

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

COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO AÇO SAE 4140 TEMPERADO E REVENIDO

por

Amália Mayrhofer

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Fevereiro de 2019

# COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO AÇO SAE 4140 TEMPERADO E REVENIDO

por

Amália Mayrhofer  
Engenheira Mecânica

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

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Aprovada por:

Prof. Dr. André Ronaldo Froehlich.....UNISINOS

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Cintia Cristiane Petry Mazzaferro.....PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Patric Daniel Neis .....PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 06 de Fevereiro de 2019

*Aos meus pais, Carlos e Margarete, e ao meu irmão, Augusto.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu professor orientador Dr. Ney Francisco Ferreira, por todo apoio, paciência e ensinamentos fornecidos durante o desenvolvimento deste trabalho;

Aos meus familiares, principalmente ao meu pai Carlos Mayrhofer Junior, à minha mãe Margarete Adriane Mayrhofer e ao meu irmão Augusto Mayrhofer, pelo apoio recebido até aqui;

Ao professor Dr. Patric Daniel Neis, pelos conselhos e incentivo durante o mestrado;

Ao meu namorado Fábio Matiello por todo suporte, paciência e companheirismo ao longo do mestrado;

À minha colega da pós-graduação Andressa Caroline da Silva Carvalho pela amizade, parceria e conselhos no decorrer do mestrado;

À equipe do Laboratório de Tribologia (LATRIB) por toda assistência durante a elaboração do trabalho, principalmente aos meus colegas e amigos Gustavo Gehlen, Adriele Jacques Amaral, Liu Yesukai de Barros, Jean Carlos Poletto, Victor Mondin, Caliel Pedon e Matheus Botega;

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte sem o qual não seria possível a realização deste trabalho;

Ao Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF);

Ao Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM).

## RESUMO

O comportamento tribológico dos materiais é influenciado por diversos parâmetros, entre eles estão dureza e microestrutura, propriedades ainda pouco correlacionadas aos mecanismos de desgaste. Este trabalho tem como objetivo avaliar o atrito, o desgaste e seus mecanismos em discos de aço SAE 4140 temperados e revenidos em quatro temperaturas: 200 °C, 300 °C, 400 °C e 500 °C. Os corpos de prova, com martensita e martensita revenida, foram submetidos a ensaios pino sobre disco em um tribômetro do Laboratório de Tribologia da UFRGS, no qual foram atritados contra esferas de zircônia com 8 mm de diâmetro. Os volumes desgastados nos discos e pinos foram determinados através de interferometria. Para avaliar os mecanismos de desgaste as superfícies foram analisadas em microscópio ótico, microscópio eletrônico de varredura e espectrômetro de energia dispersiva. Além disso, a metalografia dos discos foi feita para caracterizar as microestruturas. O tratamento térmico se mostrou efetivo, com as durezas decrescendo continuamente do disco temperado (60 HRC) para o temperado e revenido a 500 °C (39 HRC). Dentro de uma mesma condição de tratamento térmico, os desgastes foram diferentes, apesar dos ensaios terem sido realizados todos com os mesmos parâmetros. Além disso, verificou-se que a irregularidade das trilhas desgastadas aumenta com a temperatura do revenido. Em relação aos mecanismos de desgaste observou-se, além da abrasão, adesão e oxidação, o “plowing” que, segundo alguns autores, também é um mecanismo de desgaste. As esferas apresentaram acúmulo de material em sua superfície, no entanto, isso praticamente não ocorreu na esfera atritada contra os discos temperados e revenidos a 500 °C. Os coeficientes de atrito médio foram menores nos discos de dureza elevada, além de apresentarem maior estabilidade.

Palavras chaves: Aço 4140; Têmpera; Revenido; Microestrutura; Desgaste.

## **ABSTRACT**

The tribological behavior of the materials is influenced by several parameters, among them are hardness and microstructure, properties which are still not fully connected to wear mechanisms. This work aims to evaluate the friction, wear and its mechanisms on quenched and tempered SAE 4140 steel discs at four temperatures: 200 °C, 300 °C, 400 °C and 500 °C. The test specimens, with martensite and tempering martensite, were submitted to pin-to-disk tests in a tribometer from Laboratory of Tribology at UFRGS, where they were rubbed against 8 mm diameter zirconia sphere. Worn volumes from discs and from pins were determined by interferometry. To evaluate the wear mechanisms, the surfaces were analyzed with optical microscope, scanning electron microscope and dispersive energy spectrometer. In addition, the metallography of the discs was performed to verify the microstructures. The heat treatment was efficient, with the hardness decreasing continuously from the quenched disk (60 HRC) to the tempering at 500 °C (39 HRC). Within the same heat treatment condition, wear was different, although the tests were all performed with the same parameters. Moreover, it has been found that the roughness of the worn tracks increases with the tempering temperature. Regarding to wear mechanisms it was noticed, besides abrasion, adhesion and oxidation, plowing that, according to some authors, is also a wear mechanism. The spheres presented cumulated material on its surfaces, however, this hardly occurred in the spheres rubbed against disk tempering at 500 °C. The average coefficient of friction was smaller at the discs with high hardness, besides being more stable.

**Keywords:** 4140 Steel; Quenching; Tempering; Microstructure; Wear.

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO .....</b>	<b>3</b>
2.1	Objetivos específicos.....	3
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
3.1	Tratamentos térmicos .....	4
3.1.1	Têmpera.....	5
3.1.2	Revenido.....	7
3.1.3	Desgaste em materiais temperados e revenidos .....	7
3.2	Mecanismos de desgaste .....	11
3.2.1	Desgaste adesivo .....	13
3.2.2	Desgaste abrasivo .....	13
3.2.3	Desgaste por fadiga .....	14
3.2.4	Desgaste por corrosão .....	15
3.2.5	Desgaste moderado e desgaste severo.....	16
3.2.6	Mecanismos de desgaste e trabalhos relacionados.....	16
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>24</b>
4.1	Discos .....	24
4.2	Pinos .....	26
4.3	Ensaio pino sobre disco.....	26
4.4	Medição do desgaste .....	29
4.4.1	Discos .....	29
4.4.2	Esferas .....	31
4.5	Medição da rugosidade.....	33
4.6	Análise das superfícies .....	34
4.7	Análise das microestruturas dos discos .....	37
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>40</b>
5.1	Microestruturas e durezas.....	40
5.2	Desgaste .....	45
5.2.1	Desgaste dos discos .....	46

5.2.2	Desgaste dos pinos .....	51
5.3	Mecanismos de desgaste .....	58
5.4	Atrito .....	74
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>80</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>82</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>83</b>
	<b>APÊNDICE A Metalografias.....</b>	<b>87</b>
	<b>APÊNDICE B MEV/EDS Discos e esferas .....</b>	<b>90</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Principais tratamentos térmicos aplicados aos aços [Nunura, 2005].	5
Figura 3.2 Diagrama CCT do aço SAE 4140 austenitizado a 843 °C – C=0,37%, Mn=0,77%, Cr=0,98%, Mo=0,21% [Adaptado de Rasma, 2015].	6
Figura 3.3 Perfil da superfície, trilha de desgaste e sua superposição usada para calcular o volume desgastado [Adaptado de Totik et al., 2003].	10
Figura 3.4 Imagens em MEV do desgaste do aço AISI 4140 (a) e (b) normalizados; (c) e (d) endurecidos por indução durante 27 s [Adaptado de Totik et al., 2003].	11
Figura 3.5 Definições de desgaste e suas relações [Adaptado de Kato e Adachi, 2001].	12
Figura 3.6 Modos de desgaste [Adaptado de Kato e Adachi, 2001].	12
Figura 3.7 Mecanismos do desgaste abrasivo: (a) microcorte, (b) fratura, (c) fadiga acelerada por deformações e (d) arrancamento de partículas [Adaptado de Batchelor, 2006a].	13
Figura 3.8 Mecanismo de desgaste iniciado por trinca superficial [Adaptado de Batchelor, 2006d].	15
Figura 3.9 Imagens das superfícies desgastadas para carga de 35 N: (a) pino de baixa dureza, (b) pino de alta dureza, (c) disco desgastado com pino de baixa dureza e (d) disco desgastado com pino de alta dureza [Adaptado de Elhadi et al., 2016].	18
Figura 3.10 Perfil das trilhas desgastadas para os pinos (a) de baixa dureza e (b) alta dureza [Adaptado de Elhadi et al., 2016].	19
Figura 3.11 Microscopia ótica das amostras ensaiadas a seco (a) recozida (b) tratada termicamente e (c) tratada por FSP [Adaptado de Lorenzo-martin e Ajayi, 2015].	20
Figura 3.12 Perfilometria ótica da amostra recozida desgastada com material acumulado nas bordas [Adaptado de Lorenzo-martin e Ajayi, 2015].	21
Figura 3.13 Análise em MEV da trilha desgastada na amostra tratada termicamente, evidenciando (a) abrasão e (b) fadiga [Adaptado de Lorenzo-martin e Ajayi, 2015].	21
Figura 3.14 Perfilometria ótica da trilha desgastada da amostra tratada por FSP [Adaptado de Lorenzo-martin e Ajayi, 2015].	22
Figura 3.15 Microscopia e perfilometria ótica da esfera atritada contra amostra FSP com lubrificante: (a) e (b) carga de 75 N e (c) e (d) carga de 50 N [Adaptado de Lorenzo-martin e Ajayi, 2015].	22

Figura 3.16	Análise em MEV da superfície com dureza de 65 HRC ensaiada a 0,1 m/s, a elipse indica a delaminação [Adaptado de Tang et al., 2013].	23
Figura 4.1	Fluxograma metodológico.	24
Figura 4.2	Dimensões dos discos.	25
Figura 4.3	Forno elétrico Sanchis utilizado no revenimento dos discos.	25
Figura 4.4	Esfera de zircônia utilizada nos ensaios.	26
Figura 4.5	Tribômetro [Adaptado de Pavlak et al., 2018].	27
Figura 4.6	Representação esquemática do tribômetro [Adaptado de Neis et al., 2014].	27
Figura 4.7	Topografia tridimensional da trilha desgastada.	29
Figura 4.8	Esquema do passo a passo utilizado para calcular o volume desgastado nos discos (a) seleção das três regiões a serem analisadas, (b) seleção dos planos de corte, (c) perfil da trilha desgastada e (d) cálculo da área dos retângulos.	30
Figura 4.9	Procedimento para obter o raio da marca de desgaste: (a) seleção dos dez pontos ao redor da marca e (b) formação do círculo do qual se obtém o diâmetro.	31
Figura 4.10	Esquema do procedimento utilizado para cálculo do volume desgastado nas esferas.	32
Figura 4.11	Análise do perfil da esfera.	33
Figura 4.12	Seleção da trilha para análise de rugosidade.	33
Figura 4.13	Imagem de microscópio da trilha DTR500-3 desgastada, aumento de 5x.	34
Figura 4.14	Equipamento utilizado para MEV/EDS marca Hitachi, modelo TM 3000.	35
Figura 4.15	Análise em MEV da trilha DTR500-3 desgastada, aumento de 200x.	35
Figura 4.16	Imagem de microscópio da marca de desgaste da esfera atritada contra a trilha DTR500-3, aumento de 5x.	36
Figura 4.17	Análise em MEV da esfera atritada contra a trilha DTR500-3, aumento de 200x.	37
Figura 4.18	Máquina de corte Struers, modelo Discotom-100, utilizada para cortar os discos.	38
Figura 4.19	Prensa Struers, modelo LaboPress-3, utilizada no embutimento das amostras.	38
Figura 4.20	Metalografia dos discos temperados e revenidos a 500 °C com aumentos de: (a) 500x e (b) 1000x.	39
Figura 5.1	Dureza média das trilhas.	41
Figura 5.2	Durezas médias.	42

Figura 5.3	Microestrutura do disco temperado, aumento de 1000x. ....	42
Figura 5.4	Microestrutura do disco temperado e revenido a 200 °C, aumento de 1000x. ....	43
Figura 5.5	Microestrutura do disco temperado e revenido a 300 °C, aumento de 1000x. ....	44
Figura 5.6	Microestrutura do disco temperado e revenido a 400 °C, aumento de 1000x. ....	45
Figura 5.7	Microestrutura do disco temperado e revenido a 500 °C, aumento de 1000x. ....	45
Figura 5.8	Desgaste volumétrico médio de cada trilha. ....	46
Figura 5.9	Rugosidade média das trilhas. ....	48
Figura 5.10	Perfis médios do desgaste das três trilhas dos discos: (a) temperados, (b) temperados e revenidos a 200 °C, (c) temperados e revenidos a 300 °C, (d) temperados e revenidos a 400 °C e (e) temperados e revenidos a 500 °C. ....	49
Figura 5.11	Interferometria de uma das regiões: (a) trilha DTR300-1 e (b) trilha DTR300-2. ....	50
Figura 5.12	Desgaste volumétrico das esferas. ....	52
Figura 5.13	Perfis do desgaste das esferas atritadas contra as trilhas dos discos: (a) temperados, (b) temperados e revenidos a 200 °C, (c) temperados e revenidos a 300 °C, (d) temperados e revenidos a 400 °C e (e) temperados e revenidos a 500 °C. ....	53
Figura 5.14	Perfis das esferas e das trilhas dos discos temperados e revenidos a 500 °C após os ensaios. ....	55
Figura 5.15	Desgaste volumétrico médio das esferas atritadas contra os respectivos discos. ....	56
Figura 5.16	Gráfico comparativo dos desgastes das esferas e das respectivas trilhas com seus desvios padrão. ....	57
Figura 5.17	Panorâmica das trilhas dos discos temperados. ....	59
Figura 5.18	MEV da trilha DT-3, aumento de 200x. ....	60
Figura 5.19	MEV da trilha DT-3, aumento de 2000x. ....	60
Figura 5.20	Espectros dos pontos: (a) 1 e (b) 2. ....	61
Figura 5.21	Panorâmica das esferas atritadas contra as trilhas dos discos temperados. ....	62
Figura 5.22	MEV da esfera atritada contra a trilha DT-3: aumento de 200x (pontos 1 e 2), aumento de 2000x (ponto 3). ....	63
Figura 5.23	Espectros dos pontos: (a) 1, (b) 2 e (c) 3. ....	64
Figura 5.24	Panorâmica das trilhas dos discos temperados e revenidos a 200 °C. ....	65
Figura 5.25	Panorâmica das esferas atritadas contra as trilhas dos discos temperados e revenidos a 200 °C. ....	66

Figura 5.26 Panorâmica das trilhas dos discos temperados e revenidos a 300 °C. ....	67
Figura 5.27 Panorâmica das esferas atritadas contra as trilhas dos discos temperados e revenidos a 300 °C.....	68
Figura 5.28 Panorâmica das trilhas dos discos temperados e revenidos a 400 °C. ....	70
Figura 5.29 Panorâmica das esferas atritadas contra as trilhas dos discos temperados e revenidos a 400 °C.....	71
Figura 5.30 Panorâmica das trilhas dos discos temperados e revenidos a 500 °C. ....	72
Figura 5.31 Panorâmica das esferas atritadas contra as trilhas dos discos temperados e revenidos a 500 °C.....	73
Figura 5.32 Coeficiente de atrito médio de cada ensaio.....	75
Figura 5.33 Coeficientes de atrito dos discos temperados.....	76
Figura 5.34 Coeficientes de atrito dos discos temperados e revenidos a 200 °C. ....	76
Figura 5.35 Coeficientes de atrito dos discos temperados e revenidos a 300 °C. ....	77
Figura 5.36 Coeficientes de atrito dos discos temperados e revenidos a 400 °C. ....	78
Figura 5.37 Coeficientes de atrito dos discos temperados e revenidos a 500 °C. ....	79
Figura 5.38 Coeficientes de atrito médio.....	79
Figura A.1 Microestrutura dos discos temperados, aumento de 500x.....	87
Figura A.2 Microestrutura dos discos temperados e revenidos a 200 °C, aumento de 500x. .... .....	87
Figura A.3 Microestrutura dos discos temperados e revenidos a 300 °C, aumento de 500x..... .....	88
Figura A.4 Microestrutura dos discos temperados e revenidos a 400 °C, aumento de 500x..... .....	88
Figura A.5 Microestrutura dos discos temperados e revenidos a 500 °C, aumento de 500x..... .....	89
Figura B.1 Análise região escura discos temperados. ....	90
Figura B.2 Análise região clara discos temperados.....	90
Figura B.3 Análise da superfície discos temperados.....	91
Figura B.4 Análise região escura discos temperados. ....	91

Figura B.5	Análise região escura discos temperados e revenidos a 200 °C.....	92
Figura B.6	Análise região clara discos temperados e revenidos a 200 °C. ....	93
Figura B.7	Análise da superfície discos temperados e revenidos a 200 °C.....	93
Figura B.8	Análise região escura discos temperados e revenidos a 200 °C.....	94
Figura B.9	Análise região escura discos temperados e revenidos a 300 °C.....	94
Figura B.10	Análise região clara discos temperados e revenidos a 300 °C. ....	95
Figura B.11	Análise da superfície discos temperados e revenidos a 300 °C.....	95
Figura B.12	Análise região escura discos temperados e revenidos a 300 °C.....	96
Figura B.13	Análise região escura discos temperados e revenidos a 400 °C. ....	96
Figura B.14	Análise região clara discos temperados e revenidos a 400 °C. ....	97
Figura B.15	Análise da superfície discos temperados e revenidos a 400 °C.....	97
Figura B.16	Análise região escura discos temperados e revenidos a 400 °C.....	98
Figura B.17	Análise região escura discos temperados e revenidos a 500 °C.....	98
Figura B.18	Análise região clara discos temperados e revenidos a 500 °C. ....	99
Figura B.19	Análise da superfície discos temperados e revenidos a 500 °C.....	99
Figura B.20	Análise região escura discos temperados e revenidos a 500 °C.....	100
Figura B.21	Análise região acinzentada esfera discos temperados.....	101
Figura B.22	Análise região clara esfera discos temperados. ....	101
Figura B.23	Análise da superfície (borda) esfera discos temperados.....	102
Figura B.24	Análise dos pontos escuros esfera discos temperados.....	102
Figura B.25	Análise da superfície (centro) esfera discos temperados.....	103
Figura B.26	Análise região acinzentada esfera discos temperados e revenidos a 200 °C.....	103
Figura B.27	Análise região clara esfera discos temperados e revenidos a 200 °C.....	104
Figura B.28	Análise da superfície (borda) esfera discos temperados e revenidos a 200 °C .....	104
Figura B.29	Análise dos pontos escuros esfera discos temperados e revenidos a 200 °C. ....	105
Figura B.30	Análise ponto acinzentado esfera discos temperados e revenidos a 200 °C. ....	105
Figura B.31	Análise da superfície (centro) esfera discos temperados e revenidos a 200 °C.	106
Figura B.32	Análise região acinzentada esfera discos temperados e revenidos a 300 °C.....	106
Figura B.33	Análise região clara esfera discos temperados e revenidos a 300 °C.....	107
Figura B.34	Análise da superfície (borda) esfera discos temperados e revenidos a 300 °C.	107

Figura B.35	Análise dos pontos escuros esfera discos temperados e revenidos a 300 °C. ...	108
Figura B.36	Análise da superfície (centro) esfera discos temperados e revenidos a 300 °C.	108
Figura B.37	Análise região acinzentada esfera discos temperados e revenidos a 400 °C.....	109
Figura B.38	Análise região clara esfera discos temperados e revenidos a 400 °C.....	109
Figura B.39	Análise da superfície (borda) esfera discos temperados e revenidos a 400 °C.	110
Figura B.40	Análise dos pontos escuros esfera discos temperados e revenidos a 400 °C. ...	110
Figura B.41	Análise da superfície (centro) esfera discos temperados e revenidos a 400 °C.	111
Figura B.42	Análise região acinzentada esfera discos temperados e revenidos a 500 °C.....	111
Figura B.43	Análise região clara esfera discos temperados e revenidos a 500 °C.....	112
Figura B.44	Análise da superfície (borda) esfera discos temperados e revenidos a 500 °C.	112
Figura B.45	Análise dos pontos escuros esfera discos temperados e revenidos a 500 °C. ...	113
Figura B.46	Análise da superfície (centro) esfera discos temperados e revenidos a 500 °C.	113

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Parâmetros de ensaioTabela. ....	28
Tabela 4.2 Tratamentos térmicos e nomenclaturas. ....	28
Tabela 5.1 Durezas das trilhas. ....	41
Tabela 5.2 Comparação entre todos volumes médios desgastados através da análise ANOVA. .....	47
Tabela 5.3 EDS - Porcentagem em peso dos elementos nos pontos 1 e 2.....	61
Tabela 5.4 EDS - Porcentagem em peso dos elementos nos pontos 1, 2 e 3.....	63
Tabela B.1 Análise região escura discos temperados.....	90
Tabela B.2 Análise região clara discos temperados. ....	91
Tabela B.3 Análise da superfície discos temperados. ....	91
Tabela B.4 Análise região escura discos temperados.....	92
Tabela B.5 Análise região escura discos temperados e revenidos a 200 °C. ....	92
Tabela B.6 Análise região clara discos temperados e revenidos a 200 °C.....	93
Tabela B.7 Análise da superfície discos temperados e revenidos a 200 °C.....	93
Tabela B.8 Análise região escura discos temperados e revenidos a 200 °C. ....	94
Tabela B.9 Análise região escura discos temperados e revenidos a 300 °C. ....	94
Tabela B.10 Análise região clara discos temperados e revenidos a 300 °C.....	95
Tabela B.11 Análise da superfície discos temperados e revenidos a 300 °C.....	96
Tabela B.12 Análise região escura discos temperados e revenidos a 300 °C. ....	96
Tabela B.13 Análise região escura discos temperados e revenidos a 400 °C. ....	97
Tabela B.14 Análise região clara discos temperados e revenidos a 400 °C.....	97
Tabela B.15 Análise da superfície discos temperados e revenidos a 400 °C.....	98
Tabela B.16 Análise região escura discos temperados e revenidos a 400 °C. ....	98
Tabela B.17 Análise região escura discos temperados e revenidos a 500 °C. ....	99
Tabela B.18 Análise região clara discos temperados e revenidos a 500 °C.....	99
Tabela B.19 Análise da superfície discos temperados e revenidos a 500 °C.....	100
Tabela B.20 Análise região escura discos temperados e revenidos a 500 °C. ....	100
Tabela B.21 Análise região acinzentada esfera discos temperados.....	101
Tabela B.22 Análise região clara esfera discos temperados.....	102

Tabela B.23	Análise da superfície (borda) esfera discos temperados. ....	102
Tabela B.24	Análise dos pontos escuros esfera discos temperados. ....	103
Tabela B.25	Análise da superfície (centro) esfera discos temperados. ....	103
Tabela B.26	Análise região acinzentada esfera discos temperados e revenidos a 200 °C. ...	104
Tabela B.27	Análise região clara esfera discos temperados e revenidos a 200 °C. ....	104
Tabela B.28	Análise da superfície (borda) esfera discos temperados e revenidos a 200 °C.	105
Tabela B.29	Análise dos pontos escuros esfera discos temperados e revenidos a 200 °C....	105
Tabela B.30	Análise ponto acinzentado esfera discos temperados e revenidos a 200 °C.....	106
Tabela B.31	Análise da superfície (centro) esfera discos temperados e revenidos a 200 °C. ....	106
Tabela B.32	Análise região acinzentada esfera discos temperados e revenidos a 300 °C. ...	107
Tabela B.33	Análise região clara esfera discos temperados e revenidos a 300 °C. ....	107
Tabela B.34	Análise da superfície (borda) esfera discos temperados e revenidos a 300 °C.	108
Tabela B.35	Análise dos pontos escuros esfera discos temperados e revenidos a 300 °C....	108
Tabela B.36	Análise da superfície (centro) esfera discos temperados e revenidos a 300 °C. ....	109
Tabela B.37	Análise região acinzentada esfera discos temperados e revenidos a 400 °C. ...	109
Tabela B.38	Análise região clara esfera discos temperados e revenidos a 400 °C. ....	110
Tabela B.39	Análise da superfície (borda) esfera discos temperados e revenidos a 400 °C.	110
Tabela B.40	Análise dos pontos escuros esfera discos temperados e revenidos a 400 °C....	111
Tabela B.41	Análise da superfície (centro) esfera discos temperados e revenidos a 400 °C. ....	111
Tabela B.42	Análise região acinzentada esfera discos temperados e revenidos a 500 °C. ...	112
Tabela B.43	Análise região clara esfera discos temperados e revenidos a 500 °C. ....	112
Tabela B.44	Análise da superfície (borda) esfera discos temperados e revenidos a 500 °C.	113
Tabela B.45	Análise dos pontos escuros esfera discos temperados e revenidos a 500 °C....	113
Tabela B.46	Análise da superfície (centro) esfera discos temperados e revenidos a 500 °C. ....	114

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CCT	Continuous cooling transformation
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
EDS	Espectrômetro de energia dispersiva
FSP	Friction stir processing
LAMEF	Laboratório de Metalurgia Física
LATRIB	Laboratório de Tribologia
LdSM	Laboratório de Design e Seleção de Materiais
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
PIB	Produto interno bruto
PROMEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
SAE	Society of Automotive Engineers
TTT	Time temperature transformation
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## LISTA DE SÍMBOLOS

HV	Dureza Vickers
HRC	Dureza Rockwell C
$\mu$	Coefficiente de atrito
T	Torque [N.m]
F	Força normal [N]
R	Raio de aplicação da força [m], raio da esfera [mm]
r	Raio de aplicação da força [mm]
$R_a$	Rugosidade média [ $\mu\text{m}$ ]
$Vp_j$	Volume calculado pelo plano j [ $\text{mm}^3$ ]
n	Número de retângulos
$\Delta x_i$	Medida da base do i-ésimo retângulo [mm]
$h_i$	Medida da altura do i-ésimo retângulo [mm]
$V_f$	Volume final de cada trilha
$V_{Pino}$	Volume de material perdido na esfera [ $\text{mm}^3$ ]
$W_{Pino}$	Diâmetro da marca de desgaste [mm]

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com Holmberg e Erdemir, 2017, cerca de 23% do consumo total de energia no mundo tem origem em contatos tribológicos, dos quais 20% são consumidos devido ao atrito e 3% são usados com a reparação ou substituição de peças desgastadas. De acordo com os autores, o desgaste pode resultar em falhas operacionais, afetando não só a produtividade das indústrias como também os custos envolvidos na produção. O estudo sugere o tratamento de superfícies como uma das soluções para redução do atrito e do desgaste. Segundo Oliveira e Silva, 2015, entre 1% e 6% do produto interno bruto (PIB) brasileiro de 2004 foram gastos em função do desgaste, ou seja, entre 17 e 104 bilhões de reais em um único ano. Os benefícios de uma maior eficiência tribológica são inúmeros, tais como: redução do tempo de inatividade dos equipamentos, redução de custos, maior eficiência energética e redução da emissão de CO<sub>2</sub> [Lee e Carpick, 2017].

Os aços, assim como os ferros fundidos, são ligas a base de ferro, e se destacam entre os materiais industriais pelas diversas propriedades físicas e mecânicas capazes de serem obtidas através do seu processamento. Tanto a composição química quanto a estrutura dos aços caracterizam suas propriedades [Colpaert, 2008]. Essa estrutura é modificada pelos tratamentos térmicos que consistem no aquecimento, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o intuito de transformar suas propriedades ou lhe atribuir características específicas, como por exemplo, uma maior resistência ao desgaste [Chiaverini, 1998].

As diferentes microestruturas podem interferir de diferentes maneiras no comportamento de um par tribológico, seja no coeficiente de atrito, seja nos mecanismos de desgaste. Em um estudo realizado por Trevisiol et al., 2017, ensaios com baixas cargas aplicadas resultaram em um maior coeficiente de atrito devido uma mudança microestrutural, enquanto que para cargas elevadas o efeito da dureza predominou, levando a um menor coeficiente com o aumento da dureza. O autor também observou que a transição de uma microestrutura de ripas de martensita para grãos equiaxiais gerou uma combinação de diferentes mecanismos de desgaste. Segundo Zum Gahr, 1987c, a microestrutura tem influência no comportamento do desgaste dos materiais. Entender essa relação é de grande importância para engenheiros e projetistas que, muitas vezes, precisam selecionar materiais mais resistentes ao desgaste.

Observa-se, portanto, que inúmeros fatores se relacionam para caracterizar o desgaste de um determinado corpo que, assim como a fricção, não constitui uma propriedade intrínseca

do material, mas sim uma característica do sistema tribológico [Zum Gahr, 1987c; Myers, 2004; Kato, 2000]. Entre os fatores que determinam esse sistema estão: combinação de material, tipo de movimento, velocidade relativa de deslizamento, magnitude da carga aplicada, geometria da superfície de contato, lubrificação, entre outros [Verbeek, 1979].

A dureza é outra propriedade importante ao se analisar o comportamento de um par tribológico, não tendo uma relação simples com a resistência ao desgaste [Wang et al., 1999]. Segundo o autor, uma estrutura com maior dureza pode não ser a mais resistente. Este comportamento também foi observado por Yang et al., 2012, no qual amostras revenidas e com maior dureza tiveram uma menor resistência ao desgaste. Por outro lado, no estudo de Xu et al., 2017, a transformação de fase para martensita resultou em uma maior resistência devido ao aumento da dureza. Essa divergência de resultados evidencia a importância da análise microestrutural na compreensão dos mecanismos tribológicos atuantes em aços.

## **2 OBJETIVO**

O principal objetivo deste trabalho é correlacionar durezas e microestruturas, obtidas por diferentes tratamentos térmicos, com desgaste e seus mecanismos.

### **2.1 Objetivos específicos**

- Confecção de corpos de prova em aço SAE 4140 com diferentes durezas e microestruturas obtidas por tratamento térmico;
- Realização dos ensaios pino sobre disco em um tribômetro para avaliar a resistência ao desgaste dos materiais;
- Avaliar o desgaste utilizando interferometria;
- Utilização de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) e espectrômetro de energia dispersiva (EDS) para avaliar os mecanismos de desgaste;
- Metalografia microscópica (micrografia) dos discos para verificar as microestruturas resultantes dos tratamentos térmicos.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Tratamentos térmicos

Os aços geralmente são definidos como uma liga de ferro carbono em que a porcentagem de carbono pode chegar até 2% em peso, enquanto que outros elementos de liga podem chegar a 5% em peso em aços de baixa liga, ultrapassando esse valor para aços altamente ligados. Os aços podem ter diversas propriedades e que vão depender da sua composição, fase e microconstituintes, que por sua vez, dependem do tratamento térmico [ASM Handbook, 1991]. O tratamento térmico consiste no aquecimento do aço à temperatura e tempo determinados, além disso é importante o controle da atmosfera e da velocidade de aquecimento e resfriamento. O seu principal objetivo é modificar as propriedades mecânicas do aço, removendo tensões, aumentando sua resistência mecânica, melhorando sua ductilidade, resistência ao desgaste, entre outros. No entanto deve ser feito com cautela, uma vez que a melhora em algumas propriedades leva a piora de outras [Chiaverini, 1998].

