

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

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO COBRE NO DESEMPENHO TRIBOLÓGICO DE
PASTILHAS DE FREIO AUTOMOTIVO

por

Liu Yesukai de Barros

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Fevereiro de 2018

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO COBRE NO DESEMPENHO TRIBOLÓGICO DE
PASTILHAS DE FREIO AUTOMOTIVO

por

Liu Yesukai de Barros
Engenheiro Mecânico

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

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Aprovada por:

Dr. Alexandre Casaril.....Fras-le SA

Prof^a. Dr^a Cintia Cristiane Petry Mazzaferro.....PROMECC / UFRGS

Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira.....PROMECC / UFRGS

Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 20 de Fevereiro de 2018

AGRADECIMENTOS

Ao professor Patric Daniel Neis, pela orientação, conselhos e disponibilidade durante a elaboração deste trabalho;

Ao professor Ney Francisco Ferreira, pela paciência, incentivo e suporte ao longo do mestrado;

Ao colega e agora também mestre Jean Carlos Poletto, por toda a ajuda fornecida;

À equipe do Laboratório de Tribologia (LATRIB) por todo o apoio, em especial à Adriele Jacques Amaral, pelo auxílio com as montagens de uma infinidade de microscopias;

À empresa Fras-le S. A., por apoiar, acompanhar e participar deste trabalho;

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte na realização deste estudo;

Aos meus pais Ana e Wanderley, por motivos mais que óbvios.

“Daria tudo que sei pela metade do que ignoro.”

René Descartes

RESUMO

Estudos recentes mostram que o cobre oriundo do desgaste de materiais de fricção de freio automotivo é a principal fonte do depósito deste metal em rios e lagos, afetando negativamente o meio ambiente. Consequentemente, novas legislações de agências governamentais internacionais têm imposto uma redução drástica da utilização do cobre em materiais de fricção nos próximos anos, sendo esta uma tendência a ser seguida por governos de todo o mundo. Embora o cobre seja largamente utilizado em materiais de fricção, a compreensão dos mecanismos de ação deste metal para esta aplicação ainda é bastante limitada. Este trabalho tem como intuito contribuir para uma melhor compreensão do papel do cobre em pastilhas de freio automotivo no que diz respeito ao coeficiente de atrito e ao desgaste. Ensaios de frenagens foram realizados no tribômetro do Laboratório de Tribologia da UFRGS, onde três tipos de pastilhas de freio (contendo 0%, 10% e 30% de cobre cada) foram testadas em diferentes temperaturas (100 °C, 200 °C e 300 °C). Foram aplicados métodos para avaliar o coeficiente de atrito, desgaste de pastilha, desgaste de disco, parâmetros morfológicos de platôs de contato e depósito de filme no disco. O material sem cobre em sua composição apresentou valores de coeficiente de atrito maiores do que os materiais com cobre para os três patamares de temperatura. O material com 10% de cobre apresentou maior sensibilidade do atrito em função da velocidade de deslizamento do que os outros dois materiais. Correlação inversa forte foi observada entre desgaste de pastilha e desgaste de disco. A quantidade de platôs de contato foi o parâmetro morfológico que mais se correlacionou com o coeficiente de atrito em diferentes temperaturas. Em alguns ensaios foi observada uma variação abrupta do coeficiente de atrito em determinadas frenagens dos materiais sem cobre e com 10% de cobre. Juntamente com esta variação, foi constatada uma perturbação do filme depositado sobre o disco, onde este é removido quando ocorre o aumento repentino do atrito. Entretanto, este fenômeno ocorreu apenas para a temperatura de 100 °C, indicando que esta variação de atrito e perturbação do filme ocorre apenas em baixas temperaturas, e independente do percentual de cobre.

Palavras-chave: Pastilha de freio automotivo; cobre; legislação; coeficiente de atrito; desgaste.

ABSTRACT

Previous studies have shown that the copper originated from the wear of automotive brake friction materials is the main source of the deposit of this metal in rivers and lakes, leading to environmental impacts. As a result, recent legislations from international governmental agencies have forced a drastic reduction of the copper used in friction materials in next years, which is likely to be followed by other governments in the world. Although the copper is widely used in friction materials, the understanding of the action mechanisms of this metal in friction materials is quite limited. This work aims to contribute to a better understanding of the role of copper in automotive brake pads in terms of friction and wear. Tests were carried out in the tribometer of the Laboratory of Tribology of UFRGS, where three kinds of brake pads (with 0%, 10% and 30% of copper each) were subjected to different temperatures (100 °C, 200 °C e 300 °C). Methodologies to evaluate friction, wear of brake pads, wear of discs, morphological parameters of contact plateaus and deposit of film on disc surface were used. The sample without copper presented higher friction than the samples with copper for the three temperature levels. The material with 10% of copper presented higher friction sensibility due the sliding speed than other samples. Strong inverse correlation between wear of brake pads and wear of discs was observed. Quantity of contact plateaus was the parameter that presented the higher correlation with the friction in different temperatures. An abrupt variation of friction was observed in some experiments for samples without copper and with 10% of copper. At the same time, it was observed a disturbance of the film deposited on the disc surface, where the film was removed when the sudden increase of the friction occurs. However, this phenomenon occurred only at 100 °C, indicating that the variation of friction and the disturbance of film occurs only at low temperatures, and seems to be regardless of percentage of copper.

Keywords: Automotive brake pad; copper; legislation; friction; wear.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo geral.....	3
2.2 Objetivos específicos	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Sistemas de freio automotivo	4
3.2 Materiais de fricção.....	5
3.3 Platôs de contato	6
3.4 Filme	8
3.5 Cobre em materiais de fricção.....	11
3.5.1 Meio ambiente e legislação.....	11
3.5.2 Estudos recentes do cobre em materiais de fricção	13
3.5.2.1 Influência do cobre no desempenho de pastilhas de freio	13
3.5.2.2 Possíveis substitutos para o cobre.....	14
4. METODOLOGIA	17
4.1 Tribômetro.....	17
4.2 Materiais de fricção.....	18
4.3 Rotor.....	19
4.4 Parâmetros de ensaio.....	19
4.5 Método da intersecção dos histogramas de atrito	21
4.6 Desgaste das amostras.....	23
4.6.1 Desgaste das pastilhas.....	23
4.6.2 Desgaste do disco.....	25
4.7 Análise de superfície	27
4.7.1 Pastilhas	27
4.7.1.1 Microscopias da superfície das pastilhas	27
4.7.1.2 Morfologia dos platôs de contato.....	28
4.7.2 Discos.....	29
4.7.2.1 Fotografias da superfície dos discos	29

4.7.2.2	Distribuição de filme sobre o disco	30
5.	RESULTADOS.....	33
5.1	Atrito	33
5.1.1	Atrito das fases individuais	33
5.1.2	Atrito das fases agrupadas	37
5.1.3	Variação de atrito.....	42
5.2	Desgastes das amostras	45
5.2.1	Pastilha.....	45
5.2.2	Desgaste do disco.....	48
5.2.3	Correlação entre desgastes de pastilha e disco	51
5.3	Análise morfológica dos platôs de contato	52
5.3.1	Percentual de área de platôs	53
5.3.2	Tamanho médio dos platôs	54
5.3.3	Quantidade de platôs.....	57
5.3.4	Correlação entre parâmetros morfológicos e coeficiente de atrito	58
5.4	Filme no disco	62
6.	CONCLUSÕES	69
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	71
	REFERÊNCIAS	72
	APÊNDICE A – Atrito médio, inicial e final de cada frenagem dos ensaios.	76
	APÊNDICE B – Microscopias em tons de cinza e binarização das pastilhas através do algoritmo de Otsu	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Esquemática dos platôs de contato: platôs primários (coloração mais clara) e platôs secundários (coloração mais escura). A seta indica o movimento relativo entre disco e pastilha [Adaptado: Eriksson, 2000].	7
Figura 3.2 – Platôs secundários tipo I e II [Adaptado: Neis et al., 2017].	8
Figura 3.3 – Região analisada da interface tribológica: a) microscopia ótica e b) MEV [Adaptado: Österle et al., 2009].	10
Figura 3.4 - Alterações na composição dos materiais de fricção utilizados nos EUA [Adaptado: Honeywell homepage, Apud Straffelini et al., 2015].	12
Figura 4.1 - a) tribômetro e b) diagrama esquemático do tribômetro [Adaptado: Pavlak et al., 2017].	17
Figura 4.2 – Exemplo de processamento do método da intersecção dos histogramas.	22
Figura 4.3 - Exemplo de imagem obtida pelo interferômetro de um disco atritado.	25
Figura 4.4 – Processo de avaliação do desgaste de discos através do interferômetro: a) seleção da região a ser mensurada (retângulos em azul), b) perfil tridimensional real do desgaste de uma das regiões mensuradas, c) seleção de um plano de desgaste no perfil medido (linha preta tracejada) e d) plano de desgaste analisado da região selecionada.	26
Figura 4.5 – Imagem panorâmica de uma pastilha de freio de 18 mm de diâmetro após os testes (neste exemplo, V10A_100°C).	28
Figura 4.6 - Exemplo de processamento utilizando o algoritmo de Otsu: a) microscopia em tons de cinza e b) binarização através da aplicação do método [Adaptado: Barros et al., 2016].	29
Figura 4.7 – Aparato experimental montado para o registro da superfície atritada do disco: a) posicionamento da câmera digital e b) fotografia obtida.	30
Figura 4.8 – Exemplo de processamento de filme no disco: a) imagem fotográfica de um disco após frenagens com uma linha de referência escolhida e quantificação desta e b) imagem fotográfica do disco com redução de filme depositado e quantificação dos pixels deste ensaio com as mesmas coordenadas da linha de referência.	31
Figura 5.1 - Coeficiente de atrito da frenagem 100 do ensaio V10A_100°C, com valores indicados de atrito inicial (μ inicial), final (μ final) e médio (μ).	33

Figura 5.2 – Coeficientes de atrito inicial, final e médio do ensaio V10A_100°C.	34
Figura 5.3 – Média dos coeficientes de atrito.	35
Figura 5.4 – Histograma do coeficiente de atrito do ensaio V10A_100°C.	36
Figura 5.5 – Histograma de atrito das fases agrupadas nos ensaios com 100 °C de temperatura inicial de disco.	38
Figura 5.6 – Histograma de atrito das fases agrupadas nos ensaios com 200 °C de temperatura inicial de disco.	38
Figura 5.7 – Histograma de atrito das fases agrupadas nos ensaios com 300 °C de temperatura inicial de disco.	39
Figura 5.8 – Médias dos coeficientes de atrito das fases A, B e C e similaridade entre ensaios.	40
Figura 5.9 – Média dos coeficientes de atrito das fases A, B e C e similaridade entre ensaios com avaliação da influência da temperatura.	41
Figura 5.10 – Médias das variações de atrito, obtidas entre as frenagens 100 e 500.	43
Figura 5.11 – Média das médias das variações de atrito.	44
Figura 5.12 – Variação de massa das pastilhas medidos após 5 min e após 24 h da fase A. ...	45
Figura 5.13 – Desgaste volumétrico de pastilha normalizado.	46
Figura 5.14 – Média dos desgastes de pastilha normalizado das fases A, B e C.	46
Figura 5.15 – Média dos desgastes de pastilha normalizado das fases A, B e C com avaliação da influência da temperatura.	47
Figura 5.16 – Ilustração do perfil de desgaste do disco obtido em dois planos em regiões diferentes após o ensaio V10A_100°C.	48
Figura 5.17 – Desgaste de disco normalizado.	49
Figura 5.18 – Média dos desgastes de disco normalizado.	49
Figura 5.19 – Média dos desgastes de disco normalizado com avaliação da influência da temperatura.	50
Figura 5.20 – Correlação de Pearson entre desgaste de pastilha e disco.	52
Figura 5.21 – Médias dos percentuais de área de platôs de contato.	53
Figura 5.22 – Médias dos percentuais de área de platôs de contato com avaliação da influência da temperatura.	54
Figura 5.23 – Médias dos tamanhos médios dos platôs de contato.	55

Figura 5.24 – Médias dos tamanhos médios dos platôs de contato com avaliação da influência da temperatura.	56
Figura 5.25 – Média da quantidade de platôs.	57
Figura 5.26 – Média da quantidade de platôs com avaliação da influência da temperatura. ...	58
Figura 5.27 – Correlação de Pearson entre coeficiente de atrito e média do percentual de área de platôs.	59
Figura 5.28 – Correlação de Pearson entre coeficiente de atrito e tamanho médio de platôs. .	60
Figura 5.29 – Correlação de Pearson entre coeficiente de atrito e quantidade de platôs.	61
Figura 5.30 – Fenômeno de efeito de picos no coeficiente de atrito médio, observado em ensaios prévios dos materiais V10P e V0P com temperatura inicial de disco de 100 °C.	62
Figura 5.31 – Fenômeno de efeito de picos no coeficiente de atrito médio, observado no ensaio V0B_100°C.	63
Figura 5.32 – Coeficiente de atrito e média das intensidades dos tons de cinza para o ensaio V0B_100°C, mostrando a redução de filme depositado sobre o disco (aumento da média das intensidades) nas frenagens em que ocorre o aumento abrupto do coeficiente de atrito.	64
Figura 5.33 – Coeficiente de atrito e desvio padrão das intensidades dos tons de cinza para o ensaio V0B_100°C, mostrando a heterogeneidade de filme depositado no disco nas frenagens em que ocorre o aumento abrupto do coeficiente de atrito.	65
Figura 5.34 – Coeficiente de atrito e média das intensidades dos tons de cinza para o ensaio V0A_100°C, mostrando a não ocorrência da redução de filme depositado sobre o disco, bem como a não ocorrência de aumento abrupto do coeficiente de atrito.	67
Figura 5.35 – Coeficiente de atrito e desvio padrão das intensidades dos tons de cinza para o ensaio V0A_100°C, mostrando a não ocorrência de heterogeneidade de filme depositado no disco, bem como a não ocorrência de aumento abrupto do coeficiente de atrito.	67
Figura A.1 – Coeficientes de atrito do ensaio V0A_100°C.	76
Figura A.2 – Coeficientes de atrito do ensaio V0B_100°C.	76
Figura A.3 – Coeficientes de atrito do ensaio V0C_100°C.	76
Figura A.4 – Coeficientes de atrito do ensaio V10A_100°C.	77
Figura A.5 – Coeficientes de atrito do ensaio V10B_100°C.	77
Figura A.6 – Coeficientes de atrito do ensaio V10C_100°C.	77

Figura A.7 – Coeficientes de atrito do ensaio V30A_100°C.	78
Figura A.8 – Coeficientes de atrito do ensaio V30B_100°C.	78
Figura A.9 – Coeficientes de atrito do ensaio V30C_100°C.	78
Figura A.10 – Coeficientes de atrito do ensaio V0A_200°C.	79
Figura A.11 – Coeficientes de atrito do ensaio V0B_200°C.	79
Figura A.12 – Coeficientes de atrito do ensaio V0C_200°C.	79
Figura A.13 – Coeficientes de atrito do ensaio V10A_200°C.	80
Figura A.14 – Coeficientes de atrito do ensaio V10B_200°C.	80
Figura A.15 – Coeficientes de atrito do ensaio V10C_200°C.	80
Figura A.16 – Coeficientes de atrito do ensaio V30A_200°C.	81
Figura A.17 – Coeficientes de atrito do ensaio V30B_200°C.	81
Figura A.18 – Coeficientes de atrito do ensaio V30C_200°C.	81
Figura A.19 – Coeficientes de atrito do ensaio V0A_300°C.	82
Figura A.20 – Coeficientes de atrito do ensaio V0B_300°C.	82
Figura A.21 – Coeficientes de atrito do ensaio V0C_300°C.	82
Figura A.22 – Coeficientes de atrito do ensaio V10A_300°C.	83
Figura A.23 – Coeficientes de atrito do ensaio V10B_300°C.	83
Figura A.24 – Coeficientes de atrito do ensaio V10C_300°C.	83
Figura A.25 – Coeficientes de atrito do ensaio V30A_300°C.	84
Figura A.26 – Coeficientes de atrito do ensaio V30B_300°C.	84
Figura A.27 – Coeficientes de atrito do ensaio V30C_300°C.	84
Figura B.1 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V0A_100°C.	85
Figura B.2 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V0B_100°C.	85
Figura B.3 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V0C_100°C.	85
Figura B.4 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V10A_100°C.	86
Figura B.5 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V10B_100°C.	86

Figura B.6 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V10C_100°C.	86
Figura B.7 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V30A_100°C.	87
Figura B.8 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V30B_100°C.	87
Figura B.9 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V30C_100°C.	87
Figura B.10 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V0A_200°C.	88
Figura B.11 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V0B_200°C.	88
Figura B.12 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V0C_200°C.	88
Figura B.13 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V10A_200°C.	89
Figura B.14 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V10B_200°C.	89
Figura B.15 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V10C_200°C.	89
Figura B.16 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V30A_200°C.	90
Figura B.17 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V30B_200°C.	90
Figura B.18 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V30C_200°C.	90
Figura B.19 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V0A_300°C.	91
Figura B.20 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V0B_300°C.	91

Figura B.21 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V0C_300°C.	91
Figura B.22 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V10A_300°C.	92
Figura B.23 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V10B_300°C.	92
Figura B.24 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V10C_300°C.	92
Figura B.25 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V30A_300°C.	93
Figura B.26 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V30B_300°C.	93
Figura B.27 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V30C_300°C.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Propriedades das amostras.	19
Tabela 4.2 – Parâmetros de ensaio.	20
Tabela 4.3 – Parâmetros dos ensaios prévios.	21
Tabela 4.4 – Interpretação do método das intersecções dos histogramas.	22
Tabela 5.1 – Teste de Anderson-Darling para avaliação de normalidade dos histogramas de atrito dos ensaios.	36
Tabela 5.2 – Similaridade de atrito entre as fases.	37
Tabela 5.3 – Coeficiente de correlação [Adaptado: Hinkle, Wiersma e Jurs, 2003, Apud Mukaka, 2012].	51

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

GPFAI	Grupo de Projetos, Fabricação e Automação Industrial
PROMECC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
LATRIB	Laboratório de Tribologia
SEDETEC	Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico

LISTA DE SÍMBOLOS

SM	Semi-metalica
NAO	<i>Non asbestos organic</i>
LM	<i>Low-met</i>
HV	Dureza Vickers
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
μ	Coefficiente de atrito
T	Torque frenante [N.m]
F_N	Força normal [N]
R	Raio de deslizamento (ou raio efetivo) [m]
Ra	Rugosidade média [μm]
E_F	Energia de frenagem [N.m]
i	Índice do ponto de análise
t_f	Instante de tempo no final da frenagem [s]
ω_i	Velocidade angular do disco no ponto de análise [rad/s]
t_i	Instante de tempo no ponto de análise [s]
T_i	Torque frenante no ponto de análise [N.m]
ΔV_N	Desgaste volumétrico de pastilha normalizado [$\text{mm}^3/\text{N.m}$]
Δ_m	Variação de massa [g]
D	Densidade [g/cm^3]
\bar{T}	Torque frenante médio [N.m]
V	Volume desgastado da trilha [mm^3]
R_{int}	Raio interno da trilha atritada no disco [mm]
R_{ext}	Raio externo da trilha atritada no disco [mm]
n	Número de medições radiais obtidas pelo interferômetro
R_i	Raio de cada i -ésimo ponto medido [mm]
Z_i	Desgaste de cada i -ésimo ponto medido [mm]
Δ_R	Passo de medição [mm]
FD	Filme do disco

$\bar{\mu}$	Coeficiente de atrito médio
σ	Desvio padrão
ρ	Coeficiente de correlação de Pearson

1. INTRODUÇÃO

Materiais de fricção utilizados em pastilhas de freio automotivo são tipicamente compósitos que podem conter até 20 ingredientes em sua composição [Ostermeyer, 2003, Gilardi et al., 2012]. Ao longo dos anos, estes materiais sofreram diversas mudanças em suas formulações. Estas mudanças ocorrem, além de motivos econômicos, basicamente por dois motivos: desempenho e impacto ambiental. Enquanto que o primeiro deles ocorre para atender requisitos de projeto impostos por fabricantes de veículos, o segundo ocorre para atender exigências legais. Um exemplo que pode ser mencionado de mudança de composição de pastilhas de freio devido ao impacto ambiental é o caso do amianto. O amianto foi muito utilizado na fabricação de diversos componentes, inclusive sendo parte da formulação de materiais de fricção devido às suas boas propriedades físicas e químicas para esta aplicação [Ibhadode e Dagwa, 2008]. No entanto, a exposição do homem ao amianto pode levar a graves doenças devido à inalação do pó deste material, entre elas asbestose e câncer [Limpert, 1999, Halderman e Mitchell, 2004]. Este fato levou a agências governamentais indicarem a eliminação do amianto através de leis regulamentadoras [Halderman e Mitchell, 2004].

De forma semelhante ao que aconteceu com o amianto, a utilização do cobre em materiais de fricção deverá ser reduzida e eventualmente eliminada desta aplicação devido ao impacto que este metal pode causar no meio ambiente [Yun et al., 2010], especialmente no que diz respeito à vida aquática de rios em perímetros urbanos. O desgaste decorrente do contato tribológico entre material de fricção e disco de freio leva à emissão de partículas de cobre (provenientes da pastilha) ao meio ambiente [Wahlström et al., 2010], onde este desgaste é apontado como sendo a maior fonte de emissão de cobre nas vias de tráfego [Davis et al., 2001]. Com a ação das chuvas, o cobre acaba se depositando em rios e lagos, afetando assim a vida aquática local [State of Washington Department of Ecology, 2012, Rosselot, 2006]. Em decorrência disso, agências governamentais internacionais (Estados Unidos da América) estão limitando a utilização do cobre em materiais de fricção nos próximos anos [Lee e Filip, 2013]. Por outro lado, o cobre é largamente utilizado como ingrediente de materiais de fricção na atualidade. Embora fabricantes de materiais de fricção entendem que o cobre desempenha um papel importante para esta finalidade, a compreensão dos mecanismos de ação deste metal em materiais de fricção de freios automotivos ainda é bastante limitada. Desta forma, um estudo mais aprofundado sobre o papel tribológico do cobre em pastilhas de

freio pode contribuir de forma a orientar fabricantes de materiais de fricção na escolha de um potencial composto ou aditivo para a substituição deste metal.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a influência do cobre no desempenho tribológico de pastilhas de freio automotivo.

2.2 Objetivos específicos

- Análise do coeficiente de atrito das pastilhas de freio com e sem cobre durante testes de frenagem;
- Análise do desgaste de pastilhas e discos resultante das frenagens com pastilhas com e sem cobre;
- Análise morfológica dos platôs de contato das pastilhas com e sem cobre após as frenagens;
- Análise da distribuição e variação de filme depositado sobre o disco ao final de cada frenagem.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Sistemas de freio automotivo

Os sistemas de freio automotivos têm como objetivo auxiliar no controle de movimento do veículo. A maioria destes sistemas funciona através do contato entre um elemento fixo (pastilha ou lona) e um rotor (disco ou tambor). Este contato, por sua vez, gera uma força de atrito entre os componentes, convertendo a energia cinética do veículo em calor [Blau, 2001, Uyyuru et al., 2006, EL-Tayeb e Liew, 2009, Verma et al., 2015], vibração e ruído [Matozo, 2006, Kinkaid et al., 2003]. Os tipos de sistemas de freio automotivos atuais se dividem basicamente em freio a disco e freio a tambor.

O sistema de freio a disco é constituído basicamente por um disco, solidário às rodas do veículo; pinça de freio (também chamado de cáliper), o qual é fixado na suspensão do veículo; material de fricção (pastilha de freio); e sistema hidráulico, responsável pela compressão do material de fricção no disco através do acionamento do pedal de freio [Matozo, 2012]. Quando o sistema de freio é acionado, as pastilhas de freio (posicionadas nos dois lados do disco) causam uma força entre estes elementos, gerando assim a força de atrito [Birch, 1998, Limpert, 1999, Halderman e Mitchell, 2004].

O freio a tambor, por sua vez, é um sistema de freio comumente utilizado em eixo traseiro de veículos leves bem como em freio de estacionamento. No Brasil, o sistema a tambor é normalmente aplicado em todos os eixos de veículos de grande porte. Seu funcionamento consiste no acionamento das lonas (material de fricção), que são pressionadas contra o interior do tambor [Birch, 1998]. Este sistema apresenta uma eficiência mecânica menor quando comparado ao freio a disco. Quando a temperatura do tambor aumenta devido a frenagens, ocorre a dilatação radial deste, afastando as lonas e reduzindo a pressão de contato. Isso acarreta em uma perda temporária de eficácia durante uma frenagem [Albuquerque, 1976] visto que a força de atrito é reduzida.

3.2 Materiais de fricção

As pastilhas de freio são normalmente classificadas em dois grupos: semi-metálica (SM) e *non asbestos organic* (NAO) [Birch, 1998, Halderman e Mitchell, 2004, Matozo, 2006]. As semi-metálicas utilizam fibras ferrosas em sua composição. Alguns autores ainda subclassificam estas em *low-met* (LM), as quais apresentam percentuais menores de fibras ferrosas do que as SM. Por outro lado, as pastilhas do tipo NAO não possuem materiais ferrosos, utilizando percentuais maiores de cobre, aramida e sulfetos.

Tipicamente, pastilhas de freio veiculares podem conter mais de 20 ingredientes distintos [Ostermeyer, 2003, Gilardi et al., 2012]. Estes ingredientes são normalmente classificados em materiais estruturais, ligantes, cargas e aditivos [Limpert, 1999, Eriksson, 2000].

- **Materiais estruturais:** fornecem resistência mecânica para o compósito. Fibras de metal, cobre ou vidro são normalmente utilizados. O amianto era muito utilizado como material estrutural até sua proibição devido aos riscos à saúde humana que a utilização deste material proporciona.
- **Ligantes:** com o intuito de manter o compósito unido, utilizam-se ligantes para aglutinar os demais componentes. Normalmente utilizam-se termofixos para esta finalidade, com a adição de borracha para melhorar o amortecimento do sistema.
- **Cargas:** utilizados principalmente para redução de custo. Alguns tipos de carga também têm a função de conferir algumas propriedades específicas ao material de fricção.
- **Aditivos:** são adicionados com a finalidade de estabilizar o coeficiente de atrito e controlar taxas de desgaste de pastilha e disco de freio. Para a estabilização do coeficiente de atrito (principalmente em altas temperaturas), comumente são utilizados lubrificantes sólidos como grafite e sulfetos metálicos. Partículas abrasivas são utilizadas para aumentar o coeficiente de atrito, ajudando também a remover camadas de óxidos que se formam no disco.

Esta classificação pode apresentar variações, dependendo de cada autor. O cobre, assunto do presente trabalho, normalmente é utilizado como material estrutural no formato de fibras. Entretanto, alguns fabricantes também utilizam o cobre no formato de pó em algumas formulações, com o intuito de evitar a perda do coeficiente de atrito em altas temperaturas

[Taylor et al., 1996], fenômeno este também conhecido como *fade*. Alguns autores também afirmam que o cobre pode ser usado como carga em diferentes formatos, tamanho e quantidade, com o intuito de alterar o coeficiente de atrito e reduzir desgaste dos materiais de fricção [Kumar e Bijwe, 2010].

3.3 Platôs de contato

A diversidade de ingredientes presentes na composição de materiais de fricção acarreta um desgaste não uniforme na superfície de contato entre pastilha e disco de freio. Esta distribuição irregular do desgaste leva à formação dos chamados platôs de contato, onde estes se elevam em relação ao restante da superfície do material de fricção [Eriksson, 2000, Eriksson e Jacobson, 2000].

Atualmente, a classificação mais aceita no meio científico é aquela proposta por Eriksson, 2000, cujo autor separou os platôs em primários e secundários. Nos platôs estão contidos os microcontatos que estão efetivamente em contato com o disco. Os chamados platôs primários, oriundos do desgaste de ingredientes do material de fricção, são formados a partir de materiais com maiores durezas (fibras de aço, por exemplo). Estes platôs primários provocam o arrancamento de partículas mais macias do disco e do próprio material de fricção por apresentarem maior resistência mecânica. Estas partículas podem levar à formação dos platôs secundários através da aglomeração destes quando ancorados nos platôs primários. As partículas arrancadas também podem levar à formação de filme (discutido na seção 3.4) entre as superfícies de contato. Eriksson, 2000, também menciona que os platôs representam de 10% a 30% da área nominal de uma pastilha de freio. O restante da pastilha, ou seja, a região que não se tornou platô (primário ou secundário), é chamado de *lowlands*, descrito como sendo uma região irregular e áspera [Eriksson e Jacobson, 2000, Eriksson et al., 2002]. A Figura 3.1 mostra esquematicamente os platôs de contato.

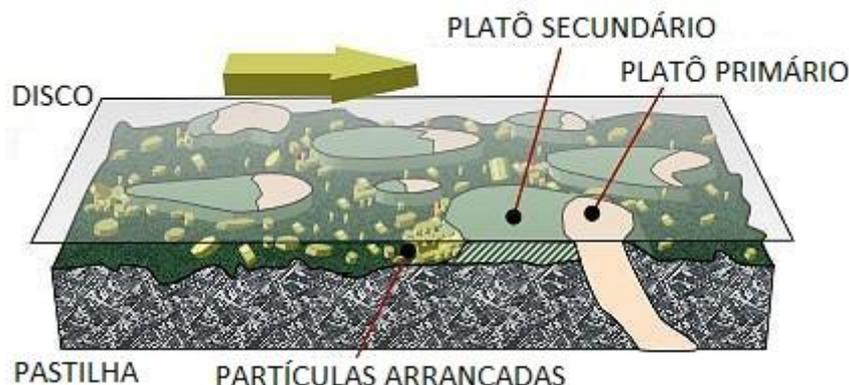


Figura 3.1 – Esquemática dos platôs de contato: platôs primários (coloração mais clara) e platôs secundários (coloração mais escura). A seta indica o movimento relativo entre disco e pastilha [Adaptado: Eriksson, 2000].

Em um estudo recente (Neis et al., 2017), realizado pelo mesmo grupo de pesquisa do presente trabalho (LATRIB), foi efetuada uma investigação da estrutura dos platôs de contato. Neste trabalho, dois tipos de pastilhas de freio (SM e NAO) foram atritadas contra um disco de ferro fundido cinzento, em ensaios realizados em um tribômetro. Através de técnicas de análise de superfície (microscopia ótica, microscopia confocal e microindentação), foi possível classificar os platôs de contato em três categorias.

A primeira categoria trata-se dos platôs primários, onde estes foram subdivididos em deformáveis e não deformáveis plasticamente. Os testes com microindentação resultaram em durezas de 79 a 119 HV dos platôs primários deformáveis plasticamente, sugerindo que estes sejam formados por cobre e/ou latão. Os não deformáveis apresentaram durezas maiores (entre 250 a 273 HV), sendo estes formados por fibras de aço.

A segunda categoria são os platôs secundários, nos quais foram subdivididos em tipo I e tipo II. Os platôs secundários do tipo I são aqueles ancorados por fibras (platôs primários), ou seja, estes são observados nas redondezas dos platôs primários. Por outro lado, os platôs secundários do tipo II se formam sem a ancoragem de fibras. A Figura 3.2 mostra estes platôs secundários dos tipos I e II. Observa-se que os platôs secundários do tipo I estão ancorados por platôs primários (regiões mais claras), enquanto que os do tipo II se formam sem a presença de platôs primários em sua proximidade.

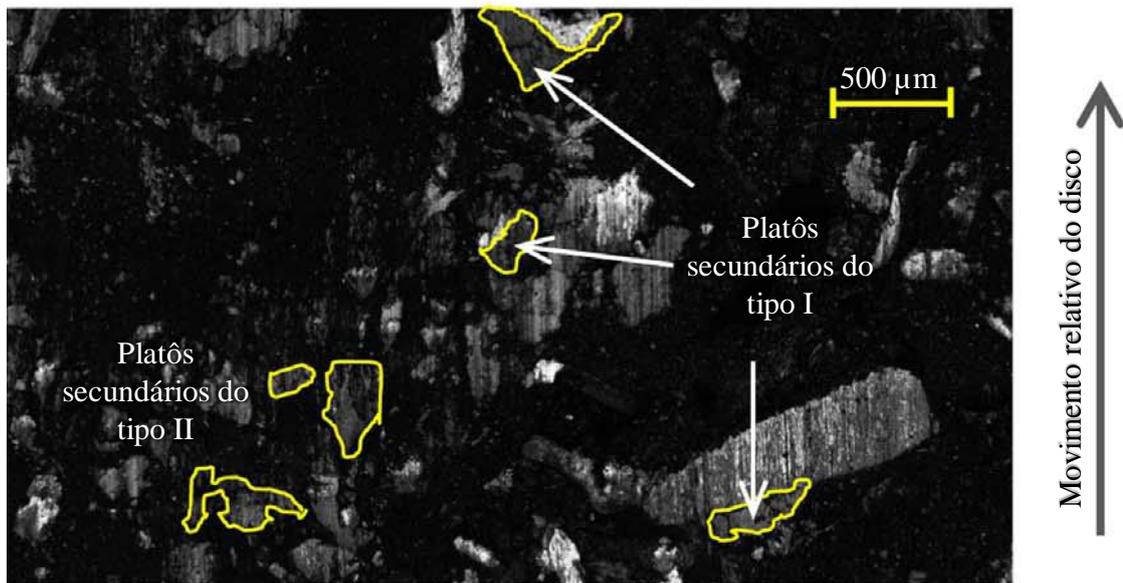


Figura 3.2 – Platôs secundários tipo I e II [Adaptado: Neis et al., 2017].

A terceira categoria de platôs foi chamada de “*elastic highlands*”, onde estes apresentaram alturas sobressalente na topografia da pastilha. Contudo, ao serem submetidas às cargas impostas pela microindentação, estas regiões apresentavam durezas muito baixas. Por serem muito elásticas, foi possível concluir que as “*elastic highlands*” não teriam uma influência muito significativa sobre a força de atrito, visto que, para ter força de atrito, a estrutura deve ser capaz de resistir à carga normal (força devido à pressão).

3.4 Filme

Conforme mencionado na seção 3.3, o filme (também conhecido como terceiro corpo) surge devido ao arrancamento de partículas oriundas das superfícies de pastilha e disco, onde sua composição é determinada principalmente pelo lubrificante sólido presente na formulação do material de fricção [Österle e Urban, 2006].

O filme influencia diretamente no desempenho de materiais de fricção, visto que previne o contato direto entre as superfícies da pastilha e disco [Jang et al., 2004]. Segundo Lee e Filip, 2013, o desgaste do material de fricção está relacionado à sua capacidade de desenvolver e manter um filme estável na interface entre material de fricção e disco. Desta forma, o filme auxilia na preservação da integridade do disco, contribuindo para a estabilidade do atrito durante a frenagem [Matozo, 2006], além de reduzir a geração de ruído e vibração

[Österle e Urban, 2006]. Na literatura, podem-se encontrar diversos trabalhos direcionados ao entendimento do filme tribológico em materiais de fricção. Alguns destes trabalhos são comentados a seguir.

No estudo de Cho et al., 2005, foi avaliada a espessura do filme depositado sobre um disco de ferro fundido cinzento em ensaios com materiais de fricção de diferentes formulações, onde estes ensaios foram realizados em uma máquina de pequena escala para avaliação de atrito (*small-scale friction tester*). A avaliação da espessura do filme depositado no disco foi realizada através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) após realizar uma seção de corte do disco, possibilitando a visualização da espessura do filme formado em sua superfície. Também foi utilizado um método não destrutivo para avaliação de espessura de filme baseado em uma técnica de medição de resistência elétrica de sonda por quatro pontos (*four-point probe resistance measurement*), onde estes valores de resistência do filme foram correlacionados com os valores obtidos de espessura deste filme através do MEV. Esta técnica proposta apresentou resultados relativamente confiáveis para avaliar a espessura de filme, contudo, não se mostrou ser aplicável para espessuras menores que 10 μm visto que a rugosidade do disco nestes casos influencia nos valores de resistência medidos. Os autores sugerem que a espessura do filme está relacionada com a temperatura do disco, afirmando que ocorre uma diminuição na espessura do filme com o aumento da temperatura devido à decomposição térmica dos ingredientes. Foi observada a formação de filme com diferentes espessuras, variando aproximadamente de 5 a 50 μm , dependendo do material ensaiado. Também sugerem que valores do coeficiente de atrito não apresentaram correlação direta com a espessura do filme, embora a oscilação do atrito seja reduzida com o aumento da espessura deste filme. Em relação ao desgaste dos materiais de fricção selecionados no estudo dos autores, não se observou influência significativa da quantidade do filme de fricção formado sobre o desgaste das amostras.

