja decomposto termicamente, o que resultará na rápida diminuição do coeficiente de atrito e, como consequência, um aumento na taxa e desgaste. Segundo Eriksson, Bergman e Jacobson (2002), pode-se afirmar que o atrito geralmente aumenta com o aumento da área de contato real. Esses fatores explicam o maior coeficiente de atrito médio observado nos ensaios submetidos à frenagem de emergência.

A Figura 4.40 ilustra a ampliação de 500 vezes de uma amostra de um experimento de descida de serra, onde é possível melhor visualizar a formação dos platôs primário e secundário. Nota-se que o platô secundário foi formado a partir da compactação de resíduos de desgaste em torno de duas fibras metálicas, que previamente formaram platôs primários. Nota-se, também, marcas de deslizamento em decorrência do processo de frenagem.

A Figura 4.41 mostra uma análise semi-quantitativa da caracterização química de uma das amostras submetidos ao ensaio de frenagem de emergência, enquanto a 4.42 representa a caracterização química EDS realizada em diferentes pontos em uma amostra submetida ao ensaio de frenagem de emergência. Nessa imagem, obtida pelo método BSE, as regiões mais claras representam as fibras metálicas, ponto #2. Nesses pontos, nota-se uma maior concentração do elemento ferro. Já nas regiões típicas com características de platôs secundários (#3), também houve considerável concentração do elemento ferro, e a presença também de outros elementos metálicos como cobre, magnésio e zinco. Não foi observado a presença de carbono e oxigênio nesses platôs secundários. As regiões mais escuras representam a matriz polimérica do material, cuja composição é predominante em carbono.

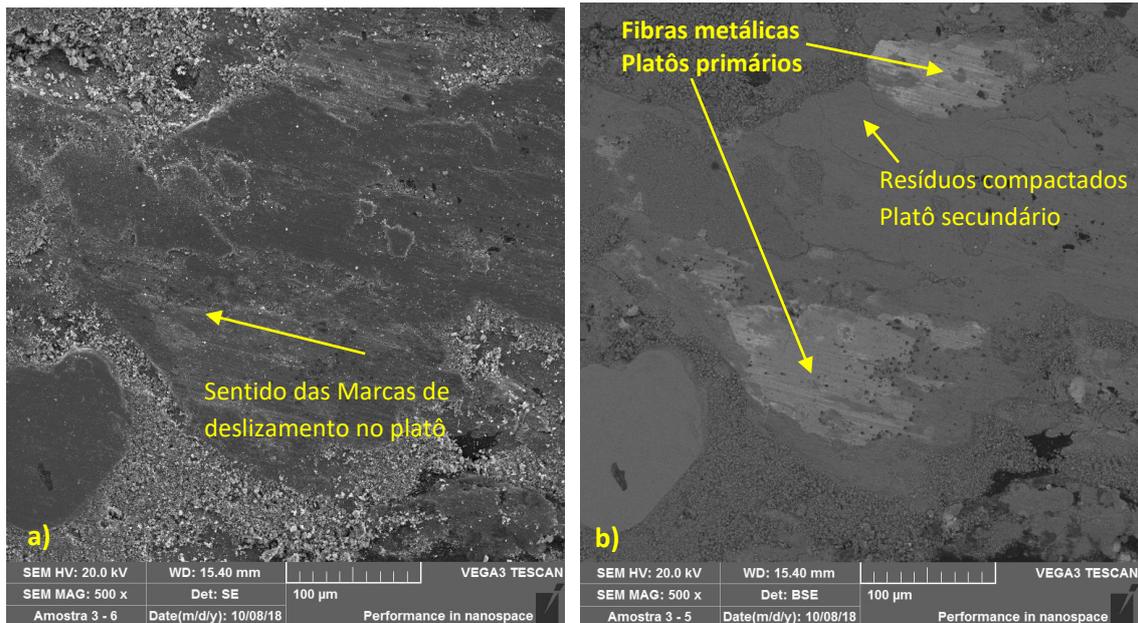


Figura 4.40: Imagens obtidos pelo MEV - 500x - para pastilha sob frenagem de emergência: a) SE; b) BSE.

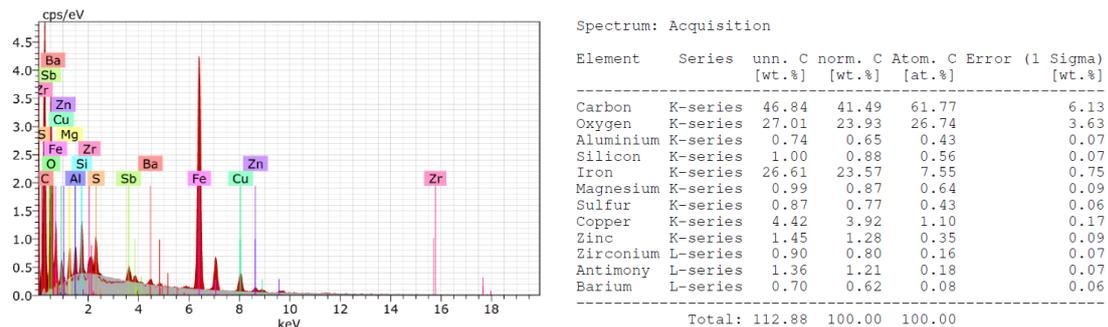


Figura 4.41: Espectro EDS de toda a amostra – pastilha ensaio frenagem de emergência.

Com o intuito de melhor analisar as estimativas das composições químicas nos platôs primários e secundários, foram analisados um maior número de pontos em cada uma destas regiões das pastilhas. A Figura 4.43 representa a seleção de três regiões com características de platôs primários relativos aos dois tipos de ensaios realizados em veículo. A Tabela 4.15 representa as estimativas de composições químicas de cada um destes platôs selecionados para os dois tipos de ensaios em veículo.

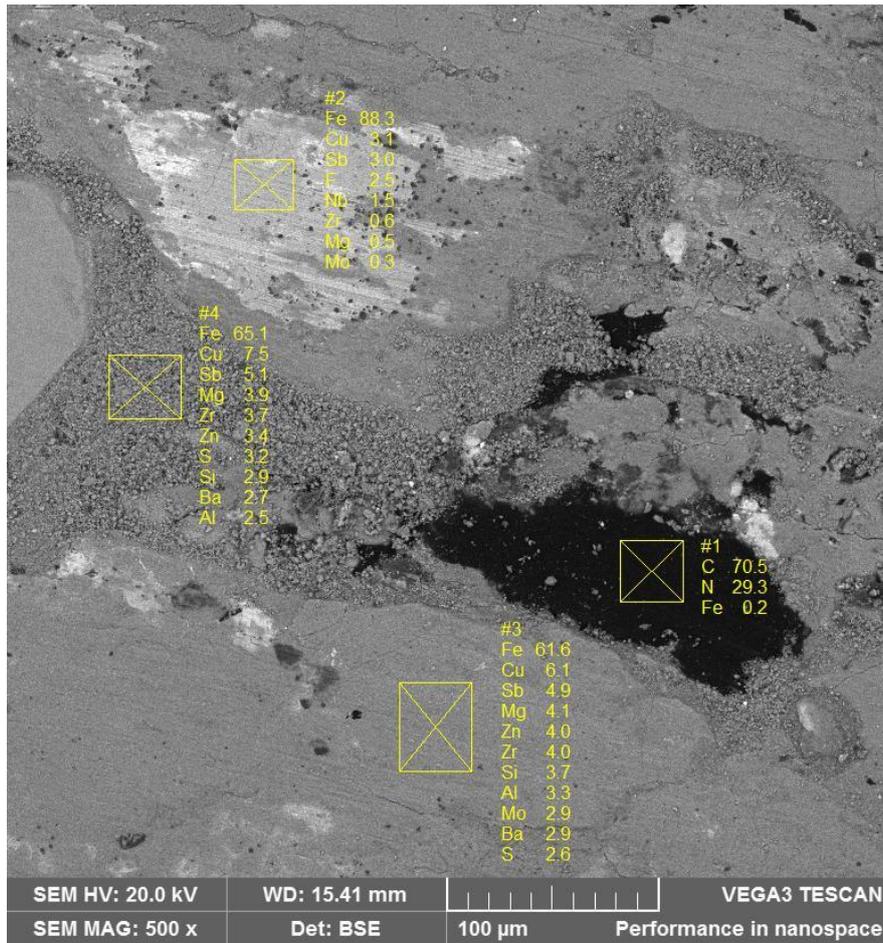


Figura 4.42: Análise EDS realizada em diferentes pontos em uma amostra submetida ao ensaio de descida de serra.