Existem diversos tratamentos térmicos aplicados aos aços, a Figura 3.1 mostra os principais. Os tratamentos térmicos de têmpera e revenido geralmente são feitos em conjunto, uma vez que este último tratamento melhora a tenacidade, porém diminui a dureza e a resistência mecânica da estrutura martensítica, resultante da têmpera [Giordani, 2012].

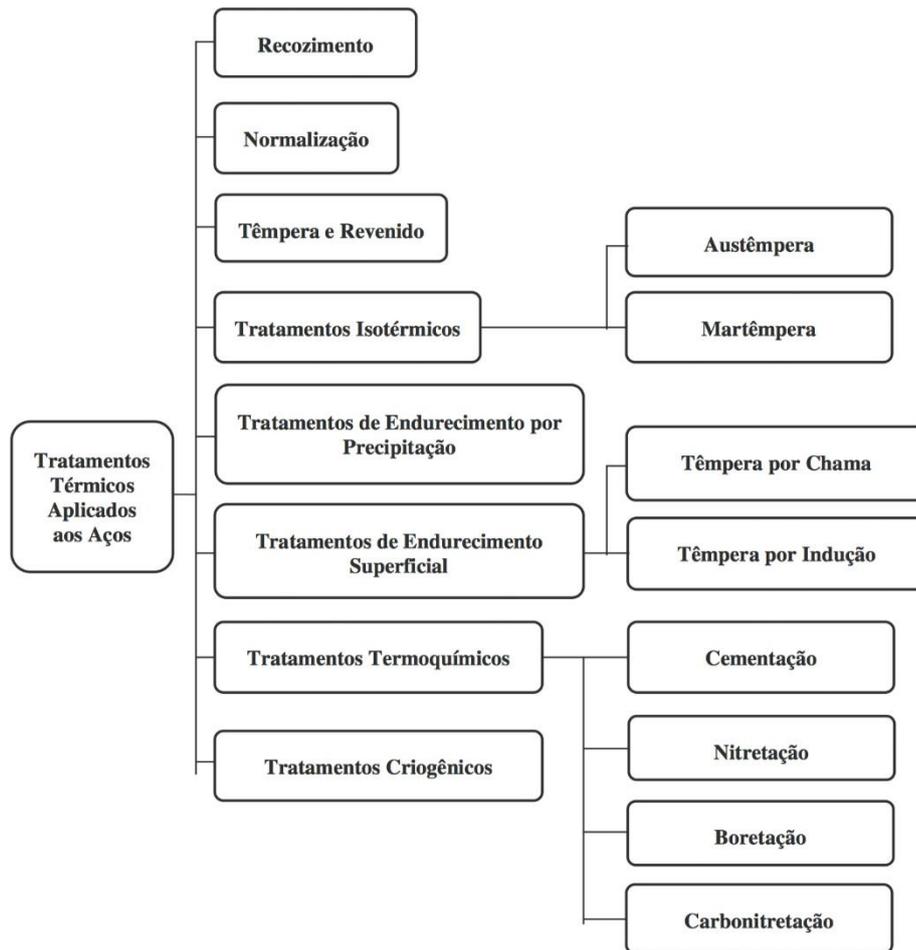


Figura 3.1 – Principais tratamentos térmicos aplicados aos aços [Nunura, 2005].

### 3.1.1 Têmpera

Segundo o ASM Handbook, 1991, a têmpera consiste no rápido resfriamento de peças metálicas a partir da temperatura de austenitização, que geralmente está entre 815 °C e 870 °C para aços. Esse tratamento pode ser usado para minimizar a presença de carbonetos de contorno de grão ou melhorar a distribuição de ferrita, em aços inoxidáveis e de alta liga. No entanto, a maioria dos aços são temperados para produzir martensita, microestrutura caracterizada por sua elevada dureza. O meio de resfriamento das peças depende da sua temperabilidade, espessura, forma e também da taxa de resfriamento necessária para atingir a microestrutura desejada. Gás e líquido são os meios mais comuns, este inclui óleo, água e soluções aquosas de polímeros.

A microestrutura após um tratamento térmico pode ser prevista através dos diagramas TTT (time-temperature-transformation) para transformações isotérmicas ou através dos

diagramas CCT (continuous-cooling-transformation) para transformações de resfriamento contínuo [Totten, 2007]. A Figura 3.2 ilustra o diagrama CCT para o aço SAE 4140, indicando, para diferentes taxas de resfriamento, as temperaturas iniciais e finais da transformação.

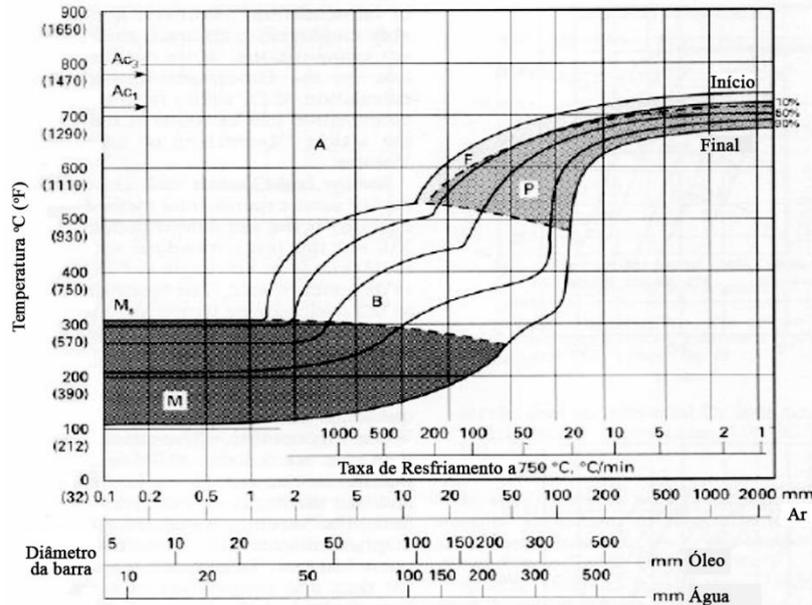


Figura 3.2 – Diagrama CCT do aço SAE 4140 austenitizado a 843 °C – C=0,37%, Mn=0,77%, Cr=0,98%, Mo=0,21% [Adaptado de Rasma, 2015].

O aço SAE 4140, também denominado aço cromo-molibdênio, é classificado como de médio carbono e de baixa liga. De acordo com Handbook, 1991, é muito usado em bielas, virabrequins, eixos, brocas de perfuração, tubulação de alta pressão, engrenagens, entre outros. Pertence à família 41xx, com 0,50-0,95% Cr, 0,20-1,12% Mo [Colpaert, 2008]. Os elementos de liga, assim como o carbono, podem modificar a posição das linhas de início e fim de transformação das curvas isotérmicas. Exceto o cobalto, todos os outros elementos deslocam a curva para a direita, retardando a transformação. Desta forma, a estrutura martensítica é mais facilmente obtida a partir do resfriamento [Chiaverini, 1998]. Segundo Totten, 2007, a adição de molibdênio produz aços de grão fino, aumenta a temperabilidade e melhora resistência à fadiga, enquanto que o cromo, também aumenta a temperabilidade.

### 3.1.2 Revenido

O revenido é um processo no qual um aço previamente endurecido ou normalizado é aquecido, geralmente, abaixo da menor temperatura crítica, mantido por um determinado tempo e resfriado a uma taxa adequada. É realizado, sobretudo, para aumentar a ductilidade e a tenacidade do material. Esse tratamento alivia as tensões após a têmpera e possibilita estabilidade dimensional [ASM Handbook, 1991]. Na maioria das vezes o revenido é feito entre as temperaturas de 175 °C e 705 °C para tempos de 30 minutos até 4 horas. Durante o revenido da martensita ocorrem algumas transformações que podem ser divididas em três estágios, de acordo com Handbook, 2004, o primeiro consiste na formação de carbonetos de transição e redução do teor de carbono na matriz martensítica (100 °C – 250 °C), no segundo estágio ocorre a transformação da austenita retida em ferrita e cementita (200 °C-300 °C) e por último a substituição dos carbonetos de transição e da martensita de baixo carbono por cementita e ferrita (250 °C-350 °C). Colpaert, 2008 também cita um estágio entre 500 °C e 650 °C no qual pode ocorrer – em aços contendo elementos de liga – a precipitação de carbonetos, causando um aumento da resistência e da dureza.

Estudos indicam que a resistência e a dureza da martensita revenida diminuem à medida que a temperatura do revenido e o tempo de manutenção aumentam. [Lee e Su, 1999, Trevisiol et al., 2017].

### 3.1.3 Desgaste em materiais temperados e revenidos

Um estudo recente realizado por Trevisiol et al., 2017, avaliou o efeito da dureza, microestrutura, carga normal e tamanho das partículas abrasivas no comportamento do atrito e desgaste do aço 35NCD16. As amostras do aço passaram por diferentes tratamentos térmicos para obter diferentes durezas. Primeiramente as amostras foram austenitizadas a 850 °C por 30 minutos e temperadas em água para gerar martensita. Após esse processo, os corpos de prova foram revenidos entre 200 °C e 600 °C. Para analisar a microestrutura as amostras foram lixadas, polidas e atacadas com Nital 1%. Os ensaios para avaliar a resistência ao desgaste abrasivo foram realizados em um tribômetro na configuração pino-no-prato (pin-on-plate) com partículas abrasivas variando desde 35 µm até 200 µm. De acordo com os resultados a amostra temperada foi a que alcançou a maior dureza, enquanto que a amostra revenida a 600 °C – maior temperatura – apresentou a menor dureza. Além disso, nessa amostra, observou-se martensita na forma de ripas, agrupadas, característica de aços baixo e médio carbono. A amostra revenida

a 200 °C também apresentou ripas de martensita e, de acordo com os autores, a sua diminuição de dureza, em relação à amostra temperada, é devido ao empobrecimento da martensita em carbono. Os corpos de prova revenidos a 300 °C, 400 °C e 500 °C, da mesma forma, apresentaram ripas de martensita. Segundo os autores a diminuição da dureza se deve à decomposição da martensita em ferrita e cementita – que se inicia em torno de 250 °C até 700 °C – e a transformação da austenita retida em ferrita e cementita – que se inicia entre 200 °C até 350 °C. Os autores afirmam que o efeito da microestrutura no desgaste diminui para cargas normais elevadas.

O estudo ainda revela que o coeficiente de atrito aumenta com o aumento do tamanho das partículas abrasivas em consequência do ângulo de ataque, que também aumenta. Além disso, independentemente do tamanho das partículas, para cargas acima de 70 N o atrito diminuiu com o aumento da dureza. Com relação ao desgaste, em todos experimentos a taxa de desgaste foi menor nas amostras temperadas e, para qualquer tamanho de abrasivo e dureza, a taxa de desgaste aumentou com o aumento da carga aplicada, exceto para as amostras revenidas entre 300 °C e 500 °C, cuja taxa de desgaste sofreu variações para diferentes intervalos de carga e tamanho de partículas abrasivas. O principal mecanismo de desgaste foi o abrasivo, no entanto, as amostras com dureza em torno de 430 HV apresentaram adesão e “plowing” – caracterizado pela grande deformação plástica da superfície com a formação de sulcos devido ao deslocamento de material.

Em outro estudo, Ulutan et al., 2010, avaliaram o efeito de diferentes métodos de tratamentos térmicos no comportamento do atrito e do desgaste do aço AISI 4140. As amostras foram divididas em cinco grupos: não tratadas, boronizadas, cementadas, temperadas e superfícies modificadas através de plasma por arco transferido (PTA). Os testes de desgaste abrasivo foram feitos em um tribômetro na configuração bloco-no-disco (block-on-disc). Observou-se menor perda de massa nas amostras cementadas e, como esperado, maior perda nas amostras não tratadas. A análise em EDS dos corpos de prova evidenciaram um desgaste semelhante nas amostras boronizadas, cementadas e temperadas, enquanto que as amostras não tratadas apresentaram ranhuras estreitas e grande quantidade de partículas provenientes do desgaste (debris), indicando alto desgaste abrasivo. As trilhas desgastadas das superfícies modificadas por PTA foram intensas, o que explica maior perda de massa em comparação com as outras amostras tratadas. Os pesquisadores ainda relatam que as amostras boronizadas, apesar de possuírem maior dureza, tiveram uma maior perda de massa do que as amostras cementadas.

Em uma pesquisa realizada por Singh et al., 2015, foram avaliados o efeito dos tratamentos térmicos na microestrutura e na resistência ao desgaste do aço AISI D2. Os corpos

de prova, em formato cilíndrico, foram obtidos a partir de uma barra recozida. Inicialmente as amostras foram austenitizadas em uma temperatura de aproximadamente 1029 °C seguidas de têmpera em óleo. As temperaturas do revenido variaram para se obter diferentes microestruturas. Os ensaios de desgaste abrasivo foram realizados na modalidade pino-no-prato (pin-on-plate) e o desgaste foi obtido através da diferença entre o peso inicial e final da amostra. A amostra temperada foi a que apresentou a maior dureza, enquanto que as amostras revenidas apresentaram um decréscimo de dureza com o aumento da temperatura do revenido. Segundo os autores, isso se deve à decomposição da martensita em ferrita e carbonetos. Com o aumento da severidade dos testes, o desgaste abrasivo aumentou cerca de duas vezes para amostras revenidas na maior temperatura – aproximadamente 649 °C –, enquanto que as amostras temperadas exibiram um aumento de aproximadamente 1,25 vezes. De acordo com os autores, o menor desgaste da amostra temperada é consequência da microestrutura martensítica, dos carbonetos mais finos e da transformação induzida pela tensão, durante o desgaste, da austenita em martensita. Além disso, conforme a temperatura do revenido aumentava, os carbonetos tornavam-se mais grosseiros, diminuindo a resistência à abrasão. A análise de difração de raios-X indicou a presença de óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) em todas amostras tratadas termicamente. Esse filme agiu como um lubrificante, reduzindo o atrito entre a superfície e as partículas abrasivas, o que não ocorreu em cargas mais altas e partículas mais grosseiras, na qual a superfície do metal ficou mais exposta, aumentando o desgaste.

Sebhi e Douib, 2016, analisaram o comportamento do desgaste no aço AISI 4140 após têmpera e revenido. As amostras de aço foram temperadas e revenidas a 200 °C e 400 °C, posteriormente atritadas contra uma esfera de aço X200Cr13 com 5 mm de diâmetro. Os testes foram realizados com cargas de 5 N, 10 N e 15 N e os corpos de prova foram pesados antes e depois de cada ensaio para verificar a perda de massa. Os resultados mostram que a amostra temperada e revenida a 200 °C não alterou sua microestrutura martensítica, a dureza permaneceu alta e a perda de massa foi insignificante quando comparada à amostra temperada. Em contrapartida, as amostras temperadas e revenidas a 400 °C tiveram perda de massa semelhante às amostras não tratadas. De acordo com os autores isso ocorre porque há um retorno ao estado de equilíbrio das fases, e a microestrutura é, possivelmente, ferrita e bainita, estruturas dúcteis que aumentam o efeito das forças externas no desgaste.

Os efeitos do endurecimento por indução nas propriedades de desgaste do aço AISI 4140 foram estudados por Totik et al., 2003. Os testes foram realizados em corpos de prova cilíndricos normalizados e, alguns, posteriormente endurecidos. O processo de endurecimento consistiu em aquecer o material por indução e em seguida resfriar em água. Os ensaios foram

realizados em um tribômetro na configuração pino-sobre-disco e uma esfera de WC-%6Co com 5 mm de diâmetro foi usada como pino. No total foram 2000 ciclos de rotação com uma velocidade de 0,08 m/s, resultando em uma distância de 50 m. As superfícies foram examinadas através de um perfilômetro Mitutoyo e, sobrepondo os perfis, foi possível calcular o volume desgastado (Figura 3.3).

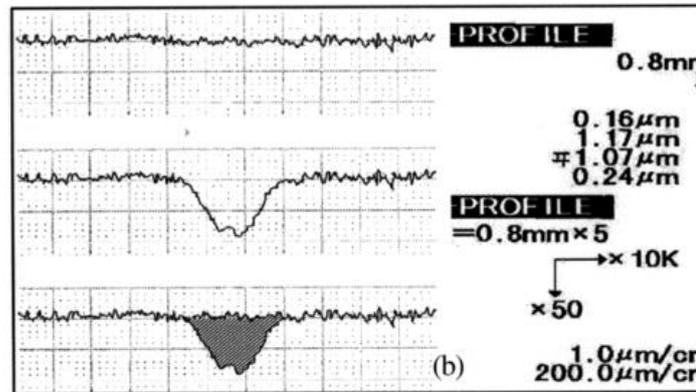


Figura 3.3 – Perfil da superfície, trilha de desgaste e sua superposição usada para calcular o volume desgastado [Adaptado de Totik et al., 2003].

Segundo os autores, a resistência ao desgaste está muito relacionada à microestrutura do material. As amostras endurecidas por indução durante 27 s a uma temperatura de 875 °C continham ferrita, perlita e carbonetos metálicos, além disso, a indução causou um aumento na quantidade de martensita. Na amostra normalizada, o maior coeficiente de atrito foi registrado devido à grande quantidade de detritos – formados pela fragmentação da superfície submetida à alta pressão de contato – gerados pelo desgaste. O estudo ainda revela que o aumento no tempo de indução causou uma diminuição do coeficiente de atrito – provavelmente resultado do aumento da dureza e das tensões residuais de compressão –, do desgaste, da quantidade de resíduos e da largura da trilha. Nas amostras normalizadas foi observado um desgaste adesivo severo (Figura 3.4a e Figura 3.4b), apresentando uma quantidade de detritos removidos, em direção às bordas da trilha, maior do que nas amostras endurecidas por indução. Já nas amostras endurecidas a superfície desgastada foi mais lisa, com pouco “plowing” e detritos muito pequenos (Figura 3.4c e Figura 3.4d).

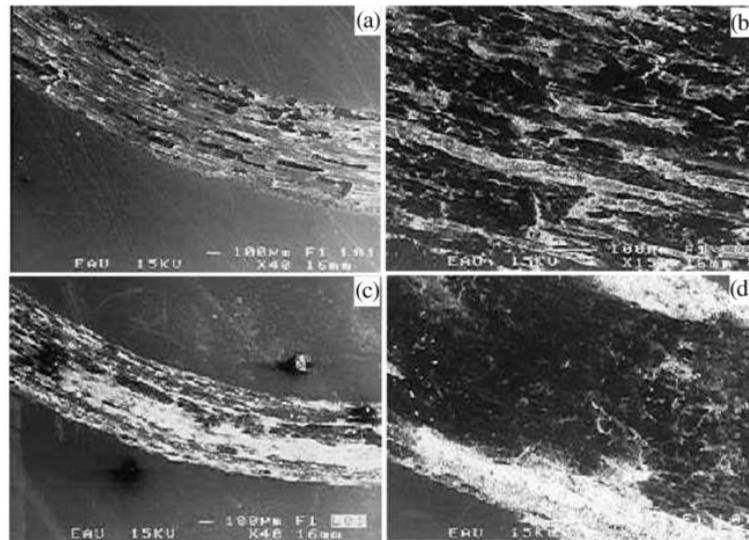


Figura 3.4 – Imagens em MEV do desgaste do aço AISI 4140 (a) e (b) normalizados; (c) e (d) endurecidos por indução durante 27 s [Adaptado de Totik et al., 2003].

### 3.2 Mecanismos de desgaste

De acordo com Kato, 1996, os mecanismos de desgaste podem ser classificados, de modo geral, em mecânico, químico e térmico. É uma classificação macroscópica e abrangente na qual a maior parte dos modelos de desgaste estão incluídos. No desgaste mecânico ocorre, principalmente, deformação e fratura, processos importantes em materiais dúcteis e frágeis, respectivamente. O desgaste químico apresenta a formação de um filme de reação química e o desgaste térmico se caracteriza não somente pela fusão local de material devido ao aquecimento causado pelo atrito, mas também por fraturas em materiais frágeis após choques térmicos. A Figura 3.5 resume as diferentes definições de desgaste e como se relacionam.

Segundo Zum Gahr, 1987b, o desgaste depende do sistema tribológico e pode ser causado pela combinação dos quatro principais mecanismos de desgaste que são, segundo o autor, abrasão, adesão, fadiga superficial e reação triboquímica.

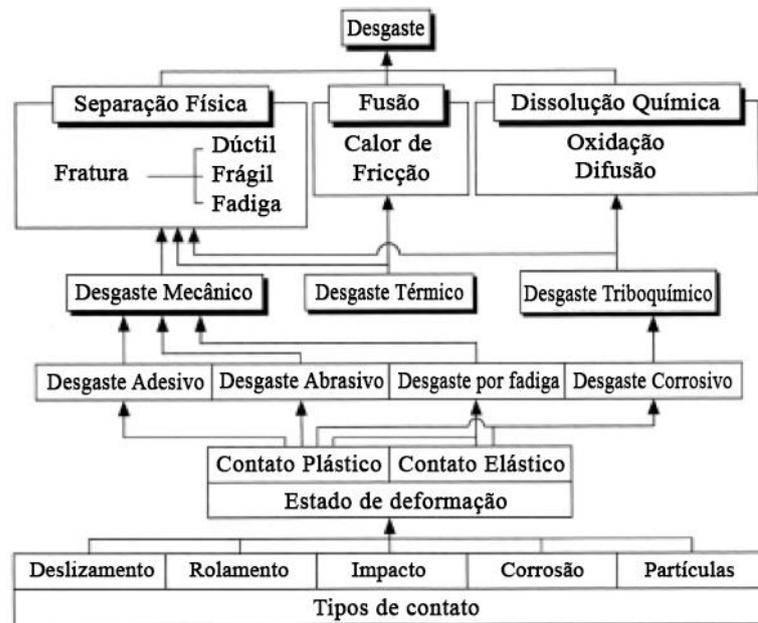


Figura 3.5 – Definições de desgaste e suas relações [Adaptado de Kato e Adachi, 2001].

Para Kato e Adachi, 2001, os modos de desgaste mais reconhecidos são: adesão, abrasão, fadiga e corrosão, conforme ilustra a Figura 3.6.

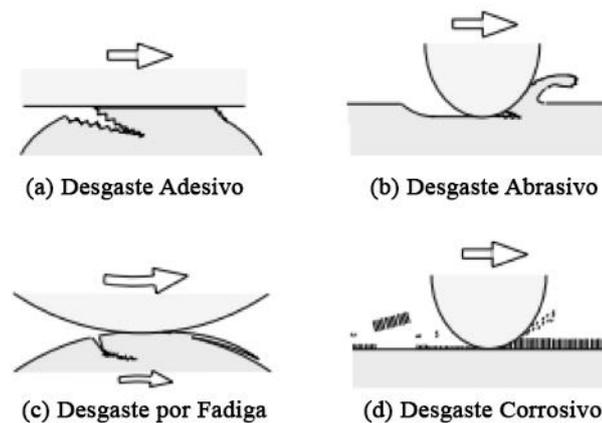


Figura 3.6 – Modos de desgaste [Adaptado de Kato e Adachi, 2001].

Alguns autores ainda classificam o desgaste em moderado e severo. Tanto para superfícies limpas quanto para superfícies lubrificadas, abaixo de determinadas cargas o desgaste é moderado e, conforme esta carga aumenta, ocorre a transição para o desgaste severo, podendo chegar a um valor até dez mil vezes maior [Brown, 2006].

### 3.2.1 Desgaste adesivo

A adesão se caracteriza por altas taxas de desgaste e um coeficiente de atrito elevado e instável. Ela é reduzida com o aumento da rugosidade superficial ou da dureza dos corpos em contato [Batchelor, 2006b]. Ainda segundo autor, sob condições adequadas pode ocorrer forte adesão entre metais e cerâmicas, dependendo de suas afinidades químicas. De acordo com Zum Gahr, 1987a, a alta pressão resulta em deformação plástica e adesão local. O deslizamento relativo dessas superfícies provoca a ruptura dessas junções e, frequentemente, a transferência de material de uma superfície para outra. Conforme o material se deteriora, devido à velocidade ou à temperatura, a adesão pode resultar no arrastamento de material. Isso está relacionado com o grande aumento do coeficiente de atrito e do desgaste.

### 3.2.2 Desgaste abrasivo

O desgaste abrasivo ocorre quando um material é atritado contra partículas de dureza maior ou igual. Geralmente há outros mecanismos atuando, mesmo que indiretamente, junto ao desgaste abrasivo, como por exemplo o microcorte, a microfatura, a fadiga acelerada por deformações repetidas e o arrancamento de partículas [Batchelor, 2006a], conforme ilustra a Figura 3.7.

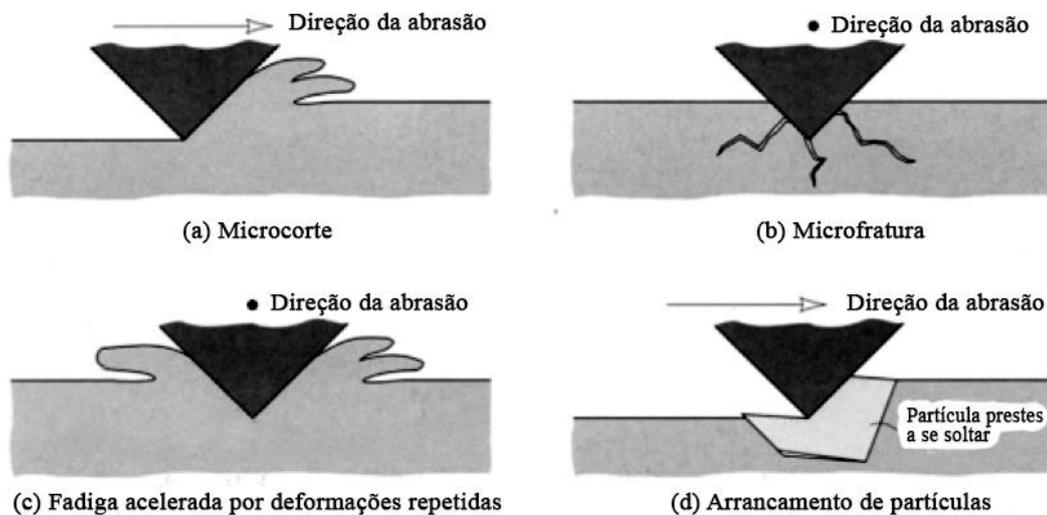


Figura 3.7 – Mecanismos do desgaste abrasivo: (a) microcorte, (b) fratura, (c) fadiga acelerada por deformações e (d) arrancamento de partículas [Adaptado de Batchelor, 2006a].

Quando um material mais duro ou um grão afiado corta a superfície mais macia, ocorre o microcorte (Figura 3.7a); se o material desgastado for frágil, poderá ocorrer a fratura dessa superfície (Figura 3.7b) – por isso a taxa de desgaste de materiais frágeis depende da tenacidade [Kato e Adachi, 2001]. No caso do material desgastado ser dúctil, a superfície é constantemente deformada (Figura 3.7c). Outro mecanismo do desgaste abrasivo é o arrancamento de partículas, no qual ocorre o descolamento de grãos que ficam perdidos como resíduos de desgaste (Figura 3.7d), acontece principalmente em materiais cerâmicos.

O desgaste abrasivo ainda pode ser classificado como sendo de dois corpos e de três corpos. O primeiro caso pode ser exemplificado pela ação de uma lixa em uma superfície e, geralmente, o desgaste se apresenta na forma de diversas ranhuras. Já no segundo caso os grãos abrasivos estão soltos entre as duas superfícies, podendo rolar e deslizar entre elas. Na maioria das vezes o desgaste se apresenta de forma irregular devido à remoção gradual de material pelo contato sucessivo dos grãos. Além disso, a perda de material é menor do que na abrasão de dois corpos, provavelmente em razão da variação do ângulo de ataque das partículas [Batchelor, 2006a, Zum Gahr, 1987a].

### **3.2.3 Desgaste por fadiga**

O desgaste por fadiga ocorre devido à repetição de cargas alternadas em superfícies sólidas, levando à formação de trincas e lascas [Kato e Adachi, 2001, Zum Gahr, 1987a]. Esse desgaste é causado por deformações que ocorrem quando superfícies irregulares entram em contato diversas vezes e, junto com a tensão local, levam à formação de partículas de desgaste provenientes da propagação de trincas por fadiga [Batchelor, 2006d]. A Figura 3.8 esquematiza o mecanismo de desgaste iniciado por trincas superficiais.

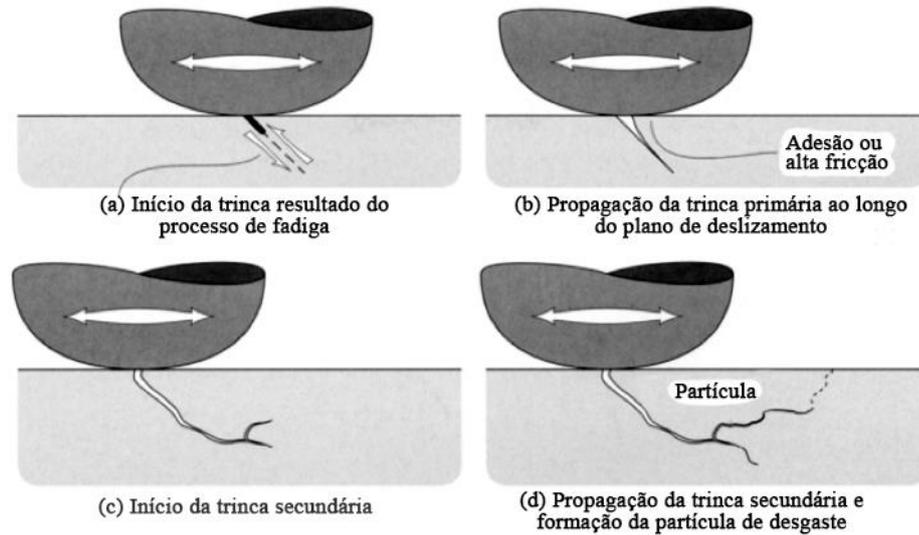


Figura 3.8 – Mecanismo de desgaste iniciado por trinca superficial [Adaptado de Batchelor, 2006d].

Uma trinca primária se origina na superfície em algum ponto fraco (Figura 3.8a) e em seguida se propaga para baixo (Figura 3.8b), uma trinca secundária pode se desenvolver a partir da trinca primária, ou esta pode se encontrar com uma trinca subsuperficial existente (Figura 3.8c). Quando a trinca atinge a superfície novamente uma partícula de desgaste é liberada (Figura 3.8d).

### 3.2.4 Desgaste por corrosão

O desgaste corrosivo e oxidativo ocorrem devido a uma reação química entre o material desgastado e um meio corrosivo, que pode ser um lubrificante reativo ou até mesmo o ar. O desgaste oxidativo está mais relacionado ao oxigênio da atmosfera, enquanto que o desgaste corrosivo abrange qualquer desgaste que dependa de um processo químico ou corrosivo. Nos dois processos a taxa de desgaste é alta e, geralmente, o coeficiente de atrito é baixo [Batchelor, 2006c]. Ainda segundo o autor, as reações químicas na superfície podem prevenir o desgaste adesivo. Enquanto o metal é submetido ao contato deslizante, a corrosão é capaz de levar à formação de um filme em sua superfície. Esse filme pode ser um lubrificante resistente que inibe tanto a corrosão como o desgaste, ou ser um filme menos resistente e que é rompido constantemente, levando a uma maior taxa de desgaste.