O trabalho de Österle et al., 2009 realizou estudos da interface entre disco e pastilha de freio após ensaios efetuados em um teste pino-sobre-disco. A metodologia utilizada pelos autores consistiu em fixar a interface disco-pino após os ensaios através da utilização de cola e resina epóxi. Esta fixação tem o intuito de manter pressionado o pino contra o disco, preservando a interface do par tribológico após o final dos testes. Em seguida, foi realizada uma seção de corte das amostras, de forma a possibilitar a visualização da espessura do filme formado. A Figura 3.3 mostra imagens de uma região da interface de contato tribológico das

amostras através de microscopia ótica (Figura 3.3-a) e através de microscopia eletrônica de varredura – MEV (Figura 3.3-b).

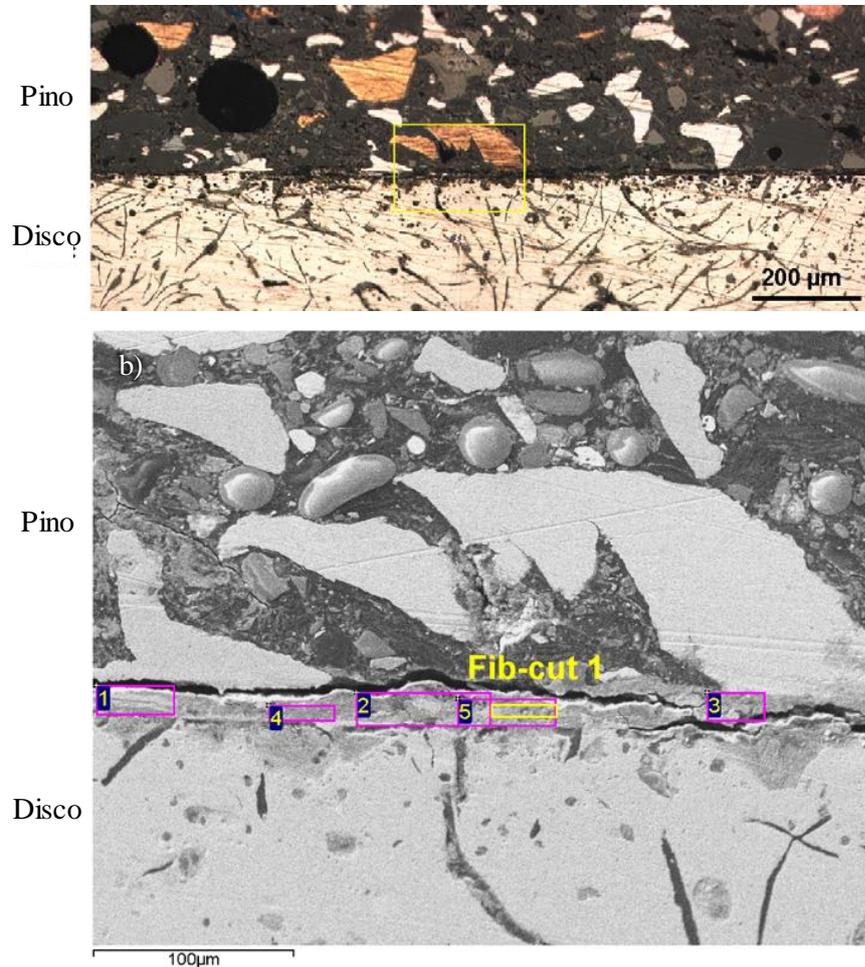


Figura 3.3 – Região analisada da interface tribológica: a) microscopia ótica e b) MEV

[Adaptado: Österle et al., 2009].

Com base nas imagens obtidas, os autores constataram que o filme formado na interface entre disco e pino apresentou uma espessura de aproximadamente 10 µm oriundo de partículas desgastadas do par tribológico.

Um estudo recente do presente grupo de pesquisa [Barros et al., 2016] avaliou a heterogeneidade do filme depositado sobre o disco de freio em ensaios realizados por um tribômetro, utilizando uma pastilha de freio tipo NAO e outra SM. O estudo foi realizado através do registro da imagem da superfície do disco utilizando microscopia ótica, onde a identificação de diferentes intensidades de cores possibilitou a avaliação da distribuição do

filme depositado sobre o disco de freio. Neste trabalho foi verificado que a pastilha de freio do tipo SM apresenta maior homogeneidade do filme depositado no sentido radial do disco do que a pastilha NAO.

O cobre em materiais de fricção, assunto do presente trabalho, auxilia na formação do filme tribológico, conforme reportado em alguns estudos [Lee e Filip, 2013, Straffelini et al., 2015]. Mais detalhes sobre o papel do cobre no filme são discutidos na seção 3.5.2.

3.5 Cobre em materiais de fricção

3.5.1 Meio ambiente e legislação

Diversos elementos utilizados como ingredientes em materiais de fricção para freios automotivos podem causar efeitos negativos no que diz respeito à questão ambiental, entre eles, o cobre [Haselden et al., 2006, Roubicek et al., 2008, Yun et al., 2010].

O tráfego de veículos em estradas é a principal fonte de emissão de componentes metálicos em áreas urbanas [Hjortenkrans et al., 2007, Straffelini et al., 2015, Duong e Lee, 2011], onde o desgaste de materiais de fricção de freios de veículos é apontado como o maior responsável pela emissão do cobre nas vias de tráfego [Davis et al., 2001]. Devido à ação das chuvas, este metal acaba por ser depositado em rios [State of Washington Department of Ecology, 2012, Rosselot, 2006], afetando assim a vida aquática local. Há estudos realizados na Baía de São Francisco (Califórnia), por exemplo, que mostram altos índices de concentração de cobre oriundos de materiais de fricção [Rosselot, 2006].

O cobre proveniente do desgaste de materiais de fricção pode ser tóxico para organismos aquáticos. Estudos mostram que a exposição do salmão-prateado (*Oncorhynchus kisutch*) ao cobre dissolvido leva a diminuição da sensibilidade olfativa da espécie. Esta perda sensorial leva a uma redução na capacidade deste peixe de evitar predadores [Innovate US, 2013, Sandahl et al., 2007], o que pode contribuir para extinção desta espécie.

Em março de 2010, o estado de Washington aprovou a lei SB6557 (*Brake friction material restriction on use*), na qual limita o uso de cobre em materiais de fricção, onde estes não poderão conter mais do que 5% e 0,5% (em massa) a partir de 1º de janeiro de 2021 e 1º de janeiro de 2023, respectivamente [Estado de Washington, 2010].

Similarmente ao estado de Washington, em setembro de 2010, o estado da Califórnia aprovou a lei SB 346 (*Hazardous materials: motor vehicle brake friction materials*). Segundo esta lei, no estado da Califórnia será proibida a comercialização de materiais de fricção automotivo com concentrações de cobre superiores a 5% (em massa) a partir de 1º de janeiro de 2021, e superiores a 0,5% a partir de 1º de janeiro de 2025 [Estado da Califórnia, 2010].

Outros estados dos Estados Unidos da América implementaram leis semelhantes, como por exemplo, em Nova Iorque e em Oregon [Lee e Filip, 2013], sendo esta provavelmente uma tendência a ser seguida por outros países no mundo.

A Figura 3.4 mostra a evolução das composições dos materiais utilizados em pastilhas de freio ao longo dos anos nos EUA.

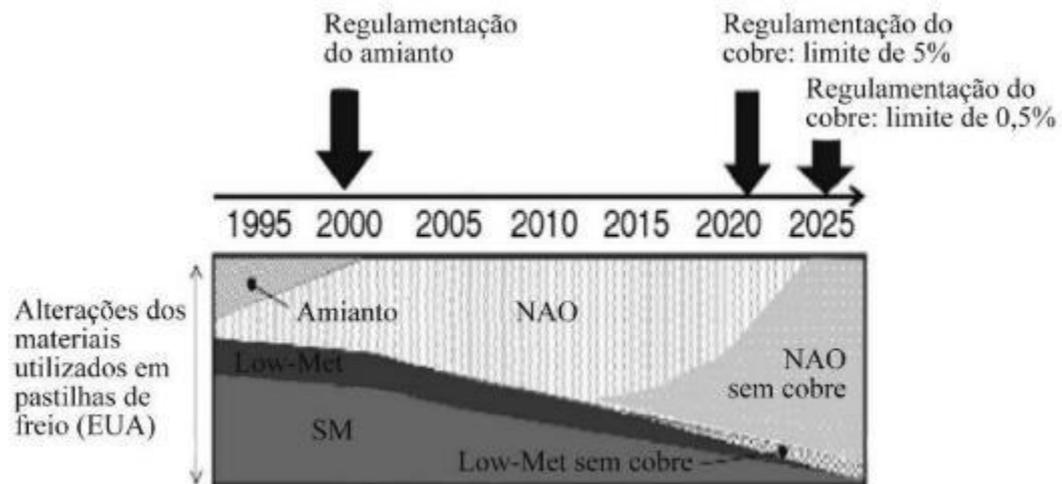


Figura 3.4 - Alterações na composição dos materiais de fricção utilizados nos EUA

[Adaptado: Honeywell homepage, Apud Straffelini et al., 2015].

Através da Figura 3.4, é possível observar que o amianto foi banido das formulações de pastilhas de freio nos EUA no final da década de 1990. Como foi relatado anteriormente, leis impostas implicarão na limitação do cobre em materiais de fricção nos próximos anos. Estima-se que, a partir de 2025, pastilhas de freio do tipo NAO sem cobre serão dominantes no mercado americano. Portanto, atualmente existe um empenho global por parte dos fabricantes de materiais de fricção para a redução e futura eliminação do cobre utilizado em pastilhas de freio automotivo.

3.5.2 Estudos recentes do cobre em materiais de fricção

A necessidade de substituição do cobre nos próximos anos em materiais de fricção vem incentivando diversos estudos sobre este assunto. Estes estudos se dividem em duas frentes. A primeira foca no papel efetivo do cobre, visando uma melhor compreensão dos efeitos que este elemento causa no desempenho de materiais de fricção. A segunda frente visa o estudo de possíveis substitutos para o cobre na formulação de materiais de fricção. Nesta seção são mostrados alguns trabalhos recentes sobre estes temas.

3.5.2.1 Influência do cobre no desempenho de pastilhas de freio

Conforme discutido na seção 3.4, o filme influencia no desempenho de materiais de fricção. Straffelini et al., 2015, afirmaram que a formação do filme de fricção é mais difícil de ocorrer quando o cobre é removido da formulação da pastilha. A remoção deste componente geralmente causa um aumento na taxa de desgaste do material de fricção com altos níveis de coeficiente de atrito, levando também a uma grande produção e emissão de *debris* (partículas arrancadas oriundas do desgaste do par tribológico). Estes autores também relatam que o cobre, além de reduzir a geração de ruído, aumenta a condutividade térmica da pastilha, o que contribui para redução da temperatura de contato.

De acordo com a literatura [Eriksson et al., 1999, Eriksson e Jacobson, 2000, Eriksson et al., 2002], a composição heterogênea de pastilhas de freio resulta em uma superfície com platôs de contato. Conforme discutido na seção 3.3, nestes platôs estão contidos os microcontatos que estão efetivamente em contato com o disco de freio. Verma et al., 2015, e Menapace et al., 2017, afirmam que o cobre auxilia na formação e estabilização dos platôs de contato bem como na redução de desgaste de material de fricção e disco.

No trabalho de Verma et al., 2015, os autores realizaram estudos de pastilhas comerciais do tipo NAO atritadas contra disco de ferro fundido cinzento em ensaios efetuados em testes do tipo pino-sobre-disco. O estudo visou avaliar o efeito de diferentes ingredientes em materiais de fricção, entre eles, o cobre, na morfologia da superfície da pastilha após os ensaios. Os autores observaram a formação de dois tipos de platôs. O primeiro deles, rico em cobre, mostrou-se propenso a apresentar tamanho maior quando comparado com o segundo deles, no qual apresenta pouco cobre. Também foi observado que o cobre contribui para a

estabilização dos platôs, bem como auxilia para redução do desgaste do material de fricção (pastilha de freio) e rotor (disco). O tamanho maior dos platôs primários (quando comparados com os secundários) pode ser explicado através da grande deformação plástica que o cobre sofre devido às forças de deslizamento [Neis et al., 2017], onde este metal pode ser responsável pela estabilização deste tipo de platô observada no estudo de Verma et al., 2015.

No estudo de Kumar e Bijwe, 2011, foi avaliada a influência do cobre em pastilhas de freio do tipo NAO quando alterado o formato e quantidade deste metal no compósito. Através de ensaios realizados em um dinamômetro, dois grupos de materiais de fricção com diferentes formatos de cobre foram testados. No primeiro grupo foi utilizado cobre em pó, enquanto que no segundo, este metal foi utilizado no formato de fibras. Em cada um destes grupos, diferentes percentuais de cobre (10% e 20% em massa) foram testados, além de uma outra amostra que possui 0% de cobre em sua formulação. Os autores avaliaram diversos parâmetros tribológicos, como magnitude do coeficiente de atrito, sensibilidade do coeficiente de atrito quanto à variação de pressão, velocidade de deslizamento e temperatura, bem como desgaste do material de fricção. Concluiu-se que, em geral, a inclusão de cobre nos compósitos levou a melhores resultados no que diz respeito ao coeficiente de atrito e desgaste do material de fricção quando comparados com as amostras sem cobre. Em relação ao formato, o cobre em pó apresentou melhores resultados tribológicos do que o cobre em fibras. Entre os materiais que continham pó de cobre, o compósito com 10% de cobre apresentou melhores resultados tribológicos, com exceção do desgaste, onde o material com 20% de cobre apresentou resultados levemente melhores do que o material com 10% de cobre.

3.5.2.2 Possíveis substitutos para o cobre

A regulamentação e limitação do uso do cobre em materiais de fricção obriga os fabricantes a encontrar algum substituto para este metal. Isso tem impulsionado diversos estudos neste sentido, onde diferentes tipos de materiais vêm sendo testados para esta função.

Gilardi et al., 2012, realizaram um estudo utilizando um tribômetro para avaliar o papel da grafita em materiais de fricção, sugerindo este material como possível substituto do cobre. Os autores do estudo afirmam que a grafita pode compensar a perda de condutividade térmica em pastilhas sem cobre, visto que uma condutividade térmica adequada é importante para manter uma distribuição homogênea de temperatura no material de fricção. Neste estudo,

foram ensaiados seis materiais com formulações reduzidas, contendo apenas seis ingredientes cada. O cobre, neste caso, não foi utilizado em nenhuma das formulações. Um material base (sem grafita) e cinco outros materiais com diferentes tipos e tamanhos de grafita utilizados como carga em suas formulações. Frequências e intensidades de ruído geradas pelo contato do par tribológico foram mensurados durante os testes, assim como a condutividade térmica dos materiais de fricção. Os autores concluíram que, em geral, os materiais com grafita apresentaram resultados positivos e melhores do que o material base (sem grafita) para a redução do ruído, bem como aumento da condutividade térmica. Também foi observado que materiais com partículas menores de grafita apresentaram níveis de ruído inferiores aos materiais que possuem partículas maiores.

Lee e Filip, 2013, realizaram ensaios em um dinamômetro utilizando pastilhas do tipo NAO sem cobre e sem antimônio, com a adição de diferentes percentuais (em massa) de uma classe de geopolímero (material sintético). Os resultados tribológicos (atrito e desgaste) destes materiais foram comparados com os resultados de um material base que contém cobre e antimônio. O desgaste dos materiais de fricção foi mensurado através da variação de massa antes e após os testes, bem como através da variação de espessura do corpo de prova, com o auxílio de um paquímetro. O desgaste do disco foi mensurado através da variação de espessura, também com o auxílio de um paquímetro. O material base resultou em níveis de atrito e desgaste de disco e pastilha inferiores aos ensaios com as pastilhas que não possuíam cobre e antimônio em sua formulação. Os autores afirmam que as amostras sem cobre e sem antimônio não apresentaram formação de filme devido à alta adesão do par tribológico. Enquanto que no material base as forças adesivas não foram suficientemente fortes para cisalhar o filme tribológico, a alta adesão nos materiais sem cobre e antimônio impediu a formação de filme. Consequentemente, os níveis de atrito e desgaste (de disco e pastilhas) foram superiores nestes materiais quando comparados com o material base.

Aranganathan e Bijwe, 2016, propuseram a utilização de termografite e lã de rocha tratada para substituição do cobre em materiais de fricção utilizando diferentes percentuais destes ingredientes. Dois diferentes grupos de materiais foram estudados. No primeiro deles, utilizou-se cobre em sua composição, mudando percentuais (em massa) de termografite e lã de rocha. No segundo grupo, todo o cobre foi retirado, onde também foi variado o percentual de termografite e lã de rocha em sua composição. Os ensaios foram realizados em um dinamômetro inercial. Os autores avaliaram algumas propriedades dos materiais de fricção

estudados, entre eles a condutividade térmica. Por apresentar valores elevados de condutividade térmica, a utilização do termografite neste estudo tem por finalidade compensar a perda de condutividade térmica de materiais de fricção sem cobre. Também foram avaliados o coeficiente de atrito bem como desgaste dos materiais de fricção, sendo este último mensurado através da variação de massa e variação de volume das amostras antes e após os testes. Observou-se que os materiais do primeiro grupo (com cobre) apresentaram níveis de atrito mais elevados na maioria das condições ensaiadas do que no segundo grupo (sem cobre). Por outro lado, algumas formulações do segundo grupo (sem cobre) de materiais estudados apresentaram maiores valores de condutividade térmica do que o grupo que tinha cobre em sua composição, comprovando assim que, segundo os autores, a utilização de termografite e lã de rocha podem compensar a perda de condutividade térmica devido à ausência de cobre em materiais de fricção. Em relação ao desgaste dos materiais de fricção estudados, foi observado que, em geral, o segundo grupo (sem cobre) apresentou valores de desgaste menores do que do primeiro grupo.

Além de artigos científicos, podem-se encontrar fabricantes que também buscam a substituição do cobre em materiais de fricção. Em um congresso da Eurobrake, realizado em 2014, a empresa Tribotecc apresentou duas novas famílias de materiais sintéticos para substituir o cobre de pastilhas de freio. A primeira delas consiste em um sulfeto de ferro sintético, que, segundo o fabricante, apresenta alta condutividade térmica, com bom desempenho tribológico para materiais de fricção sem cobre. A segunda família apresentada consiste em sulfetos metálicos à base de ferro, estanho, zinco e bismuto, projetados para estabilizar o atrito em altas temperaturas [Tribotecc, 2014].

Embora alguns resultados sejam promissores, a substituição do cobre em pastilhas de freio necessita de estudos mais aprofundados, visto que há diversos fatores a serem analisados que influenciam diretamente o desempenho tribológico de materiais de fricção, como, por exemplo, temperatura, pressão, velocidade de escorregamento, etc.

4. METODOLOGIA

4.1 Tribômetro

O equipamento utilizado para a realização dos ensaios tribológicos dos materiais avaliados neste estudo foi o tribômetro do Laboratório de Tribologia da UFRGS - LATRIB (Figura 4.1).

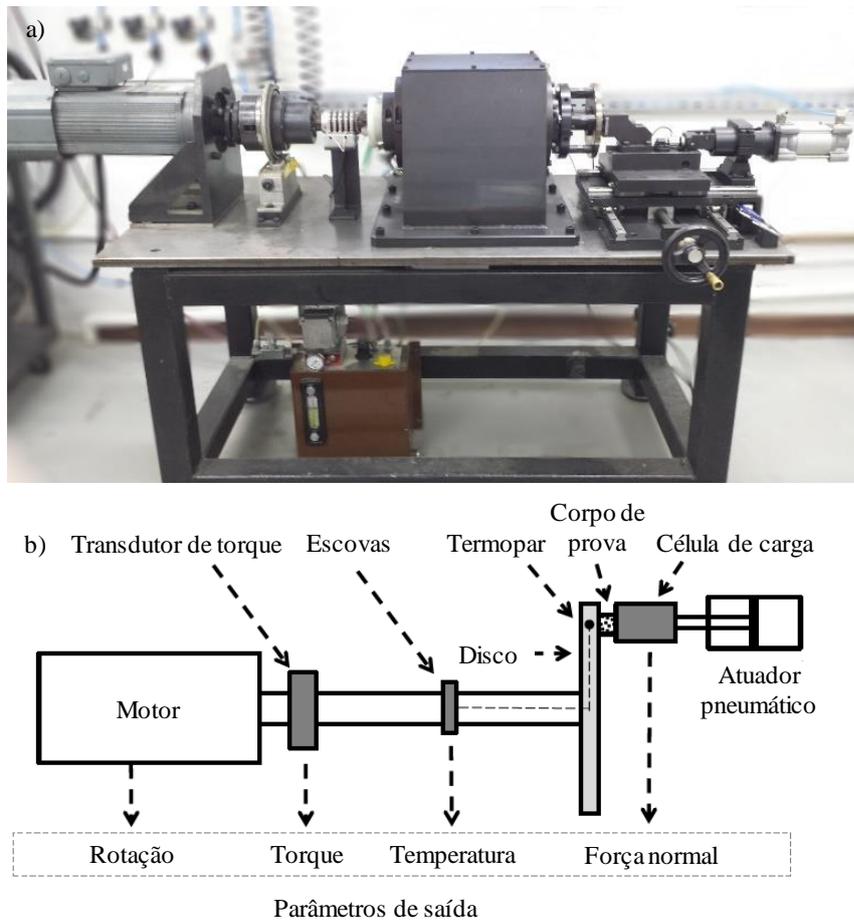


Figura 4.1 - a) tribômetro e b) diagrama esquemático do tribômetro [Adaptado: Pavlak et al., 2017].

Este equipamento foi projetado para reproduzir condições de pressão e velocidade de deslizamento de sistemas de freio a disco reais, permitindo obter valores de coeficiente de atrito. No tribômetro, o coeficiente de atrito é calculado através da Equação 4.1.

$$\mu = \frac{T}{F_N \cdot R} \quad (4.1)$$

Onde:

- μ - Coeficiente de atrito
- T - Torque frenante [N.m]
- F_N - Força normal [N]
- R - Raio de deslizamento (ou raio efetivo) [m]

Através de um estudo realizado por Pavlak et al., 2017, pode-se afirmar que, para os valores de torque e força normal encontrados no presente trabalho, o erro do coeficiente de atrito é menor do que 3%. O tribômetro utilizado também permite o controle da temperatura inicial do disco por meio da utilização de um aquecedor indutivo, bem como o monitoramento da temperatura em tempo real através de um termopar instalado no interior do disco. Maiores detalhes sobre o projeto e funcionamento deste equipamento podem ser encontrados em Neis, 2012.

4.2 Materiais de fricção

Os materiais de fricção (ou pastilhas de freio) utilizadas neste trabalho possuem formato cilíndrico, com 18 mm de diâmetro. De forma a permitir a avaliação da influência do cobre em materiais de fricção, foram utilizadas três versões de pastilhas de freio, com diferentes composições químicas. A seguir, estão descritas as três versões destes materiais empregadas no estudo experimental conduzido neste trabalho:

- V10 – Material com formulação baseada em uma pastilha de freio automotivo do tipo semi-metálica comercialmente utilizada, com 10% de cobre (em massa) na sua composição. Pode ser entendido como o material *baseline* neste comparativo;
- V0 - Mesma composição do V10, com exceção do cobre, que foi totalmente retirado. A proporção dos demais ingredientes foi mantida;
- V30 - Mesma composição do V10, com exceção do cobre, que foi aumentado para 30% em massa na sua composição. A proporção dos demais ingredientes foi mantida.

A Tabela 4.1 mostra a composição destes materiais bem como suas densidades. O percentual de cobre encontra-se somado no percentual em massa das fibras metálicas.

Tabela 4.1 – Propriedades das amostras.

Composição [% em massa]	V10	V0	V30
Ligante	6,7	7,4	5,8
Fibras metálicas	34,0	26,8	46,3
Fibras orgânicas	1,3	1,4	1,1
Abrasivos	21,0	23,3	17,1
Lubrificantes	28,0	31,0	22,7
Cargas	9,0	10,1	7,0
Densidade [g/cm³]	2,8	2,6	3,0

4.3 Rotor

Os rotores (ou discos) utilizados neste estudo são constituídos de ferro fundido cinzento, material comumente utilizado para discos de freio automotivo comerciais. O disco possui 159 mm de diâmetro e 10,25 mm de espessura. Antes de cada ensaio, a superfície do disco foi lixada com lixas de diferentes granulações (240, 300, 400, 500, 600 e 1500, nesta ordem) com o intuito de obter valores de rugosidade média (Ra) inferiores a 0,20 μm , permitindo assim atingir condições iniciais das superfícies dos discos semelhantes para cada ensaio. Conforme relatado na seção 4.1, foi instalado um termopar no interior do disco, permitindo assim monitorar a temperatura deste nos ensaios. Este termopar também tem a função de permitir controlar a temperatura do disco, aquecido através de um aquecedor indutivo.

4.4 Parâmetros de ensaio

A Tabela 4.2 mostra os parâmetros de ensaio utilizados para cada amostra (V0, V10 e V30) empregadas neste estudo.

Tabela 4.2 – Parâmetros de ensaio.

Temperatura inicial de disco [°C]	Velocidade de deslizamento inicial [m/s]	Velocidade de deslizamento final [m/s]	Força normal [N]	Tempo [s]	Repetições
100	8,05	4,02	500	6	500
200					
300					

As velocidades de deslizamento inicial e final utilizadas equivalem a uma caminhonete desacelerando de 80 a 40 km/h em seis segundos. Considerando a área nominal do corpo de prova (254,47 mm², oriundo do diâmetro de 18 mm das amostras) e a força normal (500 N), a pressão imposta no corpo de prova sobre o disco representa um valor típico de pressão empregado em sistemas de freio a disco automotivo. O número de repetições de frenagens (500) foi escolhido de forma a possibilitar que os desgastes das pastilhas e discos fossem suficientes para que pudessem ser mensurados com as técnicas escolhidas, que são discutidas posteriormente.

Optou-se por variar a temperatura inicial de disco em três patamares distintos, de forma a verificar a influência que este parâmetro tem no desempenho tribológico das amostras. Antes de iniciar os experimentos para cada configuração de ensaio, o disco foi aquecido através de um aquecedor indutivo até a temperatura atingir o valor de gatilho determinado para cada configuração de ensaio (100 °C, 200 °C ou 300 °C). A seguir, iniciam-se as frenagens, onde ocorre o aquecimento (oriundo do atrito) do par tribológico, elevando assim a temperatura do disco. Desta forma, ao final de cada frenagem, a temperatura do disco se eleva a um patamar acima da temperatura de gatilho. A frenagem seguinte inicia-se automaticamente quando a temperatura do disco retornar ao valor de gatilho, prosseguindo desta forma todo o ensaio.

Cada configuração foi ensaiada três vezes para cada material, com o intuito de avaliar a repetitividade dos ensaios, totalizando 27 experimentos (três materiais em três temperaturas com três repetições). Os diferentes ensaios com os mesmos materiais e mesmas temperaturas são, a partir de agora, chamados de “fases”, sendo estas diferenciadas pelas letras A, B e C. Assim, por exemplo, a primeira fase do material V10 com temperatura inicial de disco de 100 °C será chamado de “V10A_100°C”, a segunda fase deste mesmo material será chamada

de “V10B_100°C” e a terceira, de V10C_100°C. Para cada fase, é selecionado um corpo de prova não submetido a frenagens anteriores (material novo).

Foram também foram realizados ensaios prévios, que utilizaram parâmetros similares aos mostrados na Tabela 4.2. A Tabela 4.3 mostra os parâmetros destes ensaios prévios.

Tabela 4.3 – Parâmetros dos ensaios prévios.

Temperatura inicial de disco [°C]	Velocidade de deslizamento inicial [m/s]	Velocidade de deslizamento final [m/s]	Força normal [N]	Tempo [s]	Repetições
100					
200	8,05	0	600	10	800
300					

Nestes ensaios prévios foram utilizadas as amostras V10 e V0. Os ensaios prévios, diferenciados pela letra “P” (V10P e V0P), não fazem parte dos testes oficiais, descritos na Tabela 4.2. Diferentemente dos ensaios mostrados na Tabela 4.2, os ensaios prévios apresentam velocidades de deslizamento que equivalem a um veículo desacelerando de 80 0 km/h em 10 segundos, representando uma parada total de um veículo. Alguns resultados obtidos nestes ensaios prévios são relatados na seção 5.4.

4.5 Método da intersecção dos histogramas de atrito

Um método foi desenvolvido para avaliar o grau de similaridade dos histogramas de atrito. A Figura 4.2 mostra esquematicamente o funcionamento deste método, com dois histogramas de atrito μ_1 e μ_2 .

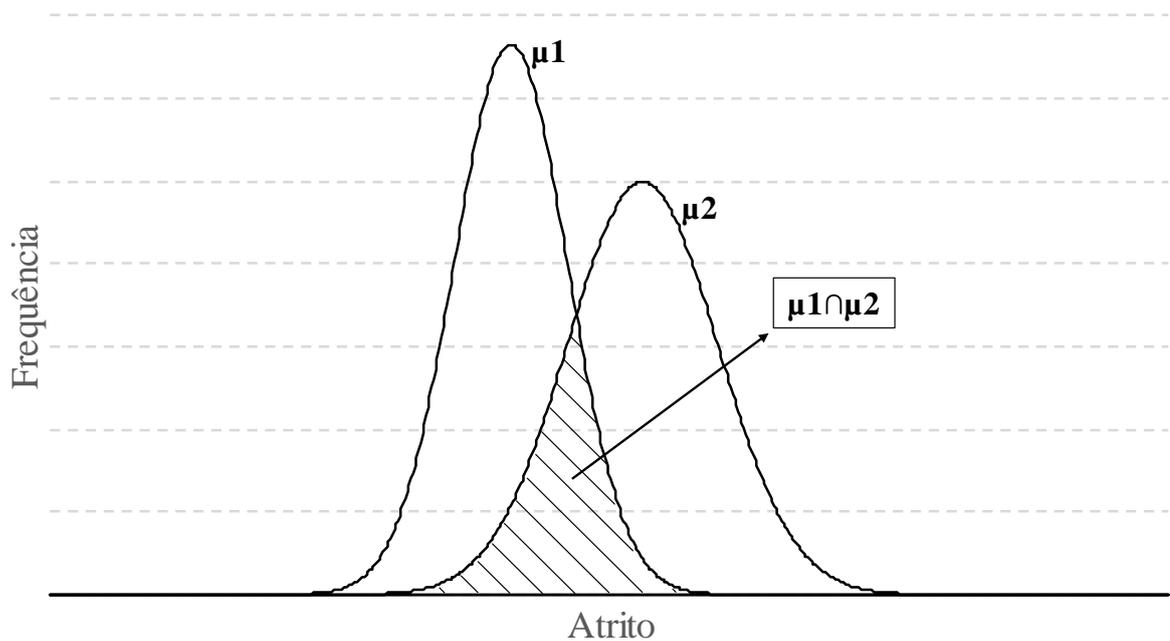


Figura 4.2 – Exemplo de processamento do método da intersecção dos histogramas.

Observa-se que há uma área de intersecção entre os histogramas μ_1 e μ_2 ($\mu_1 \cap \mu_2$). O método consiste em quantificar esta área em comum, com o intuito de verificar, em valores percentuais, quanto que o histograma μ_1 é idêntico ao histograma μ_2 . Em outras palavras, quanto maior o percentual, maior a similaridade entre as curvas, ou seja, maior a semelhança entre os histogramas de atrito μ_1 e μ_2 . Este valor percentual é calculado através da soma dos pontos de atrito em comum entre as curvas μ_1 e μ_2 dividido pelo total de frenagens analisadas. Para a avaliação do grau de similaridade entre diferentes histogramas, foi adotado o seguinte critério, apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Interpretação do método das intersecções dos histogramas.

Similaridade	Interpretação
0 a 30%	Similaridade fraca
30 a 60%	Similaridade moderada
60 a 100%	Similaridade forte

4.6 Desgaste das amostras

Como foi discutido anteriormente, diversos autores relatam que o cobre influencia no desgaste, tanto da pastilha quanto do disco. Desta forma, mensurar o desgaste tribológico neste estudo de forma adequada é fundamental para entender a influência do cobre neste quesito. A seguir, são descritas as técnicas utilizadas para mensurar o desgaste das pastilhas e dos discos.

4.6.1 Desgaste das pastilhas

Para avaliação do desgaste das pastilhas, foi necessário mensurar a variação de suas massas. Estas medidas foram realizadas antes e após cada ensaio, permitindo assim obter a variação de massa dos corpos de prova. Para este fim, foi utilizada uma balança marca Marte®, modelo AY220, com resolução de 0,1 mg.

Conforme discutido em outro estudo [Neis et al., 2014], a absorção de umidade pode influenciar nos resultados de pesagem de pastilhas de freio, visto que materiais de fricção são higroscópicos (capacidade de absorção de água de certos materiais). Durante o contato tribológico, ocorre um aumento de temperatura do material de fricção, levando à redução desta umidade. Quando o corpo de prova é deixado ao ambiente por um longo período, ocorre a absorção desta umidade pelas porosidades do material de fricção. Desta forma, valores diferentes de perda de massa podem ser obtidos caso a medida de massa seja efetuada poucos minutos ou horas após o ensaio. Para contornar este problema, duas medições foram realizadas neste estudo. A primeira medição de massa foi realizada aproximadamente cinco minutos após cada ensaio (massa seca). A segunda medição, por sua vez, foi realizada após 24 horas do ensaio tribológico (massa úmida).

Após o registro das variações de massa por ambos os métodos (massa seca e úmida), foi estimado o desgaste volumétrico dos corpos de prova através da densidade de cada amostra (apresentado na Tabela 4.1). O desgaste volumétrico foi então normalizado com base na energia de frenagem dos ensaios. Diversos autores efetuaram a avaliação de desgaste de materiais de fricção de forma similar, como por exemplo, Kim e Jang, 2000, Jang et al., 2004, Cho et al., 2005, Yoon et al., 2012. A energia de frenagem no tribômetro é dada pela equação

4.2, que descreve o somatório por intervalo de tempo da energia de frenagem para um processo de frenagem [Neis et al., 2011]:

$$E_F = \sum_{i=1}^{i=t_f} \omega_i(t_i - t_{i-1})T_i \quad (4.2)$$

Onde:

- E_F - Energia de frenagem [N.m]
- i - Índice do ponto de análise
- t_f - Instante de tempo no final da frenagem [s]
- ω_i - Velocidade angular do disco no ponto de análise [rad/s]
- t_i - Instante de tempo no ponto de análise [s]
- T_i - Torque frenante no ponto de análise [N.m]

Conforme visto na Tabela 4.2, as velocidades de deslizamento inicial e final (8,05 e 4,02 m/s, respectivamente) são as mesmas para todos os ensaios, e ocorrem no mesmo intervalo de tempo (seis segundos). Portanto, apenas o torque varia entre os ensaios, sendo este parâmetro suficiente para normalizar os desgastes entre os diferentes materiais testados. O valor de torque utilizado para esta normalização foi o torque médio de todas as 500 frenagens de cada experimento. Desta forma, o desgaste volumétrico normalizado do material de fricção em análise é dado por:

$$\Delta V_N = \frac{1000 \cdot \Delta_m}{D \cdot \bar{T}} \quad (4.3)$$

Onde:

- ΔV_N - Desgaste volumétrico de pastilha normalizado [mm³/N.m]
- Δ_m - Variação de massa [g]
- D - Densidade [g/cm³]
- \bar{T} - Torque frenante médio [N.m]

4.6.2 Desgaste do disco

Com o intuito de mensurar o desgaste dos discos após os ensaios tribológicos, foi utilizado um interferômetro, marca Bruker, modelo ContourGT-K, equipamento este capaz de fornecer a topografia tridimensional de uma determinada região. A Figura 4.3 mostra um exemplo de dados obtidos de uma trilha atritada do disco através do interferômetro.