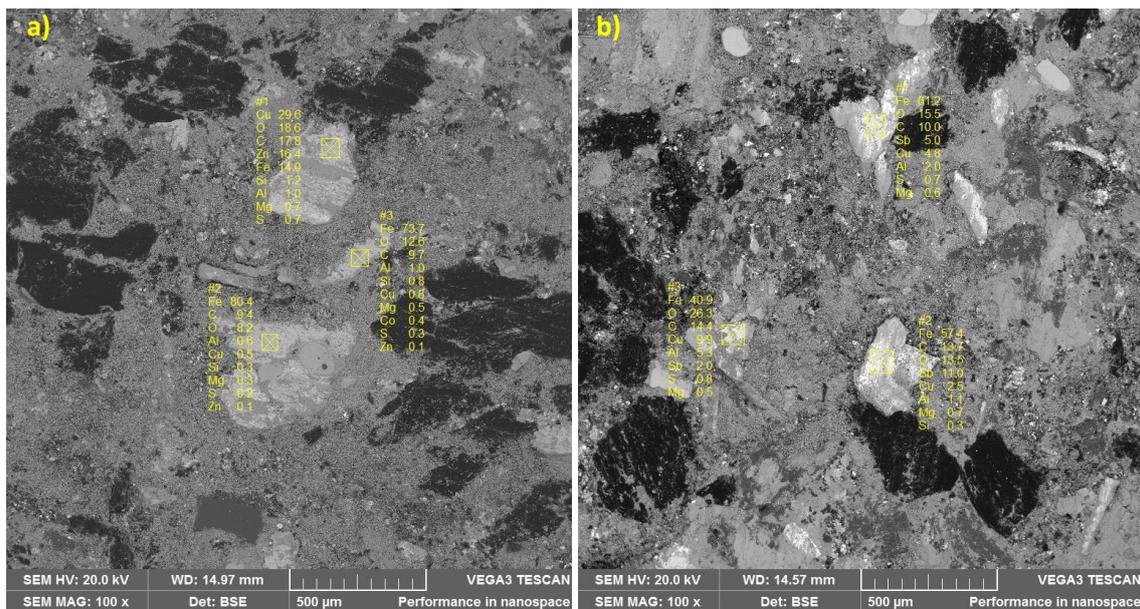


Figura 4.43: Análise EDS realizada em platôs primários: a) ensaio de descida de serra simulada. b) ensaio de frenagem de emergência.

Tabela 4.15: Composições dos platôs primários selecionados na Figura 4.43.

Elemento	Descida de Serra			Frenagem de Emergência		
	% platô 1	% platô 2	% platô 3	% platô 1	% platô 2	% platô 3
Fe	80,4	73,7	14	40,9	61,2	57,4
C	9,4	9,7	17,8	14,4	10	13,7
O	8,2	12,6	18,6	26,3	15,5	13,5
Al	0,6	1	1	5,3	2	1,1
Cu	0,5	0	29,6	9,9	4,6	2,5
Si	0,3	0,8	1,2	-	-	-
Mg	0,3	0,5	0,7	0,5	0,6	0,7
S	0,2	0,3	0,7	0,8	0,7	0,3
Zn	0,1	0,1	16,4	-	-	-
Sb	-	-	-	2	5	11

Analisando-se a Figura 4.43 e a Tabela 4.15, os resultados de estimativa da composição química dos platôs primários coincidem com os observados nas Figuras 4.38 e 4.42, onde se observou composições mais elevadas de elementos metálicos (especificamente o ferro). Entretanto, observou-se, também, a presença de carbono e oxigênio, provenientes de resíduos de desgaste da resina fenólica. Com o intuito de analisar se houve diferenças de composição química nos platôs primários desses dois tipos de ensaios, foi empregada o teste t, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.16. Como não houve nenhum p-valor abaixo do nível de significância $\alpha=0,05$, não se pode afirmar que houve diferenças significativas nas estimativas de composição química entre os platôs primários analisados para os tipos de ensaios em veículo.

Tabela 4.16: Teste t – composição platôs primários.

Elemento	t ₀	P-valor
Fe	0,13	0,908
C	-0,13	0,908
O	-1,06	0,366
Al	0,44	0,706
Cu	0,13	0,908
Si	2,68	0,099
Mg	-0,77	0,520
S	-0,93	0,407
Zn	1,02	0,416
Sb	2,27	1,151

Análise semelhante foi conduzida para os platôs secundários, representados pela Figura 4.44 e Tabela 4.17. Já a Tabela 4.18 representa o teste t para analisar as estimativas das composições dos platôs secundários entre os diferentes ensaios. Observou-se diferenças médias significativas apenas nas estimativas da composição dos elementos enxofre (S) e antimônio (Sb), que são elementos com baixos teores na composição química geral das pastilhas e também nos platôs secundários.

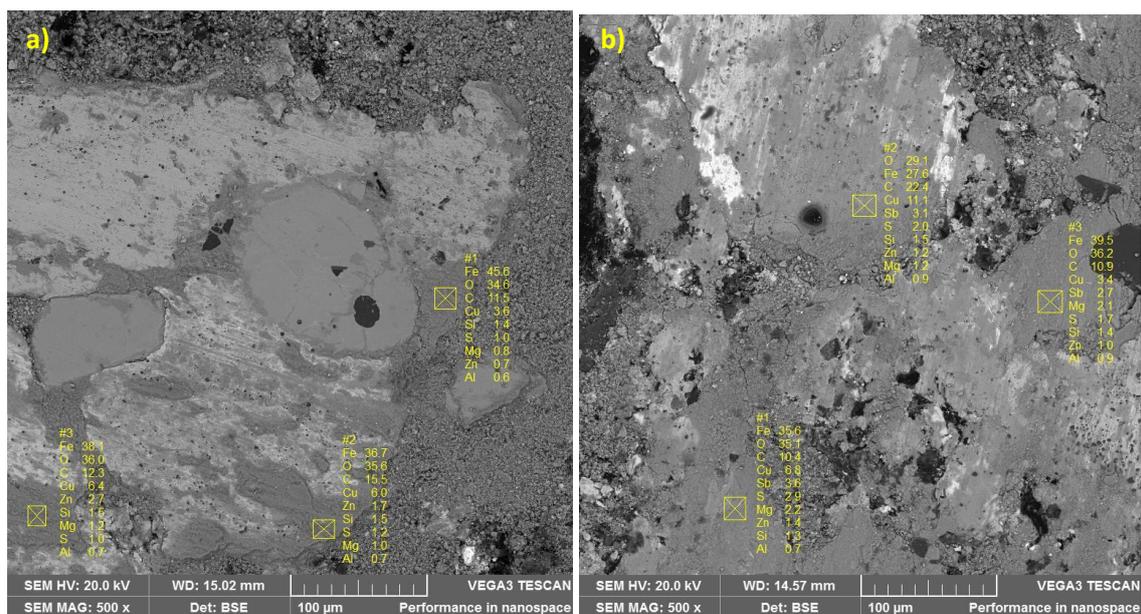


Figura 4.44: Análise EDS realizada em platôs primários - ensaio de descida de serra. a) SE; b) BSE.

Tabela 4.17: Composições dos platôs secundários selecionados na Figura 4.44.

Elemento	Descida de Serra			Frenagem de Emergência		
	% platô 1	% platô 2	% platô 3	% platô 1	% platô 2	% platô 3
Fe	38,1	36,7	45,6	35,6	27,6	39,5
C	12,3	15,5	11,5	10,4	22,4	10,9
O	36	35,6	34,6	35,1	29,1	36,2
Al	0,7	0,7	0,6	0,7	0,9	0,9
Cu	6,4	6	3,6	6,8	11,1	3,4
Si	1,5	1,5	1,4	0,7	1,5	1,4
Mg	1,2	1	0,8	2,2	1,2	2,1
S	1	1,2	1	2,9	2	1,7
Zn	2,7	1,7	0,7	1,4	1,2	1
Sb	-	-	-	3,6	3,1	2,7

Tabela 4.18: Teste t – composição platôs secundários.

Elemento	t ₀	P-valor
Fe	1,32	0,278
C	-0,36	0,755
O	0,86	0,480
Al	-2,24	0,155
Cu	-0,74	0,537
Si	1,05	0,404
Mg	-2,43	0,133
S	-3,09	0,037
Zn	0,85	0,485
Sb	12,04	0,007

De acordo com Ma, Liu, *et. al.* (2018) e Silvestre (2013) as propriedades tribológicas dos materiais de atrito estão intimamente relacionadas à morfologia das superfícies desgastadas, incluindo detritos de desgaste, partículas duras, platôs e microfissuras. É possível observar a presença de partículas duras e detritos de desgaste na superfície desgastada. As fibras metálicas distribuídas aleatoriamente (desiguais) na matriz polimérica, que constitui a pastilha, levam à formação dos platôs secundários que produzem uma série de asperezas duras e detritos sob forma de atrito e calor. Estas asperezas duras e detritos, que são o principal fator para o valor abrasivo, cortaram a superfície desgastada e, em seguida, uma série de canais rasos paralelos foram formados na superfície desgastada do material de fricção. Isto caracteriza um mecanismo de desgaste abrasivo. Esse mecanismo de desgaste está representado nas Figuras 4.45 e 4.46.

Conforme descrito por Wang e Liu (2014) pontos de adesão são produzidos na superfície de atrito a altas temperaturas devido à adesão metálica entre as fibras de aço e o disco rotativo de ferro fundido. Conseqüentemente, um contato adesivo maior e também detritos de desgaste apareceram na superfície sob a ação da força de cisalhamento. Esse contato pode ser aumentado e aprofundado quando as asperezas duras e detritos de desgaste acima destroem a superfície da matriz solta (platôs secundários) e, provavelmente, constituem a causa principal do desgaste do adesivo. O teor do elemento ferro tornou-se mais elevado nos dois tipos de ensaio de frenagem em relação à amostra nova (comparando-se as Figuras 4.37 e 4.41, que representam a estimativa

composicional das amostras submetidas, respectivamente, as ensaios de descida de serra e de emergência, com a Figura 4.34, que representa a amostra nova). Esse achado caracterizou uma possível adesão metálica entre as fibras de aço e o disco rotativo de ferro fundido, com transferência de material desgastado do disco para a pastilha.

