

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

ESTUDO DA TRANSIÇÃO DO REGIME DE DESGASTE DE MATERIAIS DE FRICÇÃO
APLICADOS A FREIOS AUTOMOTIVOS

Por

Liu Yesukai de Barros

Tese para obtenção do Título de
Doutor em Engenharia

Porto Alegre, Maio de 2022

ESTUDO DA TRANSIÇÃO DO REGIME DE DESGASTE DE MATERIAIS DE FRICÇÃO
APLICADOS A FREIOS AUTOMOTIVOS

por

Liu Yesukai de Barros
Mestre em Engenharia Mecânica

Tese 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

Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Coorientador: Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Aprovada por:

Prof. Dr. Amílcar Lopes Ramalho.....Universidade de Coimbra

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann.....PPGE3M / UFRGS

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

Prof. Dr. Luciano Tedesco Matozo.....Fras-le SA

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 20 de Maio de 2022

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador professor Ney Francisco Ferreira, pelo incentivo, suporte, amizade e conhecimentos compartilhados ao longo dos anos;

Ao meu coorientador professor Patric Daniel Neis, pela disponibilidade, pelos diversos conselhos e também pela amizade ao longo desta jornada;

Ao colega de pós graduação e grande amigo Jean Carlos Poletto, por toda a ajuda fornecida nestes anos de laboratório;

À equipe do Laboratório de Tribologia (LATRIB), demais colegas de pós graduação e bolsistas que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho;

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

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte na realização deste trabalho;

Ao amor da minha vida, Gisele Machado Bloete, por me apoiar incondicionalmente durante todos estes anos;

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

RESUMO

A transição entre regimes de desgaste (moderado para severo, ou vice-versa) é um fenômeno tribológico observado em diversos materiais. Na literatura, encontram-se trabalhos relatando este fenômeno no contato entre metais, bem como em polímeros. Entretanto, poucos autores abordam esta transição em materiais de fricção empregados em freios automotivos. Para este tipo de material pode-se esperar que uma condição de desgaste severo leve a uma redução significativa da sua vida útil. Esta tese visa avaliar os efeitos de condições operacionais de frenagem (pressão de contato e velocidade de deslizamento) na transição do regime de desgaste em materiais de fricção utilizados em freios automotivos. Diversos experimentos foram realizados no tribômetro do LATRIB (Laboratório de Tribologia da UFRGS), onde atritou-se pastilhas de freio contra discos de ferro fundido cinzento. Uma nova técnica para o monitoramento do filme tribológico depositado sobre o disco durante os testes foi implementada. Foi possível concluir que pressões de contato e velocidades de deslizamento elevadas resultam na transição do regime de desgaste de uma condição moderada para severa. Quando isso ocorre, o coeficiente de atrito sofre um aumento repentino, além de resultar em uma redução abrupta da área dos platôs de contato da pastilha e uma diminuição do filme depositado sobre o disco. No regime de desgaste severo, constatou-se uma maior irregularidade superficial do disco, além de uma dificuldade de formação de magnetita na superfície do disco, sendo este tipo de óxido descrito pela literatura como o principal componente do filme. Também foi constatada uma elevada quantidade de detritos gerados a partir do contato tribológico no regime severo. No regime moderado, por outro lado, poucos detritos foram gerados. Foi constatado que a remoção dos platôs de contato secundários, na qual ocorre devido às elevadas pressões e velocidades, resulta em um contato mais direto entre os platôs primários e o filme. Este contato acaba por remover o filme depositado sobre o disco, levando a um aumento de desgaste de pastilha em função de não haver platôs de contato estáveis entre as diferentes frenagens. Esta tese demonstra que os platôs de contato e o filme tribológico aderido na superfície do disco têm um papel fundamental em evitar a ocorrência de regime severo de desgaste. Assim, sob o ponto de vista da durabilidade (vida útil), a formação e estabilidade dos platôs e do filme tribológico são aspectos importantes a serem considerados no desenvolvimento de novos materiais de fricção.

Palavras-chave: Regime de desgaste; Material de fricção de freio automotivo; Filme tribológico.

ABSTRACT

The transition between wear regimes (moderate to severe, and vice versa) is a tribological phenomenon observed in many materials. In the literature, many studies focus on the transition of wear regime for metals and polymers. However, few authors approach the transition in automotive brake friction materials. For these materials, it could be expected that the severe condition leads to a significant reduction in lifetime of the component. This thesis aims to evaluate the effects of operational brake conditions (contact pressure and sliding velocity) in the transition of wear regime for automotive brake friction materials. Many experiments were carried out on the tribometer of LATRIB (Laboratory of Tribology – UFRGS), on which brake pads were rubbed against a disc made of gray cast iron. A new technique to evaluate the tribological tribofilm deposited on the disc's surface during the experiments was implemented. It was concluded that high contact pressures and sliding velocities leads to a transition in wear regime from moderate to severe condition. When it occurs, a sudden increases of the coefficient of friction with an abrupt reduction of the area of the contact plateaus and a reduction of the tribofilm deposited on the disc's surface is observed. In severe wear regime, it was observed a higher superficial irregularity of the disc and a difficulty in the magnetite formation on the disc's surface. This kind of iron oxide is described by the literature as the main component of the tribofilm. Besides, it was observed a high quantity of debris generate by the tribological contact during the severe wear regime. On the other hand, the moderate wear regime results in just a few debris. It was concluded that the destruction of the secondary plateaus, due the high contact pressures and high sliding velocities, results in a direct contact between the primary plateaus and the tribofilm. This contact leads to a reduction of the tribofilm, resulting in an increase of the pad's wear due the absence of stable secondary plateaus during braking operations. The present thesis shows that the contact plateaus and the tribofilm have a fundamental role to avoid the severe wear regime. Thus, from the point of view of durability (live cycle), the formation and the stability of the plateaus and the tribofilm are important issues to be considerate in the development of new brake friction materials.

Keywords: Wear regime; Automotive brake friction materials; Tribofilm.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo geral.....	3
2.2 Objetivos específicos	3
3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	4
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
4.1 Atrito	6
4.1.1 Breve histórico	6
4.1.2 Equacionamento do atrito	8
4.1.3 Influência das condições de contorno no coeficiente de atrito no contato entre metais 9	
4.1.4 Área real de contato	10
4.1.5 Assentamento.....	11
4.2 Freio automotivo	12
4.2.1 Sistemas de freio	12
4.2.2 Distribuição de pressão entre rotor e material de fricção	14
4.2.3 Materiais de fricção	15
4.2.4 Platôs de contato	16
4.2.5 Filme	21
4.3 Tipos de desgaste	28
4.3.1 Desgaste adesivo.....	29
4.3.2 Desgaste abrasivo	30
4.3.3 Desgaste triboquímico	32
4.3.4 Fadiga de contato	36
4.4 Desgaste em materiais de fricção	37
4.5 Transição de regimes de desgaste	39
5. CONTRIBUIÇÃO DA TESE	49
6. MATERIAIS E MÉTODOS	50

6.1	Tribômetro.....	50
6.2	Material de fricção e disco	52
6.3	Desgaste dos pinos	55
6.4	Coleta dos detritos.....	56
6.5	Análise de superfície	57
6.5.1	Microscopias da superfície das pastilhas e morfologia dos platôs de contato.....	57
6.5.2	Imagens da superfície dos discos e quantificação do filme	58
6.5.3	Interferometria	61
6.5.4	Rugosidade.....	62
6.5.5	Microscopia dos detritos	63
6.5.6	Raman	63
6.5.7	MEV - EDS.....	63
6.5.8	Análise termogravimétrica das pastilhas	64
6.6	Experimentos no Tribômetro	64
7.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	65
7.1	Caracterização dos materiais.....	66
7.1.1	Dureza dos discos	66
7.1.2	Microestrutura dos discos	66
7.1.3	TGA das pastilhas	68
7.2	Efeito da pressão na transição do regime de desgaste.....	70
7.2.1	Parâmetros de ensaio	70
7.2.2	Atrito e desgaste.....	71
7.2.3	Análise qualitativa dos platôs de contato e do filme no disco	73
7.2.4	Análise quantitativa dos platôs de contato e do filme no disco	76
7.2.5	Conclusões parciais.....	81
7.3	Efeitos da velocidade de deslizamento e da pressão de contato crescente e decrescente na transição de regime de desgaste.....	81
7.3.1	Parâmetros de ensaio	81
7.3.2	Relações entre atrito, temperatura final de disco, desgaste de pastilha, filme e percentual de área dos platôs de contato	82
7.3.3	Homogeneidade radial do filme no disco	92
7.3.4	Conclusões parciais.....	95
7.4	Efeitos dos regimes de desgaste nas superfícies de discos, pastilhas e detritos.....	95

7.4.1	Parâmetros de ensaio	95
7.4.2	Atrito e desgaste.....	97
7.4.3	Análise dos discos.....	100
7.4.3.1	Interferometria de disco	100
7.4.3.2	Rugosidade de disco	101
7.4.3.3	Fotografia, MEV e EDS de discos.....	103
7.4.3.4	Raman de disco.....	104
7.4.4	Análise das pastilhas	107
7.4.4.1	Quantificação dos platôs de contato	107
7.4.4.2	MEV das pastilhas	108
7.4.4.3	Interferometria de pastilha	109
7.4.4.4	Raman de pastilha.....	111
7.4.5	Análise dos detritos.....	114
7.4.5.1	Visualização dos detritos	114
7.4.5.2	Raman dos detritos.....	117
7.4.6	Conclusões parciais.....	118
7.5	Discussão	118
8.	CONCLUSÕES	123
9.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	126
	REFERÊNCIAS	127
	APÊNDICE A Estudo preliminar	134

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1	Transporte de uma estátua egípcia. Desenho datado de aproximadamente 1880 a.C., encontrado na tumba de Djehutihotep. [Adaptado: Mang, 2014].....	6
Figura 4.2	Rascunhos dos experimentos tribológicos de Leonardo Da Vinci (1452 – 1519): a) blocos sobre planos com diversas inclinações, b) bloco sendo arrastado por peso morto através de uma polia e c) blocos com diferentes orientações em uma superfície plana [Adaptado: Hutchings, 2016].....	7
Figura 4.3	Curvas típicas da influência da pressão de contato no coeficiente de atrito de metais: a) contato livre de contaminantes, b) contato com contaminantes e c) contato com óxidos frágeis [Adaptado: Ludema, 1996].....	10
Figura 4.4	Esquema mostrando a área real de contato entre dois corpos [Adaptado: Menezes et al., 2013].....	11
Figura 4.5	Curvas típicas de assentamento do coeficiente de atrito ao longo do tempo [Adaptado: Blau, 2005].....	12
Figura 4.6	Esquema do sistema de freio a disco [Adaptado: Eriksson e Jacobson, 2000]....	13
Figura 4.7	Esquema do sistema de freio a tambor do tipo simplex [Adaptado: Limpert, 1999].	13
Figura 4.8	Filme mostrando a distribuição de pressão no contato entre disco e pastilha de freio [Adaptado: Bakar et al., 2006a].....	14
Figura 4.9	Análise em elementos finitos mostrando a distribuição de pressão na pastilha durante contato com disco [Adaptado: Söderberg e Andersson, 2009].....	15
Figura 4.10	Esquemática dos platôs de contato: platôs primários (coloração mais clara) e platôs secundários (coloração mais escura). A seta indica o movimento relativo entre a pastilha e o disco [Adaptado: Eriksson, 2000].....	16
Figura 4.11	Platôs de contato tipo I e tipo II (Adaptado: Neis et al., 2017b).....	17
Figura 4.12	Microscopia ótica da superfície de um material de fricção, mostrando os platôs primários (regiões claras) e platôs secundários (regiões cinzas) [Adaptado: Masotti et al., 2015].....	18

Figura 4.13	Microscopia eletrônica de varredura de um material de fricção, mostrando os platôs primários (regiões claras) e platôs secundários (regiões cinzas) [Adaptado: Nogueira et al., 2020a].....	19
Figura 4.14	Microscopia ótica dos platôs de contato em diferentes carregamentos [Adaptado: Yoon et al., 2012].....	19
Figura 4.15	Microscopia eletrônica de varredura de uma seção de corte de uma pastilha de freio após ser atritada contra discos de diferentes rugosidades Ra: a) 5 μm , b) 0,1 μm e c) 0,04 μm [Adaptado: Federici et al., 2016].....	20
Figura 4.16	Microscopia eletrônica de varredura da superfície do material de fricção: a) após experimentos e b) após aplicação de jato de ar comprimido [Adaptado: Bettge e Starcevic, 2003].....	21
Figura 4.17	Filme depositado sobre o disco de freio de um veículo.....	22
Figura 4.18	Análise da espessura do filme: a) MEV na seção cortada de um disco em um dos experimentos e b) correlação entre espessura medida e resistência elétrica [Adaptado: Cho et al., 2005].....	23
Figura 4.19	Interface tribológica: a) microscopia ótica e b) MEV [Adaptado: Österle et al., 2009].....	24
Figura 4.20	Coefficiente de atrito em baixa e alta velocidade de deslizamento após assentamento curto e longo [Adaptado: Hinrichs et al., 2011a].....	26
Figura 4.21	Evolução do filme depositado sobre o disco ao longo de diversas frenagens para materiais de fricção do tipo NAO e SM [Adaptado: Barros et al., 2016].....	27
Figura 4.22	Esquema mostrando os quatro principais mecanismos de desgaste [Adaptado: Gahr, 1987].....	29
Figura 4.23	Microscopia eletrônica de varredura mostrando adesão de uma superfície de um corpo de aço austenítico AISI 316L quando atritado contra um corpo de mesmo material [Adaptado: Saravanan et al., 2017].....	30
Figura 4.24	Esquema do desgaste abrasivo através do: a) contato a dois corpos de uma superfície sobre a outra ou com partícula abrasiva engastada em uma das superfícies e b) contato a três corpos [Adaptado: Bhushan, 2013].....	31

Figura 4.25	Microscopia eletrônica de varredura mostrando a abrasão em uma superfície de aço ferramenta, produzida em um ensaio de microabrasão [Adaptado: Trezona et al., 1999].....	32
Figura 4.26	Mecanismos envolvidos no desgaste tribo-oxidativo [Adaptado: Gahr, 1987].	33
Figura 4.27	Formação da mistura de óxidos com detritos metálicos: a) detrito metálico arrancado devido ao contato adesivo e b) óxido incorporado ao detrito metálico [Adaptado: Stachowiak e Batchelor, 2005].....	34
Figura 4.28	Esquema mostrando a rápida oxidação de uma superfície metálica em altas temperaturas de contato [Adaptado: Stachowiak e Batchelor, 2005].	35
Figura 4.29	Microscopia ótica mostrando o desgaste tribo-oxidativo na superfície de um aço AISI H13 após ser atritado contra um pino de aço AISI 4140 [Adaptado: Viáfara e Sinatora, 2009].....	35
Figura 4.30	Esquema mostrando o processo de desgaste devido à fadiga superficial [Adaptado: Stachowiak e Batchelor, 2005].....	36
Figura 4.31	Microscopia eletrônica de varredura mostrando as trincas geradas devido à fadiga em um contato entre um rolo de aço AISI 52100 atritado contra um disco de aço AISI 52100 [Adaptado: Rycerz et al., 2017].....	37
Figura 4.32	Transição do regime de desgaste para um par tribológico metal-metal de aço 0,52% de carbono: a) taxa de desgaste em função do carregamento e b) carga de transição em função da velocidade de deslizamento [Adaptado: Welsh, 1965a].....	40
Figura 4.33	Resultados dos experimentos com discos de dureza alta e baixa: a) atrito e b) desgaste do pino [Adaptado: Viáfara e Sinatora, 2009].....	42
Figura 4.34	Microscopia ótica do disco e do pino e perfil de rugosidade do disco após os ensaios com: a) disco com dureza baixa e b) disco com dureza elevada [Adaptado: Viáfara e Sinatora, 2009].....	42
Figura 4.35	Esquema do aparato bloco no disco [Adaptado: Straffelini e Maines, 2013].....	44
Figura 4.36	Evolução: a) do coeficiente de atrito e b) da temperatura de contato em função da força normal aplicada [Adaptado: Straffelini e Maines, 2013].....	45
Figura 4.37	Taxas de desgaste de: a) pastilha e b) disco em função da força normal. As setas indicam mudança de regime de desgaste [Adaptado: Straffelini e Maines, 2013].....	45

Figura 4.38	Taxa de desgaste do par tribológico em função da força normal e velocidade de deslizamento [Adaptado: Fernandes et al., 2013].....	46
Figura 4.39	Seção transversal do disco após os experimentos mostrando regime de desgaste: a) moderado e b) severo [Adaptado: Fernandes et al., 2013].....	47
Figura 6.1	Tribômetro do LATRIB: a) fotografia digital e b) diagrama esquemático do tribômetro [Adaptado: Pavlak et al., 2017].....	50
Figura 6.2	Par tribológico utilizado nos experimentos: a) disco e b) material de fricção.....	54
Figura 6.3	Sistema para coleção de detritos durante frenagens: a) aparato e b) detalhe do suporte para o filtro.....	56
Figura 6.4	Exemplo de processamento utilizando o LATRIB Pro-AC para pastilhas de freio: a) microscopia em tons de cinza e b) binarização através da aplicação do método (dimensões de cada microscopia: 4,72 mm x 3,98 mm – largura x altura) [Adaptado: Barros et al., 2016].....	58
Figura 6.5	Aparato experimental montado para o registro da superfície atritada do disco utilizando a câmera digital: a) posicionamento da câmera e b) fotografia obtida [Adaptado: Barros et al., 2021].....	59
Figura 6.6	Análise da superfície do disco: a) microscopia e b) trilha atritada a ser analisada, desconsiderando o efeito de borda [Adaptado: Barros et al., 2019b].....	60
Figura 6.7	Exemplo de interferometria de discos: a) região de análise da trilha atritada e b) topografia tridimensional obtida pelo interferômetro [Adaptado: Barros et al., 2019a].....	61
Figura 6.8	Exemplo de interferometria de pastilhas: a) região de análise, b) topografia tridimensional obtida pelo interferômetro.....	62
Figura 7.1	Diagrama da sequência de resultados.....	65
Figura 7.2	Dureza dos discos: a) medições individuais e b) média.....	66
Figura 7.3	Microscopia dos discos: a) disco I e b) disco II. Ampliação de 100 ×.....	67
Figura 7.4	Microscopia dos rotores, evidenciando a estrutura perlítica: a) disco I e b) disco II. Ampliação de 500 ×.....	68
Figura 7.5	TGA e DTG da pastilha de freio em atmosfera de O ₂	69
Figura 7.7	Resultados tribológicos dos materiais CP.1 e CP.2: a) atrito e b) desgaste de pastilha [Adaptado: Barros et al., 2019b].....	72

Figura 7.8	Imagens da superfície das pastilhas e dos discos no regime de desgaste moderado (à esquerda, em cada CP) e severo: a) CP.1 e b) CP.2 [Adaptado: Barros et al., 2019b].....	74
Figura 7.9	Sequência de imagens mostrando a remoção dos platôs de contato na transição do desgaste moderado para severo para a amostra CP.1: a) frenagem 210, b) frenagem 230, c) frenagem 250, d) frenagem 251, e) frenagem 255 e f) frenagem 260 [Adaptado: Barros et al., 2019b].....	75
Figura 7.10	Resultados de atrito, desgaste, intensidade dos pixels do disco e área dos platôs de contato para a amostra CP.1 [Adaptado: Barros et al., 2019b].....	76
Figura 7.11	Microscopia ótica dos platôs de contato para a amostra CP.1 após a etapa de assentamento nas frenagens: a) 1, b) 5, c) 10, d) 30, e) 50 e f) 51.....	78
Figura 7.12	Resultados de atrito, desgaste, intensidade dos pixels do disco e área dos platôs de contato para a amostra CP.2 [Adaptado: Barros et al., 2019b].....	79
Figura 7.13	Microscopia ótica de pastilha mostrando os platôs de contato na pressão de 80 bar: a) frenagem 201, b) frenagem 205 (redução momentânea dos platôs) e c) frenagem 210 (recomposição dos platôs).....	80
Figura 7.15	Resultados dos testes com $v = 6$ m/s: a) Atrito, temperatura final de disco e desgaste de pastilha e b) filme, filme médio e percentual de área dos platôs de contato [Adaptado: Barros et al., 2021].....	83
Figura 7.16	Resultados dos testes com $v = 4$ m/s: a) Atrito, temperatura final de disco e desgaste de pastilha e b) filme, filme médio e percentual de área dos platôs de contato [Adaptado: Barros et al., 2021].....	86
Figura 7.17	Resultados dos testes com $v = 2$ m/s a) Atrito, temperatura final de disco e desgaste de pastilha e b) filme, filme médio e percentual de área dos platôs de contato [Adaptado: Barros et al., 2021].....	86
Figura 7.18	Influência da velocidade de deslizamento no filme médio.....	88
Figura 7.19	Resumo do efeito da a) baixa e b) alta pressão de contato no filme, desgaste de pastilha, atrito e área dos platôs de contato [Adaptado: Barros et al., 2021].....	89
Figura 7.20	Relação entre PV e a) filme médio, b) atrito médio e c) desgaste de pastilha [Adaptado: Barros et al., 2021].....	91
Figura 7.21	Resultados de filme depositado sobre o disco ao longo do raio de deslizamento para cada frenagem do experimento com $v = 6$ m/s [Adaptado: Barros et al., 2021].....	93

Figura 7.22	Resultados de filme depositado sobre o disco ao longo do raio de deslizamento para cada frenagem do experimento com $v = 4$ m/s [Adaptado: Barros et al., 2021].....	93
Figura 7.23	Resultados de filme depositado sobre o disco ao longo do raio de deslizamento para cada frenagem do experimento com $v = 2$ m/s [Adaptado: Barros et al., 2021].....	94
Figura 7.25	Resultados de atrito e intensidade dos pixels do disco para cada pressão aplicada nos experimentos com 2,5 MPa e 4,5 MPa.....	97
Figura 7.26	Desgaste de pastilha normalizado dos experimentos com 2,5 MPa e 4,5 MPa..	99
Figura 7.27	Interferometria dos discos após frenagens: a) região de análise, b) topografia da região de análise no regime de desgaste moderado, c) detalhe topográfico no regime de desgaste moderado, d) topografia da região de análise no regime de desgaste severo e e) detalhe topográfico no regime de desgaste severo.....	100
Figura 7.28	Perfis de rugosidade de disco para os experimentos com 2,5 e 4,5 MPa. A seta indica o maior vale encontrado nos perfis.....	101
Figura 7.29	Parâmetros de rugosidade de discos para os experimentos com 2,5 e 4,5 MPa: a) R_q (rugosidade média quadrática) e b) R_{sk} (assimetria).....	102
Figura 7.30	Imagens da trilha atritada dos discos: a) fotografia no regime moderado, b) fotografia no regime severo, c) microscopia eletrônica de varredura (elétrons retroespalhados) no regime moderado e d), microscopia eletrônica de varredura no regime severo. As marcações indicam os locais de medição do EDS. Ampliação de $50 \times$	103
Figura 7.31	Espectroscopia Raman do disco fora da trilha atritada.....	105
Figura 7.32	Espectroscopia Raman do disco na trilha atritada: a) experimentos com 2,5 e 4,5 MPa e b) referência de padrão de intensidades (Adaptado: Österle e Urban, 2006).....	106
Figura 7.33	Imagens da superfície das pastilhas após os experimentos com: a) regime moderado e b) regime severo.....	107
Figura 7.34	Microscopia eletrônica de varredura (elétrons retroespalhados) da superfície da pastilha: a) regime moderado e b) regime severo. Ampliação de $100 \times$	108
Figura 7.35	Microscopia eletrônica de varredura (elétrons retroespalhados) dos detritos na superfície da pastilha: a) regime moderado e b) regime severo. Ampliação de $500 \times$	109
Figura 7.36	Topografia das pastilhas geradas pelo interferômetro: a) regime moderado e b) regime severo.....	110

Figura 7.37	Parâmetros de rugosidade de pastilhas para os experimentos com 2,5 e 4,5 MPa: Sq (rugosidade média quadrática) e Ssk (assimetria).....	110
Figura 7.38	Local de seleção dos platôs primários: a) 2,5 MPa e b) 4,5 MPa. O círculo central refere-se à área de análise do Raman.....	111
Figura 7.39	Espectroscopia Raman dos platôs primários da pastilha: a) experimentos com 2,5 e 4,5 MPa e b) referência de padrão de intensidades (Adaptado: Xiao et al., 2020)....	112
Figura 7.40	Local de seleção dos platôs secundários: a) 2,5 MPa e b) 4,5 MPa. O círculo central refere-se à área de análise do Raman.....	113
Figura 7.41	Espectroscopia Raman dos platôs secundários da pastilha nos experimentos com 2,5 e 4,5 MPa.....	114
Figura 7.42	Imagens de estereomicroscópio óptico dos detritos coletados em 10 frenagens nos regimes a) moderado e b) severo.....	115
Figura 7.43	Imagens de microscopia ótica dos detritos coletados em 10 frenagens em regimes a) moderado e b) severo.....	116
Figura 7.44	Microscopia eletrônica de varredura dos detritos: a) regime moderado e b) regime severo. Ampliação de 250 \times	116
Figura 7.45	Espectroscopia Raman dos detritos: a) experimentos com 2,5 e 4,5 MPa e b) referência de padrão de intensidades (Adaptado: Ali et al., 2019).....	117
Figura 7.47	Regiões das pastilhas: microscopia eletrônica de varredura (elétrons retroespalhados) dos experimentos com a) 2,5 MPa e b) 4,5 MPa; classificação das regiões dos experimentos com c) 2,5 MPa e d) 4,5 MPa.....	120
Figura 7.48	Sequência de eventos da transição de regime de desgaste: a) regime moderado, b) transição e c) regime severo.....	121
Figura A.1	Resultados de atrito, desgaste e filme para a amostra P.....	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1	Especificações técnicas do tribômetro do LATRIB [Adaptado: Barros et al., 2019a].....	51
Tabela 6.2	Composição da pastilha de freio utilizada.....	52
Tabela 6.3	Propriedades mecânicas do material de fricção utilizado.....	52
Tabela 6.4	Composição dos rotores [SAE International, 2012].....	53
Tabela 7.1	Classificação dos rotores, de acordo com a Norma A247 [Adaptado: ASTM International, 2019].....	67
Tabela 7.2	Parâmetros de ensaio [Adaptado: Barros et al., 2019b].....	71
Tabela 7.3	Parâmetros de ensaio [Barros et al., 2021].....	82
Tabela 7.4	Valores de filme e atrito da última frenagem da etapa de assentamento.....	87
Tabela 7.5	Pressão limite dos experimentos [Adaptado: Barros et al., 2021].	90
Tabela 7.6	Parâmetros de ensaio.....	96
Tabela 7.7	Análise em EDS da trilha atritada dos discos nos ensaios com desgaste moderado e severo.....	104
Tabela A.1	Composição da pastilha de freio P.....	134
Tabela A.2	Parâmetros de ensaio.....	134

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

a.C	Antes de Cristo
DTG	Derivative Thermogravimetry
EDS	<i>Energy-dispersive X-ray spectroscopy</i>
GIXRD	Grazing Incidence X-ray Diffraction
LACER	Laboratório de Materiais Cerâmicos
LAMEF	Laboratório de Metalurgia Física
LAPOL	Laboratório de Materiais Poliméricos
LATRIB	Laboratório de Tribologia
LDSM	Laboratório de Design e Seleção de Materiais
LM	<i>Low-met</i>
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NAO	<i>Non asbestos organic</i>
PPGE3M	Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PROMECA	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
SEDETEC	Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico
SM	Semi-metálico
TGA	<i>Thermogravimetric Analysis</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

Δm	Desgaste do pino em cada conjunto de frenagem [g]
ΔW_N	Desgaste normalizado [g/J]
d	Distância de deslizamento [m]
E	Energia de cada frenagem individual [N.m ou J]
E_t	Energia total de um conjunto de frenagens [N.m ou J]
F_N	Força normal [N]
HB	Dureza Brinell [-]
HV	Dureza Vickers [-]
μ	Coefficiente de atrito [-]
R	Raio deslizante (ou raio efetivo) [m]
R_q	Rugosidade média quadrática [μm]
R_{sk}	Assimetria [-]
S_q	Rugosidade média quadrática de área [μm]
S_{sk}	Assimetria de área [-]

1. INTRODUÇÃO

Freios automotivos são componentes fundamentais para a segurança veicular. Eles funcionam basicamente através do contato do rotor, solidário à roda do veículo, com o material de fricção. Quando estes elementos entram em contato, uma força de atrito é formada, o que gera um torque frenante sobre o eixo e rodas do veículo, resultando na frenagem. Idealmente, um bom material de fricção necessita atender a diversos requisitos, entre eles, um nível de atrito estável sob diversas condições operacionais, baixo peso, baixo ruído e baixo custo de fabricação [Blau, 2001; Ostermeyer e Wilkening, 2013]. Além disso, o desgaste de materiais de fricção deve ser diminuto, reduzindo desta forma custos de reposição, além de reduzir o impacto ambiental. Este último aspecto vem motivando diversos trabalhos recentes [e.g. Yun et al., 2010; Straffelini et al., 2015], que visam à utilização de matérias-primas alternativas, menos poluentes, empregadas na composição de materiais de fricção. O cobre, por exemplo, é um ingrediente largamente utilizado em materiais de fricção. Entretanto, este metal pode ser nocivo ao meio ambiente [State of Washington Department of Ecology, 2012; Rosselot, 2006], levando a agências governamentais internacionais a limitarem sua utilização nesta aplicação nos próximos anos [Lee e Filip, 2013].

Os materiais de fricção utilizados em freios automotivos são compósitos que podem apresentar até 20 matérias-primas distintas em sua formulação [Ostermeyer, 2003; Gilardi et al., 2012]. Além disso, o desgaste de materiais de fricção é um fenômeno complexo, podendo apresentar comportamentos distintos frente a diferentes condições de frenagem. Estudos mostram que o contato entre material de fricção e rotor não é uniforme [Tirovic, 1991; Neis et al., 2010], o que gera uma distribuição irregular de pressão [Tirovic, 1991]. Em outras palavras, regiões localizadas do material de fricção podem estar submetidas a pressões mais elevadas que a pressão nominal aplicada. Consequentemente, diferentes taxas de desgaste podem ocorrer em determinadas regiões do material de fricção durante a frenagem, visto que pressões elevadas podem levar a um aumento do desgaste em materiais de fricção [Straffelini et al., 2004; Yoon et al., 2012].

A literatura reporta a existência de um fenômeno conhecido como transição do regime de desgaste dos materiais. Neste fenômeno ocorre um aumento expressivo na taxa de desgaste do par tribológico quando parâmetros são alterados, ocorrendo a transição de desgaste de uma condição chamada de moderada para severa. Tipicamente, esses parâmetros referem-se à

pressão e à velocidade de escorregamento. Normalmente, os estudos encontrados sobre a transição do regime de desgaste são focados no contato entre aços [Welsh, 1965a; Welsh, 1965b; Eyre e Maynard, 1971; Viáfara e Sinatora, 2009] e polímeros [Neis et al., 2017a; Gehlen et al., 2021], entretanto, são raramente reportados em materiais de fricção.

Um dos poucos estudos que relatam este fenômeno em materiais de fricção é o de Straffelini e Maines, 2013, onde foi observada uma alteração de regime de desgaste com o aumento da pressão de contato. Os autores atribuíram esta transição à degradação da resina fenólica do material de fricção devido à alta temperatura resultante das frenagens. Outro estudo encontrado foi o de Fernandes et al., 2013, que utilizaram diferentes pressões de contato e velocidades de deslizamento com o intuito de verificar sua influência na transição de regime de desgaste de materiais de fricção utilizados em discos de embreagem. Os autores concluíram que condições operacionais (pressão de contato e velocidade de deslizamento) contribuem para a ocorrência da transição do regime de desgaste de moderado para severo.

Entretanto, estes estudos citados não realizaram uma avaliação da superfície do par tribológico durante os experimentos. O filme tribológico depositado sobre o rotor, por exemplo, tem grande influência no desgaste [Jacko et al., 1989], atrito [Jacko et al., 1989; Cristol-Bulthé et al., 2007], ruído e vibração [Österle e Urban, 2006]. Embora existam estudos [e. g., Cho et al., 2005] nos quais é avaliada a quantidade de filme depositado sobre o disco, não foram encontrados na literatura atual estudos direcionados à formação e remoção do filme durante frenagens. Da mesma forma, a evolução durante frenagens dos platôs de contato de materiais de fricção, que podem ser entendidos como a área real de contato entre material de fricção e rotor, é pouco relatada na literatura.

Neste contexto, com intuito de aprofundar o entendimento desta dinâmica no fenômeno da transição do regime de desgaste aplicado a materiais de fricção, o presente trabalho abrange uma grande quantidade de experimentos, onde parâmetros operacionais são variados. Diversas análises são aplicadas nos pares tribológicos, com a intenção de avaliar como a transição do regime de desgaste atua nos corpos. Entre elas, destaca-se a implementação de novas técnicas de avaliação do filme tribológico depositado sobre o disco em diferentes frenagens. Conforme será mostrado ao longo deste trabalho, o filme sofre alterações abruptas quando ocorre a transição do regime de desgaste. Um melhor entendimento neste sentido pode contribuir para o desenvolvimento de materiais de fricção que apresentem atrito mais estável e menor desgaste quando em uso.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente trabalho é compreender e descrever o fenômeno de transição de regime de desgaste em materiais de fricção utilizados em freios automotivos frente às diferentes condições de pressão de contato e velocidades de deslizamento, avaliando suas influências na dinâmica de formação e remoção dos platôs de contato do material de fricção e do filme depositado no rotor durante frenagens.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são listados abaixo:

- Avaliar a influência de parâmetros operacionais (pressão de contato e velocidade de deslizamento) na transição do regime de desgaste.
- Investigar a dinâmica da transição do regime de desgaste em relação aos platôs de contato da superfície da pastilha e no filme tribológico depositado sobre o disco.
- Compreender os efeitos da transição do regime de desgaste no atrito.
- Caracterizar a morfologia dos detritos (debris) gerados nas condições de desgaste moderado e severo, avaliando suas diferenças.
- Caracterizar os tipos de óxido formados sobre o disco de freio, pastilha e detritos nos dois regimes de desgaste.
- Avaliar as diferenças de rugosidade de pastilha e disco nos diferentes regimes de desgaste.

3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

De forma a facilitar o entendimento, este trabalho foi dividido em oito Capítulos, onde a introdução é o primeiro Capítulo, e o objetivo geral e os objetivos específicos desta tese são descritos no Capítulo 2. O Capítulo 3 refere-se a esta organização do texto.

O Capítulo 4 apresenta a revisão bibliográfica sobre o tema. Neste Capítulo, uma breve revisão histórica do atrito é apresentada, seguida de alguns conceitos importantes para o entendimento do trabalho. Um foco maior é dado na revisão de freios automotivos, onde diversos trabalhos relacionados aos materiais de fricção e ao filme tribológico são relatados. Neste Capítulo, também são descritos os diferentes tipos de desgaste comumente classificados na literatura, bem como trabalhos relacionados ao desgaste de materiais de fricção automotivo. Finalmente, neste Capítulo, são apresentados alguns trabalhos relacionados à transição do regime de desgaste aplicado a metais e alguns poucos estudos encontrados na literatura relacionados a materiais de fricção.

No Capítulo 5, é explicitada a contribuição da tese, mostrando a importância deste estudo em um fenômeno ainda pouco relatado na literatura atual.

O Capítulo 6 apresenta as metodologias utilizadas nos diferentes experimentos que foram realizados nesta tese.

No Capítulo 7, são apresentados os resultados dos diversos estudos realizados neste trabalho. Cada estudo é separado por subcapítulos:

- 7.1 Caracterização dos materiais. Neste subcapítulo, uma análise de dureza e microestrutura dos discos é realizada. Além disso, uma análise termogravimétrica das pastilhas é apresentada;
- 7.2 Efeito pressão na transição do regime de desgaste. Neste subcapítulo, é apresentado um primeiro artigo sobre a transição de regime de desgaste publicado em um periódico científico por este autor. Neste artigo, foi avaliada a influência da pressão de contato na transição do regime de desgaste, bem como as alterações observadas em atrito e superfícies de disco e pastilha de freio;
- 7.3 Efeitos da velocidade de deslizamento e da pressão de contato crescente e decrescente na transição de regime de desgaste. O subcapítulo 7.3 apresenta um segundo artigo publicado por este autor em relação ao tema desta tese. Nele, é apresentada a influência da velocidade de deslizamento na transição de regime, bem como a

importância da pressão de contato quando esta é aplicada de forma crescente ou decrescente;

- 7.4 Efeito dos regimes de desgaste nas superfícies de discos, pastilhas e detritos. Este subcapítulo apresenta os resultados de um estudo que visa avaliar as diferenças morfológicas observadas em disco, pastilha e detritos nos dois regimes de desgaste;
- 7.5 Discussões. Aqui, uma discussão geral e comparativa entre os diferentes estudos é apresentada.

As conclusões obtidas neste trabalho são mostradas no Capítulo 8.

Finalmente, o Capítulo 9 apresenta as sugestões para trabalhos futuros.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Atrito

4.1.1 Breve histórico

A palavra “tribologia” é derivada das palavras gregas τρίβω (esfregar, atritar) e λόγος (estudo). A tribologia pode, então, ser entendida como o estudo do atrito. O termo tribologia foi primeiramente utilizado no trabalho de Jost, em 1966, no qual definiu a tribologia como:

“A ciência e a tecnologia de superfícies interativas em movimento relativo e assuntos e práticas associados” [Jost, 1990].

Ao longo da história da civilização, a tribologia sempre esteve ligada ao ser humano de alguma forma. Na pré-história (3500 a.C.), por exemplo, o homem gerava fogo através do atrito entre dois pedaços de madeira [Gahr, 1987; Bartz, 2001]. Há evidências de que, no século XIX a.C., os egípcios já utilizavam conhecimentos tribológicos para mover grandes estátuas de pedra. Uma pintura encontrada na tumba de Djehutihotep (Figura 4.1) mostra um desenho onde diversos escravos são empregados para puxar uma estátua. É possível observar na imagem que há uma pessoa aplicando algum lubrificante líquido na interface entre o solo e o trenó, onde se encontra a estátua, com o objetivo de reduzir o atrito entre as superfícies [Mang, 2014].

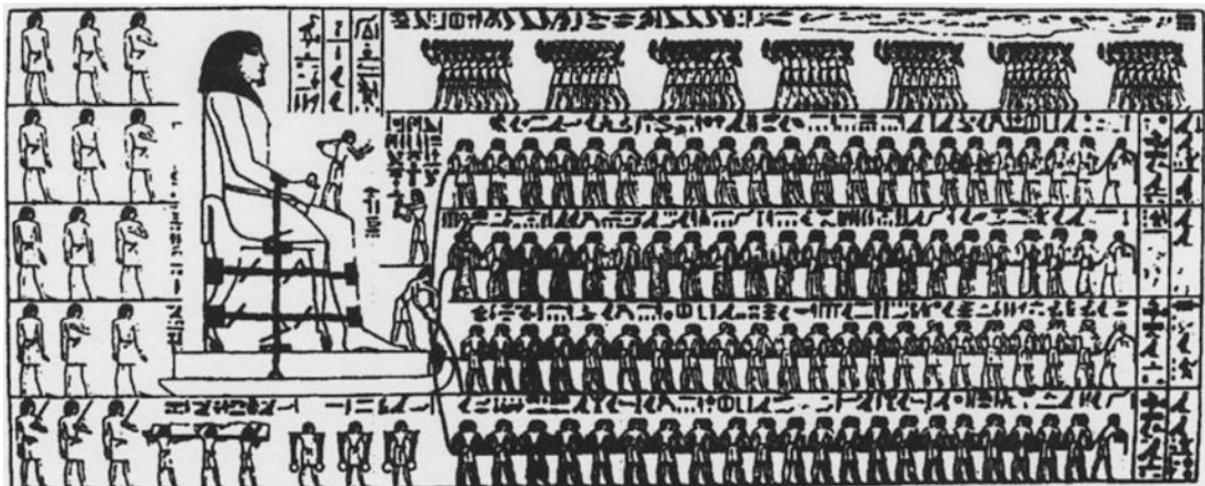


Figura 4.1 – Transporte de uma estátua egípcia. Desenho datado de aproximadamente 1880 a.C., encontrado na tumba de Djehutihotep. [Adaptado: Mang, 2014].

Entretanto, os primeiros estudos científicos sobre o atrito ocorreram apenas no século XVI, por Leonardo Da Vinci (1452 – 1519). Da Vinci mensurou a força de atrito entre objetos através de superfícies horizontais e inclinadas, onde cordas foram utilizadas para ligar os objetos a pesos mortos. A Figura 4.2 mostra alguns rascunhos dos experimentos tribológicos realizados por Da Vinci.

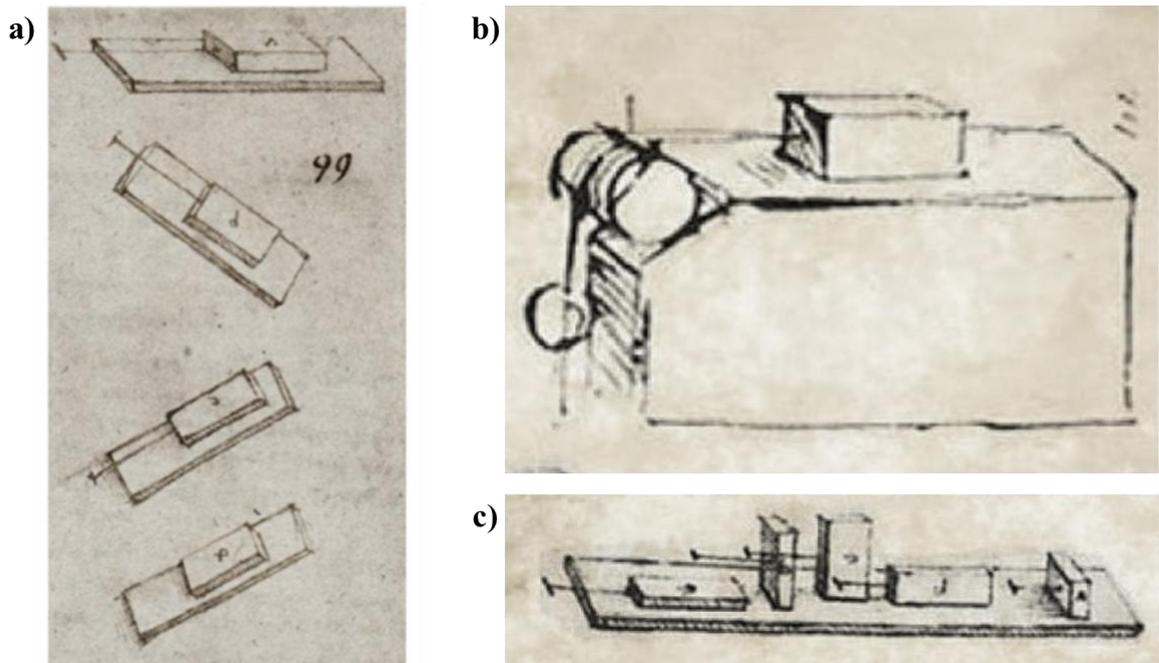


Figura 4.2 – Rascunhos dos experimentos tribológicos de Leonardo Da Vinci (1452 – 1519):
 a) blocos sobre planos com diversas inclinações, b) bloco sendo arrastado por peso morto através de uma polia e c) blocos com diferentes orientações em uma superfície plana
 [Adaptado: Hutchings, 2016].

Através de seus experimentos, Da Vinci observou que a força de atrito é proporcional à força normal aplicada entre dois materiais. Além disso, Da Vinci também observou que a força de atrito é independente da área aparente de contato entre as duas superfícies. É importante salientar que Leonardo Da Vinci não utilizou a expressão “força de atrito”. O conceito de força, definida por Newton 200 anos mais tarde, não era conhecido no período da Renascença [Hutchings, 2016].

Guillaume Amontons (1663 – 1705) chegou a conclusões similares às encontradas por Da Vinci. Outros pesquisadores (Leonhard Euler (1707 – 1783) e Charles-Augustin de

Coulomb (1736 – 1806)) confirmaram as observações obtidas nos experimentos de Da Vinci e Amontons. Historicamente, estas observações foram chamadas de “As três leis do atrito”:

- A força de atrito é diretamente proporcional à carga normal.
- A força de atrito é independente da área aparente de contato.
- A força de atrito é independente da velocidade de deslizamento.

É importante salientar que estas leis empíricas não são leis fundamentais e, muitas vezes, não condizem com o comportamento observado experimentalmente [Menezes et al., 2013]. No caso particular da primeira lei, experimentos evidenciam a proporcionalidade entre força de atrito e carga normal, embora esta relação nem sempre ocorra de forma linear (direta), conforme será mostrado a seguir.

4.1.2 Equacionamento do atrito

Matematicamente, o coeficiente de atrito (ou simplesmente atrito) é uma grandeza adimensional, definido como a razão entre a força de atrito e a força normal, conforme mostrado na Equação 4.1. A força de atrito é a força de resistência que age em um sentido diretamente oposto ao sentido de movimento entre dois corpos. A força normal, por sua vez, é a força que comprime duas superfícies paralelas, e sua direção é perpendicular às superfícies [Menezes et al., 2013].

$$\mu = \frac{F_a}{F_N} \quad (4.1)$$

Onde:

- μ – Coeficiente de atrito [-]
- F_a – Força de atrito [N]
- F_N – Força normal entre as superfícies [N]

Esta Equação corresponde à primeira lei do atrito (proporcionalidade entre força de atrito e força normal). Entretanto, esta lei só é válida caso o coeficiente de atrito seja constante entre duas superfícies em contato. Como será apresentado na sequência, o coeficiente de atrito pode variar em função das condições de contorno aplicadas no sistema tribológico.

4.1.3 Influência das condições de contorno no coeficiente de atrito no contato entre metais

As condições de contorno de um sistema tribológico podem influenciar no valor do coeficiente de atrito. Ludema, 1996, lista algumas destas variáveis e seu impacto no coeficiente de atrito no contato entre metais, conforme apresentado a seguir:

- Velocidade de deslizamento: normalmente se observa uma redução do coeficiente de atrito com o aumento da velocidade de deslizamento. Em velocidades muito elevadas, pode ocorrer a fusão do material, levando a um coeficiente de atrito muito baixo.
- Temperatura: a temperatura geralmente tem pouca influência no coeficiente de atrito entre metais. Entretanto, a partir de certo valor, a temperatura começa a contribuir para a formação de óxidos na superfície (discutido na seção 4.3.3), o que geralmente contribui para a redução do coeficiente de atrito.
- Pressão de contato ou carga aplicada: na Figura 4.3 são mostradas três curvas típicas do comportamento do coeficiente de atrito em função da pressão de contato. A Figura 4.3-a representa o contato entre superfícies limpas, livres de contaminantes, levando a um coeficiente de atrito elevado devido à adesão (discutido em maiores detalhes na seção 4.3.1). Neste caso, observa-se uma leve redução do coeficiente de atrito com o aumento da carga aplicada. Este comportamento do coeficiente de atrito em função da pressão de contato ocorre de forma semelhante na Figura 4.3-b. Esta situação, entretanto, refere-se a superfícies mais usuais, as quais apresentam contaminantes (ou óxidos) nas superfícies. Assim, o coeficiente de atrito fica em um patamar inferior ao apresentado na Figura 4.3-a. Finalmente, a Figura 4.3-c mostra um comportamento semelhante ao apresentado na Figura 4.3-b até uma determinada carga. A partir deste valor, o coeficiente de atrito se eleva. Segundo o autor, este comportamento pode ocorrer quando existem óxidos frágeis na superfície, onde lascas destes óxidos podem expor o substrato do metal, levando a um contato direto entre o par tribológico. Este contato direto leva a

uma propensão à adesão, acarretando um atrito elevado. Existem casos onde os óxidos são dúcteis em tensões compressivas elevadas. Nestes casos, os óxidos atuam como lubrificantes, o que contribui para a redução do coeficiente de atrito.

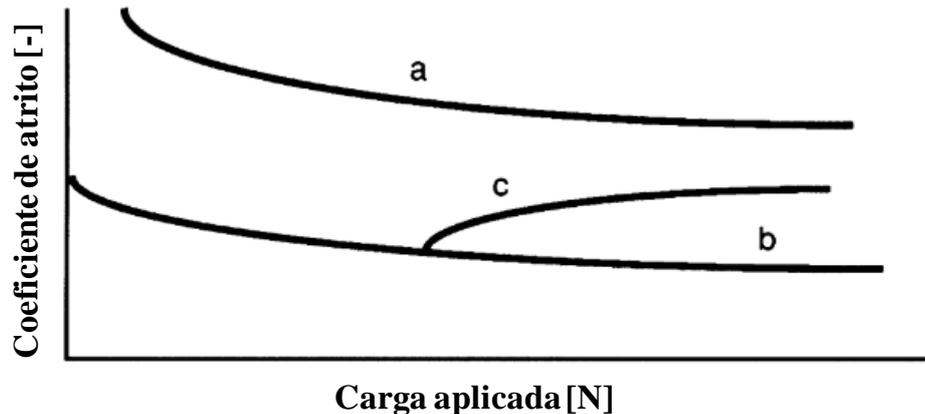


Figura 4.3 – Curvas típicas da influência da pressão de contato no coeficiente de atrito de metais: a) contato livre de contaminantes, b) contato com contaminantes e c) contato com óxidos frágeis [Adaptado: Ludema, 1996].

- **Rugosidade:** No contato a seco entre superfícies metálicas, a rugosidade normalmente não apresenta grande influência no coeficiente de atrito. Em sistemas lubrificados, as superfícies com rugosidade elevada tendem a aumentar o coeficiente de atrito, principalmente quando a espessura do filme de lubrificante é pequena quando comparada com a rugosidade.

4.1.4 Área real de contato

Superfícies aparentemente planas sempre apresentam, em certa escala microscópica, algum nível de asperezas e de irregularidades. Desta forma, dois corpos em contato apresentam, na realidade, contato apenas nas asperezas mais elevadas. A soma da área de todas as asperezas em contato é chamada de área real de contato, a qual representa apenas uma fração da área aparente de contato, conforme mostrado na Figura 4.4.