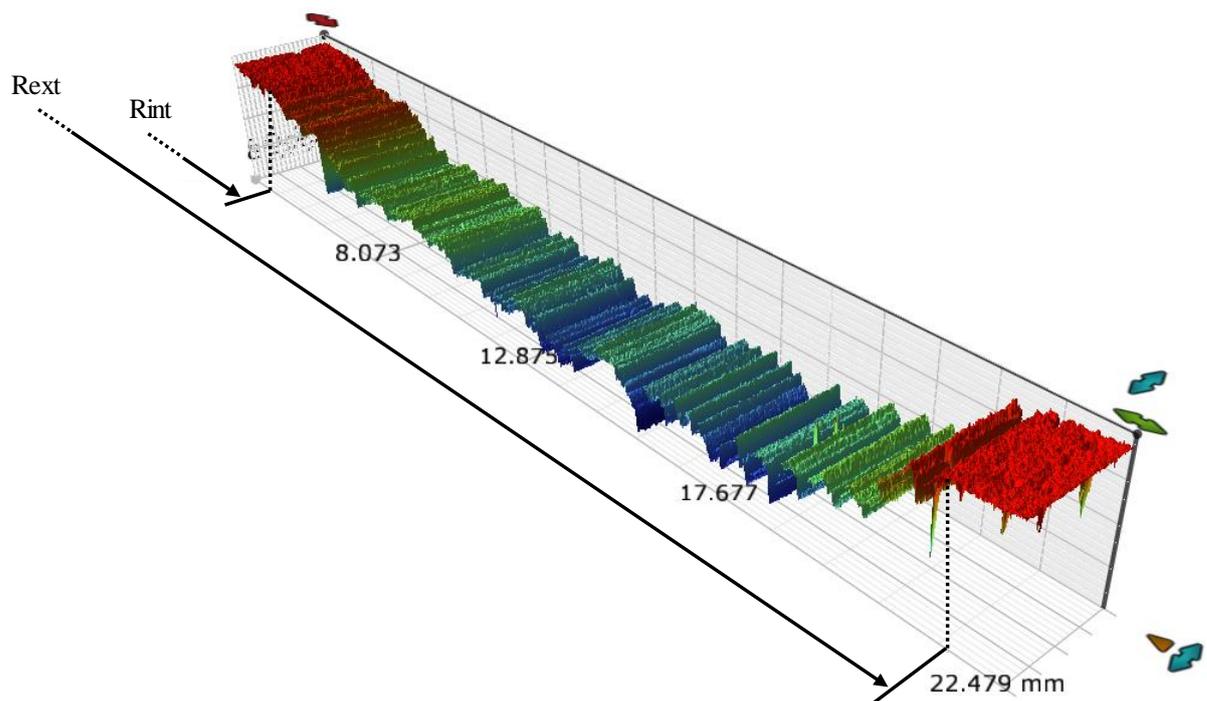


Figura 4.3 - Exemplo de imagem obtida pelo interferômetro de um disco atritado.

Com base na nuvem de pontos tridimensional obtida, pode-se então estimar o desgaste volumétrico do disco. A Figura 4.4 mostra esquematicamente como funciona o processamento dos dados de desgaste de disco obtidos pelo interferômetro.

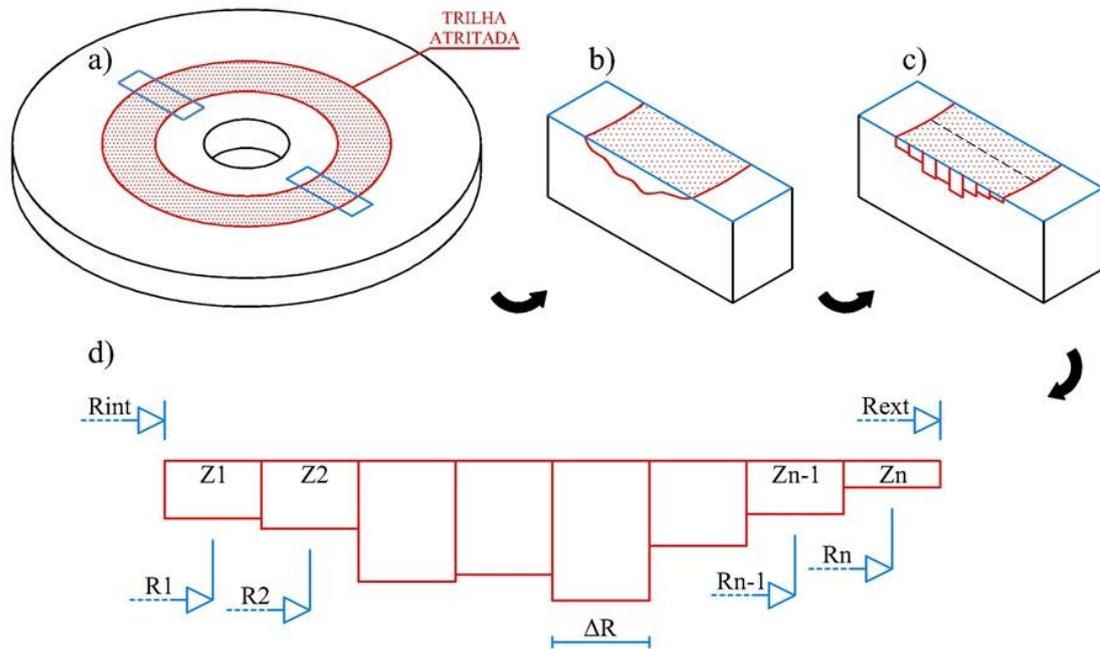


Figura 4.4 – Processo de avaliação do desgaste de discos através do interferômetro: a) seleção da região a ser mensurada (retângulos em azul), b) perfil tridimensional real do desgaste de uma das regiões mensuradas, c) seleção de um plano de desgaste no perfil medido (linha preta tracejada) e d) plano de desgaste analisado da região selecionada.

Na Figura 4.4-a observa-se o disco e a trilha atritada (hachurada em vermelho), bem como duas regiões escolhidas para análise (retângulos em azul). A Figura 4.4-b mostra uma região escolhida, onde a curva de desgaste real é mostrada sobre a superfície do disco. Na Figura 4.4-c, a região escolhida é discretizada, ou seja, o interferômetro realiza medições de desgaste ao longo da trilha a cada passo de medição (Δ_R), fornecendo assim uma nuvem de pontos tridimensional. A linha tracejada representa a seleção de um plano (ou curva) de desgaste para análise. Na Figura 4.4-d observa-se o plano de desgaste selecionado dentro da região escolhida, onde pode-se notar o raio interno (R_{int}) e raio externo (R_{ext}), os quais limitam a região atritada. Também pode-se verificar o passo de medição do interferômetro (Δ_R) bem como os valores de profundidade desgastada (Z_i) para cada passo de medição. Baseado no somatório ponto a ponto dos valores de desgaste obtidos no plano selecionado, pode-se então extrapolar este desgaste para todo o perímetro do disco. Desta forma, o volume desgastado na trilha atritada é dado pela Equação 4.4:

$$V = \left| 2\pi \sum_{i=1}^n R_i Z_i \Delta_R \right| \quad (4.4)$$

Onde:

- V - Volume desgastado da trilha [mm³]
- n - Número de medições radiais obtidas pelo interferômetro
- R_i - Raio de cada i-ésimo ponto medido [mm]
- Z_i - Profundidade desgastada de cada i-ésimo ponto medido [mm]
- Δ_R - Passo de medição [mm]

Neste trabalho, duas regiões diametralmente opostas (180°) foram selecionadas para análise de cada disco, sobre as quais foram traçadas três linhas radiais de desgaste, ou seja, três planos da trilha desgastada. Desta forma, cada disco possui seis curvas de desgaste (três para cada região selecionada). Similarmente à avaliação de desgaste das pastilhas (seção 4.6.1), o desgaste dos discos também foi normalizado com base na energia de frenagem dos ensaios, ou seja, o volume desgastado de cada trilha foi dividido pelo torque médio das 500 frenagens de cada ensaio.

4.7 Análise de superfície

4.7.1 Pastilhas

4.7.1.1 Microscopias da superfície das pastilhas

As imagens das pastilhas foram obtidas através de microscopia ótica. O equipamento utilizado foi um microscópio marca Zeiss®, modelo Axio Lab.A1, equipado com uma câmera digital de resolução de 5 Megapixels. Cada imagem microscópica cobre uma área de 3,76 mm² da pastilha, área inferior à total do corpo de prova (254,47 mm²). Para permitir a varredura de toda a região da pastilha, foi realizado o registro de diversas imagens individuais, para então agrupá-las em uma única imagem panorâmica.

Obviamente, as imagens individuais necessitam ser sobrepostas de forma a possibilitar a montagem da panorâmica, visto que são necessárias áreas em comum das microscopias

adjacentes umas às outras para que estas possam ser encaixadas apropriadamente. Estas montagens foram realizadas através do software Photoshop® (Adobe). Na Figura 4.5 é mostrada uma imagem panorâmica obtida da pastilha V10, com temperatura inicial de disco de 100 °C da fase A (V10A_100°C).

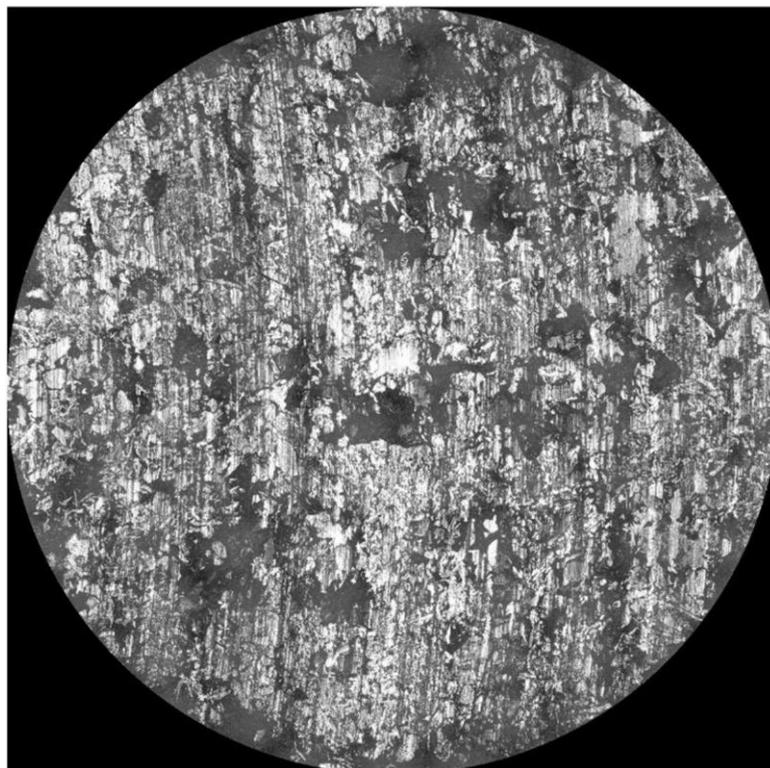


Figura 4.5 – Imagem panorâmica de uma pastilha de freio de 18 mm de diâmetro após os testes (neste exemplo, V10A_100°C).

4.7.1.2 Morfologia dos platôs de contato

A morfologia dos platôs de contato foi avaliada através de um programa baseado no algoritmo de Otsu, 1979. Este algoritmo é um entre diversos algoritmos de binarização utilizados para converter uma imagem em tons de cinza para monocromática [Masotti et al., 2015]. O algoritmo permite, através da segmentação de imagens, selecionar os limites dos níveis de cinza que melhor separam os elementos de interesse em uma imagem. Material bibliográfico a respeito da utilização deste método para materiais de fricção pode ser encontrado em estudos prévios do grupo de pesquisadores do LATRIB da UFRGS, como, por

exemplo, em Neis et al., 2015, Masotti et al., 2015, Barros et al., 2016. A Figura 4.6 mostra um exemplo de aplicação do algoritmo de Otsu em pastilhas de freio.

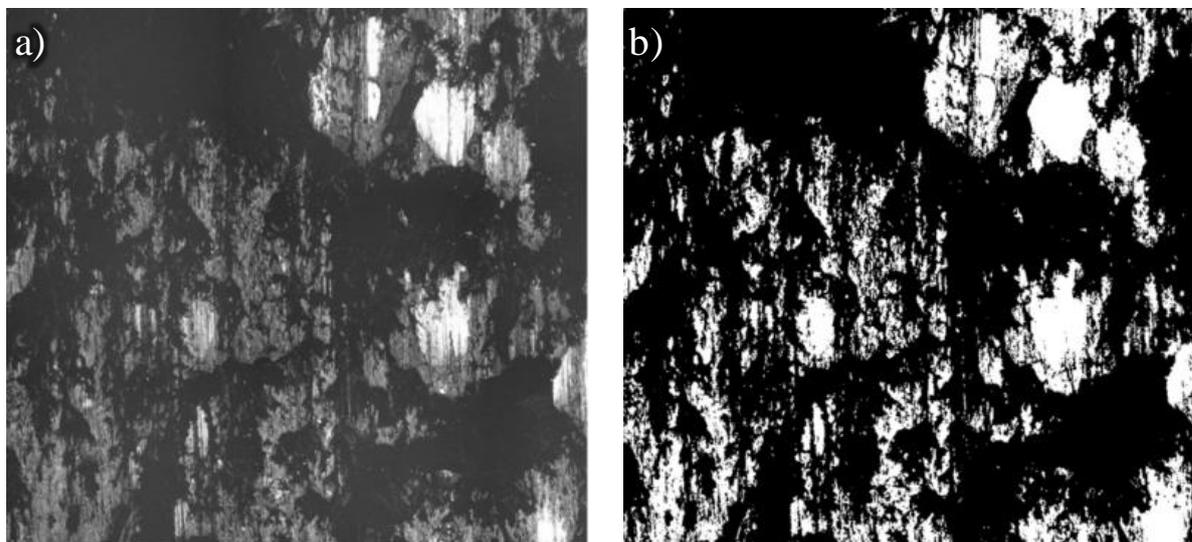


Figura 4.6 - Exemplo de processamento utilizando o algoritmo de Otsu: a) microscopia em tons de cinza e b) binarização através da aplicação do método [Adaptado: Barros et al., 2016].

Na Figura 4.6-a observa-se uma microscopia em tons de cinza de uma pastilha de freio após frenagens. A Figura 4.6-b, por sua vez, apresenta a mesma imagem após o processamento pelo algoritmo de Otsu. Com esta técnica, as regiões em branco são classificadas como platôs de contato (primários e secundários), enquanto que a região preta corresponde a regiões mais baixas (*lowlands*, conforme mencionado na seção 3.3). Desta forma, pode-se obter informações sobre a morfologia dos platôs de contato, como o percentual de área de platôs bem como o tamanho médio e quantidade destes.

4.7.2 Discos

4.7.2.1 Fotografias da superfície dos discos

Imagens da superfície atritada do disco foram registradas ao longo de todo o ensaio, sendo estas efetuadas ao final de cada frenagem. As imagens foram adquiridas através de uma câmera digital Fujifilm® modelo HS35EXR, com resolução de 16 Mega pixels (aparato experimental está mostrado na Figura 4.7). De forma a possibilitar o registro automático das

imagens ao final de cada frenagem, foi adicionado um disparador automático externo na câmera. Este disparador, por sua vez, foi sincronizado com as frenagens através de um gatilho externo do tribômetro, acionado ao final de cada frenagem.

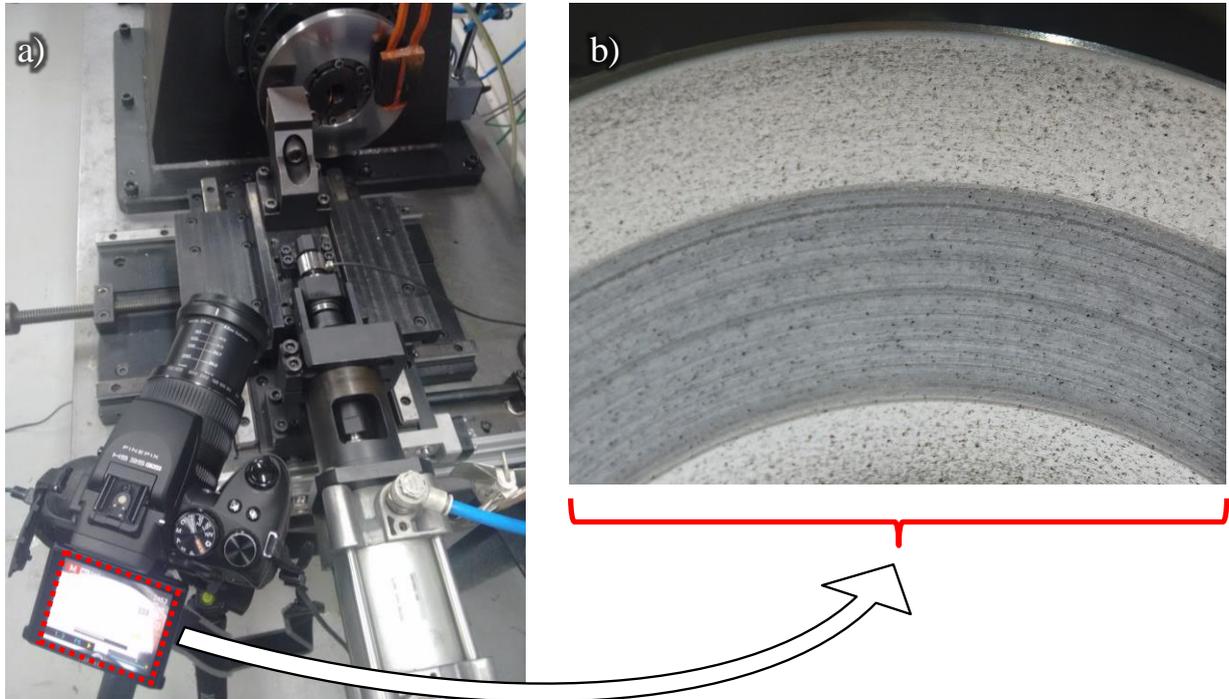


Figura 4.7 – Aparato experimental montado para o registro da superfície atritada do disco: a) posicionamento da câmera digital e b) fotografia obtida.

4.7.2.2 Distribuição de filme sobre o disco

As imagens fotográficas dos discos adquiridas no aparato experimental mostrado na Figura 4.7 foram processadas em um programa computacional desenvolvido pelo grupo de pesquisadores do LATRIB na linguagem MATLAB® (Mathworks). Este programa, registrado na SEDETEC (Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico) pelo nome de LATRIB Pro-FD (FD - Filme do Disco), foi criado com o intuito de avaliar a distribuição (homogeneidade) do filme depositado sobre a superfície do disco ao longo dos ensaios. O programa LATRIB Pro-FD funciona através da análise dos valores de intensidade dos pixels (em tons de cinza) de uma linha radial selecionada na trilha atritada no disco. Em uma imagem em tons de cinza, as intensidades dos pixels variam de 0 (pixel totalmente preto) até 255 (pixel totalmente branco).

Para exemplificar o processamento do programa, na Figura 4.8-a observa-se a trilha atritada no disco, bem como a seleção de uma linha radial de referência (linha tracejada em vermelho), selecionada pelo usuário do software. Em seguida, o programa registra as coordenadas desta linha, utilizando-as como referência para as demais imagens do ensaio. O programa então fornece valores de intensidade obtidos no processamento da linha tracejada, mostrado na parte inferior da Figura 4.8-a. Na Figura 4.8-b pode-se verificar a imagem de outra frenagem (do mesmo ensaio), porém com uma redução visível de filme depositado no disco (imagem visivelmente mais clara). Observa-se que a linha tracejada de referência não é mais mostrada nesta imagem, uma vez que é empregada a mesma linha mostrada na Figura 4.8-a, contudo, ocorre o processamento da linha radial da mesma forma, conforme mostrado na parte inferior da Figura 4.8-b.

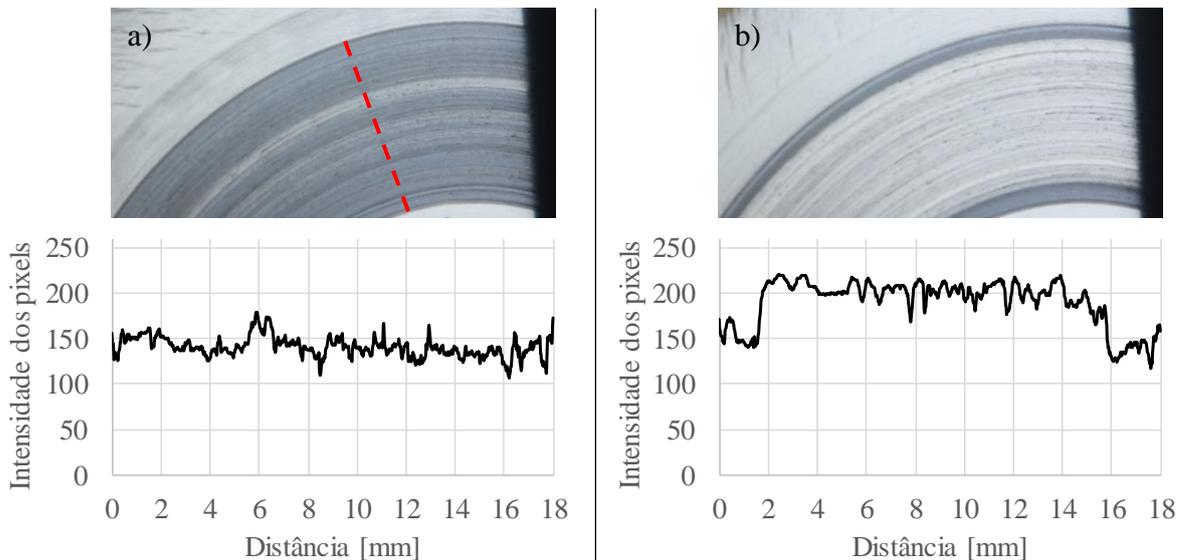


Figura 4.8 – Exemplo de processamento de filme no disco: a) imagem fotográfica de um disco após frenagens com uma linha de referência escolhida e quantificação desta e b) imagem fotográfica do disco com redução de filme depositado e quantificação dos pixels deste ensaio com as mesmas coordenadas da linha de referência.

Observa-se que, quanto maior o valor de intensidade dos pixels em tons de cinza, mais próximo da cor branca o pixel analisado estará, indicando menor presença de filme nesta região. De forma contrária, quanto menor o valor de intensidade do pixel, mais próximo da

cor preta, sendo resultado de maior quantidade de filme depositado no disco na região analisada.

A heterogeneidade de filme depositado no disco pode ser avaliada através do cálculo do desvio padrão das intensidades de cor na linha radial de referência, ou seja, quanto maior o desvio, mais heterogêneo é o filme na frenagem analisada.

A média dos valores de intensidade ao longo da trilha atritada, por sua vez, permite uma avaliação quantitativa do depósito de filme no disco após alguma determinada frenagem de um ensaio, possibilitando assim a comparação deste parâmetro (quantidade de filme sobre a superfície) em diferentes frenagens do ensaio. Valores maiores de média indica pouco filme depositado sobre o disco, enquanto que valores menores indica o oposto.

É importante salientar que todas as imagens do disco foram obtidas com mesmas configurações de software e de iluminação, minimizando assim possíveis diferenças nos valores de intensidade dos pixels oriundos destes fatores.

5. RESULTADOS

5.1 Atrito

5.1.1 Atrito das fases individuais

A Figura 5.1 mostra o gráfico de coeficiente de atrito em função do tempo de uma única frenagem. Este gráfico corresponde à frenagem número 100 da fase A da amostra V10, na temperatura inicial de disco de 100 °C (V10A_100°C).

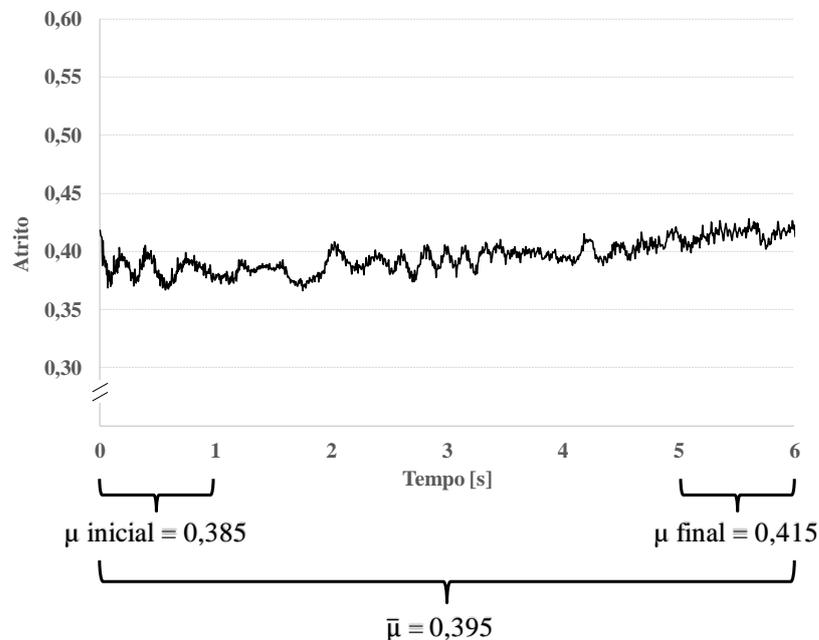


Figura 5.1 - Coeficiente de atrito da frenagem 100 do ensaio V10A_100°C, com valores indicados de atrito inicial (μ_{inicial}), final (μ_{final}) e médio ($\bar{\mu}$).

O valor do coeficiente de atrito médio é baseado na média dos valores de atrito durante os seis segundos de ensaio, enquanto que os valores inicial e final de atrito são calculados através do valor médio do primeiro e último segundo do ensaio, respectivamente. Visto que o número de ensaios é elevado (500 frenagens para cada um dos 27 ensaios), os atritos são mostrados através destes três valores (inicial, final e médio) para cada uma das 500 frenagens de cada ensaio, conforme exemplificado na Figura 5.2. Esta figura refere-se ao ensaio V10A_100°C.

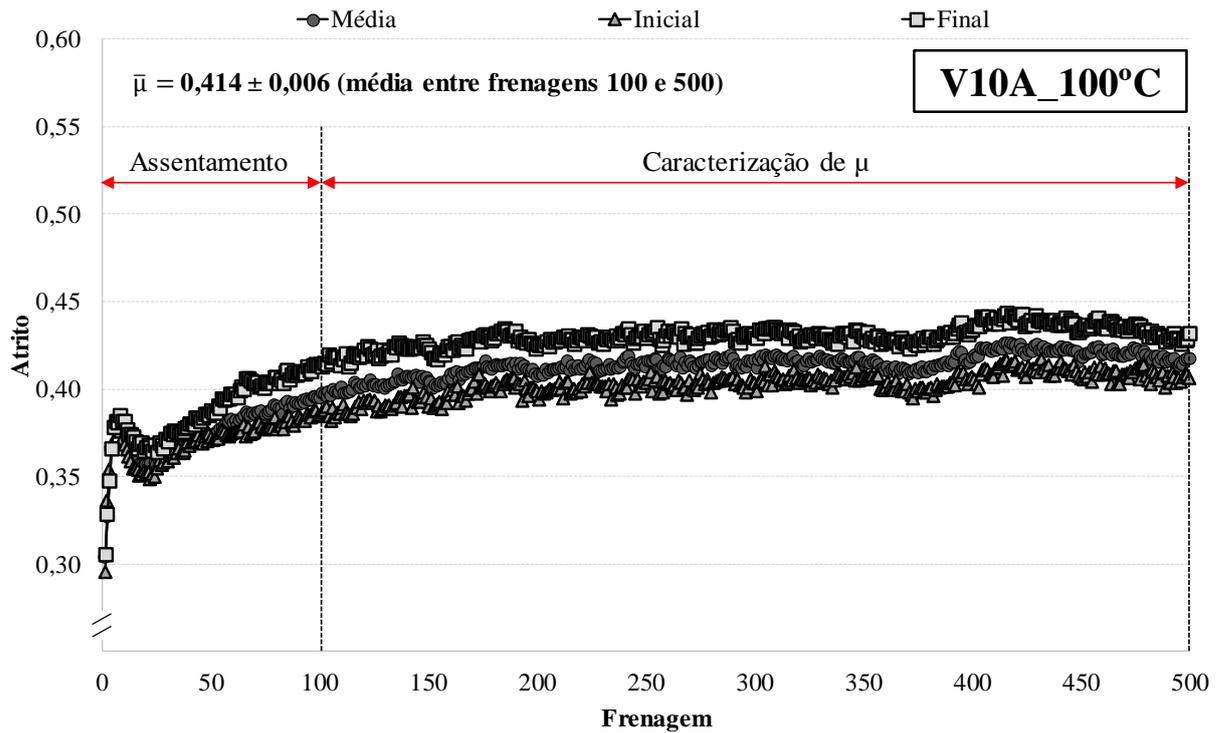


Figura 5.2 – Coeficientes de atrito inicial, final e médio do ensaio V10A_100°C.

Observa-se que, neste experimento, acontece um período de assentamento do material de fricção contra o disco até que o atrito se estabilize, o que ocorre por volta da frenagem número 80. Em uma análise conservadora, para o cálculo de atrito médio de todo o ensaio (indicado no gráfico como $\bar{\mu}$), foi considerada a média das médias dos atritos de todas as frenagens individuais a partir da frenagem número 100 (acima da frenagem 80), de forma a desconsiderar as variações de atrito do período de assentamento. Juntamente com o valor de atrito médio, é indicado no gráfico o valor de um desvio padrão ($\pm 1\sigma$), onde este também é calculado com base no atrito médio das frenagens 100 até a 500. Todos os gráficos de atrito dos 27 ensaios são mostrados da mesma forma no Apêndice A.

A Figura 5.3 mostra os resultados dos coeficientes de atritos médios ($\bar{\mu}$) e os desvios padrão (na forma de barras de erro) das fases A, B e C para cada material, em níveis de temperatura inicial de disco. As barras de erro têm como intuito mostrar a variação de atrito ao longo de cada ensaio, em termos de desvio padrão.

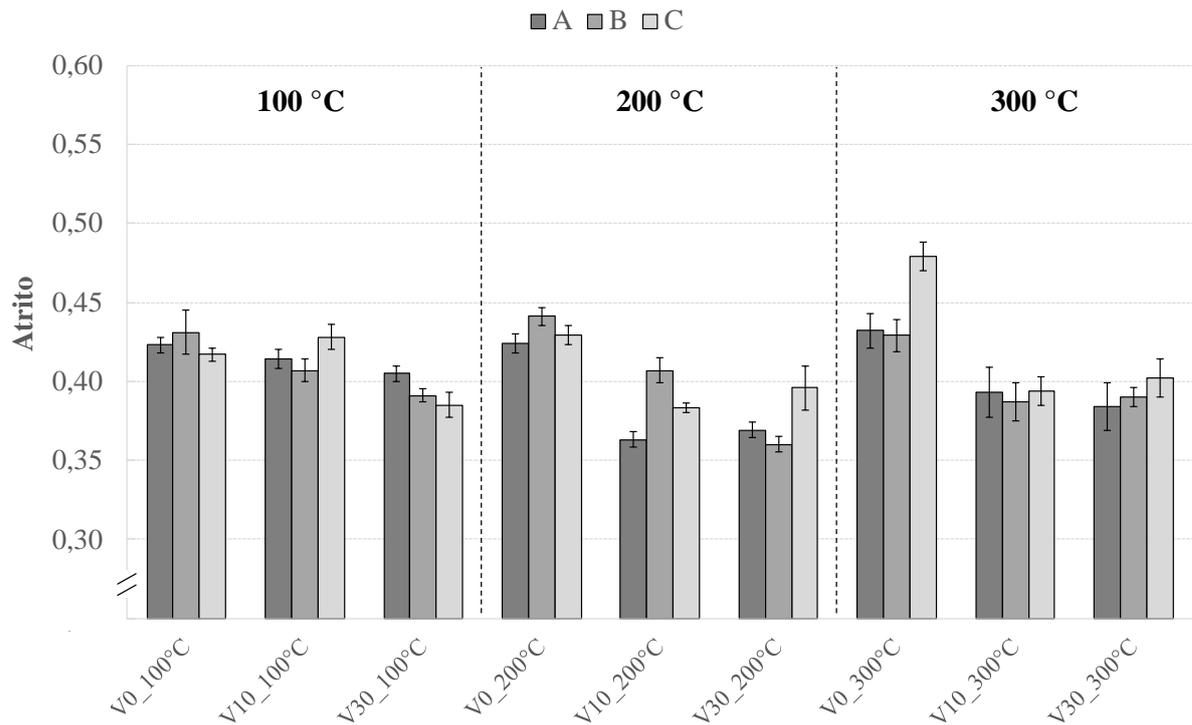


Figura 5.3 – Média dos coeficientes de atrito.

Percebe-se que ocorreu uma variação nos resultados médios de coeficiente de atrito entre as fases (A, B e C) com mesmos parâmetros, especialmente nos materiais V10 e V30 em 200 °C, e V0 em 300 °C. A diversidade de ingredientes contidos em materiais de fricção leva a uma heterogeneidade do composto, podendo causar estas variações nos valores de atrito. Desta forma, utiliza-se ferramentas estatísticas para avaliar se os valores de coeficiente de atrito das fases A, B e C de cada material para cada temperatura são similares. Para tanto, avalia-se se os histogramas de atrito entre as fases apresentam diferenças significativas através do método de análise de variância – ANOVA. Entretanto, sabe-se da literatura [Walpole et al., 2007] que esta ferramenta é apropriada quando as populações amostrais apresentam distribuições normais. Desta forma, primeiramente deve-se avaliar a normalidade dos histogramas de atrito das fases.

A Figura 5.4 mostra o histograma do coeficiente de atrito entre as frenagens 100 a 500 do ensaio V10A_100°C (distribuição real) bem como uma curva normal gerada com base na média e desvio padrão deste mesmo ensaio (distribuição normal).

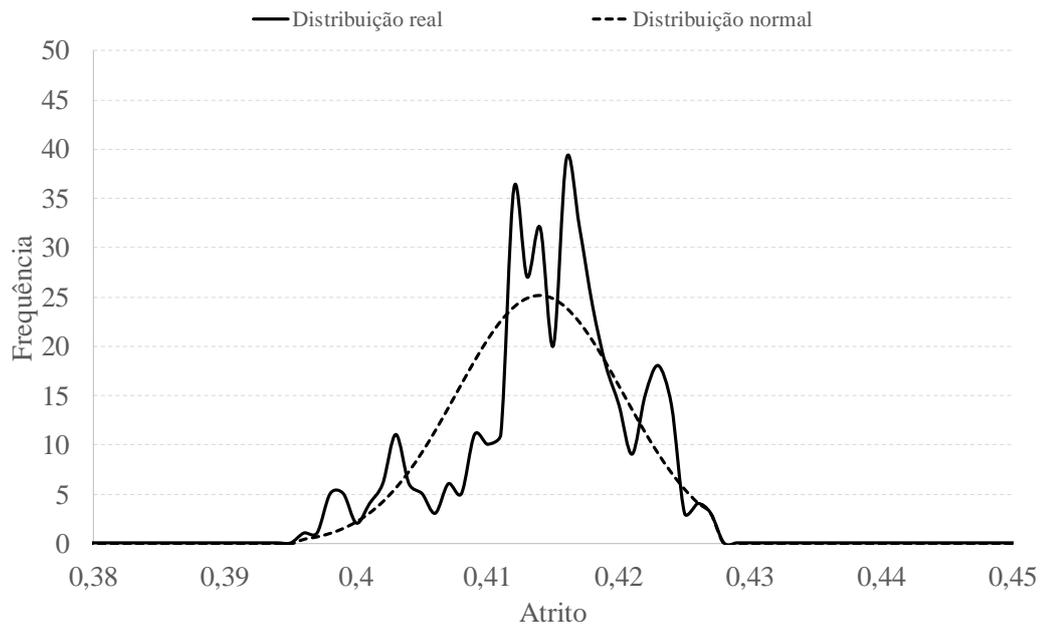


Figura 5.4 – Histograma do coeficiente de atrito do ensaio V10A_100°C.