De acordo com Zum Gahr, 1987a, na formação de filmes frágeis o atrito pode provocar um aumento da quantidade de detritos de desgaste de ação abrasiva. Além disso, aumento da

atividade química pode levar à transição do desgaste adesivo para o químico, ou até mesmo para o abrasivo. A quantidade de reação química para a minimização do desgaste depende de alguns fatores, como por exemplo, a pressão de contato, a temperatura e a qualidade da superfície.

### **3.2.5 Desgaste moderado e desgaste severo**

De acordo com Brown, 2006, o desgaste severo ocorre principalmente em superfícies não lubrificadas. A adesão e o rompimento de junções intermetálicas podem levar ao arrancamento de material de uma ou de ambas superfícies e que, posteriormente, aparecem como fragmentos de desgaste. No desgaste moderado a taxa de desgaste é muito pequena; em baixas velocidades, cargas e temperaturas, o desgaste moderado começa quando há tempo suficiente para se estabelecer uma película protetora na superfície devido à oxidação; além disso, o desgaste moderado também pode ocorrer em elevadas cargas, velocidades e temperaturas em razão do aumento na taxa de oxidação [Lancaster, 1963].

Para Wang et al., 1999, a linha que divide o desgaste moderado e o severo corresponde à situação em que a morfologia das superfícies desgastadas se torna claramente mais rugosas, além disso, o número e tamanho das partículas de desgaste aumentam rapidamente com a carga normal ou velocidade de deslizamento.

### **3.2.6 Mecanismos de desgaste e trabalhos relacionados**

Viáfara e Sinatora, 2009, estudaram a influência da dureza no regime de transição de desgaste moderado para severo. Os testes realizados foram do tipo pino-sobre-disco e sem lubrificação. A carga utilizada foi de 10 N, a velocidade de deslizamento 0,01 m/s com duração de 3600 segundos. Os materiais usados nos pinos e discos foram, respectivamente, aço AISI 4140 e H13, ambos com microestrutura martensítica obtida por têmpera e revenimento. A dureza dos pinos se manteve em torno de 433 HV, enquanto que a dureza dos discos variou conforme a temperatura do revenimento, sendo de aproximadamente 460 HV – discos de baixa dureza – e 525 HV – discos de alta dureza. Observou-se a transição do regime moderado para severo quando a dureza do disco foi diminuída em cerca de 15%. O desgaste severo foi caracterizado pela deformação plástica e pelas juntas adesivas, formando uma superfície rugosa e clara, enquanto que o regime moderado a superfície apresentou-se mais lisa e escura. Segundo o autor, nos discos mais duros o contato descontínuo entre os corpos não permitiu a deformação

plástica do pino e possibilitou a proteção do filme óxido formado na superfície, resultando em um regime moderado. Já nos discos mais macios os pinos se mantiveram em contato com a superfície, removendo constantemente o óxido e provocando o regime severo. Nesse caso, o pino sofreu endurecimento por deformação, levando a uma maior perda de massa do disco.

Os mecanismos de desgaste e suas transições foram estudadas por Wang et al., 1999 nos aços 1080 e 52100 sem lubrificação. Os materiais foram tratados termicamente para obter diferentes microestruturas e os testes de desgaste foram realizados em uma máquina pino-no-anel (pin-on-ring) com diferentes cargas e velocidades de deslizamento. O estudo revela que, independente da microestrutura, os aços 52100 e 1080 apresentaram uma transição de desgaste moderado para severo com o aumento da carga e da velocidade de deslizamento. O regime moderado foi caracterizado pela oxidação – apresentando uma superfície mais lisa –, enquanto que o severo pela adesão e delaminação – cujas trilhas desgastadas possuem alta rugosidade e sulcos profundos. De acordo com o autor, os mecanismos de transição não são muito influenciados pela variação da microestrutura, sendo as condições dos testes mais relevantes.

Fernandes et al., 2013 avaliaram a influência do desgaste moderado e severo na formação e estabilidade de filmes de fricção em sistemas de embreagem. Os testes foram realizados em um tribômetro na configuração pino-sobre-disco, sendo o disco de ferro fundido cinzento e o pino um compósito semi-metálico. O desgaste do disco foi medido através da perda de massa, enquanto que o desgaste do pino foi medido pela variação da espessura. Os ensaios tiveram duração de três horas, velocidades de deslizamento de 2,05 m/s e 3,57 m/s com cargas normais de 200 N até 450 N. A superfície atritada e o filme de fricção foram analisados utilizando microscópio eletrônico de varredura e microscopia ótica. Os ensaios foram realizados a seco, possibilitando o surgimento de partículas de desgaste que permaneceram entre as interfaces, sendo compactadas constantemente. Esses resíduos ficaram aderidos no disco e no material de fricção formando, assim, o filme heterogêneo interfacial. Os autores sugerem que a formação desse filme mantém as taxas de desgaste menores e constantes, podendo atuar como um lubrificante sólido que protege a superfície dos componentes. No regime de desgaste moderado – todas as cargas a 2,05 m/s e 200 N e 320 N a 3,57 m/s –, o filme, além de ser homogêneo, cobria grande parte da trilha desgastada. Já no regime de desgaste severo – 380 N, 410 N e 450 N a 3,57 m/s –, o filme de fricção era mais fino e heterogêneo e a quantidade de material aderido na superfície do disco era menor. Segundo os autores, aumentando a carga e a velocidade de deslizamento, o filme de fricção tende a ser mais fino. O estudo também conclui que a formação e a estabilidade do filme é influenciada pelas condições dos testes.

Elhadi et al., 2016 estudaram o desgaste no deslizamento a seco do aço carbono AISI 1055 contra aço temperado de baixa liga AISI 4140. Os ensaios foram feitos na configuração pino-sobre-disco, sendo os discos de aço AISI 1055 e os pinos de AISI 4140. Ambos foram temperados e revenidos, desta maneira, os pinos atingiram uma dureza de 33 HRC (baixa dureza) e 39 HRC (alta dureza), enquanto que os discos chegaram a 52 HRC. Os ensaios tiveram duração de 900 s, velocidade de deslizamento de 0,5 m/s e carga aplicada entre 15 N e 35 N. Os pinos foram pesados no início e no fim de cada ensaio para determinar a perda de massa. Observou-se um desgaste mais rápido em cargas elevadas nos pinos de alta dureza, segundo os autores, isso diverge da teoria clássica do desgaste que pressupõe que o material mais duro terá uma maior resistência. Além disso, para a carga mais alta – 35 N – o pino de alta dureza apresentou alto nível de oxidação (Figura 3.9b). A Figura 3.9 mostra os pinos de baixa e alta dureza e suas respectivas trilhas nos ensaios a 35 N.

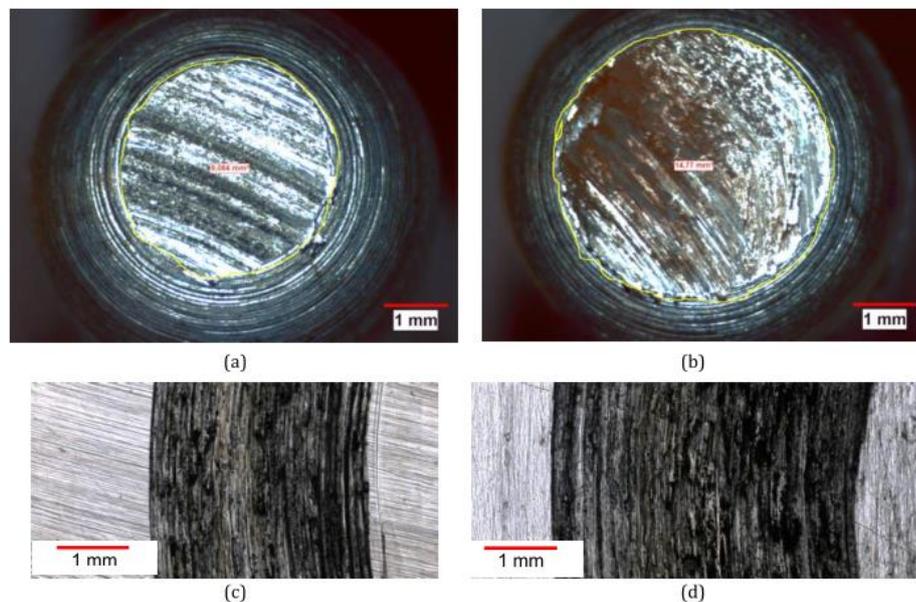


Figura 3.9 – Imagens das superfícies desgastadas para carga de 35 N: (a) pino de baixa dureza, (b) pino de alta dureza, (c) disco desgastado com pino de baixa dureza e (d) disco desgastado com pino de alta dureza [Adaptado de Elhadi et al., 2016].

De acordo com os resultados, para as mesmas cargas aplicadas (35 N) a trilha desgastada pelo pino de maior dureza foi significativamente maior e mais profunda do que aquela feita pelo pino de baixa dureza, como pode ser observado na Figura 3.10.

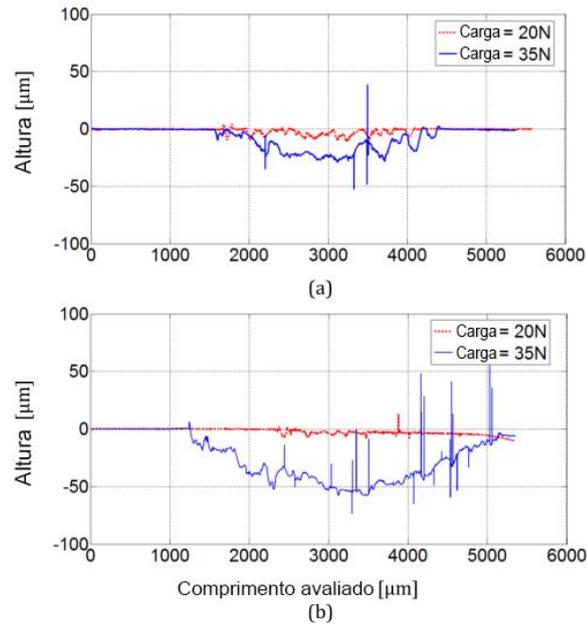


Figura 3.10 – Perfil das trilhas desgastadas para os pinos (a) de baixa dureza e (b) alta dureza [Adaptado de Elhadi et al., 2016].

No ensaio do pino de baixa dureza a 20 N, a trilha desgastada apresentou uma superfície áspera e com partículas aderidas, a presença do cromo e molibdênio indica que esses resíduos eram provenientes do pino. Os autores sugerem que esses fragmentos são resultado do micro-lascamento e fragmentação do material do pino. Para o pino de alta dureza, a superfície do disco apresentou micro-lascas e partículas finas, a análise em EDS constatou que os resíduos eram, principalmente, material oxidado do disco, uma vez que poucos elementos de cromo foram detectados.

Os autores ainda chegaram em uma relação entre a carga aplicada, dureza dos pinos e quantidade de oxigênio presente na superfície. Para o pino de baixa dureza, o teor de oxigênio diminui ao aumentar a carga aplicada, e o inverso acontece para o pino de alta dureza. Constatou-se, também, que o pino de alta dureza produz menor quantidade de cromo na trilha desgastada e induz à perda de material do disco. Esses detritos que se soltam, por terem dureza maior do que o pino, geram desgaste abrasivo em sua superfície. De modo semelhante ocorre com os pinos mais macios, porém, como uma menor quantidade de resíduos se desprende do disco, menor taxa de abrasão ocorre no pino.

Lorenzo-martin e Ajayi, 2015 estudaram o desempenho tribológico do aço AISI 4140 endurecido superficialmente por fricção (friction stir processing - FSP). Os testes de desgaste foram feitos na configuração bola-no-plano (ball-on-flat), com esferas de aço AISI 52100

endurecido e com 12,7 mm de diâmetro. As amostras de AISI 4140 foram cortadas na forma retangular, lixadas e ensaiadas em três condições diferentes: recozidas, temperadas em água – austenitizadas em aproximadamente 840 °C – e FSP. Os ensaios com lubrificação foram feitos com 25 N, 50 N e 75 N, com velocidade de deslizamento de 1 cm/s e duração de 1 hora. Já os ensaios a seco foram realizados com 5 N, com mesma velocidade e duração de 30 minutos. As superfícies foram analisadas por MEV, microscopia e perfilometria ótica. As micrografias evidenciaram perlita e ferrita na amostra recozida, enquanto que as amostras temperadas e tratadas por FSP apresentaram basicamente martensita. Nos ensaios a seco, amostra tratada com FSP obteve o maior coeficiente de atrito e, embora o ensaio tenha sido barulhento, o coeficiente se manteve constante. As amostras tratadas termicamente e recozida tiveram coeficientes de atrito semelhantes e os menores valores de desgaste foram encontrados nas amostras temperadas e nas amostras tratadas por FSP. A Figura 3.11 mostra como as amostras recozida (Figura 3.11a) e tratada termicamente (Figura 3.11b) tiveram mecanismos de desgaste similares, evidenciando abrasão, fadiga e a formação de uma camada de fragmentos. A amostra tratada por FSP (Figura 3.11c) teve um desgaste muito menor, predominando a abrasão.

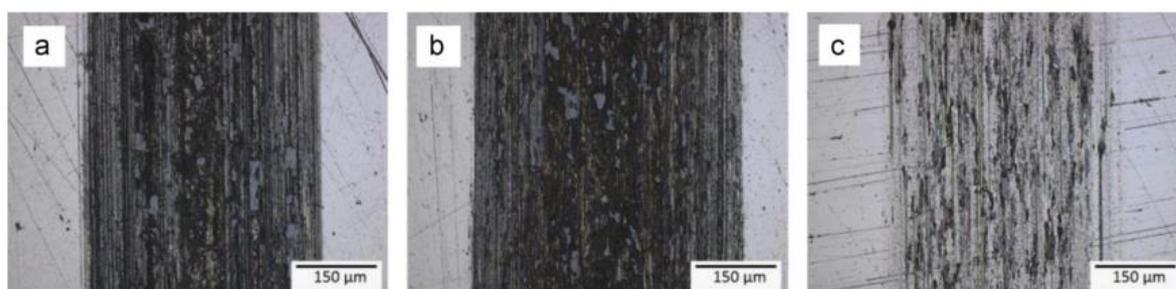


Figura 3.11 – Microscopia ótica das amostras ensaiadas a seco (a) recozida (b) tratada termicamente e (c) tratada por FSP [Adaptado de Lorenzo-martin e Ajayi, 2015].

Nos ensaios feitos com lubrificante, observou-se que a superfície desgastada da amostra recozida sofreu grande deformação plástica, conforme indica o acúmulo de material na borda da trilha (Figura 3.12).

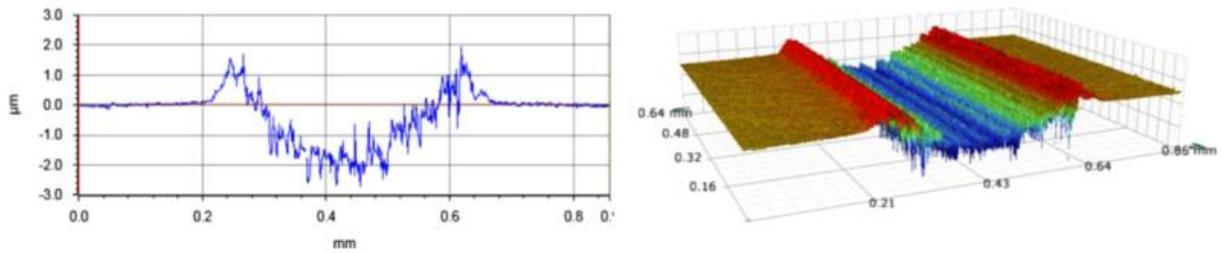


Figura 3.12 – Perfilometria ótica da amostra recozida desgastada com material acumulado nas bordas [Adaptado de Lorenzo-martin e Ajayi, 2015].

Os principais mecanismos de desgaste envolvidos nas amostras tratadas termicamente foram abrasão – indicada pelas diversas ranhuras na direção do deslizamento (Figura 3.13a) – e fadiga – evidenciada pela formação de fissuras e perda de material (Figura 3.13b).

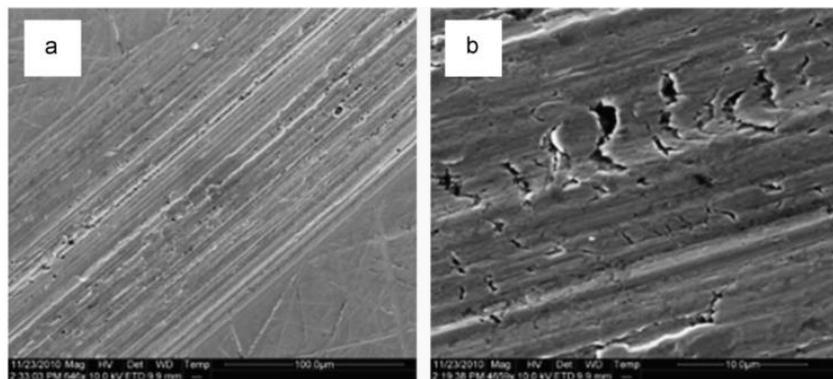


Figura 3.13 – Análise em MEV da trilha desgastada na amostra tratada termicamente, evidenciando (a) abrasão e (b) fadiga [Adaptado de Lorenzo-martin e Ajayi, 2015].

Nas amostras tratadas por FSP, praticamente não houve deformação plástica, uma vez que não há material acumulado nas extremidades da trilha (Figura 3.14), além disso, o mecanismo de desgaste predominante foi o abrasivo. De acordo com os autores, a melhor dureza da superfície FSP e o refinamento de grão pode reduzir o desgaste por fadiga quando em comparação com a superfície tratada termicamente.

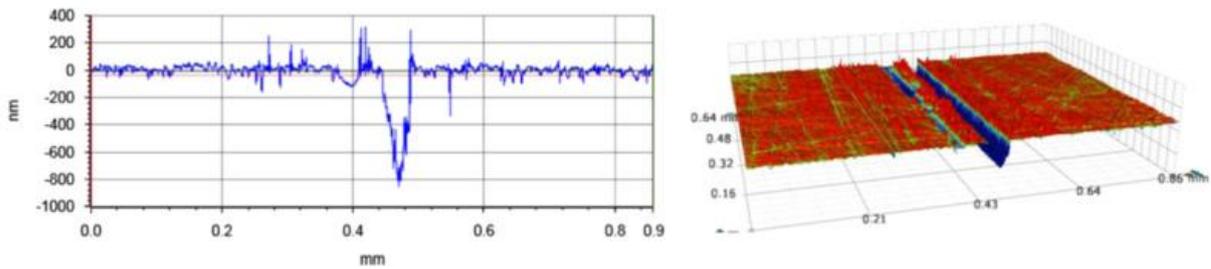


Figura 3.14 – Perfilometria ótica da trilha desgastada da amostra tratada por FSP [Adaptado de Lorenzo-martin e Ajayi, 2015].

O estudo ainda concluiu que, tanto nos ensaios realizados com a amostra FSP como nos ensaios realizados na amostra tratada termicamente, a esfera teve um menor desgaste quando a maior carga foi aplicada, 75 N. Os autores sugerem que isso se deve à formação de uma camada de óxido, como mostra a Figura 3.15.

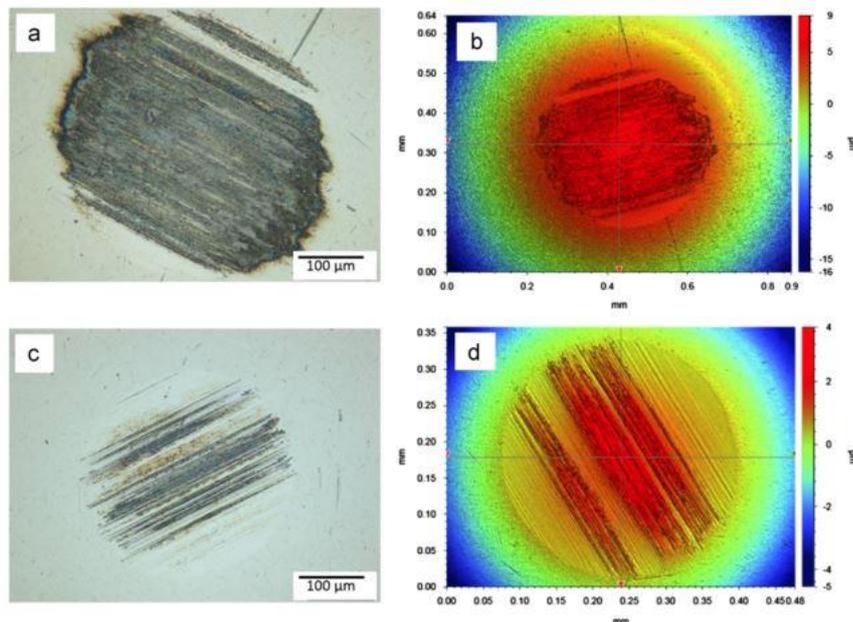


Figura 3.15 – Microscopia e perfilometria ótica da esfera atritada contra amostra FSP com lubrificante: (a) e (b) carga de 75 N e (c) e (d) carga de 50 N [Adaptado de Lorenzo-martin e Ajayi, 2015].

Tang et al., 2013 estudaram a influência da velocidade de deslizamento e da dureza no comportamento do atrito e do desgaste no aço ferramenta AISI D2. As amostras de aço foram temperadas em óleo e revenidas em diferentes temperaturas, alcançando durezas que variaram

entre 51 HRC e 65 HRC. Os ensaios de desgaste foram realizados a seco na modalidade bola-no-disco (ball-on-disc), sendo utilizado como pino uma esfera de  $N_3Si_4$  com 3 mm de diâmetro. A carga foi de 5 N, a distância percorrida foi de 100 m e as velocidades de deslizamento foram de 0,05 m/s, 0,1 m/s e 0,5 m/s. Em relação às microestruturas observou-se que, quanto menor a dureza, maior a quantidade de austenita retida. Para amostra com 62 HRC de dureza, observou-se que, quanto mais lenta é a velocidade de deslizamento, mais rápido é o aumento do coeficiente de atrito. Além disso, conforme a velocidade aumenta a amplitude do coeficiente também aumenta, ou seja, incrementos de velocidade geram maior variação no coeficiente de atrito.

O estudo mostra que, nos testes realizados com velocidade de 0,05 m/s, quanto maior a dureza da amostra, maior é a distância de deslizamento até o coeficiente de atrito atingir o estado estacionário. Os autores sugerem que isso se deve à maior quantidade de austenita retida nas amostras de menor dureza, o que facilitaria a produção de uma película metálica lubrificante. Já as amostras mais duras, por possuírem maior quantidade de martensita, têm menos chances de produzirem filme e são mais propensas à vibração. Com exceção da amostra com dureza de 58 HRC, as taxas de desgaste aumentam com a velocidade de deslizamento. Além disso, o desgaste diminui com o aumento da dureza, contudo isso não ocorre para amostra de 65 HRC nas velocidades de 0,1 m/s e 0,5 m/s. Os autores afirmam que a resistência ao desgaste pode cair em níveis elevados de dureza em consequência da fragilidade do material. O principal mecanismo de desgaste envolvido nas amostras de 55 HRC e 62 HRC foi o adesivo, enquanto que a amostra mais dura apresentou-se mais deteriorada e com pequenas rachaduras, caracterizando a fratura frágil. Isso mostra que o material se torna duro e quebradiço, levando a altas taxas de desgaste e a delaminação, indicada com uma elipse na Figura 3.16.



Figura 3.16 – Análise em MEV da superfície com dureza de 65 HRC ensaiada a 0,1 m/s, a elipse indica a delaminação [Adaptado de Tang et al., 2013].

## 4 METODOLOGIA

A Figura 4.1 apresenta um fluxograma metodológico com as etapas que serão detalhadas a seguir.

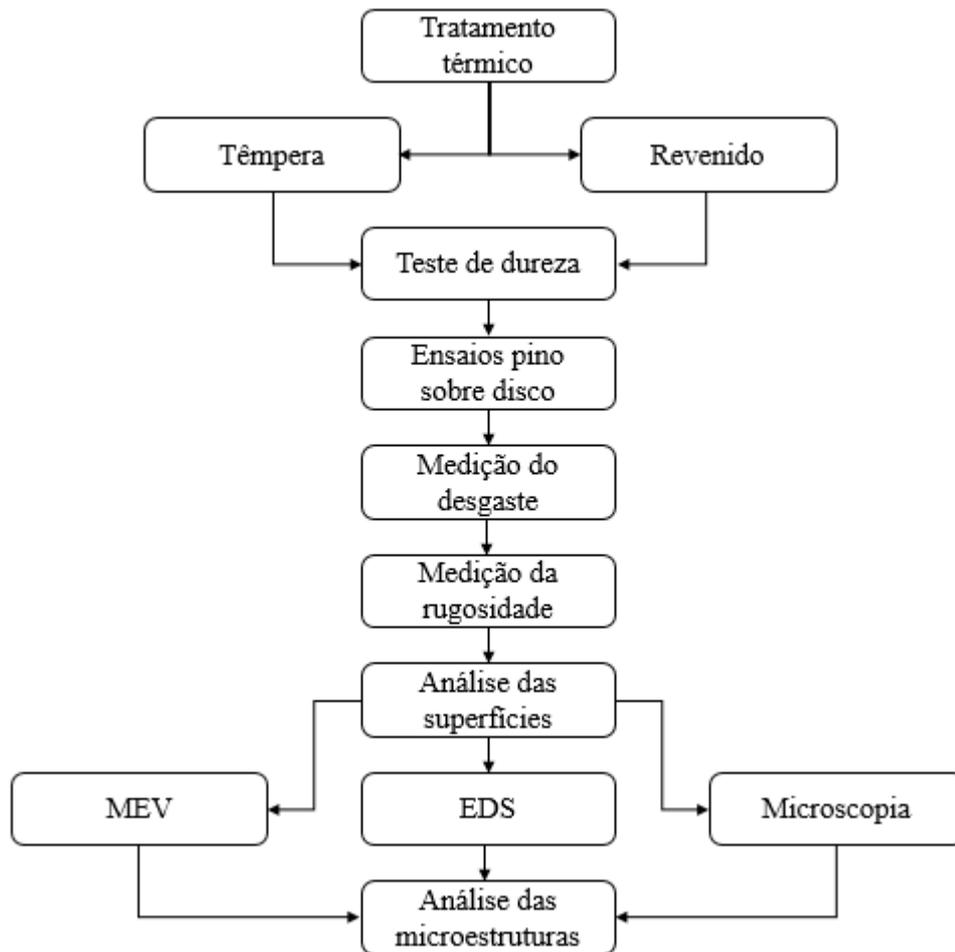


Figura 4.1 – Fluxograma metodológico.

### 4.1 Discos

Foram utilizados 10 discos de aço SAE 4140 com aproximadamente 15 mm de espessura e 55 mm de diâmetro, como mostra a Figura 4.2. Os discos foram inicialmente temperados, sendo austenitizados a 855 °C, mantidos nessa temperatura por aproximadamente 2 horas e 30 minutos e resfriados em óleo. Posteriormente, 8 deles foram revenidos em 4 temperaturas diferentes: 200 °C, 300 °C, 400 °C e 500 °C. O tratamento de revenimento foi realizado no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) em um forno elétrico da marca Sanchis

(Figura 4.3). As amostras foram mantidas nas respectivas temperaturas por 2 horas e resfriadas até a temperatura ambiente. Em seguida os corpos de prova foram lixados para teste de dureza Rockwell C, para isso utilizou-se um durômetro Emcotest, modelo DuraVision, sendo feito quatro medidas em cada um para que a dureza média fosse calculada.



Figura 4.2 – Dimensões dos discos.



Figura 4.3 – Forno elétrico Sanchis utilizado no revenimento dos discos.

Os discos foram retificados para corrigir qualquer deformação causada pela variação de temperatura no tratamento térmico. Antes dos ensaios no tribômetro, os discos foram lixados

na seguinte sequência de granulometria: 180, 240, 320, 500, 600 e 1200, possibilitando atingir uma rugosidade menor que  $0,1 \mu\text{m}$  em todas as faces, ideal para medição do desgaste através da interferometria – técnica que será explicada mais à frente. Os valores da rugosidade foram obtidos com auxílio de um rugosímetro digital portátil da marca Mitutoyo, modelo SJ-210. O processo de lixamento foi realizado em uma plataforma com água, cuidando para que toda face da peça permanecesse em contato com a lixa.

## 4.2 Pinos

Como pino se utilizou uma esfera de zircônia com 8 mm de diâmetro (Figura 4.4). Para cada condição de tratamento térmico, uma esfera foi utilizada, sendo rotacionada entre um ensaio e outro para que uma região ainda não desgastada fosse atritada. Após cada ensaio as esferas foram devidamente identificadas para que a marca de desgaste correspondente a cada ensaio pudesse ser determinada.



Figura 4.4 – Esfera de zircônia utilizada nos ensaios.

## 4.3 Ensaio pino sobre disco

Para realização dos ensaios de desgaste se utilizou o tribômetro do Laboratório de Tribologia da UFRGS (LATRIB), representado nas Figura 4.5 e Figura 4.6.

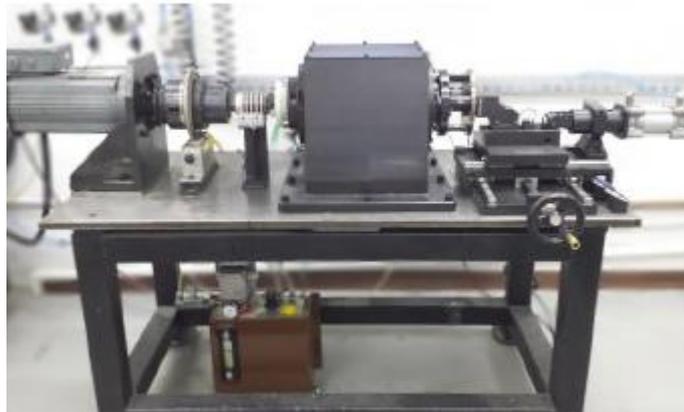


Figura 4.5 – Tribômetro [Adaptado de Pavlak et al., 2018].

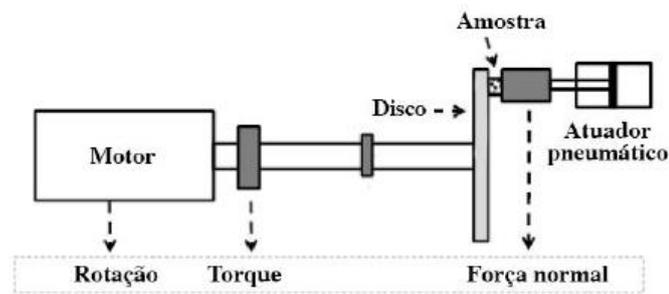


Figura 4.6 – Representação esquemática do tribômetro [Adaptado de Neis et al., 2014].