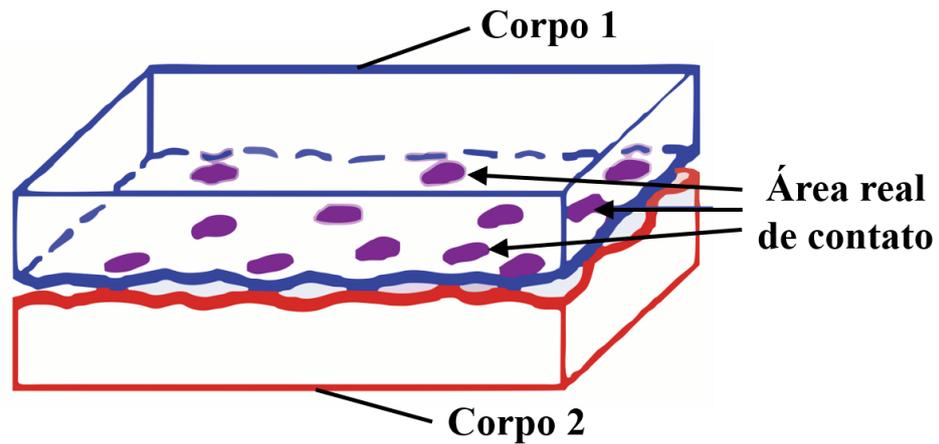


Figura 4.4 – Esquema mostrando a área real de contato entre dois corpos [Adaptado: Menezes et al., 2013].

Normalmente, quanto maior a pressão de contato imposta, maior a área real de contato. Isso ocorre em função da deformação elástica e plástica das asperezas, o que resulta em uma maior tendência de ocorrer adesão entre superfícies metálicas (seção 4.3.1). Isto acarreta atrito e desgaste elevados [Gahr, 1987]. Durante o deslizamento, novas asperezas entram em contato, enquanto outras são destruídas [Buckley, 1981; Bhushan, 2013; Menezes et al., 2013; Mang, 2014].

4.1.5 Assentamento

No início do contato de um par tribológico, observa-se frequentemente um período de assentamento, também conhecido como *running-in*. Neste período, ocorre um comportamento instável no coeficiente de atrito, na temperatura e no desgaste [Blau, 2005]. Normalmente, este período instável é desconsiderado em estudos científicos, ou seja, as análises são realizadas considerando-se apenas o coeficiente de atrito após o assentamento. Nos estudos de Blau, 1981 e Blau, 2005, são relatados comportamentos típicos de assentamento do coeficiente de atrito observados em experimentos tribológicos, conforme mostrado na Figura 4.5.

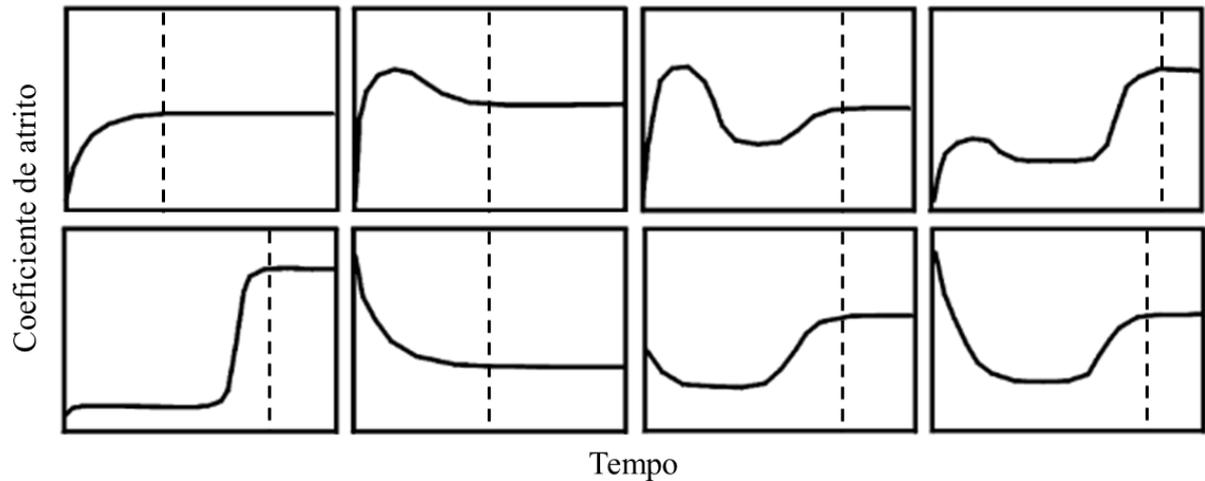


Figura 4.5 – Curvas típicas de assentamento do coeficiente de atrito ao longo do tempo
[Adaptado: Blau, 2005].

Neste trabalho, o autor relata que as curvas de assentamento apresentadas na Figura 4.5 são dependentes de diversos fatores como, por exemplo, o par tribológico, lubrificação, rugosidades das superfícies, distribuição do filme tribológico, pressão de contato, velocidade de deslizamento, etc.

4.2 Freio automotivo

4.2.1 Sistemas de freio

Os sistemas de freio automotivos são sistemas essenciais para a segurança e operação de veículos. Segundo Limpert, 1999, os sistemas de freio apresentam três funções básicas:

- Desacelerar o veículo, incluindo parada total.
- Manter a velocidade do veículo durante descidas.
- Manter o veículo parado.

Estes sistemas funcionam basicamente através do contato entre um elemento fixo (material de fricção) e um rotor (normalmente de ferro fundido cinzento). Este contato gera

uma força de atrito entre os componentes, resultando na frenagem do veículo. Atualmente, os sistemas de freio automotivo mais comuns são divididos em freio a disco e freio a tambor.

No sistema de freio a disco, ilustrado na Figura 4.6, as pastilhas de freio (material de fricção) são posicionadas dos dois lados do disco (solidário às rodas do veículo). Quando o freio é acionado pelo usuário, as pastilhas são pressionadas contra o disco, produzindo assim o torque frenante [Birch, 1998; Limpert, 1999; Halderman e Mitchell, 2004].

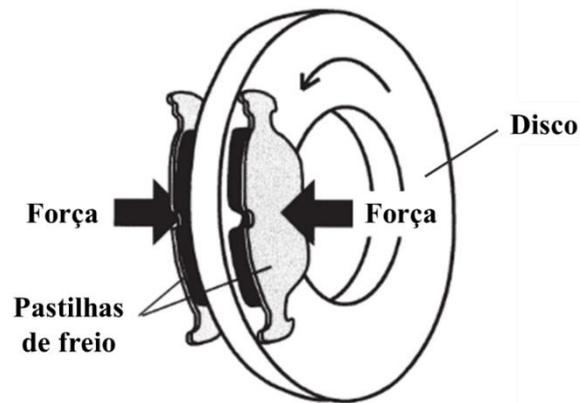


Figura 4.6 – Esquema do sistema de freio a disco [Adaptado: Eriksson e Jacobson, 2000].

Por sua vez, o sistema de freio a tambor funciona basicamente através do acionamento dos materiais de fricção (neste sistema, chamados de lonas) que, por sua vez, são pressionados contra o interior do tambor [Birch, 1998]. A Figura 4.7 ilustra um tipo de sistema de freio a tambor.

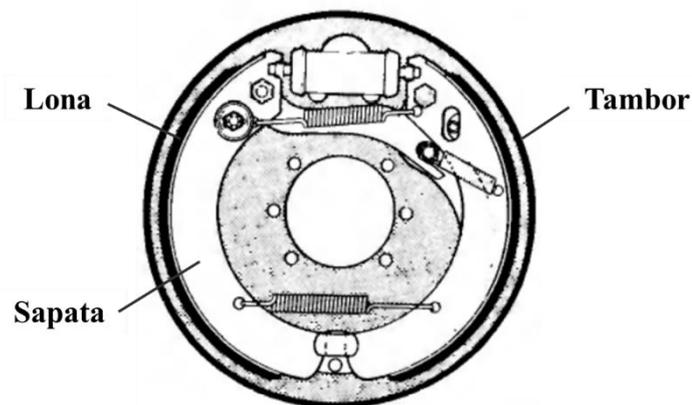


Figura 4.7 – Esquema do sistema de freio a tambor do tipo simplex [Adaptado: Limpert, 1999].

4.2.2 Distribuição de pressão entre rotor e material de fricção

A literatura reporta que o contato entre material de fricção e rotor não é uniforme [Tirovic, 1991; Neis et al., 2010], o que pode resultar em uma distribuição irregular de pressão [Tirovic, 1991]. Alguns autores realizam esta análise de uniformidade através de um filme de medição de pressão. Este filme é recortado no formato da pastilha de freio, sendo então pressionado de forma estática contra o disco por alguns segundos [Bakar et al., 2006a; Bakar et al., 2006b]. A distribuição de pressão é então indicada no filme, conforme exemplificado na Figura 4.8.



Figura 4.8 – Filme mostrando a distribuição de pressão no contato entre disco e pastilha de freio [Adaptado: Bakar et al., 2006a].

Pode-se observar que a distribuição de pressão entre o disco (rotor) e a pastilha (material de fricção) apresenta grande heterogeneidade. Alguns autores também realizam estudos de elementos finitos analisando a distribuição de pressão entre rotor e material de fricção. Exemplos destes estudos são mostrados por Tirovic, 1991, Söderberg e Andersson, 2009 e Belhocine e Omar, 2016. A Figura 4.9 mostra um exemplo de resultado da distribuição de pressão obtida por este método.

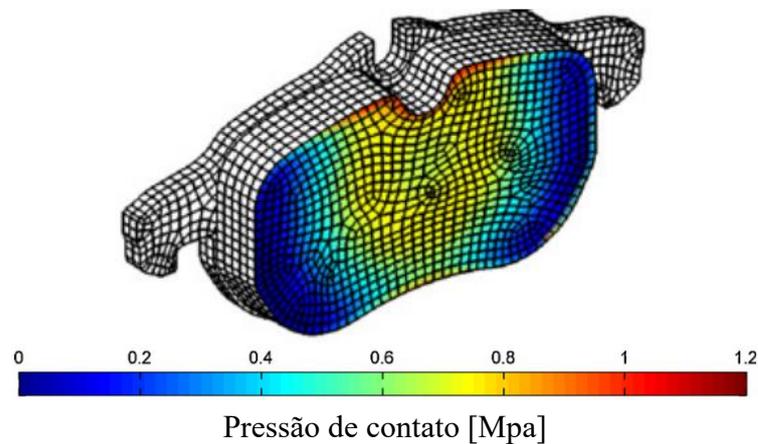


Figura 4.9 – Análise em elementos finitos mostrando a distribuição de pressão na pastilha durante contato com disco [Adaptado: Söderberg e Andersson, 2009].

Novamente, nota-se uma distribuição de pressão irregular sobre a pastilha. A heterogeneidade do contato entre rotor e material de fricção resulta em uma distribuição irregular da pressão deste par tribológico. Isto pode resultar em pressões locais com valores bem distintos da pressão de contato nominal imposta sobre o freio.

4.2.3 Materiais de fricção

Os materiais de fricção automotivos são componentes que têm como objetivo converter a energia cinética do veículo em calor através do atrito [Blau, 2001; Uyyuru et al., 2006; EL-Tayeb e Liew, 2009]. No caso das pastilhas de freio, estas normalmente são classificadas em semi-metálicas (SM) e *non asbestos organic* (NAO) [Birch, 1998; Halderman e Mitchell, 2004]. As pastilhas SM possuem fibras ferrosas em sua composição. Alguns autores ainda subdividem estas em *Low-met* (LM), que apresentam um percentual menor de fibras ferrosas quando comparadas com as do tipo SM. As pastilhas NAO, por sua vez, não apresentam em sua composição fibras ferrosas. Para substituição destas fibras, utilizam-se materiais sintéticos, como fibras de aramida, por exemplo [Halderman e Mitchell, 2004]. Cabe aqui salientar que atualmente, os materiais NAO sem cobre (*NAO copper-free*) têm ganho grande destaque na indústria de materiais de fricção para freios automotivos.

Normalmente, as pastilhas de freio automotivas podem apresentar mais de 20 matérias-primas distintas em sua composição [Ostermeyer, 2003; Gilardi et al., 2012]. Estas matérias-

primas são normalmente classificadas como materiais estruturais, ligantes, cargas e aditivos [Limpert, 1999; Eriksson, 2000]. Entretanto, é comum encontrar na literatura variações desta classificação, dependendo de cada autor.

4.2.4 Platôs de contato

Em materiais de fricção, a área real de contato (discutida na seção 4.1.4) ocorre nos chamados platôs de contato. Nos platôs de contato, os quais se elevam em relação ao restante da superfície do material de fricção [Eriksson e Jacobson, 2000; Eriksson, 2000], estão contidos os microcontatos que efetivamente entraram em contato direto com o rotor.

No meio científico, a classificação mais aceita dos platôs de contato foi proposta por Eriksson, 2000, que dividiu os platôs de contato em primários e secundários. Os platôs primários são formados por partículas engastadas no substrato do material de fricção (e.g., fibras de aço), que promovem o arrancamento de partículas (ou detritos) do rotor. Detritos também são formados por partículas arrancadas do próprio material de fricção. Algumas destas partículas podem ser compactadas através de sua aglomeração ao redor dos platôs primários, dando origem aos platôs secundários. Em outras palavras, os platôs de contato secundários necessitam dos platôs primários para se formarem [Eriksson e Jacobson, 2000; Eriksson, 2000]. A Figura 4.10 mostra esquematicamente os platôs de contato.

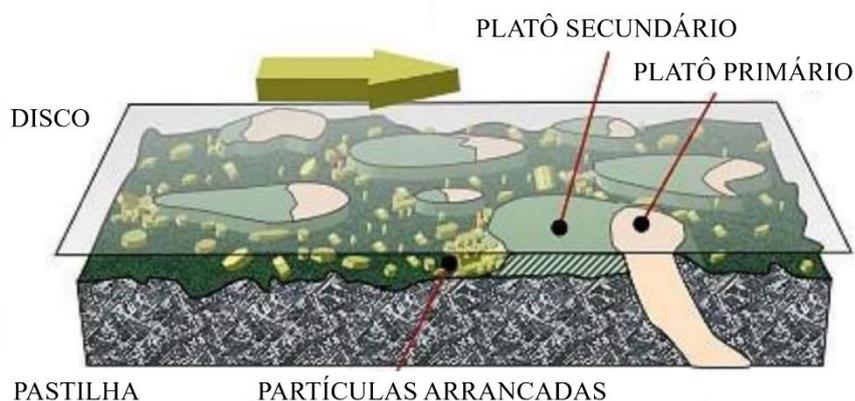


Figura 4.10 - Esquemática dos platôs de contato: platôs primários (coloração mais clara) e platôs secundários (coloração mais escura). A seta indica o movimento relativo entre a pastilha e o disco [Adaptado: Eriksson, 2000].

Eriksson, 2000, ainda menciona que os platôs de contato apresentam, tipicamente, de 10 a 30% da área nominal do material de fricção. A parcela que não entra em contato com o rotor é chamada de *lowland*, descrita como uma região irregular e áspera [Eriksson e Jacobson, 2000; Eriksson et al., 2001].

Um contraponto ao modelo proposto por Eriksson é apresentado no trabalho de Neis et al., 2017b. Os autores observaram a formação de platôs de contato secundários (chamados de “tipo II”) sem estes estarem ancorados nos platôs primários (fibras metálicas). A Figura 4.11 mostra uma microscopia ótica destes dois tipos de platô secundário.

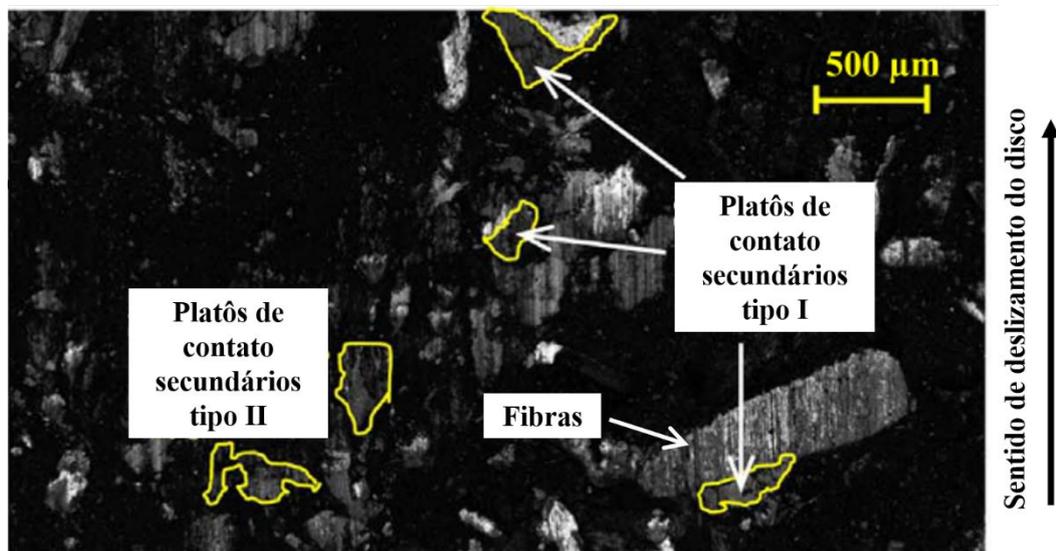


Figura 4.11 – Platôs de contato tipo I e tipo II (Adaptado: Neis et al., 2017b).

Pode-se notar que os platôs de contato secundários tipo I estão ancoradas pelas fibras metálicas, corroborando para o modelo proposto por Eriksson. Por outro lado, os platôs de contato secundários tipo II se formam sem a necessidade de ancoragem destas fibras metálicas.

Na literatura, a visualização dos platôs de contato é normalmente realizada através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) ou microscopia ótica. Em ambos os casos, pode-se identificar os platôs primários e secundários de acordo com sua coloração. Os platôs primários (fibras metálicas) aparecem com uma coloração clara e uniforme, enquanto os platôs secundários (debritos compactados) se mostram com uma aparência cinza [Masotti et al., 2015].

A Figura 4.12 mostra um exemplo de microscopia ótica de uma superfície de um material de fricção após frenagens, onde os platôs primários e secundários são evidenciados.

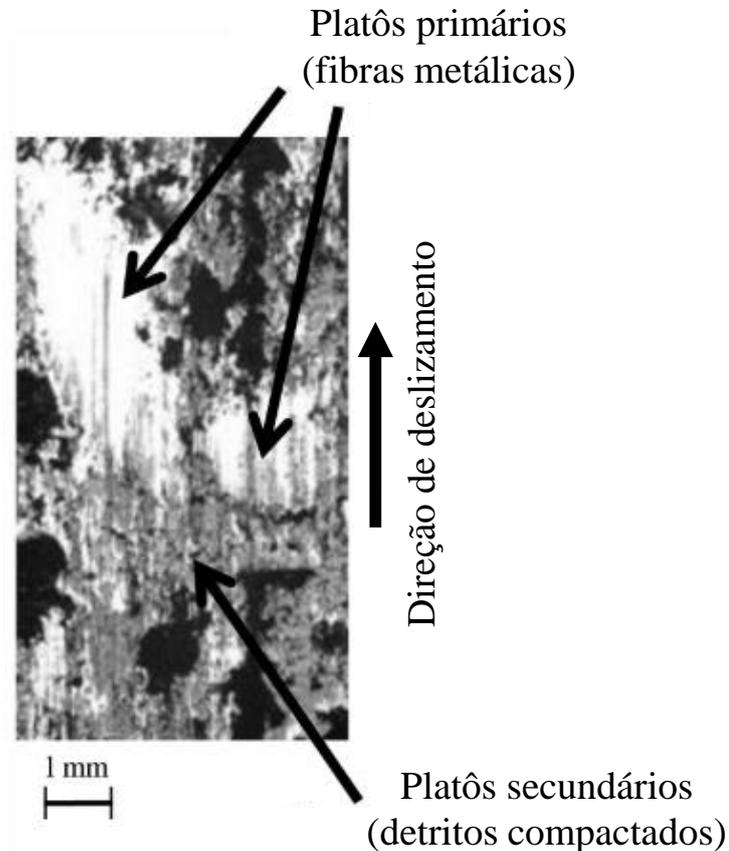


Figura 4.12 – Microscopia ótica da superfície de um material de fricção, mostrando os platôs primários (regiões claras) e platôs secundários (regiões cinzas) [Adaptado: Masotti et al., 2015].

Um exemplo de visualização dos platôs de contato através da técnica de microscopia eletrônica de varredura é mostrado na Figura 4.13. Da mesma forma que a microscopia ótica, os platôs primários também se apresentam com uma coloração mais clara, enquanto os platôs secundários possuem uma aparência cinza.

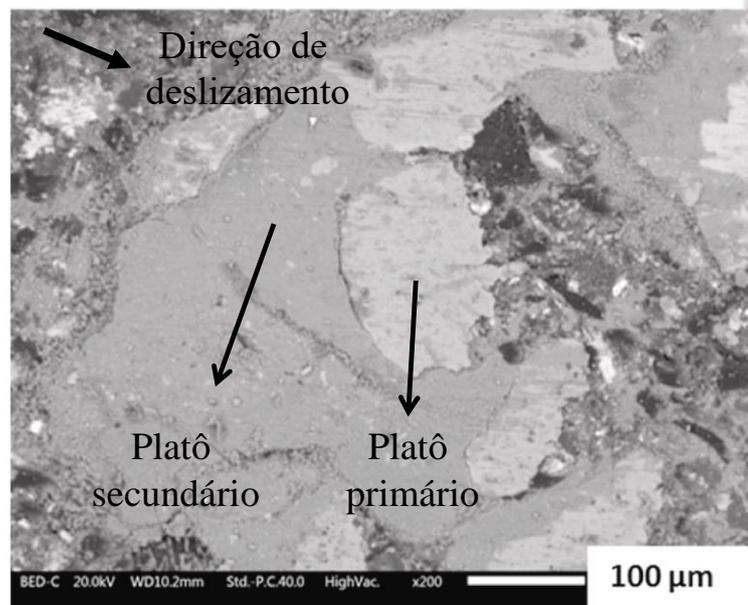


Figura 4.13 – Microscopia eletrônica de varredura de um material de fricção, mostrando os platôs primários (regiões claras) e platôs secundários (regiões cinzas) [Adaptado: Nogueira et al., 2020a].

De acordo com a literatura [Yoon et al., 2012; Barros et al., 2016], o aumento da pressão de contato entre material de fricção e rotor leva a um aumento dos platôs de contato. A Figura 4.14 mostra a evolução dos platôs de contato de uma pastilha de freio em diferentes condições de carregamento.

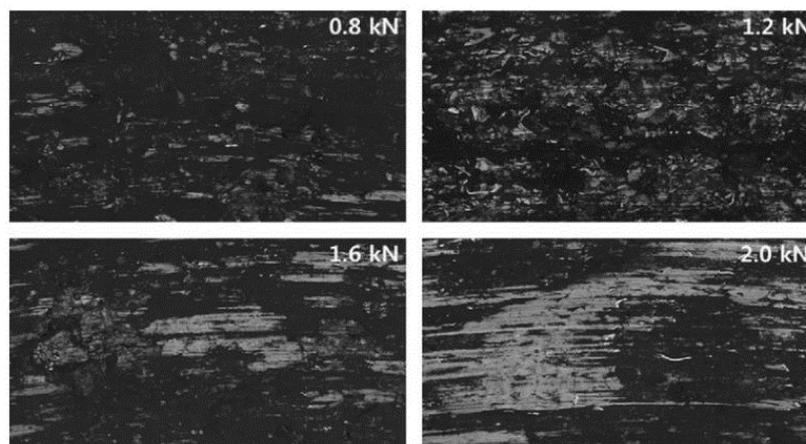


Figura 4.14 – Microscopia ótica dos platôs de contato em diferentes carregamentos [Adaptado: Yoon et al., 2012].

Observa-se que, com o aumento do carregamento, ocorre um aumento dos platôs de contato. Entretanto, os platôs de contato podem ser destruídos quando estes se tornam muito grandes [Ostermeyer e Wilkening, 2013].

A formação dos platôs de contato também é influenciada pelo rotor. No estudo de Federici et al., 2016, discos de ferro fundido recoberto com carbeto de tungstênio com diferentes rugosidades foram atritados contra uma pastilha de freio comercial. A Figura 4.15 mostra imagens da seção transversal de pastilhas de freio nesses diferentes experimentos.

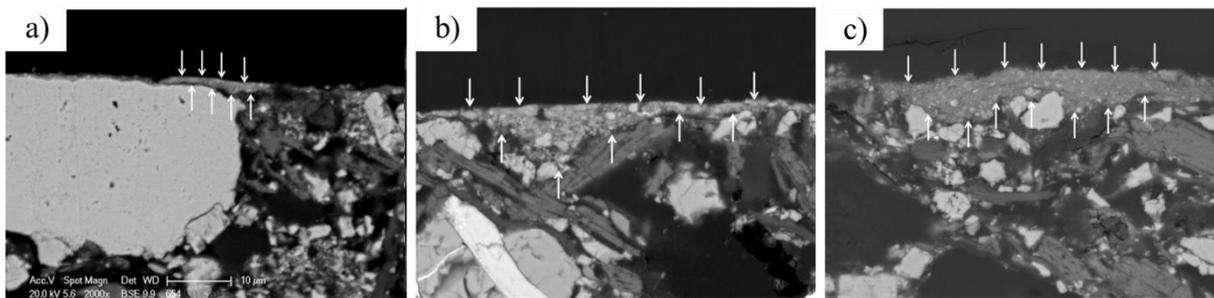


Figura 4.15 – Microscopia eletrônica de varredura de uma seção de corte de uma pastilha de freio após ser atritada contra discos de diferentes rugosidades Ra: a) 5 μm , b) 0,1 μm e c) 0,04 μm [Adaptado: Federici et al., 2016].

Pode-se observar que, quanto menor a rugosidade média Ra do recobrimento do disco, maior a espessura dos platôs de contato. Os autores atribuem este fenômeno à abrasão: quanto menor a rugosidade, menor a abrasão causada pelas asperezas, permitindo a formação dos platôs de contato. De forma contrária, discos com rugosidade elevada tendem a apresentar maior abrasão causada pelas asperezas, impedindo, desta forma, o acúmulo de detritos e, conseqüentemente, a formação dos platôs de contato.

Além da formação, também se encontram na literatura estudos direcionados à resistência dos platôs de contato. No estudo de Bettge e Starcevic, 2003, os autores investigam essa resistência dos platôs em relação ao substrato do material de fricção. A Figura 4.16-a mostra a superfície da pastilha de freio após diversas frenagens. Na Figura 4.16-b, a mesma região da pastilha é mostrada, entretanto, após esta ser exposta a um jato de ar comprimido.

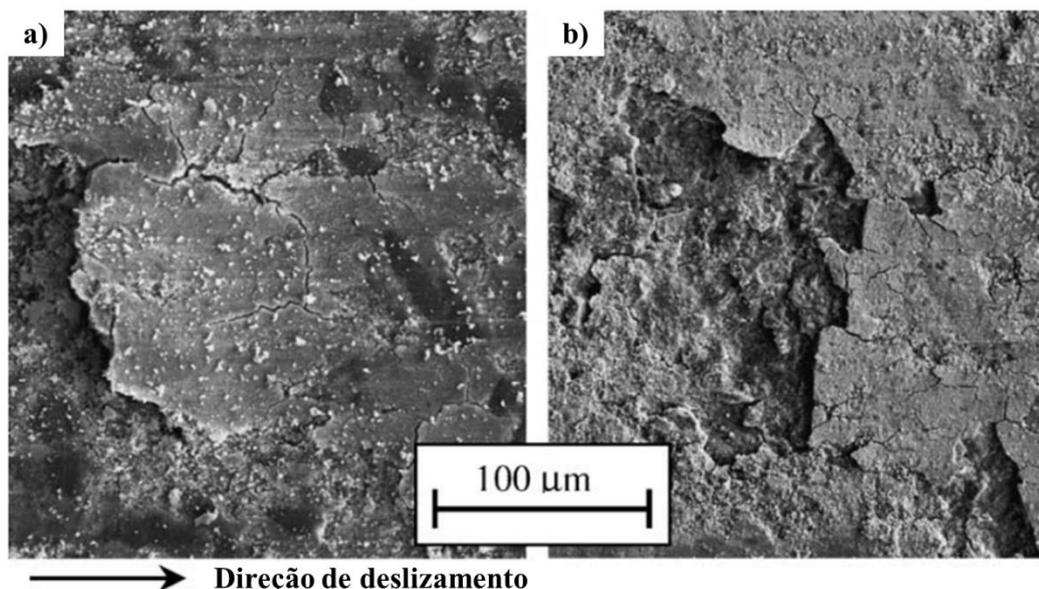


Figura 4.16 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície do material de fricção: a) após experimentos e b) após aplicação de jato de ar comprimido [Adaptado: Bettge e Starcevic, 2003].

Com a aplicação do ar comprimido após os testes, uma parte dos platôs de contato é removida, indicando que alguns deles podem não estar bem fixos no substrato do material de fricção após o contato tribológico com o rotor [Bettge e Starcevic, 2003]. Por outro lado, Eriksson et al., 2002, afirmam que os platôs de contato tem uma vida relativamente longa, apresentando poucas variações em seu formato e tamanho ao longo de diversas frenagens.

4.2.5 Filme

O desgaste gerado no contato tribológico do material de fricção com o rotor também pode dar origem ao chamado filme tribológico. A nomenclatura utilizada para o filme tribológico pode variar dependendo de cada autor, podendo ser chamado, por exemplo, de terceiro corpo [Su et al., 2015], tribofilme [Österle e Dmitriev, 2011] ou simplesmente filme [Kumar e Bijwe, 2011a], sendo este último adotado no presente trabalho. Cabe aqui salientar que alguns autores também chamam os platôs de contato de terceiro corpo. Neste trabalho, será chamado de filme aquele que está aderido sobre o rotor (disco), e platô de contato aquele que está presente na superfície do material de fricção. Além disso, será chamado de terceiro corpo os detritos que estão na interface tribológica, nos quais irão se transformar eventualmente em

platôs de contato ou filme. A Figura 4.17 mostra um disco de freio de um automóvel leve, onde se observa uma região escurecida na superfície do disco. Nesta região se encontra o filme.



Figura 4.17 – Filme depositado sobre o disco de freio de um veículo.

O filme, composto basicamente por óxido de ferro [Österle e Urban, 2004], tem um papel importante no que diz respeito ao desempenho funcional do par tribológico de materiais de fricção (atrito e desgaste), visto que impede o contato direto entre material de fricção e rotor [Jang et al., 2004]. De acordo com Lee e Filip, 2013, a taxa de desgaste do material de fricção está relacionada à sua capacidade de desenvolver e manter um filme estável na interface de contato. Em outras palavras, o filme contribui para redução do desgaste do material de fricção [Jacko et al., 1989]. Além disso, o filme contribui para a estabilidade do atrito durante a frenagem [Jacko et al., 1989; Cristol-Bulthé et al., 2007] e redução de ruído e vibração [Österle e Urban, 2006]. O mecanismo de formação do filme é complexo, dependendo fortemente do histórico térmico a que o par tribológico (material de fricção e rotor) foi submetido [Kim e Jang, 2000].

Devido à importância do filme em parâmetros tribológicos (atrito e desgaste), diversos autores realizaram estudos direcionados ao filme. Alguns destes trabalhos são comentados a seguir.

Cho et al., 2005, avaliaram a espessura do filme depositado sobre um disco de ferro fundido cinzento em ensaios com materiais de fricção de diferentes formulações. Os 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 feita através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) após a realização de uma seção de corte do disco, possibilitando a visualização da espessura do filme formado em sua superfície. Além disso, foi utilizado um método não destrutivo para avaliação de espessura de filme baseado em uma técnica de medição de sua resistência elétrica. Nesse método, uma camada fina de prata é adicionada na superfície do disco com o intuito de possibilitar a medição da resistência do filme. Filmes com espessuras diversas (variando de 5 a 50 μm) foram obtidos através de experimentos com os diferentes tipos de materiais. Com isso, foi possível correlacionar os valores de espessura de filme obtidos na seção cortada do disco com os valores de resistência. A Figura 4.18 mostra uma dessas seções cortadas do disco e a correlação das espessuras com as resistências elétricas medidas.

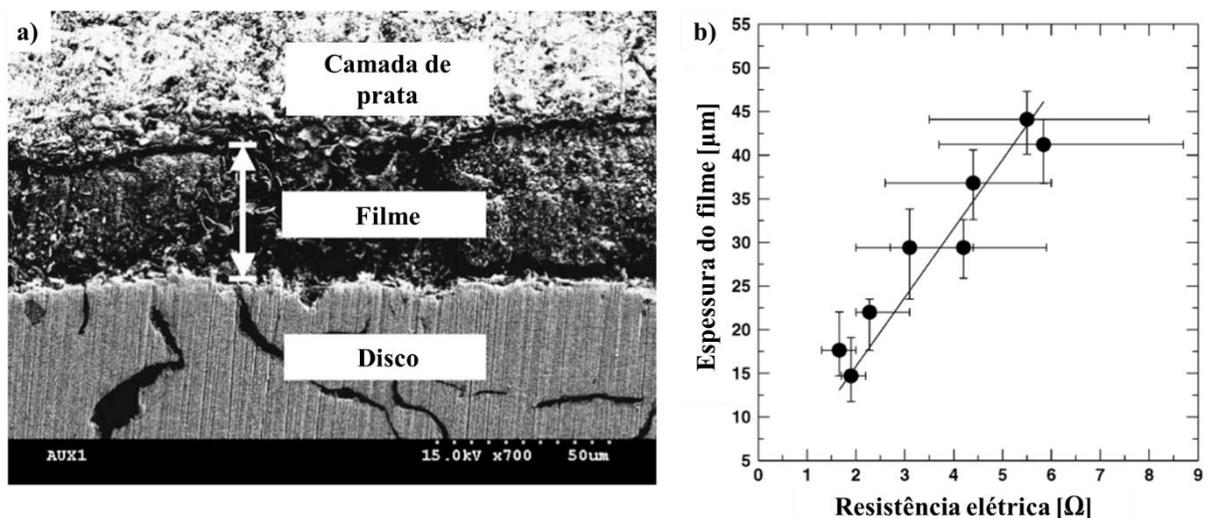


Figura 4.18 – Análise da espessura do filme: a) MEV na seção cortada de um disco em um dos experimentos e b) correlação entre espessura medida e resistência elétrica [Adaptado: Cho et al., 2005].

Segundo os autores, essa técnica apresentou resultados relativamente confiáveis para avaliar a espessura do filme, contudo, não mostrou ser aplicável para espessuras menores que 10 μm , visto que a rugosidade do disco influencia nos valores de resistência medidos. Os autores também sugerem que a espessura do filme está relacionada com a temperatura do disco: o seu aumento leva a um aumento na espessura do filme até uma determinada temperatura (300°C). A partir deste valor, ocorre uma diminuição na espessura do filme com o aumento da temperatura devido à decomposição térmica das matérias-primas. Além disso, segundo os autores, o coeficiente de atrito não apresentou correlação direta com a espessura do filme, embora a oscilação do atrito seja reduzida com o aumento da espessura deste filme.

Österle et al., 2009, também realizaram experimentos visando analisar a espessura do filme em um teste do tipo pino-sobre-disco, utilizando como par tribológico uma pastilha de freio do tipo LM e um disco de ferro fundido cinzento. A metodologia 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, possibilitando a visualização da espessura do filme formado. A Figura 4.19 mostra imagens de microscopia ótica e MEV de uma seção de corte da interface tribológica.

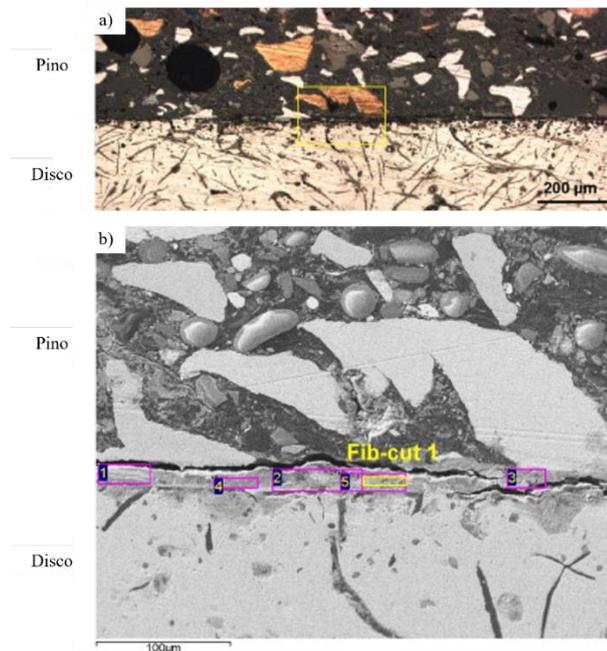


Figura 4.19 – Interface tribológica: a) microscopia ótica e b) MEV [Adaptado: Österle et al., 2009].

Os autores constataram que a espessura do filme formado na interface entre o disco e o pino é da ordem de 10 μm . Uma análise realizada através de espectroscopia de raios X por dispersão em energia (*Energy-dispersive X-ray spectroscopy* - EDS) na região 5 (mostrada na Figura 4.19-b) apontou que a composição principal do filme é óxido de ferro, seguido por sílica e cálcio, elementos presentes na formulação da pastilha utilizada. Traços de cobre, zinco, carbono e enxofre, também presentes na formulação da pastilha, foram encontrados na análise de EDS. Em outras palavras, o filme formado neste estudo é constituído basicamente pela mistura de óxido de ferro com matérias-primas utilizadas na pastilha [Österle et al., 2009].

A composição do filme também é estudada por alguns autores através de outras técnicas. O estudo realizado por Hinrichs et al., 2011a, teve como objetivo identificar as fases formadas nos detritos e nas superfícies de discos e pastilhas após frenagens. Nestes experimentos, realizados em um dinamômetro, utilizou-se pastilhas de freio do tipo semi-metálica. Foram aplicados dois assentamentos e duas velocidades de deslizamento distintas. Os assentamentos foram divididos em curto (100 frenagens) e longo (200 frenagens), representando um veículo desacelerando de 80 km/h até a parada total. Além disso, foram realizadas 1000 frenagens para cada velocidade de deslizamento, divididas em baixa (46 km/h) e alta (96 km/h), também ocorrendo até a parada total. Desta forma, através das combinações entre assentamento e velocidade de deslizamento, o estudo foi realizado com um total de quatro experimentos.

Neste estudo, diferentes técnicas de medição foram empregadas, entre elas, MEV, difração de raios-X em ângulo rasante (GIXRD - *Grazing Incidence X-ray Diffraction*) e Espectroscopia Mössbauer. Na região atritada do disco, para as duas velocidades de deslizamento, foram detectados padrões muito similares de ferro- α , magnetita (Fe_3O_4) e cementita (Fe_3C). As análises na superfície das pastilhas e nos detritos apresentaram diferenças entre as duas velocidades de deslizamento: em baixas velocidades, um alto teor de magnetita na superfície de pastilha e detritos foi observado. Nesta condição, o coeficiente de atrito apresentou um nível elevado e estável. Por outro lado, os testes em velocidade alta resultaram em um atrito inferior, porém, mais instável do que aquele observado nos experimentos com velocidade baixa, conforme mostrado na Figura 4.20.

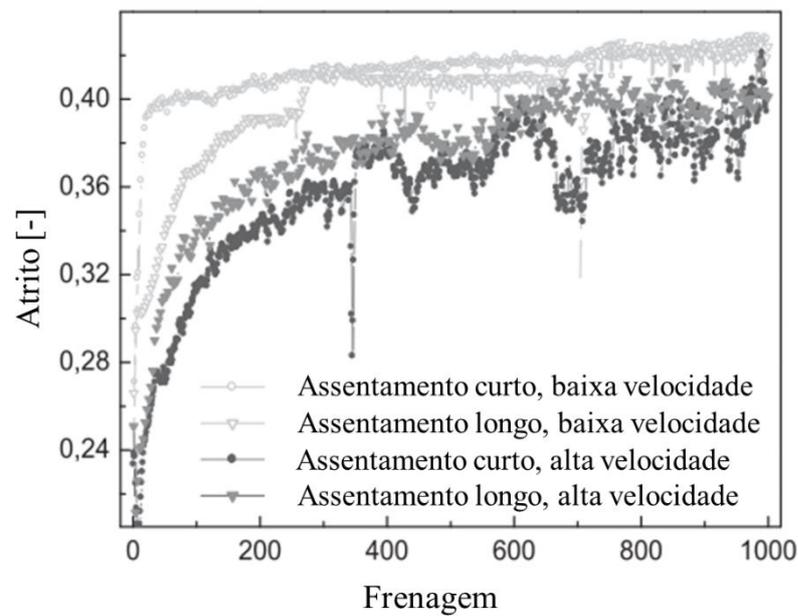


Figura 4.20 – Coeficiente de atrito em baixa e alta velocidade de deslizamento após assentamento curto e longo [Adaptado: Hinrichs et al., 2011a].

Segundo os autores, a magnetita atuou de forma a estabilizar o coeficiente de atrito nas frenagens em baixa velocidade. Por outro lado, um maior teor de cementita foi observado na superfície da pastilha e nos detritos nos experimentos com velocidade de deslizamento elevada. Desta forma, os autores afirmam que a formação de cementita deve ser evitada para um coeficiente de atrito mais estável.

Em um estudo publicado por este autor, juntamente com outros colegas de pesquisa [Barros et al., 2016], foi realizada uma primeira aplicação da técnica utilizada nesta tese para o monitoramento do filme depositado sobre o disco durante frenagens. Neste trabalho, uma avaliação não destrutiva do filme foi realizada, a qual investigou a heterogeneidade do filme entre diferentes frenagens. Experimentos foram realizados em um tribômetro, onde materiais do tipo NAO e SM foram ensaiados. Uma metodologia baseada em microscopia ótica foi implementada, possibilitando avaliar o depósito de filme sobre o disco ao longo de diversas frenagens, conforme mostrado na Figura 4.21.

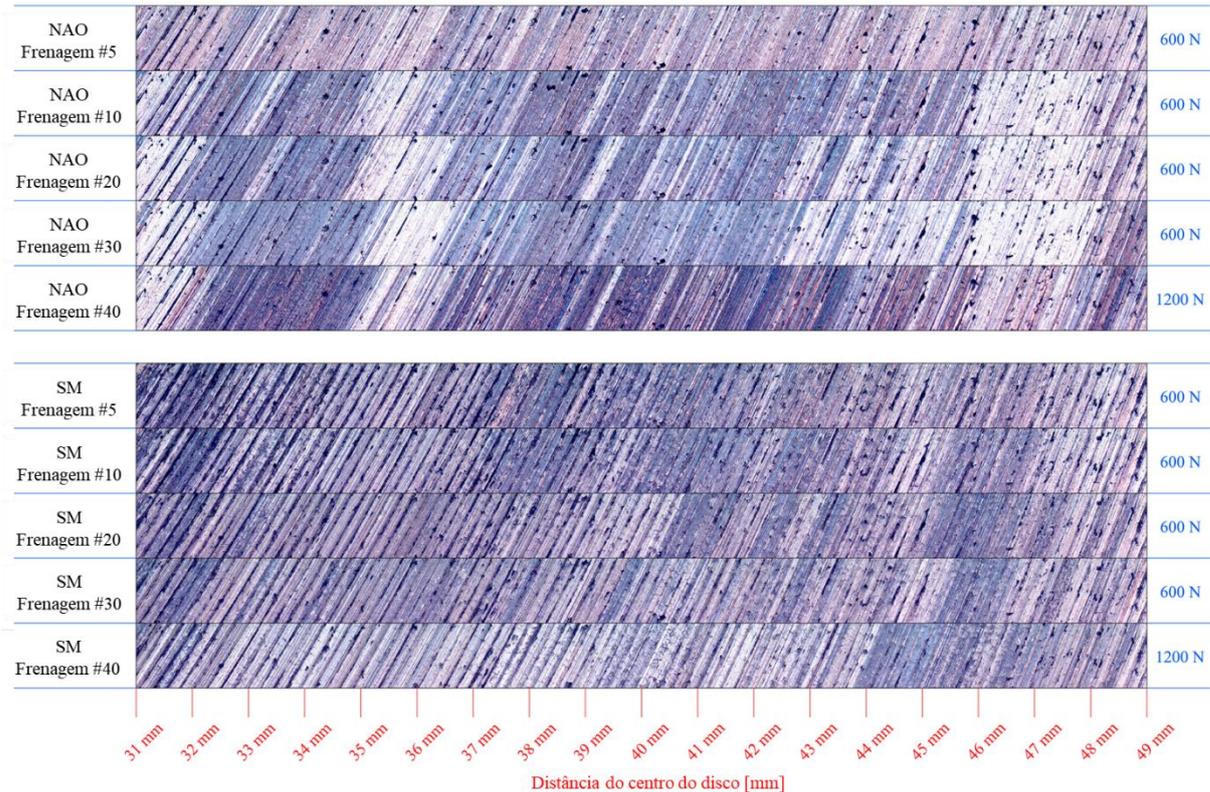


Figura 4.21 – Evolução do filme depositado sobre o disco ao longo de diversas frenagens para materiais de fricção do tipo NAO e SM [Adaptado: Barros et al., 2016].

Os autores concluíram que a heterogeneidade do filme (no sentido radial do disco) ocorre tanto nos materiais SM quanto nos NAO. Conforme observado na Figura 4.21, o material NAO apresenta maior heterogeneidade de filme do que no material SM. Além disso, observou-se que o depósito de filme pode apresentar variações de acordo com a pressão aplicada: para a pastilha do tipo NAO, o aumento de força levou a um aumento no depósito de filme (coloração mais escura), enquanto para a pastilha SM, o oposto foi observado.

Apesar da importância do filme no que diz respeito ao desgaste de materiais de fricção, a dinâmica de formação/remoção do filme entre diferentes frenagens carece de estudos mais aprofundados. Uma melhor compreensão desta dinâmica pode contribuir para a evolução dos materiais de fricção. Novas formulações que permitam o desenvolvimento e a estabilização do filme sob condições de frenagem distintas podem resultar em materiais de fricção com menor desgaste associado, além de um nível de atrito mais estável.

4.3 Tipos de desgaste

O desgaste é um fenômeno que ocorre nas mais diversas situações, desde um simples escovar de dentes até o contato entre anel e cilindro em um motor a combustão interna. Segundo a Norma DIN 50320, 1979, o desgaste pode ser definido como:

“...a perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido devido à ação mecânica, i.e., o contato e movimento relativo contra um contra-corpo sólido, líquido ou gasoso”.

Em geral, pode-se afirmar que o desgaste está intimamente ligado a questões econômicas. Este é um tema amplamente estudado, onde pode-se citar o estudo realizado por Jost, 1966, que foi o primeiro trabalho a estimar custos devido ao desgaste. Segundo o autor, 515 milhões de libras (referente ao ano de 1965) poderiam ser economizadas aplicando-se conhecimentos dos fenômenos tribológicos. Esta economia seria realizada através das reduções de custos com reposição de peças em maquinários e paradas de máquina para manutenção, por exemplo [Jost, 1990].

Questões ambientais também podem estar relacionadas ao desgaste. Partículas de um determinado componente mecânico desgastado podem afetar negativamente o meio ambiente ou a saúde do ser humano. Pode-se citar, como exemplo, o uso do amianto em materiais de fricção de freios automotivos. Apesar de apresentar propriedades físicas e químicas adequadas para esta aplicação [Smales, 1994; Ibhádode e Dagwa, 2008], a exposição do homem ao pó deste material pode levar a graves doenças, entre elas, asbestose e câncer [Limpert, 1999; Halderman e Mitchell, 2004]. Isso levou ao banimento do uso do amianto em materiais de fricção por diversas agências governamentais na década de 1990 [Limpert, 1999].

Diferentes autores classificam os tipos de desgaste de formas distintas. Entretanto, a classificação citada pela Norma DIN 50320, 1979, costuma ser adotada em diversos trabalhos encontrados na literatura, sendo também adotada no presente trabalho. A Figura 4.22 mostra esquematicamente esta classificação. Na sequência, são descritos estes principais tipos de desgaste.

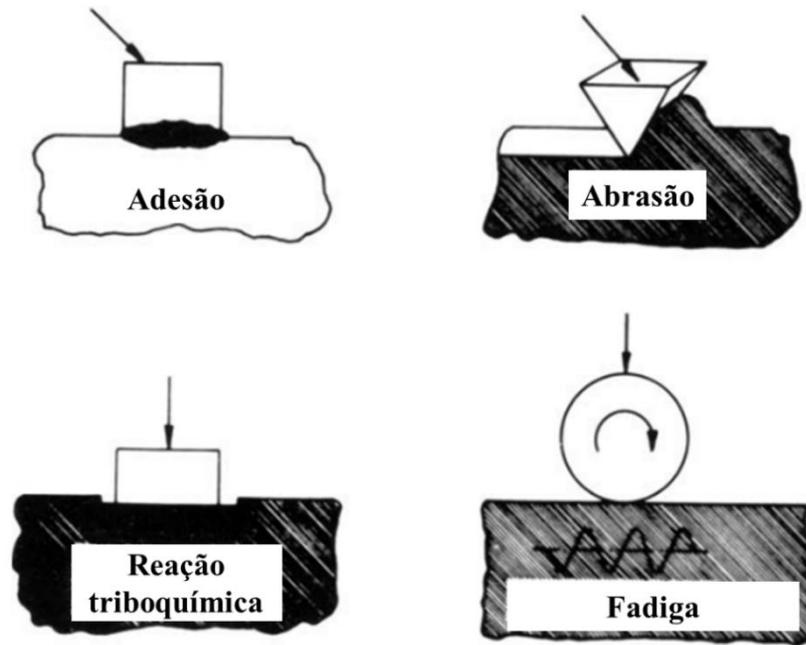


Figura 4.22 – Esquema mostrando os quatro principais mecanismos de desgaste [Adaptado: Gahr, 1987].