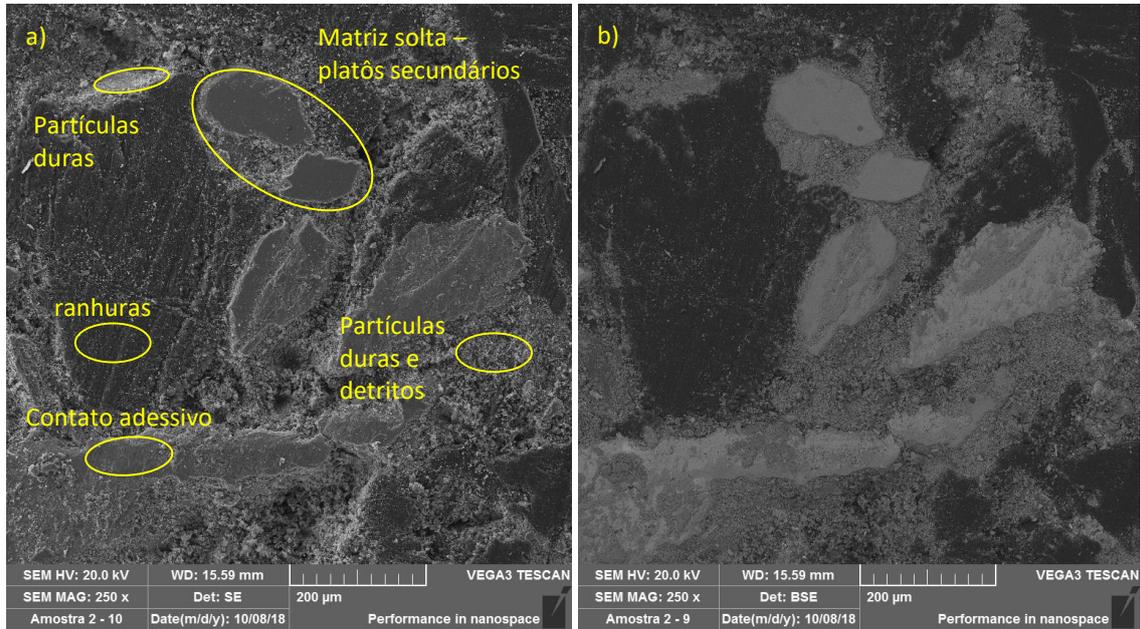


Figura 4.45: Mecanismos de desgaste - ensaio de descida de serra. a) SE; b) BSE.

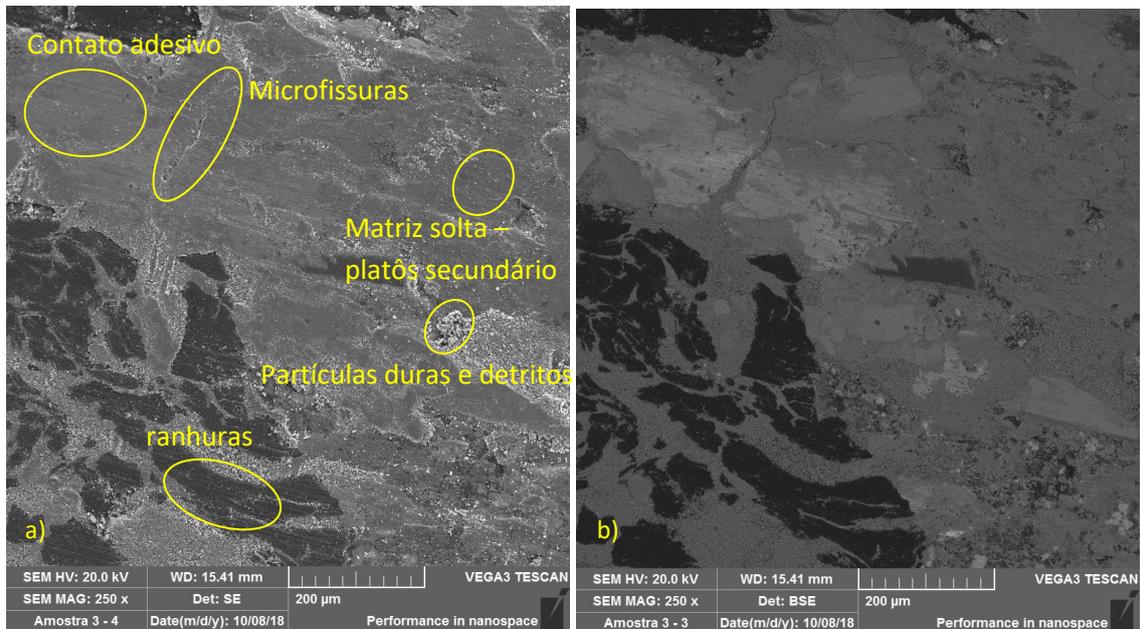


Figura 4.46: Mecanismos de desgaste – frenagem de emergência. a) SE; b) BSE.

Por outro lado, há um campo instável geral de pressão e temperatura na superfície de atrito a alta temperatura, conforme descrito por Fu *et. al.* (2008). As diferentes taxas de expansão térmica nas regiões na superfície de atrito, devido à composição heterogênea da pastilha, poderiam resultar na formação de microfissuras na superfície desgastada, conforme pode ser observado na Figuras 4.45 e 4.46, mostrando características típicas de desgaste por fadiga.

Straffelini (2015) salienta que, em geral, o coeficiente de atrito para aplicações em freios pode ser expresso pelas contribuições abrasiva e adesiva: $\mu = \mu_{abr} + \mu_A$. A contribuição abrasiva está relacionada às interações entre as asperidades da pastilha e do disco. Rabinowicz (2013) propõe o seguinte modelo para a contribuição abrasiva no coeficiente de atrito: $\mu_{abr} = \tan \theta$, onde θ é o ângulo de ataque médio que as asperidades formam com a superfície deslizante. Não se tem neste estudo uma estimativa para θ , mas de acordo com Straffelini (2015) mesmo em superfícies muito rugosas seu valor não excede 10°. A parte restante de μ é obtida pela interação adesiva entre o par tribológico. Essa contribuição, segundo Rabinowicz (2013), pode ser representada por $\mu_{ade} = \tau_{max} A_r / F_N$, em que τ_{max} é a tensão máxima de cisalhamento para separar as asperidades de contato, que é, aproximadamente proporcional ao trabalho de adesão, conforme relatado por Straffelini (2015), A_r é a área real de contato e F_N é a carga aplicada. Desta forma, espera-se que a contribuição de μ_{ade} seja mínima quando a pastilha tiver sua rugosidade original (material novo), uma vez que A_r é bastante baixa. A área real de contato entre as duas superfícies de contato é determinada principalmente pelos platôs de contato.

À medida que a rugosidade é reduzida, a taxa de desgaste diminui e o coeficiente de atrito aumenta. Esse comportamento é determinado pela redução progressiva da contribuição da componente abrasiva no desgaste. Ao mesmo tempo, reduzindo a rugosidade, a interação da componente adesiva entre pastilha e o disco aumenta fortemente e isso induz um aumento no coeficiente de atrito. Comparando-se as Figuras 4.45 e 4.46, juntamente com as análises realizadas das Figuras 4.35 e 4.39, nota-se que a superfície das amostras que representam os ensaios de frenagem de emergência apresentaram aspecto mais plano e liso, onde percebe-se a presença de platôs maiores e uma maior área relativa da amostra contendo platôs. Tais resultados coincidem com os

encontrados na análise de correlação e teste t representados, respectivamente, pelas Tabelas 4.13 e 4.14, e pelos gráficos de efeitos principais, ilustrados pela Figura 4.31. Foi observado, também, parâmetros de rugosidade superficial menores para as amostras submetidas aos ensaios de frenagem de emergência. Dessa forma, associando-se os resultados obtidos com as teorias propostas por Straffelini (2015) e Rabinowicz (2013), espera-se que a contribuição da componente abrasiva do atrito seja mais reduzida nos ensaios de frenagem de emergência. Entretanto, por apresentar características superficiais adesivas mais dominantes em relação aos ensaios de frenagem em descida de serra, seu nível de importância relativa torna-se capaz de superar sua defasagem em relação à componente abrasiva, o que faz o coeficiente de atrito médio mais elevado nos ensaios de frenagem de emergência.

4.6 Análise das superfícies das amostras por meio de Perfilometria

As imagens topográficas das texturas superficiais das amostras analisadas estão ilustradas nas Figuras 4.47 a 4.49. Já os parâmetros de rugosidade superficial das amostras estão representados na Tabela 4.19.

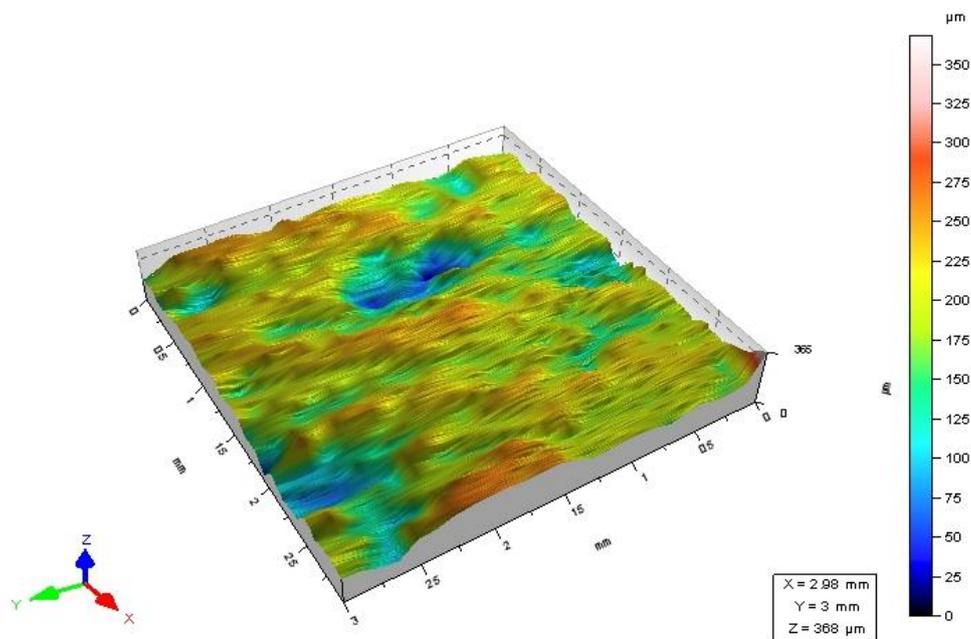


Figura 4.47: Topografia da superfície - amostra da pastilha nova.