Uma força normal é aplicada – com auxílio de um atuador pneumático – e medida através de uma célula de carga. No eixo que liga o motor ao disco, um transdutor é utilizado para medir o torque frenante resultante do contato do pino contra o disco. A Equação 4.1 é usada para calcular o coeficiente de atrito.

$$\mu = \frac{T}{F \times R} \quad (4.1)$$

Onde:

- $\mu$  – Coeficiente de atrito
- $T$  – Torque [N.m]
- $F$  – Força normal [N]
- $R$  – Raio de aplicação da força [m]

Alguns testes – todos de acordo com a norma ASTM G99-04 – foram realizados previamente para ajustar a força e o tempo de cada experimento, garantindo parâmetros que resultassem em uma trilha de desgaste mensurável. A Tabela 4.1 apresenta os parâmetros utilizados. Todos discos foram atritados em um mesmo raio, no total quinze ensaios foram realizados, sendo três em cada condição (Tabela 4.2). De cada condição de tratamento térmico, dois discos foram utilizados, sendo um deles ensaiado em ambas as faces e o outro ensaiado em apenas uma delas (terceira trilha).

Tabela 4.1 – Parâmetros de ensaio.

<b>Velocidade [m/s]</b>	0,25
<b>Distância [m]</b>	1800
<b>Força [N]</b>	200
<b>Raio [mm]</b>	18
<b>W [rpm]</b>	132,62
<b>Tempo de ensaio [s]</b>	7200
<b>Pino</b>	Esfera zircônia 8 mm

Tabela 4.2 – Tratamentos térmicos e nomenclaturas.

<b>Trilha</b>	<b>Tratamento Térmico</b>
DT-1	Temperado
DT-2	
DT-3	
DTR200-1	Temperado e Revenido a 200°C
DTR200-2	
DTR200-3	
DTR300-1	Temperado e Revenido a 300°C
DTR300-2	
DTR300-3	
DTR400-1	Temperado e Revenido a 400°C
DTR400-2	
DTR400-3	
DTR500-1	Temperado e Revenido a 500°C
DTR500-2	
DTR500-3	

## 4.4 Medição do desgaste

### 4.4.1 Discos

Para avaliar o volume desgastado de cada trilha se utilizou um interferômetro do Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF), marca Bruker e modelo ContourGT-K. O equipamento permite não só medições em 2D/3D como também análise de imagens em alta resolução. Através dele e com auxílio do software Vision64 – programa de metrologia também da marca Bruker – foi possível obter a topografia tridimensional da trilha desgastada, que nada mais é do que uma nuvem de pontos como mostra a Figura 4.7.

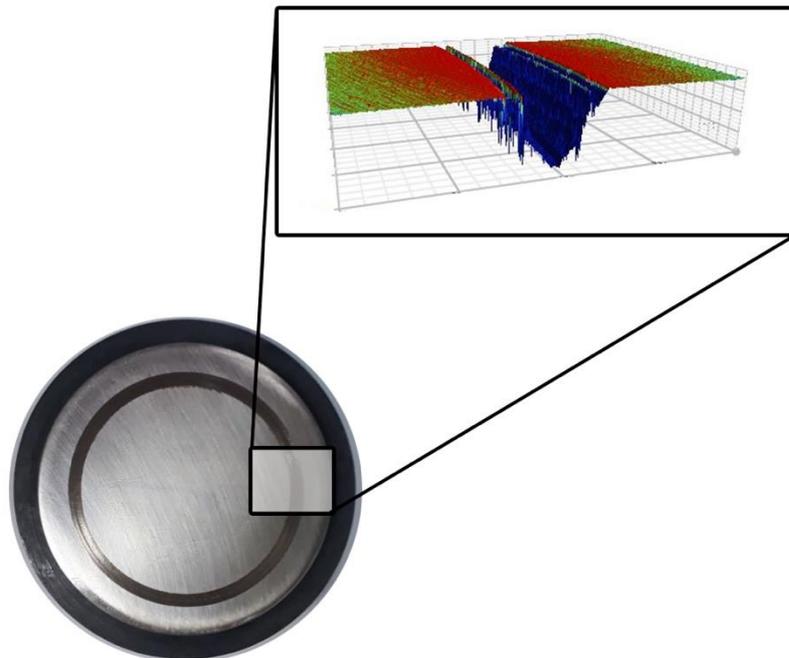


Figura 4.7 – Topografia tridimensional da trilha desgastada.

Para cada trilha, três regiões distintas – afastadas  $120^\circ$  aproximadamente – foram analisadas por meio da interferometria (Figura 4.8a). Em cada região foram traçados quatro planos radiais perpendiculares ao disco (Figura 4.8b), permitindo obter o perfil da trilha desgastada (Figura 4.8c). Desta forma, cada trilha foi avaliada por doze perfis diferentes. Esses perfis foram utilizados para cálculo do volume desgastado com auxílio do software MATLAB e através da Equação 4.2. A distância na coordenada x entre os pontos permanece constante, e

é considerada a base do retângulo, a altura é a própria coordenada z de cada um dos pontos e representa a profundidade da trilha naquele local. Com essas medidas, as áreas dos respectivos retângulos é calculada, podendo ser extrapolada para toda circunferência. Desse modo se obtém o volume desgastado do respectivo plano de corte, a Figura 4.8 esquematiza esse procedimento. Como foram traçados, ao todo, doze planos de intersecção, o volume final de cada trilha foi calculado fazendo-se a média aritmética dos volumes resultantes de cada plano (Equação 4.3).

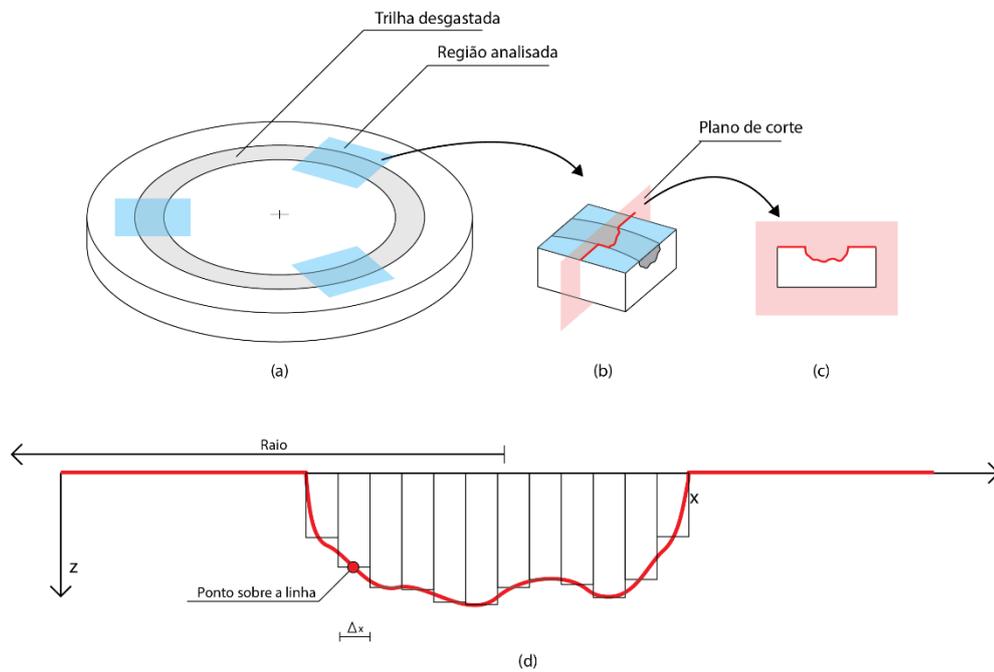


Figura 4.8 – Esquema do passo a passo utilizado para calcular o volume desgastado nos discos (a) seleção das três regiões a serem analisadas, (b) seleção dos planos de corte, (c) perfil da trilha desgastada e (d) cálculo da área dos retângulos.

$$Vp_j = 2 \cdot \pi \cdot r \sum_{i=1}^n \Delta x_i \cdot h_i \quad (4.2)$$

$$V_f = \frac{\sum_{j=1}^{12} Vp_j}{12} \quad (4.3)$$

Onde:

- $Vp_j$  – Volume calculado pelo plano j [mm<sup>3</sup>]
- $n$  – Número de retângulos

- $\Delta x_i$  – Medida da base do i-ésimo retângulo [mm]
- $h_i$  – Medida da altura do i-ésimo retângulo [mm]
- $V_f$  – Volume final de cada trilha [mm<sup>3</sup>]
- $r$  – Raio de aplicação da força [mm]

#### 4.4.2 Esferas

Para avaliar o volume desgastado em cada esfera também se utilizou o interferômetro Bruker, modelo ContourGT-K. Antes de cada análise, com ajuda do recurso Tilt Only do software Vision64, possíveis inclinações foram removidas através de um plano de ajuste, ou seja, as esferas foram posicionadas de maneira que a marca de desgaste permanecesse paralela ao plano de leitura. A interferometria permite obter a topografia do desgaste e, como todas marcas de desgaste foram bem circulares, se utilizou o software para medir o diâmetro de cada circunferência. A partir de dez pontos selecionados ao redor do desgaste, em amarelo na Figura 4.9a, um círculo é formado (Figura 4.9b), do qual pode se obter o diâmetro.

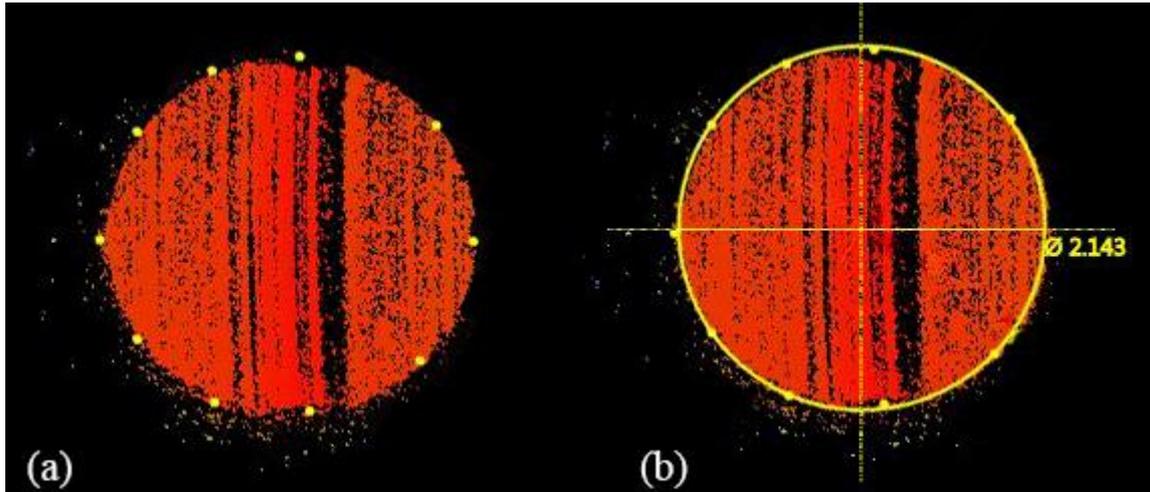


Figura 4.9 – Procedimento para obter o raio da marca de desgaste: (a) seleção dos dez pontos ao redor da marca e (b) formação do círculo do qual se obtém o diâmetro.

A norma ASTM G99-04 fornece a Equação 4.4 para calcular o volume perdido por desgaste no pino.

$$V_{Pino} = \frac{\pi \cdot W_{Pino}^4}{64 \cdot R} \quad (4.4)$$

Onde:

- $V_{Pino}$  – Volume de material perdido na esfera [mm<sup>3</sup>]
- $W_{Pino}$  – Diâmetro da marca de desgaste [mm]
- $R$  – Raio da esfera [mm]

A Figura 4.10 representa esquematicamente o procedimento para cálculo do volume desgastado nas esferas.

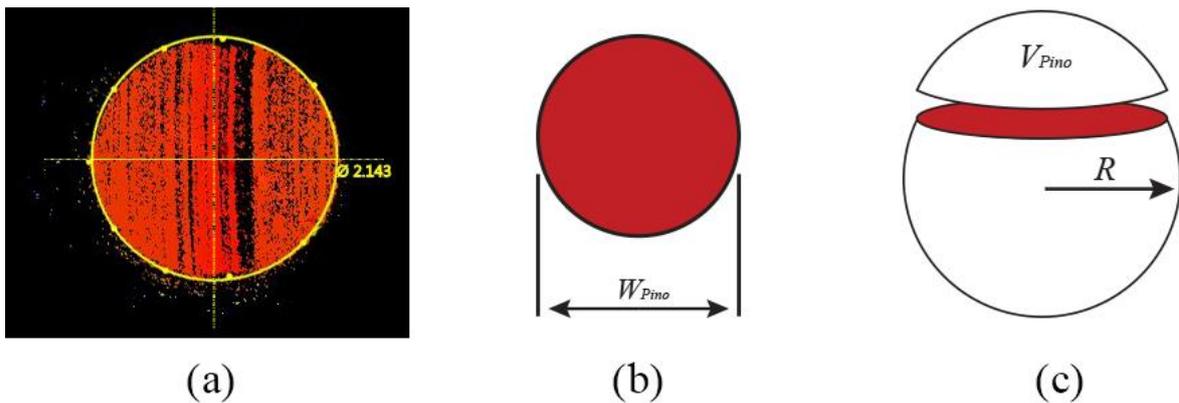


Figura 4.10 – Esquema do procedimento utilizado para cálculo do volume desgastado nas esferas.

Através do software Vision64, também foi possível gerar um perfil bidimensional do desgaste das esferas. Esses perfis foram invertidos para compará-los às respectivas trilhas geradas, desta maneira, diferentemente dos perfis dos discos, devem ser analisados de baixo para cima. A Figura 4.11 esquematiza o procedimento.

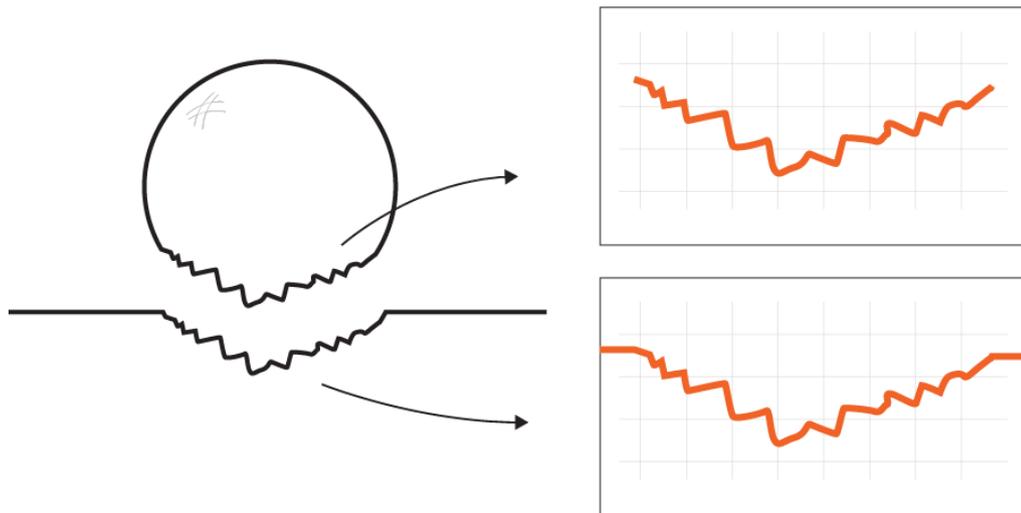


Figura 4.11 – Análise do perfil da esfera.

#### 4.5 Medição da rugosidade

A rugosidade  $R_a$  das trilhas foi avaliada a partir das interferometrias e utilizando-se o software Vision64. Através de um recurso do programa é possível isolar a trilha, avaliando a rugosidade somente nessa região – sem levar em conta a superfície do disco –, como mostra a Figura 4.12. Para cada trilha, a rugosidade foi avaliada nas três regiões distintas obtidas pelo interferômetro. Posteriormente, calculou-se a média aritmética para cada uma das trilhas.

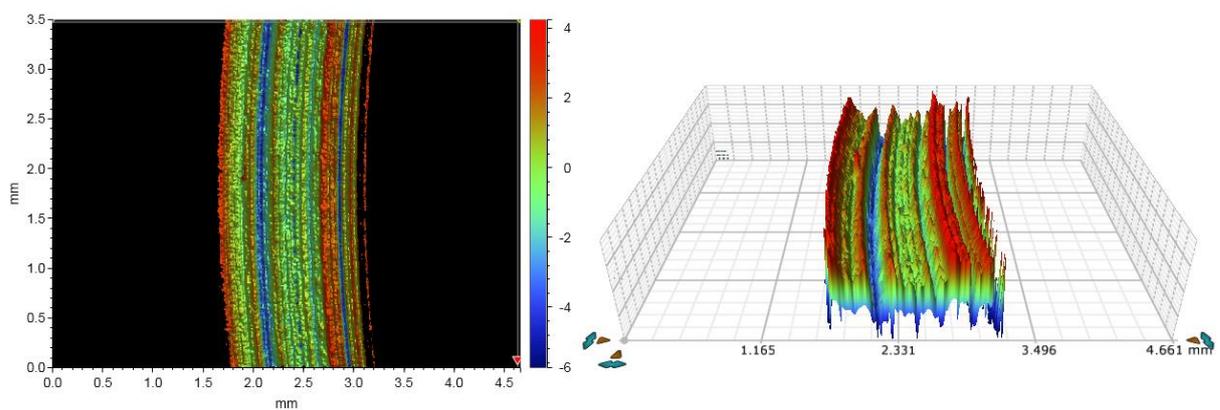


Figura 4.12 – Seleção da trilha para análise de rugosidade.

#### 4.6 Análise das superfícies

As superfícies dos discos foram analisadas após a realização de cada ensaio. Parte da trilha foi fotografada utilizando um microscópio Zeiss, modelo Axio Lab.A1. Para que a trilha pudesse ser melhor visualizada, várias fotos foram tiradas com aumento de 5x e, com auxílio do software Adobe Photoshop, as imagens foram dispostas lado a lado formando uma única figura. A Figura 4.13 mostra parte da trilha DTR500-3 (disco temperado e revenido a 500 °C).

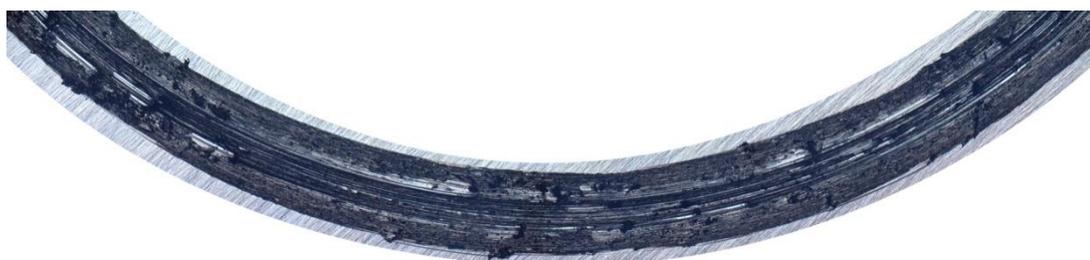


Figura 4.13 – Imagem de microscópio da trilha DTR500-3 desgastada, aumento de 5x.

Para uma análise mais detalhada da superfície, um disco de cada condição foi examinado através de MEV, permitindo obter imagens em alta resolução com aumentos de 200x e 2000x. Além disso, o EDS possibilitou verificar os elementos químicos presentes na trilha de desgaste, diferenciando detritos provenientes do próprio disco daqueles pertencentes à esfera. Para isso utilizou-se um microscópio da marca Hitachi, modelo TM 3000 (Figura 4.14), do Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM). A Figura 4.15 apresenta uma das imagens obtidas da trilha DTR500-3 com aumento de 200x.



Figura 4.14 – Equipamento utilizado para MEV/EDS marca Hitachi, modelo TM 3000.

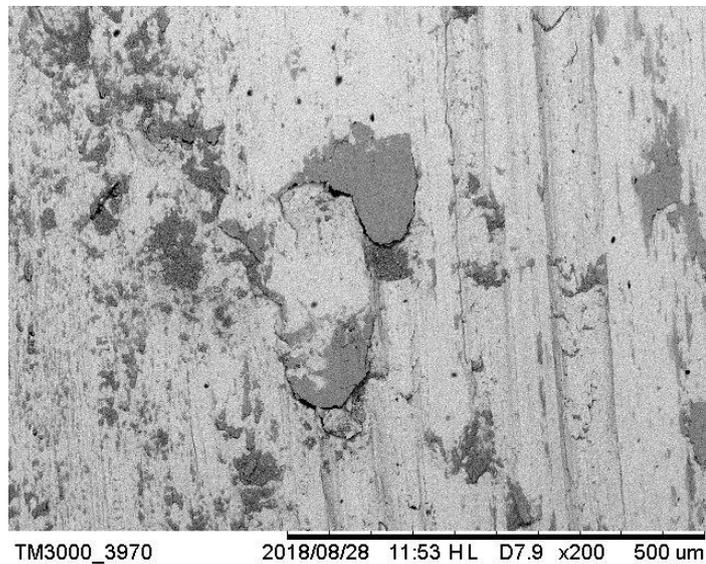


Figura 4.15 – Análise em MEV da trilha DTR500-3 desgastada, aumento de 200x.

As esferas também foram analisadas após cada ensaio. Para isso, a marca das esferas foi fotografada também com auxílio do microscópio Zeiss, modelo Axio Lab.A1. Foram necessárias quatro fotos, com aumento de 5x, para cobrir todo desgaste. Mais uma vez, utilizou-se o software Adobe Photoshop para agrupar as imagens. A Figura 4.16 mostra a marca de desgaste da esfera atritada contra a trilha DTR500-3.

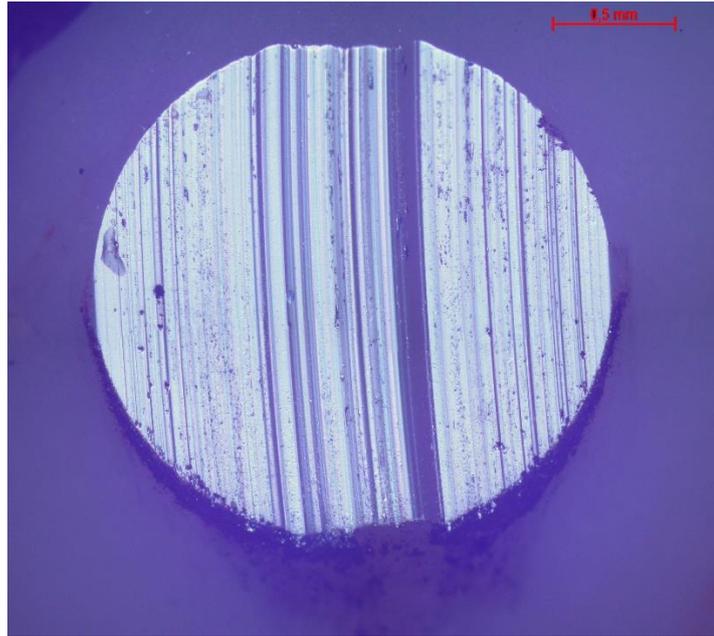


Figura 4.16 – Imagem de microscópio da marca de desgaste da esfera atritada contra a trilha DTR500-3, aumento de 5x.

Do mesmo modo, a marca de desgaste das esferas foi analisada através de MEV e EDS, utilizando-se o microscópio da marca Hitachi modelo TM3000 – mesmo usado para examinar os discos. As marcas observadas foram aquelas correspondentes às trilhas analisadas anteriormente pelo equipamento, ou seja, um par tribológico (pino/disco) foi verificado para cada condição de tratamento térmico. A Figura 4.17 mostra uma das imagens obtidas da esfera atritada contra a trilha DTR500-3 com aumento de 200x.

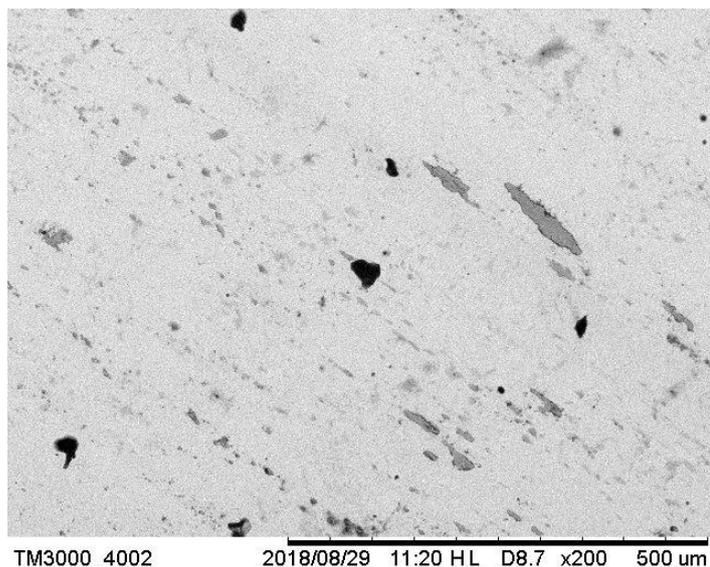


Figura 4.17 – Análise em MEV da esfera atritada contra a trilha DTR500-3, aumento de 200x.

#### 4.7 Análise das microestruturas dos discos

Após os ensaios e a observação das superfícies, os discos foram submetidos à análise metalográfica. Uma amostra de cada tratamento térmico foi avaliada – as mesmas examinadas através do MEV/EDS. Com objetivo de observar a seção transversal dos discos, as amostras foram cortadas utilizando uma máquina de corte da marca Struers, modelo Discotom-100 (Figura 4.18), localizada no LAMEF. O equipamento possui um sistema de refrigeração evitando, desta maneira, qualquer alteração microestrutural causada por um superaquecimento. As seções foram embutidas utilizando baquelite (acrílico auto polimerizante) e uma prensa para montagem a quente da marca Struers, modelo LaboPress-3 (Figura 4.19) e, em seguida, lixadas na seguinte sequência de granulometria: 80, 120, 320, 400, 600 e 1200. O procedimento foi realizado em uma plataforma com água, sempre procurando manter toda superfície da amostra em contato com a lixa para evitar possíveis deformações que pudessem dificultar a análise no microscópio.



Figura 4.18 – Máquina de corte Struers, modelo Discotom-100, utilizada para cortar os discos.

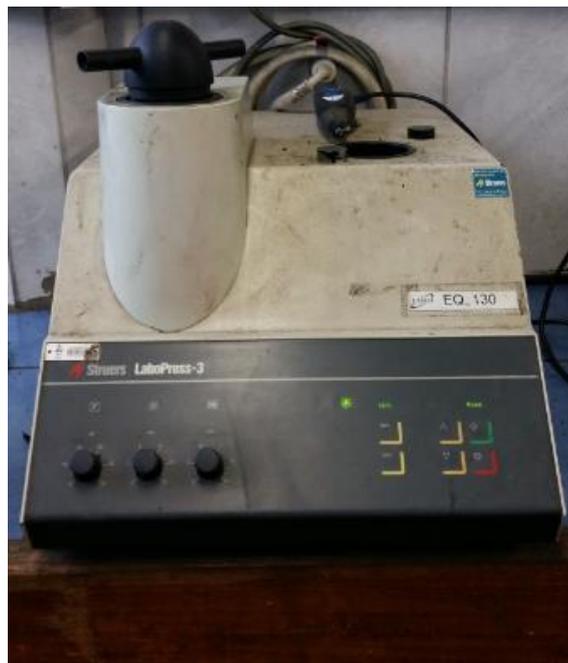


Figura 4.19 – Prensa Struers, modelo LaboPress-3, utilizada no embutimento das amostras.

Em seguida as amostras foram polidas em uma politriz da marca Struers, modelo DP10, com pasta diamantada da marca Master Diamond. Inicialmente se utilizou a pasta lilás ( $3\mu\text{-}6\mu$ , MP-4) para lapidação fina e, posteriormente, a pasta amarela ( $0,5\mu\text{-}1,5\mu$ , MP-1) para super

polimento. Tomou-se cuidado para que os resíduos da pasta lilás fossem completamente removidos antes de seguir para pasta amarela. O processo termina quando a superfície se apresenta completamente espelhada e sem riscos. Concluído o polimento, as peças foram lavadas com água e totalmente secas com auxílio de álcool e secador. Com as peças já polidas e secas, realizou-se o ataque químico em nital 2% (mistura de 2% de Ácido Nítrico e 98% de Álcool Etilico) até que a superfície metálica ficasse opaca. Logo após, as amostras foram lavadas e secas novamente.

Após o ataque químico, as peças foram observadas em um microscópio da marca Zeiss, modelo Axio Imager.Z2m com aumentos de 500x e 1000x. Várias imagens – com diferentes pontos focais – foram captadas e empilhadas com auxílio do software ImageJ que permite um rápido processamento das imagens. A Figura 4.20a e a Figura 4.20b mostram as imagens da amostra dos discos temperados e revenidos a 500 °C com aumentos de 500x e 1000x, respectivamente, após passarem pelo software.

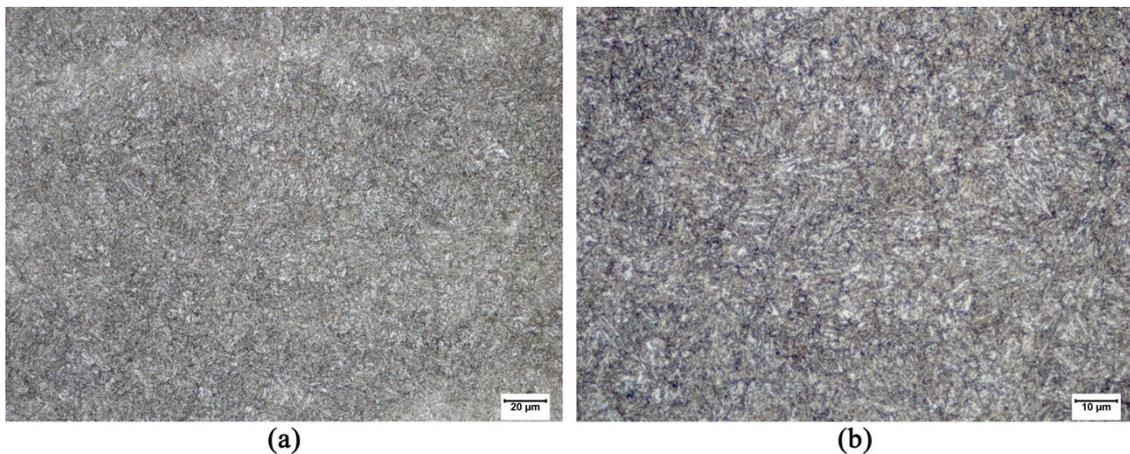


Figura 4.20 – Metalografia dos discos temperados e revenidos a 500 °C com aumentos de: (a) 500x e (b) 1000x.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Microestruturas e durezas

Para obter a dureza média dos discos, quatro medições foram feitas em cada uma das faces ensaiadas. Para análise microestrutural, um disco de cada tratamento foi analisado. Uma vez que todos os discos foram submetidos aos respectivos tratamentos térmicos simultaneamente, se presume que as microestruturas sejam as mesmas dentro de cada grupo de tratamento.