4.3.1 Desgaste adesivo

O mecanismo de adesão pode ser entendido como uma interação química entre superfícies em contato, onde ligações adesivas (ou junções) entre as asperezas dos corpos podem ocorrer [Bhushan, 2013]. Corpos em contato que apresentem maior compatibilidade química tendem a apresentar maior adesão [Arango, 2010]. A área real de contato, discutida na seção 4.1.4, normalmente aumenta com o aumento de carga aplicada no par tribológico, por conta das deformações elásticas e plásticas das asperezas. Quanto maior a área real de contato, maior o efeito da adesão no par tribológico, o que provoca um aumento das junções das asperezas. De forma contrária, a adesão tende a ser menor quando ocorre o contato entre materiais com durezas elevadas, visto que a área real de contato é reduzida [Gahr, 1987].

O movimento relativo entre os corpos aderidos pode levar ao rompimento das junções. Entretanto, caso as junções apresentem uma resistência maior do que a resistência do corpo mais macio, pode ocorrer uma transferência de material deste corpo para o corpo com maior resistência, caracterizando assim o desgaste adesivo [Buckley, 1981; Gahr, 1987]. A Figura 4.23 mostra o aspecto típico de um corpo metálico que sofreu desgaste adesivo.

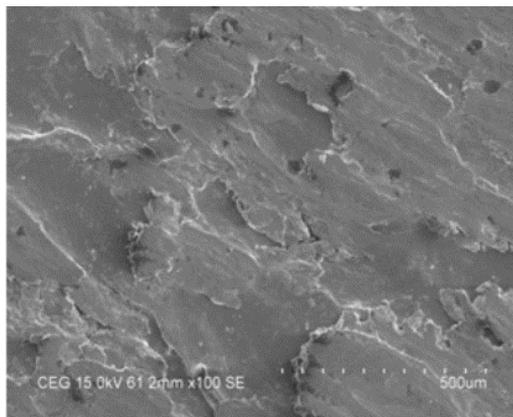


Figura 4.23 – Microscopia eletrônica de varredura mostrando adesão de uma superfície de um corpo de aço austenítico AISI 316L quando atritado contra um corpo de mesmo material [Adaptado: Saravanan et al., 2017].

O desgaste adesivo em metais normalmente leva a uma superfície com rugosidade elevada [Viáfara e Sinatora, 2009]. Geralmente, a adesão também resulta em um coeficiente de atrito e taxa de desgaste elevados. A propensão ao desgaste adesivo depende de uma série de fatores, entre eles, os tipos de materiais em contato, rugosidade do par tribológico e contaminantes na interface. A presença de óxidos na superfície de corpos metálicos (discutido na seção 4.3.3), por exemplo, tende a reduzir a adesão entre estes.

4.3.2 Desgaste abrasivo

O desgaste abrasivo pode ser entendido como a perda de material devido à ranhura provocada pela passagem de uma partícula dura sobre uma superfície [Totten, 2017]. Um material macio que possua partículas duras em seu substrato pode causar abrasão em outro corpo com dureza mais elevada. Materiais orgânicos como cana-de-açúcar, por exemplo, causam desgaste abrasivo em cortadores e trituradores, visto que a cana-de-açúcar apresenta partículas de sílica em sua composição [Stachowiak e Batchelor, 2005].

Basicamente, o desgaste abrasivo pode ocorrer através de duas formas de contato: a dois e a três corpos. No contato a dois corpos, uma das superfícies apresenta dureza superior à outra, levando ao desgaste abrasivo no corpo mais macio. O lixamento de uma superfície ou a retífica de uma peça são exemplos deste tipo de desgaste. Já no contato a três corpos, a partícula

abrasiva está solta, livre para rolar entre os corpos [Ludema, 1996]. O desgaste causado por partículas soltas dentro de um mancal de rolamento é um exemplo de desgaste abrasivo a três corpos [Abdelbary, 2014]. Estes dois tipos de contato são ilustrados na Figura 4.24.

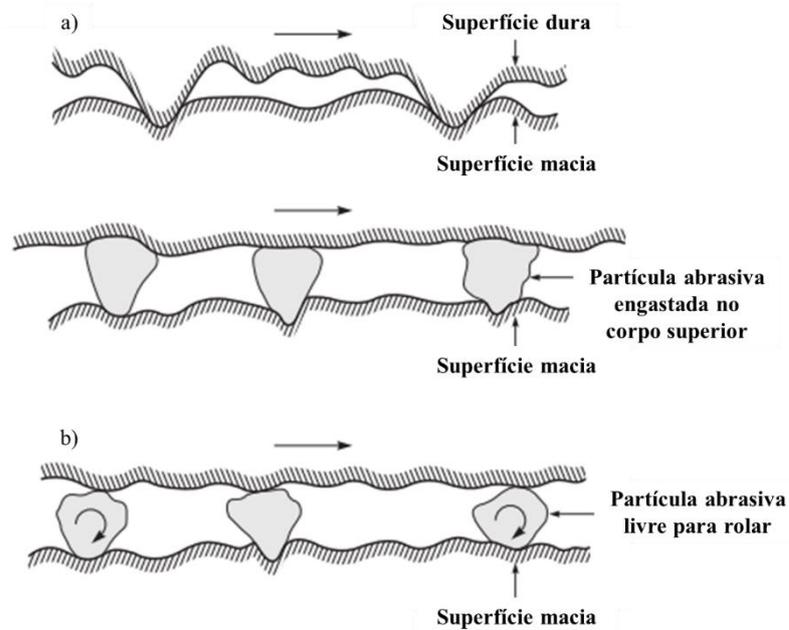


Figura 4.24 – Esquema do desgaste abrasivo através do: a) contato a dois corpos de uma superfície sobre a outra ou com partícula abrasiva engastada em uma das superfícies e b) contato a três corpos [Adaptado: Bhushan, 2013].

No contato a três corpos, o desgaste costuma ser inferior àquele observado no contato a dois corpos. Para um determinado carregamento e distância de deslizamento, o desgaste abrasivo a dois corpos é, tipicamente, cerca de 10 a 1000 vezes maior que o desgaste abrasivo a três corpos [Menezes et al., 2013]. A Figura 4.25 mostra o aspecto de um corpo metálico após sofrer desgaste abrasivo, evidenciando as ranhuras típicas de abrasão.

chamado de desgaste moderado [Stachowiak e Batchelor, 2005]. Maiores detalhes sobre a mudança de regime de desgaste são apresentados na seção 4.5.

De acordo com Gahr, 1987, o mecanismo do desgaste tribo-oxidativo pode ser dividido em quatro categorias, listadas abaixo, conforme ilustrado na Figura 4.26:

- Adesão devida ao contato metálico entre as asperezas, resultando na remoção de partículas metálicas. Estas partículas podem ser oxidadas devido ao meio reativo.
- Reação química dos corpos metálicos com o meio reativo, levando à formação de uma camada protetora superficial que reduz o contato metálico.
- Quebra da camada protetora devido às altas pressões localizadas ou microfadiga, resultando em detritos oxidados não-metálicos.
- A mistura de detritos metálicos e não-metálicos (óxidos) pode atuar como partículas abrasivas entre as superfícies.

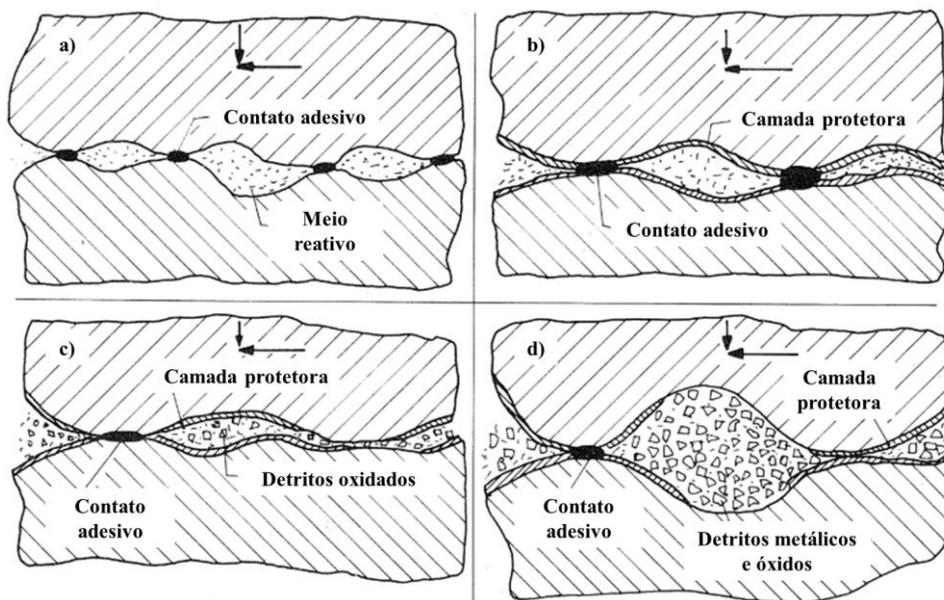


Figura 4.26 – Mecanismos envolvidos no desgaste tribo-oxidativo [Adaptado: Gahr, 1987].

O desgaste e a perda de massa das superfícies são oriundos da ocorrência repetida destes diferentes processos. O desgaste tribo-oxidativo é influenciado diretamente pela cinética de formação das camadas protetoras, bem como suas propriedades como, por exemplo, ductilidade e adesão ao substrato. A abrasão causada nas superfícies pela mistura de óxidos com detritos metálicos (Figura 4.26-d) é reduzida caso sua dureza seja similar à dureza dos corpos [Gahr,

1987]. A formação desta mistura, que age como uma abrasão a três corpos, é ilustrada na Figura 4.27.

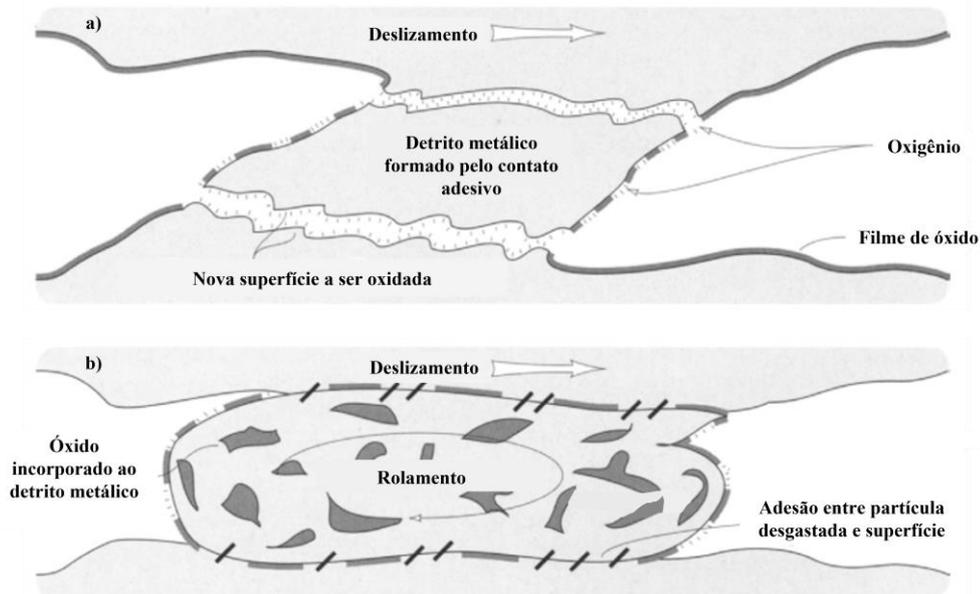


Figura 4.27 – Formação da mistura de óxidos com detritos metálicos: a) detrito metálico arrancado devido ao contato adesivo e b) óxido incorporado ao detrito metálico [Adaptado: Stachowiak e Batchelor, 2005]

O detrito metálico arrancado devido à adesão entre os corpos pode permanecer na interface de contato. Devido ao meio reativo, a superfície deste detrito se oxida. Esta partícula contribui para formação de novos óxidos, os quais se incorporam no detrito metálico. Desta forma, tem-se uma mistura de detritos metálicos com partículas oxidadas, onde essa mistura age como uma partícula abrasiva a três corpos na interface tribológica.

Por se tratar de um processo termicamente ativado, onde a taxa de oxidação pode aumentar exponencialmente com o aumento da temperatura [Menezes et al., 2013], o desgaste tribo-oxidativo pode ser acentuado em temperaturas elevadas [Stachowiak e Batchelor, 2005]. A Figura 4.28 mostra esquematicamente a oxidação de uma superfície metálica em altas temperaturas de contato.

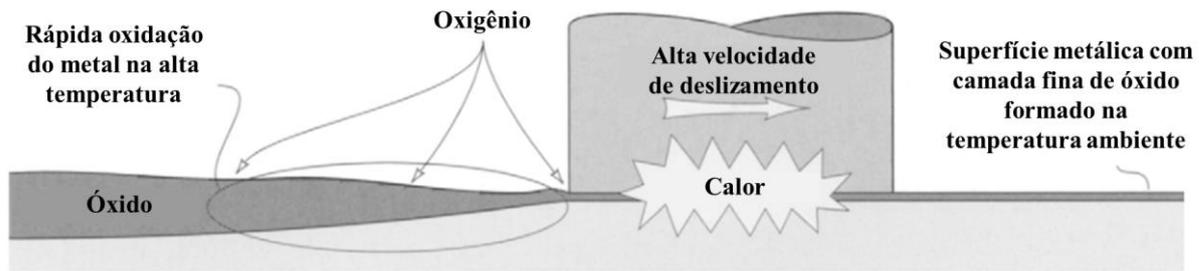


Figura 4.28 – Esquema mostrando a rápida oxidação de uma superfície metálica em altas temperaturas de contato [Adaptado: Stachowiak e Batchelor, 2005].

A rápida oxidação da superfície pode ocorrer devido às altas temperaturas impostas externamente ou decorrentes do próprio calor gerado pelo atrito em contato tribológico. O desgaste tribo-oxidativo pode ser desejável, visto que, normalmente, apresenta taxas de desgaste inferiores às aquelas observadas em outros tipos de desgaste. Entretanto, pode-se reduzir o desgaste tribo-oxidativo removendo o oxigênio do meio, embora isso possa acarretar um aumento do desgaste adesivo [Stachowiak e Batchelor, 2005]. A Figura 4.29 mostra o aspecto típico observado em uma superfície metálica que sofreu desgaste tribo-oxidativo.

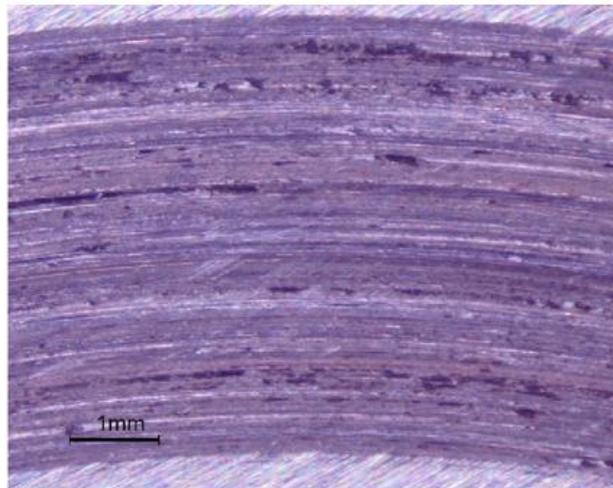


Figura 4.29 – Microscopia óptica mostrando o desgaste tribo-oxidativo na superfície de um aço AISI H13 após ser atritado contra um pino de aço AISI 4140 [Adaptado: Viáfara e Sinatora, 2009].

4.3.4 Fadiga de contato

O desgaste devido à fadiga é caracterizado por trincas geradas através de cargas de contato cíclicas. Estas cargas podem ser decorrentes do impacto de um fluido na superfície de um corpo ou no contato entre a superfície de um corpo com a superfície de outro corpo, podendo este contato ser de rolamento ou deslizamento relativo [Gahr, 1987].

Segundo Menezes et al., 2013, o desgaste devido à fadiga pode ocorrer em duas escalas: macroscópica e microscópica. A primeira delas ocorre entre superfícies não conformantes, como no caso de rolamento de contato, levando à fadiga subsuperficial. No caso da escala microscópica, o desgaste devido à fadiga ocorre no deslizamento entre asperezas, o que acontece na superfície do material através da propagação de trincas. A Figura 4.30 mostra esquematicamente a formação de trinca e, conseqüentemente, formação de partícula desgastada devido à fadiga.

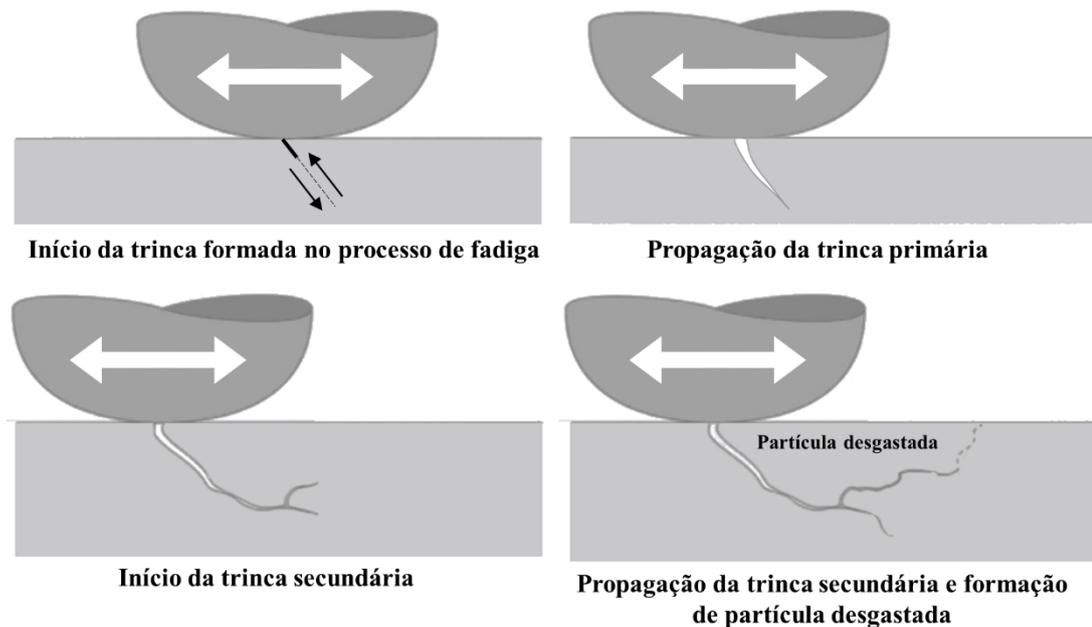


Figura 4.30 – Esquema mostrando o processo de desgaste devido à fadiga superficial

[Adaptado: Stachowiak e Batchelor, 2005].

A trinca primária é originada em algum ponto de menor resistência do material, se propagando no interior do corpo. A propagação de uma trinca secundária pode se conectar com

a superfície do material, levando ao desprendimento de uma partícula [Stachowiak e Batchelor, 2005]. A Figura 4.31 mostra as trincas geradas na subsuperfície de um aço devido à fadiga.

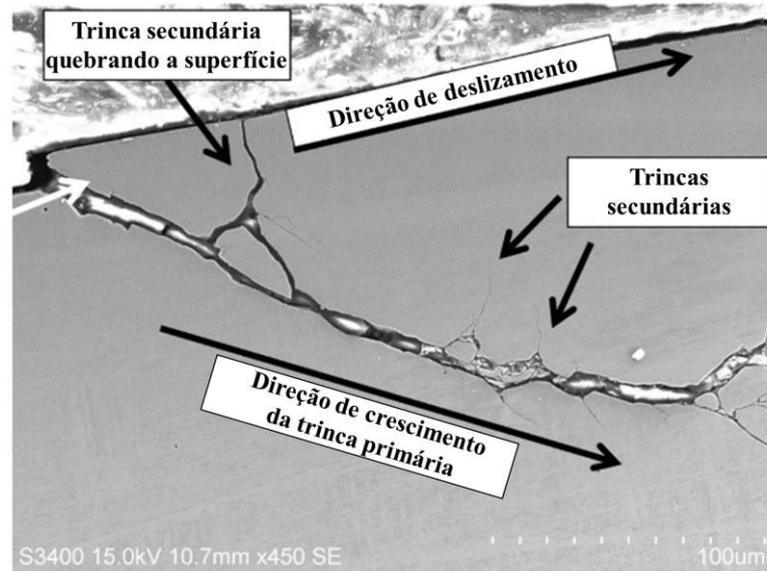


Figura 4.31 – Microscopia eletrônica de varredura mostrando as trincas geradas devido à fadiga em um contato entre um rolo de aço AISI 52100 atritado contra um disco de aço AISI 52100 [Adaptado: Rycerz et al., 2017].

4.4 Desgaste em materiais de fricção

Por se tratar de um compósito com diversas matérias-primas, o desgaste de materiais de fricção é um fenômeno complexo, podendo envolver simultaneamente mecanismos de desgaste abrasivo, adesivo e oxidativo [Chandra Verma et al., 2015]. Na literatura, encontram-se trabalhos que avaliam o desgaste de diferentes tipos de materiais de fricção automotivo sob diferentes condições de aplicação. Alguns destes trabalhos são discutidos a seguir.

Kim e Jang, 2000, realizaram experimentos variando o tipo, a quantidade de resina fenólica e a quantidade de fibra de aramida empregadas em pastilhas de freio. Em experimentos efetuados em um ensaio do tipo pino-no-disco, os autores observaram diferenças significativas no desgaste entre os diferentes materiais. Os materiais com maior porosidade apresentaram desgaste inferior quando comparados com os materiais com menor porosidade. Os autores justificam este fenômeno como sendo devido ao fato de que um material pouco poroso

apresenta menor capacidade de dissipar o calor gerado no contato do que um material com maior porosidade, o que contribui para aumentar o desgaste da pastilha.

No estudo de Kukutschová et al., 2009, ensaios em um dinamômetro foram realizados visando a analisar o desgaste de uma pastilha de freio do tipo SM em diferentes etapas do experimento. Uma combinação de desgaste abrasivo, adesivo e oxidativo foi observada. O desgaste oxidativo foi mais predominante na etapa de *fade*, onde são empregadas frenagens em temperaturas elevadas. Conforme discutido na seção 4.3.3, este comportamento é esperado, visto que a tribo-oxidação é um processo termicamente ativado [Menezes et al., 2013].

Outros estudos relacionam uma tendência de aumento do desgaste de materiais de fricção com aumento da pressão aplicada [Straffelini et al., 2004; Yoon et al., 2012]. Entretanto, existem autores que relatam justamente o efeito contrário, ou seja, ocorre uma redução do desgaste de materiais de fricção com o aumento da pressão. Segundo EL-Tayeb e Liew, 2009, isso ocorre porque o aumento de pressão leva a uma maior exposição de fibras metálicas contra o rotor, as quais têm maior resistência ao desgaste.

Além da pressão de contato, outros autores também estudam a influência da condição inicial da superfície do rotor em parâmetros tribológicos. Federici et al., 2016, utilizaram recobrimento de carbetos de tungstênio em um disco de freio. Através de lixamento e polimento, diferentes rugosidades foram obtidas nos discos com recobrimento, os quais foram atritados contra uma pastilha de freio em um ensaio pino-sobre-disco. Foi observado que a diminuição da rugosidade do disco levou a uma redução no desgaste de pastilha. Segundo os autores, rugosidades menores do disco aumentam a espessura e o tamanho dos platôs, o que favorece o mecanismo de adesão. Desta forma, o mecanismo de abrasão é reduzido, diminuindo o desgaste de pastilha. Por outro lado, a abrasão prevalece em discos com rugosidades maiores, acentuando o desgaste de pastilha.

O desgaste de materiais de fricção é influenciado também pela dinâmica de formação de filme, pois este filme evita o contato direto do par tribológico. No período de assentamento, não há um filme depositado sobre o rotor, ocorrendo o contato direto entre este rotor e o material de fricção. Mecanismos de abrasão e adesão são predominantes nesta condição, levando a uma taxa de desgaste mais acentuada do par tribológico [Matějka et al., 2017]. Este desgaste leva à formação de detritos que, por sua vez, podem sofrer oxidação, levando à formação do filme e, conseqüentemente, a um desgaste tribo-oxidativo. Desta forma, a taxa de desgaste do par tribológico é reduzida quando há um filme na interface do par. Assim, pode-se esperar que, para

se obter uma taxa de desgaste baixa, se faz necessária a formação e conservação do filme sob diferentes condições operacionais (pressão de contato, velocidade e temperatura).

As dinâmicas de formação do filme depositado sobre o disco e dos platôs de contato da pastilha fazem com que o desgaste de materiais de fricção seja afetado pela ordem de frenagens que tenham diferentes condições operacionais. Um estudo recente [Dos Santos et al., 2019] buscou avaliar a influência da ordem de execução de frenagens em um teste de durabilidade realizado em um dinamômetro. Tipicamente, este teste de durabilidade é realizado em uma chamada matriz repetitiva, na qual as condições de frenagem com parâmetros iguais (pressão de contato, velocidade de deslizamento e temperatura inicial) são agrupadas em blocos. Naturalmente, as frenagens realizadas em veículos reais ocorrem de forma mais aleatorizada, onde estes parâmetros podem variar consideravelmente entre cada frenagem realizada. Desta forma, foi comparado o desgaste de materiais de fricção quando estes são submetidos aos experimentos utilizando uma matriz repetitiva e uma matriz alternada. Para a matriz repetitiva, os parâmetros operacionais variam a cada 80 frenagens, enquanto para a matriz alternada, estes variam a cada 3. Concluiu-se que a matriz alternada resultou em um desgaste do material de fricção aproximadamente 30% maior do que o observado nos experimentos com matriz repetitiva, evidenciando que a alternância das condições de frenagem impacta diretamente no desgaste. Uma hipótese que pode explicar este comportamento é a de que o filme tribológico depositado sobre o disco e os platôs de contato de pastilha sofrem uma perturbação maior quando os parâmetros de frenagem são alternados.

Conforme discutido na seção 4.2.2, a distribuição de pressão entre material de fricção e rotor pode não ser uniforme, resultando em pressões de contato localmente elevadas, impactando na formação, distribuição e estabilização do filme tribológico e dos platôs de contato. Condições extremas de severidade, por exemplo, podem levar à deterioração e rompimento do filme [Fernandes et al., 2013]. A remoção dos platôs de contato e do filme tribológico sob determinadas condições de frenagem pode acarretar uma mudança do regime de desgaste para uma condição mais severa. Esse tópico é discutido a seguir.

4.5 Transição de regimes de desgaste

A transição nos regimes de desgaste de pares tribológicos é um fenômeno no qual a taxa de desgaste é abruptamente alterada. Normalmente, o regime de desgaste é classificado como

moderado (desgaste baixo) e severo (desgaste elevado). Na literatura, encontram-se diversos trabalhos relacionados à transição do mecanismo (ou regime) de desgaste aplicados a pares tribológicos metálicos e não metálicos (polímeros).

Um dos primeiros trabalhos relatando este fenômeno foi realizado por Welsh, nos anos 60 [Welsh, 1965a; Welsh, 1965b]. O autor realizou uma série de experimentos do tipo pino no anel (*pin-on-ring*), utilizando diferentes tipos de aço como par tribológico. Diversas velocidades de deslizamento e forças normais foram empregadas visando a avaliar sua influência na transição do regime de desgaste. A Figura 4.32 mostra alguns destes resultados.

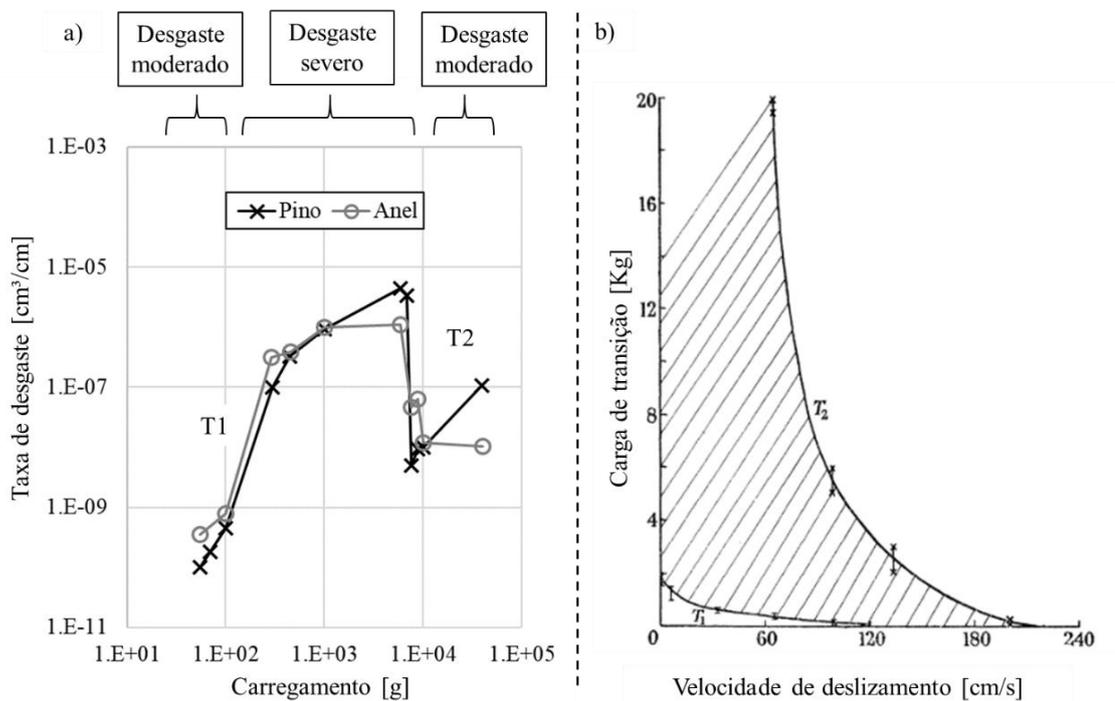


Figura 4.32 – Transição do regime de desgaste para um par tribológico metal-metal de aço 0,52% de carbono: a) taxa de desgaste em função do carregamento e b) carga de transição em função da velocidade de deslizamento [Adaptado: Welsh, 1965a].

Ao aumentar o carregamento em um ensaio com par tribológico metal-metal, o autor observou duas transições no desgaste do pino e do anel, chamadas de T1 e T2, conforme mostrado na Figura 4.32-a. Antes da transição T1 e após a transição T2, o regime de desgaste foi chamado de desgaste moderado. Na região entre a transição T1 e T2, o regime foi considerado severo. Observa-se um alto valor de taxa de desgaste no regime severo quando comparado ao regime moderado. Segundo o autor, em cargas baixas (abaixo de T1), o desgaste

severo foi inibido pela formação de óxidos finos aderidos nas superfícies dos corpos e pelo encruamento. Por outro lado, no regime de desgaste severo, partículas grosseiras foram formadas, contribuindo para o aumento do desgaste. Nesta condição, a formação de um filme de óxido é dificultada devido a grandes deformações plásticas [Welsh, 1965b]. Em cargas altas (acima de T2), o desgaste moderado ocorreu principalmente devido ao aumento de dureza resultante da mudança de fase (induzida pelas altas temperaturas geradas pelo atrito). Segundo o autor, o aumento de dureza foi suficiente para evitar o desgaste severo, não sendo necessária a presença de óxidos. Outra hipótese que explica essa mudança de regime severo para moderado (transição T2) é o aumento da temperatura. Temperaturas maiores contribuem para o aumento da taxa de formação de óxidos, o que inibiria o desgaste severo [Lancaster, 1957].

Em relação à velocidade de deslizamento (Figura 4.32-b), Welsh observou que o aumento da velocidade reduz a carga necessária para atingir a transição T1. O autor afirma que isto ocorre porque velocidades de deslizamento elevadas reduzem o tempo para que ocorra a oxidação das superfícies, facilitando o desgaste severo [Welsh, 1965b]. O aumento de velocidade também reduz a carga necessária para atingir a transição T2. Takeuchi, 1972, afirma que, em velocidades altas, ocorre a formação de uma camada de dureza elevada, sugerindo a formação de martensita.

Diversos outros estudos direcionados à transição dos regimes de desgaste aplicados a metais são encontrados na literatura, onde comumente o desgaste moderado é associado à tribo-oxidação. Podem-se citar estudos com aço carbono [Eyre e Maynard, 1971], ferro fundido [Takeuchi, 1972] e aços-liga com diferentes durezas [Viáfara e Sinatora, 2009]. Neste último, ensaios do tipo *pin-on-disc* foram realizados utilizando uma única força normal e velocidade de deslizamento. Os autores utilizaram um aço baixa liga (AISI 4140) como pino, atritado contra discos de aço ferramenta (AISI H13). Através de tratamento térmico, foram obtidos discos com durezas distintas (525 HV e 460 HV). A Figura 4.33 mostra os resultados de atrito e desgaste do pino mensurados nos experimentos.

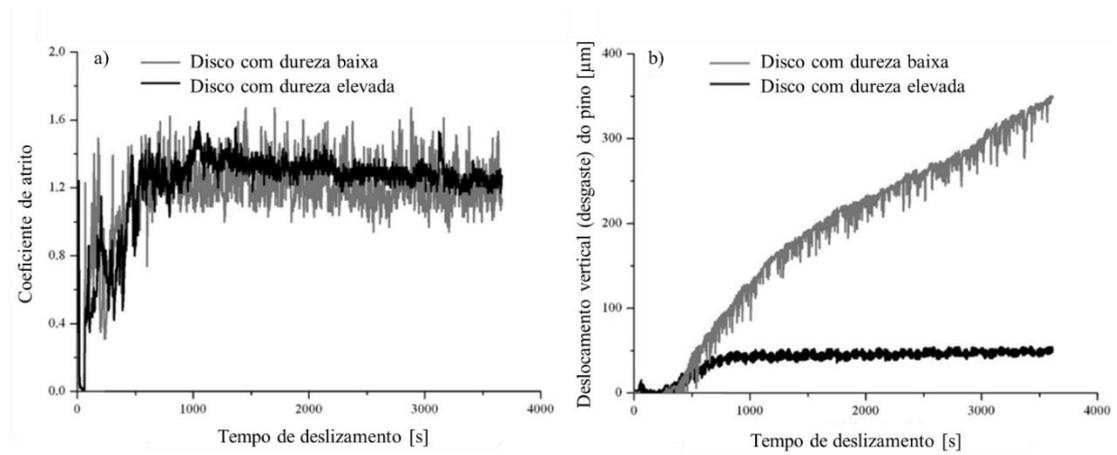


Figura 4.33 – Resultados dos experimentos com discos de dureza alta e baixa: a) atrito e b) desgaste do pino [Adaptado: Viáfara e Sinatora, 2009].

O comportamento do coeficiente de atrito médio não apresentou diferenças significativas entre os discos com baixa e elevada dureza. Entretanto, o experimento com o disco de dureza baixa foi o que apresentou maiores variações do atrito quando comparado ao experimento com disco de dureza elevada (Figura 4.33-a). Além disso, o experimento com disco de dureza baixa apresentou desgaste de pino excessivamente superior ao experimento com disco de dureza elevada (Figura 4.33-b). Os autores também registraram, através de microscopia ótica, o aspecto da superfície do par tribológico após os experimentos, bem como a rugosidade do disco, conforme mostrado na Figura 4.34.

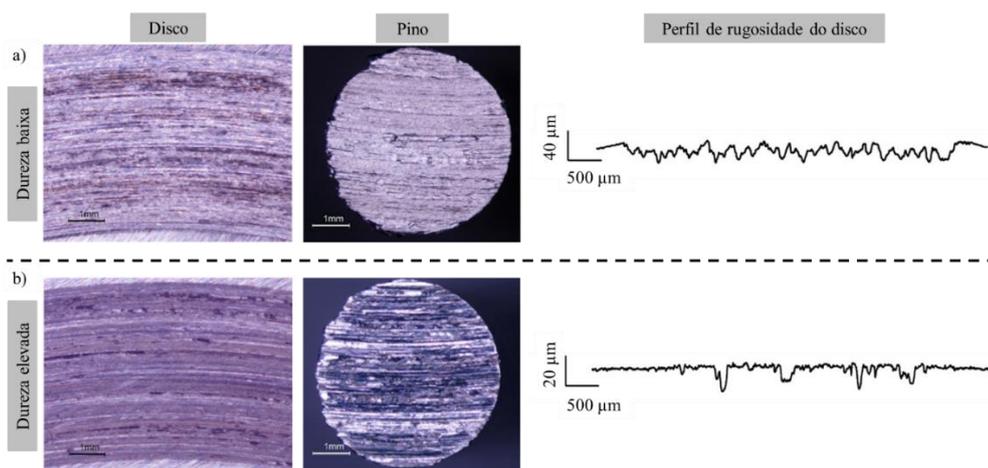


Figura 4.34 – Microscopia ótica do disco e do pino e perfil de rugosidade do disco após os ensaios com: a) disco com dureza baixa e b) disco com dureza elevada [Adaptado: Viáfara e Sinatora, 2009].

Nota-se que, nos experimentos com o disco de dureza baixa (Figura 4.34-a), a superfície do par tribológico apresentou uma aparência mais clara do que a observada nos ensaios com disco de dureza elevada (Figura 4.34-b). O desgaste severo foi caracterizado pela ocorrência de adesão e de deformação plástica das superfícies em contato, resultando em uma superfície clara e rugosa. Por outro lado, o experimento com o disco de dureza elevada gerou uma superfície mais escura (devido à presença de óxidos) e com rugosidade menor, levando a um desgaste moderado.

Também se encontram na literatura trabalhos relatando a transição de regimes de desgaste aplicados a polímeros. Entre eles, pode-se destacar o trabalho de Gehlen et al., 2021, no qual os autores realizaram experimentos em um tribômetro. Neste estudo, amostras de poliacetal com negro de fumo foram atritadas contra um disco de ferro fundido cinzento com uma pressão de contato de 1,15 MPa. Nove diferentes velocidades de deslizamento foram aplicadas, em três temperaturas distintas. Os autores avaliaram a influência da temperatura no chamado limite PV. O limite PV é o produto entre pressão de contato e velocidade de deslizamento impostas no par tribológico, no qual leva à transição de regime de desgaste do polímero de uma condição moderada para severa. Observou-se neste estudo que o limite PV é fortemente influenciado pela temperatura inicial do experimento. Em temperaturas baixas, foi constatada a alteração de regime em um determinado valor de PV. Entretanto, em temperaturas elevadas, o mesmo valor de PV manteve o regime de desgaste moderado. De acordo com os autores, as altas temperaturas contribuíram para a formação de um filme polimérico depositado sobre o disco, evitando o desgaste severo.

Alguns poucos estudos podem ser encontrados na literatura relacionados à transição de regimes de desgaste para materiais de fricção. A seguir, alguns destes estudos serão apresentados. Um detalhamento maior será dado na descrição destes estudos, visto que materiais de fricção são o tema da atual tese.

No trabalho de Straffelini e Maines, 2013, experimentos foram realizados em um ensaio do tipo bloco no disco (*block-on-disc*), esquematizado na Figura 4.35. Dois termopares foram instalados no bloco, a fim de estimar a temperatura de contato do par tribológico.

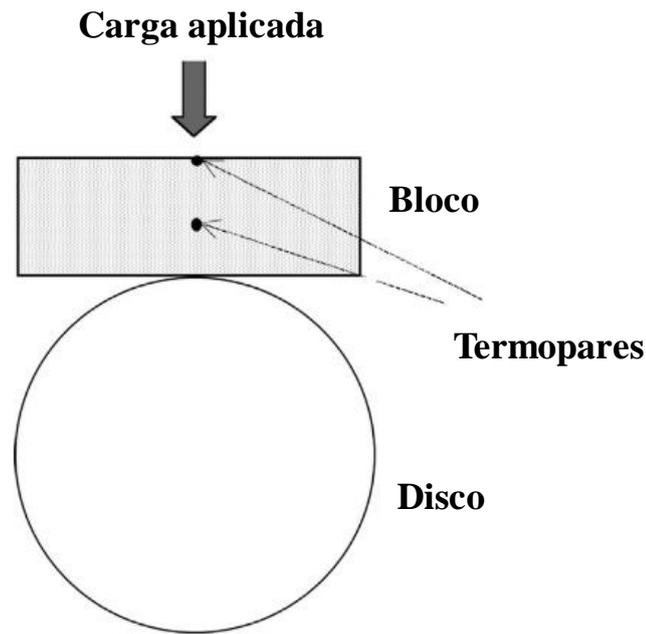


Figura 4.35 - Esquema do aparato bloco no disco [Adaptado: Straffelini e Maines, 2013].

Neste tipo de experimento, tem-se inicialmente uma linha de contato entre o par tribológico, visto que o material de fricção (bloco) possui uma geometria retangular na face de contato com o disco. Assim, foi realizada uma etapa de assentamento entre o bloco e o disco, de forma a obter, através do desgaste do bloco, uma superfície conformante entre os dois corpos. Os materiais de fricção utilizados foram duas pastilhas de freio comerciais distintas do tipo SM (A e B), atritadas contra um disco de ferro fundido cinzento. A etapa de assentamento foi realizada utilizando-se uma força normal de 50 N a uma velocidade de deslizamento constante de 0,94 m/s durante duas horas. Após esta etapa, foram realizados experimentos com o intuito de avaliar a taxa de desgaste dos materiais de fricção e discos. Utilizaram-se diferentes valores de força normal, variando de 100 a 700 N, durante 30 minutos cada, a uma velocidade de deslizamento constante de 0,94 m/s. Na Figura 4.36, são apresentados os resultados de atrito e temperatura do material de fricção em função da carga aplicada.

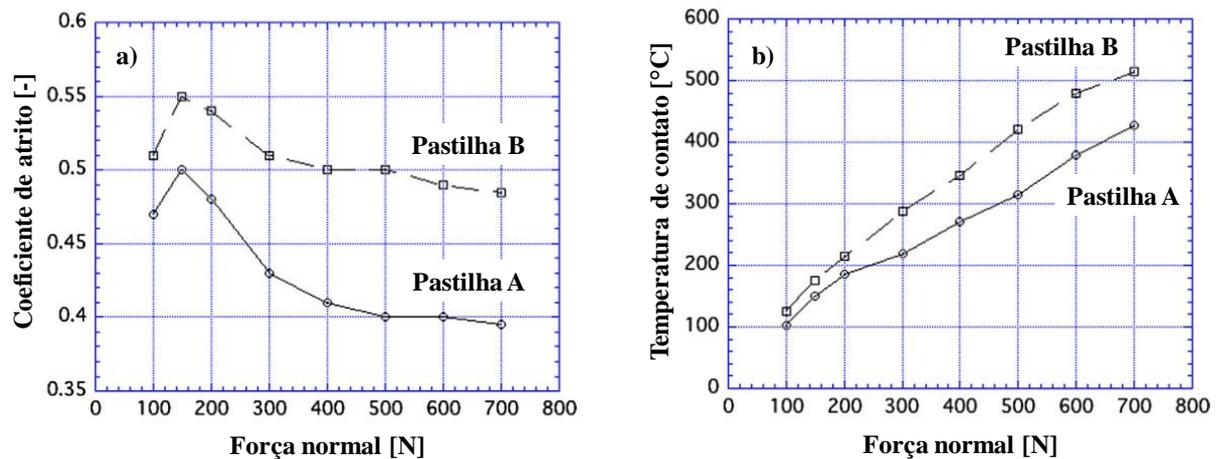


Figura 4.36 – Evolução: a) do coeficiente de atrito e b) da temperatura de contato em função da força normal aplicada [Adaptado: Straffelini e Maines, 2013].

Observa-se na Figura 4.36-a que o material B apresentou valores de coeficiente de atrito superiores ao do material A para todos os valores de força normal. Na Figura 4.36-b, um crescimento aproximadamente linear entre temperatura das pastilhas e carga aplicada é observado, onde o material B apresentou temperatura superior ao material A. Os autores observaram duas regiões distintas de desgaste (disco e pastilha), conforme mostrado na Figura 4.37.

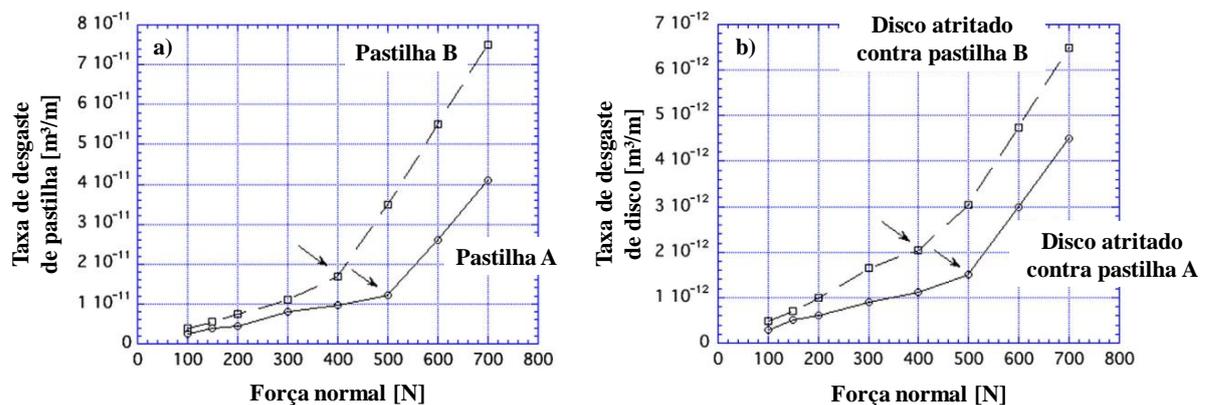


Figura 4.37 - Taxas de desgaste de: a) pastilha e b) disco em função da força normal. As setas indicam mudança de regime de desgaste [Adaptado: Straffelini e Maines, 2013].

Para a pastilha A, nota-se uma relação linear crescente entre desgaste (de pastilha e disco) e força normal aplicada até o valor de 400 N. Em forças maiores (a partir de 500 N),

também ocorre um aumento linear, entretanto, com uma taxa maior, indicando uma alteração no regime de desgaste. O mesmo fenômeno ocorre para os ensaios com a pastilha B, contudo, ocorrendo a mudança de regime a partir de uma força de 600 N.

Os autores atribuem esta mudança de regime de desgaste à elevação da temperatura de contato. Observa-se que a mudança de regime de desgaste ocorre em temperatura similar para os dois materiais: 310°C para a pastilha A e 350°C para a pastilha B. Segundo Straffelini e Maines, 2013, no primeiro regime (menor desgaste) o mecanismo de desgaste do par tribológico predominante é a abrasão. No segundo regime, o desgaste elevado da pastilha está associado à degradação térmica da resina fenólica. Já no disco, este desgaste elevado ocorre devido à tribo-oxidação. Os autores afirmam que, tanto a degradação da resina fenólica quanto a tribo-oxidação são processos termicamente ativados, ou seja, a alta temperatura contribui para sua ocorrência.

Outro estudo relacionado à transição do regime de desgaste em materiais de fricção foi realizado por Fernandes et al., 2013. Entretanto, este estudo foi aplicado a materiais de fricção utilizados em discos de embreagem. Os experimentos foram executados em um equipamento do tipo pino no disco (*pin-on-disc*), atritando o pino (material de fricção) em um disco de ferro fundido cinzento. Visando a alcançar a transição do regime de desgaste, duas velocidades de deslizamento (750 rpm, equivalente a 2,05 m/s, e 1200 rpm, equivalente a 3,57 m/s) e diversas forças normais (de 200 a 450 N) foram empregadas. Cada experimento teve duração de três horas. A Figura 4.38 mostra os resultados de desgaste em função da força normal e velocidade de deslizamento.

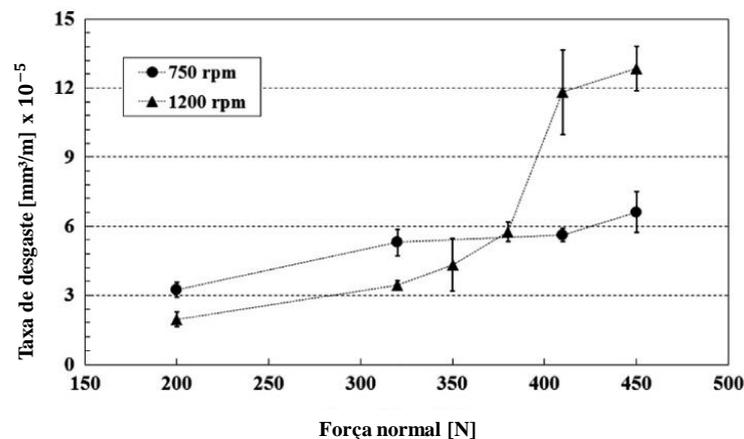


Figura 4.38 - Taxa de desgaste do par tribológico em função da força normal e velocidade de deslizamento [Adaptado: Fernandes et al., 2013].

Pode-se notar que, nos ensaios com velocidade de 2,05 m/s (750 rpm), a taxa de desgaste não sofreu grande alteração com o aumento da força normal, sendo chamado, neste caso, de desgaste moderado. Entretanto, no experimento a 3,57 m/s (1200 rpm), a taxa de desgaste aumentou abruptamente quando a força normal aumentou de 320 para 410 N, indicando que houve uma mudança no regime de desgaste para desgaste severo nesta condição. Uma análise da espessura do filme nas duas condições foi realizada através de um corte transversal no disco. Para isso, os autores realizaram um processo de niquelagem no disco, com o intuito de aumentar a resistência do filme depositado sobre o disco durante o corte. A seguir, o disco foi embutido em resina e cortado com uma serra diamantada. Finalmente, a superfície cortada foi lixada e polida, e então avaliada por microscopia eletrônica de varredura, conforme mostrado na Figura 4.39.

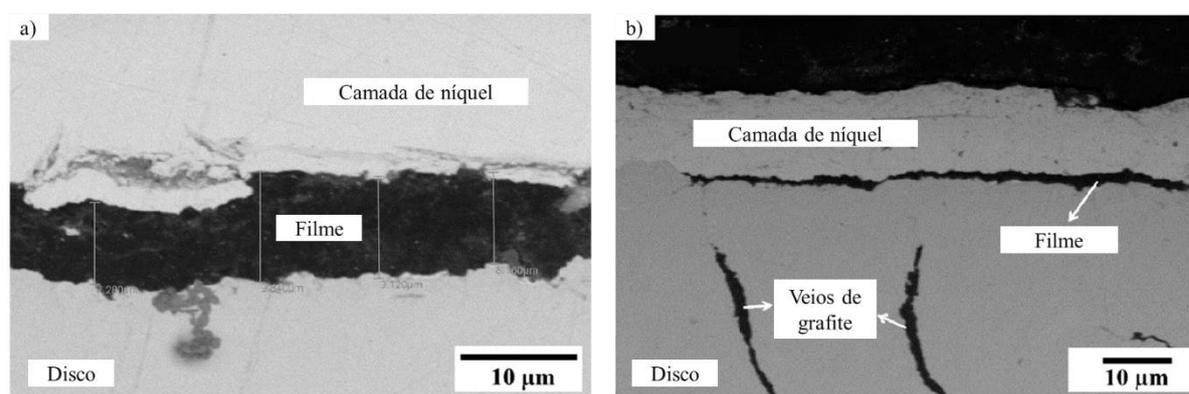


Figura 4.39 – Seção transversal do disco após os experimentos mostrando regime de desgaste: a) moderado e b) severo [Adaptado: Fernandes et al., 2013].