Observa-se que a distribuição real deste ensaio apresenta diferenças quando comparada com a sua respectiva distribuição normal. Existem diversos métodos que testam a normalidade de uma população amostral [Pino, 2014], entre eles, o teste de Anderson-Darling [Anderson e Darling, 1952]. A Tabela 5.1 mostra os resultados do teste de Anderson-Darling com nível de significância de 5%, utilizado para verificar a normalidade dos histogramas de coeficiente de atrito. Este teste foi calculado através do software Minitab®.

Tabela 5.1 – Teste de Anderson-Darling para avaliação de normalidade dos histogramas de atrito dos ensaios.

Ensaio	Distribuição normal	Ensaio	Distribuição normal	Ensaio	Distribuição normal
V0A_100°C	Não	V0A_200°C	Sim	V0A_300°C	Não
V0B_100°C	Não	V0B_200°C	Não	V0B_300°C	Não
V0C_100°C	Não	V0C_200°C	Não	V0C_300°C	Não
V10A_100°C	Não	V10A_200°C	Não	V10A_300°C	Não
V10B_100°C	Não	V10B_200°C	Não	V10B_300°C	Não
V10C_100°C	Não	V10C_200°C	Sim	V10C_300°C	Não
V30A_100°C	Não	V30A_200°C	Não	V30A_300°C	Não
V30B_100°C	Sim	V30B_200°C	Não	V30B_300°C	Não
V30C_100°C	Não	V30C_200°C	Não	V30C_300°C	Não

Com base nos resultados obtidos no teste de Anderson-Darling, observa-se que, dos 27 experimentos, apenas 3 histogramas de atrito seguem uma distribuição normal. Portanto, não é possível aplicar a ANOVA para o teste de significância entre as diferentes fases (A, B e C) de cada material para cada patamar de temperatura. Para possibilitar a avaliação da similaridade entre as diferentes fases dos ensaios, foi então utilizado o método da intersecção dos histogramas de atrito, descrito na seção 4.5, com resultados mostrados na Tabela 5.2 .

Tabela 5.2 – Similaridade de atrito entre as fases.

Ensaio	$A \cap B$	$A \cap C$	$B \cap C$	Similaridade:
V0_100°C	59%	39%	26%	Fraca
V10_100°C	50%	27%	20%	Moderada
V30_100°C	11%	11%	54%	Forte
V0_200°C	18%	66%	37%	
V10_200°C	0%	2%	2%	
V30_200°C	38%	13%	4%	
V0_300°C	78%	1%	0%	
V10_300°C	72%	49%	55%	
V30_300°C	46%	50%	41%	

Observa-se que, na maioria dos ensaios, a similaridade entre as fases é fraca, ou seja, as fases A, B e C apresentaram resultados de coeficiente de atrito distintos na sua maioria. Em outras palavras, os histogramas de atrito entre as fases apresentam grandes variações entre si.

5.1.2 Atrito das fases agrupadas

Para realizar uma análise global dos coeficientes de atrito entre os diferentes ensaios, os histogramas das fases A, B e C foram agrupados em um único histograma. A Figura 5.5 mostra o histograma das fases A, B e C dos ensaios a 100 °C utilizando valores de atrito médio de 1200 frenagens (frenagens 100 a 500 de cada fase). O quadrado abaixo de cada histograma refere-se ao valor médio de atrito (média das médias de 1200 frenagens), enquanto que a barra horizontal representa um desvio padrão ($\pm 1\sigma$, baseado nas 1200 frenagens) do coeficiente de atrito. Da mesma forma, a Figura 5.6 mostra os histogramas de atrito para os ensaios a 200 °C, e a Figura 5.7, nos ensaios a 300 °C.

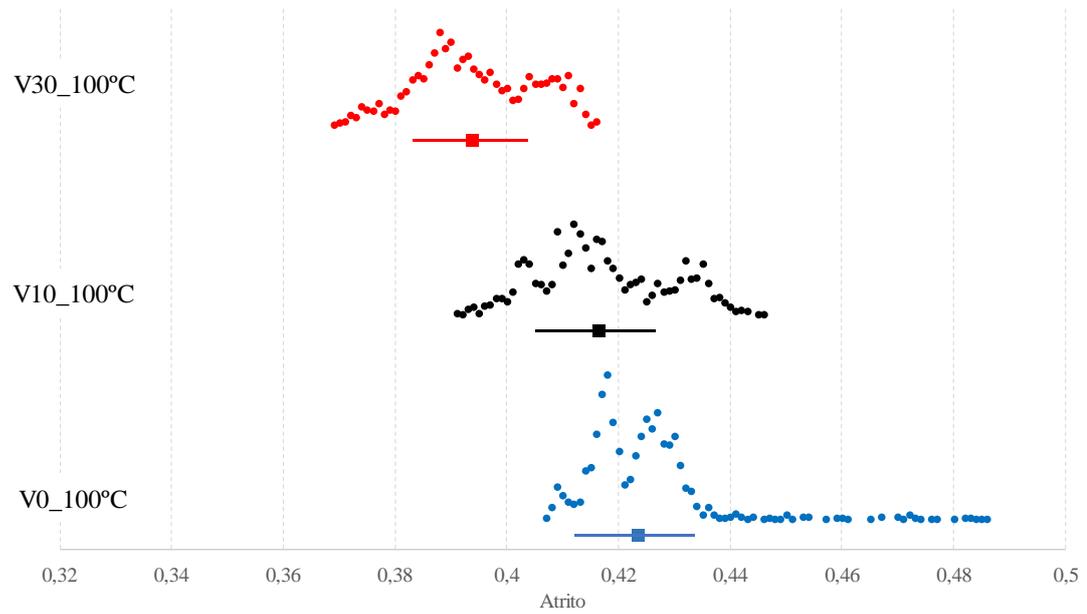


Figura 5.5 – Histograma de atrito das fases agrupadas nos ensaios com 100 °C de temperatura inicial de disco.

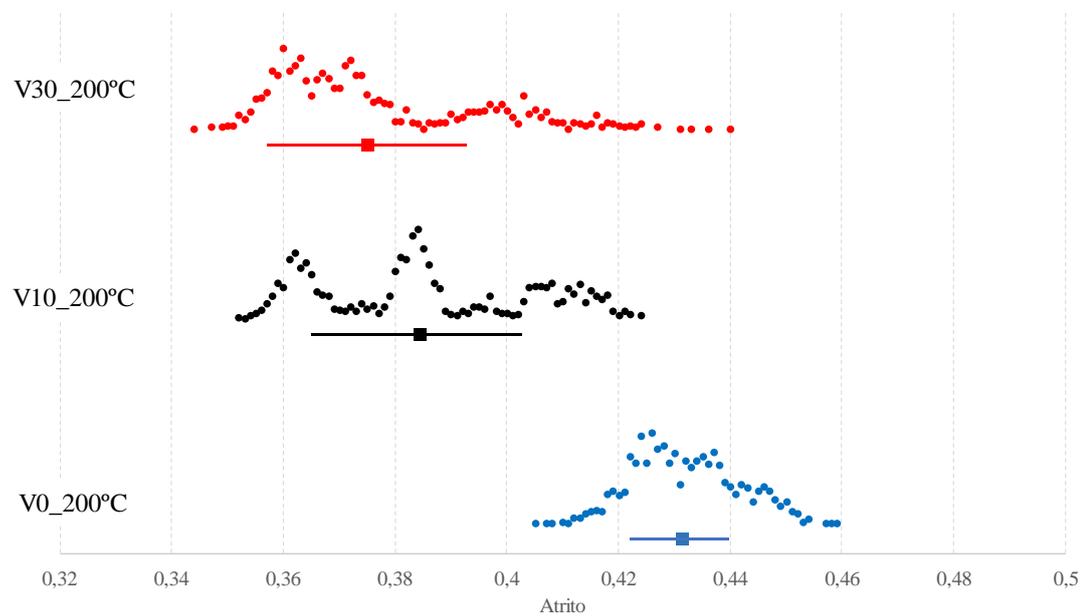


Figura 5.6 – Histograma de atrito das fases agrupadas nos ensaios com 200 °C de temperatura inicial de disco.

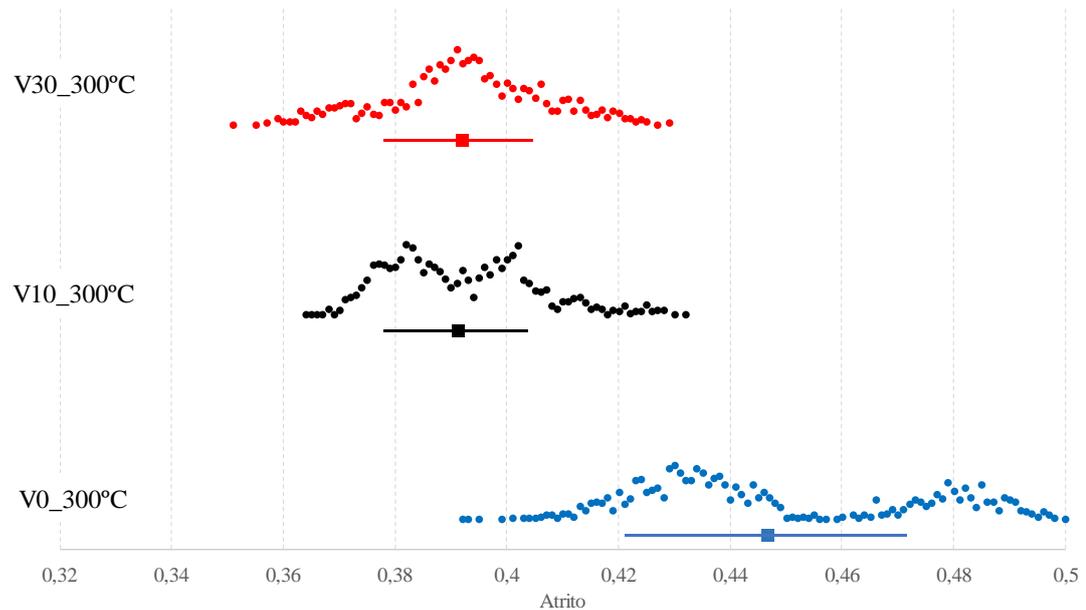


Figura 5.7 – Histograma de atrito das fases agrupadas nos ensaios com 300 °C de temperatura inicial de disco.

É possível verificar que existe uma grande dispersão nos histogramas, indicando que há variações entre as fases para as mesmas condições, fenômeno já observado na Figura 5.3. Uma análise global dos resultados de atrito é mostrada na Figura 5.8, onde são apresentados os valores médios do coeficiente de atrito e desvios padrão ($\pm 1\sigma$) de 1200 frenagens das fases agrupadas (A, B e C). Também são apresentados os valores percentuais de similaridade entre os histogramas agrupados de diferentes ensaios, obtidos através do método das intersecções dos histogramas de atrito relatada na seção 4.5.

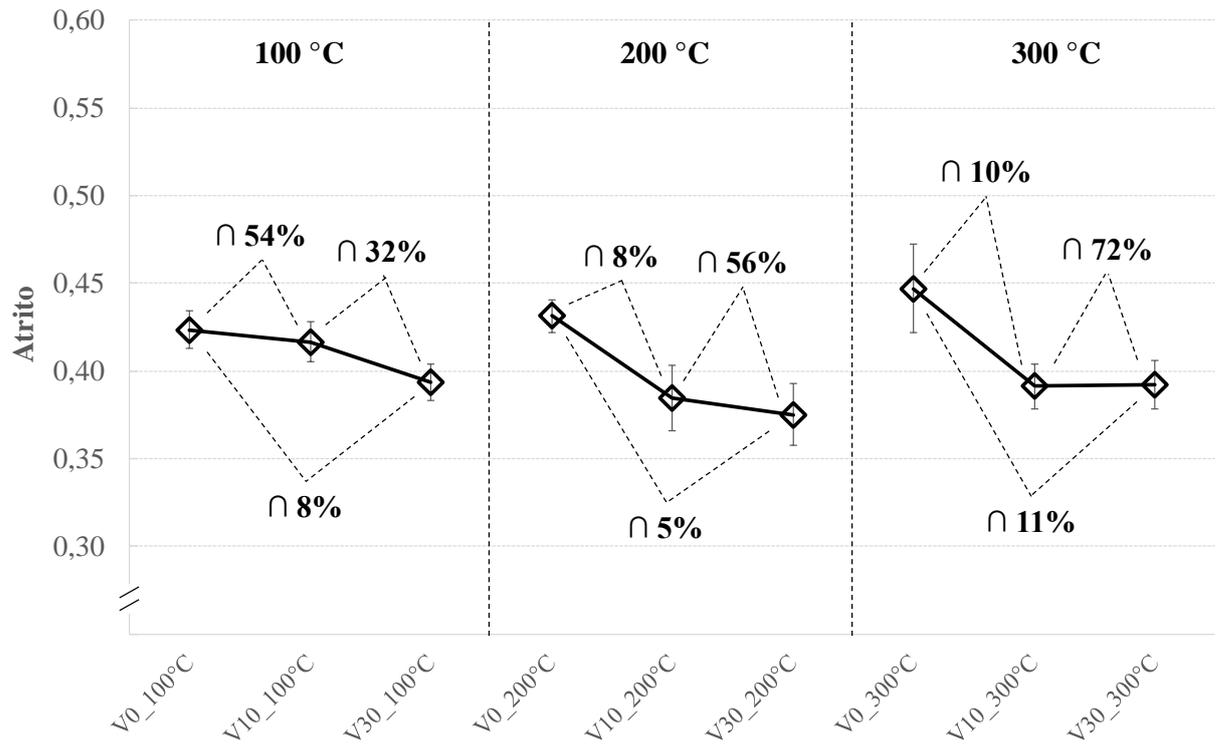


Figura 5.8 – Médias dos coeficientes de atrito das fases A, B e C e similaridade entre ensaios.

O comparativo dos resultados entre os materiais com diferentes formulações permite observar que o material sem cobre (V0) apresenta valores médios de coeficiente de atrito superiores aos outros dois materiais para os três patamares de temperatura. Na temperatura de 100 °C, o aumento do percentual de cobre de 0% (V0) para 10% (V10) não leva a uma grande alteração no coeficiente de atrito, contudo, quando aumentado para 30% (V30), ocorre uma redução expressiva deste parâmetro. Em 200 °C e 300 °C, observa-se uma queda acentuada no coeficiente de atrito quando aumentado o cobre de 0% (V0) para 10% (V10). Entretanto, aumentando o percentual de cobre para 30% (V30), esta queda acentuada não é mais observada.

Os percentuais obtidos através do método das intersecções dos histogramas apontam que o material sem cobre (V0) a 100 °C apresenta similaridade moderada com o material V10 e similaridade fraca com a amostra V30. Nas demais temperaturas (200 °C e 300 °C), a similaridade é fraca entre o material V0 e os materiais V10 e V30, indicando que o valor de coeficiente de atrito do material V0 é, de fato, superior aos demais. Uma avaliação entre os materiais V10 e V30 permite observar que a similaridade entre estes é moderada (em 100 °C e 200 °C) e forte (em 300 °C), indicando que o coeficiente de atrito entre eles é similar.

Em outras palavras, para baixas temperaturas (100 °C), uma redução expressiva no coeficiente de atrito só ocorre quando existe um grande acréscimo de cobre no material de fricção. Para temperaturas maiores (200 °C e 300 °C), esta redução no coeficiente de atrito é observada principalmente entre o material sem cobre e aquele que possui 10% de cobre em sua composição, não sendo observada uma redução significativa quando aumentado para 30%. De qualquer forma, o resultado da Figura 5.8 deixa claro que a remoção do cobre levou a um aumento no coeficiente de atrito, estando de acordo com resultados encontrados na literatura [Straffelini et al., 2015].

Pode-se também analisar os resultados de coeficiente de atrito separando-os por tipo de material, com o intuito de avaliar a influência da temperatura, conforme mostrado na Figura 5.9.

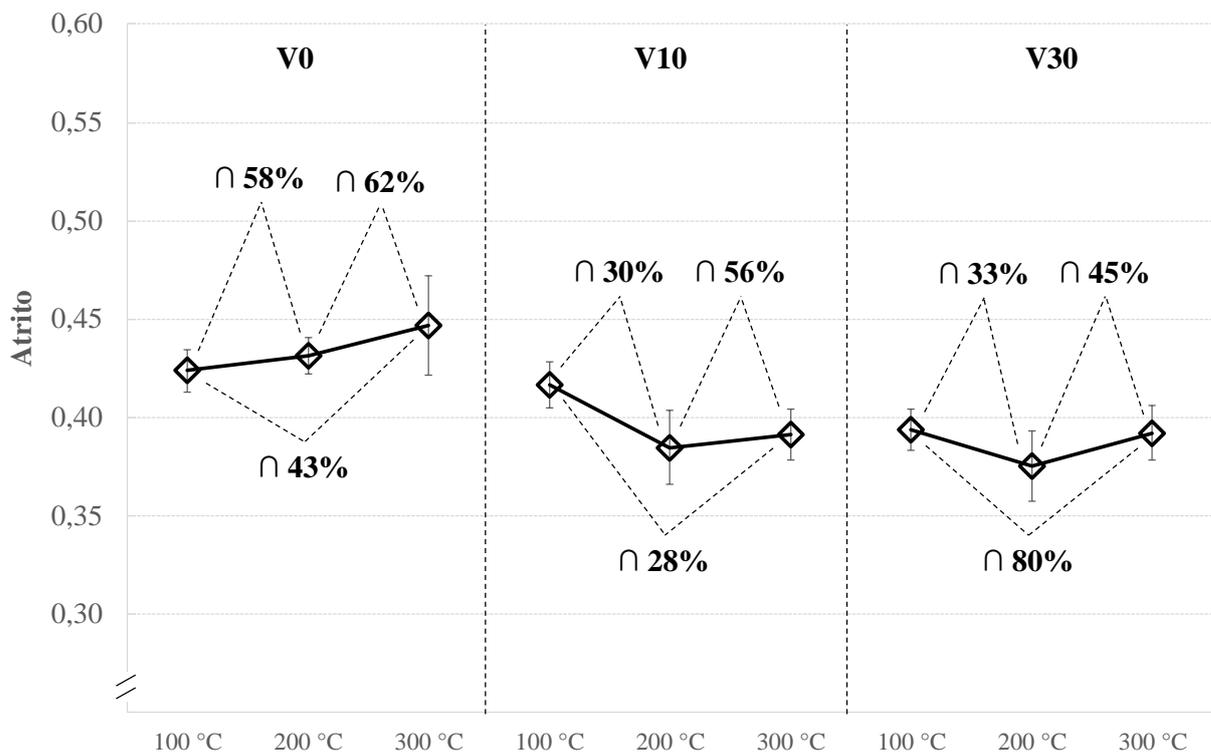


Figura 5.9 – Média dos coeficientes de atrito das fases A, B e C e similaridade entre ensaios com avaliação da influência da temperatura.

Percebe-se que na versão sem cobre (V0), o aumento de temperatura levou a um aumento do coeficiente de atrito (em valores médios). Por outro lado, nos materiais com 10% (V10) e 30% de cobre (V30), a temperatura inicial de disco intermediária (200 °C) resultou

em um ponto mínimo do coeficiente de atrito médio, ou seja, em temperaturas de 100 °C e 300 °C, o coeficiente de atrito é maior do que em temperaturas de 200 °C. No entanto, a análise realizada através do método das intersecções dos histogramas apontou similaridades moderadas e altas na maioria dos casos, indicando pequenas variações de atrito. Em outras palavras, a alteração da temperatura inicial de disco não levou a mudanças efetivas nos valores de coeficiente de atrito.

5.1.3 Variação de atrito

Outra análise que pode ser feita é sobre a variação de atrito entre o início e o fim de cada frenagem individual. Esta análise permite verificar a influência que a velocidade de deslizamento tem no coeficiente de atrito, visto que, conforme a Tabela 4.2, as velocidades inicial e final são de 8,05 e 4,02 m/s, respectivamente. Desejavelmente, pastilhas de freio devem apresentar valores de coeficiente de atrito estáveis, independente das condições de velocidade de deslizamento, temperatura, etc. [Rhee et al., 1991]. Embora a temperatura superficial do par tribológico mude ao longo da frenagem, admite-se que a variação de temperatura seja semelhante entre os ensaios de diferentes materiais, visto que o coeficiente de atrito é similar. A Figura 5.10 mostra as médias das variações de atrito das fases individuais. Estes dados foram obtidos através da média das diferenças entre μ final e μ inicial das frenagens 100 a 500 de cada experimento. As barras de erros referem-se a um desvio padrão ($\pm 1\sigma$) das mesmas frenagens analisadas.

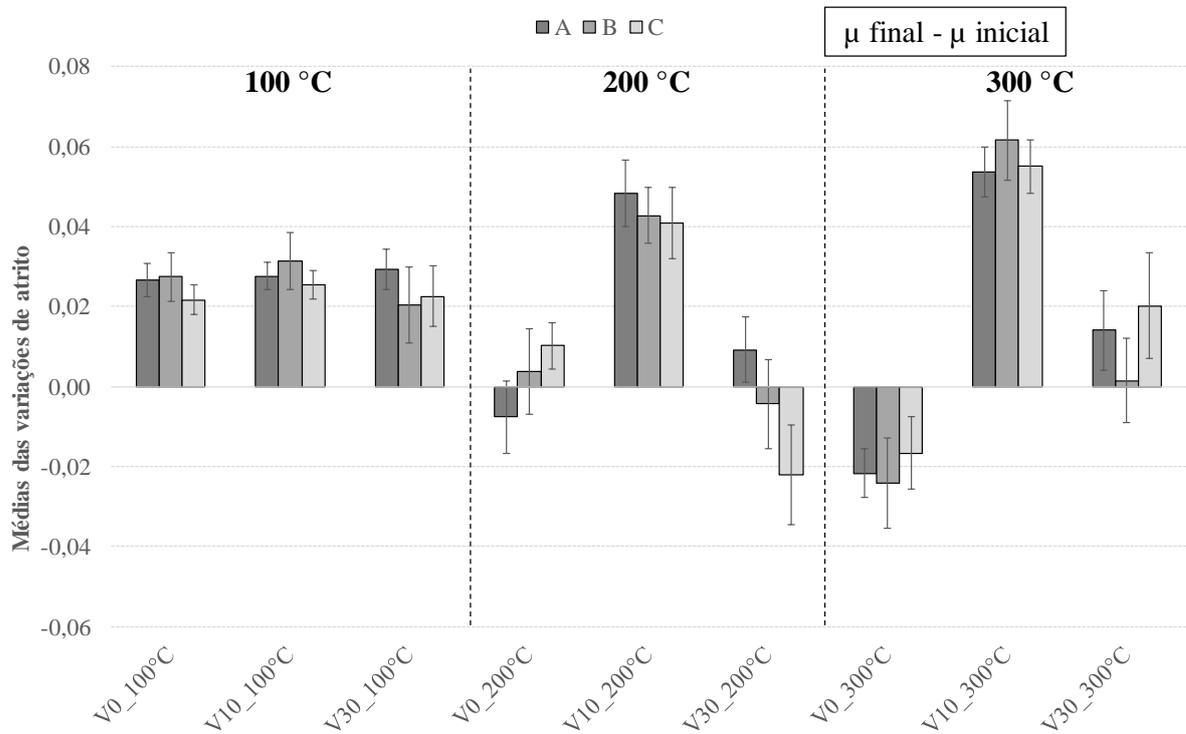


Figura 5.10 – Médias das variações de atrito, obtidas entre as frenagens 100 e 500.

De forma a permitir uma análise global dos resultados, a Figura 5.11 mostra a média das médias das variações de atrito das fases. Os gráficos de μ (atrito) e V (velocidade de deslizamento) tem o intuito de ilustrar o comportamento do coeficiente de atrito em função da velocidade de deslizamento para cada caso.

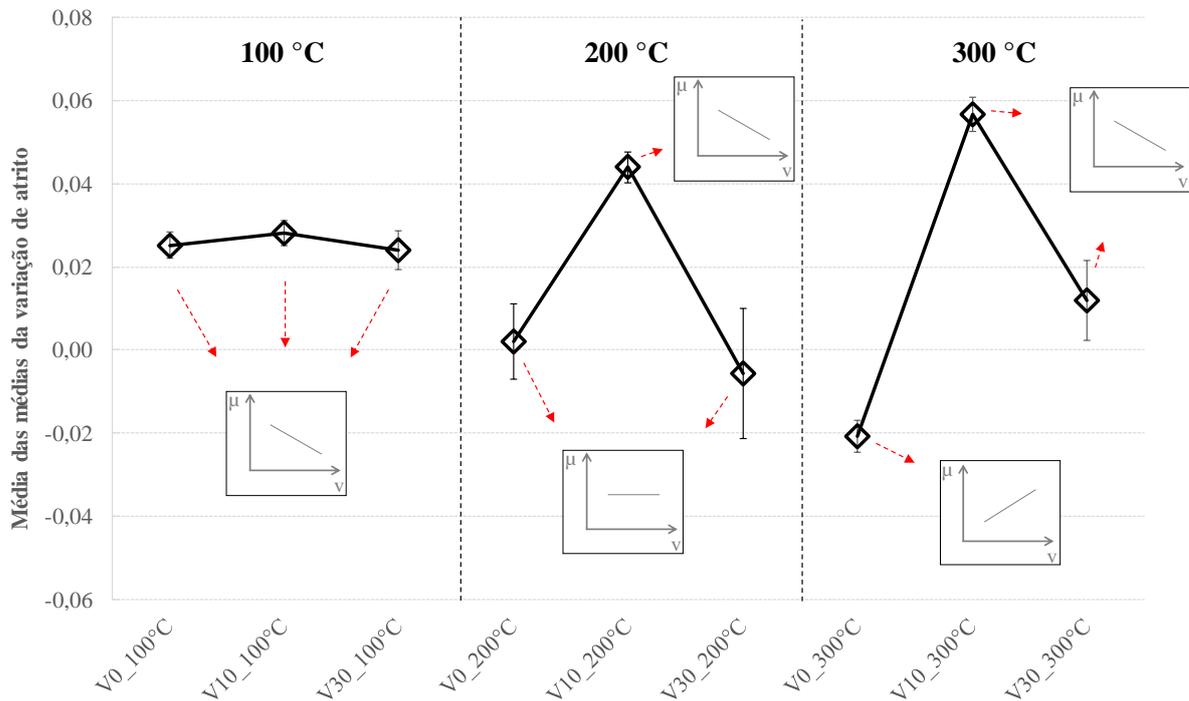


Figura 5.11 – Média das médias das variações de atrito.

Observa-se que, em 100 °C, os três materiais mostram comportamentos similares, apresentando médias de variação de atrito positivas e de magnitude relativamente semelhantes. A magnitude positiva significa que o atrito aumentou com a diminuição da velocidade de deslizamento. O material V10 apresentou um crescimento na média da variação de atrito com o aumento de temperatura (200 °C e 300 °C), enquanto que os materiais V0 e V30 apresentam variações menos comportadas entre as fases A, B e C, apresentando desvios padrão elevados. Em 200 °C, os materiais V0 e V30 apresentaram variações próximas de zero, indicando que o coeficiente de atrito não sofreu grandes alterações com a variação da velocidade de deslizamento. A amostra V10, por sua vez, parece ser a que possui a maior sensibilidade à velocidade de deslizamento na temperatura de 200 °C e 300 °C. A ausência ou excesso de cobre parece, portanto, causar uma aleatoriedade na variação de atrito entre os ensaios com os mesmos parâmetros, ou seja, nas mesmas condições de aplicação, o atrito pode mostrar alternâncias entre crescimento e decréscimo com a velocidade de deslizamento.

5.2 Desgastes das amostras

5.2.1 Pastilha

Conforme discutido na seção 4.6.1, a absorção de umidade altera os valores de massa do material de fricção ao longo do tempo. Optou-se então por registrar os valores de massa das amostras depois dos experimentos de duas formas: após 5 minutos (massa seca) e após 24 horas de cada ensaio (massa úmida), aproximadamente. A Figura 5.12 mostra a variação de massa da fase A para todas as amostras.

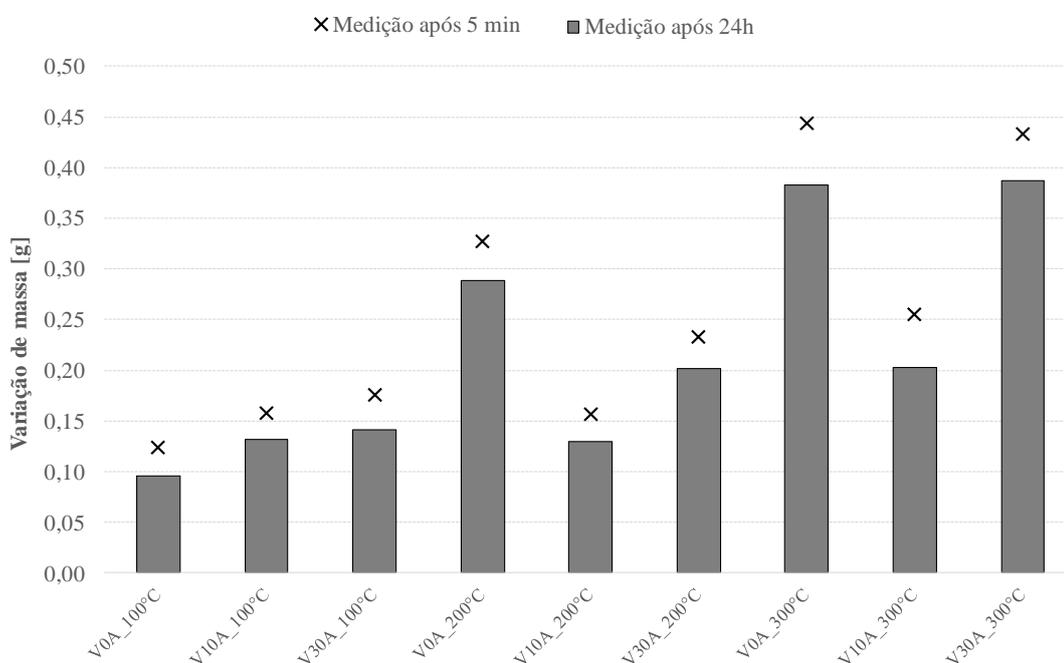


Figura 5.12 – Variação de massa das pastilhas medidos após 5 min e após 24 h da fase A.

Observou-se que ocorre um decréscimo similar na variação de massa para todos os ensaios quando se comparam as medições realizadas após 5 minutos e 24 horas, ou seja, a absorção de umidade das amostras foi similar. Nas demais fases (B e C), o comportamento foi semelhante. Portanto, para o cálculo do desgaste de pastilha, são adotados apenas os valores de variação de massa quando registrados após 24h dos ensaios (massa úmida).

A Figura 5.13 mostra os resultados de desgaste volumétrico normalizado das amostras (metodologia discutida na seção 4.6.1) para todos os experimentos.

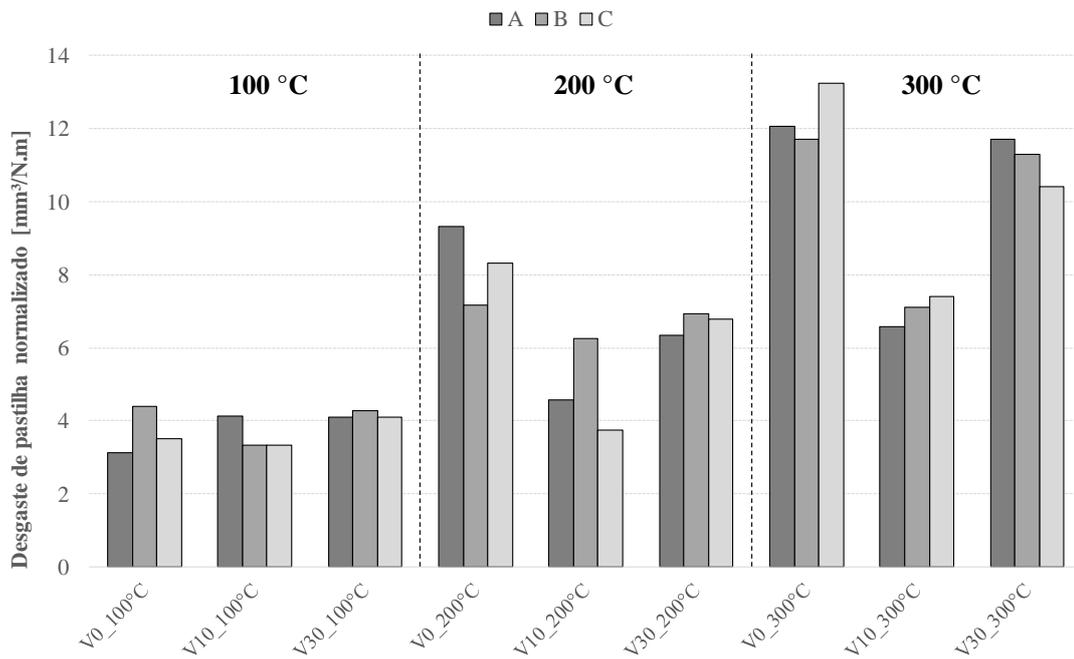


Figura 5.13 – Desgaste volumétrico de pastilha normalizado.

Para uma análise mais clara, os dados desta figura são apresentados globalmente por meio de valores médios entre as fases A, B e C. Esta análise é apresentada na Figura 5.14.

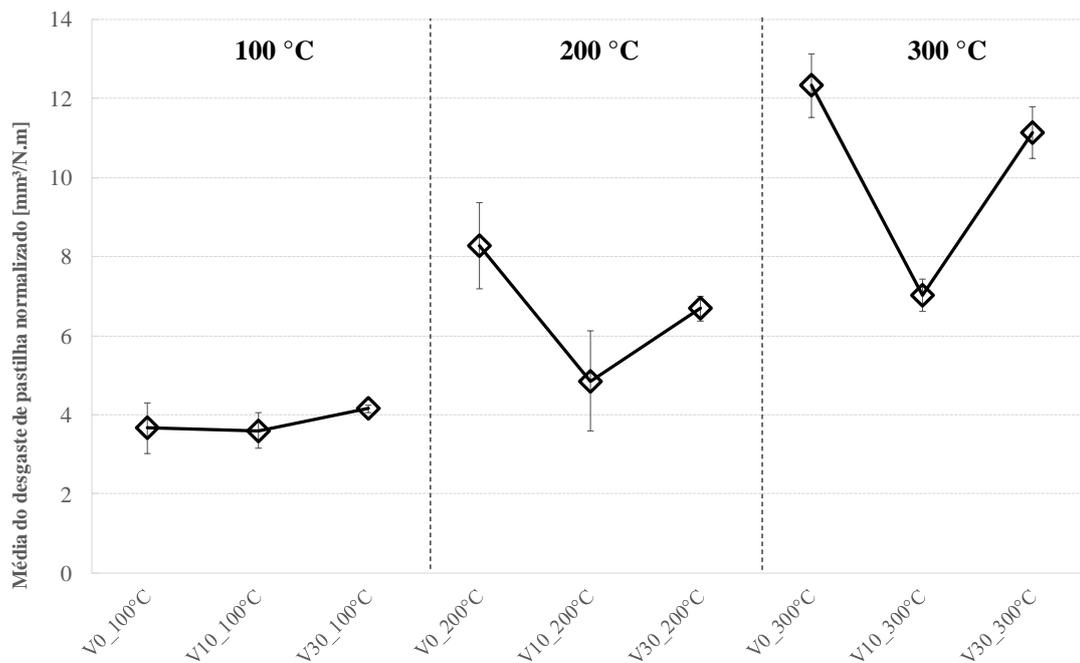


Figura 5.14 – Média dos desgastes de pastilha normalizado das fases A, B e C.