Os valores das durezas Rockwell C de cada trilha, são apresentados na Tabela 5.1 e na Figura 5.1. Além disso, a Figura 5.2 apresenta as durezas médias dos discos de acordo com seus tratamentos térmicos. Na Figura 5.1 observa-se, pelo baixo desvio padrão de cada resultado, que as durezas foram semelhantes em toda superfície do disco, sugerindo um tratamento térmico uniforme. Quando comparamos as durezas entre os discos, Figura 5.2, fica evidente a influência dos tratamentos térmicos. Os valores vão decrescendo continuamente do disco temperado para os discos revenidos, conforme a temperatura do revenido aumenta. Segundo Singh et al., 2015 e Trevisiol et al., 2017, isso se deve à decomposição da martensita em ferrita e carbonetos. De acordo com a Figura 5.2, a dureza mais elevada foi de 60 HRC – obtida nos discos temperados –, enquanto que o menor valor foi de 39 HRC – encontrado nos discos temperados e revenidos na maior temperatura, 500 °C. Isso está de acordo com a literatura, no qual estudos afirmam que a dureza da martensita revenida diminui à medida que a temperatura do revenido e tempo de manutenção no meio aumentam [Lee e Su, 1999, Trevisiol et al., 2017, Singh et al., 2015].

É interessante observar que o disco temperado, apesar da elevada dureza, não foi o que teve o menor desgaste, como pode ser visto na seção 5.2.1. De acordo com Elhadi et al., 2016, isso diverge da teoria clássica que afirma que o material mais duro terá uma maior resistência ao desgaste. No entanto, condiz com o seu estudo, no qual pinos de aço 4140 e, com maior dureza, sofreram um desgaste mais acelerado em cargas elevadas. Os ensaios foram realizados a seco na modalidade pino sobre disco. Do mesmo modo, vai ao encontro do estudo de Tang et al., 2013, no qual amostras de aço ferramenta – com dureza de 65 HRC – tiveram maior desgaste. Esse estudo também foi realizado a seco na modalidade “ball-on-disc”, sendo utilizado como pino uma esfera de Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> com 3 mm de diâmetro. Segundo os autores, a resistência ao desgaste pode cair em níveis elevados de dureza devido à fragilidade do material.

Tabela 5.1 – Durezas das trilhas.

	Discos Temperados	Discos Temperados e Revenidos a 200°C	Discos Temperados e Revenidos a 300°C	Discos Temperados e Revenidos a 400°C	Discos Temperados e Revenidos a 500°C
Trilha 1	59	54	49	45	39
	59	53	50	45	39
	59	54	49	45	39
	59	53	49	45	38
<b>Média</b>	<b>59</b>	<b>54</b>	<b>49</b>	<b>45</b>	<b>39</b>
Trilha 2	60	55	48	45	38
	61	55	48	44	38
	60	54	49	45	39
	60	54	50	45	39
<b>Média</b>	<b>60</b>	<b>54</b>	<b>49</b>	<b>45</b>	<b>38</b>
Trilha 3	61	54	49	45	39
	60	55	49	45	39
	60	54	49	45	39
	61	54	49	45	38
<b>Média</b>	<b>61</b>	<b>54</b>	<b>49</b>	<b>45</b>	<b>39</b>

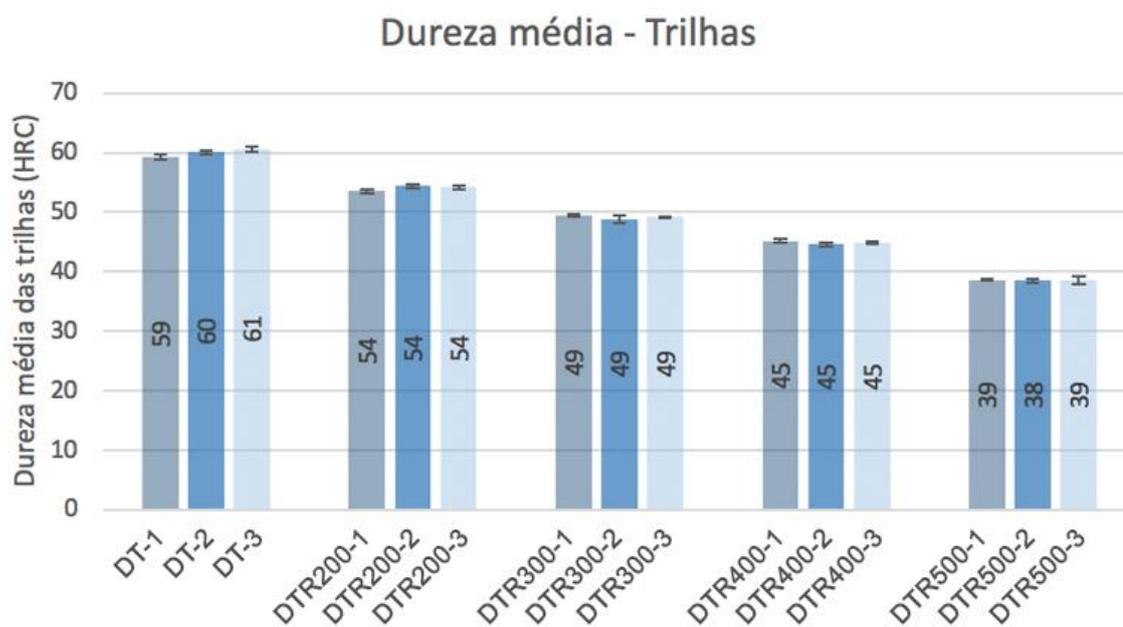


Figura 5.1 – Dureza média das trilhas.

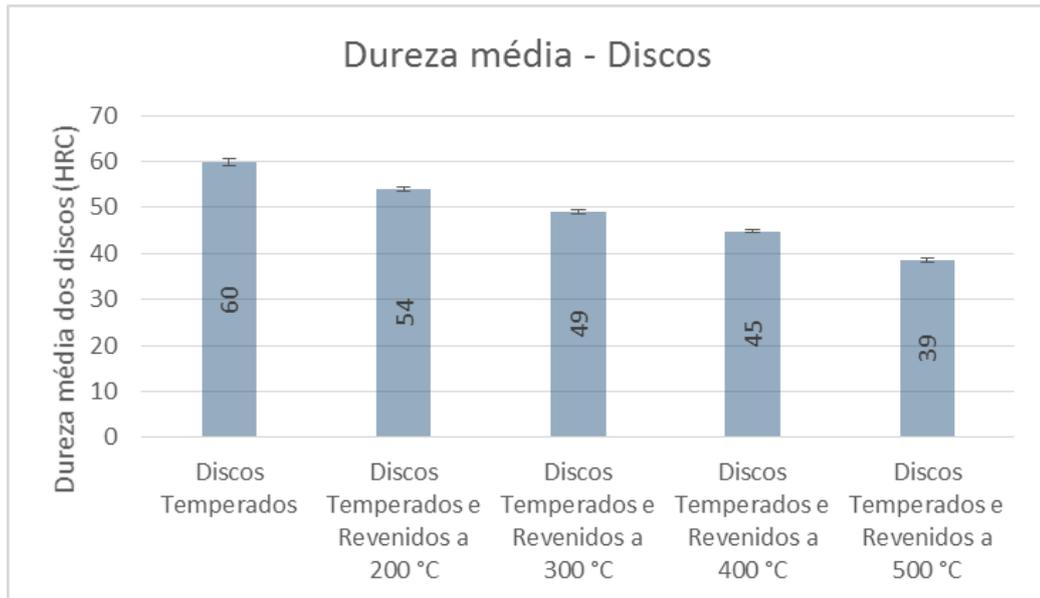


Figura 5.2 – Durezas médias.

A Figura 5.3 apresenta a microestrutura resultante no disco temperado com aumento de 1000x. As demais imagens, com aumento de 500x, se encontram no Apêndice A. Pode se observar que o disco temperado apresenta microestrutura em formato de ripas (agulhas), característica da estrutura martensítica não revenida e dos aços médio e baixo carbono [Trevisiol et al., 2017].

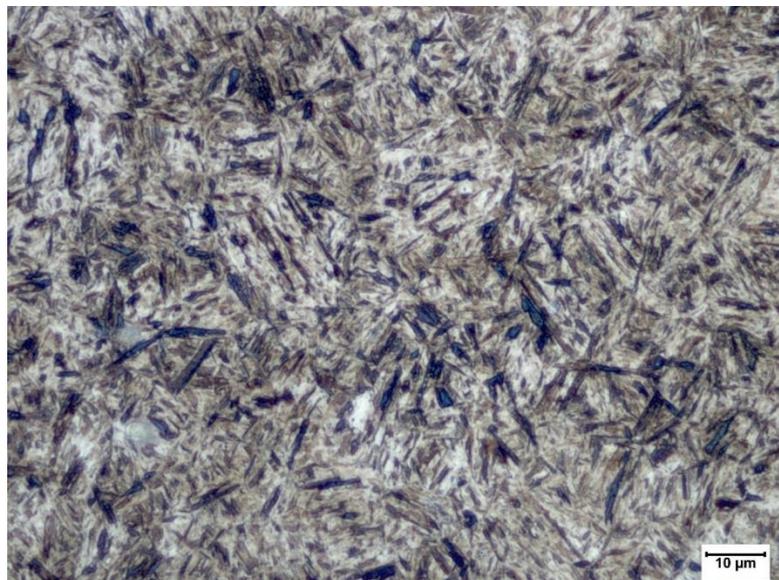


Figura 5.3 – Microestrutura do disco temperado, aumento de 1000x.

A Figura 5.4 apresenta a microestrutura resultante do disco temperado e revenido a 200 °C com aumento de 1000x. A estrutura resultante apresenta martensita revenida muito semelhante à do disco temperado. Essa semelhança com a microestrutura sem revenimento indica um baixo grau de decomposição da martensita.

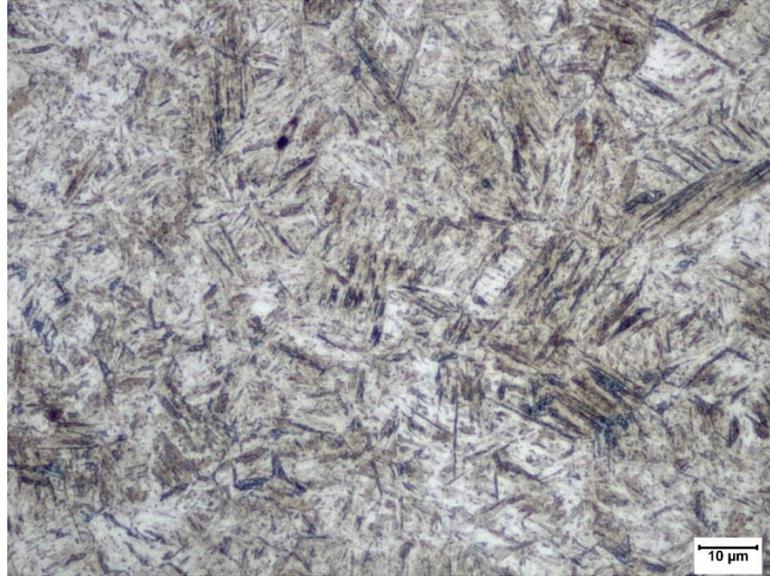


Figura 5.4 – Microestrutura do disco temperado e revenido a 200 °C, aumento de 1000x.

A Figura 5.5 apresenta a microestrutura do disco temperado e revenido a 300 °C com aumento de 1000x. Observa-se uma martensita revenida mais refinada, com ripas menores e menos evidentes.

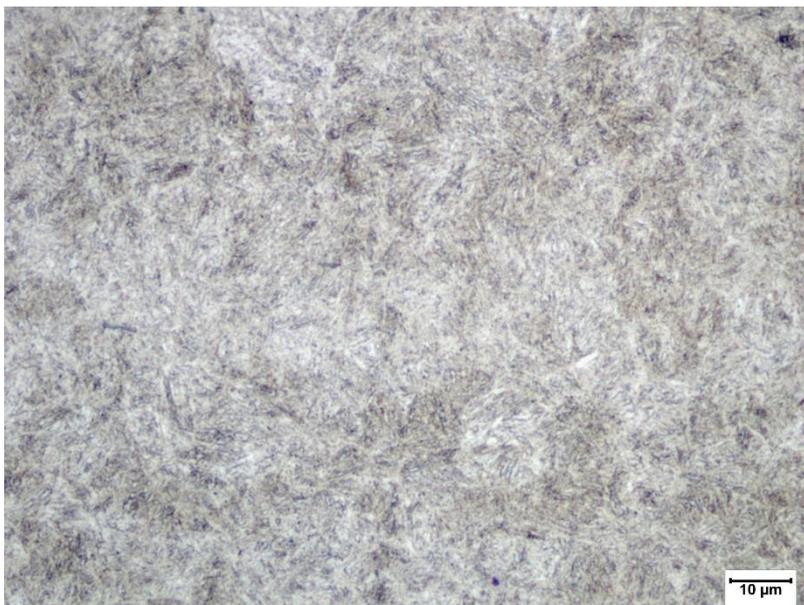


Figura 5.5 – Microestrutura do disco temperado e revenido a 300 °C, aumento de 1000x.

A Figura 5.6 e a Figura 5.7 apresentam, respectivamente, as microestruturas dos discos temperados e revenidos a 400 °C e 500 °C. A microestrutura mais clara, encontrada nos discos anteriores, não aparece nessas imagens, acredita-se que isso se deva ao ataque químico – tempo de permanência no Nital pode ter sido superior ao ideal. Para os dois discos a martensita se apresenta ainda mais refinada, no qual as ripas já não são facilmente visualizadas. A maior temperatura do revenido facilita a difusão do carbono, formando carbonetos de ferro ou até mesmo carbonetos de cromo e molibdênio – elementos de liga presentes no aço SAE. Além disso, a martensita é uma solução sólida supersaturada de carbono em reticulado de ferro e, por isso, tende a precipitar o excesso de carbono. De acordo com Singh et al., 2015, com o aumento da temperatura do revenido, os carbonetos se tornam mais grosseiros e, o material, menos resistente à abrasão. Observa-se, também, que a martensita não revenida se apresenta mais grosseira e, à medida que a temperatura do revenido aumenta, a martensita revenida se torna mais refinada e de menor dureza.



Figura 5.6 – Microestrutura do disco temperado e revenido a 400 °C, aumento de 1000x.



Figura 5.7 – Microestrutura do disco temperado e revenido a 500 °C, aumento de 1000x.

## 5.2 Desgaste

A seguir são apresentadas as análises dos volumes desgastados nas trilhas assim como suas rugosidades. Também são avaliados os volumes desgastados nas esferas e os perfis de desgaste, tanto das trilhas quanto dos pinos.

### 5.2.1 Desgaste dos discos

Para cada condição de tratamento térmico, três trilhas foram realizadas. Conforme explicado na metodologia, o desgaste volumétrico médio e o desvio padrão de cada trilha foram calculados a partir de doze perfis obtidos através de interferometria. A Figura 5.8 apresenta os desgastes volumétricos, onde a barra de erro representa o desvio padrão.

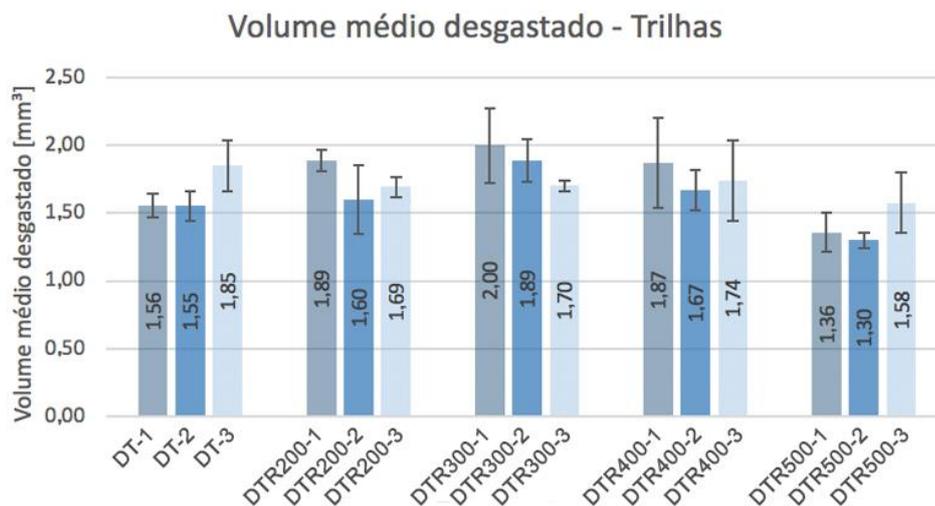


Figura 5.8 – Desgaste volumétrico médio de cada trilha.

Observa-se que, levando em conta os desvios padrão, os desgastes parecem semelhantes para uma mesma condição de tratamento térmico. Desta maneira, os desgastes foram avaliados através do método estatístico ANOVA – com intervalo de confiança de 95% – com o objetivo de verificar se há diferença significativa entre os valores. As trilhas foram comparadas uma a uma e a Tabela 5.2 foi construída. Os “x” assinalados indicam que há diferença entre as respectivas trilhas relacionadas através das linhas e colunas. Onde não há marcação o resultado foi inconclusivo, ou seja, não há evidências estatísticas suficientes para afirmar que os valores são diferentes.

Tabela 5.2 – Comparação entre todos volumes médios desgastados através da análise ANOVA.

		DT			DTR200			DTR300			DTR400			DTR500		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
DT	1			x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	2			x	x		x	x	x	x	x		x	x		
	3	x	x			x	x			x		x		x	x	x
DTR200	1	x	x			x	x			x		x		x	x	x
	2			x	x			x	x		x			x	x	
	3	x	x	x	x			x	x					x	x	
DTR300	1	x	x			x	x			x		x	x	x	x	x
	2	x	x			x	x			x		x		x	x	x
	3	x	x	x	x			x	x					x	x	
DTR400	1	x	x			x								x	x	x
	2	x	x	x	x			x	x					x	x	
	3	x						x						x	x	
DTR500	1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x
	2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x
	3			x	x			x	x		x			x	x	

Embora os ensaios tenham sido feitos todos com os mesmos parâmetros, a análise ANOVA mostrou que realmente há diferença entre os desgastes dentro de uma mesma condição de tratamento térmico. Isso indica um desgaste não homogêneo, ou seja, uma mesma microestrutura teve comportamentos diferentes quanto à perda de material. Esses comportamentos divergentes sugerem que diferentes mecanismos de desgaste, discutidos na seção 5.3, possam atuar para uma mesma condição de tratamento térmico. Além disso, esses mecanismos podem atuar em diferentes momentos do ensaio, ou seja, para cada trilha, o instante em que determinado mecanismo passa a atuar pode não ser o mesmo. É interessante comparar as trilhas DT-1 e DT-2 – do disco de maior dureza – à trilha DTR500-3 – do disco de menor dureza –, a análise ANOVA não apontou diferença entre os valores de desgaste mesmo nos discos mais opostos. A comparação de trilhas de diferentes discos, mostrou que nem todos os valores apareceram como diferentes entre si, o que pode indicar desgastes semelhantes em discos com tratamentos térmicos variados. Além disso, verifica-se que as trilhas DTR500-1 e DTR500-2 – que aparentemente apresentaram as menores perdas de material – são as que mais se diferenciam das demais. A análise estatística apontou que há diferença entre seus valores de desgaste quando comparados às demais trilhas, o que sugere que essas trilhas, de fato, desgastaram menos. Já a trilha DTR500-3, apesar de apresentar a mesma microestrutura e dureza, teve um desgaste significativamente superior.

A seguir, na Figura 5.9, serão analisadas as rugosidades médias dentro das trilhas – obtidas por interferometria em três regiões distintas – e seus desvios padrão.

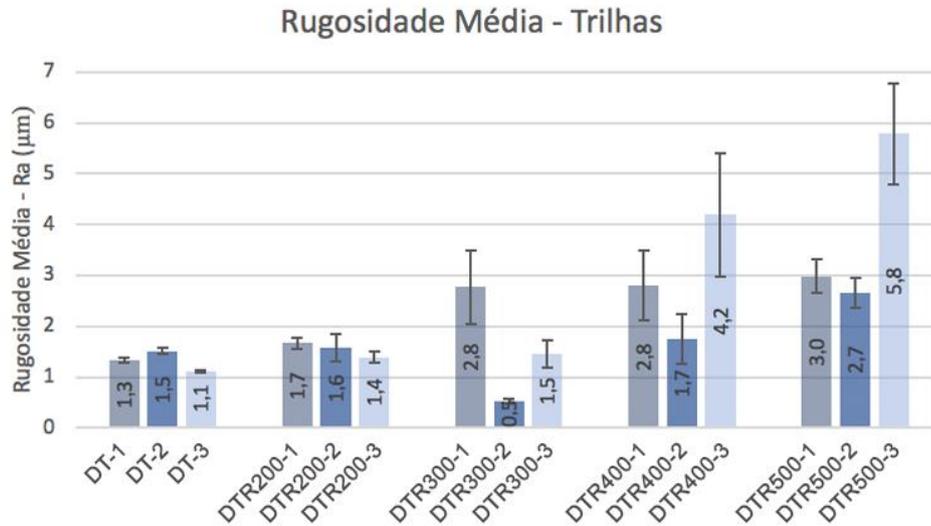


Figura 5.9 – Rugosidade média das trilhas.

De modo geral, observa-se um crescimento da rugosidade média das trilhas desgastadas conforme a temperatura do revenido aumenta. No entanto, o menor valor foi encontrado no disco temperado e revenido a 300 °C – cerca de 0,5 µm – e o maior valor encontrado no disco temperado e revenido a 500 °C – em torno de 5,8 µm. Isso está de acordo com o estudo de Trevisiol et al., 2017, no qual a profundidade dos sulcos – produzidos por partículas abrasivas – foi medida através do parâmetro rugosidade. Observou-se que, para as partículas menores, conforme a dureza dos discos diminuía, a rugosidade aumentava devido à maior penetração dos abrasivos. Acredita-se que essas irregularidades estejam relacionadas, também, à transferência de material de uma superfície para a outra, que será discutida na seção dos mecanismos de desgaste, seção 5.3.

A seguir são apresentados os perfis médios das trilhas visando mostrar o aspecto da rugosidade nessas seções transversais. Como cada trilha gerou doze perfis, para comparar uma trilha com a outra, a média aritmética foi calculada para produzir o perfil médio. A Figura 5.10 mostra os perfis médios das três trilhas de cada disco e a rugosidade média de suas regiões.

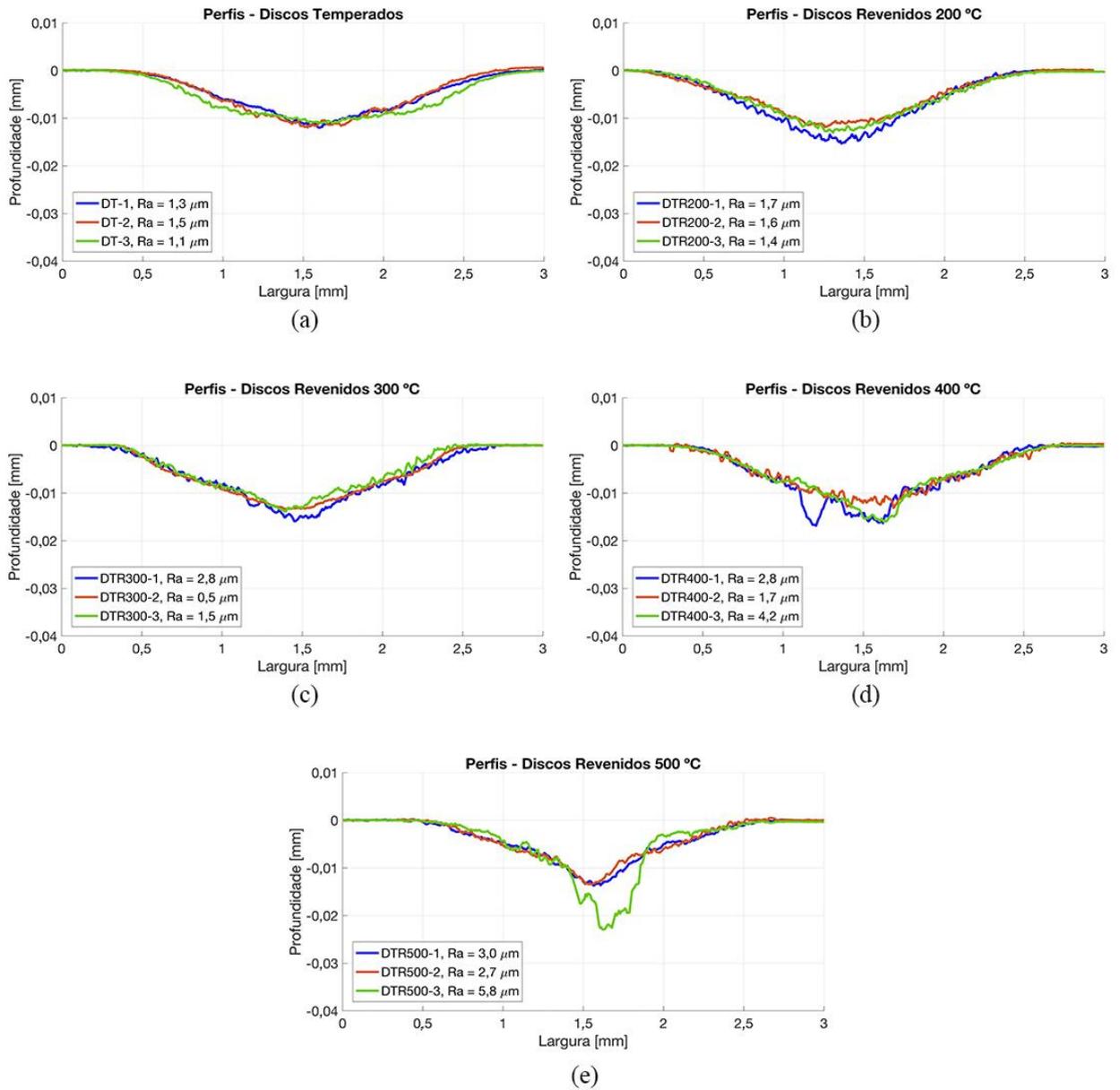


Figura 5.10 – Perfis médios do desgaste das três trilhas dos discos: (a) temperados, (b) temperados e revenidos a 200 °C, (c) temperados e revenidos a 300 °C, (d) temperados e revenidos a 400 °C e (e) temperados e revenidos a 500 °C.

Os perfis dos discos temperados, Figura 5.10a, se mostraram semelhantes. A trilha DT-3 (em verde) parece ser um pouco mais profunda nas laterais, o que explicaria seu maior desgaste. Além disso, a rugosidade das trilhas foi semelhante e, de maneira geral, menores quando comparadas aos demais discos.

Observando o perfil das trilhas dos discos temperados e revenidos a 200 °C, Figura 5.10b, verifica-se que o desgaste é mais profundo em comparação com os discos apenas

temperados. Além disso, apesar dos perfis serem bastante semelhantes, a trilha DTR200-1 (em azul) aparenta ter uma maior profundidade do que as demais, sendo esta, também, a trilha com a maior rugosidade – cerca de  $1,7 \mu\text{m}$ . De maneira geral, os perfis se apresentam mais rugosos quando em comparação aos dos discos temperados.

Os perfis dos discos temperados e revenidos a  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , apresentados na Figura 5.10c, divergem um do outro, principalmente o da trilha DTR300-1 (em azul). De fato, ao se analisar a rugosidade das respectivas trilhas, a trilha DTR300-1 apresenta uma rugosidade em torno de  $2,8 \mu\text{m}$ , cerca de 5 vezes a rugosidade da trilha DTR300-2 ( $0,5 \mu\text{m}$ ) e 2 vezes a da trilha DTR300-3 ( $1,5 \mu\text{m}$ ). Verifica-se, também, que o desgaste da trilha DTR300-1 apresentou, além da alta rugosidade, um desvio padrão mais elevado, conforme mostra a Figura 5.8, o que sugere um desgaste não uniforme, no qual alguns perfis foram obtidos de regiões com maior arrancamento de material. De maneira geral, a rugosidade da trilha DTR300-2 é a menor, tanto em comparação com as demais trilhas dos discos temperados e revenidos a  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , quanto em comparação às trilhas dos outros discos. A Figura 5.11 apresenta uma das interferometrias das trilhas DTR300-1 e DTR300-2, nela é possível comparar as rugosidades e ter noção de suas diferenças. Essas diferenças podem estar relacionadas ao momento em que os mecanismos de desgaste passam a atuar em cada uma das trilhas, que pode não ser o mesmo.

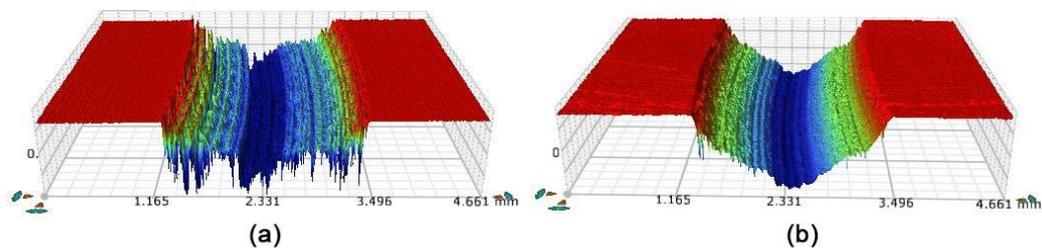


Figura 5.11 – Interferometria de uma das regiões: (a) trilha DTR300-1 e (b) trilha DTR300-2.

Os perfis dos discos temperados e revenidos a  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , Figura 5.10d, se apresentam bastante irregulares, principalmente das trilhas DTR400-1 (em azul) e DTR400-3 (em verde). Ambas apresentam sulcos profundos, o que explica suas maiores rugosidades quando comparadas à trilha DTR400-2 (em laranja). A rugosidade da trilha DTR400-1 é em torno de  $2,8 \mu\text{m}$  e a da trilha DTR400-3 cerca de  $4,2 \mu\text{m}$ . Essas trilhas mais irregulares foram as que apresentaram, também, um maior desvio padrão nos valores de desgaste (Figura 5.8), indicando sua heterogeneidade – semelhante ao que ocorreu com a trilha DTR300-1.

Observando os perfis dos discos temperados e revenidos a 500 °C, Figura 5.10e, percebe-se uma grande diferença na profundidade da trilha DTR500-3 (em verde), revelando vales acentuados e que justificam sua maior rugosidade, em torno de 5,8 µm. De maneira geral, essa rugosidade é a maior, tanto em comparação com as demais trilhas dos discos temperados e revenidos a 500 °C, quanto em comparação às trilhas dos outros discos. Mais uma vez, essa irregularidade pode ser responsável pelo maior desvio padrão nos valores de desgaste, similar ao que ocorre nas trilhas DTR300-1, DTR400-1 e DTR400-3.

Em razão da análise estatística ANOVA – que apontou para diferença entre os valores de desgaste das trilhas –, optou-se por não fazer um gráfico com volume desgastado médio por disco, ou seja, optou-se por não agrupar as trilhas.

Ao compararmos os perfis dos discos temperados e revenidos a 500 °C com os demais, principalmente nas bordas, fica claro que sua inclinação é muito mais suave, isso acontece inclusive para trilha DTR500-3, onde os sulcos aparecem apenas no centro da trilha desgastada. Essa diferença entre os perfis explicaria sua menor perda de material.