O filme depositado sobre o disco na condição de desgaste moderado (Figura 4.39-a) foi mais espesso ($\sim 8 \mu\text{m}$) e homogêneo que o observado nos experimentos de desgaste severo ($\sim 1,5 \mu\text{m}$, Figura 4.39-b). Os autores afirmam que as condições de ensaio influenciaram a formação e estabilidade do filme, onde velocidades de deslizamento e forças normais maiores contribuem para a ocorrência da transição do regime de desgaste de moderado para severo. Cabe aqui salientar que a condição de aplicação de materiais de fricção utilizados em embreagens (como neste trabalho de Fernandes et al., 2013) difere muito da aplicação utilizada em pastilhas ou lonas de freio. Normalmente, o escorregamento relativo entre o disco de embreagem (material

de fricção) e volante (rotor) ocorre em um curto período, prevalecendo o atrito estático. Por outro lado, em sistemas de freio, o período de escorregamento é maior.

A escassez de literatura focada na transição dos regimes de desgaste em materiais de fricção aplicados a freios automotivos dificulta a compreensão do fenômeno, o qual parece estar intimamente ligado ao desgaste destes compósitos. Neste contexto, a presente tese visa a um aprofundamento no assunto.

5. CONTRIBUIÇÃO DA TESE

Esta tese visa a uma melhor compreensão do fenômeno de transição do regime de desgaste que ocorre em materiais de fricção utilizados em freios automotivos, ainda pouco relatado na literatura científica. Lacunas identificadas na revisão bibliográfica neste tema podem ser listadas:

- Quais as condições de frenagem (pressão de contato e velocidade de deslizamento) necessárias para induzir a transição do regime de desgaste moderado para severo ou vice-versa?
- Como ocorre a dinâmica de formação e remoção do filme sobre o rotor e dos platôs de contato sobre o material de fricção nos diferentes regimes?
- Existem diferenças morfológicas e de composição nos rotores, nos materiais de fricção e nos detritos nos dois regimes de desgaste?

As respostas para estas lacunas são o alvo da presente tese, buscando ampliar o conhecimento do assunto, além de propor novas metodologias de análise de superfície do rotor e do material de fricção. Uma melhor compreensão neste sentido pode contribuir para explicar alterações significativas no atrito e no desgaste observadas em ensaios em dinamômetros e em experimentos em veículos. Estas alterações podem estar ocorrendo em função da pressão de contato não ser uniforme no par tribológico. Esta não uniformidade ocasiona pressões maiores em determinadas regiões do contato do par, podendo levar a alterações no regime de desgaste de forma localizada, acarretando taxas de desgaste acentuadas na aplicação.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Tribologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em parceria com a empresa Fras-le. A Fras-le, com matriz em Caxias do Sul (RS, Brasil), é uma empresa que, entre outros itens, desenvolve, produz e comercializa materiais de fricção aplicados em sistemas de frenagem, sendo uma das maiores fabricantes mundiais destes produtos [Fras-le, 2022]. Neste Capítulo são mostrados os equipamentos utilizados nos estudos, bem como as técnicas empregadas para caracterização das amostras durante os experimentos.

6.1 Tribômetro

O equipamento utilizado para a realização dos ensaios tribológicos dos materiais de fricção avaliados neste estudo foi o tribômetro do Laboratório de Tribologia da UFRGS – LATRIB, mostrado na (Figura 6.1).

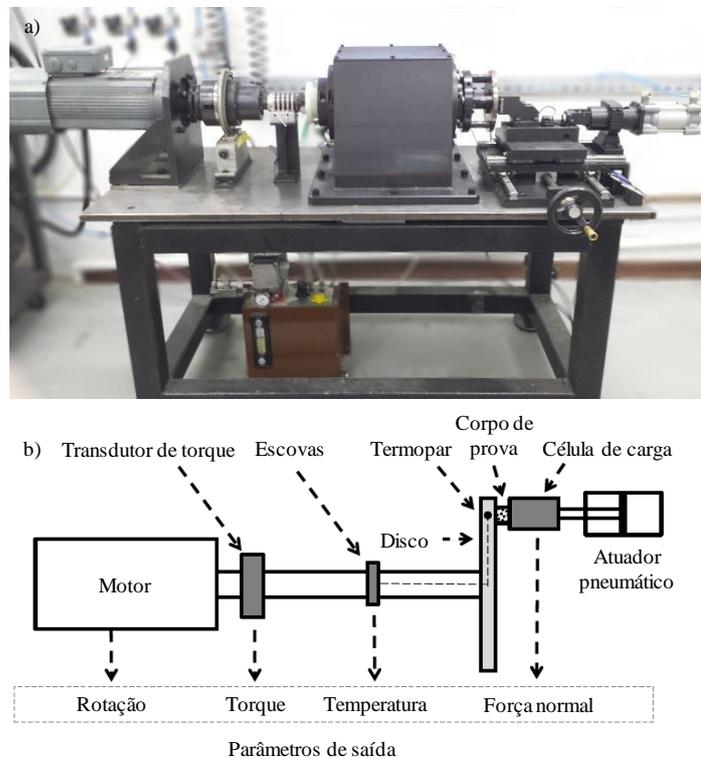


Figura 6.1 – Tribômetro do LATRIB: a) fotografia digital e b) diagrama esquemático do tribômetro [Adaptado: Pavlak et al., 2017].

Este equipamento (do tipo pino no disco), projetado de acordo com a teoria de escala descrita por Sanders et al., 2001, é capaz de reproduzir as condições de pressão, velocidade de deslizamento e temperatura encontradas em sistemas de freio reais [Neis, 2012]. O tribômetro é constituído de um servomotor, no qual impõe uma rotação controlada no eixo, permitindo inclusive desacelerações que simulem uma frenagem de parada total de veículo, por exemplo. Um transdutor de torque é montado diretamente sobre o eixo, o que possibilita o monitoramento em tempo real do torque durante os experimentos. O corpo de prova (material de fricção) é pressionado contra o disco através de um atuador pneumático em um determinado raio de deslizamento, dado pela distância entre o centro do corpo de prova e o eixo do tribômetro. A força normal de atuação, por sua vez, é mensurada através de uma célula de carga, e controlada por malha fechada. Este equipamento 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. No tribômetro, o coeficiente de atrito (μ) é calculado através da Equação 6.1.

$$\mu = \frac{T}{F_N \cdot R} \quad (6.1)$$

Onde:

- T - Torque frenante [N.m]
- F_N - Força normal exercida pelo material de fricção sobre o disco [N]
- R - Raio de deslizamento (ou raio efetivo) [m]

As especificações do tribômetro, por sua vez, são apresentadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Especificações técnicas do tribômetro do LATRIB [Adaptado: Barros et al., 2019a].

Potência do motor [kW]	11
Rotação [RPM]	De 0,2 a 4100
Força normal [N]	Até 1000
Raio de deslizamento [mm]	De 30 até 90
Temperatura [°C]	Ambiente até 550 °C
Tipo de movimento	Deslizamento puro

Através de um estudo realizado por Pavlak et al., 2017, pode-se afirmar que, para os valores de torque e força normal utilizados no presente trabalho, o erro do coeficiente de atrito, determinado em função dos sensores e instrumentos, é menor do que 3%. Maiores detalhes sobre o projeto e funcionamento deste equipamento podem ser encontrados em Neis, 2012.

6.2 Material de fricção e disco

O material de fricção utilizado como corpo de prova (pino), chamado neste trabalho de CP, consiste em uma pastilha de freio comercial do tipo SM (com cobre), utilizada no mercado de reposição de caminhonetes e utilitários leves, a qual foi usinada em formato cilíndrico de 15 mm de diâmetro. Por motivos de sigilo industrial, a sua composição exata não é mostrada. A composição aproximada deste material é apresentada na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Composição da pastilha de freio utilizada.

Categoria		Volume [%]
Fibras	Metálicas	20
	Não metálicas	2
Aglomerantes	Resina fenólica	20
	Viscoelásticos	10
Lubrificantes		28
Abrasivos		5
Enchimento		15

Algumas propriedades mecânicas deste material foram fornecidas diretamente pelo fabricante. Os valores do módulo de elasticidade, da tensão máxima de cisalhamento e da densidade, apresentados na Tabela 6.3, foram obtidas através de experimentos que seguiram as normas ISO 6311 [ISO, 1980] e NRB 5544 [NBR, 1998].

Tabela 6.3 – Propriedades mecânicas do material de fricção utilizado.

Propriedade	Norma	Valor
Módulo de elasticidade [MPa]	ISO6311	535,40
Tensão máxima de cisalhamento [MPa]	ISO6311	19,54
Densidade [g/cm ³]	NBR5544	2,94

Os rotores utilizados neste estudo são constituídos de ferro fundido cinzento, material comumente utilizado para discos de freio automotivo comerciais [Nogueira et al., 2020b]. A fabricação dos rotores seguiu as especificações da Norma SAE J661 [SAE International, 2012], devendo apresentar estrutura perlítica e dureza entre 179 e 229 HB. Esta norma recomenda práticas para o controle de qualidade de materiais de fricção e rotores em experimentos laboratoriais. A Tabela 6.4 mostra a composição aproximada dos rotores, conforme esta norma.

Tabela 6.4 – Composição dos rotores [SAE International, 2012].

Categoria	% em massa
Carbono	3,30 - 3,50
Manganês	0,55 - 0,75
Silício	1,80 - 2,10
Enxofre	0,20 (Máx)
Fósforo	0,20 (Máx)
Níquel	0,60 - 0,70
Cromo	0,15 - 0,25
Molibdênio	0,20 - 0,30

Todos os rotores utilizados neste estudo foram confeccionados pelo mesmo fabricante, e pertencem ao mesmo lote de fabricação. Para a confirmação de que estes rotores atendam a Norma SAE J661, duas amostras de dois rotores foram submetidas a um ensaio de dureza Brinell. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS (LAMEF), em um durômetro marca Emco-test, modelo Duravision, sendo realizados cinco pontos de medições de dureza para cada amostra.

Além da avaliação da dureza, estas amostras foram submetidas a uma análise metalográfica, também realizada no LAMEF. As amostras dos rotores foram primeiramente embutidas em baquelite, sendo então submetidas a um lixamento gradual com lixas de diferentes granulometrias (120, 220, 320, 400, 600 e 1200, nesta ordem). A cada granulometria, a superfície da amostra foi lixada com uma variação angular de 90°. Após o lixamento, as amostras foram polidas em uma máquina politriz, com pasta diamantada. Finalmente, as amostras foram submetidas a um ataque químico utilizando Nital 2%. Estas amostras foram então avaliadas em microscópio ótico com magnificação de 100 X e 500 X, e comparadas com

padrões de metalografia encontrados na literatura [ASTM International, 2019]. Os resultados dos ensaios de dureza e da metalografia dos rotores são mostrados na seção 7.1.

Os rotores foram fabricados no formato de um disco com 159 mm e 12 mm de diâmetro e espessura, respectivamente. Antes do início de cada experimento no tribômetro, 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 $0,20\ \mu\text{m}$. Além disso, a sequência de lixas promove a remoção de filme depositado sobre o disco em experimentos anteriores permitindo, assim, condições iniciais idênticas da superfície do disco nos diferentes ensaios realizados. Um termopar tipo K foi instalado no interior do disco, posicionado a uma distância de 2 mm de sua superfície e no mesmo raio de deslizamento do pino, ou seja, no centro da trilha atritada. Através de um sistema de escovas acoplado no eixo do equipamento, foi possível monitorar e registrar em tempo real a temperatura do disco, na qual foi adquirida a uma taxa de 1000 Hz. A Figura 6.2 mostra uma imagem fotográfica de um dos pares tribológicos utilizados nos experimentos.

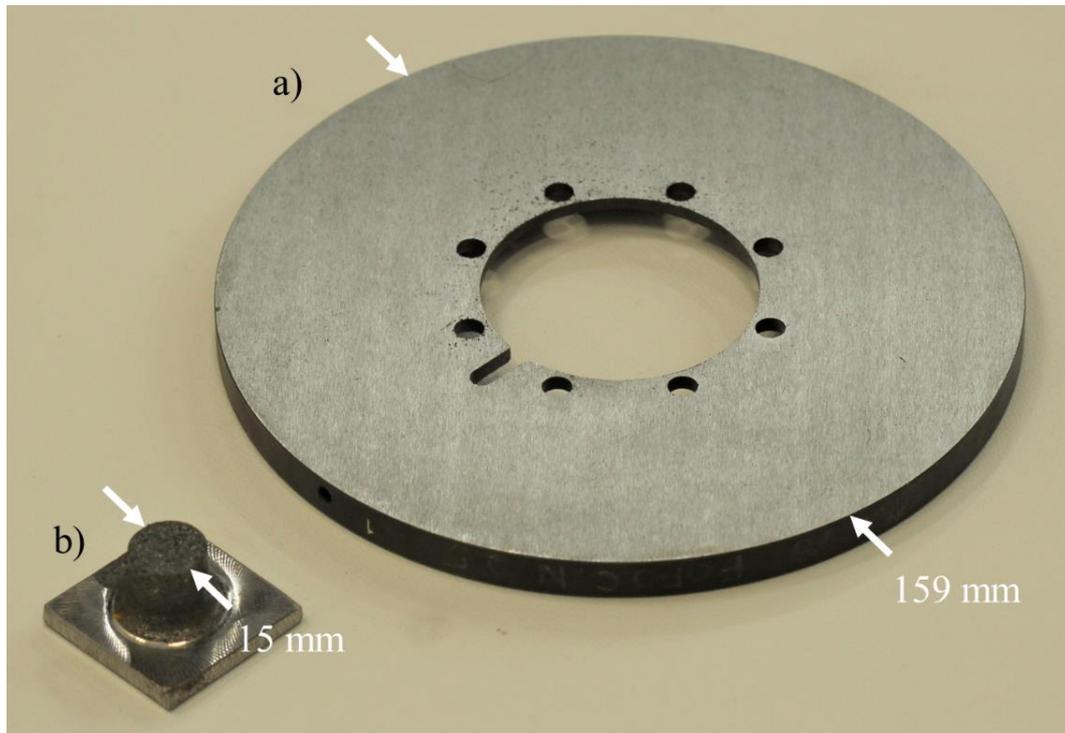


Figura 6.2 – Par tribológico utilizado nos experimentos: a) disco e b) material de fricção.

6.3 Desgaste dos pinos

Uma balança eletrônica marca Marte, modelo AY220, com resolução de 0,1 mg, foi utilizada para mensurar o desgaste em massa das pastilhas utilizadas como pinos. O desgaste foi avaliado a cada conjunto de frenagens, que dependerá do estudo em questão (conforme será mostrado nas metodologias utilizadas nos subcapítulos 7.2, 7.3 e 7.4). O desgaste foi então normalizado com base na soma da energia de todas as frenagens de cada conjunto de frenagens. Diversos autores realizam a normalização de desgaste de forma similar, como, por exemplo, Kim e Jang, 2000; Jang et al., 2004; Cho et al., 2005 e Yoon et al., 2012. A energia de cada frenagem é dada pela Equação 6.2.

$$E = F_N \mu d \quad (6.2)$$

Onde:

- E – Energia de cada frenagem [N.m ou J]
- F_N – Força normal média de cada frenagem [N]
- μ – Coeficiente de atrito médio de cada frenagem [-]
- d – Distância de deslizamento [m]

Desta forma, o desgaste normalizado de um conjunto de frenagens é dado pela Equação 6.3.

$$\Delta W_N = \frac{\Delta_m}{E_T} \quad (6.3)$$

Onde:

- ΔW_N – Desgaste normalizado [g/J]
- Δ_m – Desgaste do pino em cada conjunto de frenagem, medido pela balança [g]
- E_T – Energia total, dada pela soma das energias individuais das frenagens em um dado conjunto de frenagens [J]

6.4 Coleta dos detritos

Um dispositivo foi desenvolvido para a coleta dos detritos soltos durante as frenagens para alguns dos experimentos realizados para esta tese. Este dispositivo é constituído por uma calha, localizada abaixo do disco, de forma a possibilitar a coleta de detritos ejetados da interface tribológica pino/disco. No centro desta calha, alinhado verticalmente com o centro do pino, foi instalado um suporte, onde um sugador de pó é acoplado. Desta forma, os detritos que caem na calha são direcionados para o suporte. Neste suporte, um filtro de papel é fixado, no qual os detritos ficam depositados. A Figura 6.3 mostra o sistema para a coleção de detritos.

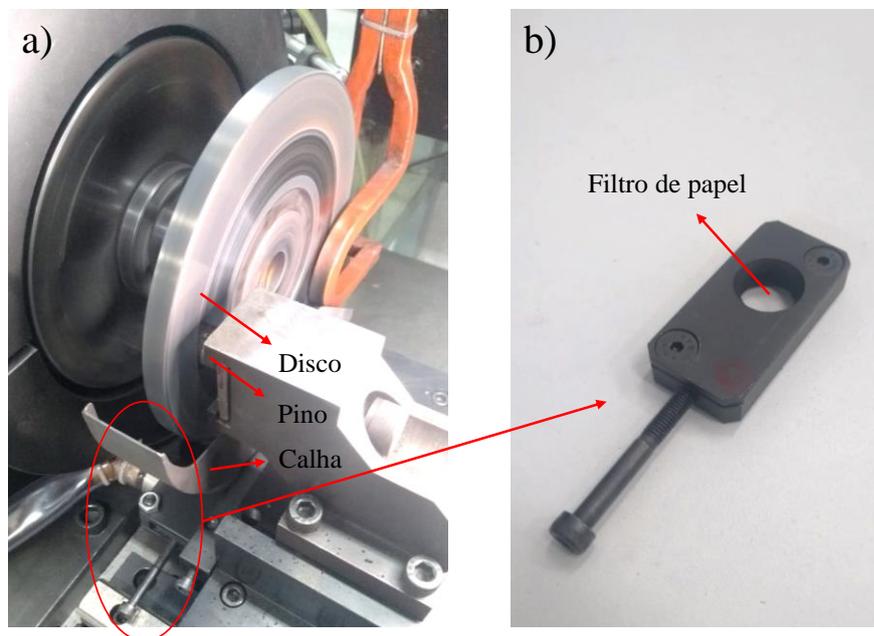


Figura 6.3 – Sistema para coleção de detritos durante frenagens: a) aparato e b) detalhe do suporte para o filtro.

Os detritos são coletados durante um certo número de frenagens, dependendo do estudo. A coleta ocorre a partir de uma determinada frenagem do procedimento escolhido. Antes desta coleta, é aplicado ar comprimido na calha e no suporte para o filtro, de modo a remover os detritos oriundos de frenagens anteriores. Após este procedimento, o filtro de papel é devidamente instalado no suporte, o sugador de pó é ligado e as frenagens para coleta são iniciadas. Desta forma, pode-se obter os detritos oriundos apenas das frenagens em análise. Após as frenagens de coleta, o suporte é removido, e o filtro de papel com os detritos é

analisado. A análise dos detritos foi realizada através de três procedimentos: microscopia ótica, espectroscopia Raman e MEV, descritos nas seções 6.5.5, 6.5.6 e 6.5.7, respectivamente.

6.5 Análise de superfície

6.5.1 Microscopias da superfície das pastilhas e morfologia dos platôs de contato

Ao longo dos experimentos, microscopias da superfície das pastilhas de freio foram registradas entre as frenagens executadas. As imagens foram obtidas através de um microscópio marca Carl Zeiss, modelo Axio LabA.1, equipado com uma câmera digital de resolução de 5 megapixels. Um dispositivo foi utilizado no microscópio para possibilitar o registro das imagens sempre na mesma região da pastilha. Desta forma, pode-se avaliar a evolução da superfície das pastilhas de freio entre frenagens.

Com o intuito de quantificar os platôs de contato na pastilha, as microscopias foram analisadas através de um programa baseado no algoritmo de Otsu, 1979. O algoritmo de Otsu é um dos diversos métodos de binarização utilizados para converter uma imagem em tons de cinza para monocromática. Assim, pode-se selecionar os limites dos níveis de cinza que melhor separam os elementos de interesse desta imagem. Foi, então, utilizado um programa desenvolvido pelo grupo de pesquisadores do LATRIB em linguagem Matlab (Mathworks) e registrado na SEDETEC (Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico) pelo nome de LATRIB Pro-AC. O LATRIB Pro-AC permite estimar o percentual de área dos platôs de contato da pastilha de freio. Maiores detalhes do funcionamento do LATRIB Pro-AC podem ser encontrados em Masotti et al., 2015; Neis et al., 2015 e Poletto et al., 2018. A Figura 6.4 mostra um exemplo de aplicação deste programa utilizado em pastilhas de freio automotivo.

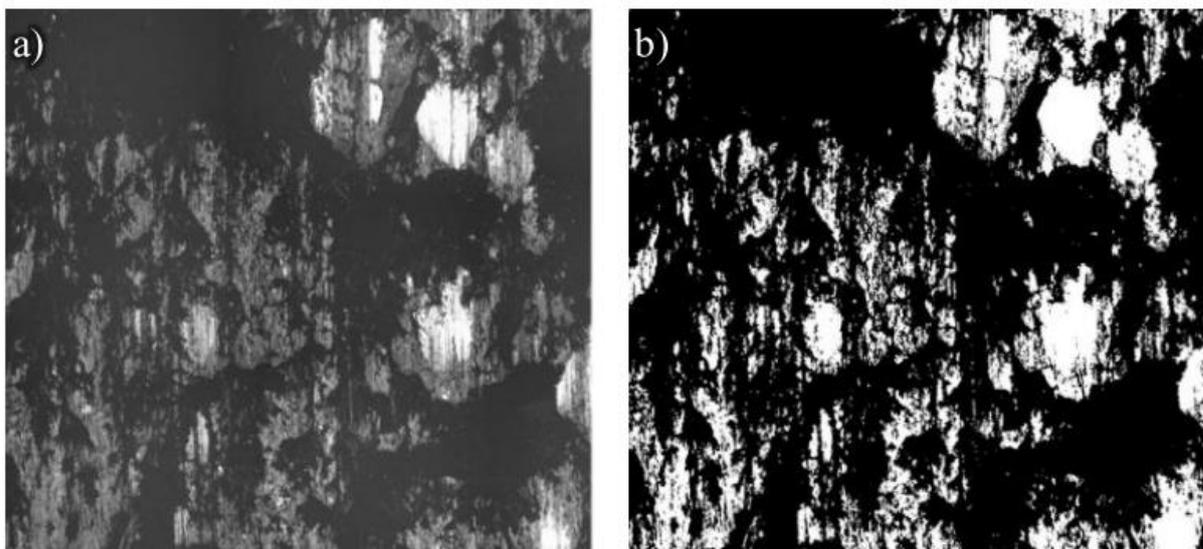


Figura 6.4 – Exemplo de processamento utilizando o LATRIB Pro-AC para pastilhas de freio: a) microscopia em tons de cinza e b) binarização através da aplicação do método (dimensões de cada microscopia: 4,72 mm x 3,98 mm – largura x altura) [Adaptado: Barros et al., 2016].

Na Figura 6.4-a, uma microscopia em tons de cinza de uma pastilha de freio após frenagens é apresentada. A Figura 6.4-b mostra a imagem obtida após o processamento pelo LATRIB Pro-AC. Com esta técnica, as regiões em branco são classificadas como platôs de contato (primários e secundários), enquanto a região preta corresponde a regiões mais baixas (chamadas de *lowlands*). Desta forma, podem-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. A título de exemplificação, o processamento da imagem da Figura 6.4 pelo programa LATRIB Pro-AC forneceu um valor de 18,7% de área de platôs de contato.

6.5.2 Imagens da superfície dos discos e quantificação do filme

Uma metodologia foi desenvolvida para permitir o registro fotográfico da superfície do disco. Com o auxílio de um sinal de gatilho, no qual é emitido automaticamente pelo tribômetro ao final de cada frenagem, foi utilizado um sistema de aquisição para obter imagens do disco. Para isso, foi utilizado um estereomicroscópio óptico marca Carl Zeiss, modelo Stemi 508, equipado com uma câmera digital de resolução de 5 megapixels. Ao longo desta tese, esta metodologia foi sendo aprimorada. Em alguns experimentos, ao invés da utilização do

estereomicroscópio ótico, optou-se pela utilização de uma câmera digital fotográfica marca Canon, modelo EOS Rebel SL1, com resolução de 18 megapixels, equipada com uma lente Canon Ef 100mm F/2.8 Macro USM e com um anel de LED para iluminação do disco. Essa alteração de equipamento ocorreu por dois motivos principais: primeiro, devido ao aumento de resolução das imagens, possibilitando um maior detalhamento das fotos e, segundo, devido à câmera digital ser mais compacta, permitindo uma maior agilidade na preparação dos experimentos. A Figura 6.5 mostra o aparato utilizando a câmera digital posicionada na frente do disco do tribômetro.

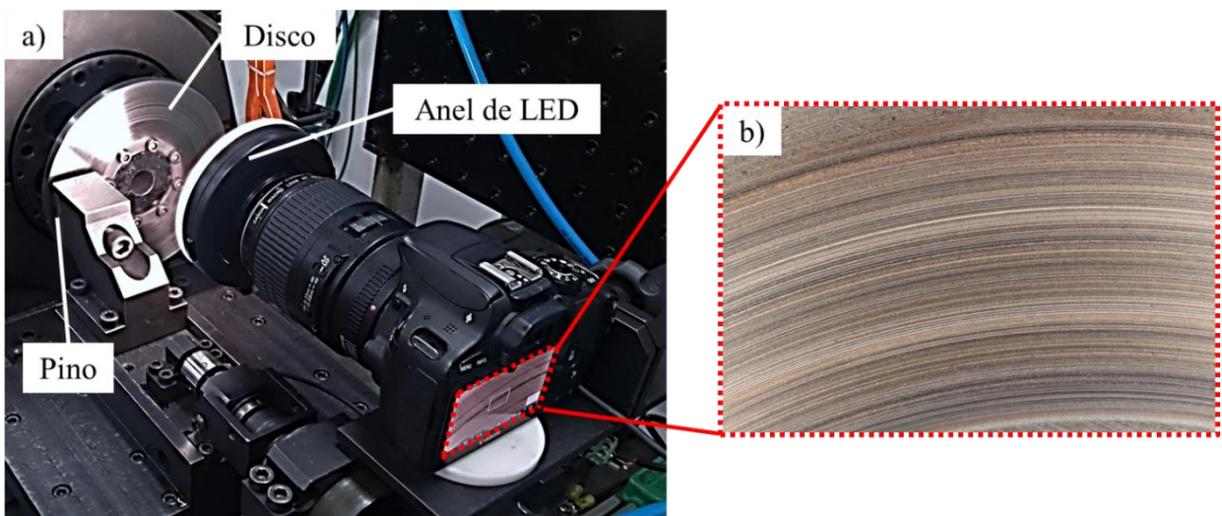


Figura 6.5 – Aparato experimental montado para o registro da superfície atritada do disco utilizando a câmera digital: a) posicionamento da câmera e b) fotografia obtida [Adaptado: Barros et al., 2021].

Na Figura 6.5-b, percebe-se uma região escura na superfície do disco, que representa a trilha por onde o pino foi atritado. Fernandes et al., 2013, obtiveram uma fotografia similar a esta em um disco atritado contra um material de fricção, onde também se observa uma região escura na trilha de atrito. Os autores realizaram uma análise em MEV e EDS, evidenciando a presença de ferro, bem como de matérias-primas da pastilha aderidas na superfície do disco na região atritada (mais escura). Por outro lado, na região não atritada (mais clara), foi observado basicamente ferro. Desta forma, conclui-se que a região escura seja, de fato, o filme tribológico.

As imagens obtidas do disco (tanto nos experimentos utilizando o estereomicroscópio ótico, quanto nos que se utilizou a câmera digital) foram submetidas a um programa

desenvolvido em Matlab (Mathworks) pelo grupo de pesquisadores do LATRIB. Este *software* foi registrado na SEDETEC pelo nome de LATRIB Pro-FD. O LATRIB Pro-FD tem como intuito quantificar o depósito de filme no disco de acordo com a tonalidade da região escura (região atritada). Um exemplo de imagem do disco obtida pelo estereomicroscópio óptico é mostrado na Figura 6.6.

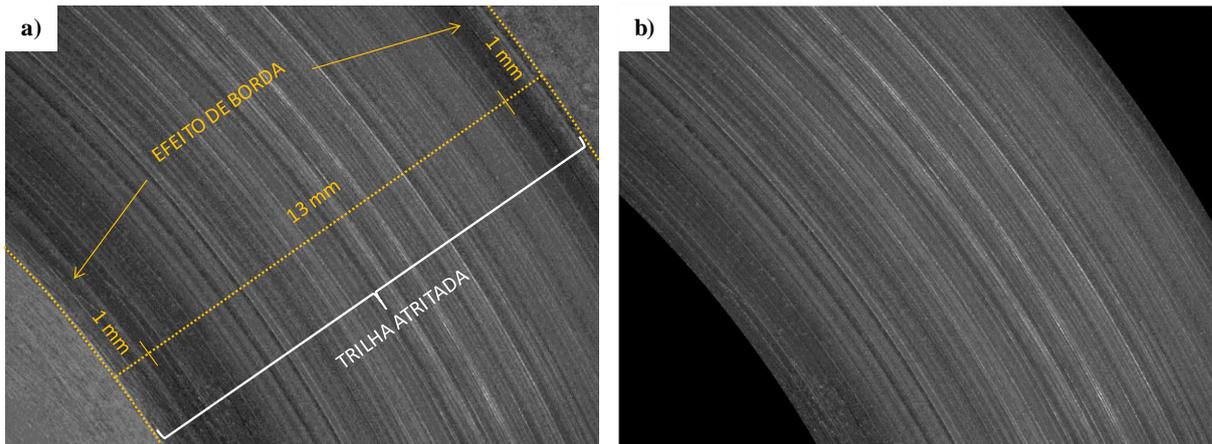


Figura 6.6 – Análise da superfície do disco: a) microscopia e b) trilha atritada a ser analisada, desconsiderando o efeito de borda [Adaptado: Barros et al., 2019b].

No LATRIB Pro-FD, as imagens da superfície do disco são primeiramente convertidas em tons de cinza, onde a intensidade de cada pixel varia de 0 (pixel preto) a 255 (pixel branco). A seguir, o LATRIB Pro-FD desconsidera da análise os efeitos de borda, onde 1 mm de cada lado da trilha atritada é excluído. O efeito de borda consiste em uma região mais escura (com maior quantidade de filme) observada nas bordas da trilha atritada, conforme mostrado na Figura 6.6-a. O centro da trilha atritada suporta a maior parte do carregamento, ocorrendo um menor acúmulo de filme nesta região [Davin et al., 2019]. Assim, no decorrer de diversas frenagens, o filme é “empurrado” para os limites da trilha atritada, levando ao efeito de borda. Desta forma, o desconto de 1 mm de cada lado da trilha tem o intuito de possibilitar a análise apenas na região central dessa trilha (Figura 6.6-b). O LATRIB Pro-FD então calcula o valor médio da intensidade dos pixels da trilha atritada, na qual encontra-se o filme. Desta forma, quanto maior o valor da média da intensidade dos pixels (pixels mais claros), menor a quantidade de filme depositado sobre o disco. De forma contrária, valores menores de média

da intensidade dos pixels (pixels mais escuros) representam um maior depósito de filme sobre o disco.

O *software* também permite a análise da homogeneidade radial do filme depositado sobre o disco ao longo das frenagens. Para isso, o *software* utiliza uma linha radial traçada sobre o filme no disco. Esta linha permite se obter informações sobre a distribuição radial de intensidade de pixels do filme para cada frenagem realizada. Desta forma, pode-se gerar um gráfico em três dimensões, o qual é função da intensidade dos pixels radiais do filme, do raio e das frenagens realizadas.

6.5.3 Interferometria

As superfícies de discos e pastilhas de determinados experimentos realizados neste trabalho foram mensuradas através da técnica de interferometria ótica. O equipamento utilizado foi um interferômetro marca Bruker, modelo ContourGT-K, localizado no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF). Este equipamento permite o registro topográfico tridimensional de superfícies com resolução lateral e vertical de $4\ \mu\text{m}$ e $0,01\ \mu\text{m}$, respectivamente. A análise dos dados foi realizada através do *software* Vision64, também da marca Bruker. A Figura 6.7 mostra um exemplo de topografia de um disco após a realização de diversas frenagens obtida através deste equipamento.

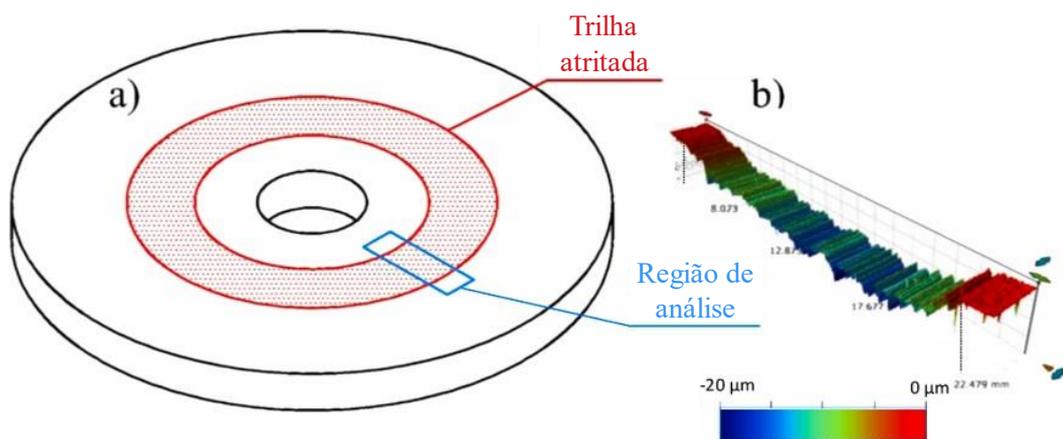


Figura 6.7 – Exemplo de interferometria de discos: a) região de análise da trilha atritada e b) topografia tridimensional obtida pelo interferômetro [Adaptado: Barros et al., 2019a].

No caso das pastilhas, toda a superfície atritada foi mensurada pelo interferômetro. A Figura 6.8 mostra um exemplo de topografia obtida através da interferometria.

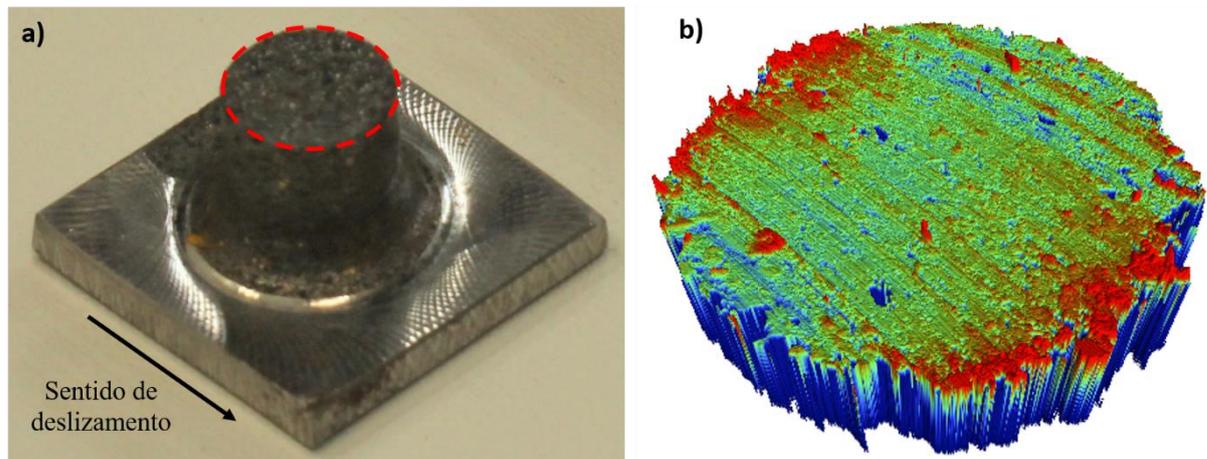


Figura 6.8 – Exemplo de interferometria de pastilhas: a) região de análise, b) topografia tridimensional obtida pelo interferômetro.

6.5.4 Rugosidade

Em alguns experimentos que serão apresentados nesta tese, a topografia de uma linha do perfil radial da trilha atritada dos discos foi obtida através da técnica de perfilometria de contato. Para isso, utilizou-se um rugosímetro marca Mitutoyo, modelo SJ-210, localizado no LATRIB. A rugosidade radial da trilha atritada dos discos também foi obtida por este equipamento. Foi utilizado um *cutoff* de 2,5 mm, com 5 intervalos de medição. Os parâmetros de rugosidade mensurados foram R_q (Rugosidade média quadrática, ou do inglês, *Root Mean Square*) e R_{sk} (assimetria, ou do inglês, *skewness*). De acordo com a literatura [Duboust et al., 2016], valores negativos de assimetria indicam uma superfície com uma maior quantidade de vales do que de picos, enquanto valores positivos, indicam o contrário (maior quantidade de picos do que vales).

Testes preliminares mostraram que o rugosímetro não é capaz de medir a rugosidade de pastilhas em alguns casos, em função da alta irregularidade de sua superfície após os experimentos. Desta forma, os parâmetros de rugosidade média e rugosidade média quadrática das pastilhas foram obtidos diretamente através do *software* do interferômetro (Vision64). Cabe aqui salientar que, neste caso, os valores de rugosidade de pastilha referem-se à área total

mensurada pelo interferômetro sendo, neste caso, uma medição em 3D. A rugosidade média quadrática e a assimetria mensuradas desta forma são abreviadas por S_q e S_{sk} , respectivamente.

6.5.5 Microscopia dos detritos

A microscopia ótica dos detritos foi realizada através de um estereomicroscópio óptico marca Carl Zeiss, modelo Stemi 508, equipado com uma câmera digital de resolução de 5 megapixels. Microscopias dos detritos foram também obtidas com maior ampliação através de um microscópio marca Carl Zeiss, modelo Axio LabA.1, equipado com uma câmera digital de resolução de 5 megapixels. Estas imagens possibilitam uma avaliação do tamanho e da quantidade de detritos ejetados da interface tribológica pino/disco durante as frenagens.

6.5.6 Raman

Em alguns dos experimentos executados nesta tese, as superfícies de discos, de pastilhas e de detritos gerados durante frenagens foram analisadas através de espectroscopia Raman, com o intuito de avaliar o tipo de óxido formado. Para isso, foi utilizado um Espectrômetro Raman marca Renishaw, modelo Invia, utilizando um laser com comprimento de onda de 532 nm. Este equipamento está localizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS. Os resultados de Raman obtidos foram comparados com dados encontrados na literatura e com o banco de dados RRUFF [Lafuente et al., 2015], site atualmente utilizado por diversos pesquisadores para avaliações de espectroscopia Raman.

6.5.7 MEV - EDS

As pastilhas de freio, os discos e os detritos gerados após determinadas frenagens de alguns experimentos foram avaliados através de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Além disso, as superfícies de discos de alguns dos experimentos realizados foram analisadas através de Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS ou EDX). Enquanto o MEV permite uma análise detalhada da superfície a ser analisada, gerando imagens com

grandes ampliações, o EDS fornece informações sobre a composição química do material. Para isso, foi utilizado um MEV de bancada marca Hitachi, modelo TM3000, localizado no Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LDSM) da UFRGS. Este equipamento fornece imagens eletrônicas através de elétrons retroespalhados (*backscattered electrons*), com tensão de até 15 kV. Acoplado a este equipamento, tem-se o EDS modelo SWIFT ED 3000.

6.5.8 Análise termogravimétrica das pastilhas

Foi realizada uma análise termogravimétrica (do inglês *Thermogravimetric Analysis* – TGA) de uma amostra de pastilha utilizada neste estudo. Para isso, um equipamento marca Ta Instrument, modelo Q50, com uma taxa de aquecimento de 20°C/min em uma atmosfera de oxigênio, foi empregado. Este equipamento está localizado no Laboratório de Materiais Poliméricos (LAPOL) da UFRGS. Esta análise permite monitorar a variação de massa da amostra em função do aumento de temperatura.

6.6 Experimentos no Tribômetro

Nesta tese, três experimentos no Tribômetro foram realizados, visando avaliar diferentes efeitos relacionados à transição de regime de desgaste:

- Efeito da pressão na transição do regime de desgaste (seção 7.2).
- Efeitos da velocidade de deslizamento e da pressão de contato crescente e decrescente na transição de regime de desgaste (seção 7.3).
- Efeitos dos regimes de desgaste nas superfícies de discos, pastilhas e detritos (seção 7.4).

De forma a facilitar o entendimento, os parâmetros de ensaio utilizados em cada um dos experimentos são mostrados antes dos seus respectivos resultados. Os resultados destes experimentos, bem como a caracterização de discos e pastilhas, são mostrados no próximo Capítulo.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste Capítulo são apresentados os resultados obtidos neste trabalho. Primeiramente, apresentam-se os resultados da análise de dureza e da análise metalográfica dos rotores utilizados nos experimentos, bem como os resultados de TGA de pastilha.

Posteriormente, são apresentados os estudos individuais da transição do regime de desgaste sob diferentes perspectivas. Com o intuito de facilitar a compreensão, primeiramente são apresentados os parâmetros de ensaio utilizados em cada um destes estudos sendo estes, então, seguidos pelos seus respectivos resultados e discussões.

Finalmente, são realizadas discussões e comparações sobre os diferentes estudos apresentados nesta tese.

A Figura 7.1 mostra o diagrama indicando a sequência de resultados apresentados neste trabalho.

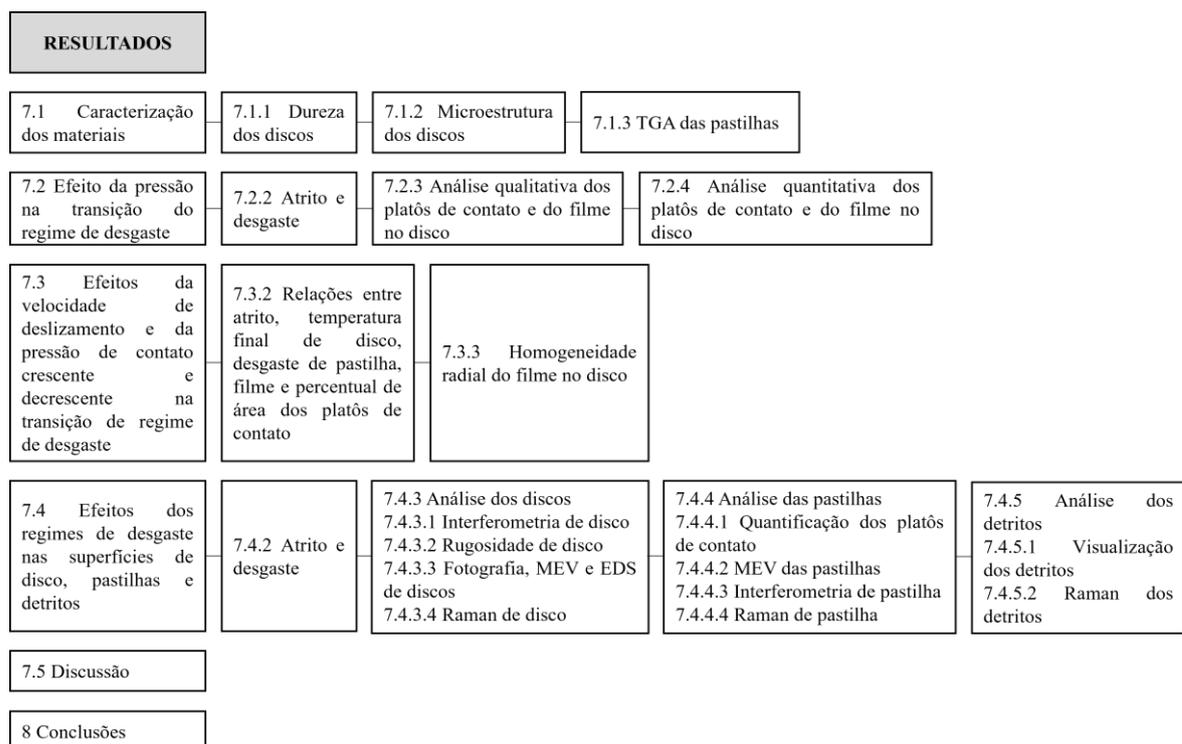


Figura 7.1 – Diagrama da sequência de resultados.

7.1 Caracterização dos materiais

7.1.1 Dureza dos discos

Os resultados da análise de dureza dos discos, realizados na escala Brinell, são apresentados na Figura 7.2. As cinco medições individuais de cada rotor são mostradas na Figura 7.2-a, enquanto as médias e os desvios padrão ($\pm 1\sigma$) destas medições são apresentados na Figura 7.2-b.

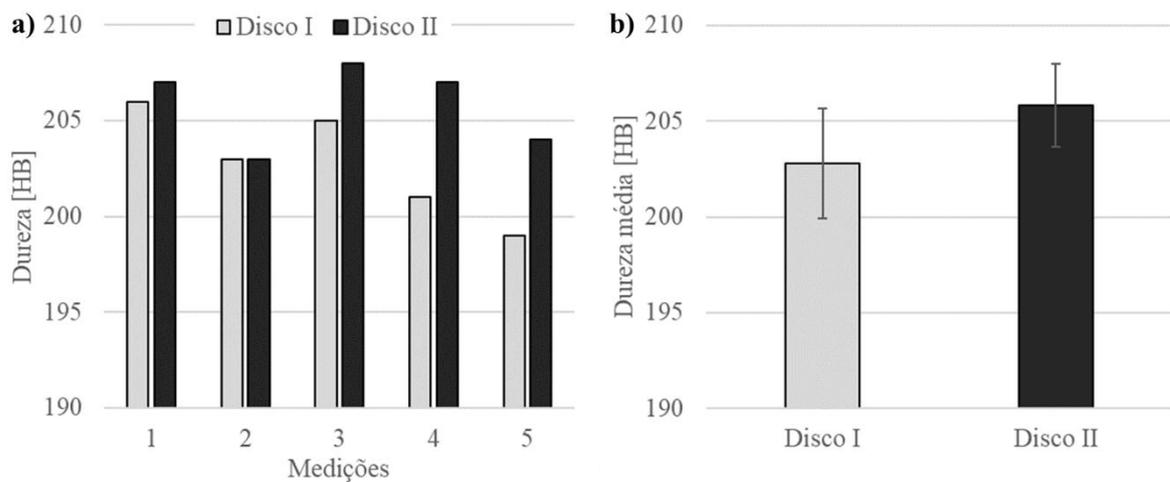


Figura 7.2 – Dureza dos discos: a) medições individuais e b) média.

Pode-se observar que as medições individuais apresentam valores médios relativamente próximos de dureza, variando de 199 a 208 HB. Estes valores de dureza encontram-se dentro da faixa especificada na Norma SAE J661 [SAE International, 2012], que indica valores de dureza entre 179 e 229 HB para rotores utilizados em sistemas de freio automotivo.

7.1.2 Microestrutura dos discos

As microscopias da análise metalográfica dos discos são apresentadas na Figura 7.3, as quais foram obtidas com magnificação de 100 \times .

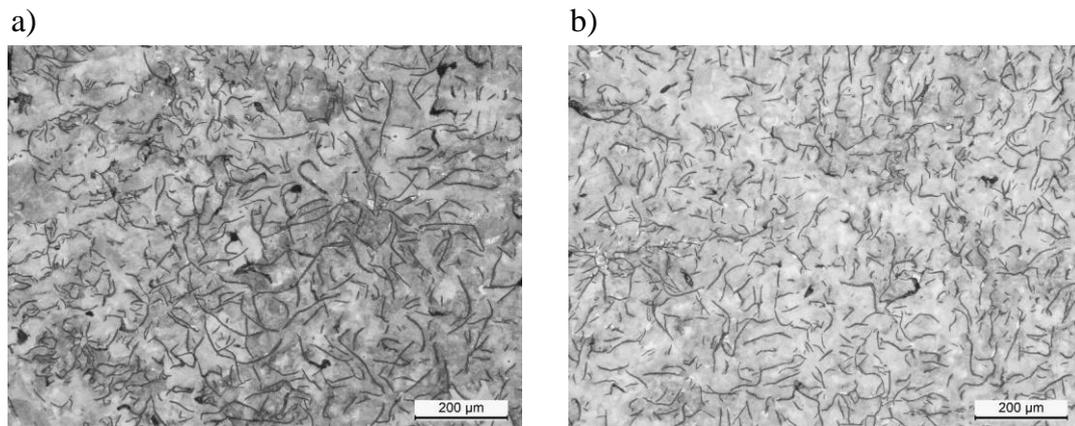
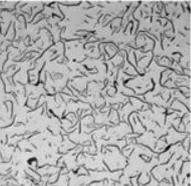


Figura 7.3 - Microscopia dos discos: a) disco I e b) disco II. Ampliação de 100 ×.

Estas microscopias foram então comparadas com as microscopias apresentadas na Norma A247 [ASTM International, 2019]. Esta norma permite classificar o ferro fundido em relação ao tipo, distribuição e tamanho da grafita. A Tabela 7.1 apresenta a classificação que as amostras receberam através desta comparação. Também são mostradas as fotos de referência (encontradas na norma) utilizadas nestas comparações, as quais também foram obtidas com magnificação de 100 ×.

Tabela 7.1 – Classificação dos rotores, de acordo com a Norma A247 [Adaptado: ASTM International, 2019].

Análise	Classificação	Microscopia de referência [ASTM International, 2019]
Tipo de grafita	VII	
Distribuição da grafita	A	
Tamanho da grafita	4 (80 a 160 μm)	

As comparações das imagens encontradas na norma com os rotores utilizados no estudo permitem classificar estes últimos como tipo de grafita VII, com distribuição tipo A e com tamanho tipo 4, o qual apresenta tamanho de grafita entre 80 e 160 μm .