Pode-se observar que, nos três patamares de temperatura, o menor valor de desgaste ocorreu para o material V10. Em outras palavras, a ausência ou excesso de cobre em materiais de fricção parece influenciar negativamente no desgaste de pastilha de freio. Isso está em parte de acordo com a literatura, onde há estudos que indicam que o cobre auxilia na redução de desgaste de pastilha [Verma et al., 2015, Straffelini et al., 2015]. O alto desgaste de pastilha no material V30 pode ter ocorrido devido ao percentual de cobre utilizado neste material, visto que 30% de cobre em massa é muito superior ao percentual de cobre encontrado no material *baseline* V10 (10%), material este com formulação baseada em uma pastilha de freio comercialmente utilizada, conforme relatado na seção 4.2.

A Figura 5.15 mostra a média do desgaste de pastilha normalizado separados por tipo de amostra, com o intuito de avaliar a influência da temperatura inicial de disco para cada material.

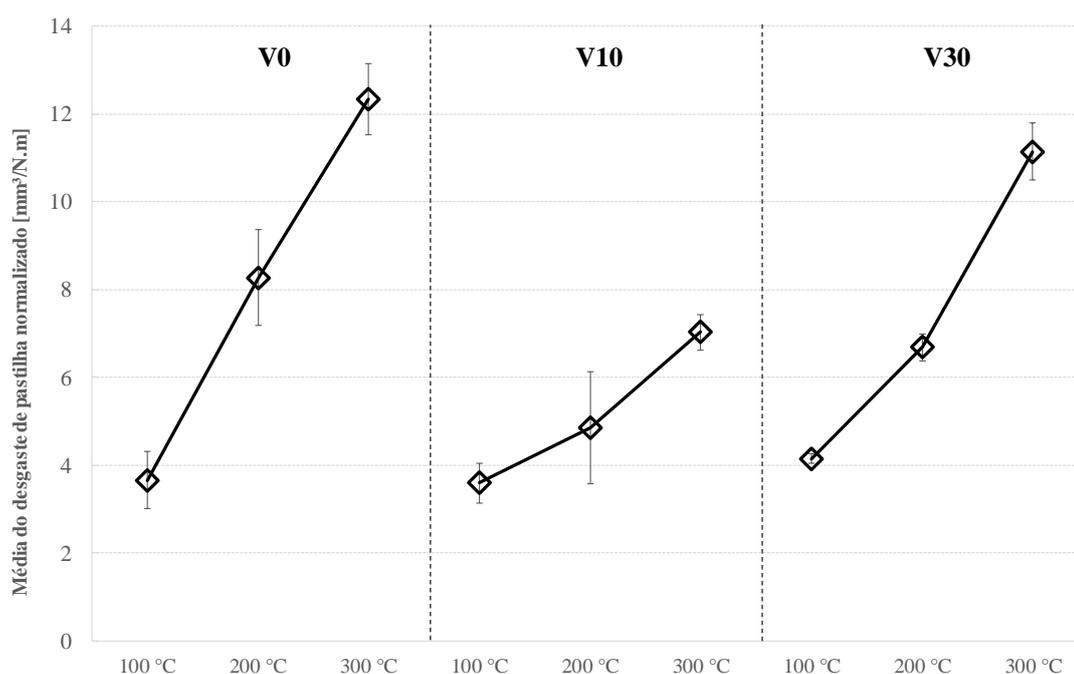


Figura 5.15 – Média dos desgastes de pastilha normalizado das fases A, B e C com avaliação da influência da temperatura.

Percebe-se que, para os três materiais, a elevação de temperatura inicial de disco levou ao aumento no desgaste de pastilha. Esse aumento é mais acentuado no material sem cobre (V0) e no material com 30% de cobre (V30) do que no material com 10% de cobre (V10), ou

seja, o material V10 é menos susceptível ao aumento de desgaste de pastilha devido ao aumento de temperatura do que os outros dois materiais.

5.2.2 Desgaste do disco

Conforme discutido na seção 4.6.2, o desgaste dos discos foi avaliado através de interferometria, onde duas regiões da pista atritada do disco foram selecionadas para serem varridas pela leitura do interferômetro. Em cada uma destas regiões, foram traçados três planos de desgaste perpendiculares ao plano atritado. A Figura 5.16 exemplifica dois planos de desgaste de disco, um para cada região, em um ensaio da amostra V10A_100 °C. Esta figura tem o intuito de ilustrar o perfil do desgaste de disco em duas regiões distintas.

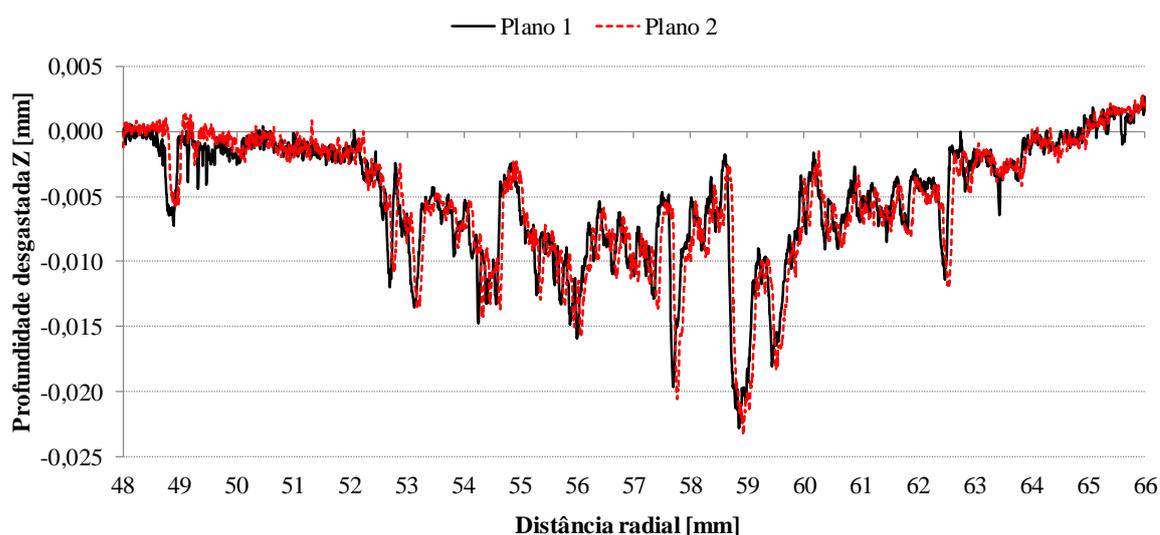


Figura 5.16 – Ilustração do perfil de desgaste do disco obtido em dois planos em regiões diferentes após o ensaio V10A_100°C.

As linhas foram obtidas através de dois planos distintos (planos 1 e 2) do mesmo ensaio (V10A_100°C). Percebe-se a uniformidade do desgaste entre diferentes regiões diametralmente opostas (180°) no disco. Apesar de relativa uniformidade, é inerente a ocorrência de alguma irregularidade no perfil de desgaste entre as medições. Conforme visto na seção 4.6.2, foram realizadas as médias e desvios padrão de seis valores de desgaste de disco normalizado de cada ensaio para que, desta forma, erros de medição pontuais sejam diluídos. A Figura 5.17 mostra estes resultados.

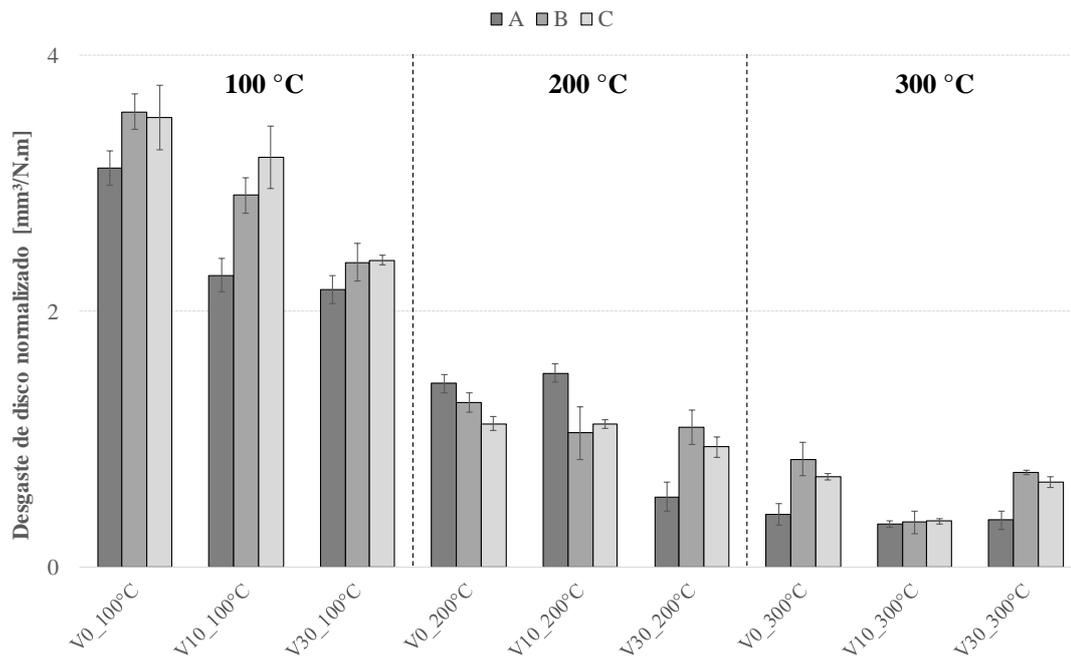


Figura 5.17 – Desgaste de disco normalizado.

Para uma análise global, estes dados foram agrupados através das médias das fases A, B e C, mostrado na Figura 5.18.

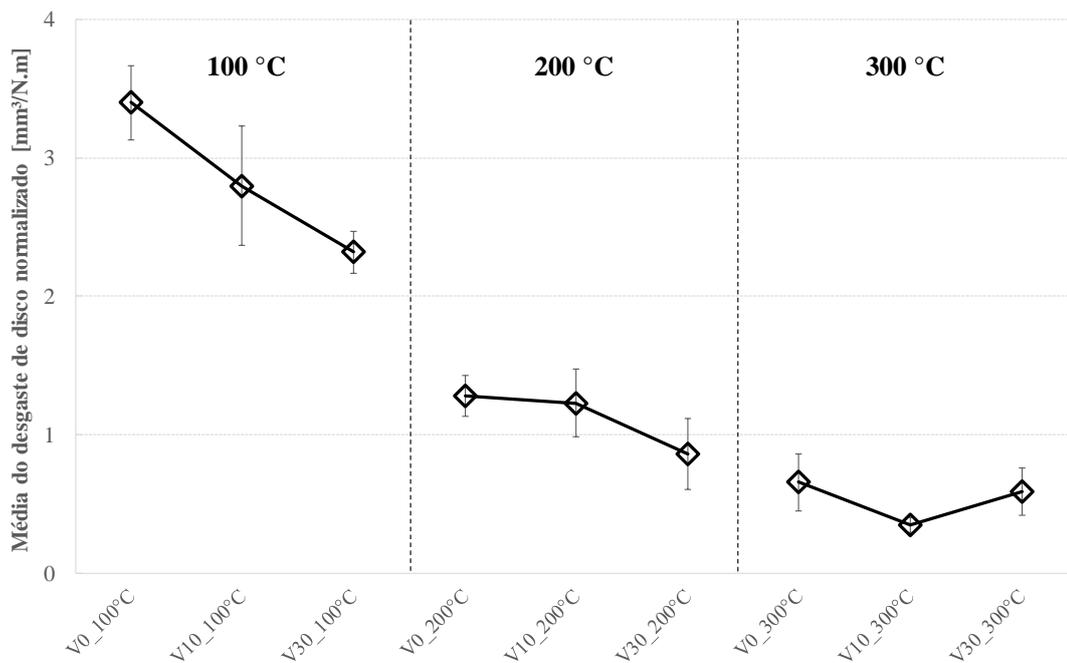


Figura 5.18 – Média dos desgastes de disco normalizado.

Percebe-se que, a 100 °C, o percentual de cobre exerce forte influência no desgaste de disco. Neste patamar de temperatura, o material sem cobre (V0) apresentou maior desgaste, enquanto que o com excesso de cobre (V30) apresentou o menor. O material com 10% de cobre (V10) por sua vez apresentou desgaste intermediário. Em outras palavras, as amostras com cobre (V10 e V30) mostraram níveis de desgaste menor do disco quando comparadas a sem cobre (V0), ainda que essa influência se mostrou forte apenas em baixas temperaturas (100 °C no presente estudo). Este comportamento está de acordo com a literatura, onde estudos apontam que a remoção do cobre eleva a taxa de desgaste do disco [Verma et al., 2015].

A Figura 5.19 mostra a média do desgaste de disco normalizado, separados por tipo de material.

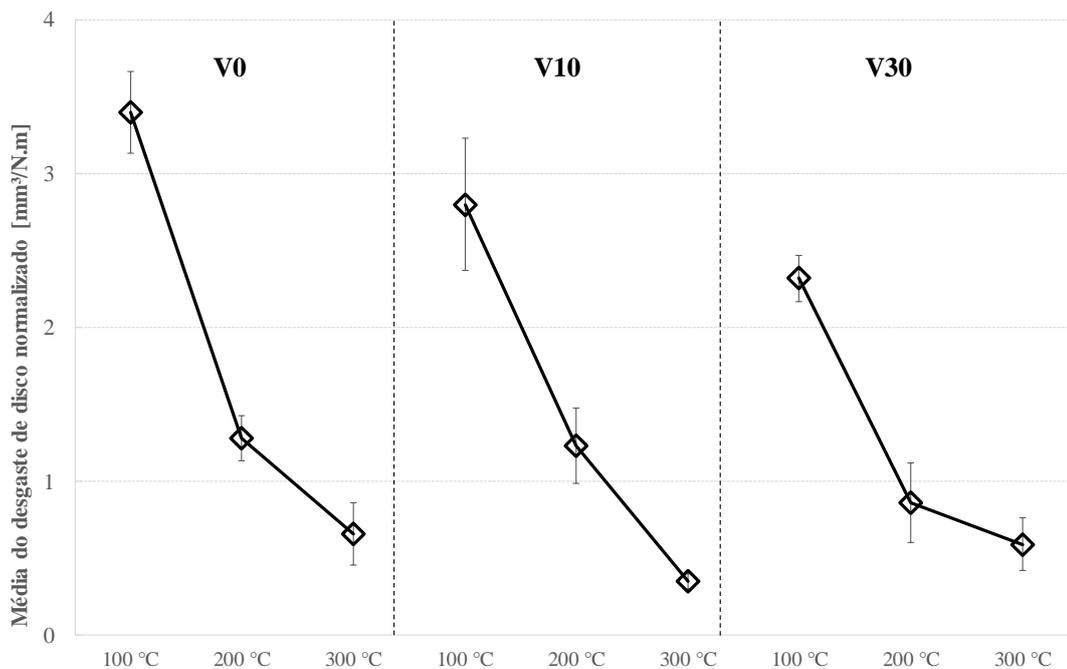


Figura 5.19 – Média dos desgastes de disco normalizado com avaliação da influência da temperatura.

É possível observar que, quanto maior a temperatura, menor foi o desgaste de disco para os três materiais (em valores médios). Esta influência da temperatura no desgaste de disco, contudo, foi menor no material com 30% de cobre (V30), do que nos outros dois materiais (V0 e V10).

5.2.3 Correlação entre desgastes de pastilha e disco

De forma a possibilitar a comparação entre os desgastes de pastilhas e discos, foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson (ρ), no qual mede o grau de correlação de duas variáveis [Scheaffer et al., 2010]. Valores positivos deste coeficiente indicam correlação direta e, negativos, correlação inversa. Desta forma, pode-se fazer uma análise de tendências de comportamento de desgaste. A Tabela 5.3 mostra a interpretação dos valores deste coeficiente de correlação.

Tabela 5.3 – Coeficiente de correlação [Adaptado: Hinkle, Wiersma e Jurs, 2003, Apud Mukaka, 2012].

Correlação	Interpretação
0,90 a 1,00 (-0,90 a -1,00)	Correlação positiva (negativa) muito forte
0,70 a 0,90 (-0,70 a -0,90)	Correlação positiva (negativa) forte
0,50 a 0,70 (-0,50 a -0,70)	Correlação positiva (negativa) moderada
0,30 a 0,50 (-0,30 a -0,50)	Correlação positiva (negativa) fraca
0,00 a 0,30 (0,00 a -0,30)	Correlação desprezível

A Figura 5.20 mostra os valores de correlação de Pearson entre os resultados médios de desgaste de pastilha e disco apresentados na Figura 5.15 e Figura 5.19, respectivamente.

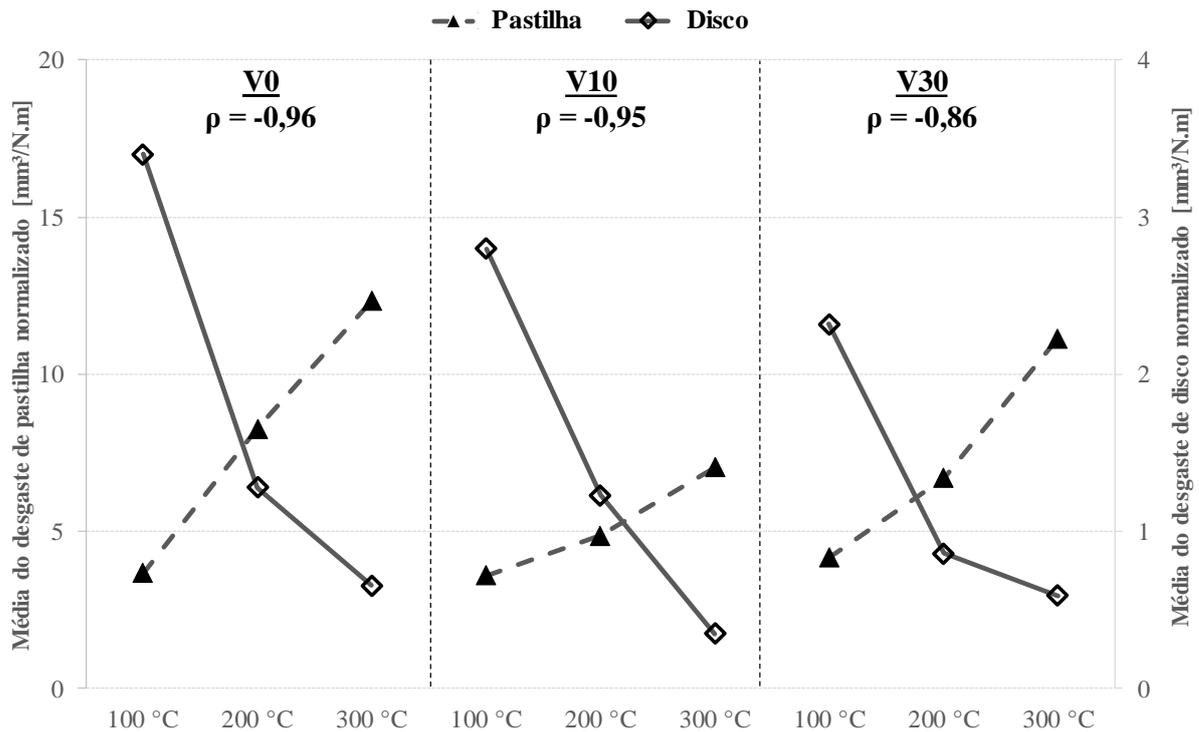


Figura 5.20 – Correlação de Pearson entre desgaste de pastilha e disco.

Observa-se que os três materiais apresentaram correlação negativa forte (material V30) e muito forte (V0 e V10). Em outras palavras, os desgastes de pastilha e disco apresentam um comportamento inverso: enquanto que o desgaste de disco é reduzido com o incremento de temperatura, o desgaste de pastilha aumenta. Uma hipótese que pode explicar este fenômeno é que o aumento da temperatura degrada alguns ingredientes contidos na pastilha, facilitando a formação de um filme que, desta forma, protege a superfície do disco, reduzindo o desgaste deste.

5.3 Análise morfológica dos platôs de contato

Conforme visto na metodologia apresentada na seção 4.7.1.2, parâmetros morfológicos foram analisados através do método de binarização (ou segmentação de imagens) de Otsu. As microscopias, bem como a binarização destas imagens de todos os ensaios, são mostradas no Apêndice B. Cabe aqui salientar que este parâmetro foi obtido ao final das 500 frenagens de cada ensaio. A seguir, são mostrados os resultados de percentual de área de platôs, tamanho médio de platôs e quantidade de platôs.

5.3.1 Percentual de área de platôs

A Figura 5.21 apresenta os percentuais de área dos platôs de contato para os ensaios realizados, obtidos através do algoritmo de Otsu. Com o intuito de facilitar as análises, os dados das fases A, B e C são agrupados através das médias e desvios padrão ($\pm 1\sigma$).

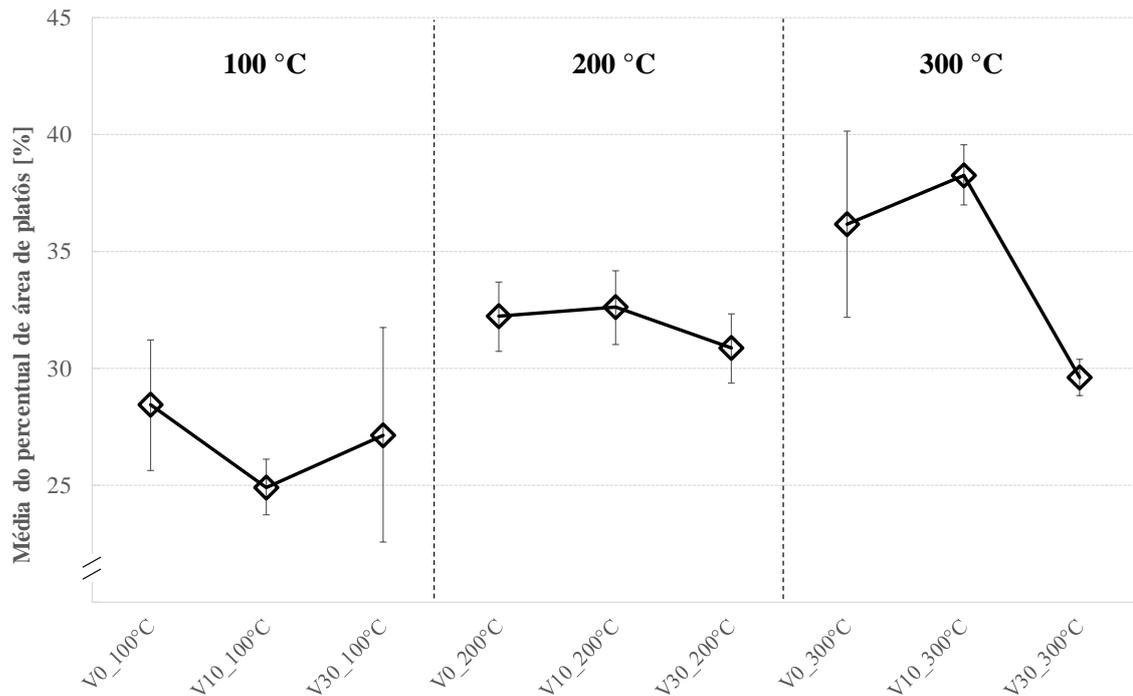


Figura 5.21 – Médias dos percentuais de área de platôs de contato.

Através da barra de erros, observa-se que existe uma grande variação nos valores de percentual de área de platôs de contato nos experimentos V30_100°C e V0_300°C. Em outras palavras, existe uma variação grande entre os resultados produzidos nas fases A, B e C para alguns materiais. Porém, não se pode atribuir tal variação à presença ou ausência do cobre, uma vez que os materiais V0 e V30 (sem cobre e com 30% de cobre, respectivamente) mostraram grandes magnitudes de desvio padrão. Em outras palavras, não é possível perceber um papel claro do cobre em relação ao percentual de área de platôs.

A Figura 5.22 mostra os resultados de percentual de área de platôs de contato separados por tipo de material, com o intuito de avaliar a influência que a temperatura tem para cada amostra.

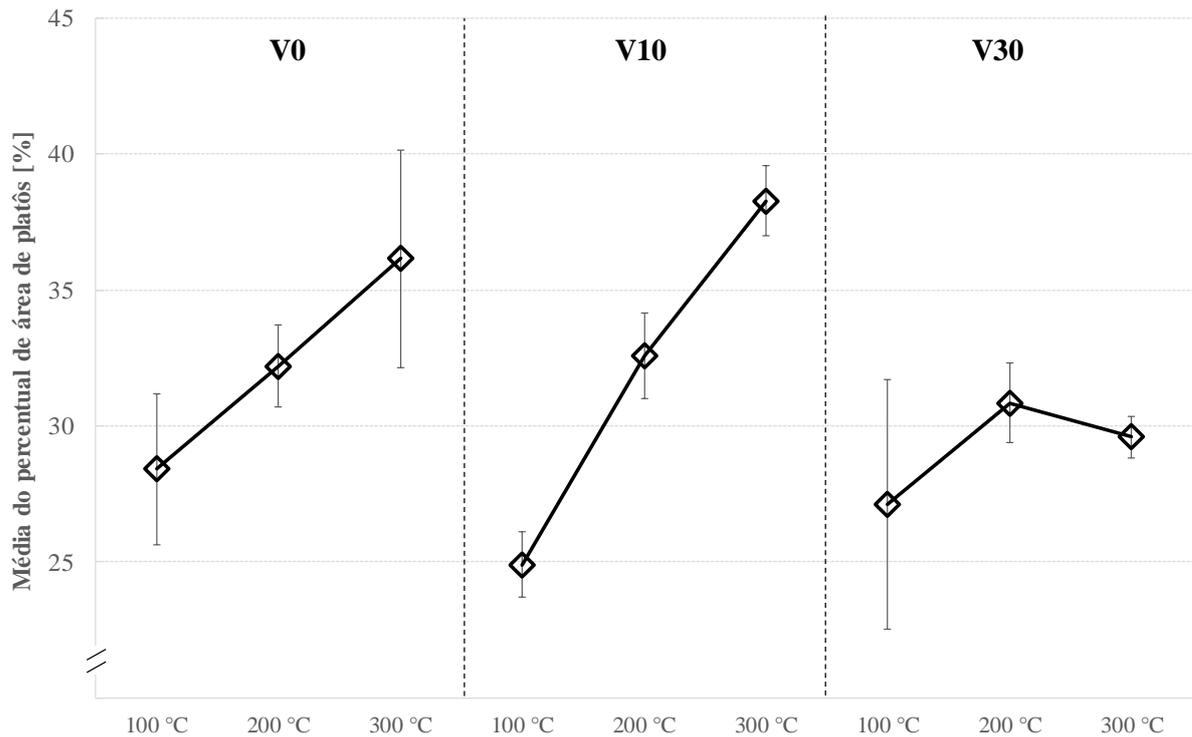


Figura 5.22 – Médias dos percentuais de área de platôs de contato com avaliação da influência da temperatura.

Pode-se verificar que o aumento de temperatura inicial de disco levou a um aumento no percentual de área de platôs para os materiais, com exceção do material V30, onde ocorreu uma redução do percentual de área de platôs a 300 °C. Porém, ao considerarmos a barra de erros, nem todos os crescimentos observados na área dos platôs podem ser considerados como estatisticamente significativos.

5.3.2 Tamanho médio dos platôs

A Figura 5.23 mostra os resultados do tamanho médio de platôs de contato (em μm^2) das fases agrupadas através da média e desvio padrão ($\pm 1\sigma$).

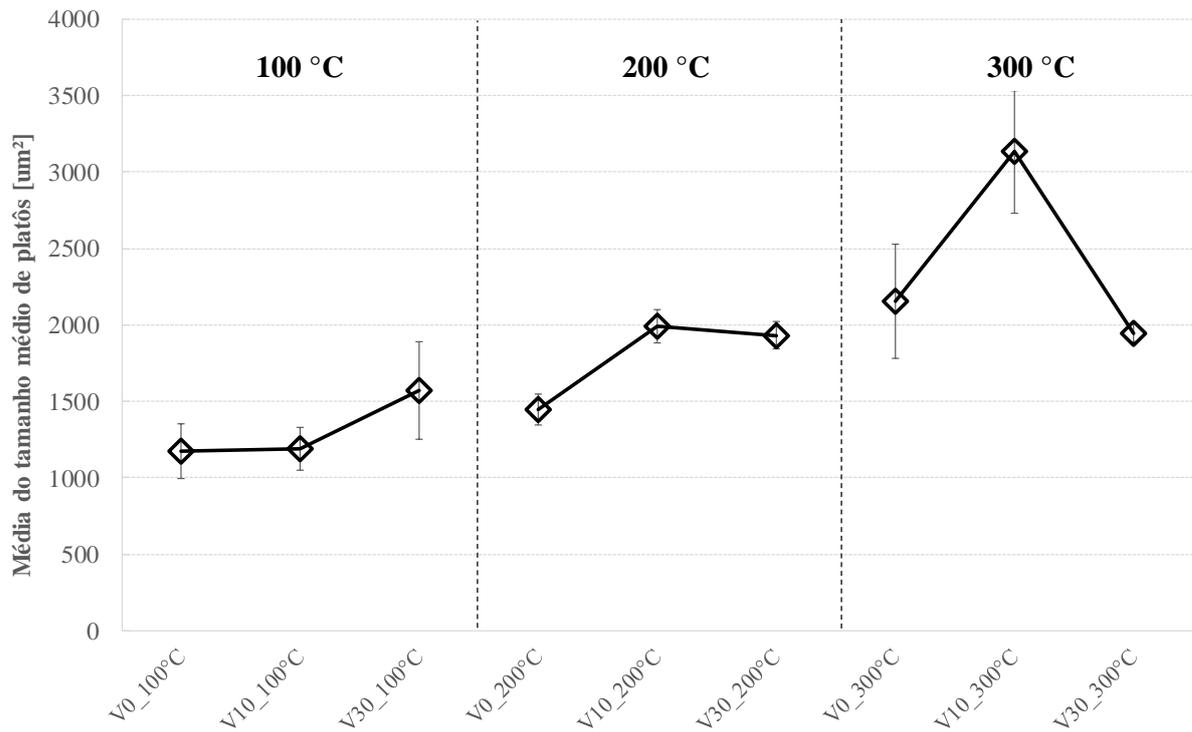


Figura 5.23 – Médias dos tamanhos médios dos platôs de contato.

De forma similar ao que foi observado nos resultados do percentual de área dos platôs de contato, o tamanho médio dos platôs também apresenta grandes variações entre as fases A, B e C de casa ensaio. Novamente, este fenômeno parece ser independente do percentual de cobre, uma vez que ocorre nos três materiais.

A Figura 5.24 mostra os resultados do tamanho médio dos platôs separados por material, visando desta forma avaliar a influência da temperatura inicial de disco.

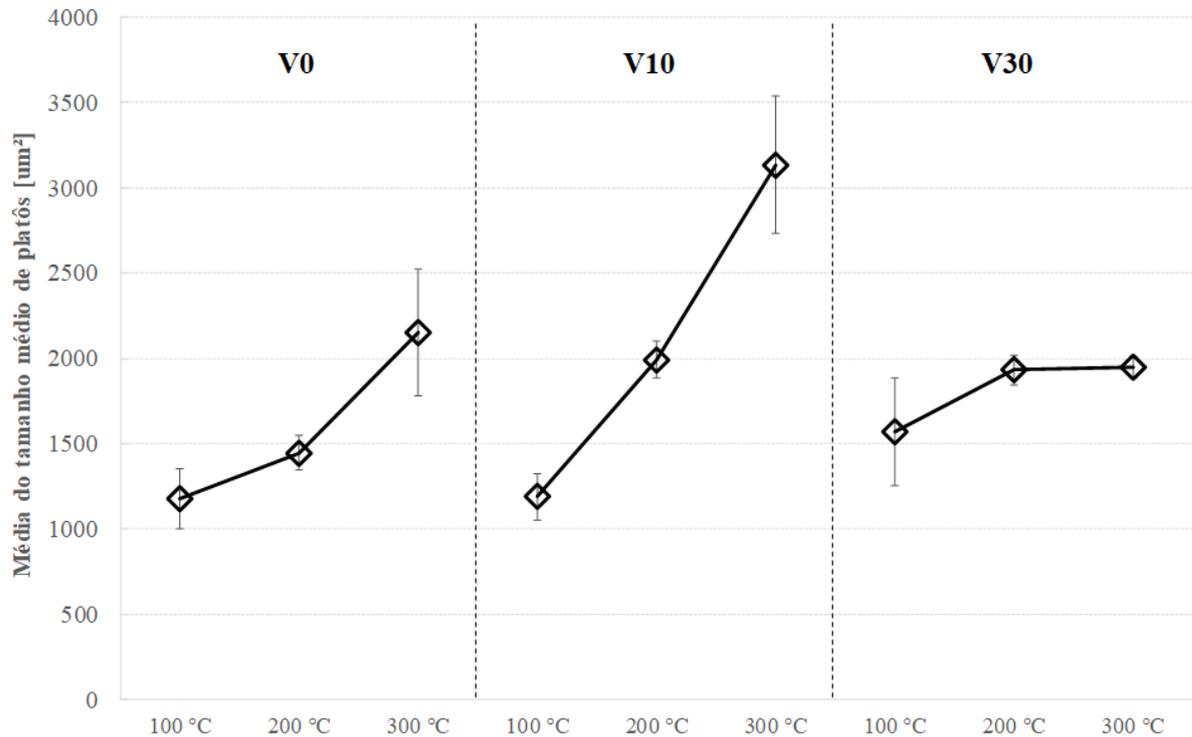


Figura 5.24 – Médias dos tamanhos médios dos platôs de contato com avaliação da influência da temperatura.

Ao avaliar o comportamento dos materiais em diferentes temperaturas, pode-se observar que, para os materiais V0 e V10, o aumento de temperatura levou a um aumento considerável no tamanho dos platôs. Para o material V30, o tamanho dos platôs aumentou apenas de 100 °C para 200 °C (em valores médios), mantendo-se praticamente constante entre as temperaturas de 200 °C e 300 °C. Cabe aqui salientar que não está sendo considerada a estatística para teste de significância para a análise, ou seja, apenas o valor da média está sendo avaliado.

O comportamento do tamanho médio dos platôs é similar ao comportamento do percentual de área de contato dos platôs. Assim, o aumento de temperatura levou a um aumento do percentual de área de platôs bem como um aumento de seu tamanho médio para os materiais V0 e V10. Uma hipótese que pode explicar este fenômeno é que, com o aumento da temperatura, as fibras tornam-se mais dúcteis, favorecendo a deformação destas no sentido da força de atrito, aumentando desta forma o tamanho dos platôs.

5.3.3 Quantidade de platôs

A Figura 5.25 mostra os resultados da quantidade de platôs de contato das fases A, B e C agrupadas através da média e desvio padrão ($\pm 1\sigma$).