Os discos temperados e revenidos a 300 °C aparentam ter o maior desgaste. No entanto, não foi encontrado na literatura informações específicas em relação ao desgaste do revenido a 300 °C. Acredita-se que esses resultados estejam mais relacionados aos mecanismos de desgaste envolvidos do que à microestrutura. De acordo com o estudo de Trevisiol et al., 2017 o efeito da microestrutura no desgaste diminui para cargas normais elevadas. Vale ressaltar que os autores utilizaram como carga máxima 110 N, enquanto que no presente estudo se utilizaram cargas de 200 N, ou seja, um carregamento ainda maior.

Além disso, os valores de desgaste nos discos temperados e revenidos a 200 °C e 400 °C parecem ser semelhantes, entretanto, ao se analisar os respectivos perfis médios das trilhas desgastadas, verifica-se uma grande diferença, sendo os desgastes nos discos temperados e revenidos a 400 °C mais irregulares e com maiores rugosidades.

### **5.2.2 Desgaste dos pinos**

Após cada ensaio, as esferas utilizadas como pino foram avaliadas através de interferometria para cálculo de volume desgastado e obtenção do perfil de desgaste. A Figura 5.12 apresenta os valores obtidos em cada uma das trilhas.

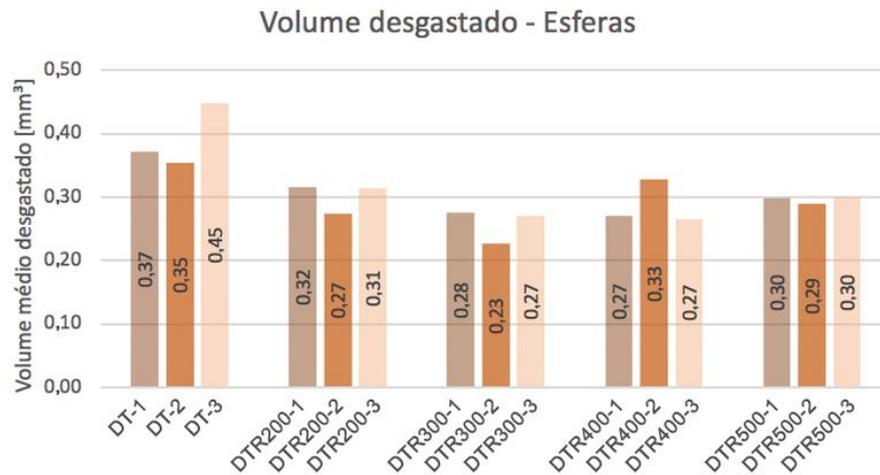


Figura 5.12 – Desgaste volumétrico das esferas.

Observa-se que a esfera tem um comportamento semelhante aos discos, embora atritada contra materiais com mesmo tratamento térmico, apresenta diferentes desgastes. Acredita-se que esses diferentes comportamentos, em uma mesma microestrutura e dureza, estejam relacionados aos mecanismos de desgaste que serão explorados na seção 5.3. Além disso, verificam-se os mesmos valores de desgaste nas esferas das trilhas DTR200-2, DTR300-3, DTR400-1 e DTR400-3, o que vai ao encontro, mais uma vez, dos resultados obtidos nos discos, nos quais durezas e microestruturas diferentes podem gerar a mesma perda de material, inclusive nos pinos.

A interferometria das esferas permitiu gerar um perfil bidimensional de seus desgastes e que foram sobrepostos para cada um dos discos, como mostra a Figura 5.13. Para melhor compara-los às respectivas trilhas geradas, os perfis foram invertidos, ou seja, ao contrário do perfil dos discos, devem ser analisados de baixo para cima.

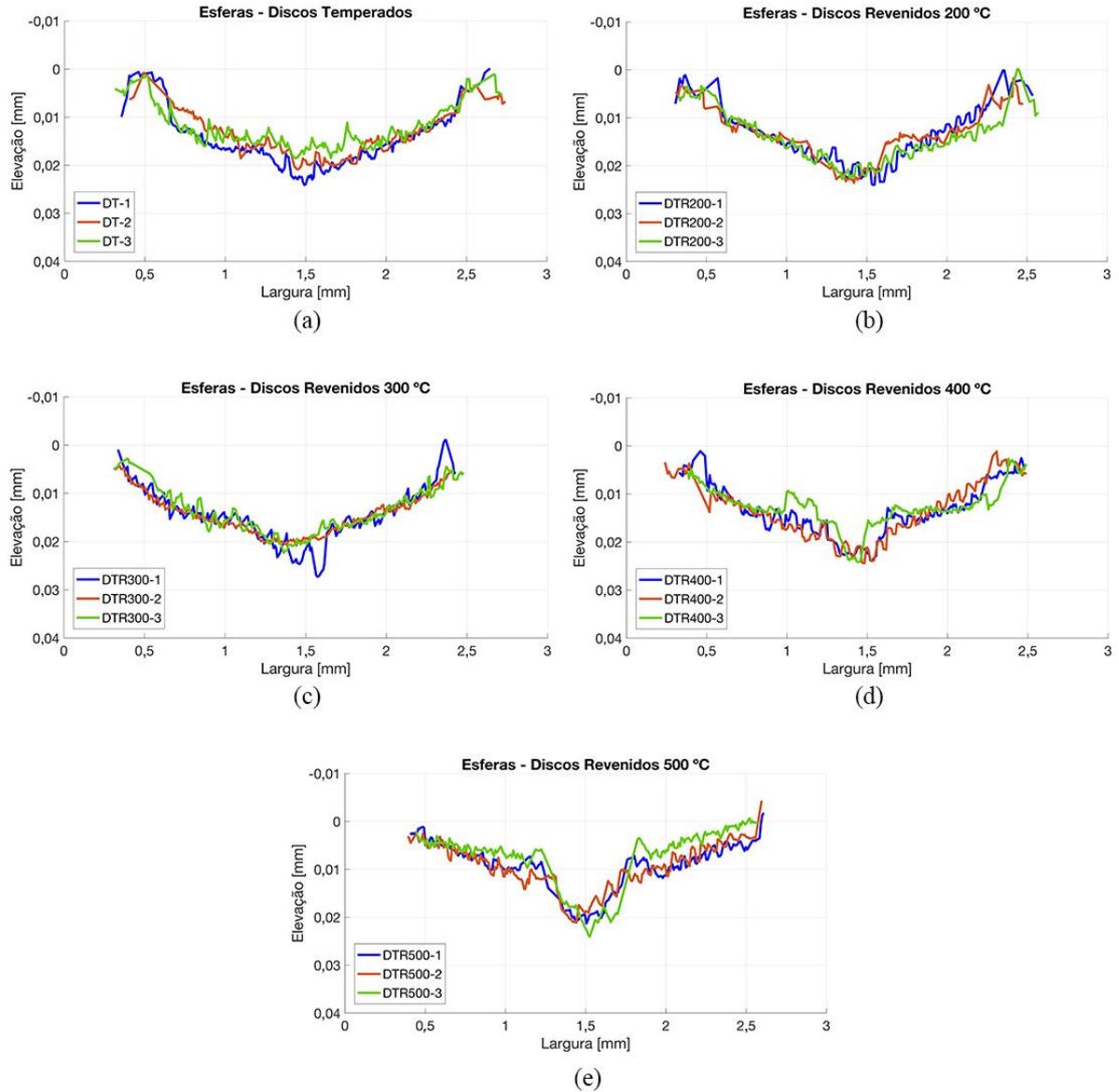


Figura 5.13 – Perfis do desgaste das esferas atritadas contra as trilhas dos discos: (a) temperados, (b) temperados e revenidos a 200 °C, (c) temperados e revenidos a 300 °C, (d) temperados e revenidos a 400 °C e (e) temperados e revenidos a 500 °C.

A Figura 5.13a mostra os perfis da esfera atritada contra os discos temperados, de fato, o perfil daquela atritada contra a trilha DT-3 (em verde) aparece mais achatado que os outros, o que explica sua maior perda volumétrica. Além disso, essa esfera foi a que gerou um maior desgaste no disco, mostrando que pode haver uma correspondência entre eles, maior desgaste no disco, maior desgaste na esfera.

Analisando os perfis da esfera atritada contra os discos temperados e revenidos a 200 °C, Figura 5.13b, verifica-se que eles têm uma maior inclinação em comparação com aqueles dos

discos temperados – mais arredondados –, o que está de acordo com a maior profundidade das trilhas geradas. Há bastante similaridade entre os perfis, assim como os valores de desgaste.

A Figura 5.13c apresenta os perfis da esfera atritada contra os discos temperados e revenidos a 300 °C. Verifica-se que os perfis aparecem semelhantes entre si e ainda mais arredondados do que os dos discos temperados, com exceção do perfil DTR300-1. O perfil DTR300-2 aparece com menos irregularidades, assim como a trilha correspondente, que teve a menor rugosidade entre todas as trilhas geradas – 0,5 µm. No perfil DTR300-1 se observa picos mais acentuados e que, provavelmente, tiveram maior penetração no disco, gerando sulcos mais profundos como mostrado na Figura 5.10c da seção 5.2.1. Em relação ao volume desgastado, os valores não foram muito diferentes entre si.

Nos perfis da esfera atritada contra os discos temperados e revenidos a 400 °C, apresentados na Figura 5.13d, não se observa um arredondamento como nas esferas dos discos temperados e dos temperados e revenidos a 300 °C, mas sim um perfil mais pontiagudo, semelhante aos perfis da esfera atritada contra os discos temperados e revenidos a 200 °C. Além disso, verifica-se uma similaridade entre os perfis DTR400-1, DTR400-2 e DTR400-3, todos bastante irregulares. Essa irregularidade está de acordo com as altas rugosidades encontradas nos perfis das trilhas dos discos temperados e revenidos a 400 °C, como mostrado na Figura 5.10d da seção 5.2.1. O volume desgastado da esfera DTR400-1 e DTR400-3 foram os mesmos, sendo a perda de material da esfera DTR400-2 um pouco maior que as demais.

Os perfis da esfera atritada contra os discos temperados e revenidos a 500 °C, apresentados na Figura 5.13e, foram diferentes dos demais discos. Não ocorre um arredondamento como nos discos temperados e nos temperados e revenidos a 300 °C, mas também não há grande inclinação como nos discos temperados e revenidos a 200 °C e 400 °C. Os perfis, além de bastante irregulares, aparecem com leve inclinação nas bordas e picos acentuados bem no centro do desgaste, o que os encaixa perfeitamente nas trilhas geradas, cujas rugosidades foram mais altas em comparação aos outros discos. Verificam-se perfis bastante semelhantes entre si, essa semelhança também é evidenciada pelos volumes desgastados em cada esfera, conforme mostra a Figura 5.12, cujos valores foram praticamente idênticos.

Observa-se, de modo geral, que o maior desgaste ocorreu na esfera atritada contra a trilha DT-3, seguido das trilhas DT-1 e DT-2, ou seja, atritadas contra o disco temperado e de alta dureza. Sabe-se que a esfera de zircônia também tem alta dureza e, portanto, maior fragilidade, o que provavelmente foi responsável por sua maior perda de material. Em contrapartida, a esfera que menos desgastou foi aquela atritada contra a trilha DTR300-2, isto é, contra o disco que aparenta ter a maior perda de material. Nenhum dos perfis se apresentou

totalmente achatado, exibindo sempre picos na região central do desgaste. Isso está de acordo com as imagens apresentadas no estudo de Lorenzo-martin e Ajayi, 2015 – no qual aço 4140 endurecido foi atritado contra esferas de aço 52100 endurecido. Apesar dos autores não analisarem os perfis das esferas, algumas figuras permitem visualizar picos na região central do desgaste. Acredita-se que isso esteja relacionado ao assentamento da esfera no disco. Inicialmente, o contato é apenas pontual entre as superfícies, gerando um desgaste mais profundo no disco ou até mesmo a sua deformação. Entretanto, conforme o ensaio avança, as laterais da esfera também começam a desgastar e o contato já não é mais pontual, levando ao desgaste de suas bordas. Além disso, os perfis do desgaste das esferas e das trilhas se complementam – como exemplifica a Figura 5.14 –, o que está de acordo com Kato e Adachi, 2001, os autores afirmam que picos e vales coincidem nas superfícies de acoplamento. A Figura 5.15 mostra o desgaste médio das esferas em cada disco e seus desvios padrão.

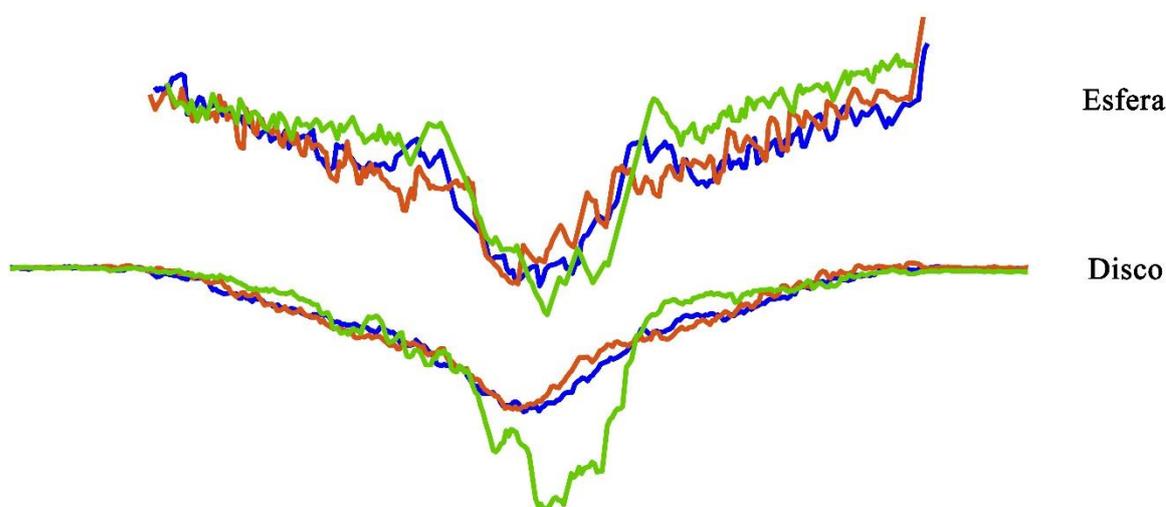


Figura 5.14 – Perfis das esferas e das trilhas dos discos temperados e revenidos a 500 °C após os ensaios.

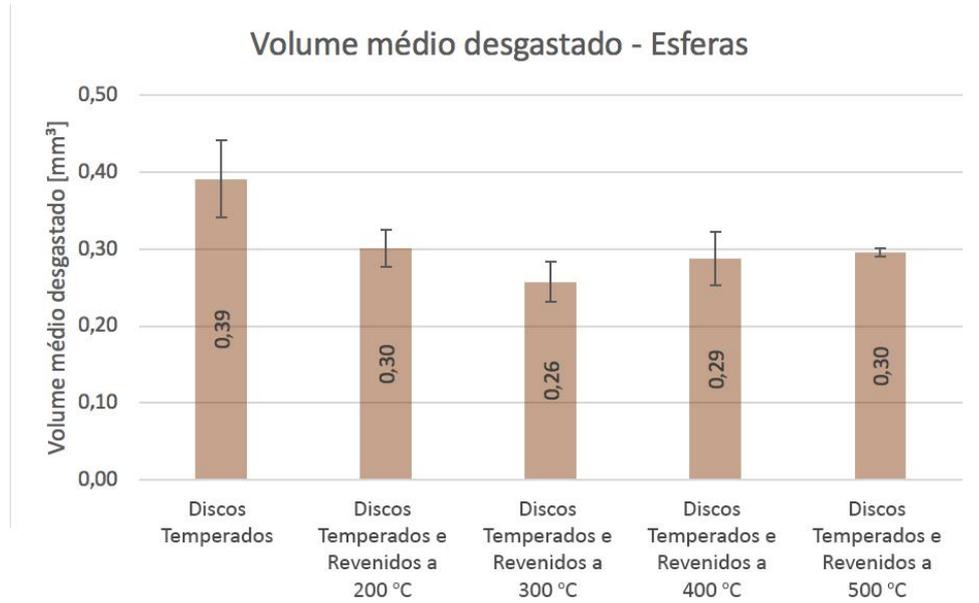


Figura 5.15 – Desgaste volumétrico médio das esferas atritadas contra os respectivos discos.

A Figura 5.16 apresenta um gráfico comparativo dos desgastes das esferas e das respectivas trilhas com seus desvios padrão. Verifica-se, nos discos temperados e nos temperados e revenidos a 200 °C e 500 °C, que maiores desgastes nos discos também correspondem a maiores desgastes nas esferas. No entanto, isso não ocorre para todas as trilhas dos discos temperados e revenidos a 300 °C e 400 °C. Isso sugere que os mecanismos de desgaste atuantes foram distintos ou, então, ocorreram em diferentes intensidades.

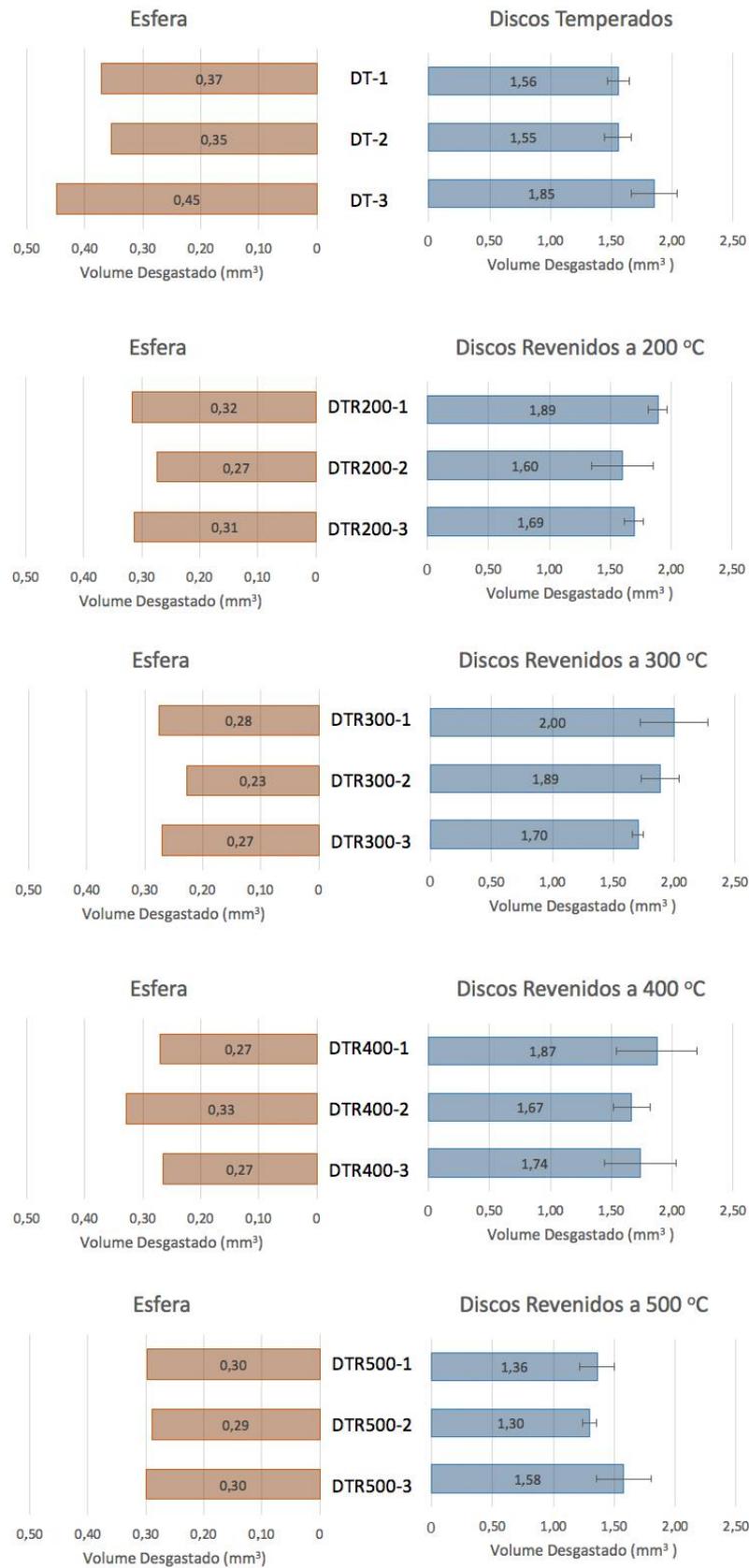


Figura 5.16 – Gráfico comparativo dos desgastes das esferas e das respectivas trilhas com seus desvios padrão.

### 5.3 Mecanismos de desgaste

A seguir, será feita a análise das microscopias de todas esferas e discos ensaiados, além da análise em MEV e EDS de um dos discos e de uma das esferas para cada condição de tratamento térmico – as mesmas amostras analisados através da metalografia.

A Figura 5.17 mostra uma imagem panorâmica – feita através de microscopia – das trilhas DT-1, DT-2 e DT-3 (discos temperados), a seta no canto superior direito indica a direção de deslizamento. Na trilha DT-3, observa-se uma superfície clara e pouco irregular, com ranhuras distribuídas de maneira uniforme, características de desgaste abrasivo. Além disso – semelhante ao que ocorre na trilha DT-2 – ocorre pouco arrancamento de material, concentrado em sua maioria na borda inferior, como pode ser visto na ampliação. Visualmente as trilhas são semelhantes, todas com marcas de desgaste abrasivo. No entanto, a trilha DT-2 aparenta ter ranhuras mais profundas na região central, mesmo assim, a análise ANOVA dos valores de desgaste não apontou para diferença significativa entre os valores das trilhas DT-1 e DT-2. Esses resultados estão de acordo com o estudo de Totik et al., 2003, no qual amostras de aço 4140 endurecido apresentaram uma superfície desgastada mais lisa e com detritos muito pequenos, como demonstram as análises em MEV e EDS a seguir.

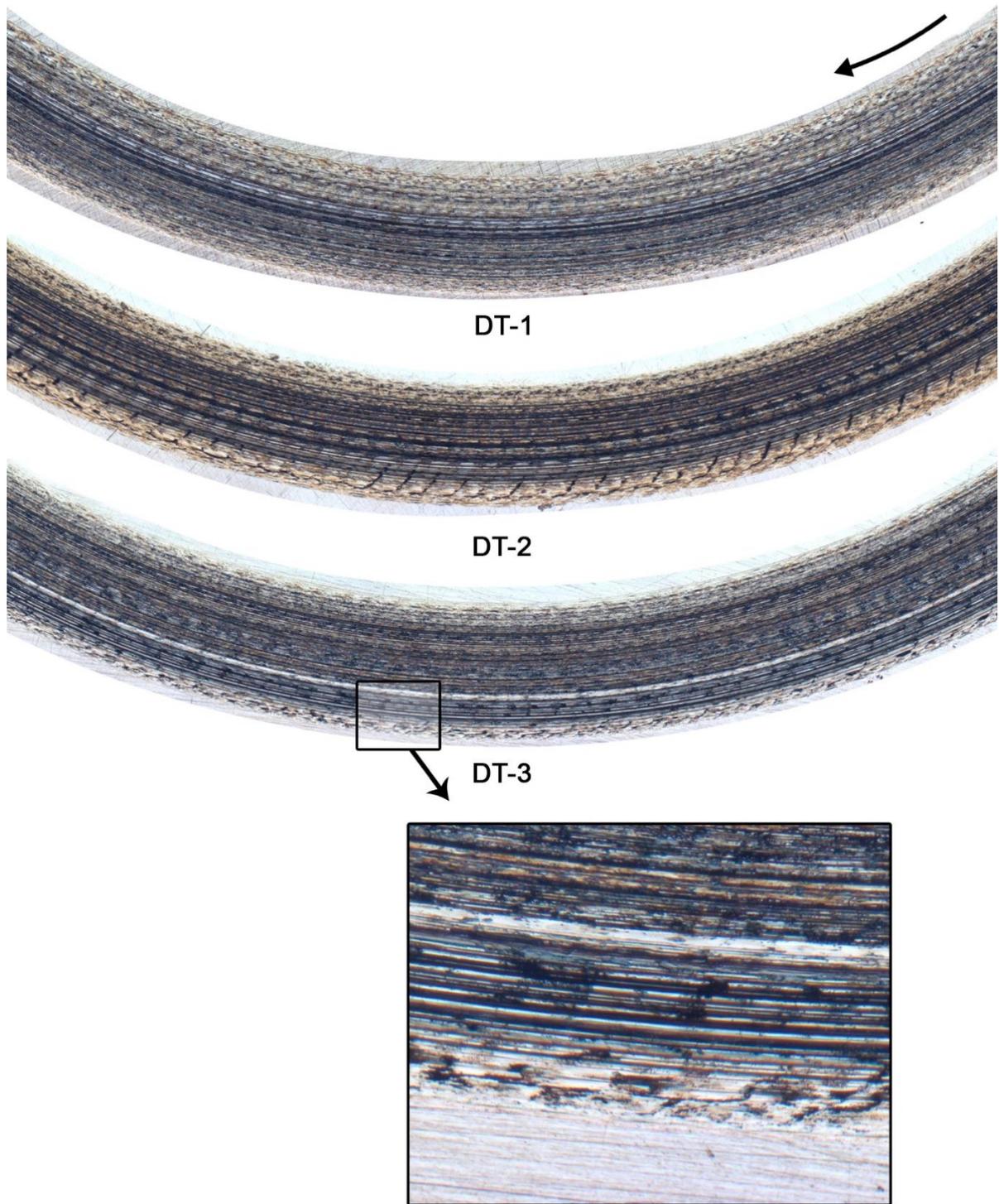


Figura 5.17 – Panorâmica das trilhas dos discos temperados.

A análise em MEV da superfície da trilha DT-3 é apresentada na Figura 5.18. Essas manchas escuras, assim como os elementos encontrados, estiveram presentes em todas as análises, seguindo um padrão. Desta maneira, optou-se por apresentar somente as análises dos discos temperados, as dos discos restantes estão no Apêndice B. Além dos pontos escuros, a

imagem também permite visualizar as ranhuras características do desgaste abrasivo, indicadas pela seta.

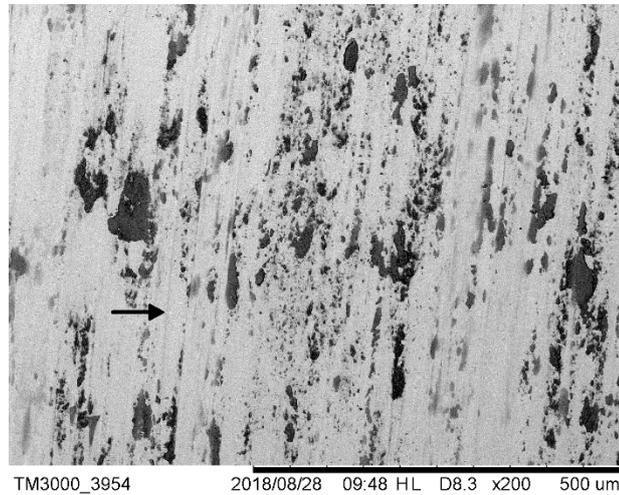


Figura 5.18 – MEV da trilha DT-3, aumento de 200x.

A análise em EDS da região mais clara, ponto 1 na Figura 5.19, revelou grande quantidade de ferro, mas não apontou para a presença de oxigênio. A análise das regiões escuras, ponto 2 da Figura 5.19, indica que essas marcas correspondem a uma mistura de zircônia, oxigênio e ferro, o que sugere, além de uma leve adesão do material da esfera no disco, a formação de óxido de ferro. A Tabela 5.3 apresenta a porcentagem de cada elemento nos pontos indicados e a Figura 5.20a e Figura 5.20b o espectro dos pontos 1 e 2, respectivamente.

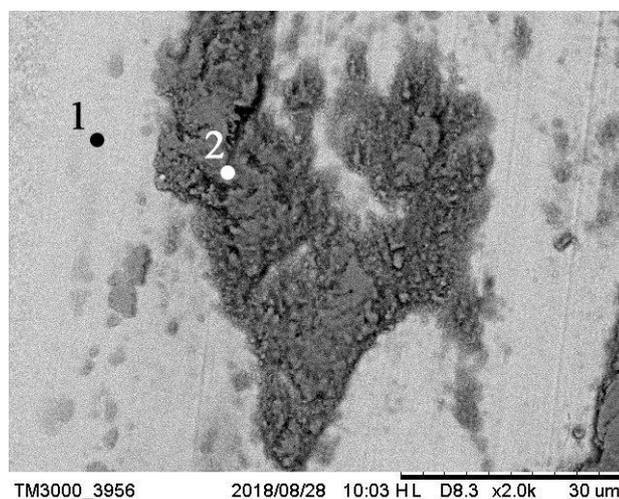
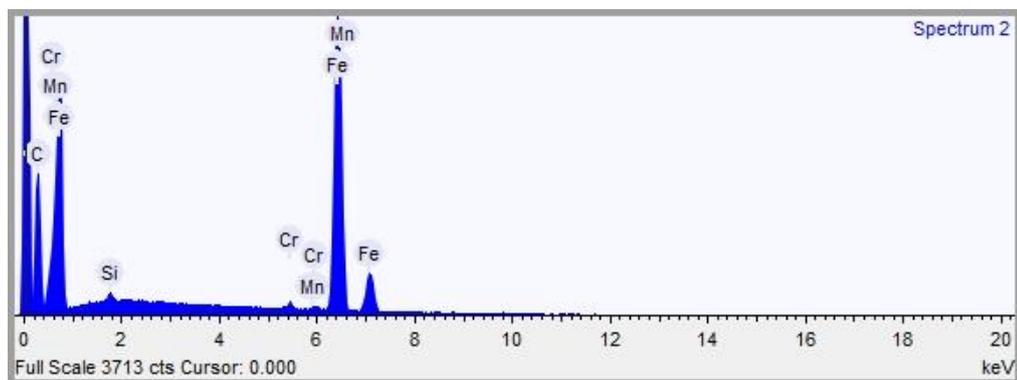


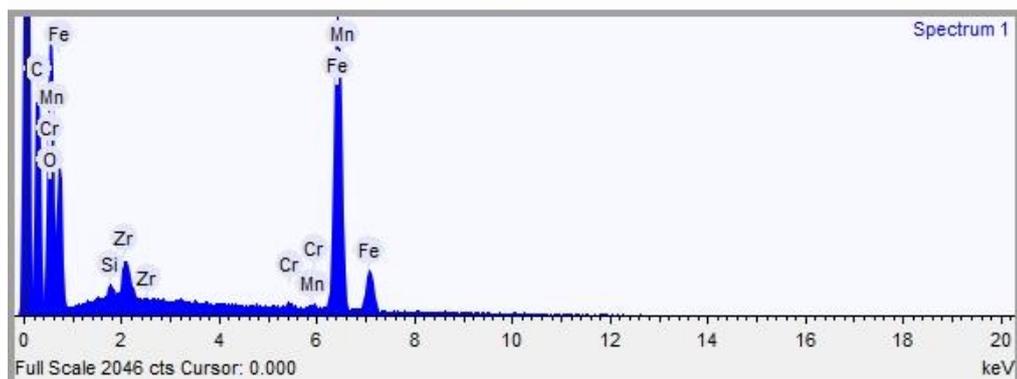
Figura 5.19 – MEV da trilha DT-3, aumento de 2000x.