A Figura 7.4 mostra microscopias dos rotores em uma maior magnificação (500 \times). As setas em vermelho indicam regiões onde a formação da perlita é de fácil identificação.

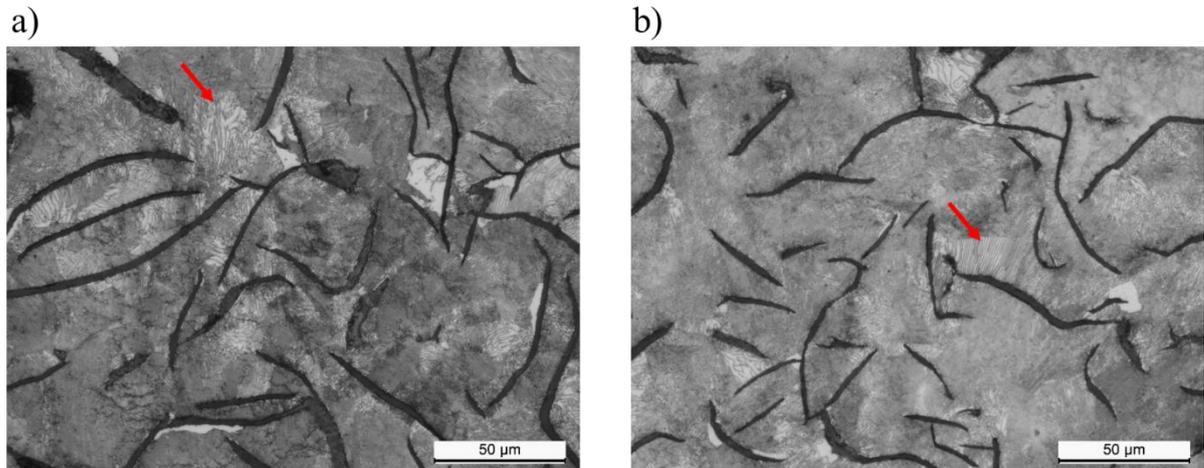


Figura 7.4 – Microscopia dos rotores, evidenciando a estrutura perlítica: a) disco I e b) disco II. Ampliação de 500 \times .

Observa-se a presença de perlita nos dois discos analisados, evidenciando a estrutura perlítica dos rotores utilizados neste estudo. Desta forma, as análises para caracterização dos discos mostraram que estes atendem a Norma SAE J661 [SAE International, 2012], onde foi observada uma dureza de 203 HB (em média) com estrutura perlítica.

7.1.3 TGA das pastilhas

A Figura 7.5 mostra o resultado da análise termogravimétrica (TGA) da pastilha em atmosfera de oxigênio. Também é apresentada a primeira derivada da curva TGA, chamada de DTG (do inglês *derivative thermogravimetry*). Esta curva permite uma melhor visualização dos valores de temperatura onde ocorreram as maiores variações de massa.

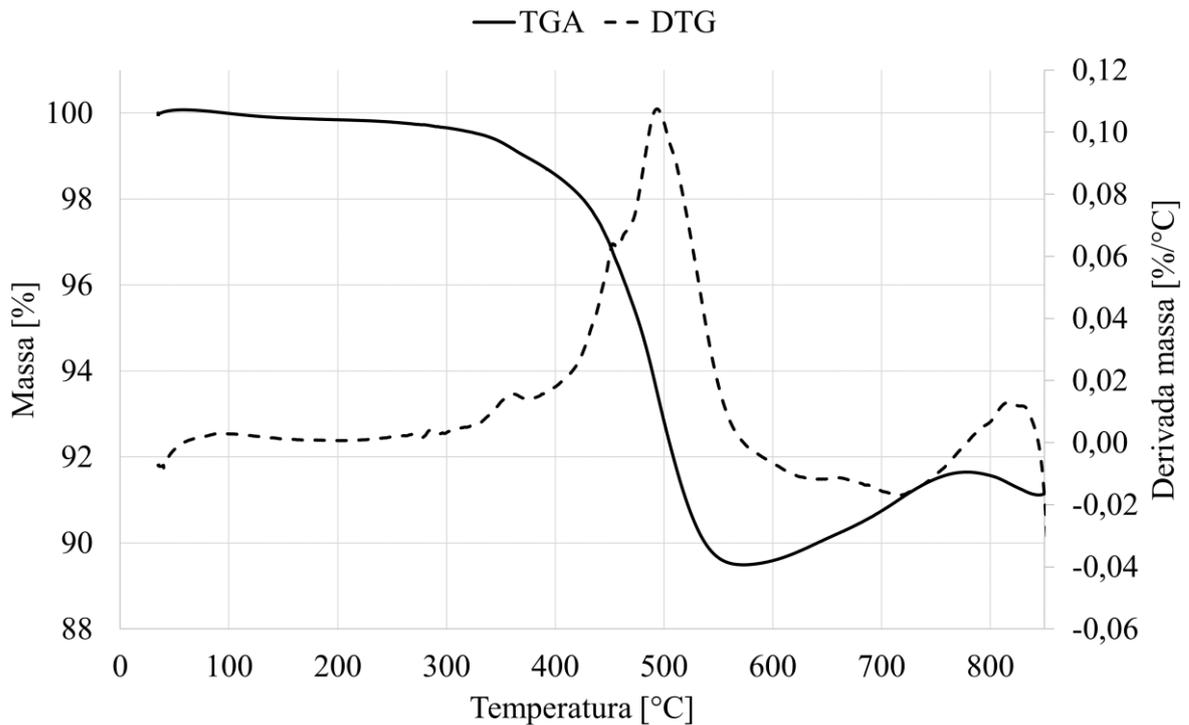


Figura 7.5 – TGA e DTG da pastilha de freio em atmosfera de O₂.

Até a temperatura de 300°C, uma pequena redução de massa é observada, em torno de 1%. Isso ocorre devido à perda da água ou à presença de gases que se encontram nos poros da amostra [Cristol-Bulthé et al., 2008]. Uma queda mais acentuada do percentual de massa é observada a partir de 300°C até 600°C. Neste caso, ocorre a degradação térmica da resina fenólica devido às altas temperaturas [Yun et al., 2010], bem como a degradação de outros ingredientes do material de fricção. Isso indica que o material apresenta uma boa resistência térmica, visto que, nas temperaturas convencionais de operação de frenagem (<600°C), a pastilha de freio manteve uma parte significativa (aproximadamente 90%) de sua massa. Um aumento de massa é observado acima de 600°C. De acordo com a literatura [Cristol-Bulthé et al., 2008], este aumento é uma consequência da formação de óxidos dos metais presentes na amostra. Em outras palavras, a atmosfera de O₂ utilizada na técnica de TGA contribuiu para o aumento de massa da amostra devido à oxidação destes metais.

7.2 Efeito da pressão na transição do regime de desgaste

Nesta seção, um estudo publicado em uma revista científica internacional (Wear Journal - Elsevier) por este autor, juntamente com outros colegas de pesquisa [Barros et al., 2019b], será detalhado. Neste artigo, estudou-se a influência da pressão de contato na transição do regime de desgaste em materiais de fricção utilizados em freios automotivos.

7.2.1 Parâmetros de ensaio

Neste estudo, o procedimento de ensaio foi separado em duas etapas. Na primeira delas foi realizado um assentamento, baseado no procedimento AK Master SAE J2522 (SAE International, 2003). Neste procedimento, frenagens com diversas pressões de contato e temperaturas são realizadas. Cabe destacar que o procedimento AK Master SAE J2522 contém duas etapas de alta temperatura, chamadas de etapas de “*fade*”. Desta forma, devido às diferentes condições de frenagem, evitam-se flutuações de atrito e desgaste decorrentes do assentamento do corpo de prova ensaiado. Os resultados da etapa de assentamento não são discutidos no artigo, visto que este não é o foco do trabalho.

Após a etapa de assentamento, foi aplicada a segunda etapa, chamada de caracterização. Nela, seis diferentes valores de pressão foram empregados (1,9, 2,4, 2,9, 3,4, 3,9 e 4,3 MPa, equivalentes às pressões hidráulicas do sistema de freio veicular de 40, 50, 60, 70, 80 e 90 bar, respectivamente), com o intuito de atingir a transição do regime de desgaste de uma condição moderada para severa. De acordo com a literatura [Infantini, 2008], as pressões hidráulicas típicas aplicadas em sistemas de freio a disco para veículos leves e SUVs é de 10 a 80 bar. Embora a pressão de 90 bar utilizada no presente experimento esteja acima desta faixa indicada, optou-se por aplicar esta pressão maior com o objetivo de avaliar seu impacto na transição de regime de desgaste. A Tabela 7.2 mostra os parâmetros de ensaio utilizados neste experimento.

Tabela 7.2 – Parâmetros de ensaio [Adaptado: Barros et al., 2019b].

Etapa	Repetições	Pressão hidráulica [bar]	Pressão de contato [MPa]	Velocidade de deslizamento inicial - final [m/s]	Desaceleração [m/s ²]	Temperatura inicial do disco [°C]
Assentamento	275	De acordo com o procedimento AK Master (SAE J2522)				
Caracterização	50	40	1,9	7,5 - 2,8	3,15	100
		50	2,4		3,93	
		60	2,9		4,72	
		70	3,4		5,51	
		80	3,9		6,28	
		90	4,3	7,09		

Para cada pressão foram aplicadas 50 frenagens, onde a velocidade de deslizamento inicial-final representa um veículo desacelerando de 80 a 30 km/h. A desaceleração varia de acordo com a pressão utilizada, com o intuito de manter a energia de frenagem constante para todas as pressões. A temperatura inicial de disco, realizada através do aquecedor indutivo, foi de 100°C para todas as condições. Microscopias da superfície da pastilha foram realizadas nas frenagens 1, 5, 10, 30 e 50 de cada pressão. Duas amostras de mesma formulação (apresentada na Tabela 6.2) foram utilizadas, com o intuito de avaliar a repetibilidade dos experimentos. A nomenclatura utilizada para as amostras são CP.1 e CP.2. O disco, por sua vez, foi o mesmo em ambos os experimentos.

7.2.2 Atrito e desgaste

Os resultados tribológicos (atrito e desgaste) obtidos para os diferentes níveis de pressão são apresentados na Figura 7.6. Cabe aqui salientar que os pontos de atrito apresentados se referem ao atrito médio de cada uma das 300 frenagens. O desgaste de pastilha, por sua vez, equivale ao desgaste mensurado a cada conjunto de 50 frenagens aplicadas para cada nível de pressão.

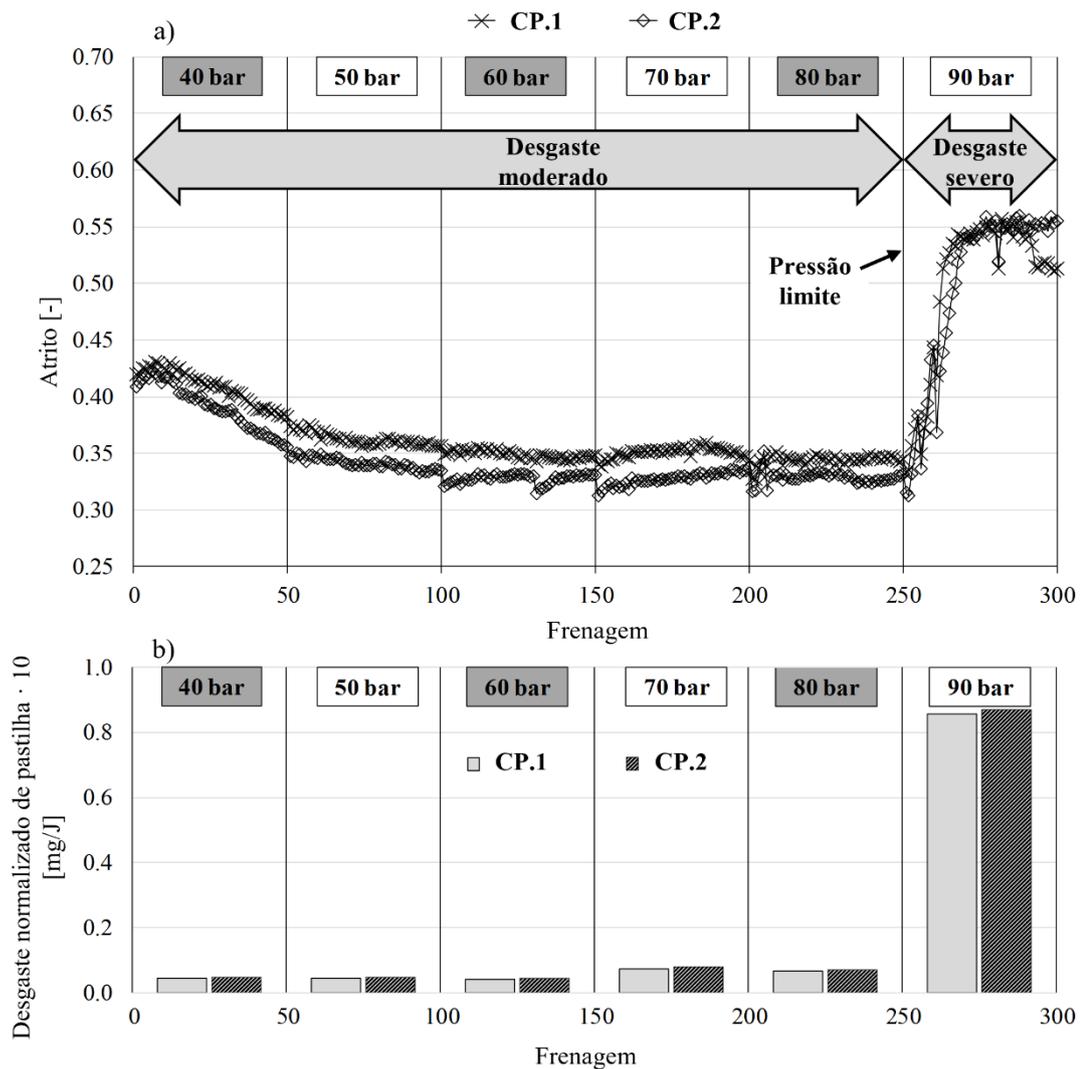


Figura 7.6 – Resultados tribológicos dos materiais CP.1 e CP.2: a) atrito e b) desgaste de pastilha [Adaptado: Barros et al., 2019b].

Pode-se notar uma boa repetibilidade dos resultados de atrito e desgaste nos experimentos com as pastilhas CP.1 e CP.2. Nas pressões de 40, 50 e 60 bar, observa-se uma redução do atrito com o aumento de pressão, o que está de acordo com a literatura [Uyyuru et al., 2006; Kumar e Bijwe, 2011b]. Em 70 e 80 bar, o coeficiente de atrito se mantém em um nível relativamente similar ao observado em 60 bar. Entretanto, na pressão de 90 bar (equivalente a uma pressão de contato de 4,3 MPa), chamada de pressão limite, se observa um aumento abrupto do atrito (Figura 7.6-a), ocorrendo também um aumento expressivo do desgaste normalizado de pastilha (Figura 7.6-b). O aumento do desgaste normalizado foi aproximadamente 13 vezes superior ao observado em pressões mais baixas. Desta forma, a

pressão limite foi responsável pela mudança do regime de desgaste, onde ocorreu a alteração de regime moderado (para pressões até 80 bar) para severo (90 bar).

Em todos os experimentos, a temperatura máxima registrada pelo termopar instalado no interior do disco foi abaixo de 130°C. Isto difere do estudo relatado por Straffelini e Maines, 2013, onde a transição do regime de desgaste foi atribuída à degradação da resina fenólica do material de fricção devido às altas temperaturas (acima de 300°C). Desta forma, evidencia-se que a transição do regime de desgaste de uma condição moderada para severa em materiais de fricção não ocorre unicamente devido à degradação térmica da resina fenólica decorrente do efeito de alta temperatura. Verificou-se, assim, que a transição de regime de desgaste pode também ocorrer em temperaturas relativamente baixas (< 130°C). Cabe aqui ressaltar que no presente trabalho, a temperatura foi mensurada através de um termopar instalado no interior do disco. Desta forma, a temperatura de contato foi superior à temperatura medida. Embora a temperatura de contato não tenha sido mensurada, espera-se que esta tenha sido inferior aos 300°C observados no trabalho de Straffelini e Maines, 2013.

7.2.3 Análise qualitativa dos platôs de contato e do filme no disco

As imagens das superfícies das pastilhas (obtidas por microscopia ótica) e dos discos (via estereomicroscópio ótico) nas condições de desgaste moderado e severo são apresentadas na Figura 7.7. Para o desgaste moderado, são apresentadas as imagens do par tribológico na frenagem 250, onde foi aplicada a última frenagem na pressão de 80 bar. Para o desgaste severo, foi escolhida a frenagem 280 que, por sua vez, representa a trigésima frenagem na pressão de 90 bar.

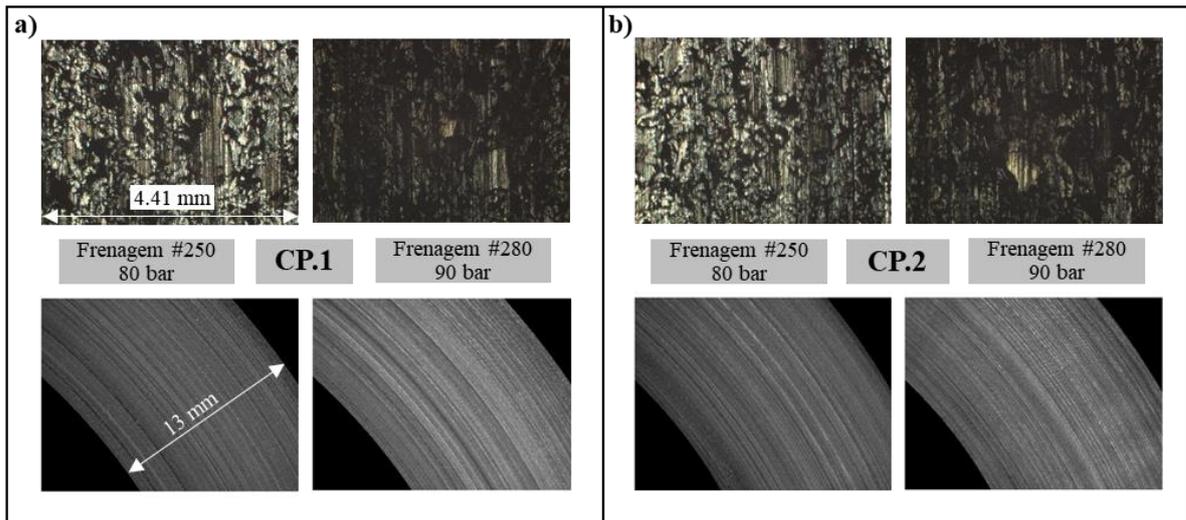


Figura 7.7 – Imagens da superfície das pastilhas e dos discos no regime de desgaste moderado (à esquerda, em cada CP) e severo: a) CP.1 e b) CP.2 [Adaptado: Barros et al., 2019b].

Pode-se observar uma mudança drástica, tanto no disco quanto na pastilha, quando o regime de desgaste é alterado de moderado para severo. Para a pastilha, ocorre uma redução da área dos platôs de contato (regiões mais claras) quando o regime de desgaste é severo. No caso do disco, a trilha de atrito se mostra mais clara na condição de desgaste severo do que na observada no desgaste moderado. Isto indica que o filme depositado sobre o disco foi parcialmente removido na condição de desgaste severo.

Com a presença de filme (pressões abaixo de 90 bar), ocorre um desgaste predominantemente tribo-oxidativo, o que contribui para um atrito relativamente baixo e estável. Por outro lado, na pressão elevada (90 bar), ocorre a remoção dos platôs de contato e uma remoção do filme tribológico no disco. Desta forma, ocorre um contato mais direto entre disco e pastilha, resultando a um desgaste mais abrasivo no par tribológico. Isto contribui para um atrito elevado, bem como para um aumento no desgaste de pastilha.

Uma sequência de microscopias da pastilha CP.1 é apresentada na Figura 7.8, onde se mostra a remoção dos platôs de contato quando a pressão é alterada de 80 para 90 bar. Uma linha foi utilizada para contornar uma região onde há um platô de contato, com o intuito de mostrar a evolução desta área nas diferentes frenagens.

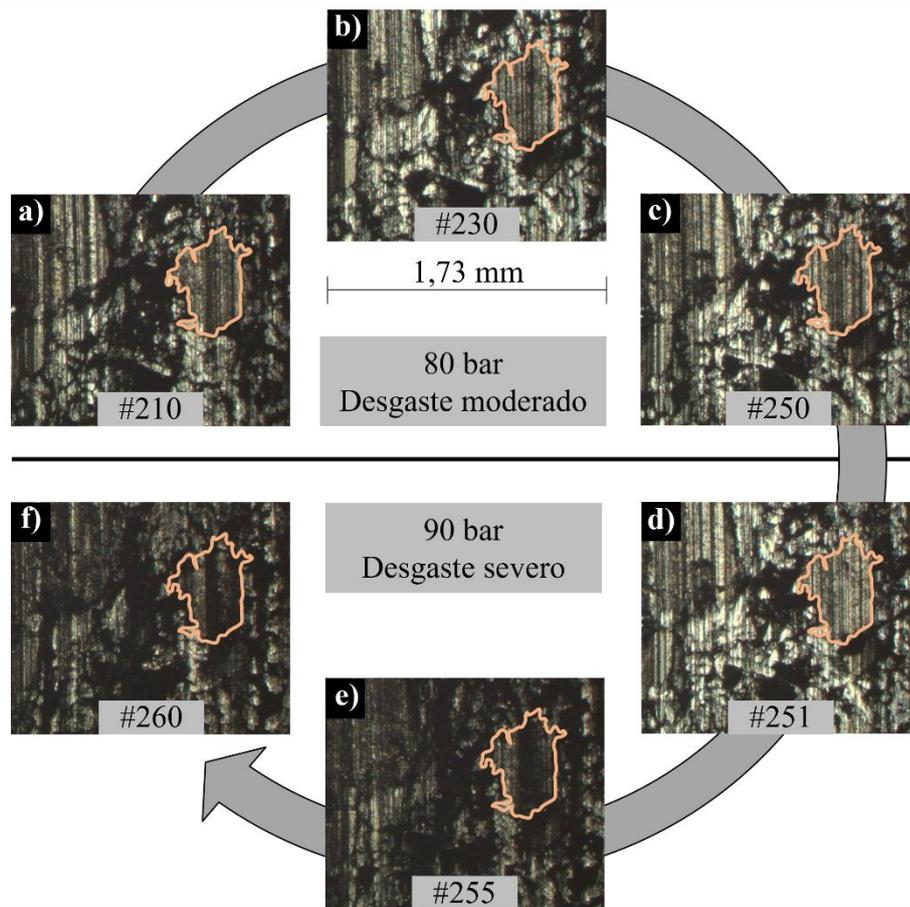


Figura 7.8 – Sequência de imagens mostrando a remoção dos platôs de contato na transição do desgaste moderado para severo para a amostra CP.1: a) frenagem 210, b) frenagem 230, c) frenagem 250, d) frenagem 251, e) frenagem 255 e f) frenagem 260 [Adaptado: Barros et al., 2019b].

Em todas as imagens obtidas nas pressões de 80 bar, nota-se que o platô contornado não sofreu alterações significativas. Da mesma forma, uma única frenagem na pressão onde ocorre a mudança de desgaste (90 bar), não levou a alterações no platô de contato analisado (Figura 7.8-d). Entretanto, na quinta (Figura 7.8-e) e na décima (Figura 7.8-f) frenagem a 90 bar, ocorre a remoção dos platôs de contato. Esta remoção leva ao aumento excessivo de desgaste da pastilha mostrado anteriormente. A área dos platôs de contato e o filme depositado sobre o disco são avaliados quantitativamente, conforme mostrado a seguir.

7.2.4 Análise quantitativa dos platôs de contato e do filme no disco

Através da metodologia descrita na seção 6.5, foi possível quantificar o percentual de área dos platôs de contato nas microscopias obtidas da superfície da pastilha nas frenagens escolhidas (1, 5, 10, 30 e 50) para cada pressão. Também foi possível quantificar a média da intensidade dos pixels das imagens registradas do disco. Cabe aqui ressaltar que, quanto menores forem os valores para a média da intensidade dos pixels, mais escura será a foto do disco, representando uma condição com maior depósito de filme. Além disso, para facilitar o entendimento do gráfico, a média da intensidade dos pixels foi normalizada entre 0 e 1. A Figura 7.9 mostra estes resultados para a amostra CP.1.

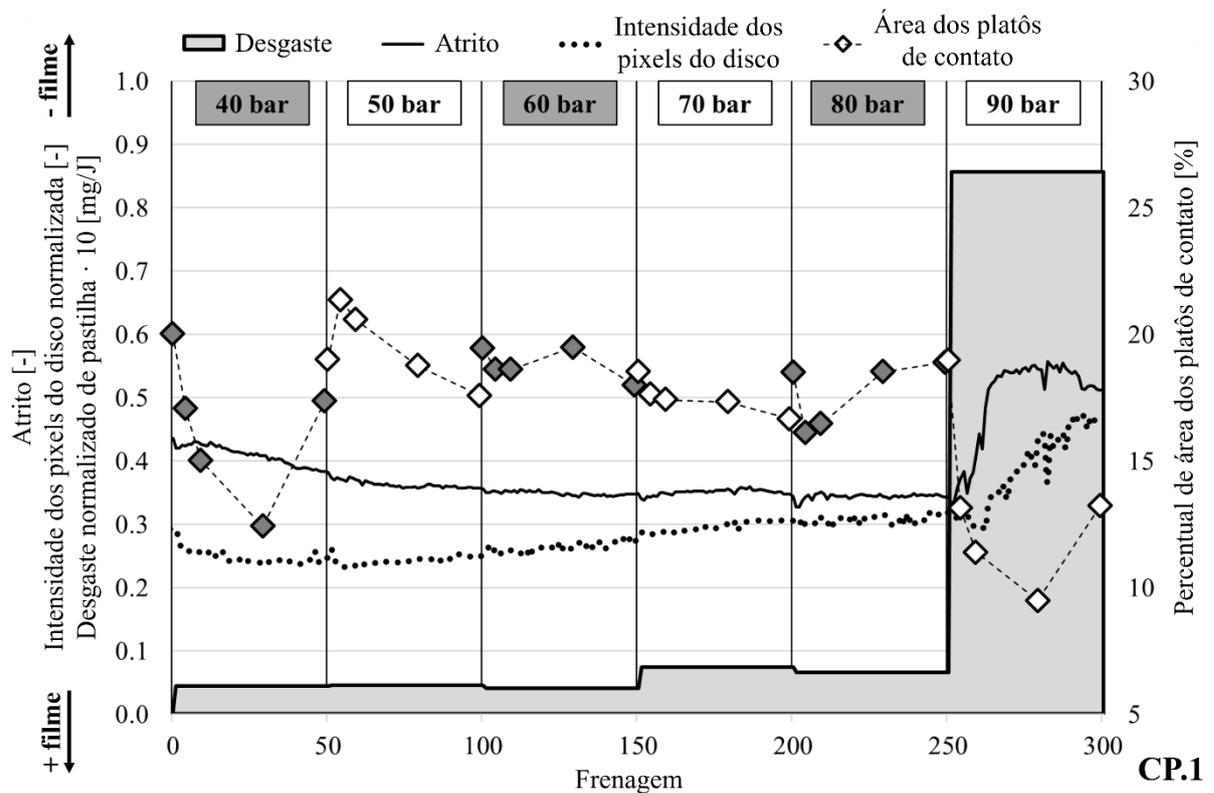


Figura 7.9 – Resultados de atrito, desgaste, intensidade dos pixels do disco e área dos platôs de contato para a amostra CP.1 [Adaptado: Barros et al., 2019b].

Pode-se observar o mesmo fenômeno descrito anteriormente, onde um aumento expressivo do coeficiente de atrito ocorre quando a pressão limite (90 bar) é aplicada. A intensidade dos pixels do disco sofre um aumento similar, indicando uma redução do filme

sobre o disco. Entretanto, a intensidade dos pixels e o atrito parecem ocorrer em dinâmicas distintas: enquanto o atrito sofre um aumento expressivo em apenas algumas frenagens, a intensidade dos pixels cresce em uma taxa menor, necessitando de 20 frenagens para alcançar um patamar relativamente estável. Uma hipótese que explique este fenômeno é a de que a espessura do filme é reduzida gradativamente nas frenagens onde a pressão limite (90 bar) é empregada. Com a redução da espessura, regiões do disco sem filme passam a ser registradas pelas imagens que, por sua vez, apresentam valores de intensidade de pixel maiores (mais claras). Nesta condição, o contato direto entre pastilha e disco leva a um alto nível de desgaste de pastilha. Isto está em contradição com Cho et al., 2005, o qual observou em seus experimentos que o desgaste de materiais de fricção é independente da espessura do filme.

Na condição de desgaste moderado (frenagem 1 a 250), observa-se uma leve redução do filme com o aumento da pressão. Isto está de acordo com resultados encontrados na literatura [Fernandes et al., 2013], onde a espessura e a uniformidade do filme são reduzidas com o aumento da severidade do experimento (pressão e velocidade de deslizamento). Entretanto, o oposto também é relatado por Liu et al., 1980, que afirma que um aumento da severidade leva a um aumento na formação do filme.

Em relação aos platôs de contato, pode-se observar uma redução abrupta da área destes quando é empregada a pressão limite (90 bar), levando a um aumento expressivo no desgaste de pastilha. Na região de desgaste moderado, a área dos platôs de contato apresenta um valor relativamente estável (em torno de 18%), com exceção da pressão de 40 bar, onde uma variação maior é observada. Esta variação ocorre devido às diferenças dos parâmetros de frenagem entre a etapa de assentamento e caracterização. No assentamento, temperaturas elevadas são empregadas, levando a alterações significativas na superfície da pastilha com a formação de uma grande quantidade de terceiro corpo. Assim, nas frenagens iniciais após o assentamento, ocorre um período transiente onde o terceiro corpo presente na pastilha sofre alterações ao longo das frenagens. Para ilustrar este transiente, a Figura 7.10 mostra as microscopias da amostra CP.1 em frenagens após a etapa de assentamento.

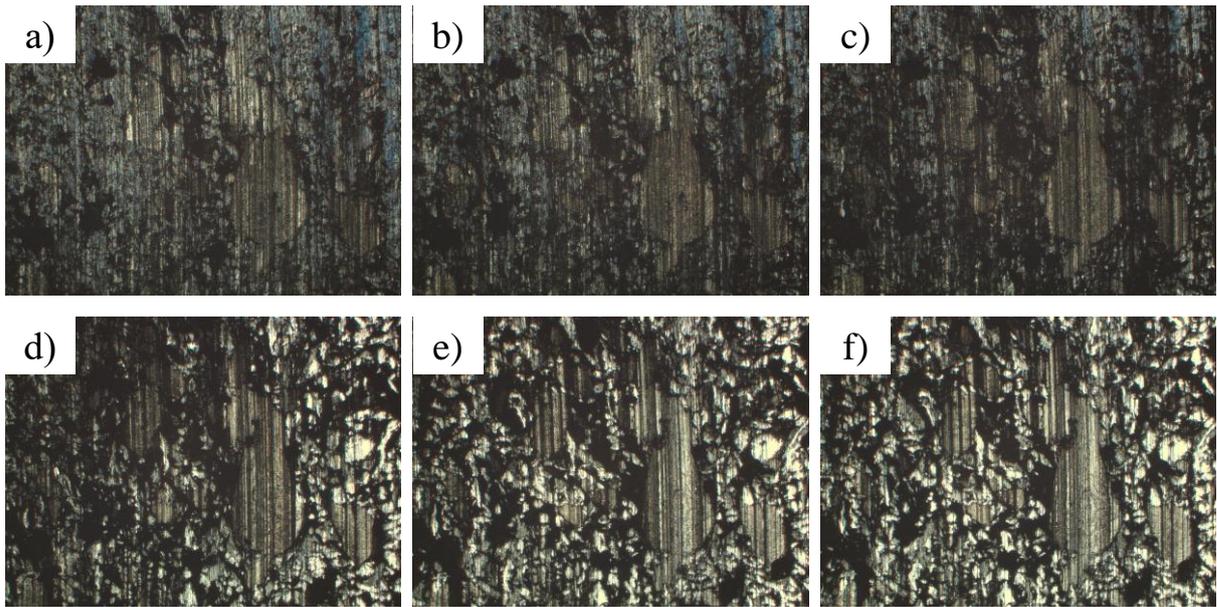


Figura 7.10 – Microscopia ótica dos platôs de contato para a amostra CP.1 após a etapa de assentamento nas frenagens: a) 1, b) 5, c) 10, d) 30, e) 50 e f) 51.

Observa-se que a tonalidade dos platôs de contato logo após o assentamento (Figura 7.10-a) muda gradativamente após as frenagens. Nas frenagens iniciais, uma coloração azulada é observada, enquanto, após 50 frenagens (Figura 7.10-e), os platôs (coloração clara) se destacam mais facilmente devido a um maior contraste entre os platôs e os *lowlands* (coloração escura). Este aspecto mais claro se manteve ao longo de todo o experimento até a ocorrência da transição de regime de desgaste, onde uma coloração mais escura ocorre em toda imagem, conforme mostrado anteriormente na Figura 7.8. O aspecto azulado observado nas imagens da Figura 7.10 é oriundo das altas temperaturas aplicadas na etapa de *fade* do assentamento, e acaba influenciando nos resultados de percentual de área dos platôs de contato, levando a uma grande variação deste parâmetro nas frenagens iniciais após a etapa de assentamento.

A Figura 7.11 mostra os resultados de atrito, desgaste de pastilha, intensidade dos pixels do disco e percentual de área dos platôs de contato para a amostra CP.2.

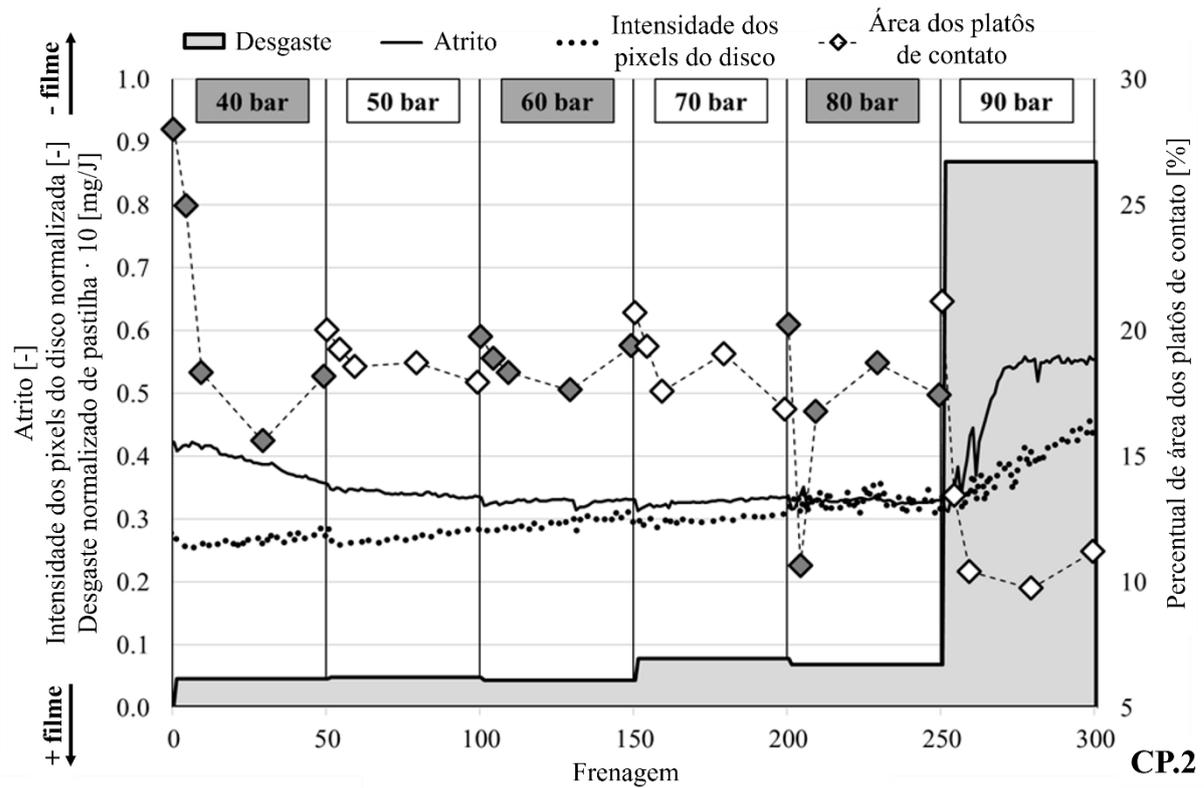


Figura 7.11 – Resultados de atrito, desgaste, intensidade dos pixels do disco e área dos platôs de contato para a amostra CP.2 [Adaptado: Barros et al., 2019b].

Pode-se perceber um comportamento muito similar ao observado no experimento com a amostra CP.1, evidenciando boa repetibilidade entre os ensaios. Na quinta frenagem a 80 bar, percebe-se que ocorreu uma queda significativa do percentual de área dos platôs de contato a um nível observado no desgaste severo (aproximadamente 10%). Na décima frenagem a 80 bar, este valor retorna a um patamar observado nas demais frenagens no desgaste moderado (18%). As microscopias da pastilha mostrando esta alteração são mostradas na Figura 7.12.

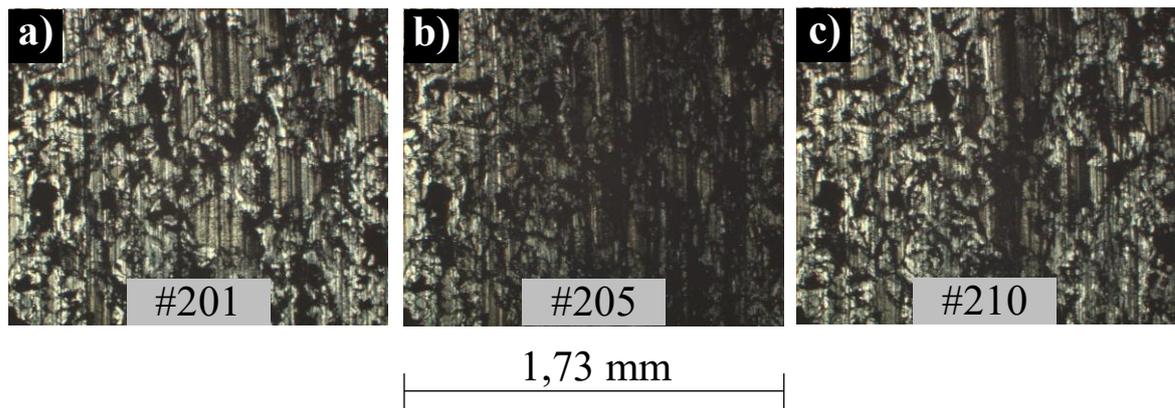


Figura 7.12 – Microscopia ótica de pastilha mostrando os platôs de contato na pressão de 80 bar: a) frenagem 201, b) frenagem 205 (redução momentânea dos platôs) e c) frenagem 210 (recomposição dos platôs).

Nota-se que ocorreu uma mudança momentânea de regime nesta situação, visto que a pressão de 80 bar está próxima à pressão limite (90 bar). Neste caso, uma remoção parcial dos platôs de contato ocorreu na quinta frenagem (Figura 7.12-b). Por outro lado, uma recomposição dos platôs é observada na décima frenagem (Figura 7.12-c). Esta mudança momentânea não foi suficiente para causar mudanças significativas no atrito, filme ou desgaste de pastilha. Isto é uma evidência de que a área dos platôs de contato é o primeiro dos parâmetros analisados a sofrer alterações mensuráveis quando o regime de desgaste muda de moderado para severo.

Em resumo, no regime de desgaste moderado, observa-se a presença de filme sobre o disco e área de platôs de contato estáveis ao longo de diversas frenagens, bem como desgaste de pastilha baixo e atrito relativamente reduzido e estável. Por outro lado, no regime severo, resultante da elevada pressão de contato, ocorre a remoção dos platôs de contato secundários em poucas frenagens, pois estes não suportam a carga aplicada. Esta remoção leva uma maior exposição das fibras metálicas da pastilha (platôs primários) na interface tribológica, resultando na remoção gradual do filme no disco. Desta forma, o contato mais direto entre as fibras metálicas com o disco contribui para um aumento de desgaste de pastilha e aumento de atrito. Uma discussão mais aprofundada sobre este fenômeno será apresentada na seção 7.5. Este artigo [Barros et al., 2019b] foi o primeiro estudo onde se investigou a relação entre estes fatores. A transição do regime de desgaste foi obtida alterando a pressão do par tribológico. Além da pressão, a influência de outros parâmetros na alteração do regime de desgaste deve ser

analisada como, por exemplo, a velocidade de deslizamento. Conforme foi visto, os platôs de contato e o filme depositado sobre o disco parecem ter influência vital no comportamento tribológico de pastilhas de freio.

7.2.5 Conclusões parciais

Os experimentos deste estudo mostraram a existência de uma pressão limite (PL), na qual o desgaste do material de fricção é alterado de moderado para severo. Quando o regime de desgaste severo é estabelecido, o desgaste normalizado de pastilha se mostrou 13 vezes superior ao observado no desgaste moderado. Quando a pressão limite é atingida, ocorre uma redução abrupta do percentual de área dos platôs de contato com um aumento repentino de atrito e uma remoção de filme sobre o disco ocorre. Entre os parâmetros analisados, os platôs de contato foram os primeiros a mostrar alterações significativas quando a transição de regime ocorre, enquanto o filme depositado sobre o disco parece ser um processo mais lento.

7.3 Efeitos da velocidade de deslizamento e da pressão de contato crescente e decrescente na transição de regime de desgaste

Este estudo teve como objetivo aprofundar o entendimento sobre a transição de regimes de desgaste. Neste sentido, a influência da velocidade de deslizamento foi avaliada, além de também ser estudado o papel da pressão de contato, quando esta é aplicada de forma crescente e decrescente, na alteração de regime. Este trabalho [Barros et al., 2021] foi publicado na revista científica internacional *Polymer Composites - Wiley*.

7.3.1 Parâmetros de ensaio

Neste estudo, uma etapa de assentamento baseada no procedimento AK Master SAE J2522 (SAE International, 2003) foi aplicada, similar ao assentamento utilizado no estudo anterior. Três amostras do material de fricção foram submetidas à mesma etapa de assentamento. Os resultados da etapa de assentamento não são discutidos, pois não são o foco deste estudo. Após o assentamento, as amostras foram então submetidas a etapas de caracterização distintas, nas quais as velocidades de deslizamento foram variadas. As

velocidades de deslizamento utilizadas foram de 6, 4 e 2 m/s, com tempos de frenagens de 5, 7,5 e 15 s, respectivamente, totalizando uma distância de deslizamento de 30 m para cada frenagem. Desta forma, os experimentos onde a amostra submetida à velocidade de deslizamento de 6 m/s é chamada de $v = 6$ m/s. De forma análoga, têm-se os experimentos com $v = 4$ m/s e $v = 2$ m/s. As velocidades foram aplicadas de forma constante (*drag*). Para cada velocidade, diversas pressões de contato foram utilizadas. Estas pressões foram aplicadas primeiramente de forma crescente em valores incrementais de 1,0 MPa (de 1,5 para 5,5 MPa), e então, aplicadas de forma decrescente (de 5,5 para 1,5 MPa). Para cada pressão, 50 frenagens foram aplicadas, totalizando 850 frenagens para cada velocidade de deslizamento (excluindo a etapa de assentamento). A temperatura inicial de disco foi de 100°C. A sequência de pressões crescente e decrescente foram repetidas duas vezes, conforme mostrado na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 – Parâmetros de ensaio [Barros et al., 2021].

Etapa	Repetições	Velocidade de deslizamento [m/s]	Pressão de contato [MPa]	Temperatura inicial do disco [°C]
Assentamento	100	De acordo com o procedimento AK Master (SAE J2522)	1,5	100
			2,5	
			3,5	
			4,5	
			5,5	
			4,5	
			3,5	
			2,5	
			1,5	
			2,5	
			3,5	
			4,5	
			5,5	
			4,5	
Caracterização	50	6 / 4 / 2	1,5	100
			2,5	
			3,5	
			4,5	
			5,5	
			4,5	
			3,5	
			2,5	
			1,5	
			1,5	

7.3.2 Relações entre atrito, temperatura final de disco, desgaste de pastilha, filme e percentual de área dos platôs de contato

A Figura 7.13-a mostra os resultados de atrito, temperatura final de disco e desgaste normalizado de pastilha para o ensaio com $v = 6$ m/s na etapa de caracterização. A Figura 7.13-

b, por sua vez, apresenta os resultados de filme no disco, filme médio e percentual de área dos platôs de contato. Cabe aqui salientar que, neste estudo, optou-se por inverter a escala de intensidade de pixels do filme, de forma que, quanto maior o valor, maior a quantidade de filme. Assim, da mesma forma que a intensidade de pixels, a quantidade de filme é uma grandeza adimensional.

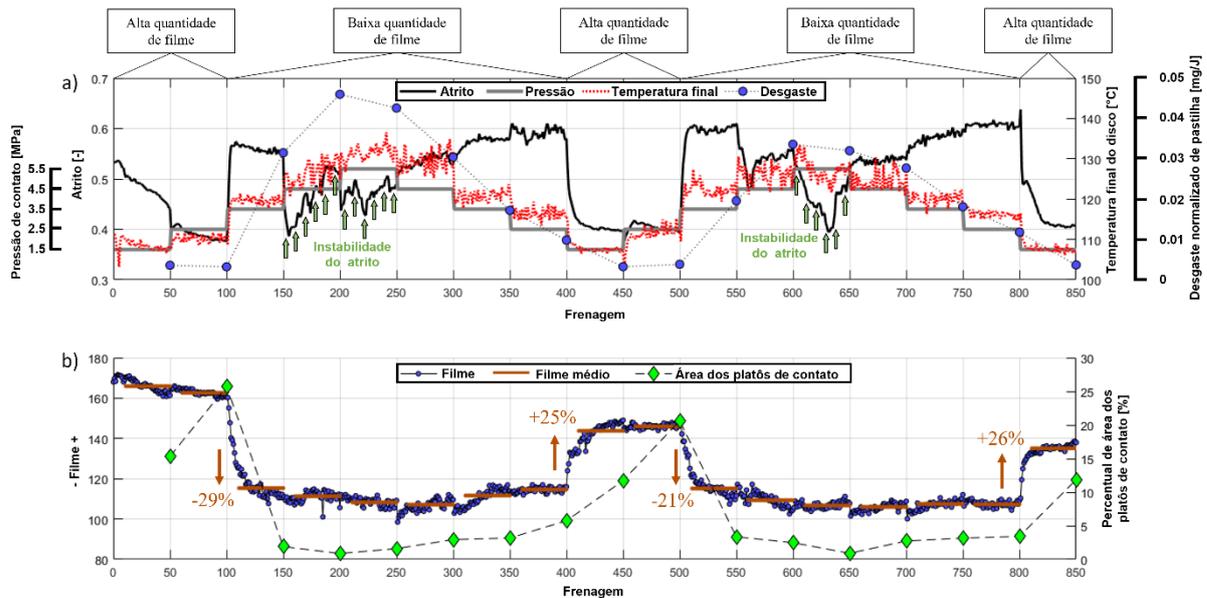


Figura 7.13 – Resultados dos testes com $v = 6$ m/s: a) Atrito, temperatura final de disco e desgaste de pastilha e b) filme, filme médio e percentual de área dos platôs de contato

[Adaptado: Barros et al., 2021].

As frenagens foram classificadas como condições de alta ou baixa quantidade de filme, indicadas no topo do gráfico. O critério para esta classificação se deu através do filme médio para cada pressão de contato, indicado na Figura 7.13-b. Caso esta média aumente (ou diminua) mais de 15%, a transição de pouco para muito filme (ou vice-versa) é contabilizada. Para o cálculo desta média, foram desconsideradas as 10 primeiras frenagens de cada pressão, para evitar as grandes flutuações do filme quando a pressão de contato é alterada. Em outras palavras, a média do filme é calculada utilizando-se as últimas 40 frenagens de cada pressão. Os valores de aumento ou diminuição das médias de filme são indicados na Figura 7.13-b. Por exemplo, o filme médio das frenagens #61 a #100 (em 2,5 MPa), é de 162, e o filme médio das frenagens

#111 a 150 (3,5 MPa) é de 115. Desta forma, o filme médio sofreu uma redução de 29% (indicado com uma seta decrescente no gráfico). Assim, por este critério, a condição de filme foi alterada de alta para baixa quantidade.

Uma análise geral da Figura 7.13 indica 5 regiões: três regiões com alta quantidade de filme e duas com baixa quantidade de filme. Da mesma forma que os resultados apresentados no estudo da seção 7.2, uma relação entre filme e atrito é observada: nas frenagens com alta quantidade de filme, as quais ocorreram em baixas pressões de contato, um atrito relativamente baixo é observado. Por outro lado, frenagens com pouco filme (altas pressões de contato) resultam em um atrito elevado.

Em relação ao desgaste do material de fricção, pode-se observar que este ocorre em um nível relativamente baixo (desgaste moderado) nas primeiras 100 frenagens. Quando a pressão de contato de 3,5 MPa é aplicada, o filme é removido da superfície do disco, e o desgaste aumenta drasticamente, resultando em um desgaste severo. Pode-se observar, por exemplo, os altos níveis de desgaste medidos nas frenagens #150 e #550 quando comparados com os valores medidos nas frenagens anteriores (#100 e #500). Desta forma, para $v = 6$ m/s, a pressão limite (PL) que resultou na remoção do filme sobre o disco (resultando na transição de desgaste moderado para severo) foi de 3,5 MPa.