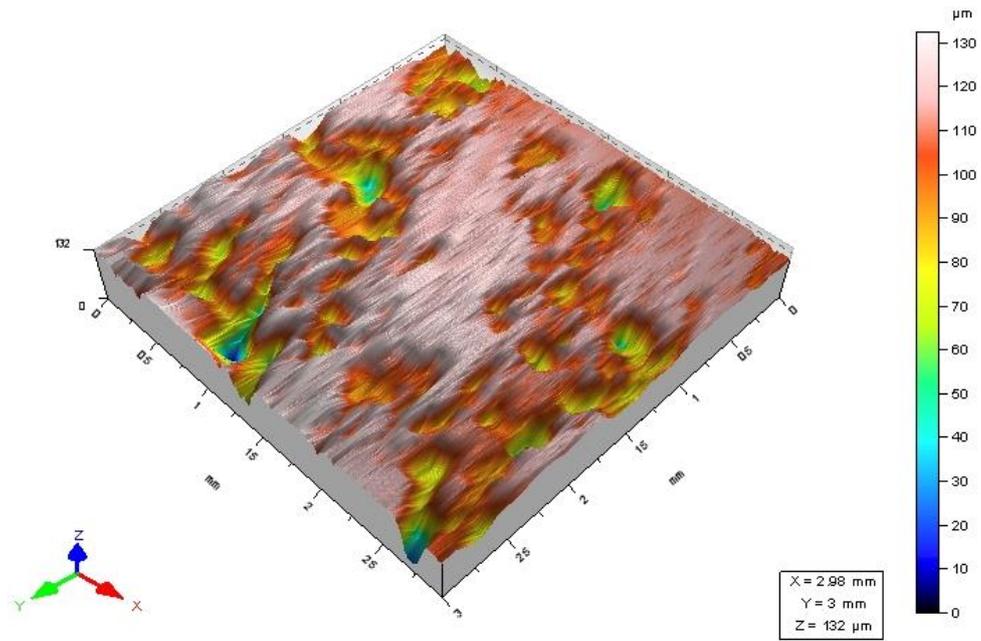


Figura 4.48: Topografia da superfície - amostra ensaio descida de serra.

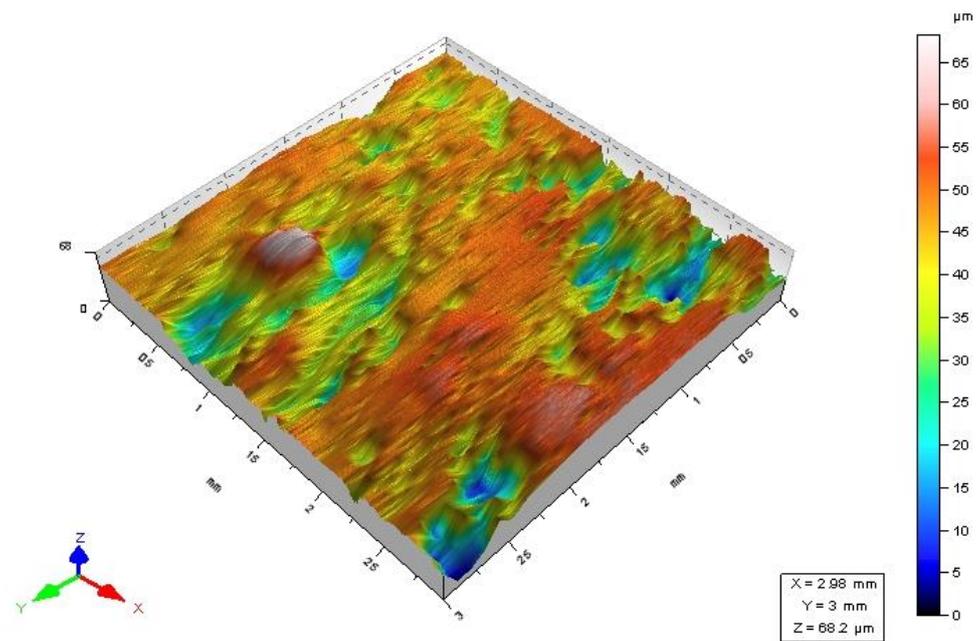


Figura 4.49: Topografia da superfície - amostra ensaio frenagem de emergência.

Tabela 4.19: Resumo - parâmetros de rugosidade tridimensional.

		Parâmetros de amplitude - ISO 25178								
Amostra		Sq (μm)	Ssk	Sku	Sp (μm)	Sv (μm)	Sz (μm)	Sa (μm)	Smr (%)	Smc (μm)
1	Pastilha nova	59,8	-0,267	2,48	130	211	340	49,7	0,036	77,6
4	DS	48,2	-0,117	2,26	107	147	254	40,4	0,021	64
3	EM	33	0,0394	2,28	80,1	90,5	171	27,2	0,022	46,8

Por meio da Tabela 4.19, percebe-se que a pastilha nova apresentou a rugosidade média S_a , parâmetro baseado na média dos desvio-padrão entre picos e vales em uma superfície, consideravelmente superior em relação às demais amostras. Já a amostra submetida ao experimento de frenagem de emergência apresentou o menor valor de rugosidade média S_a . Com relação ao parâmetro S_q , que descreve a altura estatística baseada na variância (rms) da topografia superficial em relação a um plano médio, a mesma tendência foi observada, ou seja, a amostra de pastilha nova apresentou a maior variância das alturas do perfil em relação ao plano médio, enquanto que a amostra do ensaio de frenagem de emergência a menor variância.

Pelos parâmetros que avaliam a altura máxima dos picos (S_p), e a profundidade máxima de um vale (S_v), a pastilha nova apresentou altura máxima dos picos mais elevada e a maior profundidade máxima de um vale; já a amostra de frenagem de emergência os menores valores para S_p e S_v . Analisando-se o parâmetro S_z , que calcula a média entre os cinco maiores picos e cinco vales mais profundos, é possível notar a mesma tendência em relação a S_p e S_v .

A análise dos parâmetros S_a , S_q , S_p , S_v e S_t indicam que dentre os três tipos de amostras, a amostra nova apresentou o perfil de superfície mais irregular, e que o ensaio frenagem de emergência apresentou um perfil superficial mais regular se comparado com o ensaio de descida de serra simulada.

Esses resultados dos parâmetros de rugosidade tridimensional coincidem com os resultados obtidos para os parâmetros de rugosidade superficial R_a , R_z e R_t observados por meio do teste t, representados pela Tabela 4.14, e gráficos de efeitos principais, ilustrados na Figura 4.31. Foi possível notar que diferentes condições de operação do sistema de freio produziram parâmetros de rugosidade bidimensional significativamente distintos nas superfícies do material de atrito e que as amostras menos rugosas (superfícies mais regulares) foram as submetidas aos ensaios de frenagem de emergência. Esses resultados também são condizentes com as análises das imagens obtidas pelo MEV observadas nas Figuras 4.35 e 4.39, juntamente com as análises realizadas das Figuras 4.45 e 4.46, onde se observou que as superfícies das amostras que representam os ensaios de frenagem de emergência apresentaram aspecto mais plano e liso.

Tais resultados, obtidos por perfilometria tridimensional, além de reforçarem os resultados alcançados pelas medidas de rugosidade bidimensional realizadas, contribuem, também, para corroborar com a análise da correlação estatística, observados na Tabela 4.13. Dessa forma, foi possível ratificar que são significativas as correlações estatísticas, em decorrência dos dois diferentes tipos de ensaios de frenagem, entre as medidas dos parâmetros de rugosidade tanto com as medidas das características dos platôs formados na superfície, quanto com a medida de desempenho do sistema de freio, por meio do monitoramento do coeficiente de atrito.

Em relação ao parâmetro Ssk do perfil, que mede a assimetria dos desvio de uma superfície em relação a um plano médio, apresentou valores negativos (mas próximos a zero) para pastilha nova e descida de serra; e próximo a zero para frenagem de emergência. Um valor de Ssk igual a zero indica uma superfície gaussiana, que possui distribuição de altura simétrica. Já Ssk negativo indica distribuição de alturas próxima ao plano médio.

O parâmetro curtose (Sku) indica a forma da distribuição de alturas da curva de amplitude. Todos as amostras apresentaram Sku inferior a 3, o que representa uma distribuição de alturas mais espalhada.

5- CONCLUSÕES

No presente estudo foram aplicados procedimentos metodológicos para condução de ensaios de frenagem tanto em veículo real quanto em bancada de ensaios de freios. Uma contribuição inédita dessa pesquisa se observa em conter experimentos de frenagem em veículo, uma vez que a grande maioria dos estudos nessa área concentram-se na realização de experimentos em bancada. Por mais que ensaios em bancada sejam capazes de apresentar boa representatividade do comportamento da frenagem, testes conduzidos diretamente no veículo permitem analisar o comportamento real da frenagem. Ensaios em veículo são mais difíceis de serem realizados pois demandam custos mais elevados, como a instrumentação do veículo, disponibilidade de pista apropriada, tempo do piloto e do engenheiro responsável pela execução dos testes.