Tabela 5.3 – EDS - Porcentagem em peso dos elementos nos pontos 1 e 2.

Elemento	Ponto 1	Ponto 2
	Peso [%]	Peso [%]
Oxigênio	–	23,013
Silício	0,355	0,306
Cromo	0,577	0,454
Magnésio	0,553	0,325
Ferro	66,711	45,305
Zircônio	–	2,389



(a)



(b)

Figura 5.20 – Espectros dos pontos: (a) 1 e (b) 2.

A Figura 5.21 apresenta a panorâmica das esferas atritadas contra as trilhas DT-1, DT-2 e DT-3, a seta indica a direção de deslizamento. Observa-se bastante material acumulado nas bordas e ranhuras evidentes, características da abrasão.

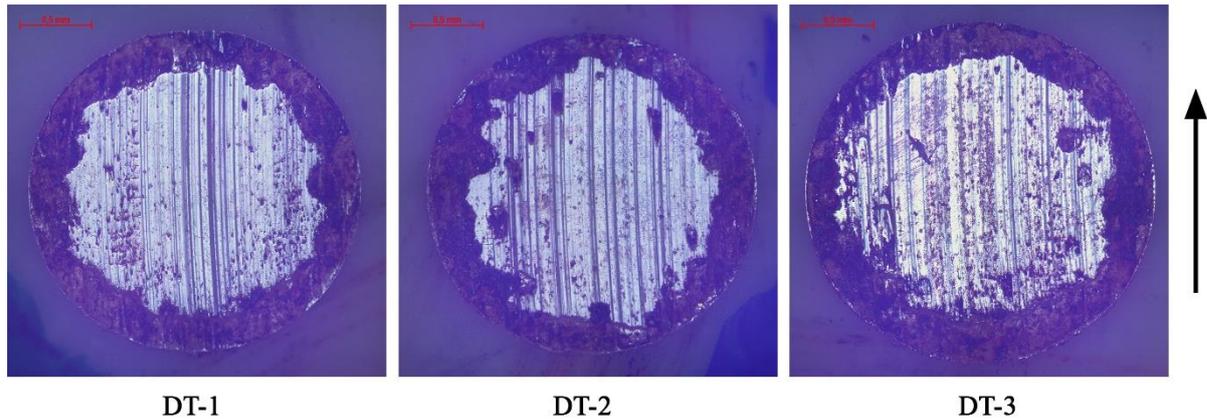


Figura 5.21 – Panorâmica das esferas atritadas contra as trilhas dos discos temperados.

A Figura 5.22 apresenta a análise em MEV da borda da esfera DT-3. Esse material acumulado, assim como os elementos encontrados, estiveram presentes em todas as análises. Tendo isso em vista, optou-se por apresentar somente as análises da esfera atritada contra os discos temperados, as das demais esferas estão presentes no Apêndice B. A análise em EDS (Tabela 5.4) da região mais clara, ponto 1, mostra grande quantidade de zircônia e porcentagem de ferro insignificante. A análise do material acinzentado, ponto 2, aponta para grande concentração de ferro e oxigênio, ou seja, ocorreu grande acúmulo de material do disco nas laterais da esfera, principalmente, óxido de ferro. Já as marcas mais escuras, ponto 3, revelaram a presença predominante de oxigênio e zircônia, o que sugere que pequenos fragmentos da esfera foram arrancados durante o desgaste abrasivo, permanecendo entre as superfícies durante o deslizamento. Desta maneira, observa-se que, além da troca de material entre as superfícies, ocorreu a formação de óxido. O desgaste foi predominantemente abrasivo. A Figura 5.23 mostra os espectros dos pontos 1, 2 e 3.

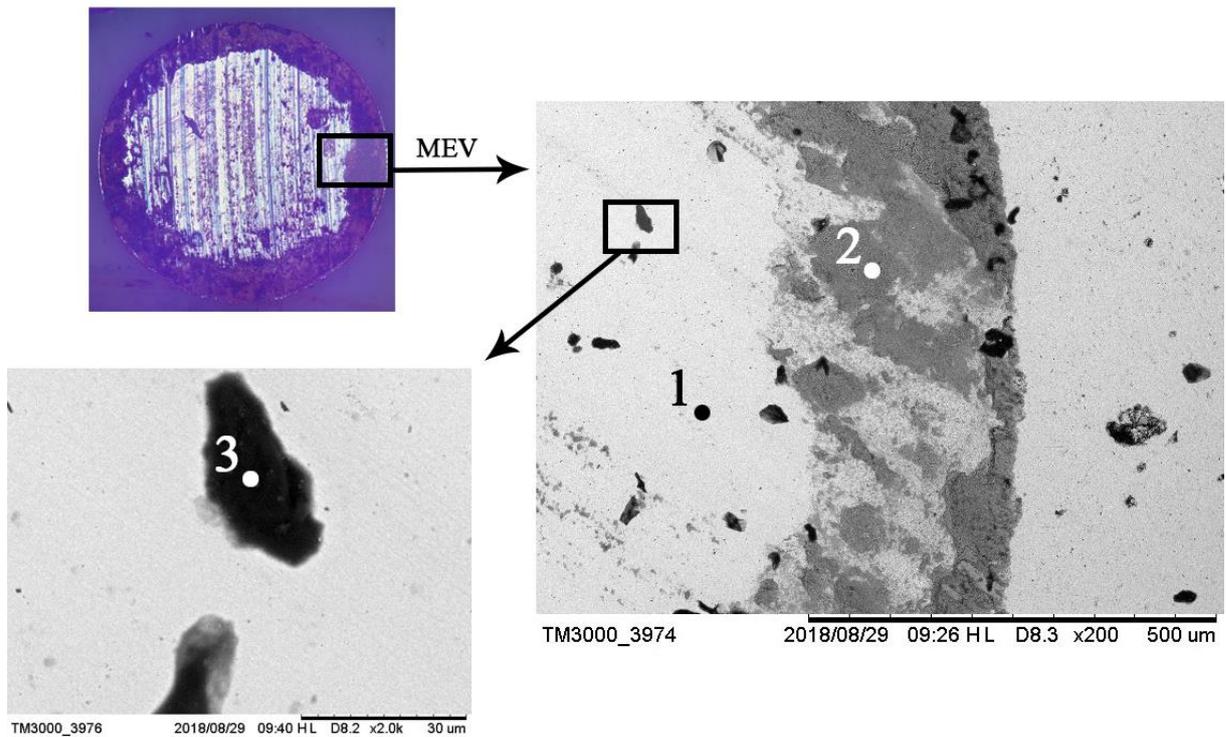
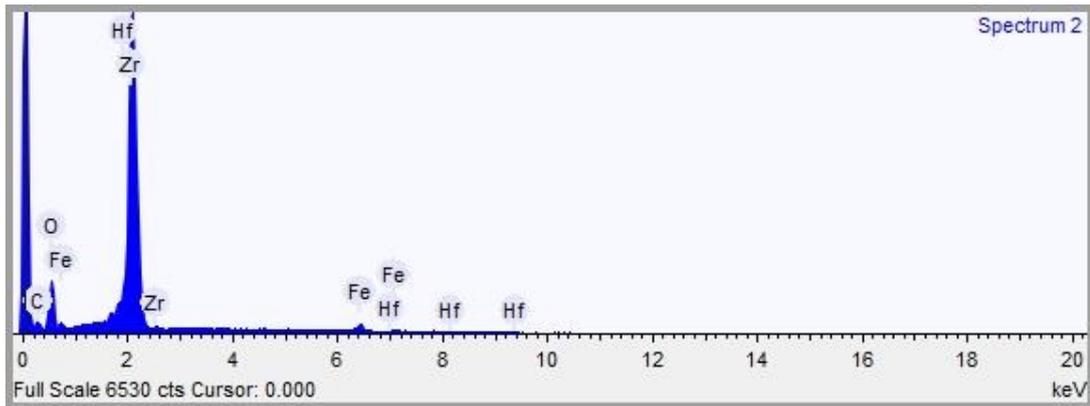


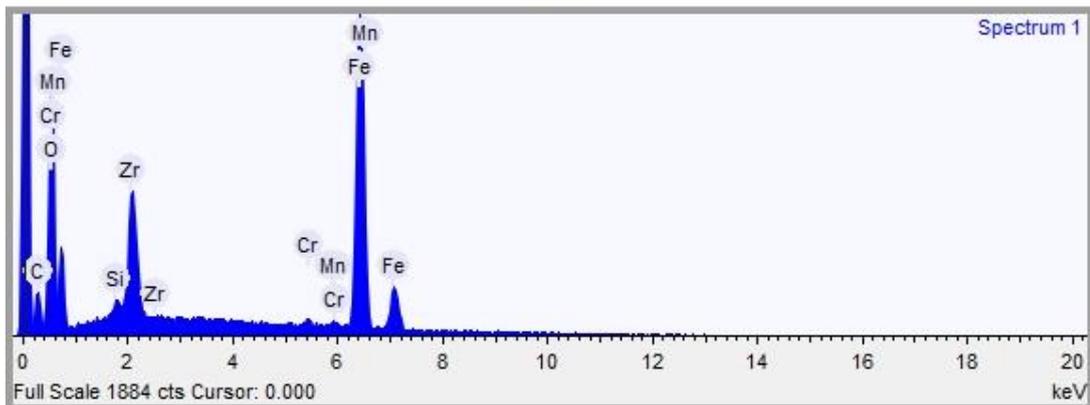
Figura 5.22 – MEV da esfera atritada contra a trilha DT-3: aumento de 200x (pontos 1 e 2), aumento de 2000x (ponto 3).

Tabela 5.4 – EDS - Porcentagem em peso dos elementos nos pontos 1, 2 e 3.

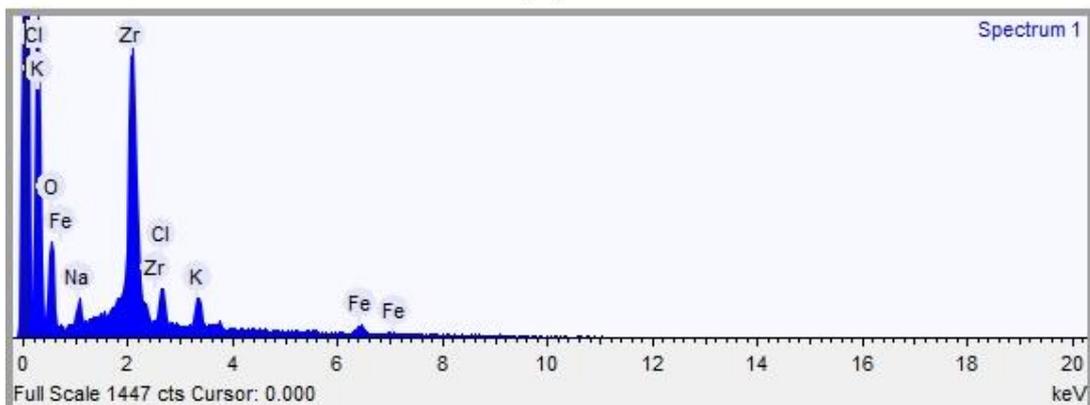
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
<b>Elementos</b>	<b>Peso [%]</b>	<b>Peso [%]</b>	<b>Peso [%]</b>
Oxigênio	27,429	21,841	40,533
Silício	–	0,227	–
Cromo	–	0,645	–
Sódio	–	–	2,604
Cloro	–	–	4,863
Magnésio	–	0,737	–
Potássio	–	–	4,093
Ferro	2,993	58,580	2,931
Zircônio	57,918	10,694	44,977
Háfnio	1,356	–	–



(a)



(b)



(c)

Figura 5.23 – Espectros dos pontos: (a) 1, (b) 2 e (c) 3.

A Figura 5.24 mostra a panorâmica das trilhas DTR200-1, DTR200-2 e DTR200-3 (discos temperados e revenidos a 200 °C). Visualmente, as trilhas DTR200-1 e DTR200-3 são muito semelhantes, no entanto, a análise ANOVA dos volumes desgastados apontou para diferença significativa entre essas duas trilhas. Observa-se, na trilha DTR200-2, uma superfície com poucas irregularidades, semelhante às demais, no entanto, a trilha aparece um pouco mais

clara, principalmente, na região central. Praticamente não há marcas de arrancamento de material – assim como nos discos temperados –, mas sim riscos característicos da abrasão como podem ser vistos na ampliação.

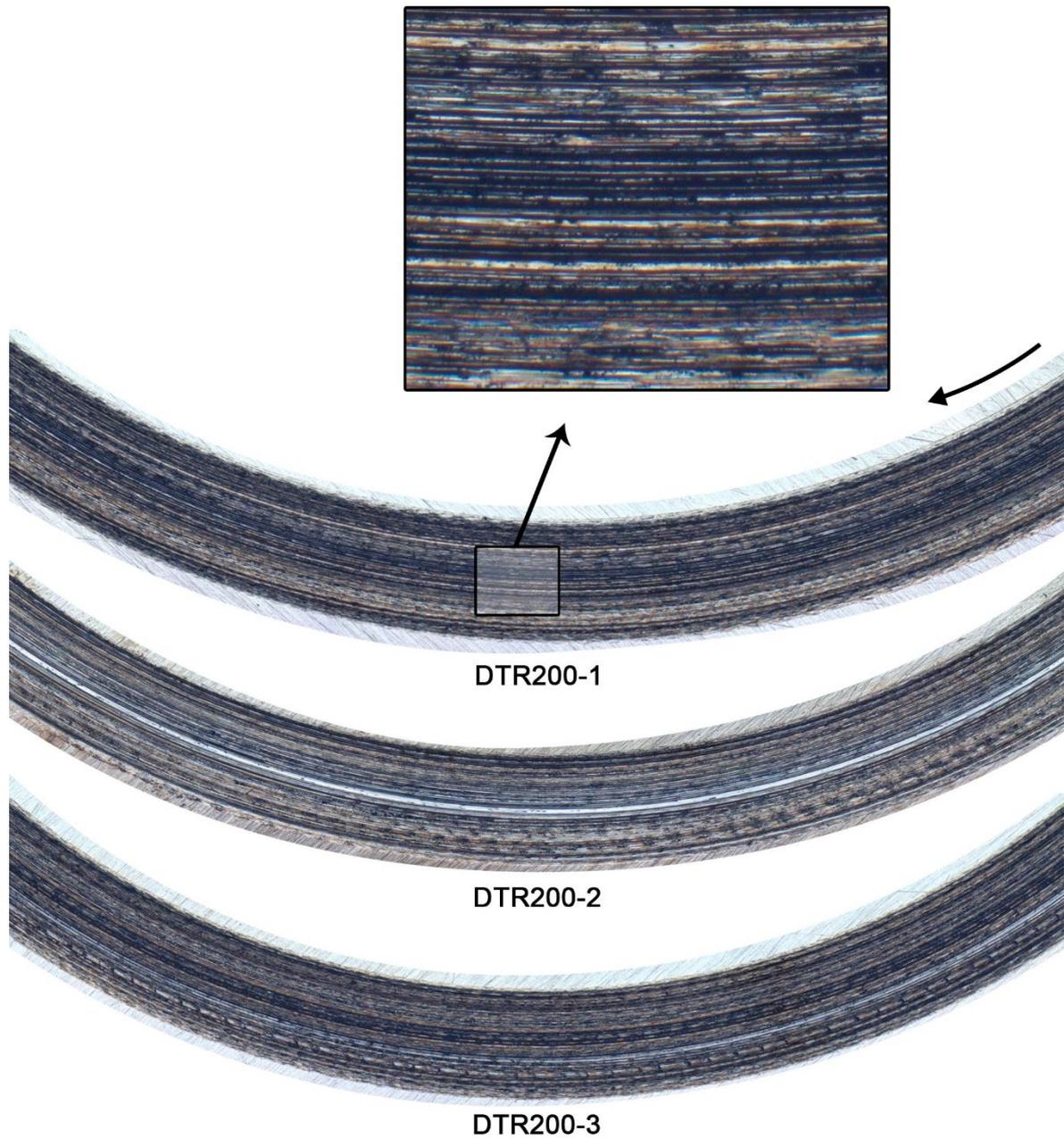


Figura 5.24 – Panorâmica das trilhas dos discos temperados e revenidos a 200 °C.

A Figura 5.25 apresenta a panorâmica das esferas atritadas contra as trilhas DTR200-1, DTR200-2 e DTR200-3. Verifica-se, além das ranhuras bem visíveis, marcas de desgaste menores do que as esferas utilizadas nos ensaios dos discos temperados, o que está de acordo

com os menores volumes desgastados encontrados. Além disso, semelhante às esferas anteriores, ocorre acúmulo de material nas bordas.

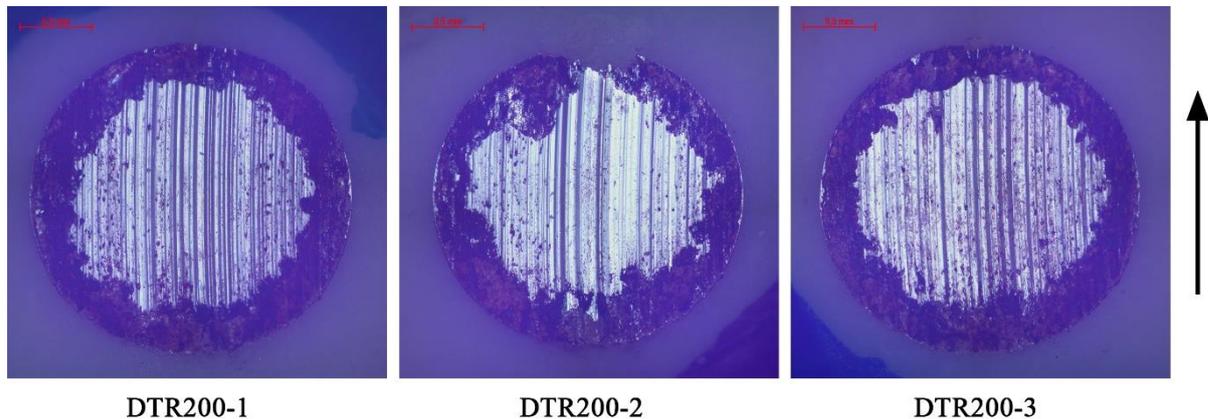


Figura 5.25 – Panorâmica das esferas atritadas contra as trilhas dos discos temperados e revenidos a 200 °C.

A Figura 5.26 mostra uma imagem panorâmica das trilhas DTR300-1, DTR300-2 e DTR300-3 (discos temperados e revenidos a 300 °C). Na trilha DTR300-1 é possível observar buracos maiores na região central do desgaste – melhor visualizados na região ampliada – o que sugere um maior arrancamento de material. Isso está de acordo com a maior rugosidade apresentada por essa trilha quando comparada às trilhas DTR300-2 e DTR300-3. A superfície da trilha DTR300-2 se apresenta visivelmente mais clara que as demais e, além das ranhuras indicando abrasão, percebe-se um acúmulo de material na parte central (ampliada), o que sugere o seu arrancamento. Essa partícula pode ter sido arrancada tanto por adesão quanto por fratura. A fratura ocorre geralmente em materiais frágeis e de maior dureza, no entanto, acredita-se que a adesão tenha atuado durante o deslizamento. Analisando a imagem, a partícula parece ter sido arrastada e compactada pela esfera, o que está de acordo com Zum Gahr, 1987a. O autor relata que, conforme a partícula se deteriora, a adesão pode resultar no arrastamento de material. É interessante notar que essa trilha, além da menor rugosidade, apresentou pouquíssimas irregularidades, como pôde ser visto nos perfis da seção 5.2.1. Desta maneira, observa-se arrancamento de material – principalmente na trilha DTR300-1 –, desgaste adesivo na trilha DTR300-2 e desgaste abrasivo em todas as trilhas, especialmente na trilha DTR300-3.

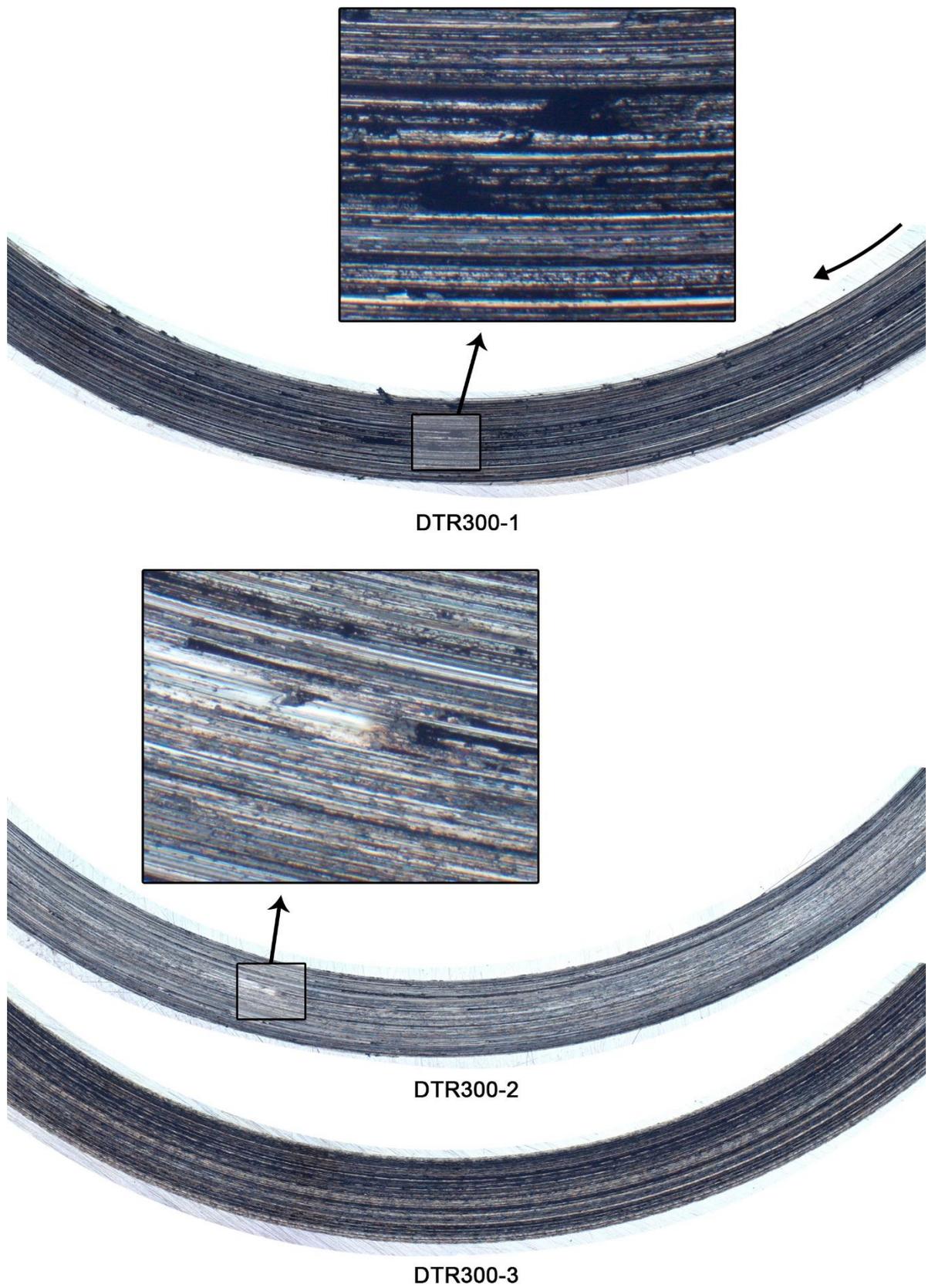


Figura 5.26 – Panorâmica das trilhas dos discos temperados e revenidos a 300 °C.

A Figura 5.27 apresenta a panorâmica das esferas atritadas contra as trilhas DTR300-1, DTR300-2 e DTR300-3. Observa-se grande diferença entre a esfera DTR300-2 e as anteriores, praticamente não há material acumulado nas bordas – apenas na extremidade inferior (borda de entrada) – nem mesmo na região central do desgaste. As ranhuras também estão presentes, no entanto, parecem menos profundas que as demais, o que está de acordo com o seu perfil mostrado na seção 5.2.2. É interessante notar que, apesar da menor dureza dos discos temperados e revenidos a 300 °C, pouco material do disco se encontra aderido à superfície dessa esfera. Acredita-se que o desgaste abrasivo tenha ocorrido e, também, o adesivo. No entanto, as partículas aderidas à esfera permaneceram por pouco tempo em sua superfície, sendo arrastadas e compactadas contra a superfície do disco, onde permaneceram grudadas. As esferas DTR300-1 e DTR300-3 ainda apresentam material acumulado nas bordas, porém em menor quantidade que as esferas dos discos temperados e dos temperados e revenidos a 200 °C.

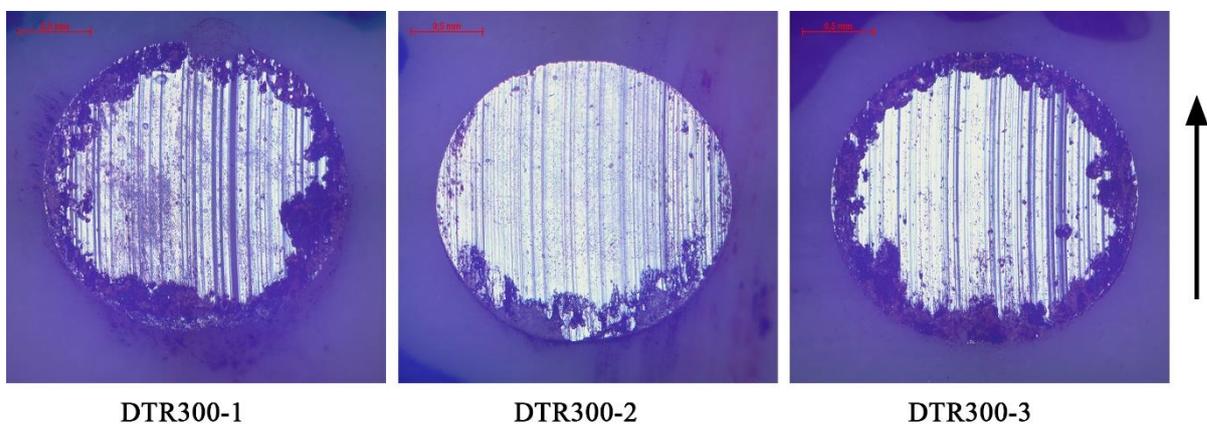


Figura 5.27 – Panorâmica das esferas atritadas contra as trilhas dos discos temperados e revenidos a 300 °C.

A panorâmica das trilhas DTR400-1, DTR400-2 e DTR400-3 (discos temperados e revenidos a 400 °C), é mostrada na Figura 5.28. A trilha DTR400-1 – muito semelhante à trilha DTR300-1 – apresenta regiões com arrancamento de material, como pode ser visto na ampliação. A trilha DTR400-2, além de mais escura, apresenta desgaste predominantemente abrasivo. A trilha DTR400-3 apresenta um desgaste semelhante a trilha DTR300-2, no entanto, mais intenso. A superfície exibe ranhuras e sulcos profundos, além disso, em alguns locais aparecem buracos e material acumulado de forma achatada (região ampliada). Deste modo, além do desgaste abrasivo e adesivo, observa-se o “plowing” que, segundo Trevisiol et al.,

2017, também é um mecanismo de desgaste. Ele se caracteriza pelos sulcos formados a partir do deslocamento de material e pela deformação plástica. Esse resultado foi encontrado pelo autor em amostras de aço 35NCD16 temperadas e revenidas. As amostras com durezas em torno de 430 – 450 HV (aproximadamente 45 HRC), apresentaram adesão e “plowing”, lembrando que a dureza média do disco temperado e revenido a 400 °C ficou em torno de 45 HRC, próxima às amostras de Trevisiol et al., 2017. É interessante notar que a microscopia da trilha DTR400-2 mostra menos irregularidades, o que está de acordo com seu perfil, mostrado na seção 5.2.1, e sua menor rugosidade quando comparada às trilhas DTR400-1 e DTR400-3. As irregularidades apresentadas na trilha DTR400-3, provavelmente, são as responsáveis pela alta rugosidade encontrada nesta trilha.

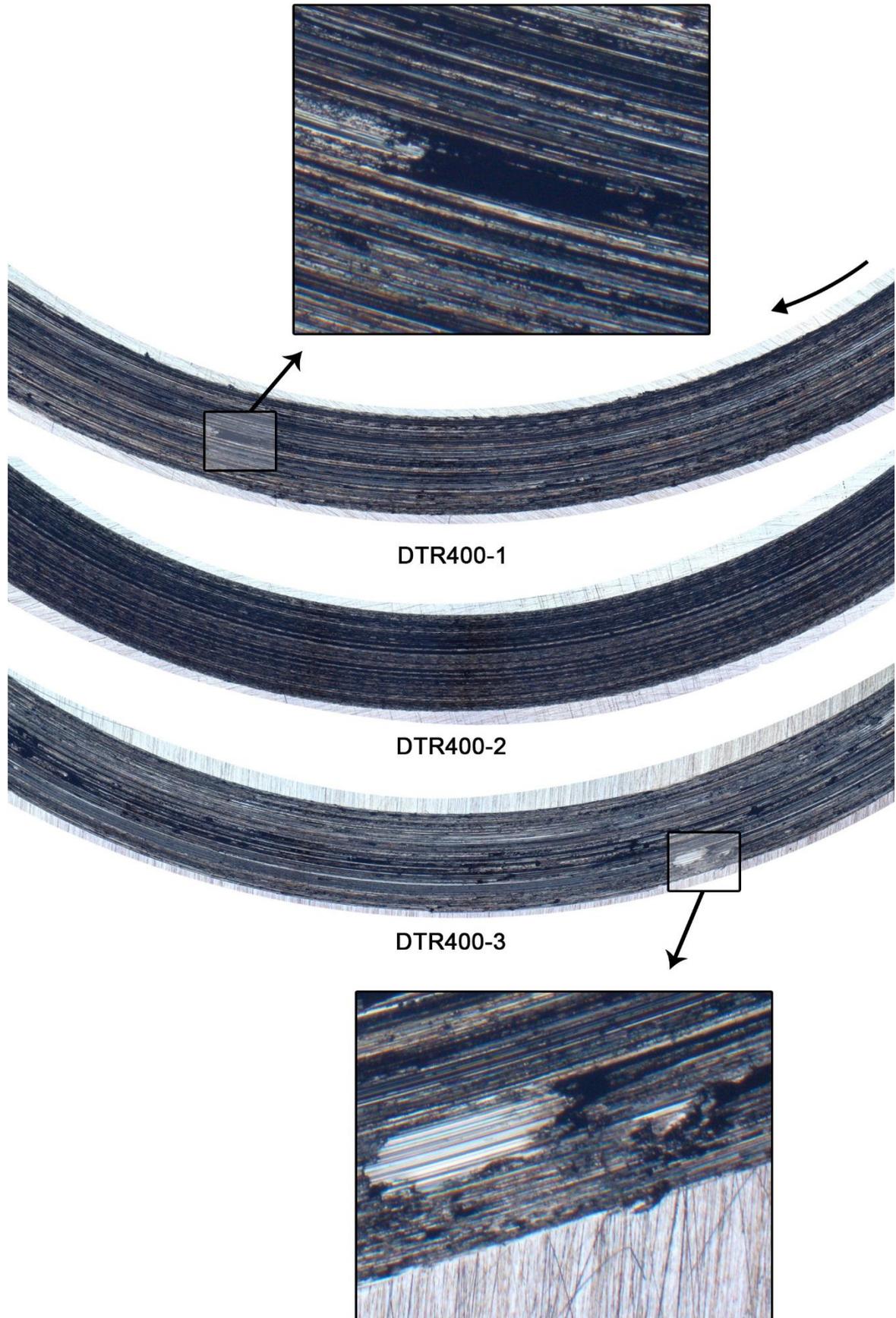


Figura 5.28 – Panorâmica das trilhas dos discos temperados e revenidos a 400 °C.