Embora a transição de desgaste moderado para severo ocorra com a remoção de filme sobre o disco, a transição de desgaste severo para moderado é um fenômeno mais lento, que ocorre ao longo de diversas frenagens, mesmo que a formação de filme já tenha sido observada. Entre as frenagens #200 e #400, observa-se que a taxa de evolução de desgaste diminui gradualmente, de forma aproximadamente linear. Entretanto, este desgaste ainda se apresenta em níveis elevados (desgaste severo). Esta linearidade do comportamento do desgaste parece não ser influenciado pelo aumento significativo de filme observado nas frenagens #401 e #450. Assim, na transição de regime severo para moderado, a taxa de formação do filme sobre o disco é diferente da taxa de evolução do desgaste. Por outro lado, na transição de regime moderado para severo, o aumento repentino de desgaste ocorre de forma mais rápida. Este fenômeno está relacionado aos platôs de contato.

De forma similar ao ocorrido nos experimentos apresentados na seção 7.2, pode-se notar um aumento do percentual de área dos platôs de contato no início da etapa de caracterização (frenagens #1 a #100). Conforme mostrado na Figura 7.10 (seção 7.2.4), as elevadas temperaturas provenientes do assentamento influenciam na quantificação dos platôs de contato

durante as primeiras frenagens da etapa de caracterização, resultando em uma grande variação deste parâmetro. Paralelamente à remoção do filme (frenagens #101 a #150), pode-se observar também uma grande redução do percentual de área dos platôs de contato (de 26% para ~2%), indicando sua remoção. Os platôs de contato permanecem em um valor baixo (<5%) até que ocorra novamente a formação de filme sobre o disco (frenagens #401 a #450). Neste ponto, observa-se um aumento gradual do percentual de área dos platôs de contato (até 20%, frenagem #500), indicando que a formação dos platôs de contato ocorreu após diversas frenagens. Este fato demonstra que a remoção dos platôs de contato é um fenômeno mais rápido que sua formação. Conforme relatado na seção 7.2.4, a remoção dos platôs de contato secundários devido às altas pressões resulta em um contato maior entre os platôs primários da pastilha com o disco, resultando na remoção do filme. Quando uma pressão de contato menor é aplicada, parte do terceiro corpo começa a se transformar rapidamente em filme sobre o disco. Entretanto, são necessárias diversas frenagens para que ocorra a formação dos platôs de contato secundários na pastilha. Uma discussão mais aprofundada sobre este fenômeno é apresentada na seção 7.5.

Um fenômeno pode ser observado nas pressões de contato mais elevadas (frenagens #151 a #250 e #551 a #650), onde ocorre uma instabilidade do atrito (indicadas por setas em verde no gráfico). Uma hipótese que pode explicar este fenômeno é a de que elevadas pressões de contato, nas quais resultam na remoção dos platôs de contato e redução de quantidade de filme, levam a uma instabilidade do atrito devido ao contato mais intenso entre as asperezas do material de fricção e do disco.

A temperatura final do disco após cada frenagem, por sua vez, se elevou com o aumento da pressão de contato. Entretanto, o valor máximo registrado foi de 136°C (frenagem #241), em uma condição de baixa quantidade de filme. Da mesma forma que os experimentos apresentados na seção 7.2, isto indica que, mesmo na condição de desgaste severo, a temperatura final do disco pode ser considerada baixa, não aumentando de forma considerável em relação à temperatura inicial de cada frenagem (100°C).

Os resultados de atrito, temperatura final de disco, desgaste de pastilha, filme, filme médio e percentual dos platôs de contato, para os experimentos com $v = 4$ m/s e $v = 2$ m/s, são apresentados na Figura 7.14 e na Figura 7.15, respectivamente.

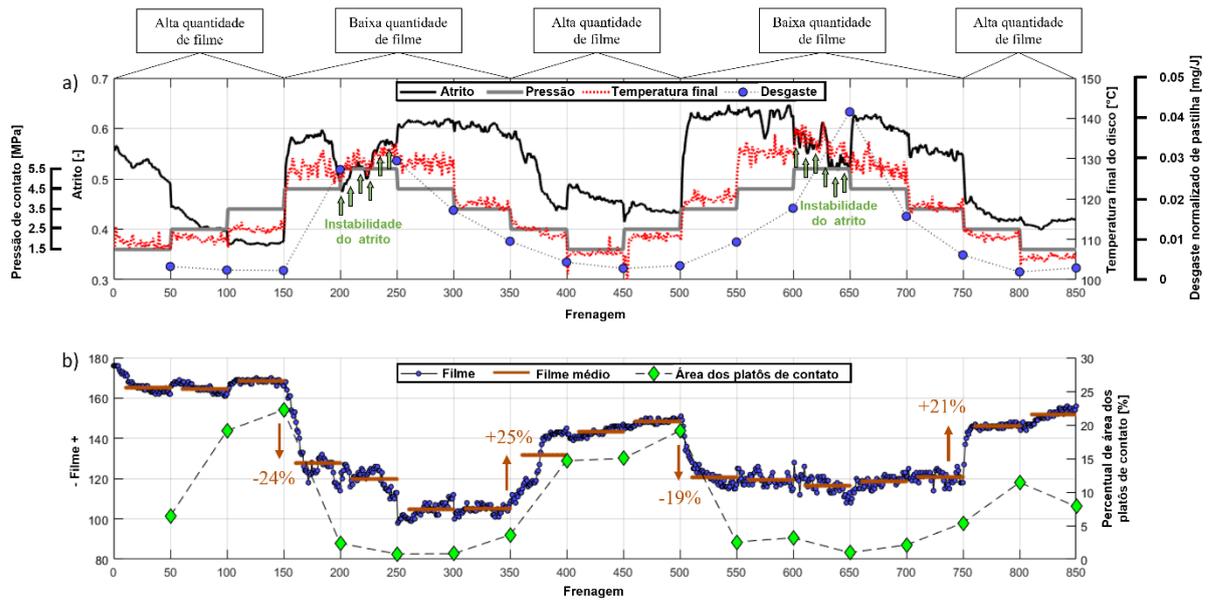


Figura 7.14 – Resultados dos testes com $v = 4$ m/s: a) Atrito, temperatura final de disco e desgaste de pastilha e b) filme, filme médio e percentual de área dos platôs de contato [Adaptado: Barros et al., 2021].

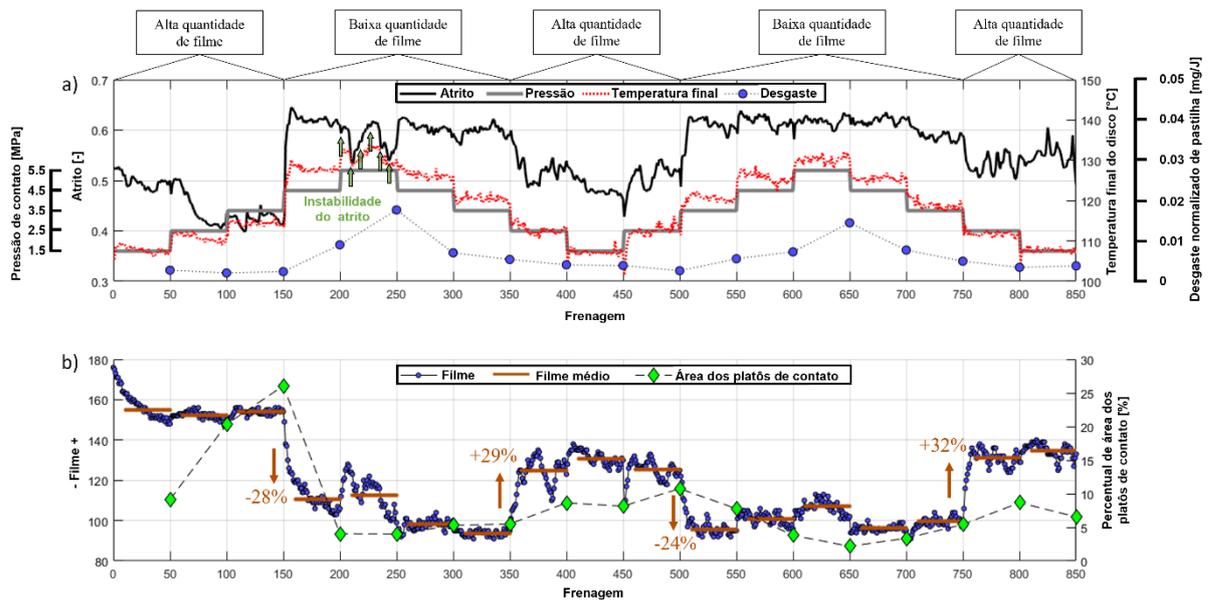


Figura 7.15 – Resultados dos testes com $v = 2$ m/s a) Atrito, temperatura final de disco e desgaste de pastilha e b) filme, filme médio e percentual de área dos platôs de contato [Adaptado: Barros et al., 2021].

Após a etapa de assentamento, o atrito e o filme apresentaram valores similares para as três velocidades utilizadas, conforme mostrado na Tabela 7.4, indicando que o assentamento foi bem aplicado. Em outras palavras, as condições iniciais para a etapa de caracterização foram similares para $v = 2$ m/s, $v = 4$ m/s e $v = 6$ m/s.

Tabela 7.4 – Valores de filme e atrito da última frenagem da etapa de assentamento.

Velocidade de deslizamento	Filme	Atrito
6 m/s	168	0,52
4 m/s	176	0,55
2 m/s	176	0,52

Assim como no experimento de $v = 6$ m/s, a instabilidade do atrito (indicada por setas em verde) também foi observada em altas pressões de contato (condição com pouco filme) em algumas frenagens para as menores velocidade de deslizamento ($v = 4$ m/s e $v = 2$ m/s). Entretanto, esta instabilidade foi menos evidente para a menor velocidade $v = 2$ m/s (Figura 7.15-a). Conforme mencionado anteriormente, pressões de contato elevadas, associadas com pouco filme tribológico, resultam na instabilidade de atrito. Isto está de acordo com a literatura, na qual relata que o filme contribui para estabilização do atrito [Jacko et al., 1989; Cristol-Bulthé et al., 2007].

Os percentuais de área dos platôs de contato para os experimentos de $v = 4$ m/s e $v = 2$ m/s mostraram comportamentos similares aos observados em $v = 6$ m/s, ou seja, foi observada uma redução abrupta da área dos platôs paralelamente à remoção do filme na superfície do disco.

A velocidade de deslizamento parece influenciar no filme depositado sobre o disco. A Figura 7.16 mostra a relação da velocidade com o filme médio ao longo das frenagens. Este filme médio foi calculado da mesma forma que os resultados anteriores, onde foram descontadas as 10 primeiras frenagens de cada pressão, para evitar as grandes flutuações do filme quando a pressão de contato é alterada.

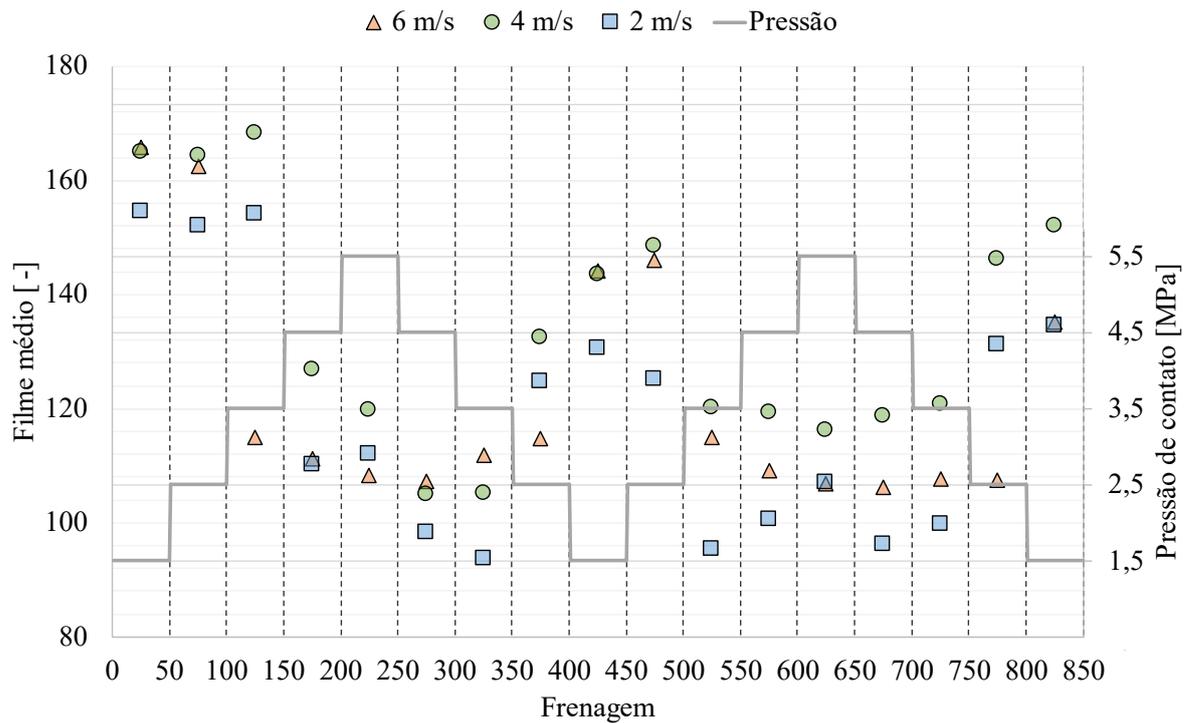


Figura 7.16 – Influência da velocidade de deslizamento no filme médio.

Em geral, pode-se observar que para $v = 2$ m/s, uma menor formação de filme ocorre quando comparada com as velocidades mais elevadas. Isto indica que, em baixas velocidades de deslizamento, a formação de filme sobre o disco ocorre em um menor nível. Em outras palavras, maiores velocidades de deslizamento contribuem para a formação de filme depositado sobre o disco. Também pode-se observar que a quantidade de filme dos três experimentos logo após o assentamento (frenagens iniciais) é maior do que àquelas observadas nas frenagens posteriores. Isso ocorre devido às altas temperaturas impostas durante o período de assentamento, garantindo assim um maior depósito de filme sobre o disco. Por outro lado, após o assentamento, todas as frenagens foram realizadas com temperatura inicial de disco de 100°C . Desta forma, uma menor quantidade de filme sobre o disco foi gerada.

Finalmente, para $v = 4$ m/s e $v = 2$ m/s, pode-se observar o mesmo comportamento do experimento com $v = 6$ m/s, onde um aumento da pressão levou a um aumento da temperatura final. Além disso, a temperatura final máxima foi de 139°C (frenagem #627) e 134°C (frenagem #226) para os experimentos com $v = 4$ m/s e $v = 2$ m/s, respectivamente. Ambos ocorreram também durante uma condição de baixa quantidade de filme sobre o disco. Novamente, a

temperatura máxima após as frenagens não aumentou de forma expressiva em relação à temperatura inicial dos experimentos (100°C).

A Figura 7.17 resume os efeitos de pressões de contato baixas e altas no filme, desgaste de pastilha, atrito e percentual de área dos platôs de contato.

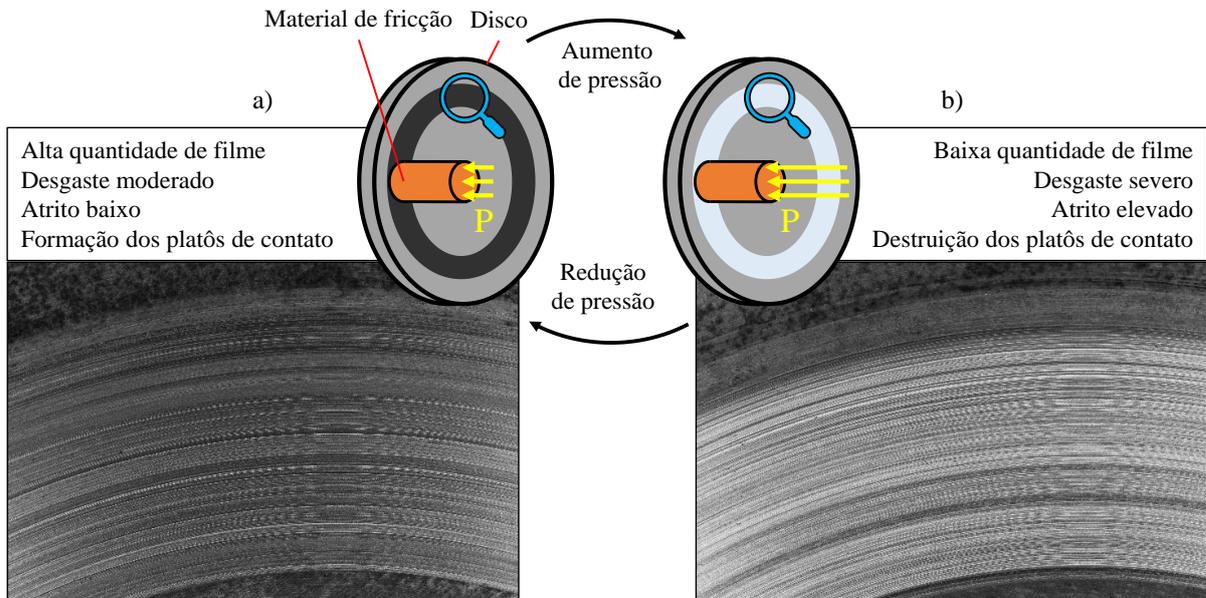


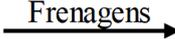
Figura 7.17 – Resumo do efeito da a) baixa e b) alta pressão de contato no filme, desgaste de pastilha, atrito e área dos platôs de contato [Adaptado: Barros et al., 2021].

Pode-se notar uma diferença visível do filme depositado sobre o disco entre uma condição em que é aplicada uma pressão de contato baixa (Figura 7.17-a) e alta (Figura 7.17-b). Assim, altas pressões de contato resultam em um regime severo de desgaste, levando à remoção dos platôs de contato e a um aumento de atrito.

A Tabela 7.5 resume os valores de pressão limite (PL) dos experimentos, que representam as pressões onde ocorreu a transição de filme, de acordo com o critério do filme médio apresentado anteriormente. As setas indicam se a pressão foi aumentada (\uparrow) ou diminuída (\downarrow). É importante ressaltar que a remoção de filme, que ocorre com o aumento de pressão (PL1 \uparrow e PL3 \uparrow), é associada à transição de regime de desgaste moderado para severo. Por outro lado, a formação repentina do filme no disco, que ocorre com a redução de pressão (PL2 \downarrow e PL4 \downarrow), leva a uma redução gradual do desgaste do material de fricção, a qual ocorre ao longo de diversas frenagens.

Tabela 7.5 – Pressão limite dos experimentos [Adaptado: Barros et al., 2021].

Velocidade de deslizamento [m/s]	Pressão de contato [MPa]			
	PL1↑	PL2↓	PL3↑	PL4↓
6	3,5	1,5	3,5	1,5
4	4,5	2,5	3,5	2,5
2	4,5	2,5	3,5	2,5



Para os experimentos $v = 2$ m/s e $v = 4$ m/s, percebe-se que PL3↑ (3,5 MPa) é menor do que PL1↑ (4,5 MPa). Assim, a remoção de filme (e a transição de regime de desgaste moderado para severo) ocorreu em pressões menores em PL3↑ quando comparado com a primeira transição (PL1↑). Conforme pode ser visto na Figura 7.16, o filme médio durante as frenagens anteriores à PL1↑ (frenagens #111 a #150) é maior do que nas frenagens anteriores à PL3↑ (frenagens #461 a #500). Isto indica que a condição prévia da superfície do disco, em relação à quantidade de filme, afeta a pressão limite necessária para a transição de regime de desgaste moderado para severo. Uma hipótese que explique este fenômeno é que em uma condição com menor quantidade de filme, os platôs de contato secundários são removidos com uma menor pressão de contato, visto que há menos filme “amortecendo” a pressão imposta. Assim, os platôs primários acabam removendo o filme depositado sobre o disco levando à alteração de regime de desgaste.

O experimento com $v = 6$ m/s mostrou valores menores de PL1↑, PL2↓ e PL4↓ quando comparado com os outros testes em menor velocidade de deslizamento. A redução de PL1↑ na velocidade elevada sugere que a remoção dos platôs de contato e remoção de filme e, conseqüentemente, a mudança de regime de desgaste de moderado para severo, ocorre em pressões de contato inferiores àquelas observadas em experimentos com velocidades menores. A combinação de altas pressões de contato com altas velocidades de deslizamento parece contribuir para a transição de regime de uma condição moderada para severa. Por outro lado, a redução de PL2↓ e PL4↓ para $v = 6$ m/s indica que uma pressão de contato menor é necessária para que ocorra a formação de filme tribológico sobre o disco.

Conforme já discutido, a remoção dos platôs de contato devido às altas pressões resultou na remoção do filme, com aumento considerável do desgaste de pastilha e do atrito para as três

velocidades de deslizamento. Desta forma, faz sentido uma análise de como o produto entre a pressão de contato e a velocidade de deslizamento (chamado de PV) afeta o filme, o atrito e o desgaste, ou seja, relaciona-se a energia imposta no sistema com estas variáveis. Esta análise é mostrada nos gráficos apresentados na Figura 7.18. Nestes gráficos, a média da quantidade de filme e o atrito médio são calculados excluindo-se as 10 primeiras frenagens para cada pressão de contato, com o intuito de evitar flutuações do filme e do atrito quando a pressão é alterada.

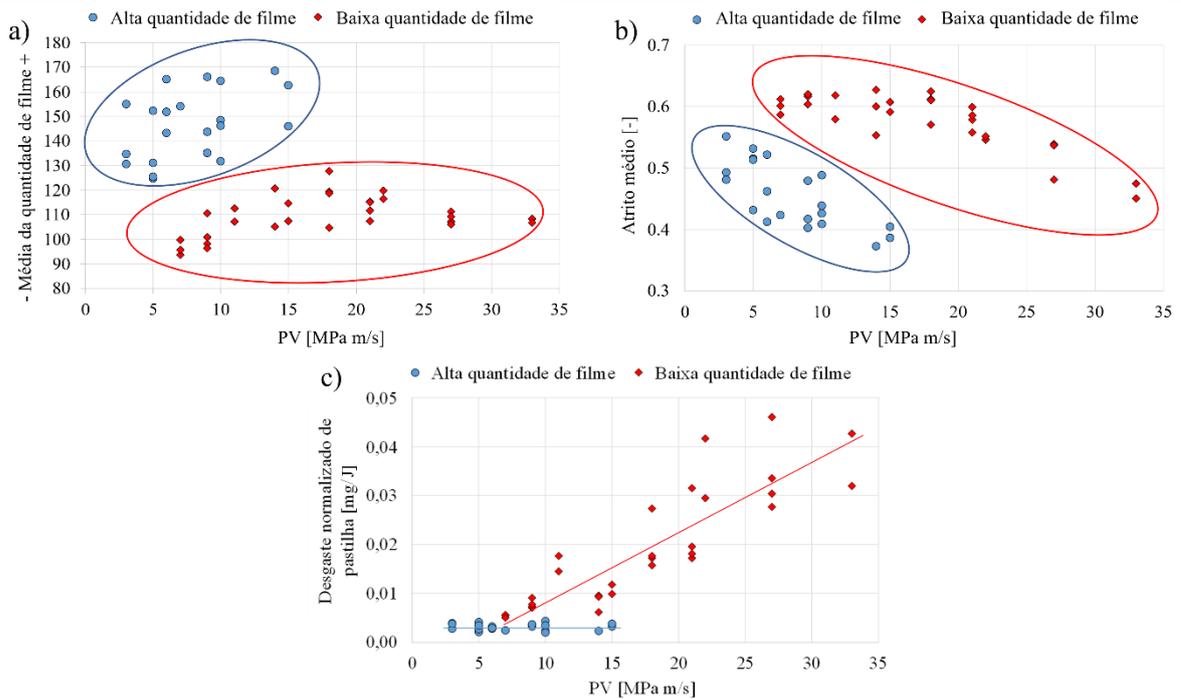


Figura 7.18 – Relação entre PV e a) filme médio, b) atrito médio e c) desgaste de pastilha [Adaptado: Barros et al., 2021].

Dois diferentes grupos podem ser observados na Figura 7.18-a, separados por elipses: 1 - conjunto de frenagens com alta quantidade de filme e 2 - conjunto de frenagens com baixa quantidade de filme. Este gráfico evidencia que o critério de 15% de alteração do filme médio apresentado anteriormente, utilizado para classificar regiões com alta ou baixa quantidade de filme, é adequado. A Figura 7.18-b mostra o atrito médio em função do PV (pressão x velocidade), utilizando os mesmos dois grupos classificados pela quantidade de filme (Figura 7.18-a). Finalmente, a Figura 7.18-c mostra uma análise similar para o desgaste de pastilha, utilizando este mesmo critério. Na condição com baixa quantidade de filme, observa-se um aumento do desgaste com aumento de PV. Por outro lado, nas frenagens com alta quantidade

de filme, o valor de PV não influencia no desgaste de pastilha. Desta forma, pode-se classificar o grupo 1 (alta quantidade de filme) como uma condição de desgaste moderado e o grupo 2 (baixa quantidade de filme) como desgaste severo. É importante correlacionar estes dois grupos, mostrados na Figura 7.18-c, com PV: valores baixos de PV ($PV < 7 \text{ MPa m/s}$), resultam em uma condição de desgaste moderado, enquanto valores elevados ($PV > 15 \text{ MPa m/s}$) resultam no desgaste severo. Para valores intermediários de PV ($7 \text{ MPa m/s} \leq PV \leq 15 \text{ MPa m/s}$), ambos os regimes podem ser observados. Isto ocorre devido à condição prévia (histórico) da superfície de pastilha e do disco em relação aos platôs de contato e filme, respectivamente. Em outras palavras, regimes de desgaste moderado e severo podem ser observados para os mesmos valores de PV, dependendo se a transição ocorre do regime moderado para o severo ou o oposto (severo para moderado).

7.3.3 Homogeneidade radial do filme no disco

A análise da distribuição radial de filme no disco permite constatar a homogeneidade deste filme ao longo das diversas frenagens realizadas. Os gráficos gerados para esta análise foram obtidos através do *software* LATRIB Pro-FD, conforme descrito na seção 6.5.2. A Figura 7.19, Figura 7.20 e Figura 7.21 mostram estes resultados para os experimentos com $v = 6 \text{ m/s}$, $v = 4 \text{ m/s}$ e $v = 2 \text{ m/s}$, respectivamente. A escala de intensidade de pixels do filme também foi invertida, de forma que, quanto maior o valor, maior a quantidade de filme. A evolução do atrito ao longo das frenagens (linha contínua) também é mostrada no gráfico.

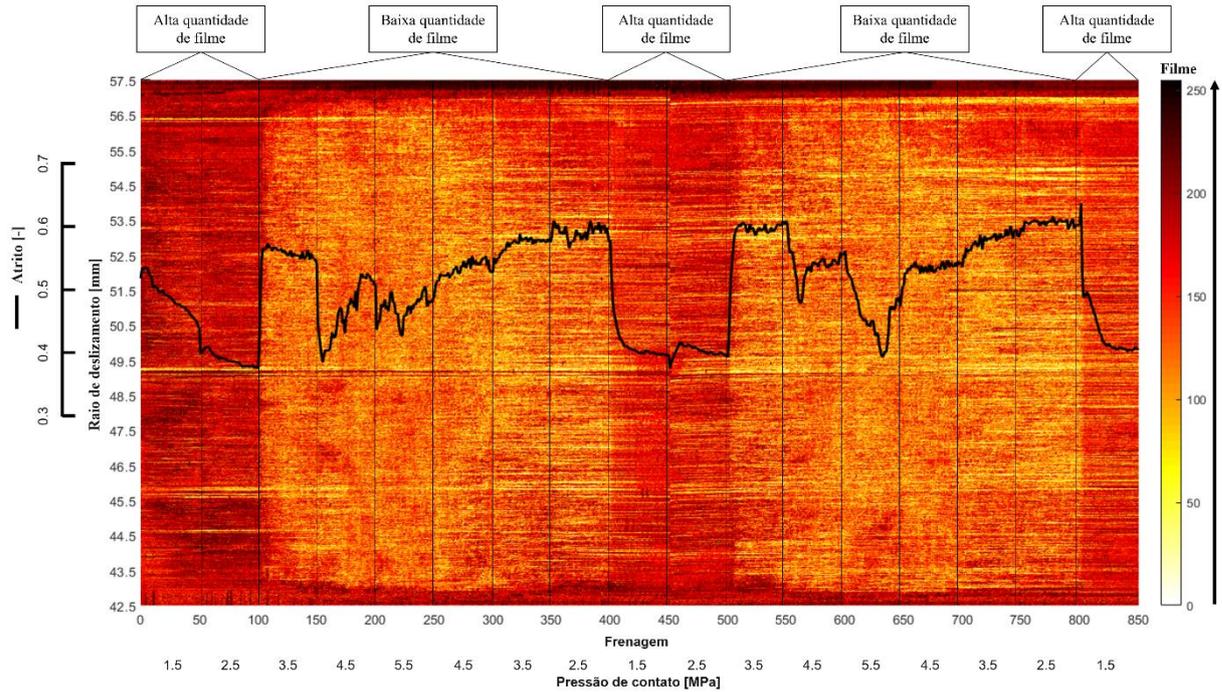


Figura 7.19 – Resultados de filme depositado sobre o disco ao longo do raio de deslizamento para cada frenagem do experimento com $v = 6$ m/s [Adaptado: Barros et al., 2021].

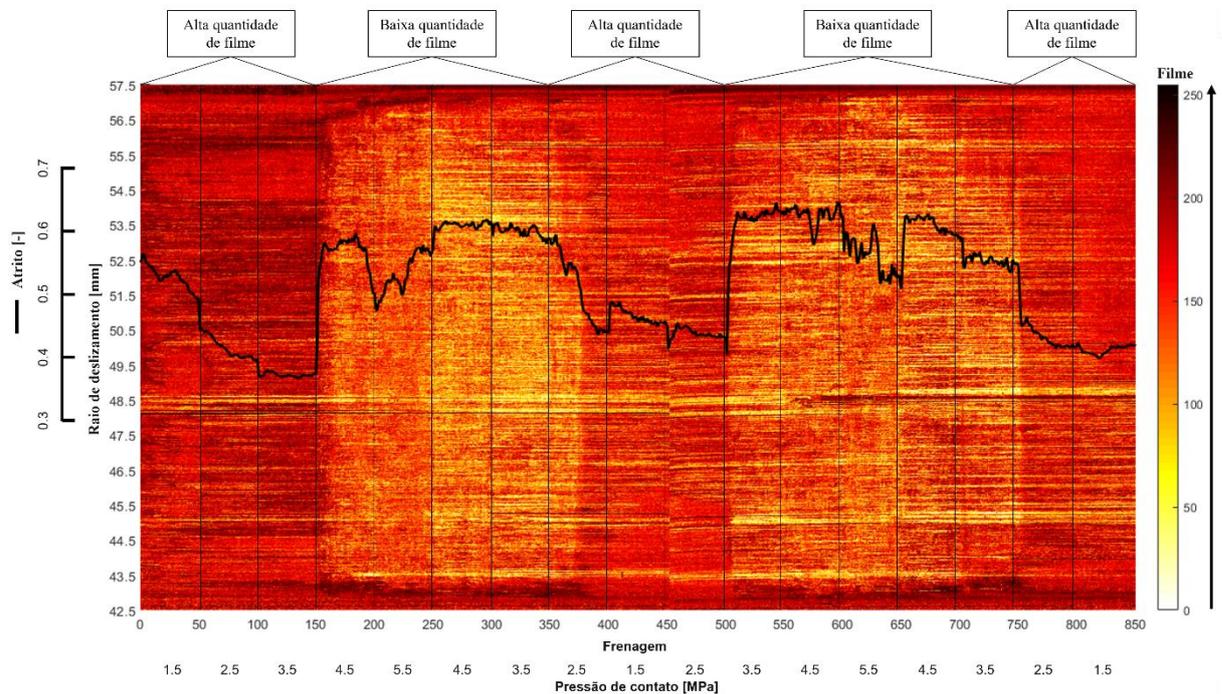


Figura 7.20 – Resultados de filme depositado sobre o disco ao longo do raio de deslizamento para cada frenagem do experimento com $v = 4$ m/s [Adaptado: Barros et al., 2021].

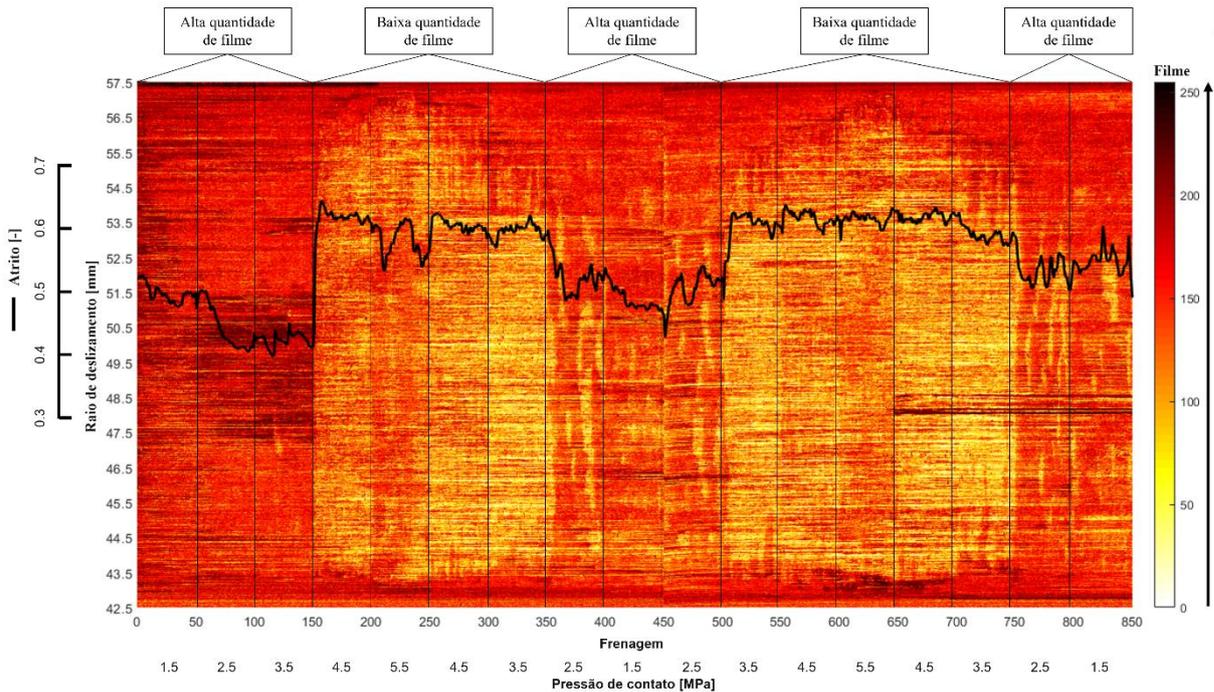


Figura 7.21 – Resultados de filme depositado sobre o disco ao longo do raio de deslizamento para cada frenagem do experimento com $v = 2$ m/s [Adaptado: Barros et al., 2021].

Ao observar as tonalidades mostradas nas figuras acima, pode-se identificar as frenagens com alta e baixa quantidade de filme depositado sobre o disco. Conforme discutido anteriormente, a etapa de assentamento resulta em uma maior quantidade de filme. Desta forma, pode-se observar uma relativa homogeneidade radial de filme nas primeiras frenagens (à esquerda do gráfico) após esta etapa para os três experimentos. Para o ensaio com maior velocidade de deslizamento ($v = 6$ m/s), o filme se mostrou radialmente homogêneo em todas as frenagens. Por outro lado, nos experimentos com $v = 4$ m/s e $v = 2$ m/s (Figura 7.20 e Figura 7.21, respectivamente), um comportamento mais radialmente heterogêneo é observado. Além disso, esta heterogeneidade fica mais evidente durante as frenagens onde ocorre a instabilidade do atrito, principalmente para o ensaio de $v = 2$ m/s (frenagens #201 a #250, Figura 7.21), indicando uma alteração radial de formação do filme.

Também é possível notar que, para os três experimentos, um maior depósito de filme é observado nas bordas externas da trilha atritada (por volta de 42.5 - 43.0 mm e 57.0 - 57.5 mm). Conforme citado anteriormente, o centro da trilha atritada suporta a maior parte do carregamento, ocorrendo um menor acúmulo de filme nesta região [Davin et al., 2019]. Assim,

o filme pode se espalhar na superfície do disco, “empurrando-os” para os limites da trilha atritada.

7.3.4 Conclusões parciais

Neste estudo, foi possível observar que altas pressões de contato e altas velocidades de deslizamento contribuem para a remoção dos platôs de contato da pastilha e para a redução do filme sobre o disco, resultando também na transição de regime moderado para severo. Na transição de regime severo para moderado, a taxa de formação do filme sobre o disco é diferente da taxa de evolução do desgaste do material de fricção, no qual ocorre de forma mais lenta. Por outro lado, na transição de regime moderado para severo, a taxa de evolução do desgaste ocorre mais rapidamente. Além disso, a condição prévia da superfície da pastilha (em relação aos platôs de contato) e do disco (em relação à quantidade de filme depositado), afetam a pressão limite que leva à transição de regime de moderado para severo. A instabilidade de atrito durante o regime de desgaste severo se mostrou mais evidente nos experimentos com maiores velocidades de deslizamento. Finalmente, o filme sobre o disco se mostrou mais radialmente heterogêneo em velocidades de deslizamento mais baixas.

7.4 Efeitos dos regimes de desgaste nas superfícies de discos, pastilhas e detritos

Buscou-se neste estudo avaliar qual o efeito que a transição de regime de desgaste de uma condição moderada para severa tem sobre a morfologia do par tribológico (disco e pastilha), bem como sobre os detritos coletados durante as frenagens.

7.4.1 Parâmetros de ensaio

Neste estudo foi realizada uma etapa de assentamento similar a dos estudos anteriores, nos quais foram aplicadas 100 frenagens baseadas no procedimento AK Master SAE J2522 (SAE International, 2003). Após o assentamento, foram aplicadas 200 frenagens com velocidade constante para se obter um período de estabilização. Esta última etapa tem o intuito de garantir que o regime de desgaste esteja estabilizado.

Após esta etapa de estabilização, ocorre a etapa de coleta de detritos. Conforme mencionado na seção 6.4, aplica-se ar comprimido na calha e no suporte do filtro antes da

coleta, de modo a remover os detritos oriundos das frenagens que ocorreram nas etapas anteriores (assentamento e estabilização). Então, instala-se o filtro para possibilitar a coleta dos detritos. Esta coleta foi realizada ao longo de 10 frenagens. A Tabela 7.6 resume os parâmetros de ensaio utilizados neste experimento.

Tabela 7.6 – Parâmetros de ensaio.

Etapa	Repetições	Velocidade de deslizamento [m/s]	Pressão de contato [MPa]	Tempo de frenagem [s]	Temperatura inicial do disco [°C]
Assentamento	100	De acordo com o procedimento AK Master (SAE J2522)			
Estabilização	200				
Coleta de detritos	10	4	2,5 / 4,5	7,5	100

Todos os parâmetros foram mantidos fixos nas etapas de estabilização e coleta de detritos. A velocidade de deslizamento escolhida foi de 4 m/s (constante), valor intermediário à velocidade aplicada no estudo dos efeitos da velocidade de deslizamento e da pressão de contato crescente e decrescente na transição de regime de desgaste (seção 7.3). Este valor foi escolhido de forma a permitir uma alteração do regime de desgaste alterando apenas o valor da pressão de contato, conforme visto nos resultados da seção 7.2. O tempo de frenagem e a temperatura inicial do disco foram de 7,5 segundos e 100°C, respectivamente.

Duas pressões de contato foram escolhidas: 2,5 e 4,5 MPa. Isso permite atingir um regime de desgaste moderado, em 2,5 MPa, e desgaste severo, em 4,5 MPa, conforme foi observado no estudo anterior. Para cada pressão de contato, uma pastilha nova de mesma formulação (apresentada na Tabela 6.2) foi utilizada. Para facilitar o entendimento, as amostras são nomeadas pelo valor de pressão de contato utilizado, ou seja, 2,5 MPa (regime moderado) e 4,5 MPa (regime severo). Foram utilizados rotores diferentes para cada experimento. Estes rotores foram submetidos a uma sequência de lixas, permitindo condições superficiais iniciais similares nos dois ensaios realizados. Ao final dos experimentos, o perfil radial das trilhas atritadas dos discos foi obtido através de um rugosímetro (descrito na seção 6.5.4). Parâmetros de rugosidade também foram mensurados. Além disso, amostras dos discos foram retiradas para que estes fossem avaliados por interferometria (seção 6.5.3), espectroscopia Raman (seção 6.5.6) e MEV/EDS (seção 6.5.7). Microscopias das pastilhas também foram obtidas, com o intuito de quantificar a área dos platôs de contato, bem como imagens geradas por MEV. A

topografia das pastilhas foi obtida por interferometria. Finalmente, as pastilhas e os detritos coletados nos experimentos foram analisados através de espectroscopia Raman.

7.4.2 Atrito e desgaste

Os resultados de atrito e de filme no disco (obtidos através das imagens registradas via câmera digital fotográfica), para os experimentos com 2,5 MPa e 4,5 MPa são apresentados na Figura 7.22. Cabe aqui salientar que, da mesma forma que os resultados do estudo anterior (seção 7.3), optou-se por inverter a escala de intensidade de pixels do filme. Desta forma, quanto maior o valor desta escala, maior a quantidade de filme. Os resultados do assentamento não são de interesse neste estudo, e foram ocultados do gráfico. Assim, a primeira frenagem mostrada na Figura 7.22 refere-se à primeira frenagem da seção de estabilização.

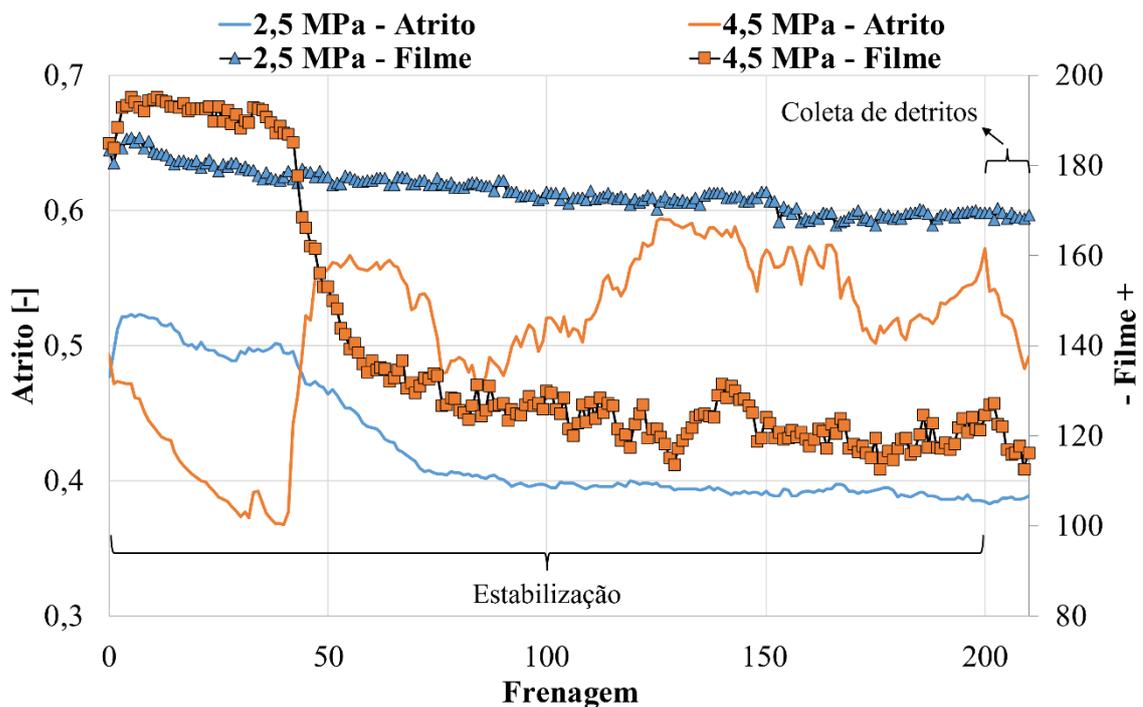


Figura 7.22 – Resultados de atrito e intensidade dos pixels do disco para cada pressão aplicada nos experimentos com 2,5 MPa e 4,5 MPa.

No experimento com pressão de contato de 2,5 MPa, observa-se que o atrito apresenta um valor relativamente alto ($\mu \sim 0,50$) até a frenagem 41, a partir da qual apresenta um

decréscimo de seu valor até chegar a uma estabilização em torno de $\mu = 0,39$, após a frenagem 73. Este valor de atrito se mantém relativamente constante até o final do experimento, na frenagem 210. Este comportamento sugere que foram necessárias 73 frenagens para alcançar um patamar estável de atrito. Este comportamento ocorre devido às diferenças nos parâmetros de ensaio (força, velocidade de deslizamento e temperatura) entre o assentamento e a etapa de estabilização. Por outro lado, o depósito de filme sobre o disco mostrou um comportamento levemente decrescente até a frenagem 153, indicando uma pequena remoção de filme. A partir desta frenagem o filme assume um comportamento relativamente constante até o final do ensaio.

O experimento com pressão mais elevada, de 4,5 MPa, resultou em um comportamento bem distinto àquele observado no ensaio com 2,5 MPa. Observa-se uma redução do atrito nas frenagens iniciais, caindo de 0,47 para 0,37 (frenagem 36). Isso ocorre devido ao grande incremento de pressão entre o final da etapa de assentamento (1,3 MPa) e a caracterização (4,5 MPa). Conforme discutido anteriormente, a redução do atrito com o aumento de pressão é um fenômeno já reportado na literatura [Uyyuru et al., 2006; Kumar e Bijwe, 2011b]. A partir da frenagem 37, um aumento repentino do atrito é observado, subindo de 0,37 para 0,56 (frenagem 54), caracterizando assim uma mudança de regime de desgaste de moderado para severo. Até o final do experimento, o atrito apresenta valores elevados, com grandes oscilações. O mesmo fenômeno foi observado nos experimentos apresentados na seção 7.3, onde uma instabilidade do atrito ocorreu no regime de desgaste severo. Em relação ao filme depositado sobre o disco, observa-se que este apresenta pouca oscilação durante o regime moderado. Entretanto, quando ocorre a transição de regime, uma redução abrupta da quantidade de filme sobre o disco é observada. Em outras palavras, foi constatado o mesmo comportamento observado nos resultados dos experimentos apresentados nas seções 7.2 e 7.3.

A Figura 7.23 apresenta os resultados de desgaste de pastilha normalizado para este experimento durante a caracterização e a coleta de detritos.

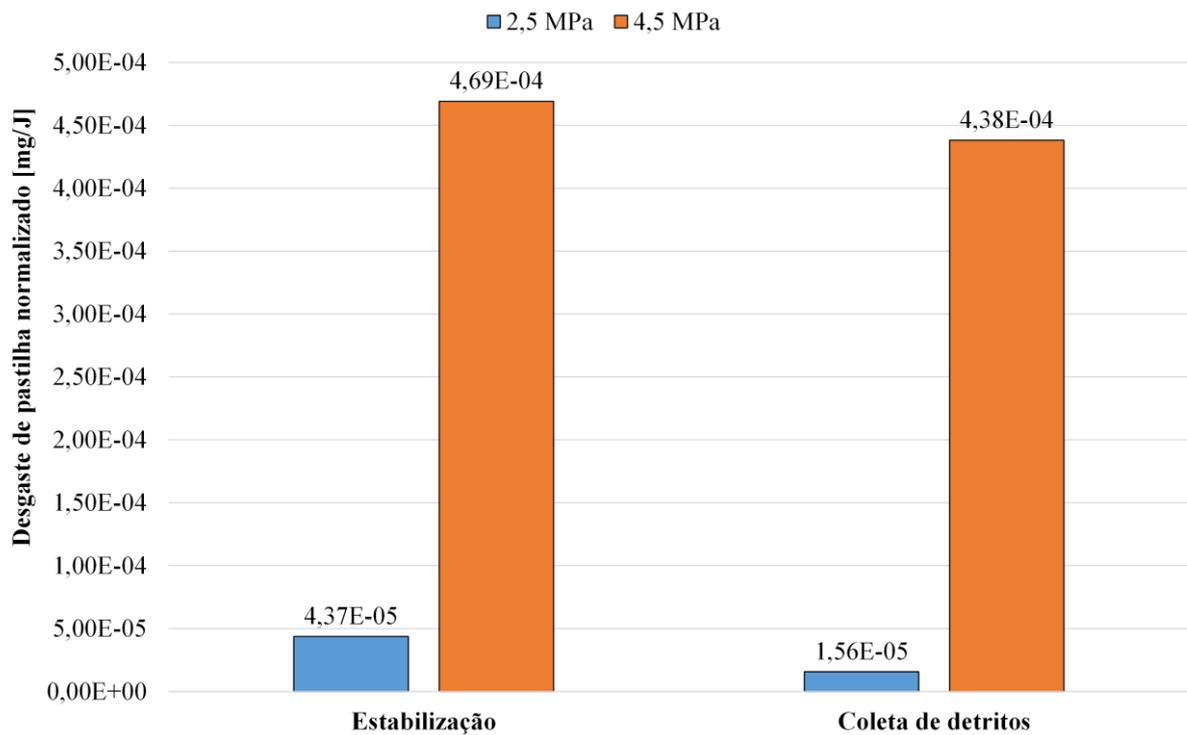


Figura 7.23 – Desgaste de pastilha normalizado dos experimentos com 2,5 MPa e 4,5 MPa.

Pode-se observar a grande diferença de desgaste de pastilha entre os dois experimentos. Durante a estabilização, foi observado que o desgaste de pastilha no experimento com pressão de 4,5 MPa foi 10,7 vezes maior do que no experimento com 2,5 MPa. Por outro lado, no período da coleta de detritos, observa-se um desgaste aproximadamente 20 vezes maior na condição severa do que na moderada. Esta diferença em relação ao período de estabilização ocorre devido à grande variação de desgaste ao longo do experimento de 4,5 MPa. Embora o desgaste após cada frenagem individual não tenha sido mensurado, pode-se esperar que o desgaste apresente grandes oscilações, similarmente ao que ocorre com o atrito, conforme mostrado na Figura 7.22.

7.4.3 Análise dos discos

7.4.3.1 Interferometria de disco

As interferometrias realizadas nos discos após os experimentos são apresentadas na Figura 7.24.