Para ensaios em veículo em real, a metodologia consistiu na análise de correlação entre características superficiais das pastilhas e medidas de desempenho. As características superficiais das pastilhas foram obtidas por meio de microscopia eletrônica de varredura e de medidas de rugosidade bidimensional e tridimensional. Já as medidas de desempenho durante a frenagem, temperatura e coeficiente de atrito, foram mapeadas por meio do monitoramento dos sinais captados pelos sensores instalados no veículo. Imagens de microscopia eletrônica de varredura e estimativas semi-quantitativas das composições químicas das pastilhas foram utilizadas para explicar os resultados encontrados em relação aos ensaios em descida de serra e frenagem de emergência. Em termos práticos aplicáveis, essa metodologia permitiu analisar diferenças entre essas duas condições operacionais de frenagem, as correlações entre os grupos de variáveis envolvidas no processo de frenagem, bem como analisar características superficiais presentes nas pastilhas de freio que explicam possíveis diferenças de comportamento experimentadas pelo veículo durante a frenagem.

Considerando-se os objetivos propostos para essa pesquisa, obteve-se as seguintes conclusões quanto aos ensaios em veículo:

- Observou-se a presença do efeito *fade* em temperaturas entre 200 e 250° e diferenças de desempenho durante a frenagem entre as duas condições operacionais analisadas. Frenagens de emergência resultaram em menores valores de temperatura ao final da frenagem e maiores valores de coeficiente de atrito médio na interface de atrito;
- Por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), foi possível comparar amostras novas e submetidas aos dois tipos de ensaios em veículo. Nas superfícies das amostras novas, inicialmente mais ásperas, conforme constatado pelos parâmetros de rugosidade, mostrou-se que não existem platôs de contato. Para os ensaios em descida de serra e de frenagem de emergência, foi constatada a presença de platôs primário e secundário. Já por meio da análise EDS foi possível obter a estimativa da caracterização química de alguns pontos específicos das superfícies das amostras. Não se observou diferenças significativas nas composições químicas dos principais elementos nesses pontos específicos analisados nas pastilhas sob os ensaios de frenagem em descida de serra e de emergência.
- Foi possível identificar os principais mecanismos de desgaste resultantes do processo de frenagem, a saber: desgaste abrasivo, oriundos das asperezas duras e detritos, gerados no desgaste do par tribológico, que cortaram e formaram ranhuras na superfície das pastilhas; desgaste adesivo, produzidos na superfície de atrito a altas temperaturas devido à adesão metálica entre as fibras de aço e o disco rotativo de ferro fundido; e desgaste por fadiga, produzido devido à instabilidade de pressão e temperatura na superfície de atrito a alta temperatura.
- Observou-se uma tendência de correlação estatística forte e significativa entre as propriedades superficiais das amostras quanto à formação de platôs, parâmetros de rugosidade em duas dimensões e medidas de desempenho durante a frenagem. Notou-se uma tendência de maiores valores médios de coeficiente de atrito para os ensaios de frenagem de emergência, onde se observou, também, maior comprimento médio, menor número médio e um maior percentual médio de área das amostras com presença de platôs.

- Quanto aos parâmetros de rugosidade $2d$, observou-se que os ensaios de frenagem de emergência levaram a menores valores dos parâmetros de rugosidade R_a , R_z e R_t . Já com relação aos parâmetros de rugosidade tridimensional, a pastilha nova apresentou a rugosidade média S_a superior em relação às demais amostras. Já a amostra submetida ao experimento de frenagem de emergência apresentou o menor valor de rugosidade média S_a . A mesma tendência foi observada em relação ao parâmetro S_q , ou seja, a amostra de pastilha nova apresentou a maior variância das alturas do perfil em relação ao plano médio, enquanto que a amostra do ensaio de frenagem de emergência a menor variância. A pastilha nova apresentou altura máxima dos picos (S_p) mais elevada e a maior profundidade máxima de um vale (S_v); já a amostra de frenagem de emergência os menores valores para S_p e S_v . Por meios do parâmetro S_z foi possível notar a mesma tendência em relação a S_p e S_v . A análise dos parâmetros S_a , S_q , S_p , S_v e S_t indicam que dentre os três tipos de amostras, a amostra nova apresentou o perfil de superfície mais irregular, e que o ensaio frenagem de emergência resultou em um perfil superficial mais regular se comparado com o ensaio de descida de serra.

A contribuição inédita nos ensaios em bancada conduzidos nesse estudo concentra-se no método de aplicação de técnicas estatísticas combinadas com ferramentas de otimização e de predição para as variáveis envolvidas. Dessa forma, foi possível analisar a influência de fatores operacionais e materiais no comportamento das variáveis de desempenho temperatura, coeficiente de atrito e desgaste das pastilhas de freio durante o processo de frenagem. A otimização multi-objetivo empregada contribuiu para selecionar os níveis ótimos dos fatores operacionais que levam à performance global otimizada dessas três medidas de desempenho simultaneamente. Já as duas técnicas de predição empregadas mostraram ser eficientes para predizer o comportamento dessas medidas de desempenho da frenagem para uma dada condição operacional. Em termos práticos aplicáveis, trata-se de uma oportunidade para aplicação de técnicas de otimização e predição de medidas de desempenho, o que pode contribuir para se tomar decisões quanto ao critério de escolha dos materiais de fricção e de parâmetros de operação envolvidos durante a frenagem. Pode-se, também,

obter oportunidades para redução de custos de manutenção e operação, aumento de confiabilidade, ganhos na seleção dos parâmetros de operação do veículo, melhoria na gestão do conhecimento da organização em termos do domínio do processo de operação. Além disso, por meio destes ensaios em bancada buscou-se identificar e analisar a influência da variação da temperatura no coeficiente de atrito durante a frenagem, contribuindo para melhorar o entendimento do problema de fadiga térmica presente durante a frenagem.

Para os ensaios em bancada, pode-se concluir:

- Em relação aos ensaios realizados com potência motora de 3cv, foi possível estudar o efeito das variáveis tipo de disco, tipo de pastilha e pressão de acionamento da manete de freio nas variáveis resposta temperatura, coeficiente de atrito e desgaste das pastilhas de freio. Para a variável resposta temperatura, com função objetivo de minimização, o desempenho ótimo foi obtido pelos ensaios realizados com disco novo, pastilha nova e pressão de acionamento de 0,10MPa. Para o coeficiente de atrito, cuja função objetivo é de maximização, o desempenho ótimo foi obtido empregando-se disco assentado, pastilha assentada e pressão de 0,15MPa. Já o desgaste das pastilhas, que apresenta função objetivo de minimização, não sofreu alteração significativa variando-se os níveis dos três fatores. A aplicação da técnica de otimização multi-objetivo resultou na seguinte configuração quanto aos níveis dos fatores: disco de freio assentado, pastilha nova e pressão de acionamento de 0,10 MPa. Tanto as funções *desirability* composta e individuais apresentaram um atendimento igual ou superior a 90% das especificações estabelecidas para cada resposta, o que representa um desempenho satisfatório.
- Para os ensaios realizados com potência motora de 10cv, foi analisado o efeito dos fatores velocidade de escorregamento e pressão de contato nas variáveis resposta temperatura, coeficiente de atrito e desgaste. Aqui também foram empregadas técnicas estatísticas e de otimização para analisar os resultados obtidos. Para a variável resposta temperatura, o desempenho ótimo foi obtido pelos ensaios realizados com valor indiferente de velocidade de escorregamento e pressão de contato de

0,67 MPa. Para o coeficiente de atrito e desgaste, o desempenho ótimo foi obtido nos ensaios com velocidade de 60km/h e pressão de contato de 0,67 MPa. A aplicação da técnica de otimização multi-objetivo resultou na seguinte configuração quanto aos níveis dos fatores: velocidade de 60km/h e pressão de contato de 0,67 MPa. Observou-se que os requisitos para as funções objetivo do coeficiente de atrito e do desgaste foram atendidos em mais de 98%, fato este que não ocorreu para a temperatura, o que também penalizou o atendimento da função objetivo composta. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de os ensaios conduzidos com o nível alto de pressão de contato alcançaram temperaturas bastante elevadas. Esse comportamento está atrelado ao efeito da temperatura no coeficiente de atrito e no desgaste sob altas temperaturas. Isso demonstra que a temperatura, além de ser influenciada pela velocidade de escorregamento e pela pressão de contato, também promove alterações no coeficiente de atrito e desgaste.

- Com o objetivo de obter previsão do comportamento das variáveis resposta, foram propostos dois modelos: por regressão múltipla (MRM) e por redes neurais artificiais (RNA). A predição do comportamento das variáveis resposta de um sistema de freio também contribui para análise de desempenho, desenvolvimento, seleção e manutenção de um determinado sistema de freio. Conforme resultados obtidos, observou-se que ambos os modelos foram capazes de prever de forma satisfatória o comportamento das variáveis resposta.
- Foi identificado o efeito *fade* nos experimento em bancada realizados com potência motora de 10cv. A influência da temperatura na redução do coeficiente de atrito ocorre devido à acentuação do desgaste da pastilhas a partir de valores de temperatura que levam à degradação da resina fenólica e da queima de materiais voláteis provenientes dos materiais de atrito entre 250 e 300°C. O desgaste do material de atrito leva à formação de diferentes filmes de fricção, cujo efeito é acentuado a partir de valores de temperaturas de decomposição da resina fenólica. A formação e a fratura do filme de oxidação e do filme de transferência são oriundos de

desgaste por fricção e estão relacionadas à vida útil dos materiais de atrito. Já a formação do filme lubrificante e dos filmes de gases amortecedores afetam diretamente o coeficiente de fricção devido a mudanças nos platôs de contato, influenciando assim o desempenho da frenagem.