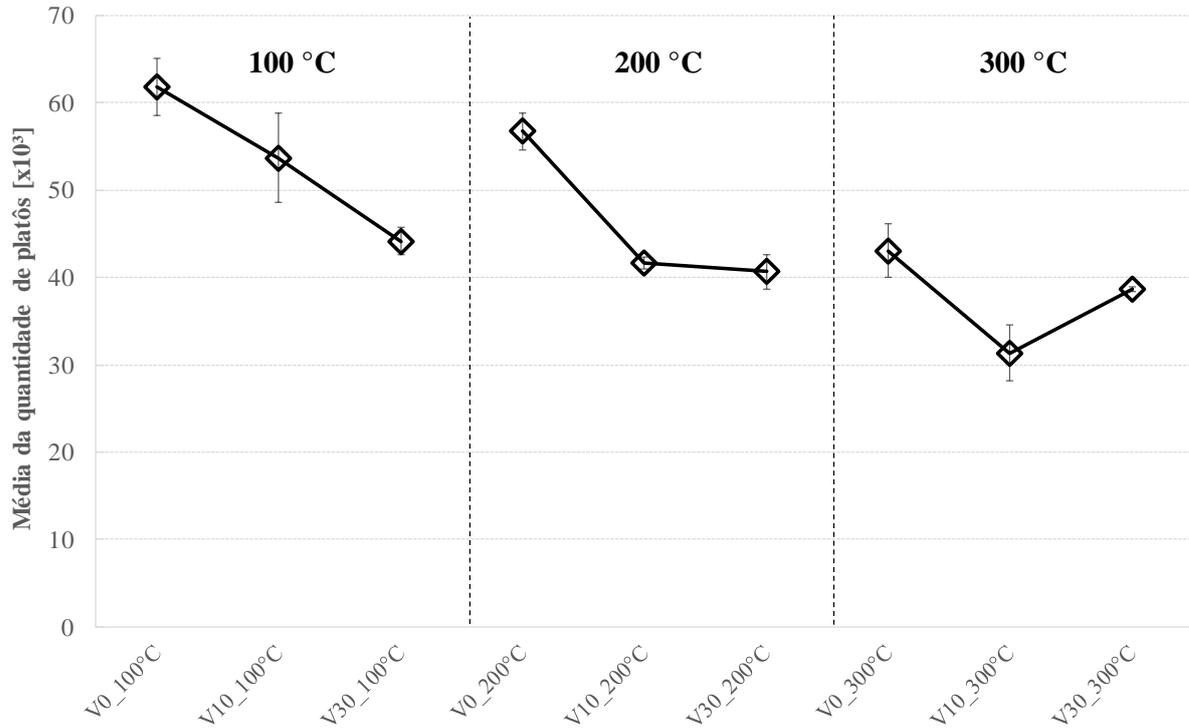


Figura 5.25 – Média da quantidade de platôs.

Observa-se que, com o aumento de percentual de cobre, ocorreu uma redução na quantidade de platôs (em valores médios) nas temperaturas de 100 °C e 200 °C. Para 300 °C, contudo, este comportamento não foi observado.

A Figura 5.26 mostra os valores de quantidade de platôs separados por tipo de material, com o intuito de avaliar a influência da temperatura inicial de disco.

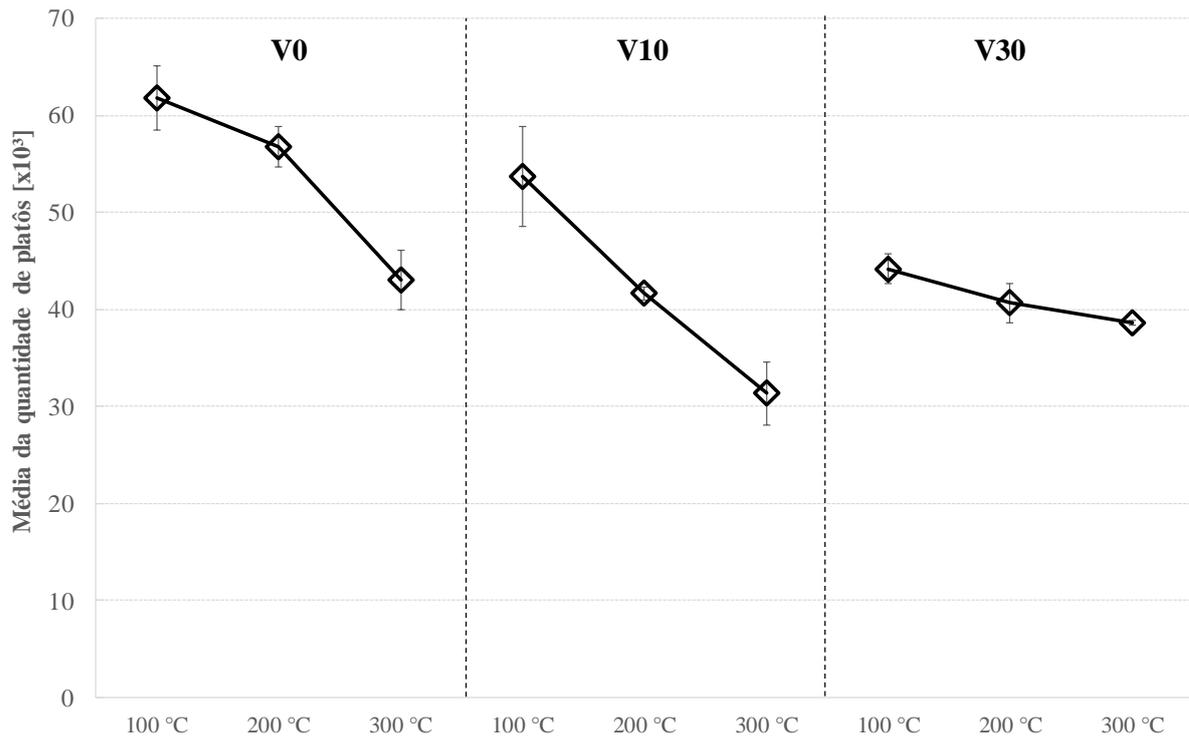


Figura 5.26 – Média da quantidade de platôs com avaliação da influência da temperatura.

É possível observar que os três materiais ensaiados apresentaram uma redução na quantidade de platôs com o aumento de temperatura inicial de disco, entretanto, esta influência da temperatura foi menor no material com 30% de cobre (V30).

5.3.4 Correlação entre parâmetros morfológicos e coeficiente de atrito

Os parâmetros morfológicos (percentual de área de platôs, tamanho médio de platôs e quantidade de platôs) foram correlacionados com o coeficiente de atrito dos ensaios através do coeficiente de correlação de Pearson, com interpretação mostrada na Tabela 5.3. Esta correlação tem como intuito verificar quais parâmetros morfológicos estão mais relacionados ao coeficiente de atrito quando o percentual de cobre é variado para cada uma das temperaturas iniciais de disco. Visto que os parâmetros morfológicos foram obtidos após as 500 frenagens de cada ensaio, eles foram correlacionados com a média das médias dos coeficientes de atrito das 10 últimas frenagens, assumindo que estas influenciam nos parâmetros morfológicos dos platôs de contato.

A Figura 5.27 apresenta os valores da média do percentual de área de platôs (mostrados na Figura 5.21) e atrito médio (Figura 5.8) nos três patamares de temperatura inicial de disco.

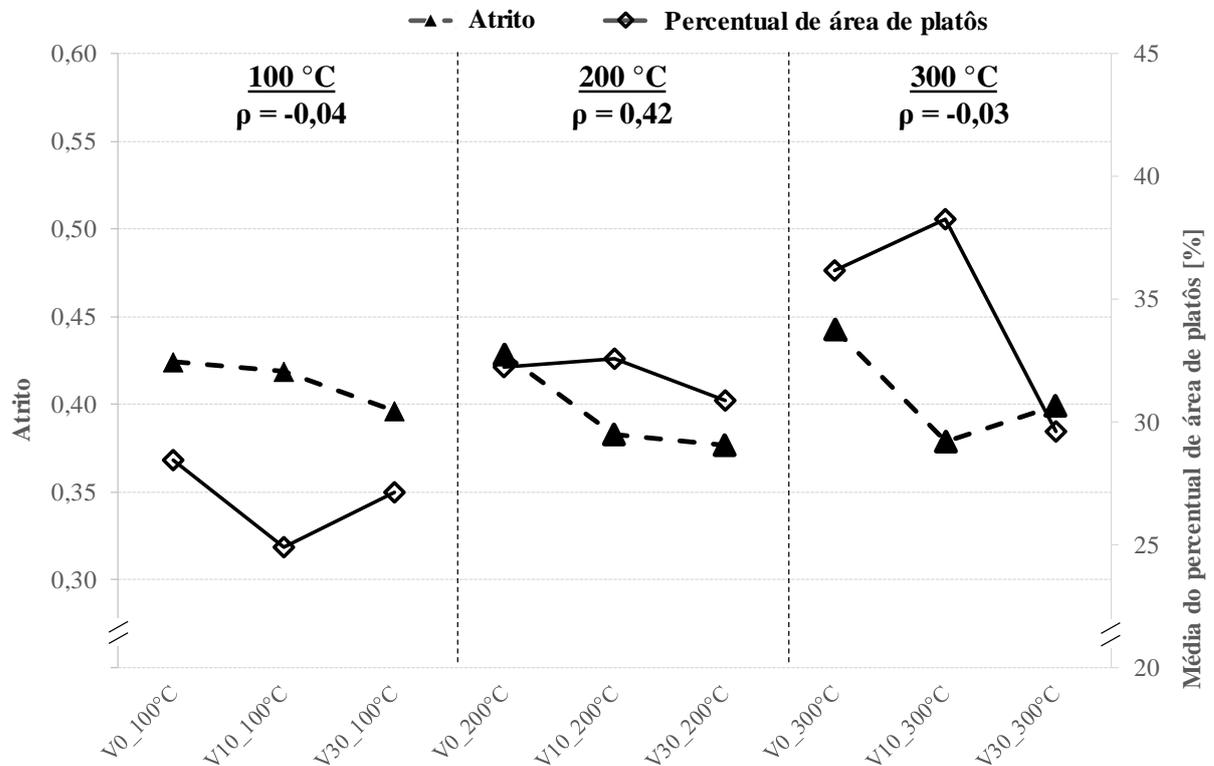


Figura 5.27 – Correlação de Pearson entre coeficiente de atrito e média do percentual de área de platôs.

Observa-se que a correlação entre coeficiente de atrito e percentual de área de platôs é positiva fraca (em 200 °C) e desprezível (em 100 °C e 300 °C). Em outras palavras, não foi possível observar uma correlação clara entre estes dois parâmetros, ou seja, eles são independentes.

A Figura 5.28 apresenta os valores da média do tamanho médio de platôs (apresentados na Figura 5.23) e atrito médio (Figura 5.8) nos três patamares de temperatura inicial de disco.

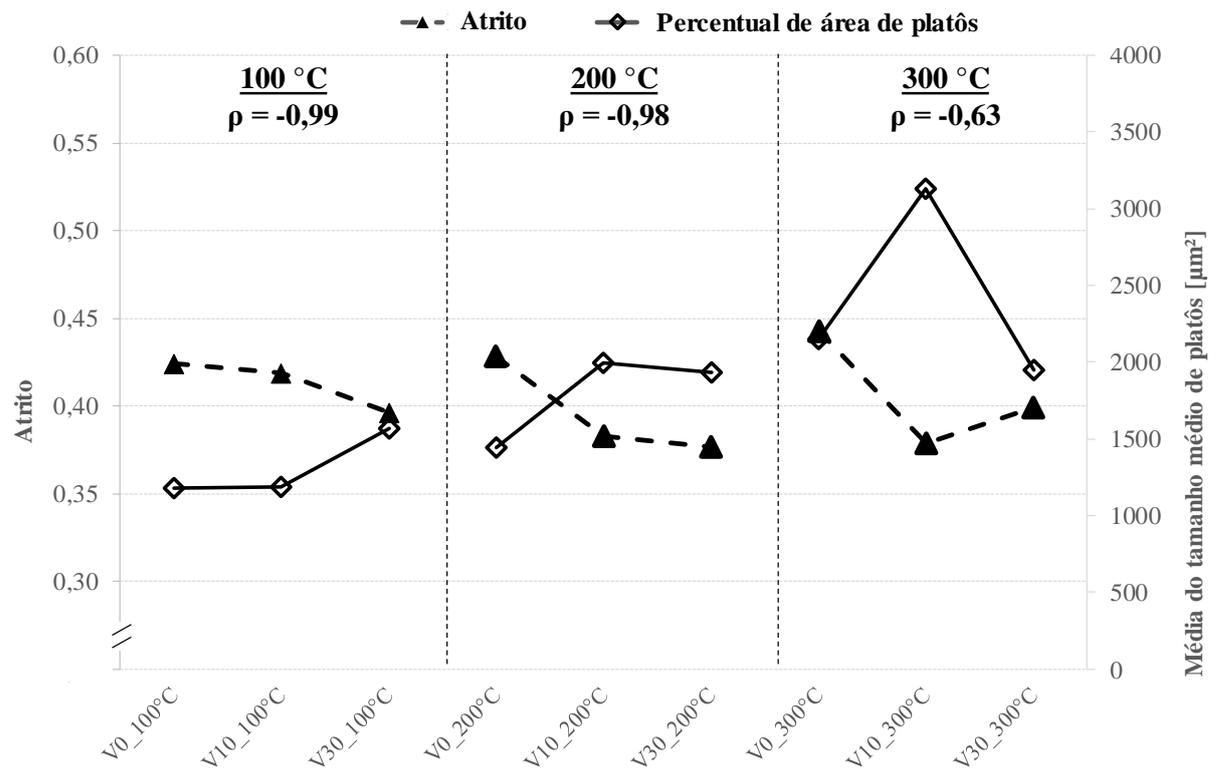


Figura 5.28 – Correlação de Pearson entre coeficiente de atrito e tamanho médio de platôs.

Neste caso, existe uma correlação negativa muito forte (em 100 °C e 200 °C) e negativa moderada (em 300 °C) entre o coeficiente de atrito e o tamanho médio de platôs, ou seja, o comportamento do coeficiente de atrito é inverso ao comportamento do tamanho de platôs. Embora esta correlação seja mais forte do que a correlação entre o coeficiente de atrito e percentual de área de platôs, a correlação em 300 °C ainda se mostra moderada neste caso.

A Figura 5.29 apresenta os valores da média da quantidade de platôs (Figura 5.25) e atrito médio (Figura 5.8) nos três patamares de temperatura inicial de disco.

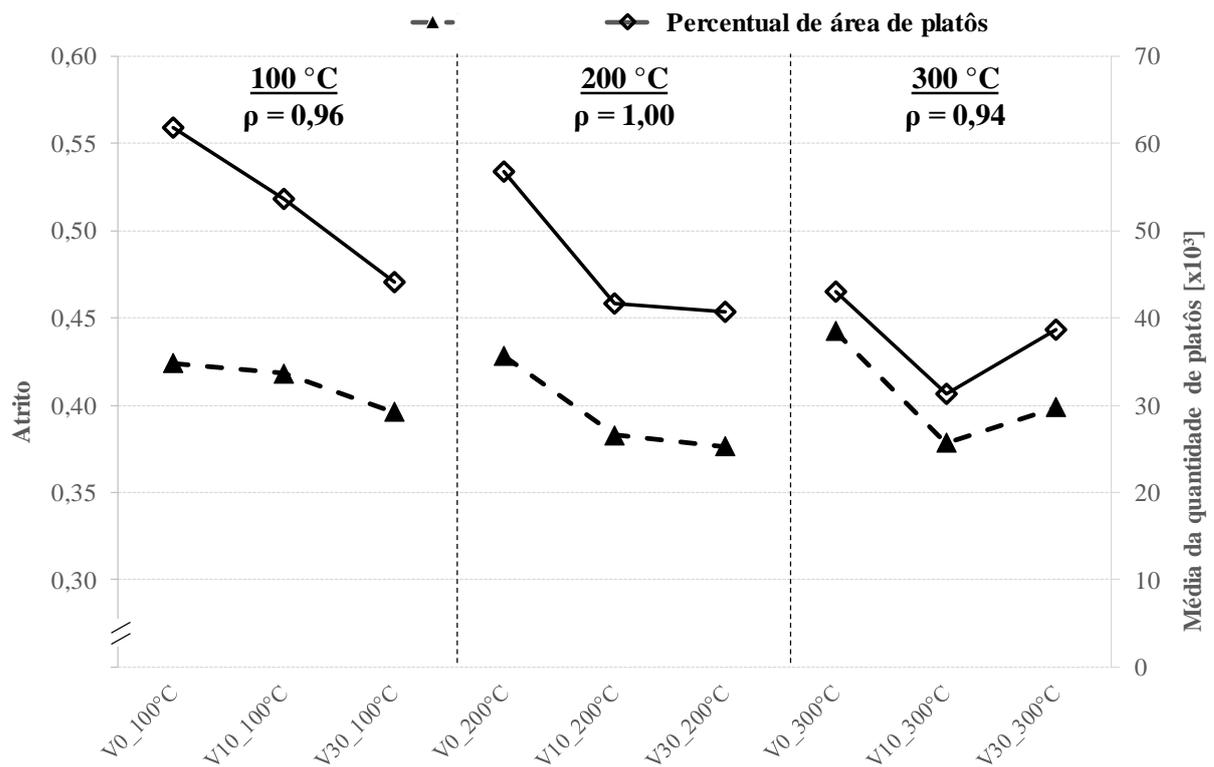


Figura 5.29 – Correlação de Pearson entre coeficiente de atrito e quantidade de platôs.

Com base na Tabela 5.3, percebe-se que, para os três valores de temperatura, o coeficiente de correlação de Pearson (ρ) é positivo, apresentando correlação muito forte nos três patamares de temperatura. Em outras palavras, o aumento ou diminuição na quantidade de platôs de contato ocorreu juntamente com o aumento ou diminuição do coeficiente de atrito. Ao analisar os valores obtidos de correlação, pode-se afirmar que, para as amostras selecionadas no presente estudo, o coeficiente de atrito está mais correlacionado com a quantidade de platôs do que os demais parâmetros morfológicos dos platôs (percentual de área de platôs e tamanho médio de platôs).

Cabe aqui ressaltar que os valores da morfologia dos platôs (percentual de área, tamanho médio e quantidade) foram obtidos apenas após a realização das 500 frenagens de cada ensaio. Quaisquer alterações que ocasionalmente possam ter ocorrido no decorrer destas frenagens não foram contabilizadas. Para uma análise mais criteriosa, sugere-se elaborar uma metodologia capaz de registrar imagens dos platôs de contato (e, conseqüentemente, quantificá-los) ao final de cada frenagem realizada, sendo esta uma sugestão para trabalhos futuros.

5.4 Filme no disco

Em alguns dos ensaios prévios (parâmetros de ensaio mostrados na Tabela 4.3), foi constatada uma mudança abrupta do coeficiente de atrito (picos) em determinadas frenagens. Juntamente com esta mudança do coeficiente de atrito, foi observada (visualmente) uma remoção do filme depositado sobre o disco nas mesmas frenagens. Este fenômeno foi observado em alguns ensaios dos materiais V10P e V0P, com temperatura inicial de disco de 100 °C, ou seja, ocorreu tanto no material com cobre (V10P) quanto no material sem cobre (V0P). Entretanto, este fenômeno não foi observado em temperaturas mais elevadas nos ensaios prévios (200 °C e 300 °C). A Figura 5.30 mostra o coeficiente de atrito médio de cada frenagem dos materiais V10P e V0P nos ensaios prévios.

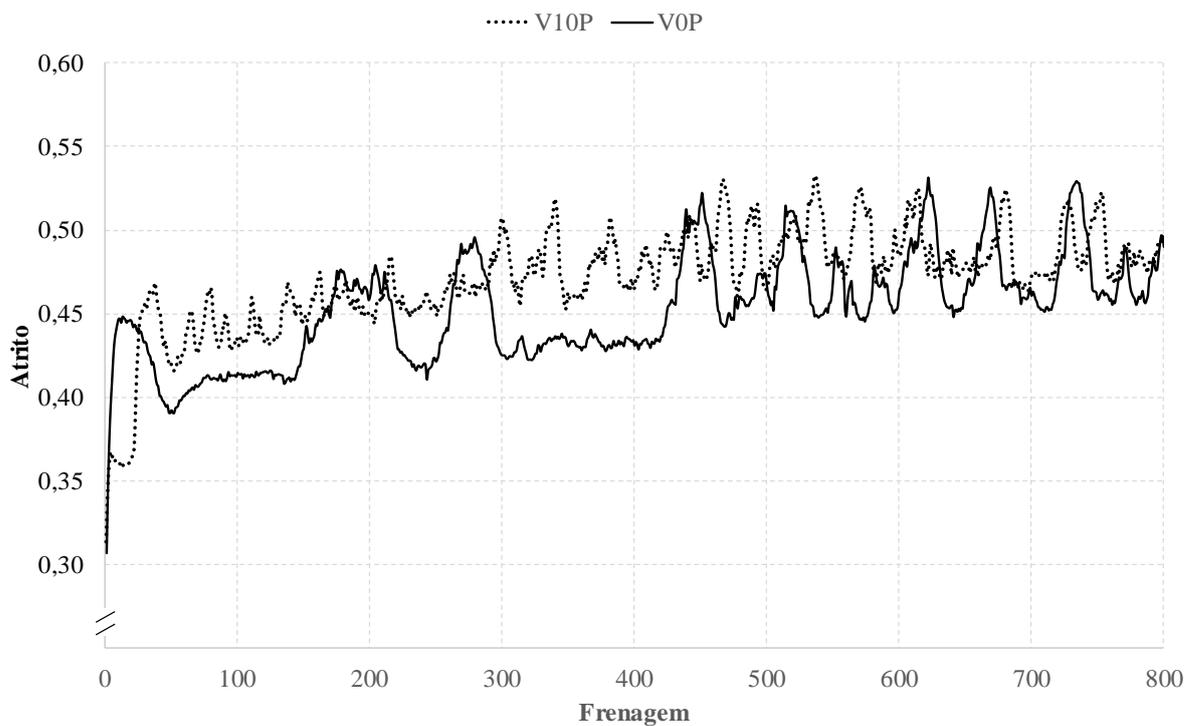


Figura 5.30 – Fenômeno de efeito de picos no coeficiente de atrito médio, observado em ensaios prévios dos materiais V10P e V0P com temperatura inicial de disco de 100 °C.

Observa-se uma variação no coeficiente de atrito em diversas frenagens, ocorrendo um aumento e diminuição abruptos deste parâmetro ao longo do teste. Este fenômeno ocorreu em alguns dos ensaios prévios, sendo apresentado aqui apenas os resultados do coeficiente de

atrito para um ensaio do material V0P e um ensaio do material V10P (os ensaios prévios em que não ocorreram este fenômeno não são mostrados neste trabalho).

Com a implementação da metodologia descrita na seção 4.7.2.1, motivada pelo fenômeno ocorrido nos ensaios prévios, foi possível obter o registro fotográfico da superfície do disco ao final de cada frenagem para os ensaios realizados neste trabalho.

Nos ensaios “oficiais”, o fenômeno de mudança abrupta do coeficiente de atrito ocorreu em um único ensaio, constatado na segunda fase (B) do material sem cobre com 100 °C de temperatura inicial de disco (V0B_100°C). Observou-se esta mudança abrupta do coeficiente de atrito médio (picos) em determinadas frenagens, conforme apresentado na Figura 5.31. Cabe aqui salientar que este ensaio utilizou velocidades de deslizamento e força normal diferentes das utilizadas nos ensaios prévios, conforme relatado na seção 4.4.

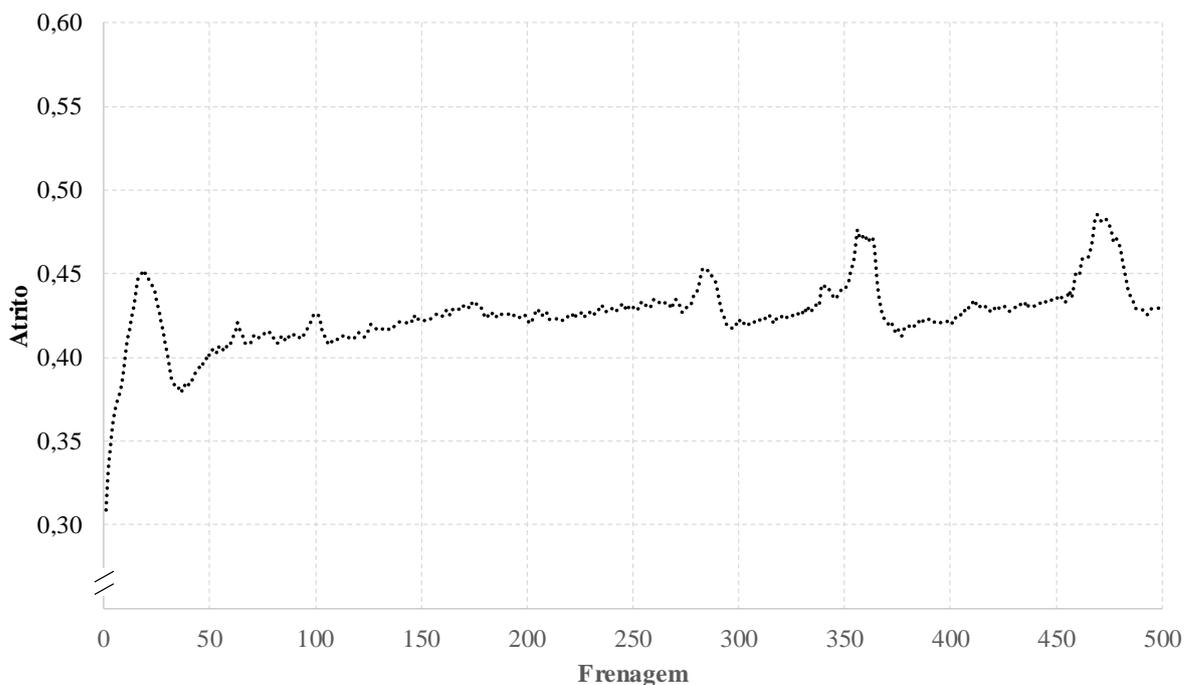


Figura 5.31 – Fenômeno de efeito de picos no coeficiente de atrito médio, observado no ensaio V0B_100°C.

Através da Figura 5.31, percebe-se que se inicia um aumento no coeficiente de atrito em determinadas frenagens, como, por exemplo, em torno da frenagem 350 e 460. O coeficiente de atrito continua a aumentar até apresentar um ponto de máxima magnitude após

algumas frenagens (em torno de 10), voltando então a descer para um valor próximo do início da subida. Esta variação obviamente aumenta o desvio padrão do coeficiente de atrito médio de todo o ensaio.

Conforme discutido na seção 4.7.2.1, as trilhas atritadas da superfície do disco ao final de cada frenagem foram registradas através de imagens fotográficas. Estas foram então analisadas através de um programa computacional, fornecendo valores de intensidade dos pixels de uma linha radial atritada do disco. Observou-se que ocorreu uma relação direta entre variação do coeficiente de atrito e variação de filme depositado no disco neste ensaio específico (V0B_100°C). A Figura 5.32 mostra o coeficiente de atrito juntamente com a média das intensidades das linhas radiais atritadas do disco para cada frenagem do ensaio V0B_100°C.

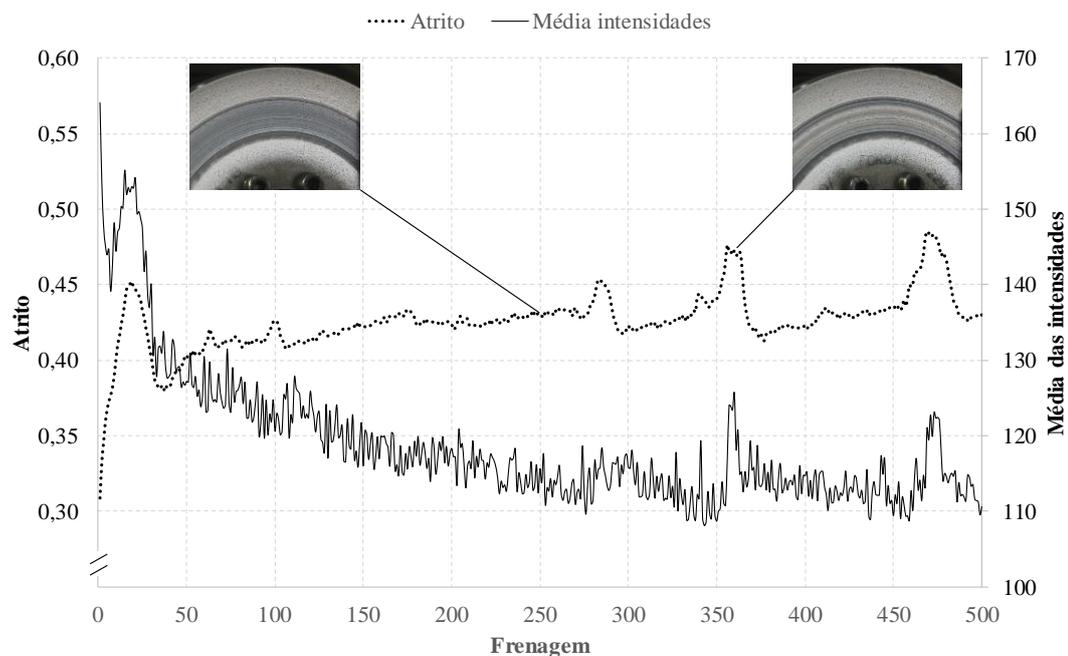


Figura 5.32 – Coeficiente de atrito e média das intensidades dos tons de cinza para o ensaio V0B_100°C, mostrando a redução de filme depositado sobre o disco (aumento da média das intensidades) nas frenagens em que ocorre o aumento abrupto do coeficiente de atrito.

As imagens fotográficas mostram visualmente o depósito de filme no disco na frenagem 250 (atrito estável e baixo, filme homogêneo) e na frenagem 360 (atrito alto, filme heterogêneo). Observou-se que a média das intensidades aumenta (tons de cinza mais claros)

juntamente com o aumento do coeficiente de atrito. Isso indica que a redução do depósito de filme sobre a superfície do disco levou ao aumento do coeficiente de atrito, ou, de forma contrária, o aumento do coeficiente de atrito levou à redução do depósito de filme sobre o disco. Não há como explicar qual dos efeitos foi responsável pela ocorrência do outro (quem é causa e quem é efeito), sendo necessários estudos mais aprofundados para a compreensão deste fenômeno.

Outra possibilidade de análise é realizar o desvio padrão dos tons de cinza obtido para o perfil radial avaliado sobre a trilha atritada, com o intuito de avaliar a homogeneidade da distribuição do filme depositado na superfície do disco. Assim, um alto valor de desvio padrão significa que a distribuição do filme sobre o perfil radial na trilha atritada do disco é heterogênea, enquanto que um desvio baixo significa que o perfil é homogêneo. A Figura 5.33 mostra esta análise.

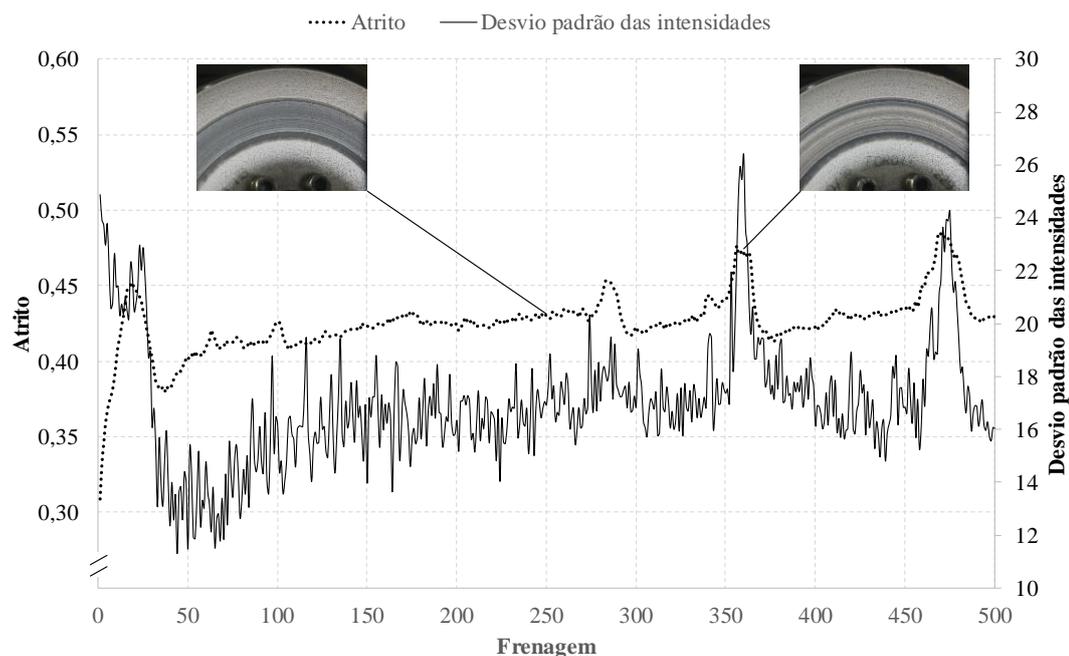


Figura 5.33 – Coeficiente de atrito e desvio padrão das intensidades dos tons de cinza para o ensaio V0B_100°C, mostrando a heterogeneidade de filme depositado no disco nas frenagens em que ocorre o aumento abrupto do coeficiente de atrito.

Pode-se verificar que o desvio padrão também aumenta com o aumento do coeficiente de atrito, indicando que o filme depositado no disco se torna mais heterogêneo (análise do perfil radial) à medida que o atrito aumenta.

Este fenômeno de variação abrupta do coeficiente de atrito ocorreu na segunda fase (B) do ensaio do material sem cobre com temperatura inicial de disco de 100 °C (V0B_100°C). Contudo, essas variações de atrito não ocorreram nas demais fases (A e C) deste mesmo material, indicando que este fenômeno é aleatório para esta temperatura. Cabe aqui ressaltar que esta aleatoriedade também foi observada nos ensaios prévios, ou seja, apenas em alguns experimentos este fenômeno foi observado, embora tenha ocorrido apenas para temperaturas de 100 °C.

Conforme relatado anteriormente, o fenômeno de variação abrupta do coeficiente de atrito ocorreu apenas em um dos ensaios “oficiais” (V0B_100°C). Com o intuito de ilustrar a não ocorrência deste fenômeno nos demais ensaios (fases A e C do material V0 a 100 °C, bem como nos ensaios do material V0 em 200 °C e 300 °C e em todos os ensaios dos materiais V10 e V30 para os três patamares de temperatura), a Figura 5.34 e Figura 5.35 mostram estas mesmas análises mostrando o coeficiente de atrito juntamente com a média das intensidades e desvio padrão dos tons de cinza do ensaio V0A_100°C, respectivamente.

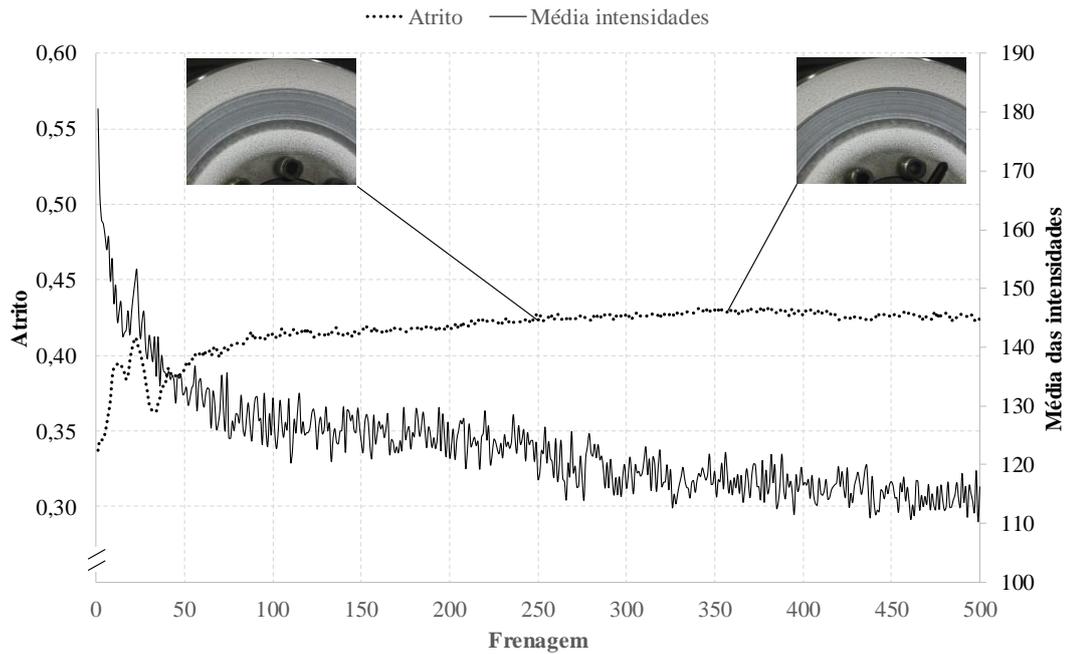


Figura 5.34 – Coeficiente de atrito e média das intensidades dos tons de cinza para o ensaio V0A_100°C, mostrando a não ocorrência da redução de filme depositado sobre o disco, bem como a não ocorrência de aumento abrupto do coeficiente de atrito.