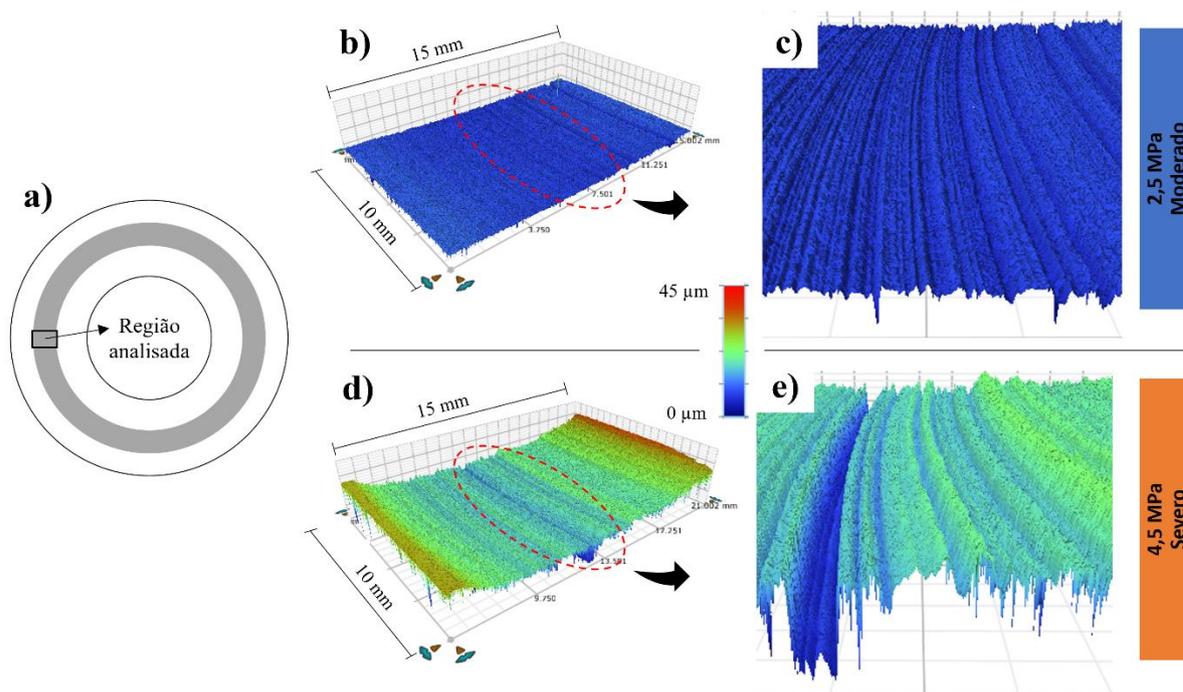


Figura 7.24 – Interferometria dos discos após frenagens: a) região de análise, b) topografia da região de análise no regime de desgaste moderado, c) detalhe topográfico no regime de desgaste moderado, d) topografia da região de análise no regime de desgaste severo e e) detalhe topográfico no regime de desgaste severo.

A Figura 7.24-b mostra a topografia da área analisada (15 mm x 10 mm) no experimento em regime moderado. A largura de 15 mm coincide com o diâmetro do material de fricção. Percebe-se uma homogeneidade na superfície do disco, indicando um baixo desgaste do rotor nos experimentos. Um comportamento distinto pode ser observado nos experimentos com regime de desgaste severo (Figura 7.24-d). Pode-se observar uma variação radial de altura do disco, onde uma maior profundidade é observada no centro da trilha atritada, evidenciando assim um maior desgaste nesta condição.

Ao observar as topografias em detalhe para os experimentos em regimes moderado (Figura 7.24-c) e severo (Figura 7.24-e), pode-se notar marcas de abrasão na superfície dos dois discos. Entretanto, no regime de desgaste severo, a superfície do disco apresenta marcas de abrasão mais profundas quando comparadas com o experimento de desgaste moderado. Neste caso, as marcas de abrasão surgem devido ao contato mais direto entre o material de fricção e o disco. Esta observação corrobora para o entendimento de que o regime de desgaste severo afeta não apenas o material de fricção, mas também o rotor. A profundidade destas marcas de abrasão é demonstrada nos perfis de rugosidade apresentados a seguir.

7.4.3.2 Rugosidade de disco

Os perfis de rugosidade radial do disco nos experimentos com 2,5 e 4,5 MPa, obtidos através de um rugosímetro, são apresentados na Figura 7.25. Para cada disco, foram realizadas três medições radiais em regiões distintas. Estas medições se mostraram muito similares entre si para o mesmo disco, de forma que apenas uma delas é apresentada. O trecho de medição, de 12,50 mm, foi realizado na parte central da trilha atritada.

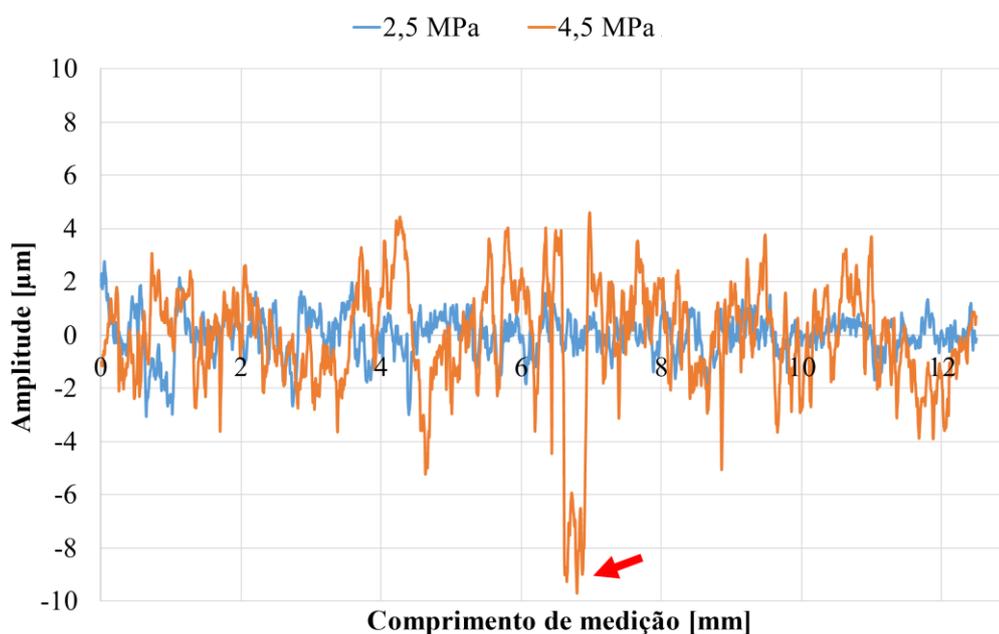


Figura 7.25 – Perfis de rugosidade de disco para os experimentos com 2,5 e 4,5 MPa. A seta indica o maior vale encontrado nos perfis.

Pode-se notar que o perfil de rugosidade medido no experimento com 4,5 MPa apresenta vales maiores do que aqueles observados com pressão de contato de 2,5 MPa. A maior profundidade foi de 9,70 μm (indicado pela seta), evidenciando o maior vale apresentado na seção anterior, na Figura 7.24-e.

Os parâmetros de rugosidade (R_q e R_{sk}) do disco mensurados pelo rugosímetro são apresentados na Figura 7.26. Para cara experimento, os valores de rugosidade foram avaliados em três regiões distintas da trilha atritada. Desta forma, são mostrados os valores médios de R_q e R_{sk} destas três medições, com seus respectivos desvios padrão ($\pm 1\sigma$) indicados no gráfico pelas barras de erro.

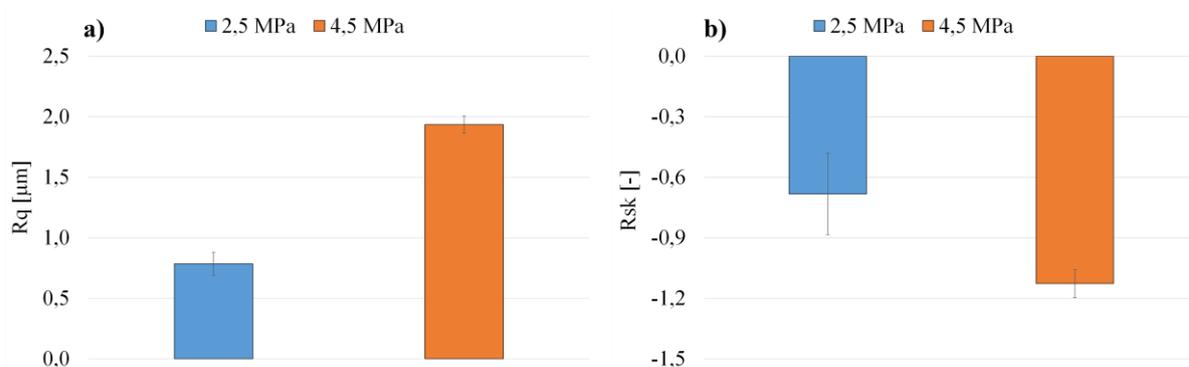


Figura 7.26 – Parâmetros de rugosidade de discos para os experimentos com 2,5 e 4,5 MPa: a) R_q (rugosidade média quadrática) e b) R_{sk} (assimetria).

Observa-se que o parâmetro R_q (Figura 7.26-a), evidencia a maior heterogeneidade da rugosidade do disco submetido ao regime de desgaste severo. Na Figura 7.26-b, pode-se notar que o valor de R_{sk} para o experimento com 4,5 MPa é mais negativo do que o do experimento de 2,5 MPa. Isso indica que o aumento da rugosidade demonstrado através do parâmetro R_q ocorreu de forma assimétrica, em direção aos vales. Dessa forma, pode-se afirmar que os vales do disco aumentaram em quantidade e/ou profundidade no regime de desgaste severo quando comparado com o regime moderado. Assim, pode-se concluir que, no regime severo, a ausência dos platôs de contato e do filme tribológico é maléfica não apenas à pastilha, mas também contribui para um aumento do desgaste do rotor.

7.4.3.3 Fotografia, MEV e EDS de discos

As imagens fotográficas dos discos em ambos os regimes de desgaste, bem como as obtidas por MEV, são apresentadas na Figura 7.27.

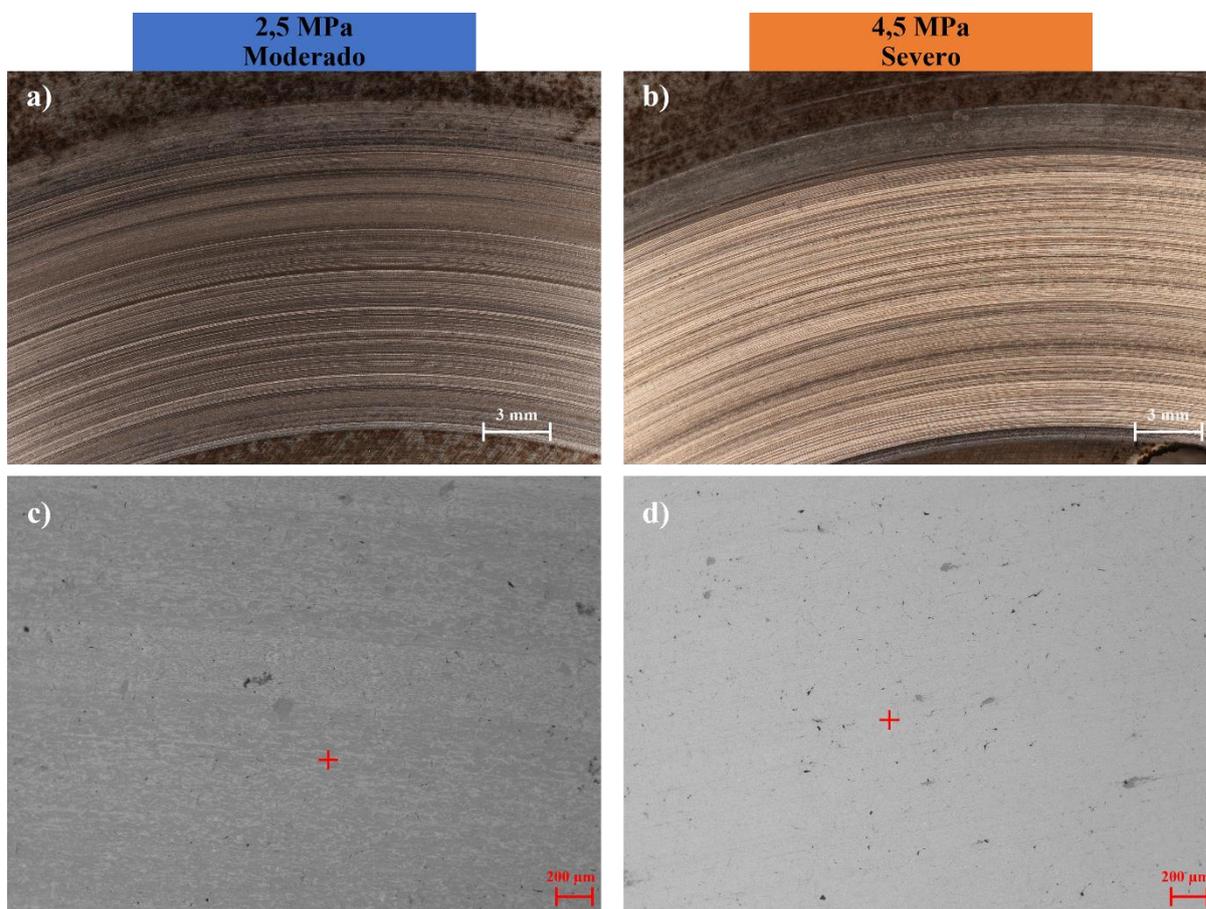


Figura 7.27 – Imagens da trilha atritada dos discos: a) fotografia no regime moderado, b) fotografia no regime severo, c) microscopia eletrônica de varredura (elétrons retroespalhados) no regime moderado e d), microscopia eletrônica de varredura no regime severo. As marcações indicam os locais de medição do EDS. Ampliação de 50 ×.

As fotografias dos discos mostram o mesmo aspecto de filme observado nos estudos anteriores, onde o regime moderado resultou em um filme visível e relativamente homogêneo aderido à superfície do disco (Figura 7.27-a). No regime severo, um aspecto de coloração bem mais claro é mostrado (Figura 7.27-b). Em relação às imagens obtidas por MEV, no experimento com 2,5 MPa (Figura 7.27-c), pode-se facilmente notar a trilha atritada do disco

através de marcas da pastilha sobre sua superfície. Por outro lado, a trilha atritada do disco no experimento com 4,5 MPa (Figura 7.27-d) é de difícil identificação neste caso.

Os percentuais dos elementos encontrados nestas superfícies, através do EDS realizado nas marcações na Figura 7.27, são apresentados na Tabela 7.7. Esta análise foi realizada de forma pontual, ou seja, um ponto da superfície atritada de cada disco foi selecionado para permitir a escolha do local de realização do EDS.

Tabela 7.7 – Análise em EDS da trilha atritada dos discos nos ensaios com desgaste moderado e severo.

Elemento	% em massa	
	Moderado	Severo
Ferro	77,4	98,6
Oxigênio	19,7	-
Enxofre	2,0	-
Silício	0,9	1,4

Observa-se que, para o experimento em desgaste moderado, foram detectados principalmente ferro e oxigênio, além do enxofre e silício. Isto evidencia a presença de filme tribológico, que é constituído basicamente por óxido de ferro. Por outro lado, a análise da superfície do disco no experimento em desgaste severo apresentou grande concentração de ferro, não sendo detectada a presença de oxigênio. Isso indica uma redução de filme formado na superfície do disco nesta condição.

7.4.3.4 Raman de disco

Após os experimentos, os discos dos dois ensaios foram analisados através de espectroscopia Raman. Uma primeira análise foi realizada fora da trilha atritada do disco, conforme mostrado na Figura 7.28.

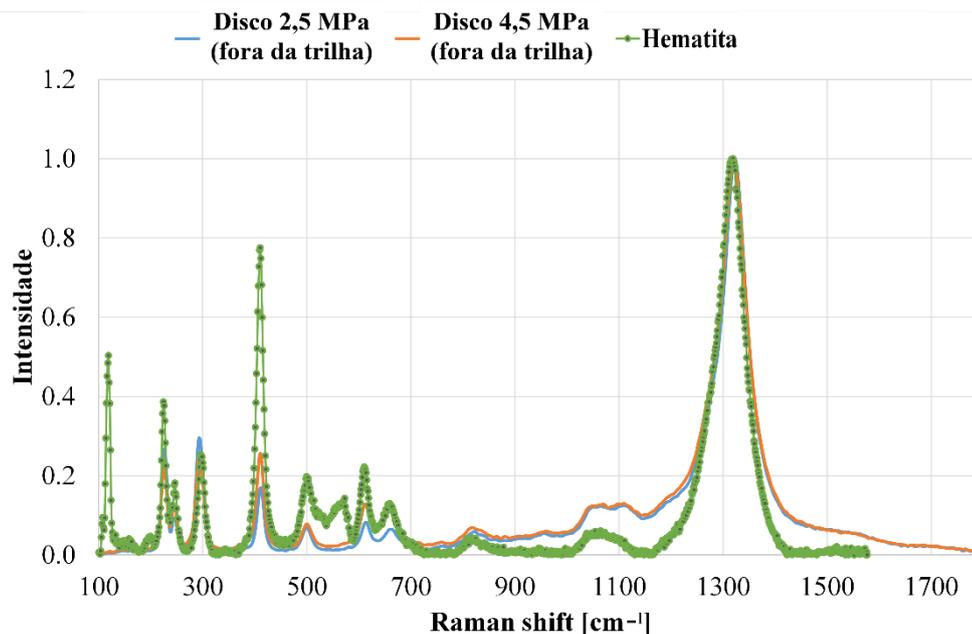


Figura 7.28 – Espectroscopia Raman do disco fora da trilha atritada.

Pode-se observar que os dois experimentos apresentam um padrão de intensidades da espectroscopia Raman muito semelhantes entre si e ao encontrado no banco de dados RRUFF [Lafuente et al., 2015], que se refere ao óxido hematita (Fe_2O_3). A similaridade do padrão de intensidades entre os dois experimentos é esperada, visto que a análise foi realizada na região externa da trilha atritada. Cabe aqui salientar que esta região ficou submetida a temperaturas na ordem de 100°C ao longo de todo o experimento (em torno de 3 horas e 30 minutos), visto que esta foi a temperatura inicial de disco controlada através do aquecedor indutivo.

A Figura 7.29 mostra os resultados de espectroscopia Raman no centro da trilha atritada nos dois experimentos, bem como uma referência para comparação de resultados. Cabe salientar que estas medições foram realizadas três vezes por disco. Os resultados das três medições se mostraram muito similares entre si. Desta forma, apenas uma destas medições é mostrada.

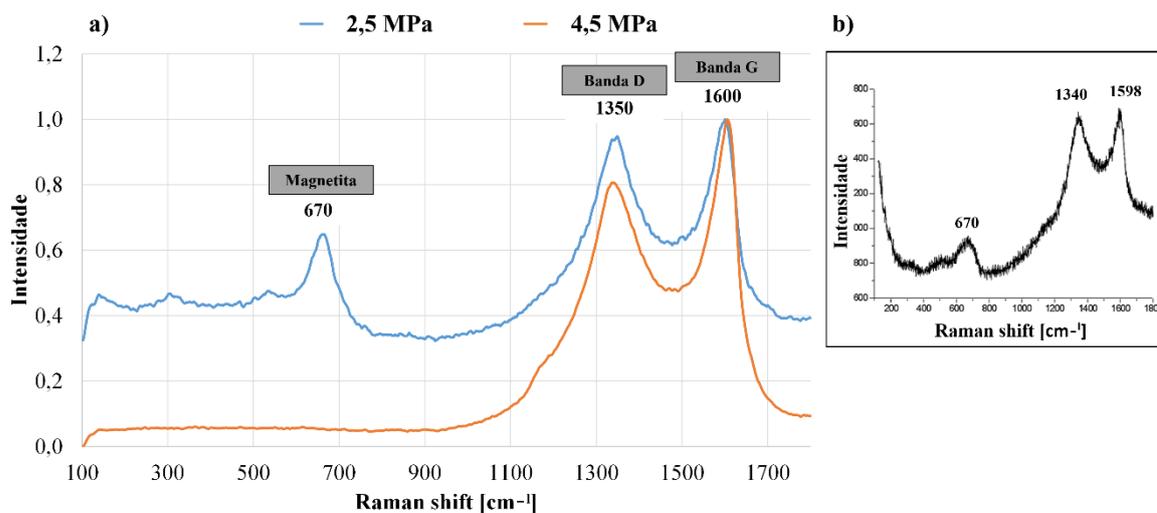


Figura 7.29 – Espectroscopia Raman do disco na trilha atritada: a) experimentos com 2,5 e 4,5 MPa e b) referência de padrão de intensidades (Adaptado: Österle e Urban, 2006).

Nos dois experimentos (Figura 7.29-a), pode-se verificar picos em torno de valores de *Raman shift* de 1350 e 1600 cm^{-1} . De acordo com a literatura, os picos próximos de 1350 e 1600 cm^{-1} , chamados de bandas D e G, respectivamente, referem-se à presença de carbono na amostra analisada [Nascimento, 2001]. Estes picos são comumente observados em superfícies de discos atritados contra materiais de fricção, acompanhados de outros picos ao longo do eixo das abscissas [Österle e Urban, 2006; Dmitriev et al., 2008; Hinrichs et al., 2018]. Estes picos podem ser oriundos também da grafita presente no ferro fundido dos discos. Hinrichs et al., 2018, mostram que, em um disco de ferro fundido cinzento não atritado, apenas estes picos são mostrados na análise de Raman. Cabe aqui salientar que na análise anterior (Figura 7.28), ocorreu a formação de hematita fora da trilha desgastada, visto que os discos foram mantidos a temperaturas de 100°C por algumas horas. Essa hipótese explicaria o fato de naquela análise (Figura 7.28) o pico em 1600 não ter se tornado evidente.

Uma diferença entre os dois experimentos é observada em valores de *Raman shift* próximos de 670 cm^{-1} , onde um pico neste valor ocorre no ensaio de desgaste moderado (2,5 MPa). O padrão apresentado como referência na Figura 7.29-b [Österle et al., 2007] também apresenta um pico próximo deste valor. Segundo o autor, este pico refere-se à formação de magnetita (Fe_3O_4). O pico referente à presença de magnetita não foi observado no ensaio com desgaste severo. Este fato corrobora o estudo de Hinrichs et al., 2011a, onde relata que um aumento de velocidade de deslizamento levou a uma redução da presença de magnetita. No

caso do presente estudo, o aumento de pressão levou à não identificação de magnetita. Pode-se então afirmar que o aumento de severidade das frenagens, em termos de pressão de contato ou velocidade de deslizamento, evita a formação deste tipo de óxido. Cabe aqui salientar que a magnetita é descrita pela literatura como sendo o principal componente do filme tribológico [Österle e Urban, 2004; Hinrichs et al., 2010; Hinrichs et al., 2011b]. Em outras palavras, a não detecção de magnetita no experimento com desgaste severo está relacionada à redução de filme tribológico encontrado sobre o disco nesta condição de regime. Além disso, o filme, composto principalmente pela magnetita, atua como estabilizador de atrito [Hinrichs et al., 2011a], o que explica a grande variação do atrito observado no experimento com regime de desgaste severo (Figura 7.22).

7.4.4 Análise das pastilhas

7.4.4.1 Quantificação dos platôs de contato

As microscopias óticas da região central das pastilhas, após os experimentos (frenagem 210), são apresentadas na Figura 7.30.

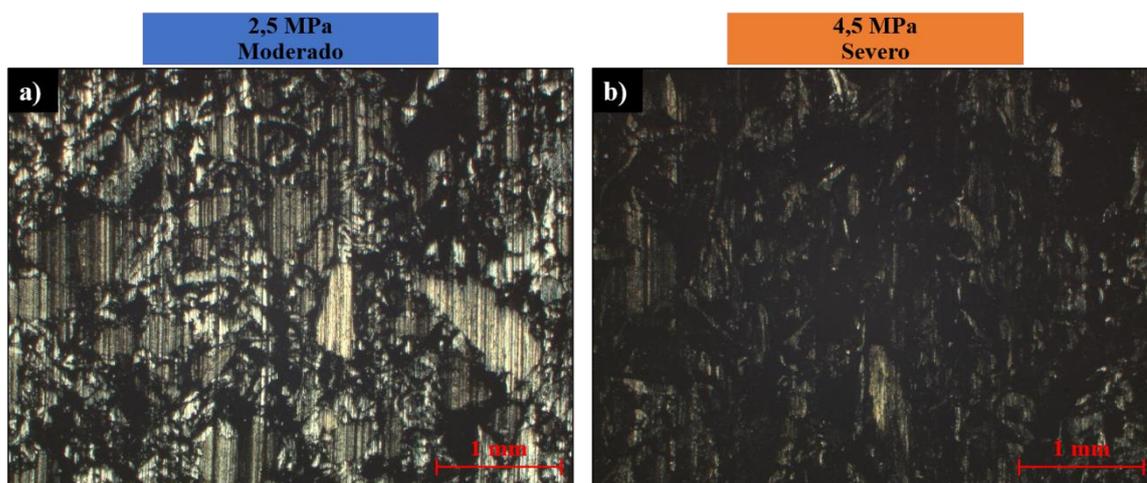


Figura 7.30 – Imagens da superfície das pastilhas após os experimentos com: a) regime moderado e b) regime severo.

Pode-se perceber o mesmo fenômeno observado no estudo apresentado na seção 7.2: enquanto nos ensaios em regime moderado observam-se platôs de contato grandes e visíveis, o

regime de desgaste severo resultou em poucos platôs de contato na superfície da pastilha. Também é possível verificar este resultado através da quantificação do percentual de área dos platôs de contato, obtida pelo *software* LATRIB Pro-AC (seção 6.5.1). Esta análise resultou em áreas de platôs de 17,23% e 6,23% para os experimentos em regimes moderado e severo, respectivamente. Ou seja, o regime de desgaste moderado resultou em um percentual de área de platôs de contato quase três vezes maior do que aquela observada no regime de desgaste severo.

7.4.4.2 MEV das pastilhas

A Figura 7.31 mostra as imagens das pastilhas nos dois regimes de desgaste, obtidas através de microscopia eletrônica de varredura.

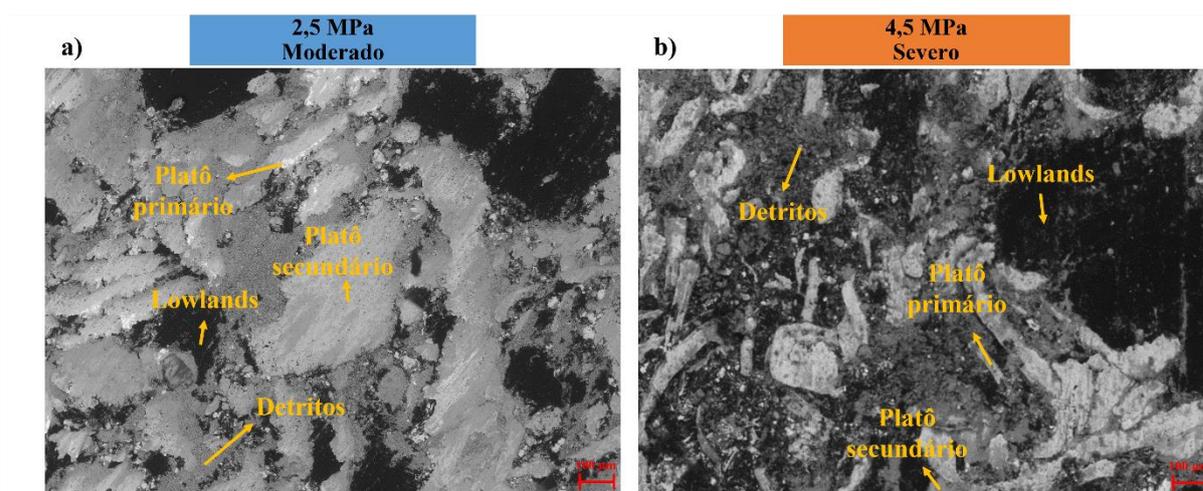


Figura 7.31 – Microscopia eletrônica de varredura (elétrons retroespalhados) da superfície da pastilha: a) regime moderado e b) regime severo. Ampliação de 100 \times .

Novamente, percebe-se a diferença entre os dois regimes de desgaste. No experimento com desgaste moderado (Figura 7.31-a), os platôs de contato secundários são grandes e bem distribuídos. Os platôs primários (coloração mais clara) se mostram pequenos, visto que os platôs secundários (coloração cinza) estão cobrindo sua superfície. Por outro lado, a Figura 7.31-b (regime severo) mostra uma irregularidade na superfície da pastilha, com muitas fibras metálicas aparentes e com poucos platôs de contato secundários. Além disso, uma grande quantidade de detritos fragmentados é observada, não ocorrendo sua compactação e,

consequentemente, formação dos platôs de contato secundários. Este comportamento corrobora o fato de que, no desgaste severo, os platôs de contato se desestabilizam, levando à sua remoção da superfície do material de fricção.

A Figura 7.32 mostra imagens de MEV dos detritos, em uma maior ampliação, em outra região da superfície das pastilhas.

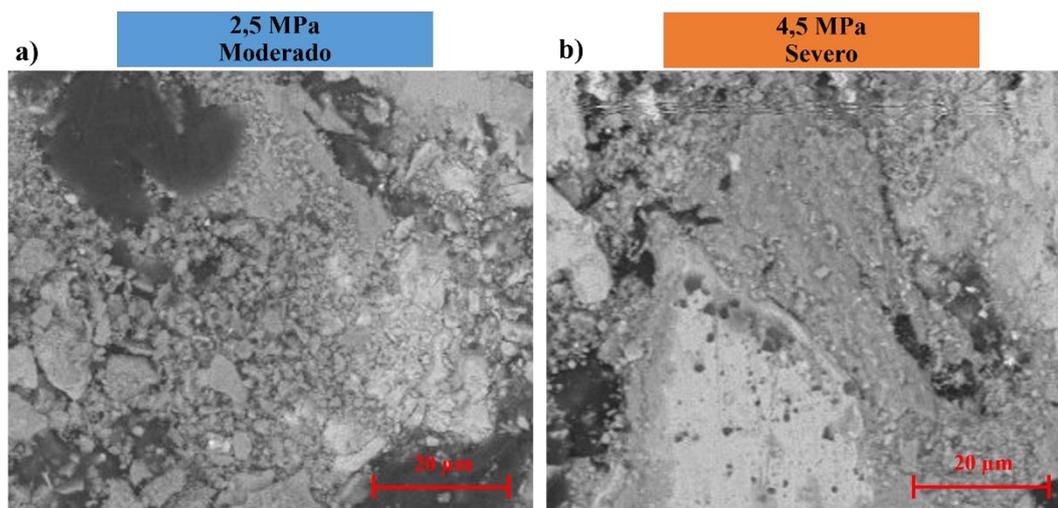


Figura 7.32 – Microscopia eletrônica de varredura (elétrons retroespalhados) dos detritos na superfície da pastilha: a) regime moderado e b) regime severo. Ampliação de 500 ×.

Pode-se observar os detritos nos dois experimentos, onde um início de aglomeração destes detritos ocorre em algumas regiões.

7.4.4.3 Interferometria de pastilha

A Figura 7.33 mostra as interferometrias das pastilhas para os experimentos com desgaste moderado e severo.

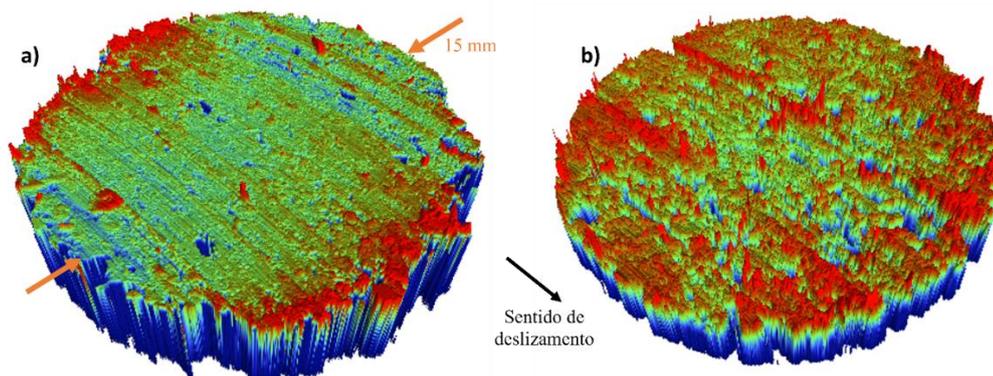


Figura 7.33 – Topografia das pastilhas geradas pelo interferômetro: a) regime moderado e b) regime severo.

Pode-se perceber uma nítida diferença entre as topografias dos dois experimentos. Enquanto o teste com 2,5 MPa (desgaste moderado) apresentou uma topografia com poucos vales, o experimento com 4,5 MPa (desgaste severo) resultou em uma superfície mais irregular, decorrente da alta taxa de desgaste. A Figura 7.34 mostra os parâmetros de rugosidade de superfície S_q e S_{sk} (descritos na seção 6.5.4) destas topografias.

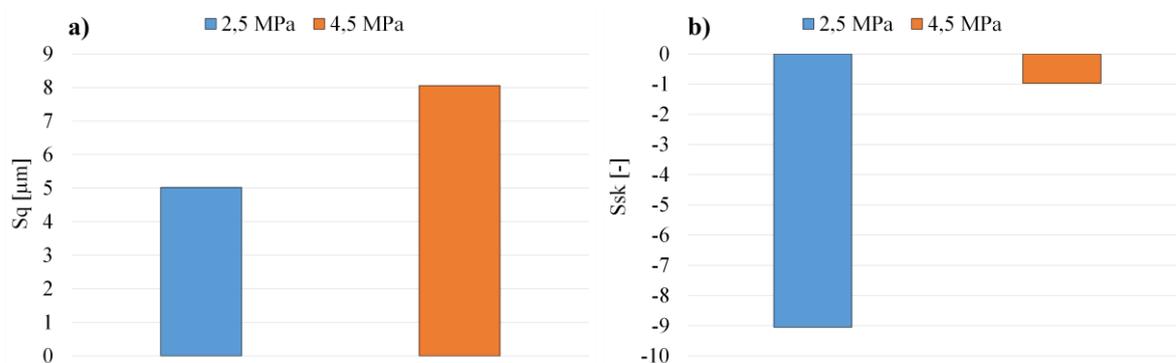


Figura 7.34 – Parâmetros de rugosidade de pastilhas para os experimentos com 2,5 e 4,5 MPa: S_q (rugosidade média quadrática) e S_{sk} (assimetria).

Observa-se que o parâmetro S_q (Figura 7.34-a) evidencia a superfície com maior rugosidade de pastilha no experimento em desgaste severo. Este resultado está de acordo com os resultados apresentados nas análises de platôs de contato (Figura 7.33), os quais mostraram maior irregularidade na superfície da pastilha para a condição de desgaste severo. Por outro lado, a Figura 7.34-b mostra um valor mais negativo de assimetria da pastilha para o

experimento em desgaste moderado (2,5 MPa), ao contrário do comportamento que havia sido observado para o rotor. Para o caso da pastilha, esse efeito pode estar diretamente relacionado à formação dos platôs secundários. Na condição em regime de desgaste moderado, a maior quantidade de platôs de contato secundários junto aos platôs primários (na superfície da amostra) provoca uma assimetria na distribuição, resultando em valores mais negativos do parâmetro S_{sk} . Por outro lado, na condição de regime de desgaste severo, a perda dos platôs de contato resulta no aumento da irregularidade da pastilha, com uma distribuição mais equalitária entre picos e vales. Isso resulta em uma distribuição mais simétrica, resultando em um valor do S_{sk} mais próximo do zero.

7.4.4.4 Raman de pastilha

A análise Raman dos platôs de contato (primários e secundários) foi realizada através da visualização da superfície das pastilhas com o auxílio do microscópio óptico acoplado ao equipamento. Conforme mencionado na seção 4.2.4, os platôs primários se mostram com uma coloração clara em um microscópio óptico, e os platôs secundários, uma tonalidade acinzentada [Masotti et al., 2015].

A Figura 7.35 mostra o local selecionado para a análise dos platôs primários dos dois experimentos (2,5 e 4,5 MPa). Observa-se que a região de análise se encontra em uma região clara. O círculo central das imagens, de 2 μm de diâmetro, é a área na qual o Raman realiza a análise.

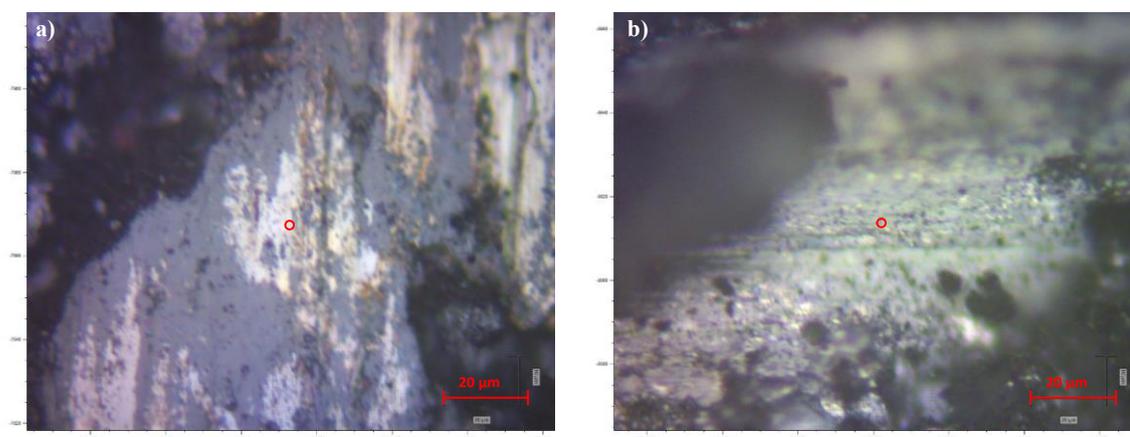


Figura 7.35 – Local de seleção dos platôs primários: a) 2,5 MPa e b) 4,5 MPa. O círculo central refere-se à área de análise do Raman.

Pode-se perceber que, ao redor da região de análise do experimento em desgaste moderado (Figura 7.35-a), existe a formação de platôs secundários (região cinza). Por outro lado, a microscopia do experimento com desgaste severo (Figura 7.35-b) mostra poucas regiões com tonalidade acinzentada, evidenciando a dificuldade de formação dos platôs secundários neste regime de desgaste. A Figura 7.36 mostra os resultados de Raman para estas regiões selecionadas.

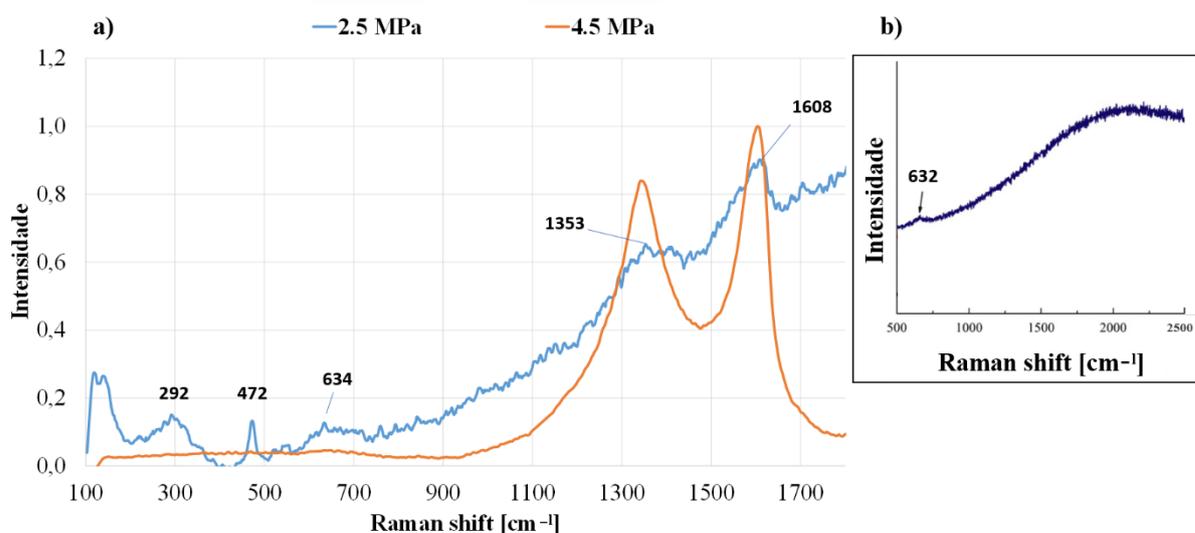


Figura 7.36 – Espectroscopia Raman dos platôs primários da pastilha: a) experimentos com 2,5 e 4,5 MPa e b) referência de padrão de intensidades (Adaptado: Xiao et al., 2020).

O experimento com 2,5 MPa parece apresentar uma sobreposição de componentes, com picos em 292, 472 e 634, 1353 e 1608 cm^{-1} . Estes dois últimos representam o carbono presente nas fibras de aço da pastilha, com picos similares aos observados na superfície do disco. O pico de 634 cm^{-1} remete à presença de óxido de cobre (CuO) [Xiao et al., 2020], conforme mostrado na Figura 7.36-b. O pico em 292 cm^{-1} pode estar também relacionado à presença de cobre, conforme mostrado no trabalho de Aakib et al., 2019. Finalmente, o pico de 472 cm^{-1} pode referir-se a traços de enxofre [Gómez et al., 2007] provenientes da barita (BaSO_4), frequentemente utilizada como carga em materiais de fricção [Limpert, 1999].

A sobreposição de picos apresentada no desgaste moderado, na Figura 7.36-a, ocorre devido ao fato de que dificilmente se pode analisar unicamente o platô de contato primário, visto que a espectroscopia Raman analisa uma área. Ou seja, resquícios de outros constituintes

podem estar depositados parcialmente sobre a fibra metálica, mesmo que estes resquícios não sejam observáveis na microscopia ótica, levando a uma sobreposição de picos na espectroscopia Raman.

Para o experimento com 4,5 MPa, apenas os picos de carbono foram identificados. Este mesmo resultado foi observado na análise de Raman para a superfície atritada do disco na condição de desgaste severo (Figura 7.29-a).

A Figura 7.37 mostra o local selecionado para a análise dos platôs secundários nos dois experimentos.

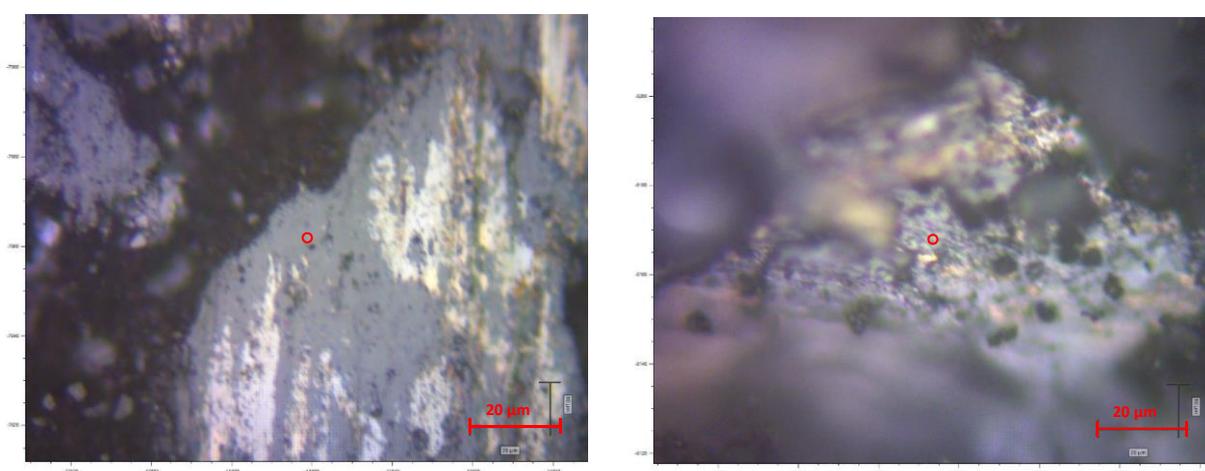


Figura 7.37 – Local de seleção dos platôs secundários: a) 2,5 MPa e b) 4,5 MPa. O círculo central refere-se à área de análise do Raman.

Os resultados de Raman para estas duas regiões são mostrados na Figura 7.38.

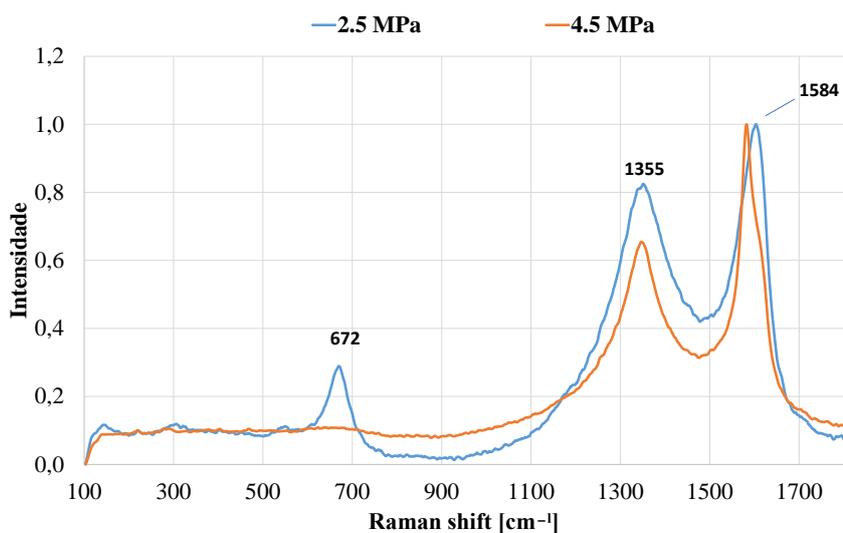


Figura 7.38 – Espectroscopia Raman dos platôs secundários da pastilha nos experimentos com 2,5 e 4,5 MPa.

Em relação ao experimento com regime de desgaste moderado (2,5 MPa), pode-se notar um padrão muito semelhante ao observado na trilha atritada do disco (Figura 7.29-a), com picos indicando a presença de magnetita (672 cm^{-1}), além dos picos relacionados à presença de carbono (1355 e 1584 cm^{-1}). Desta forma, pode-se afirmar que os platôs secundários têm constituição semelhante ao filme depositado sobre o disco. Por outro lado, no experimento em regime de desgaste severo (4,5 MPa), observam-se novamente apenas os picos de carbono.

7.4.5 Análise dos detritos

7.4.5.1 Visualização dos detritos

Os detritos coletados nas 10 frenagens após a etapa de estabilização são mostrados na Figura 7.39. Estas imagens foram obtidas através do estereomicroscópio óptico.

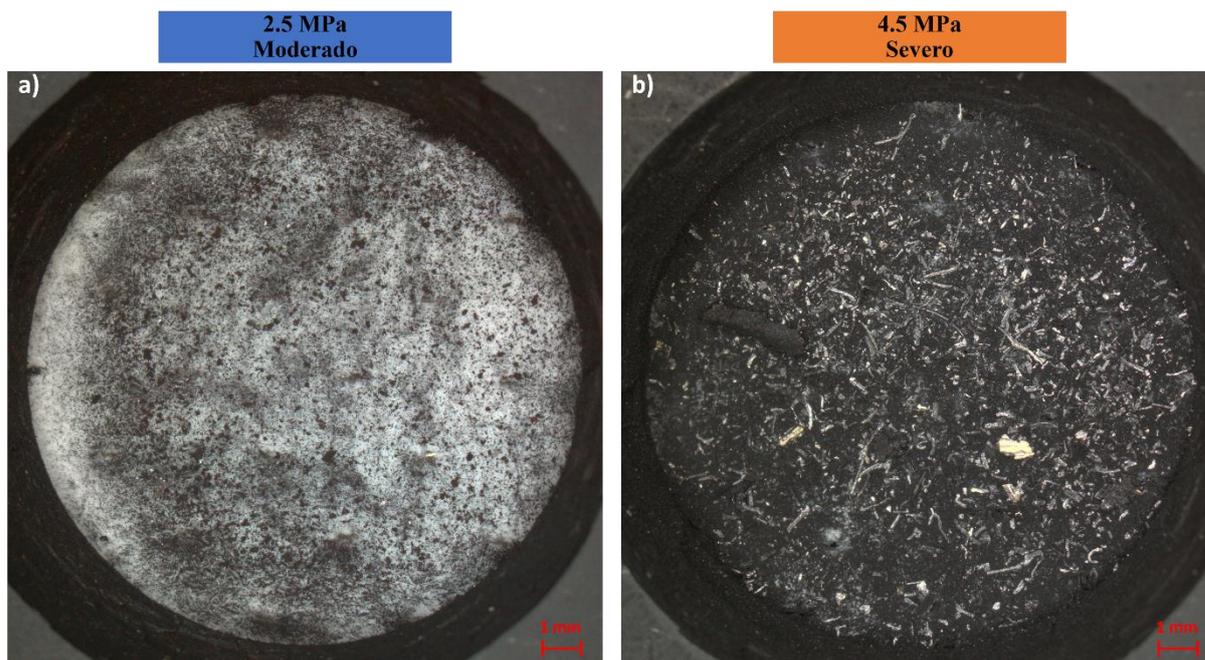


Figura 7.39 – Imagens de estereomicroscópio óptico dos detritos coletados em 10 frenagens nos regimes a) moderado e b) severo.

Observa-se uma diferença clara entre os dois experimentos. No regime moderado (Figura 7.39-a), alguns poucos detritos pequenos encontram-se depositados sobre o filtro de papel, estando este último ainda visível na imagem. Já os detritos gerados no regime severo de desgaste (Figura 7.39-b) ocultam totalmente o filtro de papel. Além disso, observam-se partículas grandes depositadas sobre o filtro quando comparadas com os detritos gerados no regime de desgaste moderado. Podem-se observar, inclusive, grandes fibras metálicas e particulados com um aspecto plano sendo, estes últimos, platôs de contato que foram removidos do material de fricção. Este fato contribui para o entendimento de que, no regime severo, os platôs de contato não são estáveis ao longo das frenagens, levando a um desgaste elevado de pastilha.