- A abordagem da influência da temperatura por meio dos mecanismos de atrito e desgaste indica que em temperaturas reduzidas a componente adesiva é pouco significativa, prevalecendo as componentes de abrasão. À medida que a temperatura aumenta em decorrência do processo de frenagem, as interações atômicas também aumentam, acentuando-se a contribuição da componente adesiva no coeficiente de atrito. Entretanto, a elevação na temperatura provoca uma redução no limite de cisalhamento do material, tornando as superfícies mais dúcteis, promovendo redução da contribuição das componentes abrasivas. A componente adesiva também é prejudicada pelo aumento na ductilidade na área real de contato no par tribológico. Em temperaturas acima das que promovem decomposição térmica do material, a redução da componente adesiva devido ao aumento na ductilidade das superfícies supera o aumento ocasionado pela elevação na taxa de formação das interações atômicas, resultando na diminuição do coeficiente de atrito e, conseqüentemente, promovendo a fadiga térmica

Como oportunidades para o desenvolvimento de trabalhos futuros, sugere-se realizar análise MEV e EDS também na superfície do disco de freio, em uma abordagem similar à conduzida nas pastilhas de freio deste estudo, com o objetivo de obter-se uma análise completa do par tribológico empregado em sistemas de freio; conduzir mais experimentos e analisar um número maior de amostras, para tornar o estudo mais representativo; realizar análise química e composicional mais detalhada dos materiais de atrito, como, por exemplo, utilizando-se técnicas de difração de raios x para caracterização dos materiais.

6 ARTIGOS PUBLICADOS DURANTE O DOUTORADO

Machado Pinto, R. L. M., Horta Gutiérrez, J. C., Menezes, R. C., Rubio, J. C. C., Faria, P. E. **Análise comparativa do efeito térmico e do desgaste sofrido por um material de fricção de freio a disco submetido a ensaios em bancada Krauss com variações de potência motora e condições operacionais.** Revista *Matéria (Rio J.)*, 2020, vol.25, no.3. ISSN 1517-7076

Machado Pinto, R. L., Horta Gutiérrez, R. C., Rubio, J. C. C., Faria, P. E. **Aplicação de Técnicas de Planejamento de Experimentos para Otimização do Comportamento Tribológico e Térmico de Materiais de Atrito Durante o Processo de Frenagem.** Revista *Matéria (Rio J.)*, 2017, vol.22, supl.1. ISSN 1517-7076

Machado Pinto, R. L., Horta Gutiérrez, J. C., Menezes, R. C., Rubio, J. C. C., Faria, P. E. **Avaliação do Desempenho Tribológico e Térmico de Materiais de Atrito Durante o Processo de Frenagem.** Revista *Matéria (Rio J.)*, 2017, vol.22, no.3. ISSN 1517-7076

Machado Pinto, R. L., Horta Gutiérrez, J. C., Menezes, R. C., Rubio, J. C. C., Faria, P. E. **Estudo comparativo do desgaste e do efeito térmico de materiais de atrito com a variação da potência motora de um banco de ensaio de freios.** CIBEM – Congresso Íbero Americano de Engenharia Mecânica, Lisboa, Portugal, 2017.

Machado Pinto, R. L., Horta Gutiérrez, J. C., R. C., Rubio, J. C. C., Faria, P. E. **Proposta de Planejamento Experimental e de Sistemas de Medição para Análise de Variáveis que Influenciam o Desempenho da Frenagem veicular.** CONBREPRO – Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, 2018

Machado Pinto, R. L., Silveira, M. L., Reis, B. C. M., Pereira, N. F. S., Horta Gutiérrez, J. C. **Técnicas de Metrologia Aplicada à Calibração de uma Balança de Precisão.** CONBREPRO – Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, 2018

Machado Pinto, R. L., Horta Gutiérrez, J. C., Diniz Neto, J. F., Rubio, J. C. C., Faria, P. E. **Análise da correlação entre propriedades de materiais de atrito de freio e desempenho durante a frenagem através de Ensaios experimentais.** CIBEM – Congresso Íbero Americano de Engenharia Mecânica, Cartagena da Índias, Colômbia, 2019.

Machado Pinto, R. L., Horta Gutiérrez, J. C. **Aplicação de Redes Neurais Artificiais para Predição do Comportamento Tribológico e Térmico de Materiais de Atrito Durante o Processo de Frenagem.** CONBREPRO – Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, 2019.

REFERÊNCIAS

1. ABREU, R. M. **Simulação e Ensaio de Mecanismo de Freio Automotivo**. (Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção), Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade de Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
2. Al-Bender, F.; Swevers, J. Characterization of Friction Force Dynamics, **IEE Control Systems Magazine**, v.28, Edição 6, pp.64-81, 2008
3. Anderson, A. E., Knapp, R. A. Hot spotting in automotive friction systems. **Wear**, v. 135, p.319-337, 1990.
4. Anoop, S., Natarajan, S., Kumaresh Babu, S.P. **Analysis of factors influencing dry sliding wear behaviour of Al/SiCp-brake pad tribosystem**. Mater Des, 2009;30:3831–8.
5. ASTM: American Society for Testing and Materials. “**Standard Terminology Relating to Wear and Erosion**”, ASTM G40-15, 2015.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6143:1995 – Pastilha do Freio a disco – Determinação do atrito e desgaste através da bancada de ensaio Krauss**. Rio de Janeiro, 1995.
7. Bao, J.S., Zhu, Z.C., Tong, M.M., et al. Dynamic friction heat model for disc brake during emergency braking. **Adv Sci Lett**, v. 249, 4, pp.272-278, 2011.
8. Bao, J. S., Zhu, Z. C., Tong, M. M., et al. Influence of braking pressure on tribological performance of non-asbestos brake shoe for mine hoister during emergency braking. **Ind Lubr Tribol**, v.64, pp.230-236, 2012.
9. Barros, L.Y., Neis, P.D., Ferreira, N.F., Pavlak, R.P., Masotti, D., Matozo, L.T., Sukumaran, J., De Baets, P., Andó, M. Morphological analysis of pad–disc system during braking operations. **Wear**, v. 352-353, pp.112-121, 2016.
10. Bergman, F., Eriksson, M., Jacobson, S., “Influence of Disc Topography on Generation of Brake Squeal”, **Wear**, v. 225-229, Part 1, pp. 621-628, 1999.
11. Bijwe, J., Majumdar, N., Satapathy, B.K. Influence of modified phenolic resins on the fade and recovery behavior of friction materials. **Wear** V.259, pp.1068–1078, 2005.
12. Birch, T.W. **Automotive Braking Systems**. Third edition, Delmar. 1999.
13. Blau, P. J. **Friction Science and Technology: From Concepts to Applications**, 2. ed., Peter J. Blau, 2008.
14. Blau, P.J., Mclaughlin, J.C. Effects of Water Films and Sliding Speed on the frictional Behavior of Truck Disc Brake Material. **Tribology International**, v.36, p.709-715, 2003.
15. Bode, K. H., Ostermeyer, G. P. “Simulations and Tests of Innovative Friction Laws in Brake Systems”. **Technische Universit at Braunschweig, Institute of Dynamics and Vibrations**, v. 9, 1 ed., pp. 63-66, 2009.

16. Bosh, R. **Manual de Tecnologia Automotiva**". Tradução de Helga Madjderey, Gunter W. Prokesch, Euryale de Jesus Zerbini, Suely Pfeferman – São Paulo: Edgard Blucher, 2005.
17. Brembo, S.P.A. **The Brake Disc Manual**. Manual, Curno, 128p., 1997.
18. Brezolin, A. **Estudo de Geração de Trincas Térmicas em Discos de Freios de Veículos Comerciais**. (Dissertação de mestrado em Materiais), Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2007.
19. Bushan, B. **Principles and applications of tribology**. New York: John Wiley & Sons, 2013.
20. Cirovic, V., Aleksendric, D. Development of Neural Network Model of Disc Brake Operation. **FME Transactions**, v.38, pp. 29-38, 2010
21. Chen, J., Xiong, X., Yao, P.P., *et al.* Effect of rubbed surface temperature on frictional behaviour of iron based P/M friction materials. **Powder Metall Technol**, v.22, pp. 223–227, 2004.
22. Corrar, L. J., Paulo, E., Filho, J. M. D. **Análise Multivariada Para Os Cursos De Administração, Ciências Contábeis e Economia**. Editora Atlas, 2012.
23. Deng, H., Li, K., Li, H. *et al.* Effect of brake pressure and brake speed on the tribological properties of carbon/carbon composites with diferente pyrocarbon textures. **Wear**, v.270, pp. 95-103, 2010
24. Diulgheroglo, P.A. Fundamentos de Freios e Seus Componentes. Apostila Curso. **Congresso SAE Brasil**, São Paulo, 2010.
25. Dmitriev, A. I., Osterle, W. Modeling of brake pad-disc interface with emphasis to dynamics and deformation of structures. **Tribology International**, v.43, pp. 719-727, 2010.
26. Dmitriev, A. I., Osterle, W., Klob, H. Numerical simulation of typical contact situations of brake friction materials. **Tribology International**, v.41, pp.1-8, 2008.
27. Dowson, D. **History of Tribology**. Editora Longman Group Limited, 677p., Inglaterra, 1979.
28. Dukkipati, R.V. *et al.* **Road Vehicle Dynamics**, SAE, 2008.
29. Eddoumy, F., Kasem, H., Dhieb, H., Buijnsters, J.G., Dufrenoy, P., Celis, J.P., Desplanques, Y. Role of constituents of friction materials on their sliding behavior between room temperature and 400 °C, **Mater.Des.**, V.65, pp.179–186, 2015.
30. Eriksson, M., Bergman, F., Jacobson, S. Surface characterisatio of brake pads after running under silente and squealing conditions. **Wear**, v.232, pp.163-167,1999.