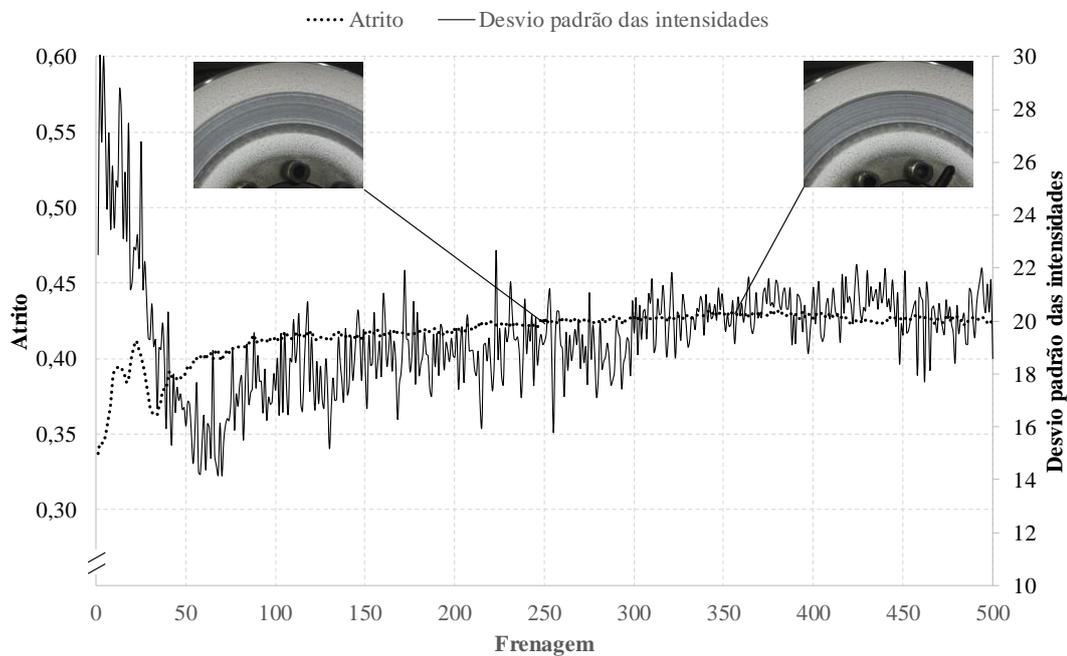


Figura 5.35 – Coeficiente de atrito e desvio padrão das intensidades dos tons de cinza para o ensaio V0A_100°C, mostrando a não ocorrência de heterogeneidade de filme depositado no disco, bem como a não ocorrência de aumento abrupto do coeficiente de atrito.

Pode-se verificar que nos ensaios do material V0A_100°C não ocorreu o aumento abrupto do coeficiente de atrito de forma semelhante ao que ocorreu no ensaio V0B_100°C. Conseqüentemente, a média das intensidades e desvio padrão não apresentaram grandes variações pontuais. Este comportamento foi similar aos demais ensaios realizados neste estudo, ou seja, o fenômeno de aumento abrupto do coeficiente de atrito foi observado apenas no ensaio V0B_100°C.

Embora esta variação tenha ocorrido apenas na fase B do material sem cobre (V0), a 100 °C, este fenômeno foi observado em testes prévios, conforme mencionado no início desta seção. Nos ensaios prévios, se observou este aumento abrupto do coeficiente de atrito em alguns experimentos para os materiais V0 e V10 nas temperaturas de 100 °C. Porém, não foi observado este fenômeno em nenhum ensaio com temperaturas iniciais de disco mais elevadas (200 °C e 300 °C). Em outras palavras, esta instabilidade do coeficiente de atrito e perturbação do filme depositado sobre o disco parece ocorrer apenas em baixas temperaturas, e independe do percentual de cobre.

Na literatura, não foram encontrados relatos sobre esta relação entre variação no coeficiente de atrito em determinadas frenagens e instabilidade de filme depositado no disco. Embora não seja o foco deste trabalho, este fenômeno demanda um estudo mais aprofundado neste sentido, buscando compreender se a variação de atrito causa esta alteração do filme depositado no disco ou vice-versa. Ensaios em condições diversas de força normal, velocidade de deslizamento e avaliação de espessura de filme são algumas sugestões para trabalhos futuros para a análise deste fenômeno.

6. CONCLUSÕES

Com o presente trabalho, algumas conclusões podem ser obtidas:

- O material com ausência de cobre (amostra V0) apresentou valores de coeficiente de atrito mais elevados do que os materiais com cobre em sua composição (V10 e V30) para os três patamares de temperatura;
- A alteração da temperatura inicial de disco não levou a mudanças significativas nos valores de coeficiente de atrito;
- O material V10 (10% de Cobre) apresentou maior variação de atrito entre o início e fim de cada frenagem individual quando comparado com os materiais V0 e V30, ou seja, a amostra V10 mostrou ter mais sensibilidade à velocidade de deslizamento;
- A ausência (V0) ou excesso de cobre (V30) levou a uma aleatoriedade na variação de atrito entre início e fim de cada frenagem individual;
- A elevação da temperatura inicial de disco levou a um aumento no desgaste da pastilha para os três materiais. O material V10 foi menos susceptível a este aumento de desgaste em função da temperatura do que os outros materiais (V0 e V30). O material V10 também apresentou menor desgaste do que os demais para os três patamares de temperatura;
- Observou-se forte influência do percentual de cobre contido nas amostras no desgaste de disco para temperaturas de 100 °C. Quanto maior o percentual de cobre, menor o desgaste de disco nesta temperatura;
- O aumento de temperatura levou a uma redução no desgaste de disco para os três materiais;
- Observou-se correlação negativa forte (V30) e muito forte (V0 e V10) entre desgaste de pastilha e desgaste de disco, onde o aumento de temperatura aumenta o desgaste de pastilha e reduz o desgaste de disco. Hipótese: aumento da temperatura degrada ingredientes da pastilha, facilitando a formação de um filme que protege a superfície do disco;
- O aumento de temperatura inicial de disco levou a uma redução da quantidade de platôs;

- A quantidade de platôs é o parâmetro morfológico de platôs que está mais correlacionado com o coeficiente de atrito entre os materiais para diferentes temperaturas, mostrando coeficientes de correlação positiva muito forte para os três patamares de temperatura inicial de disco utilizados;
- Foi observada uma variação abrupta do coeficiente de atrito em determinadas frenagens com os materiais V0 e V10 com temperatura inicial de disco de 100 °C. Esta variação ocorreu nas mesmas frenagens em que foi observada uma remoção do filme depositado no disco. Este fenômeno, contudo, parece ser aleatório, uma vez que ocorreu apenas em uma fase do ensaio “oficial” e em alguns ensaios prévios. Além disso, este fenômeno parece ser independente da presença de cobre, uma vez que ocorreu em ensaios com os materiais V0 e V10;
- A variação abrupta do coeficiente de atrito e perturbação do filme não foram observados em ensaios com temperaturas iniciais de disco de 200 °C e 300 °C. Em outras palavras, este fenômeno parece ocorrer apenas em baixas temperaturas.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas linhas de pesquisa surgem após o presente trabalho, sendo estas listadas a seguir:

- Realizar experimentos com os mesmos materiais utilizando outros parâmetros, variando força normal e velocidades de deslizamento;
- Desenvolver uma metodologia capaz de registrar imagens dos platôs de contato ao final de cada frenagem para permitir uma análise morfológica dos platôs frenagem a frenagem;
- Realizar estudos mais aprofundados sobre a perturbação do filme em elevações abruptas do coeficiente de atrito, avaliando, por exemplo, a espessura de filme depositado no disco nas frenagens em que este fenômeno ocorre.

REFERÊNCIAS

- Albuquerque, C.T., **O livro do automóvel**, ed. 6, Lisboa, Rearer's Digest. 1976.
- Anderson, T.W., Darling, D.A., Asymptotic theory of certain “goodness of fit” criteria based on stochastic processes, **Annals of Mathematical Statistics**, vol. 23, pp.193–212, 1952.
- Aranganathan, N., Bijwe, J., Development of copper-free eco-friendly brake-friction material using novel ingredients, **Wear**, vol. 353, pp.79–91, 2016.
- 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**, vol. 352–353, pp.112–121, 2016.
- Birch, T.W., **Automotive braking systems**, ed. 3, New York, Learning, Delmar Cengage. 1998.
- Blau, P.J., Compositions, functions, and testing of friction brake materials and their additives, **Energy**, vol. 27, ed. September, p.38, 2001.
- Cho, M.H., Cho, K.H., Kim, S.J., Kim, D.H., Jang, H., The role of transfer layers on friction characteristics in the sliding interface between friction materials against gray iron brake disks, **Tribology Letters**, vol. 20, ed. 2, pp.101–108, 2005.
- Davis, A.P., Shokouhian, M., Ni, S., Loading estimates of lead, copper, cadmium, and zinc in urban runoff from specific sources, **Chemosphere**, vol. 44, ed. 5, pp.997–1009, 2001.
- Duong, T.T.T., Lee, B.K., Determining contamination level of heavy metals in road dust from busy traffic areas with different characteristics, **Journal of Environmental Management**, vol. 92, ed. 3, pp.554–562, 2011.
- EL-Tayeb, N.S.M., Liew, K.W., On the dry and wet sliding performance of potentially new frictional brake pad materials for automotive industry, **Wear**, vol. 266, ed. 1–2, pp.275–287, 2009.
- Eriksson, M., **Friction and contact phenomena of disc brakes related to squeal**, Tese de doutorado, Uppsala University, 2000.
- Eriksson, M., Bergman, F., Jacobson, S., On the nature of tribological contact in automotive brakes, **Wear**, vol. 252, ed. 1–2, pp.26–36, 2002.
- Eriksson, M., Bergman, F., Jacobson, S., Surface characterization of brake pads after running under silent and squealing conditions, **Wear**, vol. 232, ed. 2, pp.163–167, 1999.
- Eriksson, M., Jacobson, S., Tribological surfaces of organic brake pads, **Tribology International**, vol. 33, pp.817–827, 2000.
- Estado da Califórnia, E., **Senate Bill No. 346**, 2010.
- Estado de Washington, E., **Senate Bill No. 6557**, 2010.
- Gilardi, R., Alzati, L., Thiam, M., Brunel, J.F., Desplanques, Y., Dufrénoy, P., Sharma, S., Bijwe, J., Copper substitution and noise reduction in brake pads: Graphite type selection, **Materials**, vol. 5, ed. 11, pp.2258–2269, 2012.
- Halderman, J.D., Mitchell, C.D., **Automotive brake system**, ed. 3, New Jersey,

Pearson Education. 2004.

Haselden, A., Christoforou, C., Schlautman, M., **Characterization of airborne brake wear debris**, Final Report, ed. January 2005, pp.1–55, 2006.

Hjortenkrans, D., Bergbäck, B., Häggerud, A., Metal emissions from brake linings and tires: case studies of stockholm, **Environmental science & technology**, vol. 41, ed. 7, pp.5224–5230, 2007.

Ibhadode, a. O. a., Dagwa, I.M., Development of asbestos-free friction lining material from palm kernel shell, **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, vol. 30, ed. 2, pp.166–173, 2008.

Innovate US, W., **The copper on brakepads can pollute the water**, disponível em: <www.innovateus.net/earth-matters/copper-brakepads->, acesso em: 19/07/2016.

Jang, H., Ko, K., Kim, S.J., Basch, R.H., Fash, J.W., The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials, **Wear**, vol. 256, ed. 3–4, pp.406–414, 2004.

Kim, S.J., Jang, H., Friction and wear of friction materials containing two different phenolic resins reinforced with aramid pulp, **Tribology International**, vol. 33, pp.477–484, 2000.

Kinkaid, N.M., O'Reilly, O.M., Papadopoulos, P., Automotive disc brake squeal, **Journal of Sound and Vibration**, vol. 267, ed. 1, pp.105–166, 2003.

Kumar, M., Bijwe, J., Non-asbestos organic (NAO) friction composites: Role of copper; its shape and amount, **Wear**, vol. 270, ed. 3–4, pp.269–280, 2011.

Kumar, M., Bijwe, J., Role of different metallic fillers in non-asbestos organic (NAO) friction composites for controlling sensitivity of coefficient of friction to load and speed, **Tribology International**, vol. 43, ed. 5–6, pp.965–974, 2010.

Lee, P.W., Filip, P., Friction and wear of Cu-free and Sb-free environmental friendly automotive brake materials, **Wear**, vol. 302, ed. 1–2, pp.1404–1413, 2013.

Limpert, R., **Brake design and safety**, ed. 2, 1999.

Masotti, D., Neis, P., Ferreira, N., Gomes, K., Poletto, J., Matozo, L., Experimental evaluation of surface morphology characteristics during stick-slip process at low speed sliding test, **SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems**, 2015.

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

Matozo, L.T., **Estudo da relação entre propriedades de compósitos de fricção aplicados a sistemas de freio a disco e a propensão à ocorrência de squeal noise**, Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2012.

Menapace, C., Leonardi, M., Perricone, G., Bortolotti, M., Straffelini, G., Gialanella, S., Pin-on-disc study of brake friction materials with ball-milled nanostructured components, **Materials and Design**, vol. 115, pp.287–298, 2017.

Mukaka, M.M., Statistics corner: A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research, **Malawi Medical Journal**, vol. 24, ed. 3, pp.69–71, 2012.

Neis, P.D., **Projeto e construção de um tribômetro com controle independente da**

temperatura do disco, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Brasil) e Universidade de Ghent (Bélgica). 2012.

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**, vol. 105, ed. September 2016, pp.135–147, 2017.

Neis, P.D., Ferreira, N.F., Lorini, F.J., Matozo, L.T., Contribution to thermal correlation between a laboratory-scale tribometer and brake dynamometer, **SAE Brasil**, ed. 40, pp.1–7, 2011.

Neis, P.D., Ferreira, N.F., Silva, F.P., Comparison between methods for measuring wear in brake friction materials, **Wear**, vol. 319, ed. 1–2, pp.191–199, 2014.

Neis, P.D., Ferreira, N.F., Sukuraman, J., Matozo, L.T., Masotti, D., Characterization of surface morphology and its correlation with friction performance of brake pads, **Sustainable construction & design**, vol. 6, ed. 1, 2015.

Österle, W., Dörfel, I., Prietzel, C., Rooch, H., Cristol-Bulthé, a.-L., Degallaix, G., Desplanques, Y., A comprehensive microscopic study of third body formation at the interface between a brake pad and brake disc during the final stage of a pin-on-disc test, **Wear**, vol. 267, ed. 5–8, pp.781–788, 2009.

Österle, W., Urban, I., Third body formation on brake pads and rotors, **Tribology International**, vol. 39, ed. 5, pp.401–408, 2006.

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

Otsu, N., A threshold selection method from gray-level histograms, **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, vol. 9, ed. 1, pp.62–66, 1979.

Pavlak, R.P., Neis, P.D., Poletto, J.C., de Barros, L.Y., Ferreira, N.F., Wear, friction and NVH characterization using a laboratory-scale tribometer, **SAE Technical Paper**, 2017.

Pino, F.A., A questão da não normalidade: uma revisão, **Revista de economia agrícola**, vol. 61, ed. C, pp.17–33, 2014.

Rhee, S.K., Jacko, M.G., Tsang, P.H.S., The role of friction film in friction, wear and noise of automotive brakes, **Wear**, vol. 146, pp.89–97, 1991.

Rosselot, K.S., **Copper released from brake lining wear in the San Francisco Bay area**, Relatório técnico, 2006.

Roubicek, V., Raclavska, H., Juchelkova, D., Filip, P., Wear and environmental aspects of composite materials for automotive braking industry, **Wear**, vol. 265, ed. 1–2, pp.167–175, 2008.

Sandahl, J.F., Baldwin, D.H., Jenkins, J.J., Scholz, N.L., A sensory system at the interface between urban stormwater runoff and salmon survival a sensory system at the interface between urban stormwater runoff and salmon survival, **Environmental Science & Technology**, vol. 41, ed. 8, pp.2998–3004, 2007.

Scheaffer, R.L., Mulekar, M., McClave, J.T., **Probability and statistics for engineers**, ed. 5, Flórida, 2010.

State of Washington Department of Ecology, **Better brakes eule chapter 173-901 WAC**, 2012.

Straffelini, G., Ciudin, R., Ciotti, A., Gialanella, S., Present knowledge and perspectives on the role of copper in brake materials and related environmental issues: A critical assessment, **Environmental Pollution**, vol. 207, pp.211–219, 2015.

Taylor, P., Handa, Y., Kato, T., Effects of Cu powder , BaSO 4 and cashew dust on the wear and friction characteristics of automotive brake pads effects of Cu powder , BaSO , and cashew dust on the wear and friction characteristics of automotive brake pads, **Tribology Transactions**, vol. 39, ed. January 2015, pp.346–353, 1996.

Tribotecc, **New copper-free synthetic solutions**, disponível em: <www.tribotecc.at/home2/news/archive/news/ne>, acesso em: 04/12/2017.

Uyyuru, R.K., Surappa, M.K., Brusethaug, S., Effect of reinforcement volume fraction and size distribution on the tribological behavior of Al-composite/brake pad tribo-couple, **Wear**, vol. 260, ed. 11–12, pp.1248–1255, 2006.

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**, vol. 322–323, pp.251–258, 2015.

Wahlström, J., Olander, L., Olofsson, U., Size, shape, and elemental composition of airborne wear particles from disc brake materials, **Tribology Letters**, vol. 38, ed. 1, pp.15–24, 2010.

Walpole, R.E., Myers, R.H., Myers, S.L., **Probability & statistics for engineers & scientists**, 8 ed., 2007.

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**, vol. 294–295, pp.305–312, 2012.

Yun, R., Filip, P., Lu, Y., Performance and evaluation of eco-friendly brake friction materials, **Tribology International**, vol. 43, ed. 11, pp.2010–2019, 2010.

APÊNDICE A – ATRITO MÉDIO, INICIAL E FINAL DE CADA FRENAGEM DOS ENSAIOS.

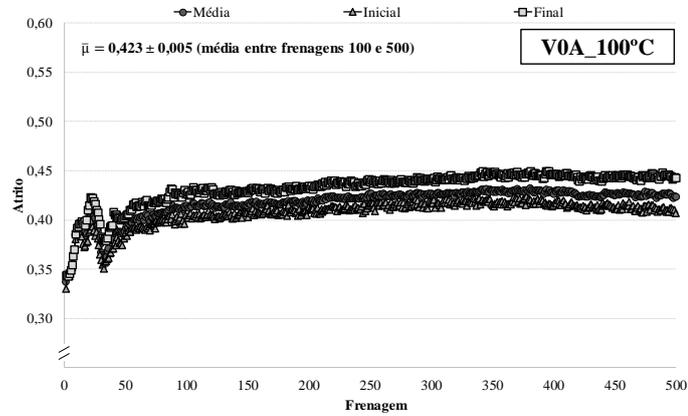


Figura A.1 - Coeficientes de atrito do ensaio V0A_100°C.

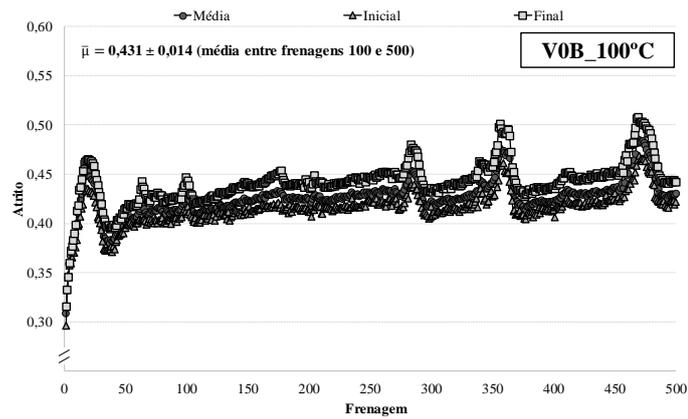


Figura A.2 - Coeficientes de atrito do ensaio V0B_100°C.

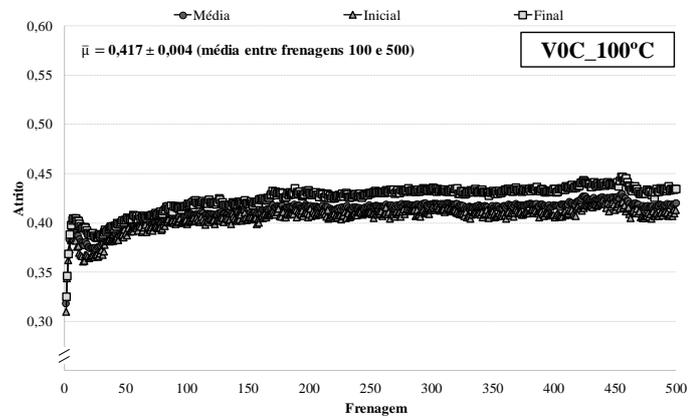


Figura A.3 - Coeficientes de atrito do ensaio V0C_100°C.

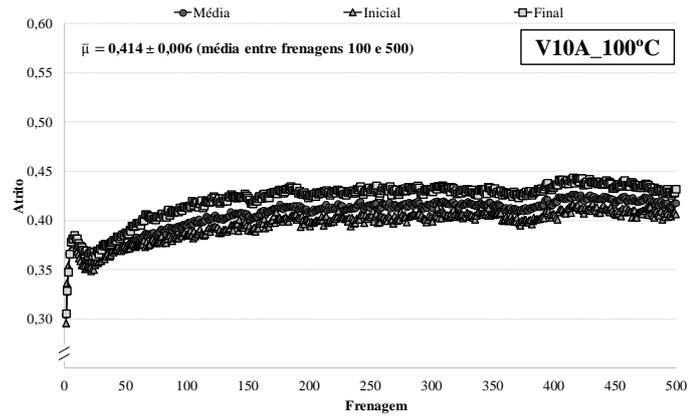


Figura A.4 - Coeficientes de atrito do ensaio V10A_100°C.

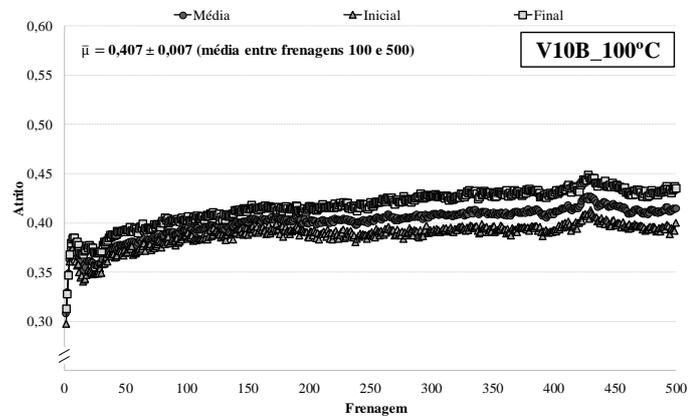


Figura A.5 - Coeficientes de atrito do ensaio V10B_100°C.

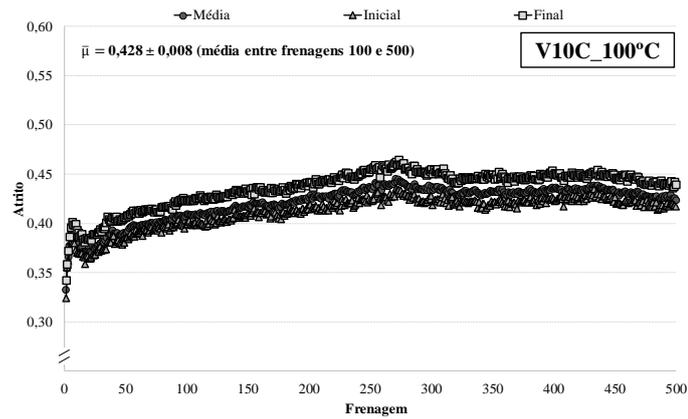


Figura A.6 - Coeficientes de atrito do ensaio V10C_100°C.

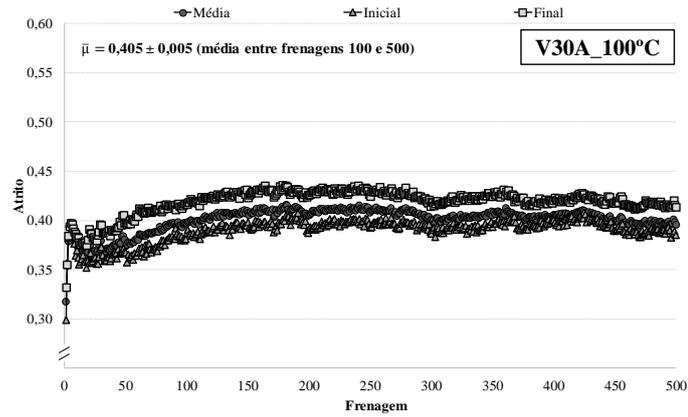


Figura A.7 - Coeficientes de atrito do ensaio V30A_100°C.

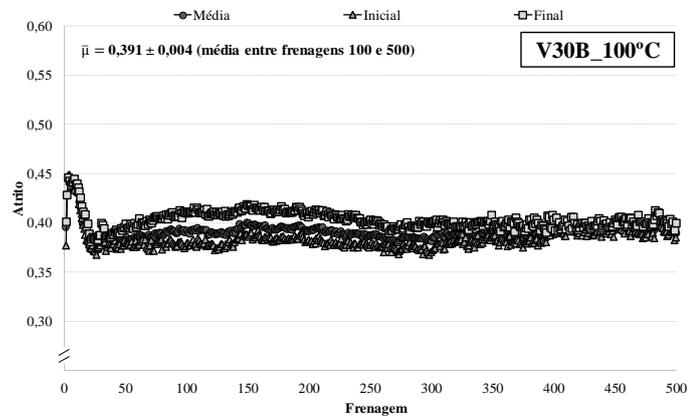


Figura A.8 - Coeficientes de atrito do ensaio V30B_100°C.

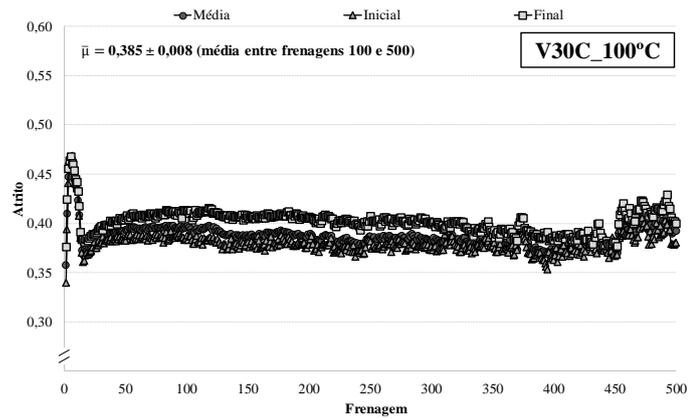


Figura A.9 - Coeficientes de atrito do ensaio V30C_100°C.

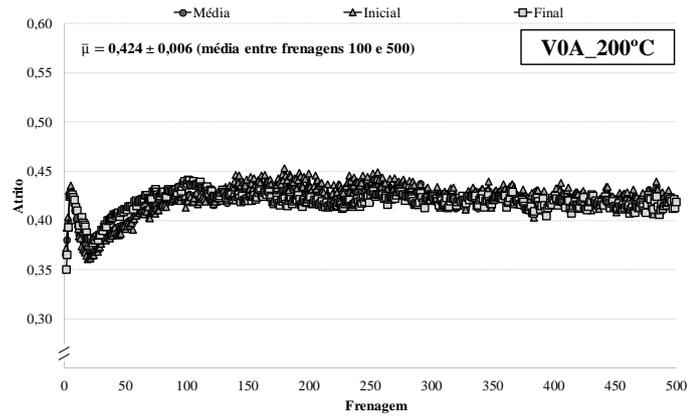


Figura A.10 - Coeficientes de atrito do ensaio V0A_200°C.

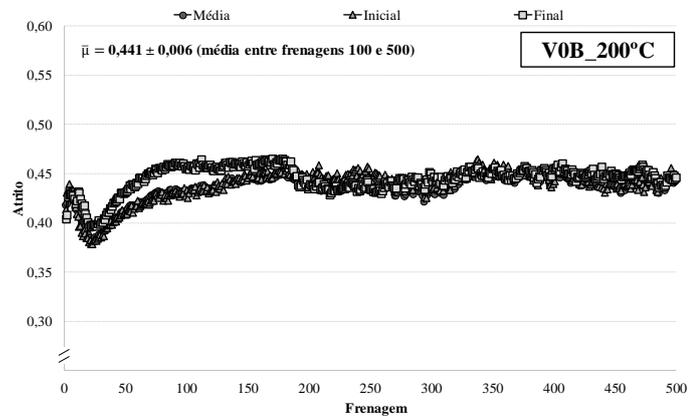


Figura A.11 - Coeficientes de atrito do ensaio V0B_200°C.

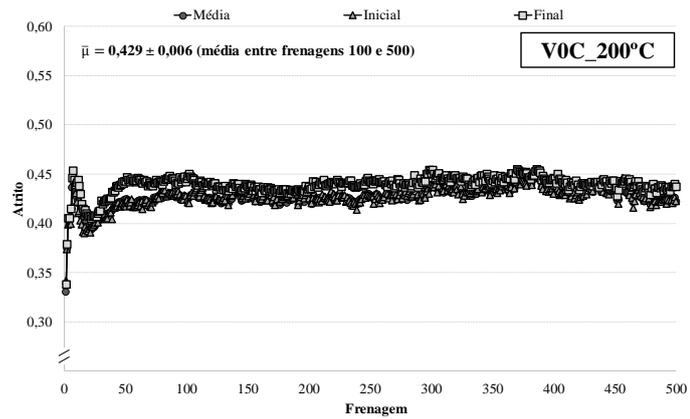


Figura A.12 - Coeficientes de atrito do ensaio V0C_200°C.

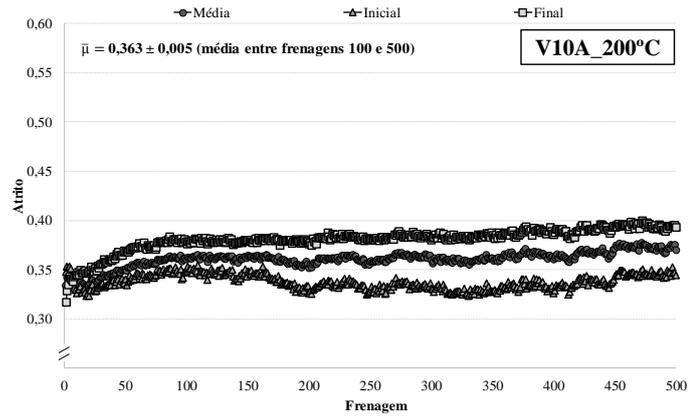


Figura A.13 - Coeficientes de atrito do ensaio V10A_200°C.

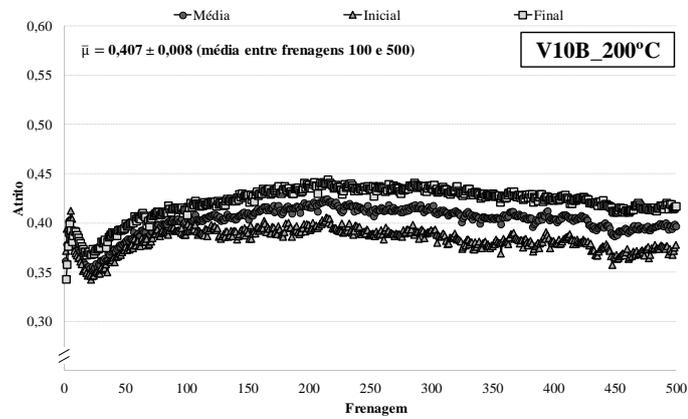


Figura A.14 - Coeficientes de atrito do ensaio V10B_200°C.

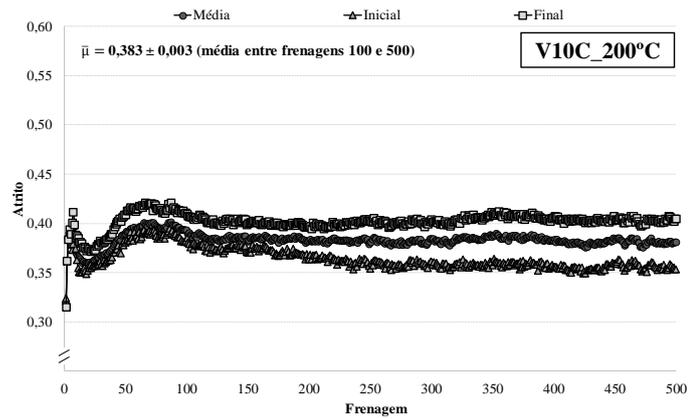


Figura A.15 - Coeficientes de atrito do ensaio V10C_200°C.

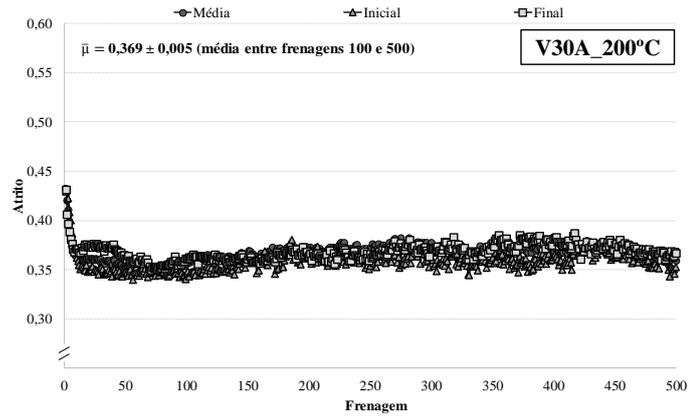


Figura A.16 - Coeficientes de atrito do ensaio V30A_200°C.

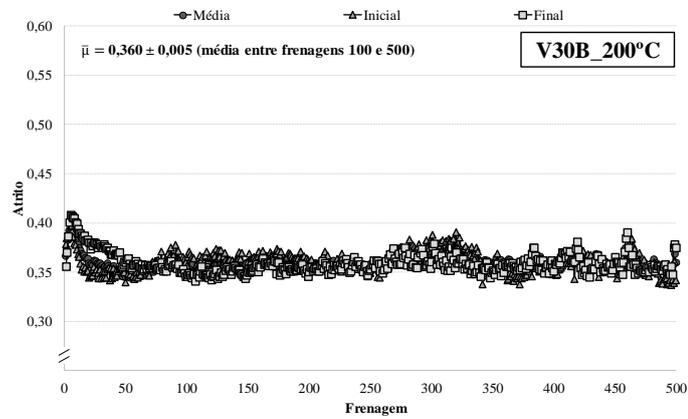


Figura A.17 - Coeficientes de atrito do ensaio V30B_200°C.

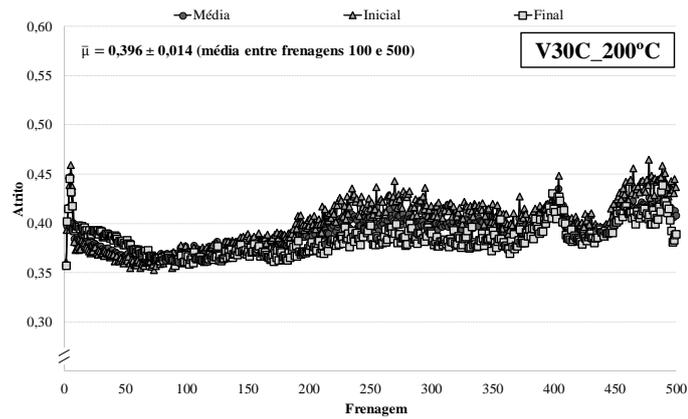


Figura A.18 - Coeficientes de atrito do ensaio V30C_200°C.