Maiores magnificações dos detritos são apresentadas na Figura 7.40 em três regiões distintas dos filtros de coleta.

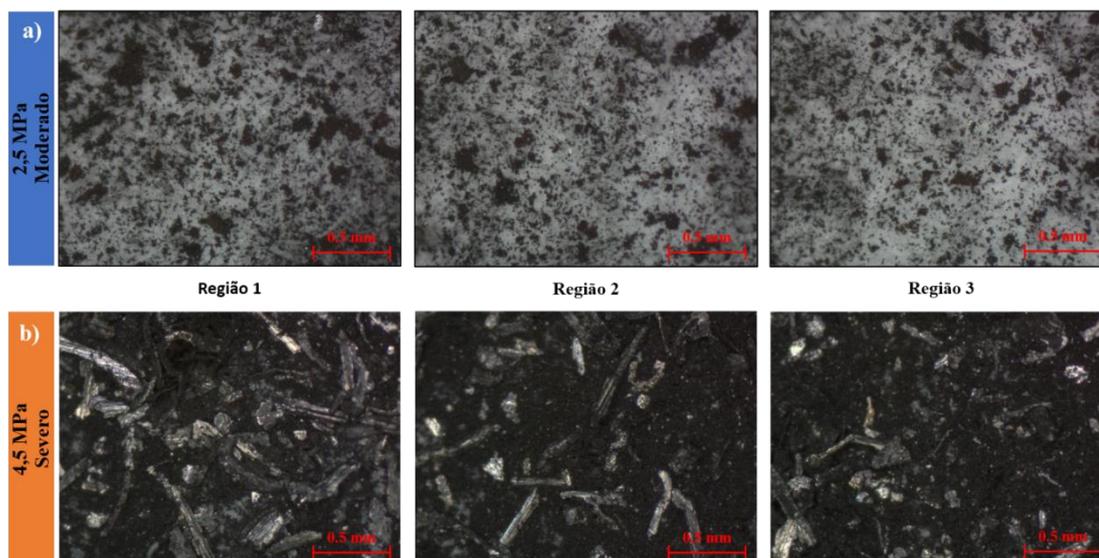


Figura 7.40 – Imagens de microscopia ótica dos detritos coletados em 10 frenagens em regimes a) moderado e b) severo.

Novamente, observa-se uma grande diferença entre os dois experimentos. Enquanto nos experimentos com desgaste moderado (Figura 7.40-a) os detritos são pequenos e em pequena quantidade, os detritos no regime severo (Figura 7.40-b) apresentam-se em grande quantidade, cobrindo a totalidade do filtro. O tamanho das fibras metálicas, neste caso, é da ordem de 0,5 mm de comprimento.

A mesma conclusão pode ser obtida através da Figura 7.41, onde é apresentada a microscopia eletrônica de varredura dos detritos nos regimes de desgaste moderado e severo.

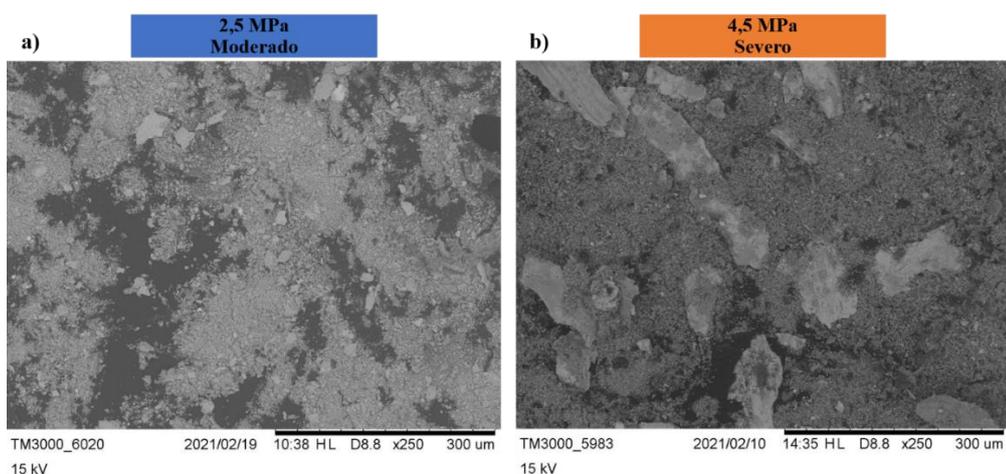


Figura 7.41 – Microscopia eletrônica de varredura dos detritos: a) regime moderado e b) regime severo. Ampliação de 250 \times .

Nota-se uma grande diferença entre os detritos gerados nos dois experimentos. No experimento em regime moderado (Figura 7.41-a), os detritos se mostram em tamanhos pequenos quando comparados com alguns detritos do regime severo de desgaste (Figura 7.41-b). Grandes particulados com um aspecto plano podem ser observados no experimento com 4,5 MPa, oriundos dos platôs de contato que foram removidos do material de fricção durante as frenagens.

7.4.5.2 Raman dos detritos

A Figura 7.42 mostra os resultados de Raman para os detritos coletados nos experimentos. Buscou-se evitar que a região de análise do equipamento estivesse sobre as fibras depositadas no filtro, com o intuito de avaliar apenas os detritos finos.

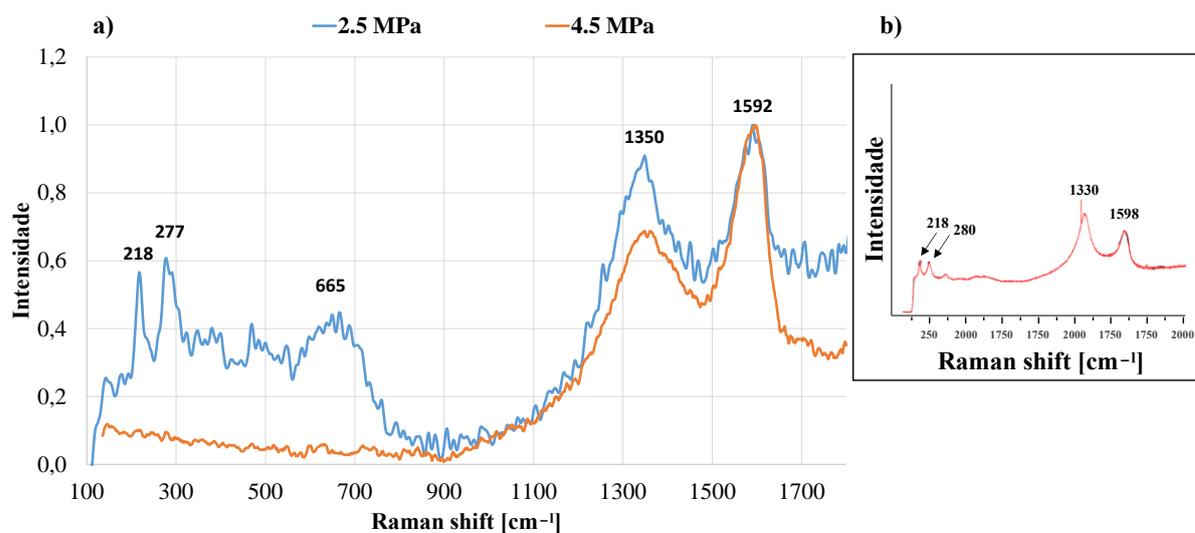


Figura 7.42 – Espectroscopia Raman dos detritos: a) experimentos com 2,5 e 4,5 MPa e b) referência de padrão de intensidades (Adaptado: Ali et al., 2019).

No experimento com 2,5 MPa, novamente se observam picos referentes à presença de carbono (1350 e 1592 cm^{-1}). Além disso, traços de magnetita são observados através dos picos de intensidade próximos de 665 cm^{-1} . Os picos encontrados em 218 e 277 cm^{-1} coincidem com os observados na Figura 7.42-b (Ali et al., 2019), e referem-se a picos de hematita. Isso está de

acordo com a literatura (Österle e Urban, 2004), onde é relatado que os principais constituintes das partículas desgastadas oriundas de frenagens são a magnetita e a hematita.

Da mesma forma que ocorreu com a trilha atritada dos discos e com os platôs primários e secundários da pastilha, o experimento em regime de desgaste severo não mostrou picos de intensidade além dos oriundos do carbono. A alta taxa de desgaste de disco e material de fricção parece impedir a formação de óxidos.

7.4.6 Conclusões parciais

Os resultados de atrito e desgaste de pastilha mostrados neste estudo foram similares aos relatados nos estudos anteriores. Uma alta taxa de desgaste, com atrito elevado e instável, ocorre nas condições de regime de desgaste severo. A interferometria e a análise de rugosidade de disco evidenciaram uma maior irregularidade dos rotores na condição de desgaste severo, indicando que esta severidade ocorre não apenas nas pastilhas, mas também nos discos. As imagens da superfície dos discos evidenciaram que um filme homogêneo é formado na condição de desgaste moderado. Por outro lado, a condição de desgaste severo resultou em imagens de tonalidade mais clara da superfície do disco, com pouco filme formado. No regime de desgaste moderado, a magnetita (Fe_3O_4) foi detectada na superfície do disco através de espectroscopia Raman, sendo este tipo de óxido o principal componente do filme tribológico. Por outro lado, em taxas de desgaste elevadas, observou-se uma dificuldade de formação desse óxido. Finalmente, a coleta dos detritos mostrou grande diferença entre os dois regimes de desgaste, onde os experimentos de desgaste severo resultaram em uma elevada quantidade de detritos soltos da interface tribológica. Além disso, também foram observados fibras e platôs de contato que se desprenderam da pastilha. No regime de desgaste moderado, por outro lado, poucos detritos foram coletados.

7.5 Discussão

Os resultados dos diferentes experimentos realizados neste trabalho evidenciaram a alteração do regime de desgaste de materiais de fricção automotivo. Durante o regime de desgaste moderado, uma parcela dos detritos (terceiro corpo) oriundos do desgaste do par tribológico se depositam na superfície da pastilha. Conforme descrito na seção 4.2.4, ocorre a compactação e aglomeração destes detritos ao redor dos platôs primários, formando assim os

platôs de contato secundários. No regime moderado, os platôs de contato são relativamente estáveis ao longo de diversas frenagens, conforme mostrado na Figura 7.8 (seção 7.2.3).

Ainda durante o regime de desgaste moderado, outra parcela dos detritos acaba se depositando na superfície do disco, formando assim o filme. Através da metodologia empregada para avaliação do filme durante os experimentos, este filme também se apresenta estável ao longo das frenagens, sendo observada pouca variação durante o regime de desgaste moderado.

Com o aumento da pressão de contato, constatou-se a remoção dos platôs de contato secundários da superfície da pastilha, resultando na transição de regime de desgaste de uma condição moderada para severa. Pressões elevadas resultam em uma maior deformação do substrato do material de fricção. Entretanto, os platôs de contato secundários, por serem mais duros que o substrato [Eriksson e Jacobson, 2000; Neis et al., 2017b], podem ser rompidos em pressões de contato elevadas, não suportando o grau de deformação elástica deste substrato. Conforme relatado na seção 7.2, os platôs de contato secundários foram removidos em poucas frenagens após a pressão limite ser atingida. Com a remoção dos platôs de contato, a área real de contato foi reduzida aos platôs primários, dados por fibras metálicas. Desta forma, uma maior pressão de contato local foi aplicada entre as fibras e o filme depositado sobre o disco. Com isso, as fibras promoveram o arrancamento gradual do filme, ocorrendo então o contato direto entre as fibras metálicas e o disco. Assim, um desgaste maior de disco ocorreu, bem como um aumento de desgaste de pastilha em função de não haver platôs de contato estáveis entre as diferentes frenagens. Além da pressão de contato, a velocidade de deslizamento (abordada na seção 7.3) também influencia na transição do regime de desgaste. Em velocidades maiores, uma pressão limite menor é necessária para que a transição de uma condição moderada para severa ocorra. Desta forma, a transição de regime de desgaste é influenciada pela energia de frenagem (pressão de contato e velocidade de deslizamento) aplicada no sistema.

A abordagem utilizada para a análise dos detritos durante as frenagens, bem como a análise superficial dos materiais de fricção, possibilitou comprovar a ocorrência da remoção dos platôs de contato da pastilha quando o regime de desgaste severo é atingido. A Figura 7.43 mostra uma classificação qualitativa das regiões superficiais das pastilhas dos dois experimentos apresentados anteriormente (seção 7.4). Esta classificação foi realizada através do *software* Photoshop, baseada na tonalidade dos tons de cinza das imagens obtidas por MEV.

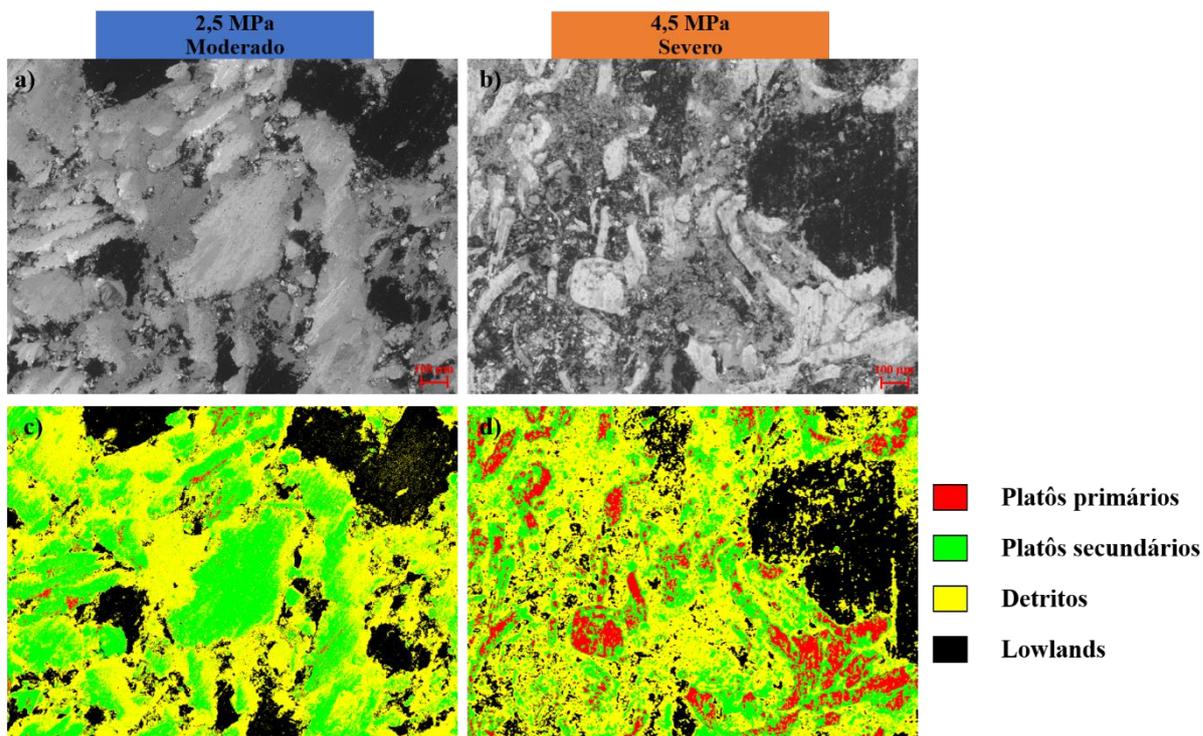


Figura 7.43 – Regiões das pastilhas: microscopia eletrônica de varredura (elétrons retroespalhados) dos experimentos com a) 2,5 MPa e b) 4,5 MPa; classificação das regiões dos experimentos com c) 2,5 MPa e d) 4,5 MPa.

Embora esta análise seja qualitativa, ela mostra uma grande diferença entre os dois experimentos. Na condição de regime de desgaste moderado (2,5 MPa), os platôs primários aparecem apenas em pequenas regiões. Isso ocorre devido ao depósito dos platôs secundários sobre sua superfície, ocultando-os. Neste caso, os platôs secundários cobrem uma grande área da pastilha de freio. Os detritos, por sua vez, parecem se aglomerar em grandes porções, indicando que eventualmente se tornariam platôs secundários em futuras frenagens.

No regime de desgaste severo (Figura 7.43-d), os platôs primários são mais visíveis. Além disso, os platôs secundários se apresentam em menor quantidade. Os detritos, neste caso, se mostram mais fragmentados ao longo de toda superfície da pastilha.

A sequência de eventos da transição de regime de desgaste moderado para severo é ilustrada na Figura 7.44.

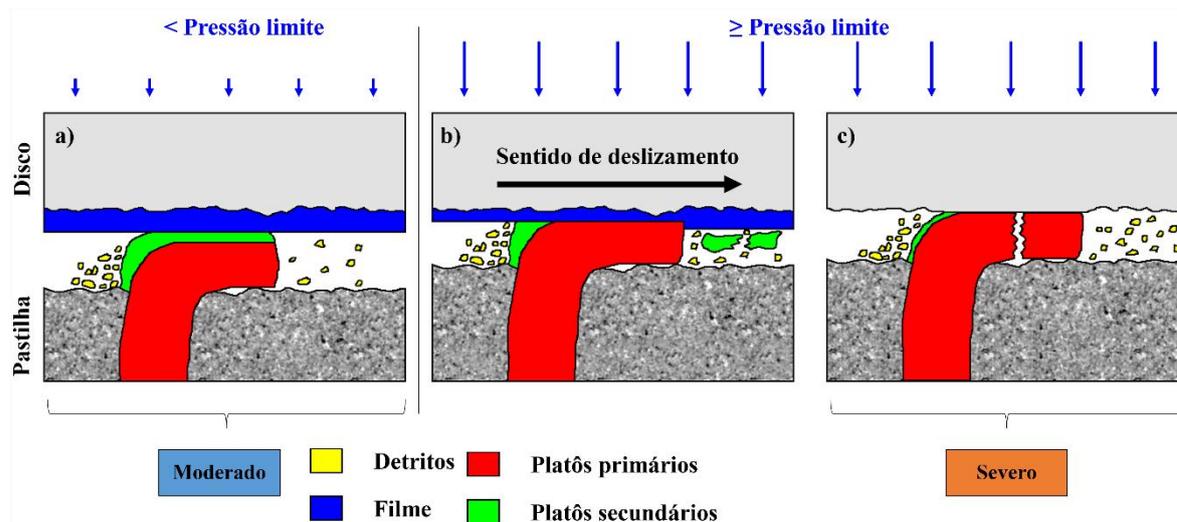


Figura 7.44 – Sequência de eventos da transição de regime de desgaste: a) regime moderado, b) transição e c) regime severo.

Com o contato tribológico, ocorre uma deformação plástica das fibras metálicas. Esta deformação plástica dos platôs primários é também relatada pela literatura [Kukutschová et al., 2009; Monreal et al., 2021]. Em uma condição de regime moderado de desgaste (Figura 7.44-a), um filme bem desenvolvido no disco, bem como platôs de contato secundários (formados através da aglomeração dos detritos) estão presentes, evitando o contato direto entre fibra (platô primário) e disco. Eventuais detritos acabam saindo da interface tribológica. Com a aplicação de uma pressão de contato maior que a pressão limite, ocorre a quebra e consequente remoção dos platôs secundários (Figura 7.44-b). Os detritos, por sua vez, não são capazes de se aglomerar para a formação dos platôs secundários. Conforme explicado anteriormente, a ausência dos platôs secundários resulta em um maior atrito e maior contato entre as fibras metálicas e o filme depositado sobre o disco, levando à remoção gradual deste último ao longo das frenagens. Com a ausência de filme, as fibras entram em contato direto com o disco (Figura 7.44-c), levando a um aumento de desgaste de disco. Eventualmente, este contato direto pode levar à ruptura das fibras metálicas, conforme observado nos detritos de grandes dimensões que foram coletados durante o regime de desgaste severo (Figura 7.39).

Os platôs de contato da pastilha e o filme tribológico formado e aderido na superfície do rotor têm um papel fundamental na transição de regime de desgaste. Pode-se concluir que materiais de fricção que resultem em platôs de contato estáveis e em um filme bem formado no rotor sob diferentes condições de frenagem apresentem menor desgaste quando em uso. Assim,

a formação e remoção dos platôs e do filme são aspectos importantes a serem avaliados no desenvolvimento de materiais de fricção.

Todos os experimentos apresentados neste trabalho utilizaram um material de fricção de mesma formulação. Entretanto, estudos preliminares mostraram que a transição de regime de desgaste em função da pressão de contato ocorre também em outros materiais de fricção. Os resultados deste estudo preliminar (no qual foi utilizado um material chamado de “P”) são apresentados no Apêndice A. Cabe aqui salientar que este estudo preliminar, onde foi aplicada uma metodologia similar àquela utilizada no estudo apresentado na seção 7.2, tem como intuito mostrar que o fenômeno de transição ocorre também em outros materiais.

8. CONCLUSÕES

Neste trabalho, três grupos de experimentos foram realizados. O primeiro deles refere-se à influência da pressão de contato na mudança do regime de desgaste. As principais conclusões obtidas deste estudo são listadas abaixo:

- Foi observada uma pressão limite na qual o regime de desgaste do material de fricção é alterado de uma condição moderada para severa. Esta transição ocorreu em uma pressão limite de 90 bar.
- Neste experimento, o desgaste normalizado de pastilha aumentou aproximadamente 13 vezes no desgaste severo quando comparado ao desgaste moderado.
- Uma redução abrupta da área dos platôs de contato ocorreu no desgaste severo.
- O atrito aumentou consideravelmente no regime severo de desgaste.
- Observou-se uma redução do filme depositado sobre o disco na condição de desgaste severo.
- A transição no regime de desgaste ocorreu em temperaturas relativamente baixas ($< 130^{\circ}\text{C}$), indicando que, ao contrário do relatado na literatura, o desgaste severo não ocorre unicamente devido à degradação térmica da resina fenólica da pastilha.
- A área dos platôs de contato foi o primeiro dos parâmetros analisados a sofrer alterações mensuráveis quando o regime de desgaste muda de moderado para severo.

O segundo estudo realizado avaliou a influência da velocidade e da pressão de contato nos regimes de desgaste de materiais de fricção. Deste estudo, pode-se concluir que:

- Velocidades de deslizamento e pressões de contato elevadas tendem a remover os platôs de contato da pastilha e o filme tribológico depositado sobre o disco, levando a uma alteração do regime de desgaste de uma condição moderada para severa.
- Na transição de regime severo para moderado, a taxa de formação do filme sobre o disco é diferente da taxa de evolução do desgaste, a qual ocorre de forma gradual ao longo das frenagens. Na transição de regime moderado para severo, o aumento repentino de desgaste ocorre de forma mais rápida.

- A condição prévia superficial do par tribológico (platôs de contato e filme) afeta a pressão limite necessária para que ocorra a transição de regime de uma condição moderada para severa.
- O atrito mostrou-se mais instável em condições de velocidades de deslizamento maiores durante o regime de desgaste severo.
- O filme depositado sobre o disco se mostrou mais radialmente heterogêneo em velocidades de deslizamento menores.

O terceiro estudo realizado nesta tese focou na influência que os diferentes regimes de desgaste têm na superfície de disco, de pastilha e de detritos. Concluiu-se deste estudo que:

- Uma maior irregularidade superficial dos discos foi observada na condição de desgaste severo, indicando que esta severidade atinge não unicamente o material de fricção, mas também o disco de freio.
- No regime de desgaste moderado, a magnetita (Fe_3O_4) foi detectada na superfície do disco através de espectroscopia Raman, sendo este tipo de óxido descrito pela literatura como o principal componente do filme tribológico. Em taxas de desgaste elevadas, oriundas do regime de desgaste severo, observou-se uma dificuldade de formação desses óxidos.
- A coleta dos detritos durante os experimentos mostrou grande diferença entre os dois regimes de desgaste, onde os experimentos de desgaste severo resultaram em uma elevada quantidade de detritos soltos da interface tribológica. Por outro lado, no regime moderado, poucos detritos foram coletados.

Pode-se concluir, dos estudos apresentados nesta tese, que uma maior energia de frenagem imposta ao par tribológico, em termos de pressão de contato e velocidade de deslizamento, resultam na remoção dos platôs de contato secundários da pastilha. Desta forma, os platôs primários (fibras metálicas) entram em um contato mais direto com o filme depositado sobre o disco, resultando na remoção deste filme. Com a ausência de filme, o contato entre fibras metálicas da pastilha com o disco resulta em um maior desgaste do par tribológico devido à ausência de platôs de contato secundários estáveis ao longo das frenagens. Assim, fica

evidente a importância de ser considerada a evolução e estabilidade dos platôs de contato e do filme depositado sobre o disco no desenvolvimento de novos materiais de fricção.

9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da presente tese, algumas linhas de pesquisa podem ser sugeridas em trabalhos futuros. Estas sugestões são listadas abaixo:

- Realizar experimentos visando obter as condições de pressão de contato e as velocidades de deslizamento necessárias para que ocorra a transição de regime de desgaste em diferentes materiais de fricção comerciais utilizados em freios automotivos;
- Analisar a influência da quantidade de resina fenólica presente na formulação de materiais de fricção na transição de regime de desgaste;
- Avaliar a influência da temperatura inicial de frenagem na transição de regime de desgaste;
- Utilizar diferentes técnicas para caracterização dos detritos nos diferentes regimes (e.g., difração de raio X);
- Realizar experimentos em dinamômetros inerciais e em veículos com o intuito de atingir a transição de regime de desgaste.

REFERÊNCIAS

- Aakib, H.E., Pierson, J.F., Chaik, M., Ait Dads, H., Samba Vall, C., Narjis, A. e Outzourhit, A. Nickel doped copper oxide thin films prepared by radiofrequency reactive sputtering: study of the impact of nickel content on the structural, optical and electrical properties. **Spectroscopy Letters**, vol. 0, ed.0, p.1–8. 2019.
- Abdelbary, A. Sliding mechanics of polymers. **Wear of Polymers and Composites**, p.37–66. 2014.
- Ali, M.K.A., Makrahy, M.M. e Xianjun, H. Role of the Friction Layer Formed on the Brake Lining Surface in the Friction Stabilization for Automotive Brakes. **Surface Topography: Metrology and Properties**. 2019.
- Arango, C.C.V. Transição no regime de desgaste por deslizamento dos aços: uma abordagem termodinâmica. 2010.
- ASTM International A247 - 19 - Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings. **American Society for Testing and Materials**, vol. 67, ed.Reapproved, p.3–4. 2019.
- Bakar, A.R.A., James, L.L., Ouyang, H. e Siegel, J.E. Wear Simulation and Its Effect on Contact Pressure Distribution and Squeal of a Disc Brake. **Conference on Vehicle Braking Technology**, p.233–242. 2006a.
- Bakar, A.R.A., Hamid, M.K.A. e Ouyang, H. A New Prediction Methodology For Dynamic Contact Pressure Distribution In A Disc Brake. **Jurnal Teknologi**, vol. 45, ed.1, p.1–11. 2006b.
- Barros, L.Y., Neis, P.D., Ferreira, N.F., Pavlak, R.P., Masotti, D., Matozo, L.T., Sukumaran, J., De Baets, P. e Andó, M. Morphological analysis of pad-disc system during braking operations. **Wear**, vol. 352–353, p.112–121. 2016.
- Barros, L.Y., Poletto, J.C., Neis, P.D., Ferreira, N.F. e Pereira, C.H.S. Influence of copper on automotive brake performance. **Wear**, vol. 426–427, ed.August 2018, p.741–749. 2019a.
- Barros, L.Y., Poletto, J.C., Buneder, D., Neis, P.D., Ferreira, N.F., Pavlak, R.P. e Matozo, L.T. Effect of pressure in the transition between moderate and severe wear regimes in brake friction materials. **Wear**, vol. 438–439, ed.November, p.203112. 2019b.
- Barros, L.Y., Poletto, J.C., Buneder, D., Flores, R., Gehlen, G., Neis, P.D., Ferreira, N.F. e Matozo, L.T. An experimental study of the transition in the wear regime of brake friction materials. **Polymer Composites**, ed.March, p.1–12. 2021.
- Bartz, W.J. History of Tribology - The bridge between the classical antiquity and the 21st Century. **Proceeding of the 2nd World Tribology Congress**, p.3–12. 2001.
- Belhocine, A. e Omar, W.Z.W. A numerical parametric study of mechanical behavior of dry contact slipping on the disc-pads interface. **Alexandria Engineering Journal**, vol. 55, ed.2, p.1127–1141. 2016.
- Bettge, D. e Starcevic, J. Topographic properties of the contact zones of wear surfaces in disc brakes. **Wear**, vol. 254, ed.3–4, p.195–202. 2003.

- Bhushan, B. Introduction to tribology. 2nd ed., John Wiley & Sons Ltd. 2013.
- Birch, T.W. Automotive braking systems. 3rd ed., New York, Learning, Delmar Cengage. 1998.
- Blau, P.J. Interpretations of the Friction and Wear Break-in Behavior in Metals in Sliding Contact. **Wear**, vol. 71, ed.1, p.29–43. 1981.
- Blau, P.J. Compositions, functions, and testing of friction brake materials and their additives. **Oak Ridge National Laboratory Technical Report, ORNL/TM-2001/64 (2001) 29 p. Available through NTIS.gov.**, ed. September, p.38. 2001.
- Blau, P.J. On the nature of running-in. **Tribology International**, vol. 38, ed.11-12 SPEC. ISS., p.1007–1012. 2005.
- Buckley, D.H. Surface effects of adhesion, friction, wear, and lubrication. **Tractates Sabbat and 'Eruvin**, ed.1. 1981.
- Chandra Verma, P., Menapace, L., Bonfanti, A., Ciudin, R., Gialanella, S. e Straffelini, G. Braking pad-disc system: Wear mechanisms and formation of wear fragments. **Wear**, vol. 322–323, p.251–258. 2015.
- Cho, M.H., Cho, K.H., Kim, S.J., Kim, D.H. e 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, p.101–108. 2005.
- Cristol-Bulthé, a. L., Desplanques, Y. e Degallaix, G. Coupling between friction physical mechanisms and transient thermal phenomena involved in pad-disc contact during railway braking. **Wear**, vol. 263, ed.7-12 SPEC. ISS., p.1230–1242. 2007.
- Cristol-Bulthé, A.L., Desplanques, Y., Degallaix, G. e Berthier, Y. Mechanical and chemical investigation of the temperature influence on the tribological mechanisms occurring in OMC/cast iron friction contact. **Wear**, vol. 264, ed.9–10, p.815–825. 2008.
- Davin, E., Cristol, A.L., Brunel, J.F. e Desplanques, Y. Wear mechanisms alteration at braking interface through atmosphere modification. **Wear**, vol. 426–427, ed. September 2018, p.1094–1101. 2019.
- DIN 50320 DIN 50320: Verschleiß - Begriffe, Analyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes. Verl. 1979.
- Dmitriev, A.I., Österle, W. e Kloß, H. Numerical simulation of typical contact situations of brake friction materials. **Tribology International**, vol. 41, ed.1, p.1–8. 2008.
- Duboust, N., Ghadbeigi, H., Pinna, C., Ayvar-Soberanis, S., Collis, A., Scaife, R. e Kerrigan, K. An optical method for measuring surface roughness of machined carbon fibre-reinforced plastic composites. **Journal of Composite Materials**, vol. 51, ed.3, p.289–302. 2016.
- El-Tayeb, N.S.M. e 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, p.275–287. 2009.
- Eriksson, M. Friction and contact phenomena of disc brakes related to squeal. Uppsala University. 2000.
- Eriksson, M., Bergman, F. e Jacobson, S. On the nature of tribological contact in automotive brakes. **Wear**, vol. 252, ed.1–2, p.26–36. 2002.

- Eriksson, M. e Jacobson, S. Tribological surfaces of organic brake pads. **Tribology International**, vol. 33, ed.12, p.817–827. 2000.
- Eriksson, M., Lord, J. e Jacobson, S. Wear and contact conditions of brake pads: Dynamical in situ studies of pads on glass. **Wear**, vol. 249, ed.3–4, p.272–278. 2001.
- Eyre, T.S. e Maynard, D. Surface aspects of unlubricated metal-to-metal wear. **Wear**, vol. 18, ed.4, p.301–310. 1971.
- Federici, M., Menapace, C., Moscatelli, A., Gialanella, S. e Straffelini, G. Effect of roughness on the wear behavior of HVOF coatings dry sliding against a friction material. **Wear**, vol. 368–369, p.326–334. 2016.
- Fernandes, G.P., Haertel, W., Zanotto, P.S. e Sinatora, A. Influence of mild and severe wear condition in the formation and stability of friction film in clutch system. **Wear**, vol. 302, ed.1–2, p.1384–1391. 2013.
- Fras-le Institucional. <https://www.fras-le.com/pt/institucional/>, 2022, Acesso em: 01-04-2022.
- Gahr, K.H. Zum Microstructure and Wear of Materials. **Tribology Series**, vol. 10., 1987.
- Gehlen, G.S., Neis, P.D., Poletto, J.C., Barros, L.Y., Buneder, D. e Ferreira, N.F. Pressure-velocity limit evaluation on POM-C + carbon black at different temperatures. **Wear**, vol. 464–465, ed.October 2020, p.203530. 2021.
- Gilardi, R., Alzati, L., Thiam, M., Brunel, J.F., Desplanques, Y., Dufrénoy, P., Sharma, S. e Bijwe, J. Copper substitution and noise reduction in brake pads: Graphite type selection. **Materials**, vol. 5, ed.11, p.2258–2269. 2012.
- Gómez, R.W., Pérez, J.L.M., Marquina, V., Ridaura, R. e Marquina, M.L. Polymerization of commercial Mexican sulfur. **Revista Mexicana de Física**, vol. 53, ed.1, p.30–33. 2007.
- Halderman, J.D. e Mitchell, C.D. Automotive brake system. 3rd ed., New Jersey, Pearson Education. 2004.
- Hinrichs, R., Soares, M.R.F., Lamb, R.G., Soares, M.R.F. e Vasconcellos, M.A.Z. Phase characterization of debris generated in brake pad coefficient of friction tests. **Wear**, vol. 270, ed.7–8, p.515–519. 2011a.
- Hinrichs, R., Vasconcellos, M.A.Z., Österle, W. e Prietzel, C. A TEM snapshot of magnetite formation in brakes: The role of the disc's cast iron graphite lamellae in third body formation. **Wear**, vol. 270, ed.5–6, p.365–370. 2011b.
- Hinrichs, R., Vasconcellos, M.A.Z., Österle, W. e Prietzel, C. Amorphization of Graphite Flakes in Gray Cast Iron Under Tribological Load. **Materials Research**, vol. 21, ed.4, p.2–7. 2018.
- Hinrichs, R., Vasconcellos, M. e Soares, M.R. Magnetite generated by tribo-reactions on the surface of brake pad material. **SAE Technical Papers**. 2010.
- Hutchings, I.M. Leonardo da Vinci's studies of friction. **Wear**, vol. 360–361, p.51–66. 2016.
- Ibhádode, A.O.A. e 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, p.166–173. 2008.

- Infantini, M.B. Variáveis de desempenho dos sistemas de freio. 2008.
- ISO 6311 - Road vehicles - Brake linings - Internal shear strength of lining materials - Test procedure. 1980.
- Jacko, M.G., Tsang, P.H.S. e Rhee, S.K. Wear debris compaction and friction film formation of polymer composites. **Wear**, vol. 133, ed.1, p.23–38. 1989.
- Jang, H., Ko, K., Kim, S.J., Basch, R.H. e Fash, J.W. The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials. **Wear**, vol. 256, ed.3–4, p.406–414. 2004.
- Jost, H.P. Tribology - Origin and future. **Wear**, vol. 136, p.1–17. 1990.
- Kim, S.J. e Jang, H. Friction and wear of friction materials containing two different phenolic resins reinforced with aramid pulp. **Tribology International**, vol. 33, p.477–484. 2000.
- Kukutschová, J., Roubíček, V., Malachová, K., Pavlíčková, Z., Holuša, R., Kubačková, J., Mička, V., MacCrimmon, D. e Filip, P. Wear mechanism in automotive brake materials, wear debris and its potential environmental impact. **Wear**, vol. 267, ed.5–8, p.807–817. 2009.
- Kumar, M. e Bijwe, J. Non-asbestos organic (NAO) friction composites: Role of copper; its shape and amount. **Wear**, vol. 270, ed.3–4, p.269–280. 2011a.
- Kumar, M. e Bijwe, J. Composite friction materials based on metallic fillers: Sensitivity of μ to operating variables. **Tribology International**, vol. 44, ed.2, p.106–113. 2011b.
- Lafuente, B., Downs, T., Yang, H. e Stone, N. The power of databases: the RRUFF project. <https://rruff.info/>, 2015, Acesso em 29-01-2021.
- Lancaster, J.K. The influence of temperature on meiosis. **Proceedings of the Physical Society of London**, vol. B70, ed.1, p.112–118. 1957.
- Lee, P.W. e Filip, P. Friction and wear of Cu-free and Sb-free environmental friendly automotive brake materials. **Wear**, vol. 302, ed.1–2, p.1404–1413. 2013.
- Limpert, R. Brake Design and Safety. ed. 2., 1999.
- Liu, T., Rhee, S.K. e Lawson., K.L. A study of wear rates and transfer films of friction materials. **Wear**, vol. 60, ed.1, Apr. 1980, p.1–12. 1980.
- Ludema, K.C. Friction, wear, lubrication. 1996.
- Mang, T. Encyclopedia of Lubricants and Lubrication. T. Mang, ed., 2014.
- Masotti, D., Neis, P., Ferreira, N., Gomes, K., Poletto, J. e 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.
- Matějka, V., Metinöz, I., Wahlström, J., Alemani, M. e Perricone, G. On the running-in of brake pads and discs for dyno bench tests. **Tribology International**, vol. 115, ed.June, p.424–431. 2017.
- Menezes, P.L., Ingole, S.P., Nosonovsky, M., Kailas, S. V. e Lovell, M.R. Tribology for Scientists and Engineers. Springer, ed., 2013.
- Monreal, P., Clavería, I., Arteta, P. e Rouzaut, T. Effect of modified novolac resins on the physical properties and friction performance of railway brake blocks. **Tribology**

- International**, vol. 154, ed.July 2020, p.106722. 2021.
- Nascimento, J.R. da S. do Identificação e caracterização de materiais por espectroscopia raman. , p.90. 2001.
- NBR NBR 5544 - Guarnições da embreagem e do freio - Determinação da densidade relativa. 1998.
- 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., Sukuraman, J., Beats, P.D., Andó, M., Matozo, L.T. e Masotti, D. Characterization of surface morphology and its correlation with friction performance of brake pads. **Sustainable construction & design**, vol. 6, ed.1. 2015.
- Neis, P.D., Ferreira, N.F., Poletto, J.C., Sukumaran, J., Andó, M. e Zhang, Y. Tribological behavior of polyamide-6 plastics and their potential use in industrial applications. **Wear**, vol. 376–377, p.1391–1398. 2017a.
- Neis, P.D., Ferreira, N.F., Fekete, G., Matozo, L.T. e Masotti, D. Towards a better understanding of the structures existing on the surface of brake pads. **Tribology International**, vol. 105, ed.September 2016, p.135–147. 2017b.
- Neis, P.D., Kruze, G. e Ferreira, N. Relation between the temperature of the disc measured with thermocouple and by thermography using a reduced scale dynamometer. **ABCM - Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas. (Org.). Symposium Series in Mechatronics. Rio de Janeiro**, vol. V.4, p.907–913. 2010.
- Nogueira, A.P.G., Bagolan, P., Leonardi, M., Gialanella, S. e Straffelini, G. The role of scorching treatment on the wear and emission behavior of friction materials with and without copper. **Wear**, vol. 460–461, ed.March, p.203480. 2020a.
- Nogueira, A.P.G., Carlevaris, D., Menapace, C. e Straffelini, G. Tribological and emission behavior of novel friction materials. **Atmosphere**, vol. 11, ed.10. 2020b.
- Österle, W., Kloß, H., Urban, I. e Dmitriev, A.I. Towards a better understanding of brake friction materials. **Wear**, vol. 263, ed.7-12 SPEC. ISS., p.1189–1201. 2007.
- Österle, W., Dörfel, I., Prietzel, C., Rooch, H., Cristol-Bulthé, a.-L., Degallaix, G. e 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, p.781–788. 2009.
- Österle, W. e Dmitriev, A.I. Functionality of conventional brake friction materials - Perceptions from findings observed at different length scales. **Wear**, vol. 271, ed.9–10, p.2198–2207. 2011.
- Österle, W. e Urban, I. Friction layers and friction films on PMC brake pads. **Wear**, vol. 257, ed.1–2, p.215–226. 2004.
- Österle, W. e Urban, I. Third body formation on brake pads and rotors. **Tribology International**, vol. 39, ed.5, p.401–408. 2006.
- Ostermeyer, G.P. On the dynamics of the friction coefficient. **Wear**, vol. 254, ed.9, p.852–858. 2003.
- Ostermeyer, G.P. e Wilkening, L. Experimental Investigations of the Topography

- Dynamics in Brake Pads. **SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems**, vol. 6, ed.3, p.2013-01–2027. 2013.
- Otsu, N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, vol. 9, ed.1, p.62–66. 1979.
- Pavlak, R.P., Neis, P.D., Poletto, J.C., De Barros, L.Y. e Ferreira, N.F. Wear, Friction and NVH Characterization Using a Laboratory-Scale Tribometer. **SAE Technical Papers**, vol. Part F1298, ed.May, p.1–7. 2017.
- Poletto, J.C., Barros, L.Y., Neis, P.D. e Ferreira, N.F. Analysis of the error in the estimation of the morphology of contact plateaus existing on the surface of brake pads. **Tribology International**, vol. 126, p.297–306. 2018.
- Rosselot, K.S. Copper Released from Brake Lining Wear in the San Francisco Bay Area. 2006.
- Rycerz, P., Olver, A. e Kadiric, A. Propagation of surface initiated rolling contact fatigue cracks in bearing steel. **International Journal of Fatigue**, vol. 97, p.29–38. 2017.
- SAE International Surface vehicle recommended practice - SAE J2522 - Dynamometer global brake effectiveness (AK Master). 2003.
- SAE International Vehicle Recommended Practice - Brake Lining Quality Test Procedure. 2012.
- Sanders, P.G., Dalka, T.M. e Basch, R.H. A reduced-scale brake dynamometer for friction characterization. **Tribology International**, vol. 34, ed.9, p.609–615. 2001.
- Dos Santos, R.L., Masotti, D., Moraes Da Silva, P.H., Severo, D.A., Ferreira, N.F., Poletto, J.C., De Barros, L.Y. e Neis, P.D. Effect of alternation of braking conditions on friction material. **SAE Technical Papers**. 2019.
- Saravanan, M., Venkateshwaran, N., Devaraju, A., Krishnakumari, A. e Saarvesh, J. Surface Modification of 316L Stainless Steel By Plasma-Assisted Low Temperature Carburizing Process. **Surface Review and Letters**, vol. 24, ed.8. 2017.
- Smales, H. Friction materials-black. **Journal of Automobile Engineering**, vol. 209, p.151–157. 1994.
- Söderberg, A. e Andersson, S. Simulation of wear and contact pressure distribution at the pad-to-rotor interface in a disc brake using general purpose finite element analysis software. **Wear**, vol. 267, ed.12, p.2243–2251. 2009.
- Stachowiak, G.W. e Batchelor, A.W. Engineering Tribology. ed. 3., 2005.
- State of Washington Department of Ecology Better Brakes Rule Chapter 173-901 WAC. 2012.
- Straffelini, G., Ciudin, R., Ciotti, A. e 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, p.211–219. 2015.
- Straffelini, G. e Maines, L. The relationship between wear of semimetallic friction materials and pearlitic cast iron in dry sliding. **Wear**, vol. 307, ed.1–2, p.75–80. 2013.
- Straffelini, G., Pellizzari, M. e Molinari, A. Influence of load and temperature on the dry sliding behaviour of Al-based metal-matrix-composites against friction material. **Wear**, vol. 256, ed.7–8, p.754–763. 2004.

- Su, L., Gao, F., Han, X. e Chen, J. Effect of copper powder third body on tribological property of copper-based friction materials. **Tribology International**, vol. 90, p.420–425. 2015.
- Sullivan, J.L., Quinn, T.F.J. e Rowson, D.M. Developments in the oxidational theory of mild wear. **Topics in Catalysis**, vol. 13, ed.4, p.153–158. 1980.
- Takeuchi, E. The mechanism of wear of spheroidal graphite cast iron in dry sliding. , vol. 19, ed.3, p.267–276. 1972.
- Tirovic, M. Disc brake interface pressure distributions. **Proc Instn Mech Engrs**, vol. 205,. 1991.
- Totten, G.E. Friction, lubrication, and wear technology. In *ASM Handbook*. 2017.
- Trezona, R.I., Allsopp, D.N. e Hutchings, I.M. Transitions between two-body and three-body abrasive wear: Influence of test conditions in the microscale abrasive wear test. **Wear**, vol. 225–229, ed.I, p.205–214. 1999.
- Uyyuru, R.K., Surappa, M.K. e Brusethaug, S. Effect of reinforcement volume fraction and size distribution on the tribological behavior of Al-composite/brake pad tribocouple. **Wear**, vol. 260, ed.11–12, p.1248–1255. 2006.
- Viáfara, C.C. e Sinatora, A. Influence of hardness of the harder body on wear regime transition in a sliding pair of steels. **Wear**, vol. 267, ed.1–4, p.425–432. 2009.
- Welsh, C. The dry wear of steels I. The general pattern of behaviour. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, vol. 257, ed.1077. 1965a.
- Welsh, C. The dry wear of steels II. Interpretation and special features. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, vol. 241, ed.835, p.379–397. 1965b.
- Xiao, J.K., Xiao, S.X., Chen, J. e Zhang, C. Wear mechanism of Cu-based brake pad for high-speed train braking at speed of 380 km/h. **Tribology International**, vol. 150, ed.February, p.106357. 2020.
- Yoon, S.W., Shin, M.W., Lee, W.G. e Jang, H. Effect of surface contact conditions on the stick-slip behavior of brake friction material. **Wear**, vol. 294–295, p.305–312. 2012.
- Yun, R., Filip, P. e Lu, Y. Performance and evaluation of eco-friendly brake friction materials. **Tribology International**, vol. 43, ed.11, p.2010–2019. 2010.

APÊNDICE A – Estudo preliminar

Neste experimento, foi utilizado uma pastilha de freio (material “P”) do tipo SM, com uma formulação distinta àquela apresentada na tese. A Tabela A.1 mostra a composição aproximada deste material.

Tabela A.1 – Composição da pastilha de freio P.

Categoria	Volume [%]
Fibras	11
Aglomerantes	14
Lubrificantes	48
Abrasivos	5
Enchimento	22

Foi aplicada uma metodologia similar à apresentada na Tabela 7.2, onde um assentamento baseado na norma AK Master foi aplicado seguido de uma caracterização. A Tabela A.2 mostra este procedimento.

Tabela A.2 – Parâmetros de ensaio.

Etapa	Repetições	Pressão hidráulica [bar]	Pressão de contato [MPa]	Velocidade de deslizamento inicial - final [m/s]	Desaceleração [m/s²]	Temperatura inicial do disco [°C]
Assentamento	275		De acordo com o procedimento AK Master (SAE J2522)			
Caracterização	50	40	1,9	7,5 - 2,8	3,15	100
		50	2,4		3,93	
		60	2,9		4,72	
		70	3,4		5,51	

Os resultados são mostrados na Figura A.1.

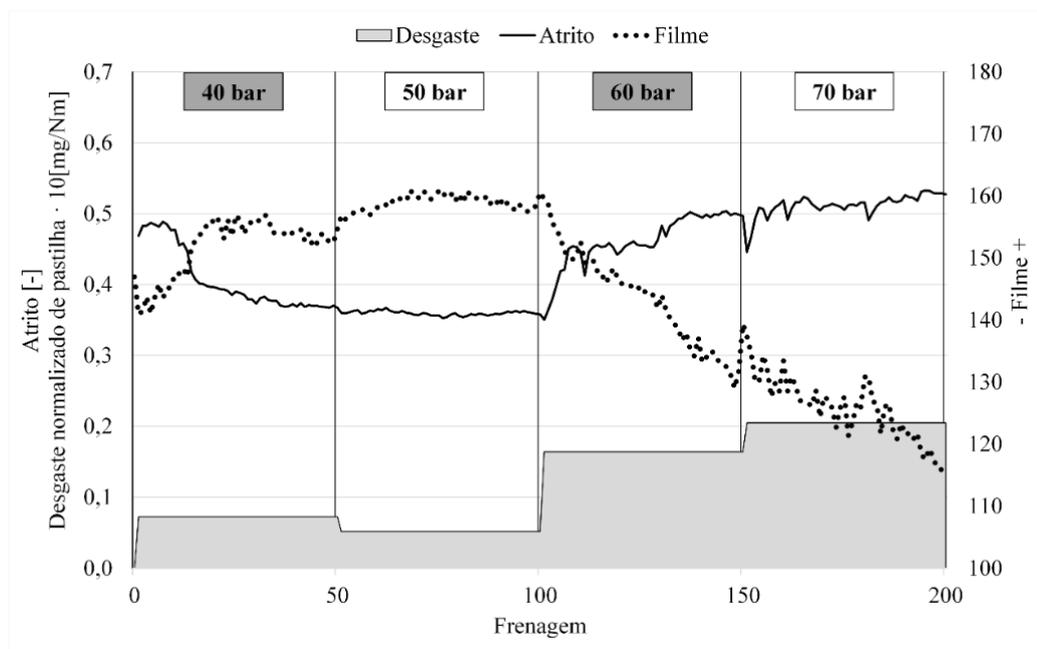


Figura A.1 – Resultados de atrito, desgaste e filme para a amostra P.

Observa-se que a transição de regime de desgaste de moderado para severo ocorreu em uma pressão de 60 bar, com um aumento de desgaste de pastilha, aumento do atrito e redução do filme depositado sobre o disco. Esta transição ocorreu em uma pressão menor do que a ocorrida nos resultados apresentados na seção 7.2 (90 bar). O aumento do desgaste também foi menos significativo neste caso. Este estudo preliminar teve como intuito ilustrar que o fenômeno de transição de regime de desgaste ocorre também em outras formulações de material de fricção. Entretanto, uma investigação mais aprofundada deve ser realizada para que possa correlacionar o efeito da formulação do material de fricção com a transição de regime de desgaste.