31. Eriksson, M., Bergman, F., Jacobson, S. On the nature of tribological contact in automotive brakes, **Wear**, v.252, pp.26-36, 2002.
32. Eriksson, M. **Friction and contact phenomena of disc brakes related to squeal**. (Ph. D. thesis). Uppsala University, Uppsala Sweden, Acta Universitatis Upsaliensis, ISBN: 91-554-4716-3, 2000.
33. Eriksson, M., Jacobson, S., Tribological surfaces of organic brake pads. **Tribology International**, v.33, pp. 817-827, 2000.
34. Eriksson, M., Lord, J., Jacobson, S. Wear and contact conditions of brake pads: dynamical in situ studies of pad on glass. **Wear**, v.249. pp. 272-279, 2001.
35. Federici, M., Menapace, C., Moscatelli, A. Gianella, S., Straffelini, G. Effect of roughness on the wear behavior of HVOF coatings dry sliding against a friction material. **Wear**, v. 3678-369, pp. 326-334, 2006.
36. Federici M., Gialanella, S., Leonardi, M., Perricone, G., Straffelini, G. A preliminar investigation on the use of pin-on-disc test to simulate off-brake friction and wear characteristics of friction materials, **Wear**, v. 410-411, pp. 202-209, 2018.
37. Filip, P., Weiss, Z., Rafaja, J. On friction layer formation in polymer matrix composite materials for brake applications, **Wear**, v.252, pp.189-198, 2002.
38. Grabiec, T. Wear and friction behavior of friction pairs tested with different typs of grey cast iron and low met friction material. **SAE International**, 2014
39. Gao, C.H., Lin, X.Z. Transient Temperatura Field Analysis of a brake in a Non-Axisymmetric Three-dimensional Model. **Jounal of Materials Processing Technology**, v.129, pp.513-517, 2002.
40. Gillespie, T. D. **Fundamentals of vehicle dynamics**. 2.ed. Warrendale, SAE, 1992.
41. Gonçalves, F. M. **Ferramentas para Análise de Autogestão e Sudentabilidade do Uso de Água em Perímetros Irrigados**. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Departamento de Engenharia Agrícola – Universidade Federal do Ceará, 2014.
42. Han, X. M., Gao, F., Song, B. W., et al. Tribological properties of short fiber C/SiCbrake materials and 30CrSiMoVA mate. **Tribol Lett**, v.43, pp.287-293, 2011.
43. Haynes Publishin. **Automotive Disc Brake Manual**. Techbook Series, 1999.
44. Hee, K. W., Filip, P. Performance of ceramic enhanced phenolic matrix brake lining materials for automotive brake linings. **Wear**, v.259, pp.1088-1096, 2005.
45. Hinrichs, R. A.; Kleinback, M. **Energia e Meio Ambiente**. 3.ed., Editora Thomson, 555 p., 2000.
46. Holmberg, K., Erdemir, A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. **Friction**, v. 5(3), pp. 263-284, 2017.

47. Hong, U.S., Jung, S.L., Cho, K.H., Cho, M.H., Kim, S.J., Jang, H. Wear mechanism of multiphase friction materials with different phenolic resin matrices **Wear**, V. 266, pp. 739–744, 2009.
48. HORTA GUTIÉRREZ, J.C.H, ABREU, R.M, VASCONCELOS, I.R., FERREIRA, E.R., FARIA, P.E., RUBIO, J.C.C. **Estudo Experimental do Desempenho de Sistema de Freio Automotivo**. CIBEM, La Plata, 2013.
49. HUTCHINGS, I. M., **Tribology Friction and Wear of Engineering Materials**. First edition. Arnold, London, 1992.
50. Infantini, M. B. **Variáveis de Desempenho dos Sistemas de Freio**. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica). Escola de Engenharia – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, Brasil, 2008
51. Iombriller, S. F. **Análise Térmica e Dinâmica do Sistema de Freio a Disco de Veículos Comerciais Pesados**. (Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – SP, Brasil, 2002.
52. Jacobson, S. **Nature of the tribological interface of automotive brakes**. in: J. Bijwe (Ed.), First International Workshop on Advances in Asbestos Free Friction Composites (IWAAFC-1) held at ITMMEC, Indian Institute of Technology Delhi, pp. 90-98, 2006.
53. Jang, H., Ko, K., Kim, S., Bash, R., Fash, J. The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials. **Wear**, v.256, pp. 3-4, 2004.
54. Jost, H. P. **Lubrication (Tribology) Education and Research – A Report on the Present Position and Industry’s Need**. Relatório técnico, 79p., Departamento de Educação e Ciência, Londres, 1966.
55. Kakad, S. R., More, R. M. Mathematical Modeling & Analysis of Brake Pad for Wear Characteristics. **International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering**, v.5, pp.1048-1056, ISSN 2321-8169 2017.
56. Kato, K. A. **Wear Mechanisms, Modern Tribology Handbook**, Ed. CRC Press LLC, V. 2, Cap. 2, 2001
57. Kemmer, H. A. **Investigation of the friction behavior of automotive brakes through experiments and tribological modelling**. (PhD-thesis) University Pader-born, Robert Bosch GmbH, Schriftenreihe ISBN 3-00r-r011230-8, 2002.
58. Kim, S. J., Jang, H. Friction and wear of friction materials containing two different phenolic resins reinforced with aramid pulp. **Tribol Int**, v.200, pp.477-484, 2000.
59. Kukutschová, J., Roubicek, V., Maslan, M., Jancik, D., Slovák, V., Malachová, K., Pavlicková, Z., Filip, P. Wear performance and wear debris of semimetallic automotive brake materials. **Wear**, v.268, pp.86-93, 2010.
60. Larson, R., Farber, B. **Estatística Aplicada**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

61. Lee, P. W., Filip, P. Friction and wear of Cu-free and Sb-free environmental friendly automotive brake materials. **Wear**, v.302, pp.1404-1413, 2013.
62. Leonardi, M., Menapace, C., Mateja, V., Gialanella, S., Straffelin. Pin-on-disc on mcopper-free friction materials dry sliding against cast iron. **Tribology International**, v.119, pp. 73-81, 2018.
63. LIMPERT, R. **Brake Design and Safety**. 3 ed., SAE, 2011.
64. Liu, Z. M. **Tribology theory and design**. Wuahn, China: Wuan University of Technology Press, 2009.
65. Luo, Y, Yang, Z. Effect of different-condition parameters on frictional properties of non-asbestos phenolic resin-based friction material. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 9(5), pp.1-14, 2017.
66. Ma, Y., Liu, Y., Wang, L., Tong, Jin, Zhuang, J., Jia, H. Performance assessment of hybrid fibers reinforced friction composites under dry sliding conditions. **Tribology International**, v.119, pp.262-269, 2018.
67. Machado Pinto, R.L. **Análise de variáveis que influenciam no desempenho de frenagem veicular através de ensaios baseados na metodologia de Krauss**. (Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção), Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade de Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
68. Machado Pinto, R.L, Horta Gutiérrez, J.C., Rubio, J. C. C., Faria, P. E. “Avaliação do Desempenho Tribológico e Térmico de Materiais de Atrito Durante o Processo de Frenagem”. **Revista Matéria**, v.22, n.03, 2017-a.
69. Machado Pinto, R. L., Horta Gutiérrez, R. C., Rubio, J. C. C, Faria, P. E. Aplicação de Técnicas de Planejamento de Experimentos para Otimização do Comportamento Tribológico e Térmico de Materiais de Atrito Durante o Processo de Frenagem. **Revista Matéria**, vol.22, supl.1. ISSN 1517-7076, 2017-b.
70. Machado Pinto, R. L., Horta Gutiérrez, J. C., Diniz Neto, J. F., Rubio, J. C. C., Faria, P. E. **Análise da correlação entre propriedades de materiais de atrito de freio e desempenho durante a frenagem através de Ensaios experimentais**. CIBEM – Congresso Íbero Americano de Engenharia Mecânica, Cartagena da Índias, Colômbia, 2019.
71. Machado Pinto, R. L., Horta Gutiérrez, J. C., Menezes, R. C., Rubio, J. C. C, Faria, P. E. Análise comparativa do efeito térmico e do desgaste sofrido por um material de fricção de freio a disco submetido a ensaios em bancada Krauss com variações de potência motora e condições operacionais. **Revista Matéria**, vol.25, no.3., ISSN 1517-7076, 2020.
72. Massi, F., Berthier, Y., Baillet, L. Contact surface topography and dynamucs of brake squeal. **Wear**, v.265, pp.1784-1792, 2008.
73. Mahale, V., Bijwe, J., Sinha, S. Influence of nano-potassium titanate particles on the performance of NAObrake-pads. **Wear**, v.376-377, pp. 727-737.