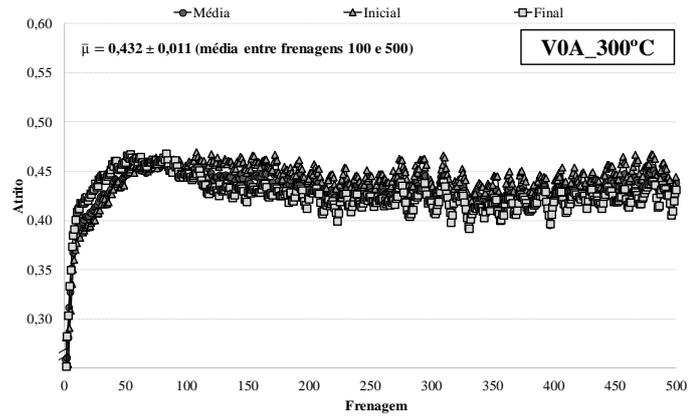


Figura A.19 - Coeficientes de atrito do ensaio V0A_300°C.

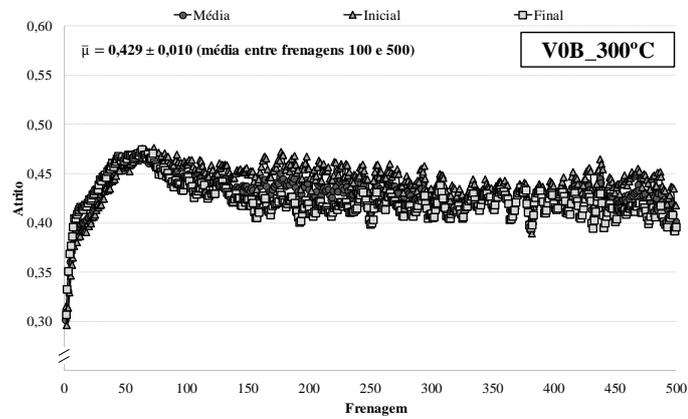


Figura A.20 - Coeficientes de atrito do ensaio V0B_300°C.

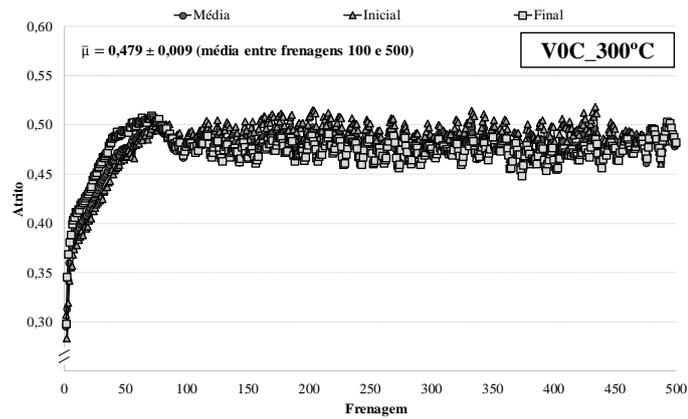


Figura A.21 - Coeficientes de atrito do ensaio V0C_300°C.

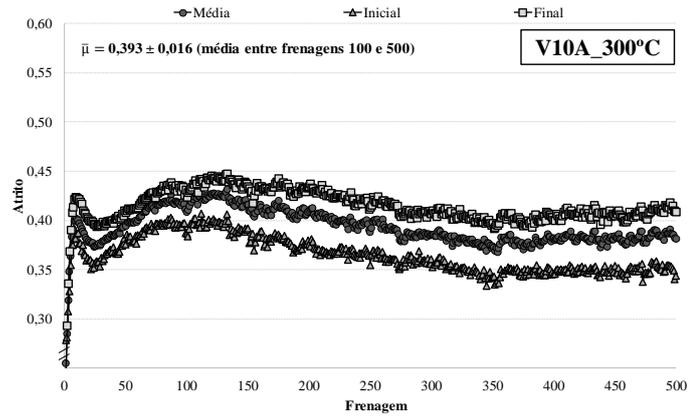


Figura A.22 - Coeficientes de atrito do ensaio V10A_300°C.

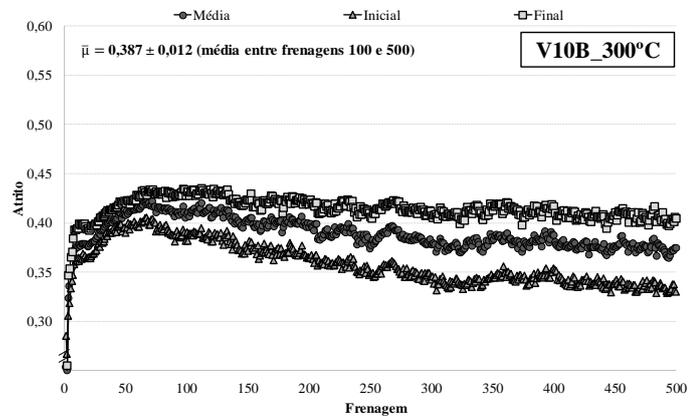


Figura A.23 - Coeficientes de atrito do ensaio V10B_300°C.

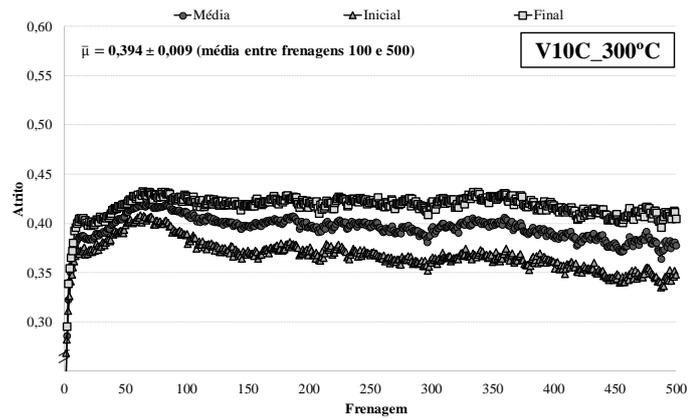


Figura A.24 - Coeficientes de atrito do ensaio V10C_300°C.

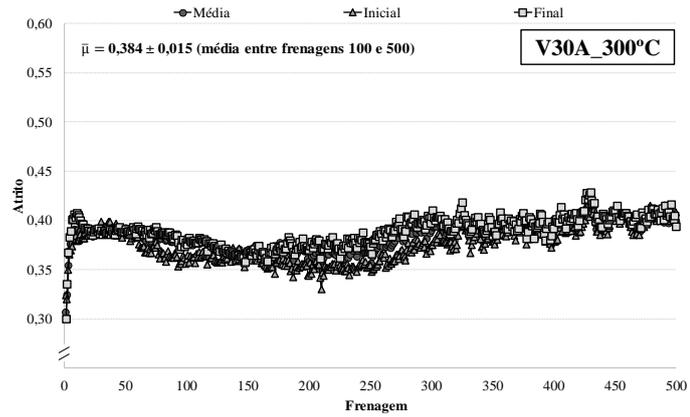


Figura A.25 - Coeficientes de atrito do ensaio V30A_300°C.

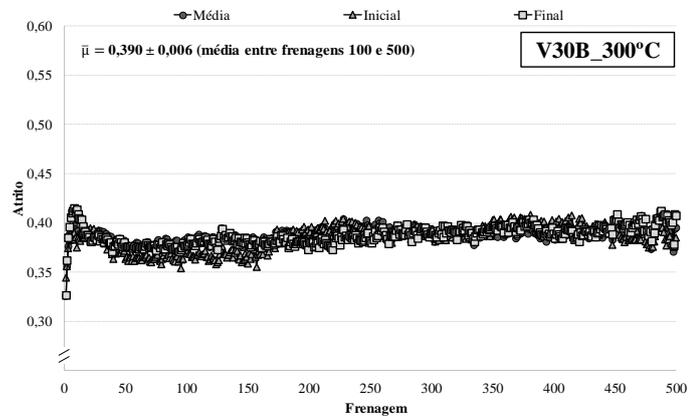


Figura A.26 - Coeficientes de atrito do ensaio V30B_300°C

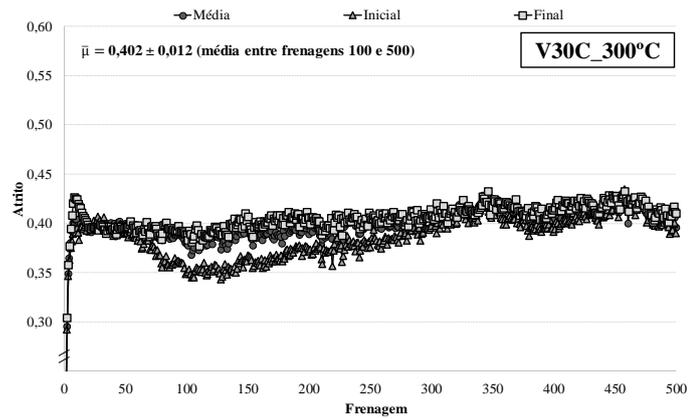


Figura A.27 - Coeficientes de atrito do ensaio V30C_300°C.

APÊNDICE B – MICROSCOPIAS EM TONS DE CINZA E BINARIZAÇÃO DAS PASTILHAS ATRAVÉS DO ALGORITMO DE OTSU

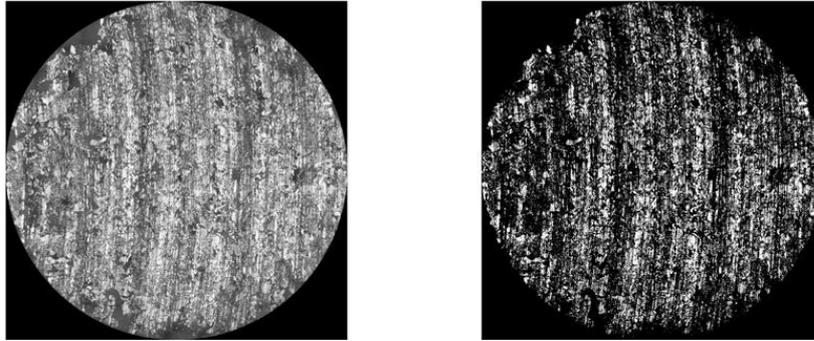


Figura B.1 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V0A_100°C.

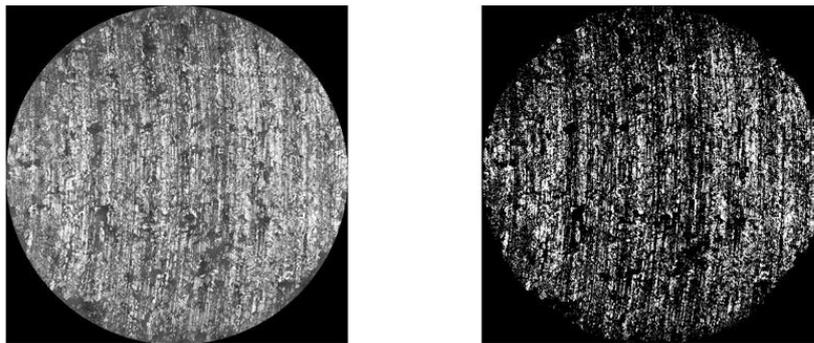


Figura B.2 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V0B_100°C.

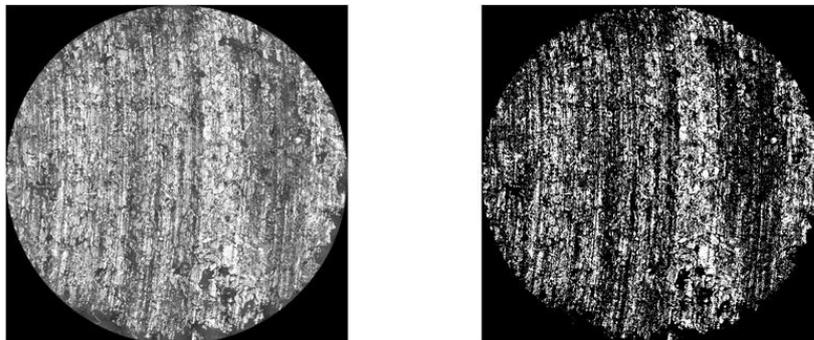


Figura B.3 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V0C_100°C.

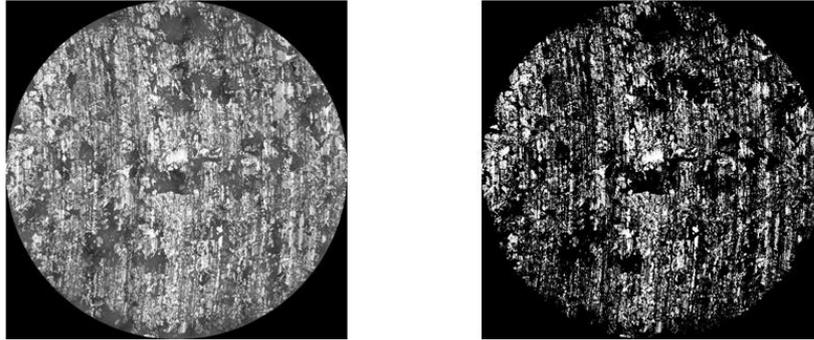


Figura B.4 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V10A_100°C.

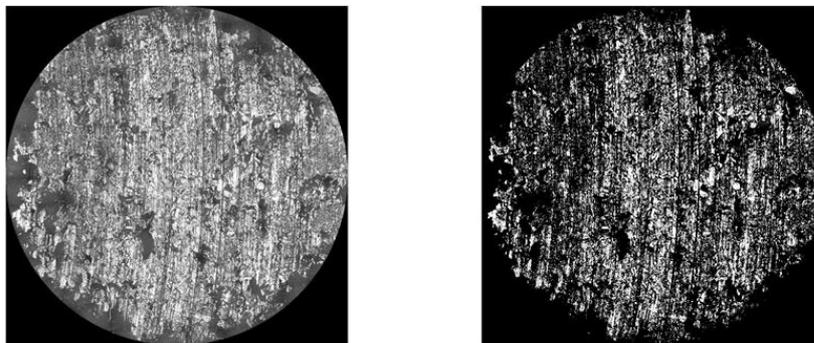


Figura B.5 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V10B_100°C.

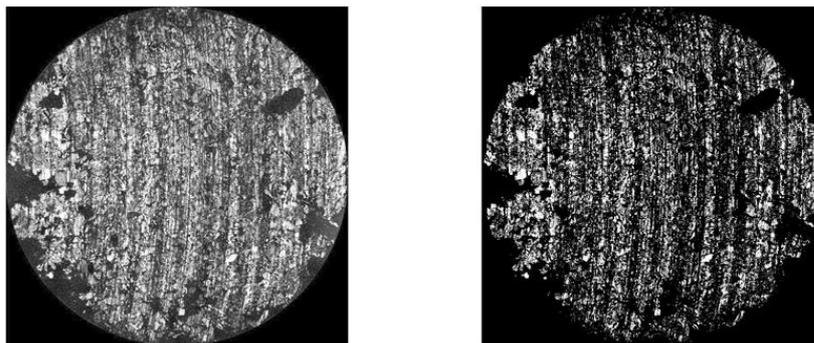


Figura B.6 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V10C_100°C.

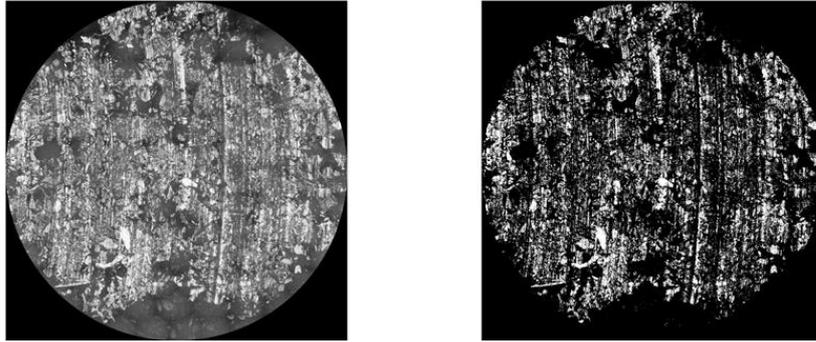


Figura B.7 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V30A _100°C.

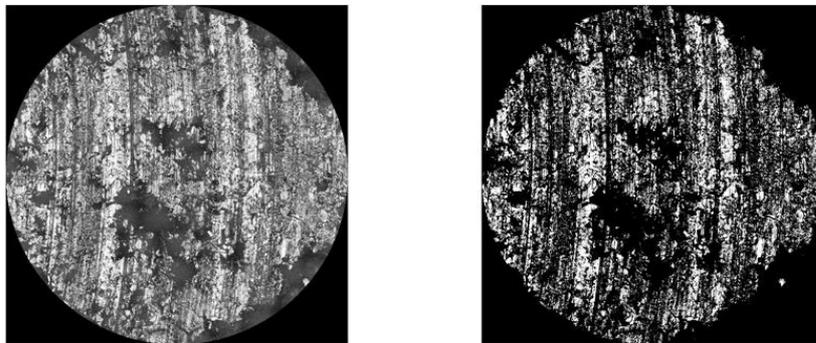


Figura B.8 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V30B _100°C.

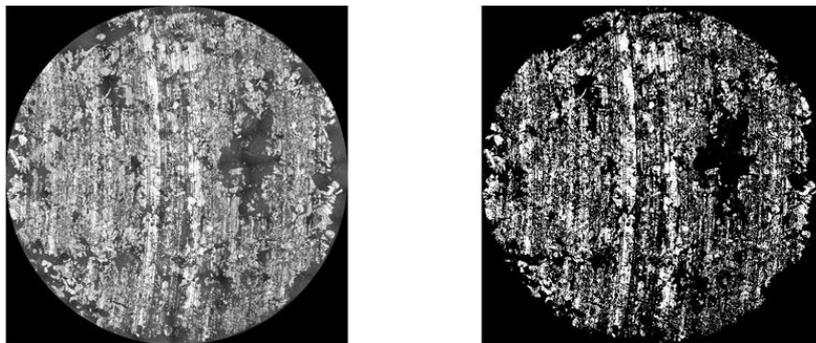


Figura B.9 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V30C _100°C.

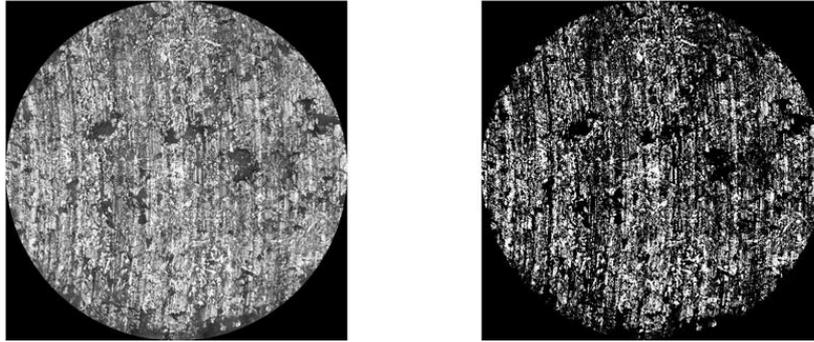


Figura B.10 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V0A _200°C.

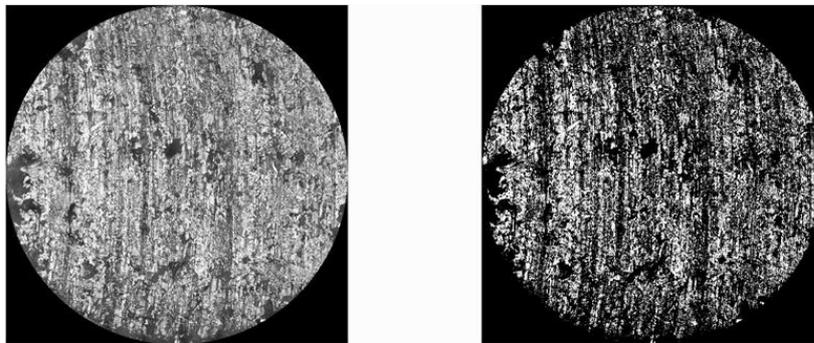


Figura B.11 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V0B _200°C.

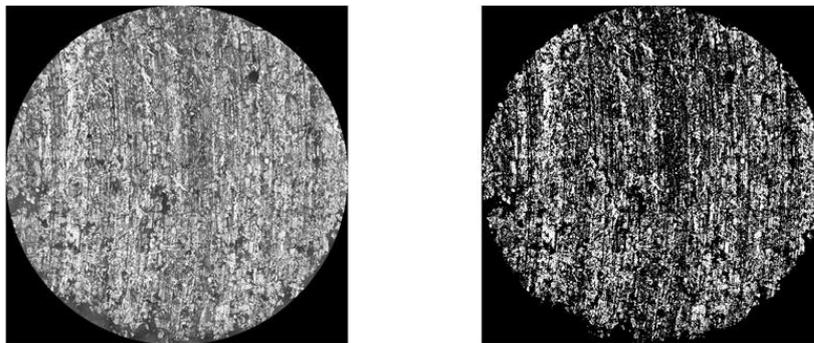


Figura B.12 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V0C _200°C.

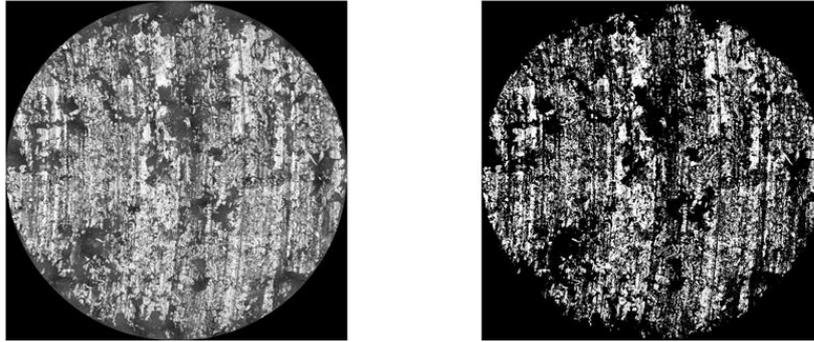


Figura B.13 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V10A _200°C.

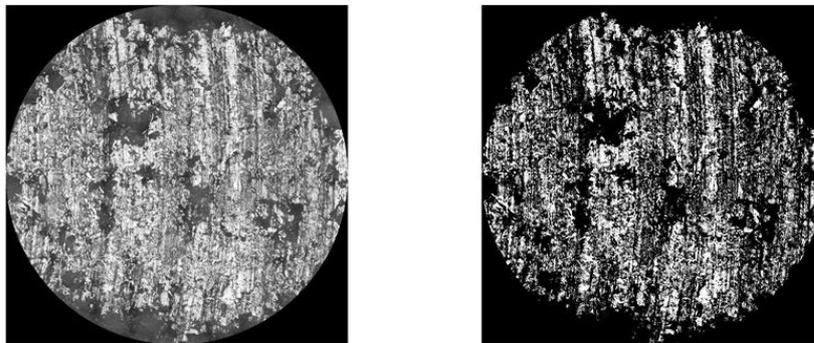


Figura B.14 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V10B _200°C.

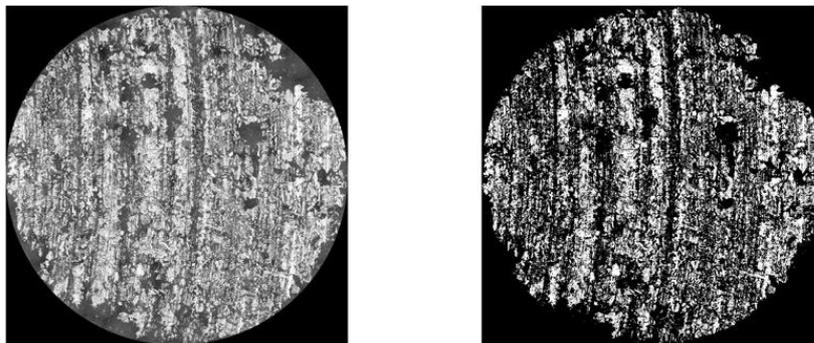


Figura B.15 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V10C _200°C.

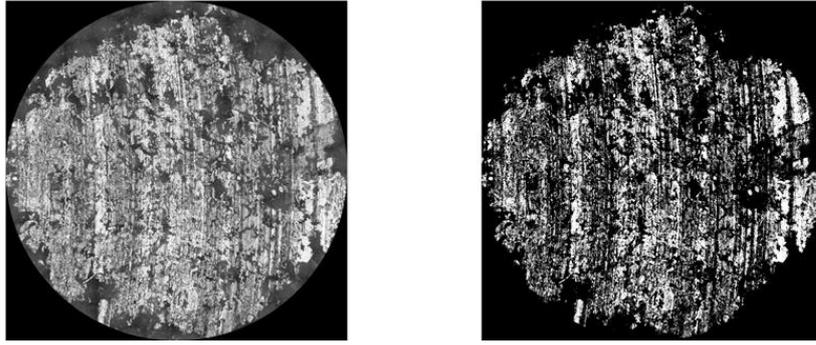


Figura B.16 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V30A _200°C.

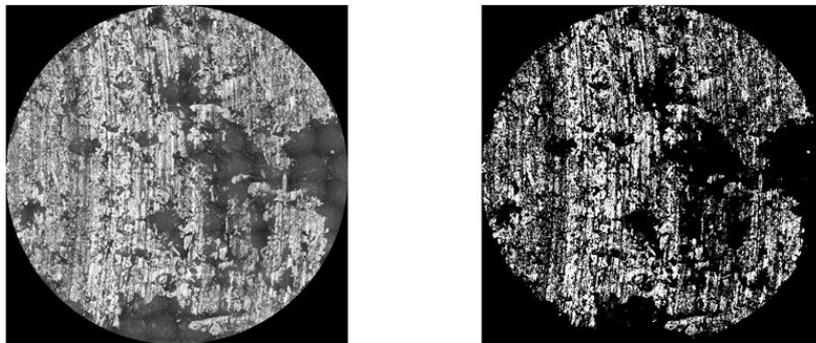


Figura B.17 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V30B _200°C.

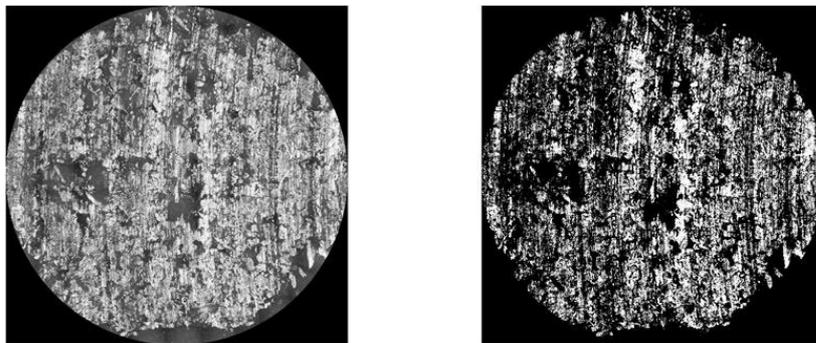


Figura B.18 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V30C _200°C.

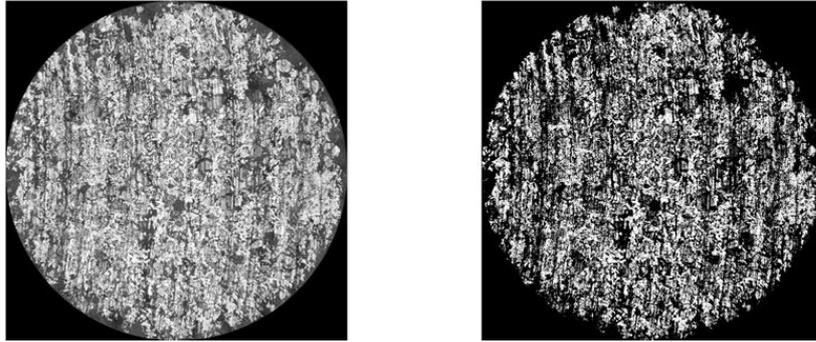


Figura B.19 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V0A _300°C.

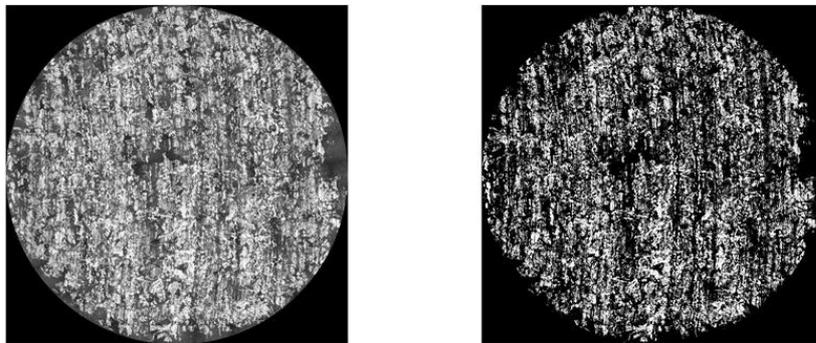


Figura B.20 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V0B _300°C.

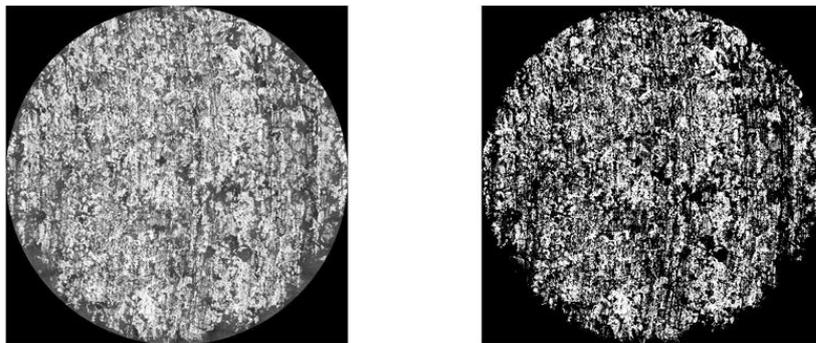


Figura B.21 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V0C _300°C.

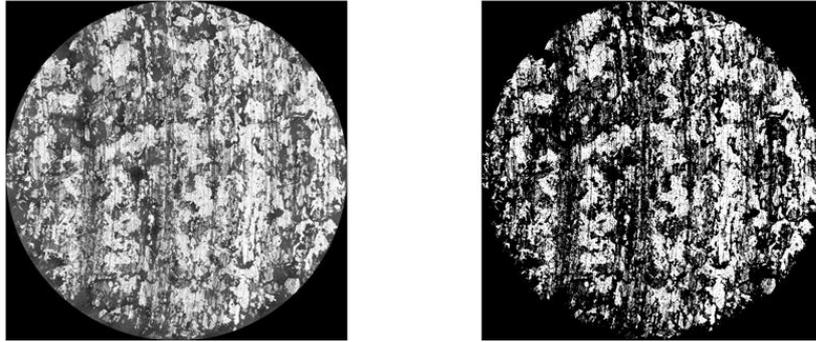


Figura B.22 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V10A _300°C.

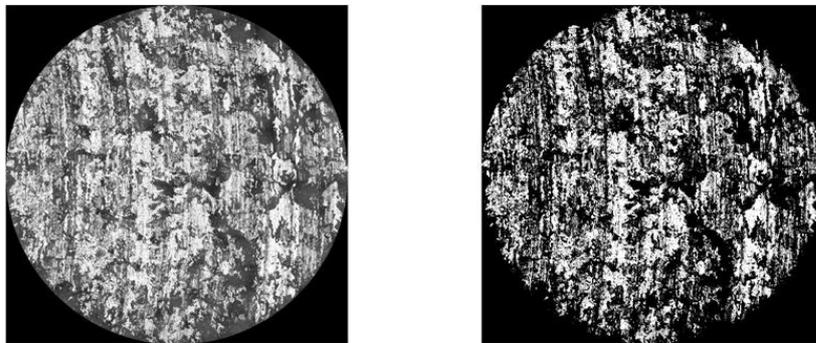


Figura B.23 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V10B _300°C.

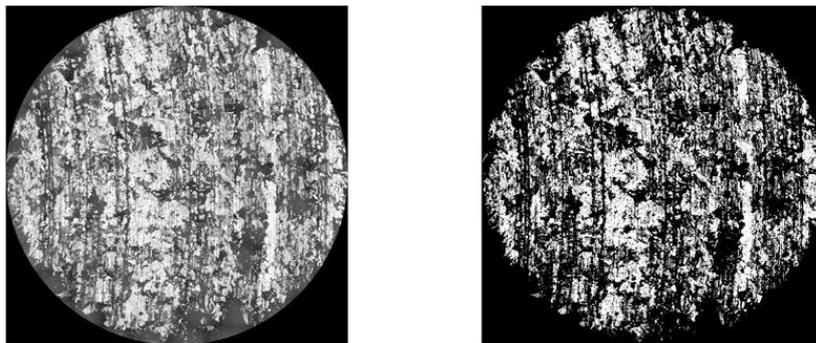


Figura B.24 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V10C _300°C.

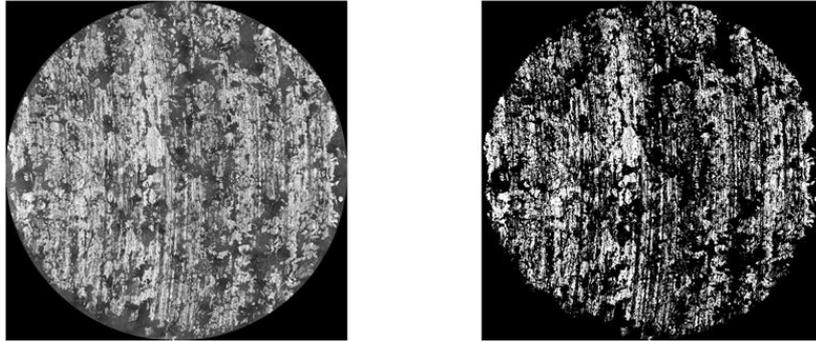


Figura B.25 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V30A _300°C.

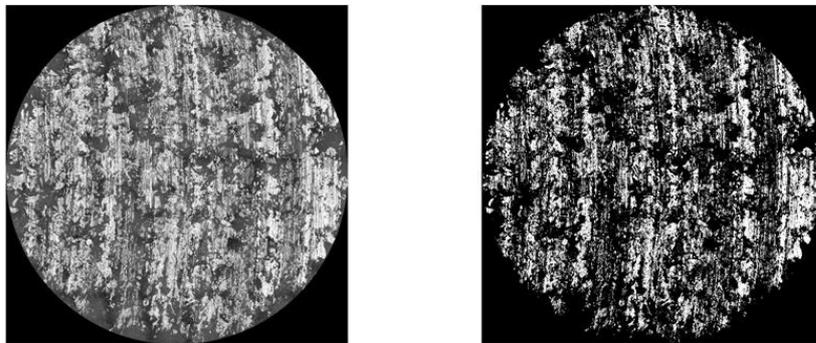


Figura B.26 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V30B _300°C.

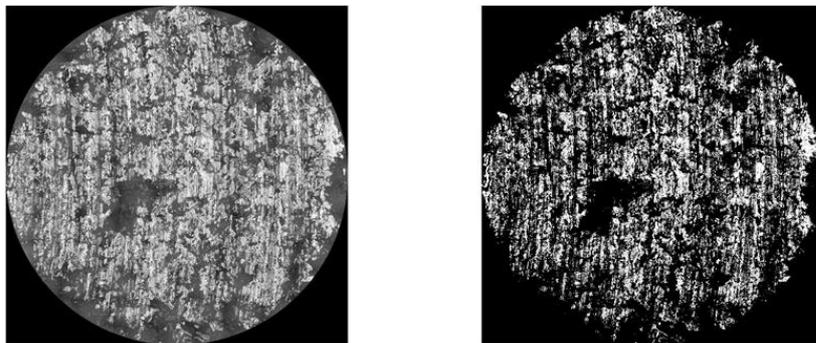


Figura B.27 – Microscopia em tons de cinza (esquerda) e binarização da imagem através da aplicação do método de Otsu (direita) do ensaio V30C _300°C.