74. Menezes, R. C. **Avaliação da Influência da pressão de Contato, da Velocidade de Escorregamento e da Temperatura no Desempenho de Mecanismo de Freio Veicular.** (Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção), Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade de Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
75. Montgomery, D.C. **Introduction to Statistical Quality Control**, 8th ed., John Wiley & Sons, Inc., 2019.
76. Montgomery, D.C. **Design and Analysis of Experiments.** 9th ed. John Wiley & Sons, NY, 2017.
77. Muller, M., Ostermeyer, G. P. A cellular automaton model to describe the three-dimensional friction and wear mechanism of brake systems. **Wear**, v.263, pp.1175-1188, 2007.
78. Mutlu, I. Investigation of Tribological Properties of Brake Pads by Using Rice Straw and Rice Husk Dust. **Journal of Applied Science**, v.9(2), pp.377-381, ISSN 1812-5654, 2009.L
79. Neis, P. D., Ferreira, N. F., Lorini, F. J. Contribution to perform high temperature tests (fading) on a laboratory-scale tribometer. **Wear**, v.271, pp.2660-2664, 2011.
80. Neis, P. D. **Projeto e Construção de um Tribômetro com Controle Independente da Temperatura do Disco.** (Tese de doutorado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.
81. Neis, P. D., Ferreira, N. F., Fekete, G., Matozo, L. T., Masotti, D. Towards a better understanding of the structures existing on the surface of brake pads. **Tribology International**, v. 105, pp. 135-147, 2017.
82. Osterle, W., Urban, I. Third body formation on brake pads and rotors. **Tribology International**, v.39, pp.401-408, 2006.
83. Osterle, W., Dmitriev, A. I. Functionality of conventional brake friction materials – Perceptions from findings observed at diferente length scales. **Wear**, v.271, pp. 2198-2207, 2011.
84. Osterle, W., Dmitriev, A. I. The Role of Solid Lubricants for Brake Friction Materials. **Lubricants**, v.4(1), 2016.
85. Osterle, W., Prietzel, C., Kloß, H., Dmitriev, A.I. On the role of copper in brake friction materials, *Tribol. Int.*, v.43, pp. 2317–2326, 2010.
86. Osterle, W., Urban, I., Frictions layers and friction films on PMC brake pads, **Wear**, v.257, pp.215-226, 2004.
87. Osterle, W., Dorfel, I., Prietzel, C., Rooch, H., Cristol-Bulthé, A. L., Degallaix, G., Desplanques, Y. A comprehensive microscopy study of third body formation at the interface between a brake pad na brake disc during the final stage of a pin-on-disc test. **Wear**, v.267, pp.781-788, 2009.

88. Osterle, W., Urban, I. Third body formation on brake pads and rotors. **Tribol. Int.**, v.39, pp.401-408, 2006.
89. Ostermeyer, G. P. Friction and Wear of Brake Systems. **Forschung im Ingenieurwesen**, v.66, pp.267-272, 2001.
90. Ostermeyer, G. P., Muller, M., New insights into the tribology of brake systems, in: Proc. IMechE. Part D: J. **Automobile Engineering**, v. 222, special issue paper, pp.1167-1200, 2008.
91. Ostermeyer, G. P. On the dynamics of the friction coefficient. **Wear**, v.254, pp. 852-8, 2003.
92. Ozturk, B., Arslan, F. e Ozturk S. Effects of different kinds of fibers on mechanical and tribological properties of brake friction materials. *Tribol T* 2013; 56: 536–545.
93. PAZ, M. A. **Manual do Automóvel**. Editora Mestre Jou, 1970.
94. Parmigiani, J. P., Timothy, C. O. The transient temperature distribution in a heavy duty brake system during fatigue crack testing. **SAE**, Paper 2000-01-0441, 2000.
95. Pinto, L. C. M. **Quantikov- Um analisador microestrutural para o ambiente WindowsTM**. (Tese de Doutorado em Ciências), Universidade de São Paulo-USP, Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares - IPEN, 1996.
96. Polleto, J. C., Barros, L. Y., Neis, P. D., Ferreira, N. F. Analysis of the error in the estimation of the morphology of contact plateaus existing on the surface of brake pads. **Tribology International**, v. 126, pp,297-306
97. PRESTON, J.D., FORTHOFFER, R.J. **Correlation of Vehicle, Dynamometer and Other Laboratory Tests for Brake Friction Materials**. Society of Automotive Engineers, paper 710250, 1971.
98. [QWIKNET] Kagi Software. *QwikNet* 2.23. Disponível em <http://www.kagi.com/cjensen>. Acesso em 15 set. 2018.
99. Rabinowicz, E. **Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Systems**. ASME, New York, pp.1-23, 1986.
100. Rabinowicz, E. **Friction and Wear of Materials**, Editora John Wiley and Sons, 2.ed., 335p., Estados Unidos, 2013.
101. Rehkopf, J., Halderman, J.D. **Automotive Brake Systems**. Prentice Hall, 4.ed., 2006.
102. Rhee, S.K., Schwartz, H.W., “Test Methods for Automotive and Truck Friction Materials, American Society for Testing and Materials”, **American Society for Testing and Materials**, paper 701, pp. 39-49, Philadelphia, 1979.
103. Rumold, W., Swift, R. A. Evaluation of disc brake pad pressure distribution **by multibody dynamic analysis**. International Conference Braking 2002 – From the driver to the road. SAE, 2002.

104. Sanders, P.G., Dalka, T.M., Bash, R.H. A Reduced-Scale Brake Dynamometer for Friction Characterization. **Tribology International**, v. 34, pp. 609-615, 2001.
105. Satapathy, B. K., Bijwe, J. Performance of friction materials based on variation in nature of organic fibres – Part I. Fade and recovery behavior. **Wear**, v.257 pp.573-584, 2004-a
106. Satapathy, B.K., Bijwe, J. Performance of friction materials based on variation in nature of organic fibres: Part II. Optimisation by balancing and ranking using multiple criteria decision model (MCDM). **Wear**, v.257(5), pp.585-589, 2004-b.
107. Serbino, E.M. **Um Estudo dos Mecanismos de Desgaste em Disco de Freio Automotivo Ventilado de Ferro Fundido Cinzento Perlítico com Grafita Lamelar**. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais), Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, 123p., 2005.
108. Sharp, B., 2013. “**Fading, O Inimigo do Motorista**”. Disponível em <<http://autoentusiastas.blogspot.com.br/2011/06/fading-o-inimigo-do-motorista.html>> Acessado em 29/09/2018.
109. Singh T, Patnaik A, Chauhan R, Rishiraj A. Assessment of braking performance of lapinus–wollastonite fibre reinforced friction composite materials. **J King Saud Univ - Eng Sci**, V. 29, pp.183–195, 2017.
110. Silvestre, N. **State-of-the-art review on carbon nanotube reinforced metal matrix composites**. *Int J Compos Mater*, 3 (6A) (2013), pp. 28-44
111. Stachowiak, G., Batchelor, A. W. **Engineering Tribology**. Third Edition, Elsevier, 2005.
112. Straffelini, G., Verma, P. C., Metnoz, I., Ciudin, R., Perricone, G., Gialanella, S. Wear behavior of a low metallic friction material dry sliding against a cast iron disc: role of the heat-treatment of the disc. *Wear*, v.348-349, pp.10-16, 2016
113. Straffelini, G. **Friction and Wear, Methodologies for Design and Control**. Springer International Publishing, Switzerland, 2015.
114. Sugoza, I., Mutlu, I., Sugoza, B. The Effect of Ulexite to the Tribological Properties of Brake Lining Materials, **Polymer Composites**, V.39, issue 1, pp. 55-62, 2016.
115. Talati, F., Jalalifar, S. Analysis of heat conduction in a disk brake system. *Heat Mass Transfer*, v.45, pp. 1047–1059, DOI 10.1007/s00231-009-0476-y, 2009.
116. Triola, M. F. **Introdução à Estatística**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos Científicos, 1999.
117. Tylcsak, J. H. **ASM Handbook – Friction, Lubrication and wear technology**, v.18, 1991.

118. Wahlstrom, J. A factorial design to numerically study the effects of brake pad properties on friction and wear emissions. **Advances in Tribology**. V.2016, Article ID 8181260, 10p., 2016.
119. Wahlstrom, J., Lyu, Y., Matejka, V., Soderberg, A. A pin-on-disc tribometer study of disc brake contact pairs with respect to wear and airborne particle emissions. **Wear**, v.384–385, pp.124–130, 2017.
120. Wang, L., Li, Y., Guo, X. H. et al. Study on friction and wear property of train powder metallurgy brake disc. **Locomotive and Rolling Stock Technol**, v.5, pp.27-28, 2008.
121. Wang, F.H., Liu, Y. Mechanical and tribological properties of ceramic-matrix friction materials with steel fiber and mullite fiber. *Mater Des*, 57 (2014), pp. 449-455
122. Wilson, A.J., Bowsher, G.T. Machine Testing for Brake Lining Classification. **Society of Automotive Engineers**, paper 710249, 1971.
123. Verma, P. C., Ciudin, R., Bonfanti, A., Aswath, P., Straffelini, G., Gialanella, S. Role of the friction layer in the high-temperature pin-on-disc study of a brake material. **Wear**, v.346-347, pp.56-65, 2016.
124. Verma, P. C., Menapace, L., Bonfanti, A., Ciudin, R., Gialanella, S., Straffelini, G. Braking pad-disc system: Wear mechanisms and formation of wear fragments. **Wear**, v.322, pp. 251-258, 2015.
125. Yevtushenko, A., Ivanyk, E. Determination of heat and thermal distortion in braking systems. **Wear**, v.185, pp.159-165, 1995.
126. Yoon, S. W., Shin, M.W., Lee, W.G., Jang, H. Effect of surface contact conditions on the stick-slip behavior of brake friction material, **Wear**, v.294, pp.305–312, 2012.
127. Xiao, X., Yin, Y., Bao, J., Feng, X. Review on the friction and wear of brake materials. **Advances in Mechanical Engineering**, v.8(5), pp.1-10, Sage, 2016.
128. Zangiacomì, M.H. Desenvolvimento e Análise de Compósitos Reforçados com Fibras de Panox e Fibras de Aramida Utilizados em Materiais de Fricção em Freios Automotivos. Dissertação (mestrado em Engenharia Química), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.
129. Zimmer, D. ATE Friction Test Machine and Other Methods of Lining Screenin. **Society of Automotive Engineers**, paper 820163, 1982.
130. Zula, H., Ghetiya, N. D., Pandya, D. Development of friction pad and study of its wear characteristics. **International Journal of Mechanical and Production Engineering**, v.5, Issue-2, ISSN: 2320-2092, 2017.