A Figura 5.29 apresenta a panorâmica das esferas atritadas contra as trilhas DTR400-1, DTR400-2 e DTR400-3. Observa-se marcas bem pronunciadas no centro do desgaste, além disso, há mais material acumulado em suas bordas do que nas esferas dos discos temperados e revenidos a 300 °C. É interessante notar que a esfera DTR400-3 parece acumular menos material na extremidade superior (borda de saída), semelhante à esfera DTR300-2, lembrando que essas duas trilhas foram semelhantes entre si.

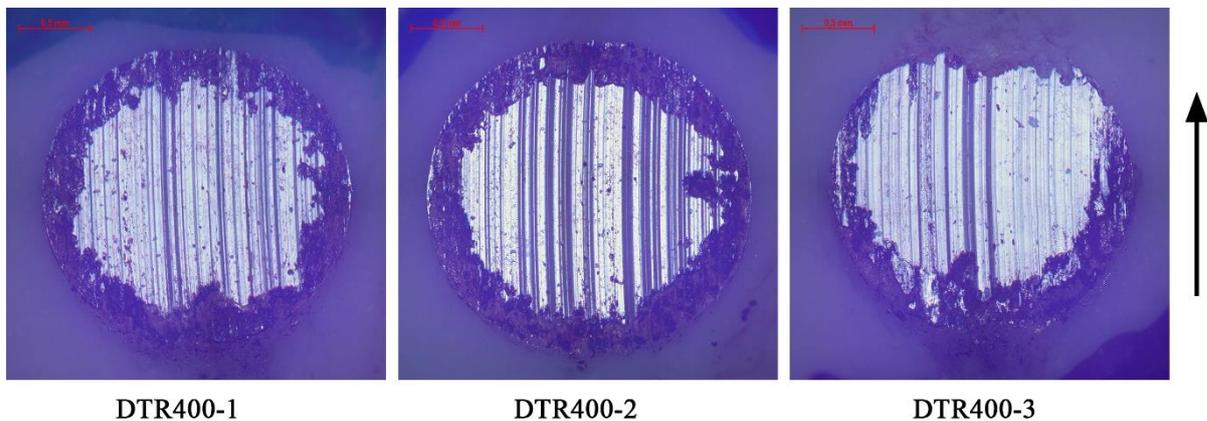


Figura 5.29 – Panorâmica das esferas atritadas contra as trilhas dos discos temperados e revenidos a 400 °C.

A panorâmica das trilhas DTR500-1, DTR500-2 e DTR500-3 (discos temperados e revenidos a 500 °C) é apresentada na Figura 5.30. As trilhas DTR500-1 e DTR500-2 não apresentam arrancamento de material, mas sim ranhuras características do desgaste abrasivo. A trilha DTR500-3 é a que mais se diferencia. A análise ANOVA dos volumes desgastados apontou para diferença significativa entre seus valores e as trilhas DTR500-1 e DTR500-2. Observa-se forte adesão e em alguns pontos fica evidente a presença de partículas arrastadas e compactadas pela esfera, como pode ser visto na região ampliada. Sasada et al., 1981, explicam o surgimento desses fragmentos, de acordo com a teoria dos autores, o material do disco fica aderido na superfície da esfera, criando uma irregularidade. Com o passar do tempo, mais material pode se unir a partícula aderida, formando uma partícula ainda maior e que, mais adiante, pode se desprender da superfície. Ainda segundo os autores, a partícula pode, não apenas ser pressionada pela carga de contato, mas também ser estendida longitudinalmente por cisalhamento, adquirindo um aspecto achatado. Além da adesão, também é possível observar ranhuras características do desgaste abrasivo e sulcos profundos – consequência do

deslocamento de material – característicos do “plowing”. Essas inúmeras irregularidades da trilha DTR500-3 são bem representadas pelo seu perfil mostrado na seção 5.2.1 e são, certamente, as responsáveis pela alta rugosidade encontrada na trilha, a maior quando comparada aos demais discos.

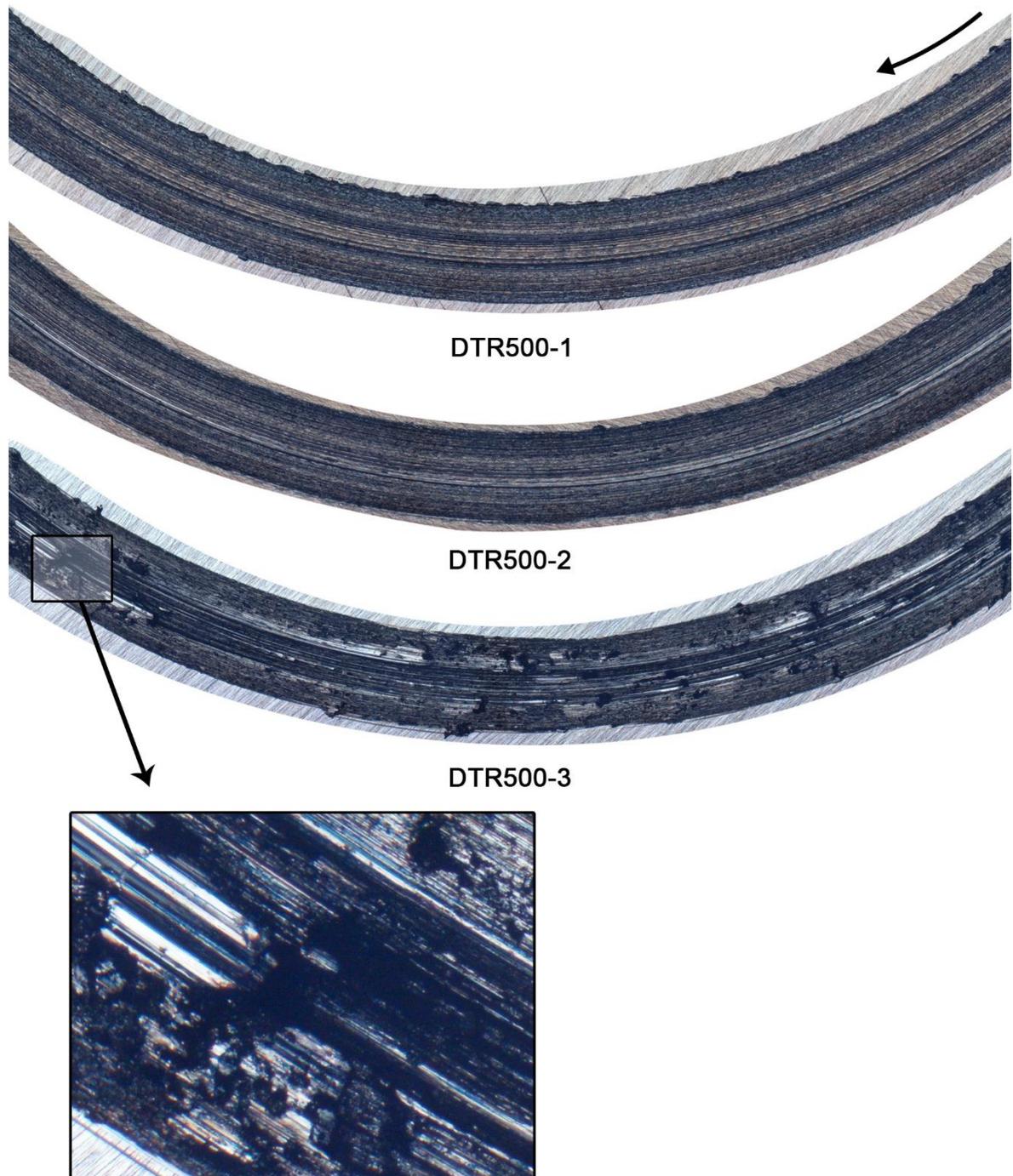


Figura 5.30 – Panorâmica das trilhas dos discos temperados e revenidos a 500 °C.

A panorâmica das esferas atritadas contra as trilhas DTR500-1, DTR500-2 e DTR500-3 está representada na Figura 5.31. Verifica-se grande diferença entre essas esferas e as demais, há pouquíssimo material acumulado nas bordas e, na região central da esfera DTR500-3, praticamente não há partículas aderidas. No centro do desgaste as marcas são bem pronunciadas. Nas esferas DTR500-1 e DTR500-3 é possível observar, também, que a marca de desgaste não é completamente circular. Isso também foi relatado por Koefender, 2017, segundo o autor, esferas atritadas contra discos de menor dureza apresentam uma marca mais alongada devido a sua maior penetração no disco. É interessante notar que, apesar da baixa dureza do disco, praticamente não houve adesão de partículas na esfera, semelhante à esfera DTR300-2. Acredita-se que – análogo ao ocorrido nos discos temperados e revenidos a 300 °C – os fragmentos aderidos à esfera tenham sido arrastados e comprimidos contra a superfície do disco, onde permaneceram grudados.

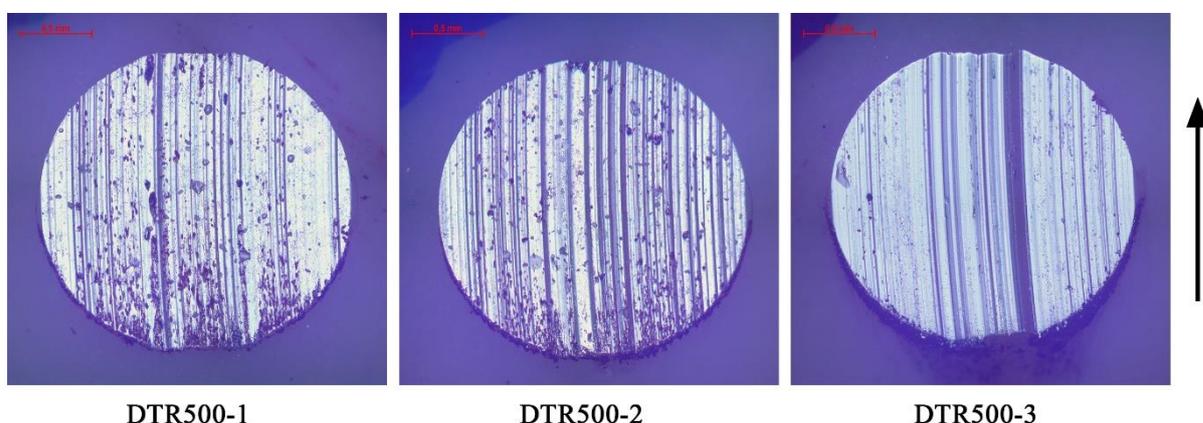


Figura 5.31 – Panorâmica das esferas atritadas contra as trilhas dos discos temperados e revenidos a 500 °C.

De maneira geral, observa-se que os principais mecanismos de desgaste envolvidos são a abrasão, a adesão e o “plowing”. Além disso, a formação de óxido nas superfícies desgastadas sugerem, também, desgaste oxidativo. Observa-se que a abrasão predomina nos discos temperados e nos temperados e revenidos a 200 °C, de maior dureza. Segundo Batchelor, 2006b, as partículas de desgaste geralmente são mais duras do que o substrato devido ao endurecimento por deformação e, por isso, são capazes de formar sulcos e ranhuras. Além disso, a adesão se intensifica conforme a temperatura do revenido aumenta e, conseqüentemente, as durezas diminuem, o que também está de acordo com Batchelor, 2006b. De acordo com o autor,

a dureza dos corpos pode reduzir o desgaste adesivo. A adesão também pode ser observada nas rugosidades, os discos temperados e revenidos a 400 °C e 500 °C foram os que apresentaram os maiores valores, provavelmente devido à grande quantidade de material removido e arrastado ao longo da trilha, o que deve interferir, também, na estabilidade do atrito, analisado na seção 5.4 a seguir.

Percebe-se, também, que partículas das esferas aderiram à superfície do disco. De fato, Batchelor, 2006a explica o arrancamento de partículas. Segundo o autor isso acontece, principalmente, nos materiais cerâmicos, no qual ocorre o descolamento de grãos que ficam perdidos como resíduos de desgaste. Acredita-se que, no decorrer do ensaio, essas partículas tenham aderido no disco. Desta maneira, nos pinos, observou-se um desgaste predominantemente abrasivo. As esferas atritadas contra os discos temperados e contra os temperados e revenidos a 200 °C apresentaram uma quantidade maior de material acumulado quando comparadas às esferas dos discos temperados e revenidos a 300 °C, 400 °C e 500 °C. Acredita-se que isso esteja relacionado à fragilidade dos discos – de alta dureza. Semelhante ao que ocorre em materiais cerâmicos, a fragilidade do material pode ter levado ao arrancamento de partículas e que, posteriormente, aderiram na esfera.

Nos ensaios dos discos temperados e revenidos a 500 °C, observa-se que as esferas têm pouco material aderido, isso sugere que, conforme a dureza dos discos diminui, a adesão de partículas tende a passar da esfera para o disco, ou seja, a esfera apenas arrasta o material pela trilha desgastada. Desta maneira, pode-se dizer que quando o disco tem maior dureza, as partículas são mais propensas a aderir na superfície do pino; quando o disco tem menor dureza, a adesão tende a ocorrer em sua própria superfície. No entanto, essa tendência não foi observada em todas as esferas dos discos temperados e revenidos a 300 °C e 400 °C, somente nas esferas DTR300-2 e DTR400-3, que apresentaram menor quantidade de material acumulado na borda de saída.

## **5.4 Atrito**

A seguir serão apresentados os gráficos dos coeficientes de atrito para cada ensaio. Também serão exibidos os gráficos com os valores médios do coeficiente de atrito e seus desvios padrão em cada trilha, assim como os valores médios e seus desvios padrão em cada disco.

A Figura 5.32 apresenta o coeficiente de atrito médio e desvios padrão em cada ensaio. Para calcular as médias, os primeiros 280 segundos foram desconsiderados, tempo necessário

para o assentamento da esfera sobre o disco. Observa-se que o atrito médio nas trilhas dos discos temperados e dos temperados e revenidos a 200 °C foram os menores e também similares. Isso está de acordo com suas superfícies de desgaste, ambas muito semelhantes, com poucas irregularidades e ranhuras distribuídas uniformemente. Esse menor coeficiente de atrito nas amostras mais duras, também foi encontrado por Totik et al., 2003 em corpos de prova de aço 4140 endurecidos por indução.

É interessante notar que um dos maiores coeficientes de atritos – trilha DTR300-2 em torno de 0,74, corresponde a uma das esferas mais limpas. Provavelmente, a adesão de partículas se concentrou no discos, aumentando o coeficiente de atrito. Isso sugere que essas partículas, além de serem arrastadas e aderirem ao disco, possivelmente, rolaram como terceiro corpo entre as superfícies. De acordo com Totik et al., 2003, a grande quantidade de detritos aumenta o coeficiente de atrito. Além disso, conforme esses fragmentos se deterioram, o arrastamento dessas partículas pela adesão também pode estar relacionado ao aumento do coeficiente de atrito [Zum Gahr, 1987a]. Os discos temperados e revenidos a 500 °C não se comportam da mesma maneira, apesar das esferas estarem com pouco material aderido, os coeficientes de atrito não foram altos.

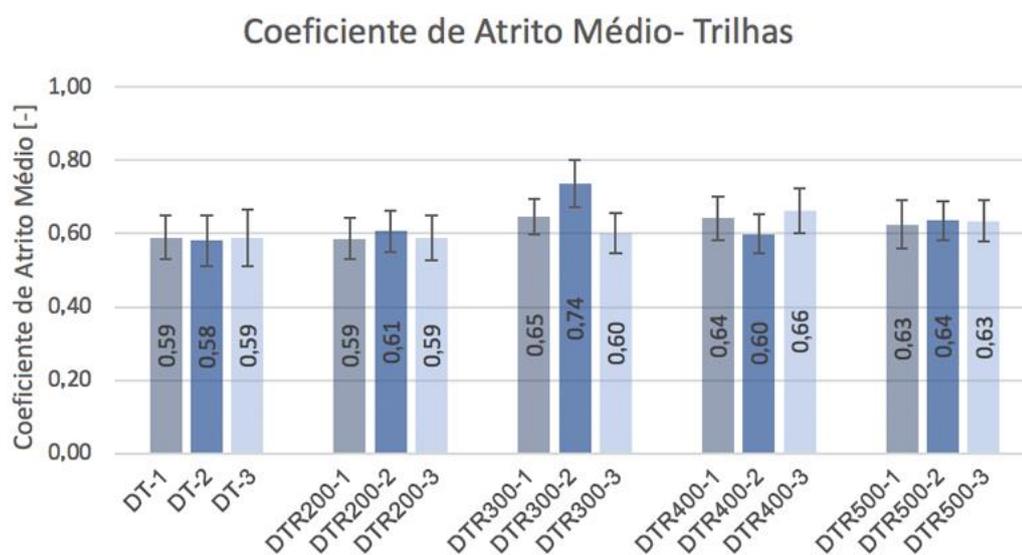


Figura 5.32 – Coeficiente de atrito médio de cada ensaio.

A Figura 5.33 e a Figura 5.34 apresentam os gráficos dos coeficientes de atrito para os ensaios dos discos temperados e dos temperados e revenidos a 200 °C. Além dos valores muito semelhantes, também se observa um comportamento similar, com grande estabilidade. Isso vai

ao encontro dos menores valores de rugosidade encontrado nas respectivas trilhas e também do desgaste predominantemente abrasivo.

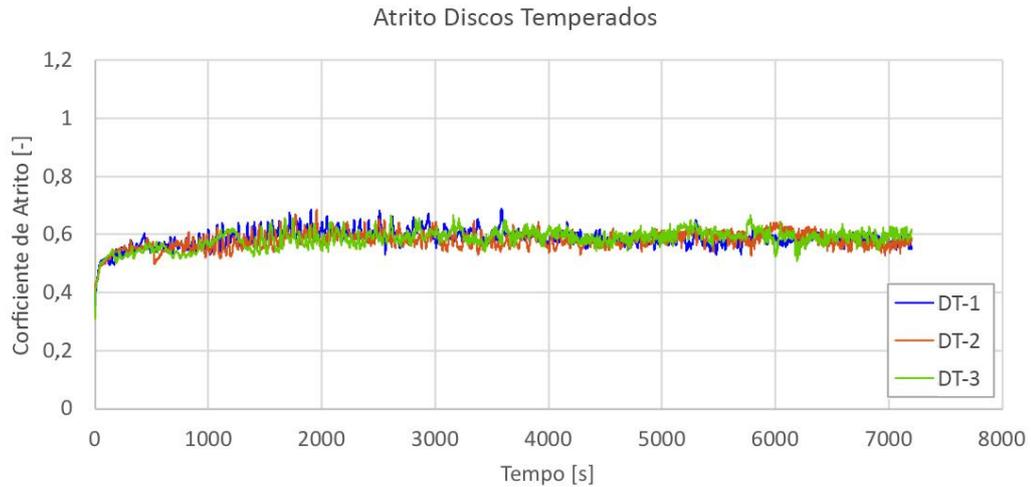


Figura 5.33 – Coeficientes de atrito dos discos temperados.

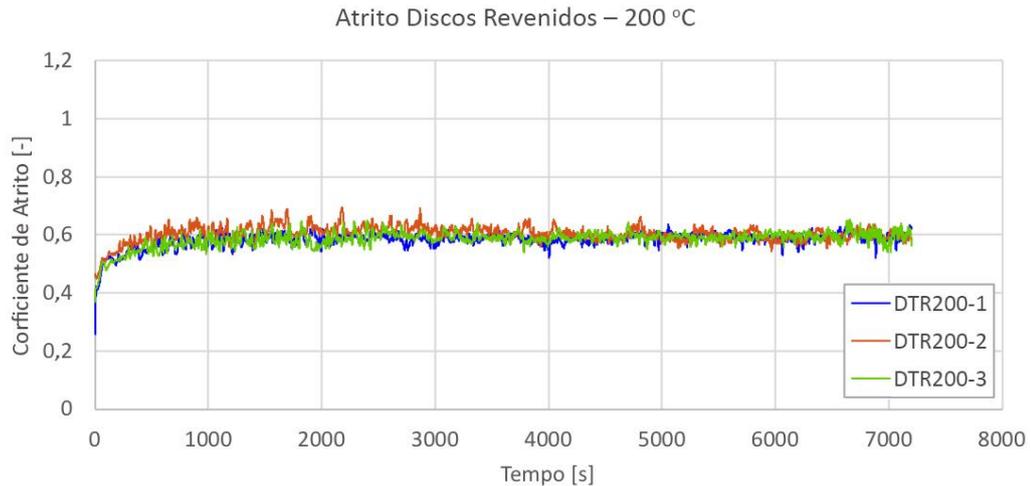


Figura 5.34 – Coeficientes de atrito dos discos temperados e revenidos a 200 °C.

Os coeficientes de atrito dos discos temperados e revenidos a 300 °C, representado na Figura 5.35, se apresentam mais instáveis e com valores diferentes entre si. Percebe-se que o coeficiente da trilha DTR300-2 é mais alto quando comparado às trilhas DTR300-1 e DTR300-3. As microscopias mostram, a trilha DTR300-2 apresenta uma coloração mais clara do que as demais, o que sugere, juntamente da análise em EDS, que houve menor formação de

óxido, o que pode ter levado a um aumento do coeficiente de atrito. O coeficiente da trilha DTR300-1, apresenta uma instabilidade maior, provavelmente devido ao arrancamento de material que pode ser visualizado em algumas regiões da trilha de desgaste.

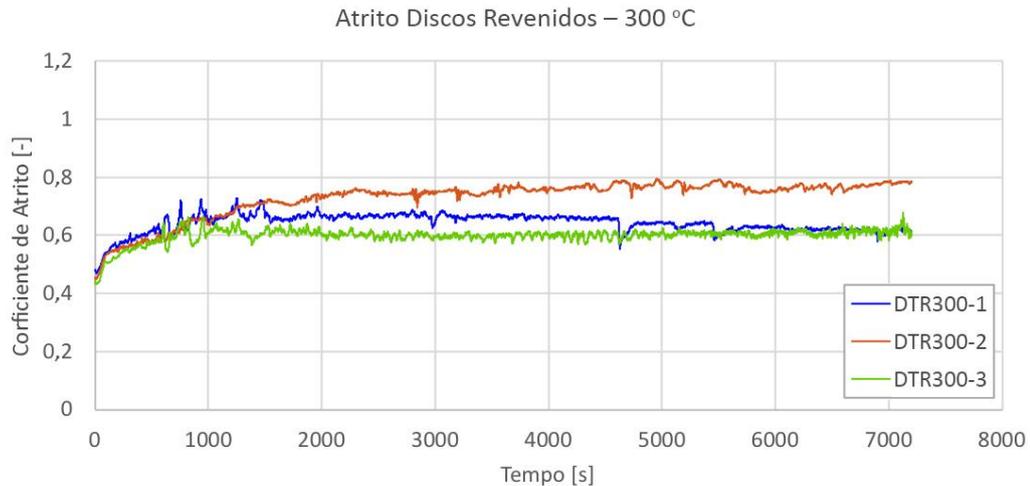


Figura 5.35 – Coeficientes de atrito dos discos temperados e revenidos a 300 °C.

A Figura 5.36 mostra os coeficientes de atrito dos discos temperados e revenidos a 400 °C. Verifica-se que são semelhantes entre si, no entanto, a trilha DTR400-3 apresenta maior instabilidade. Analisando as microscopias percebe-se que, juntamente do desgaste abrasivo, o “plowing” e a adesão também ocorreram, mecanismos com deslocamento de material e que, provavelmente, levaram a uma maior variação do coeficiente de atrito. Segundo Batchelor, 2006b, a adesão se caracteriza por um coeficiente de atrito instável. A trilha DTR400-1 também apresenta instabilidade, porém menos significativa. Ao analisar sua superfície, pode-se observar algumas regiões com remoção de material e que, possivelmente, foram responsáveis pela variação do atrito.

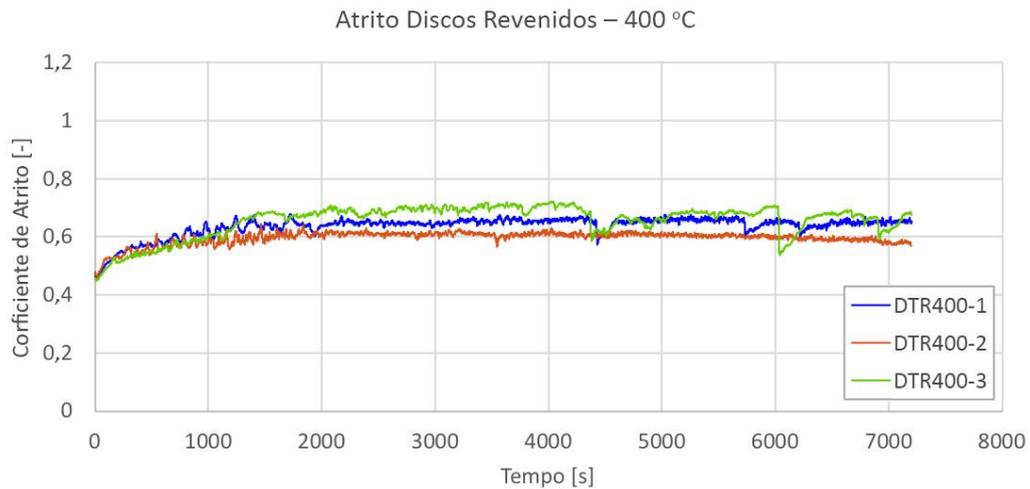


Figura 5.36 – Coeficientes de atrito dos discos temperados e revenidos a 400 °C.

Os coeficientes de atrito dos discos temperados e revenidos a 500 °C são apresentados na Figura 5.37. Observa-se que os coeficientes das trilhas DTR500-1 e DTR500-2 são semelhantes, tanto em valor quanto em estabilidade. Ao analisar essas superfícies, percebe-se que, além de serem muito similares, o principal mecanismo de desgaste atuante é o abrasivo, o que justifica a pequena variação do atrito. A que mais se diferencia é a trilha DTR500-3, com alto desgaste adesivo e deslocamento de material, como mostrou a microscopia apresentada anteriormente. Esses mecanismos, provavelmente, foram os responsáveis pela grande instabilidade do coeficiente. Além disso, essa grande variação também pode estar relacionada à alta rugosidade da região – aproximadamente 5,8  $\mu\text{m}$  – o maior valor dentre as trilhas. De acordo com Hutchings, 1992, o aumento da rugosidade da superfície pode ser responsável pelo aumento do coeficiente de atrito.

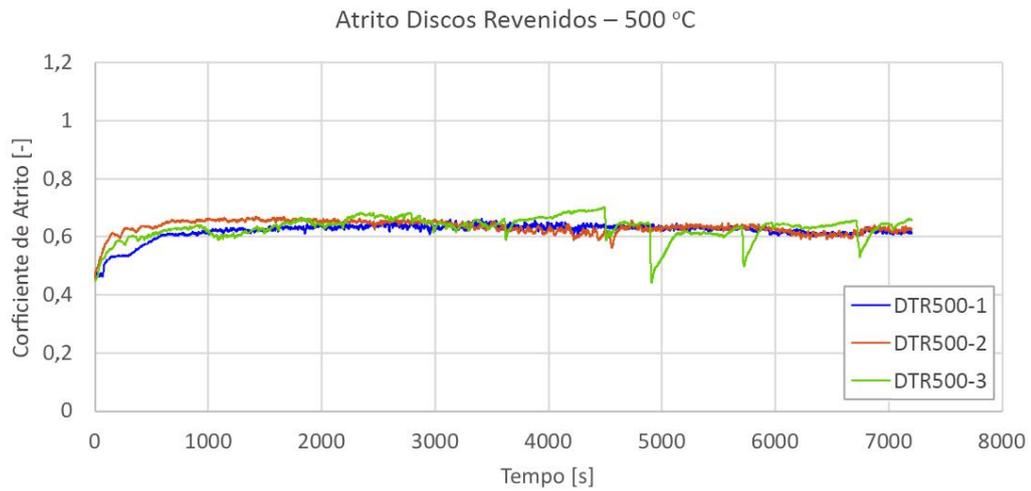


Figura 5.37 – Coeficientes de atrito dos discos temperados e revenidos a 500 °C.

A Figura 5.38 apresenta o coeficiente de atrito médio nos discos e seus desvios padrão de acordo com seus tratamentos térmicos.

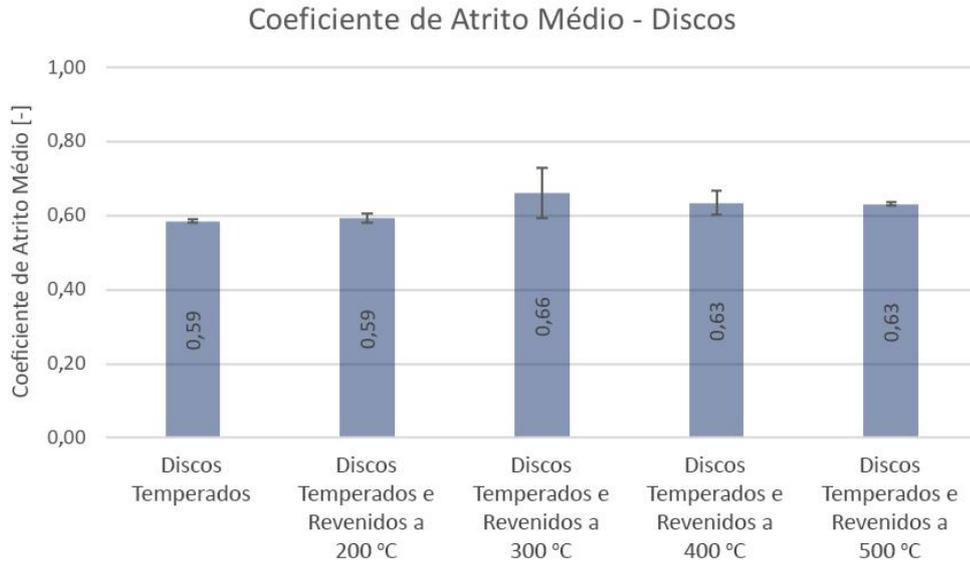


Figura 5.38 – Coeficientes de atrito médio.

## 6 CONCLUSÕES

Com relação ao comportamento tribológico do aço SAE 4140 temperado e revenido, conclui-se:

- A análise metalográfica dos discos mostrou que, conforme a temperatura do revenido aumenta, a martensita – grosseira e inicialmente sem revenimento – vai se tornando, gradativamente, mais refinada e de menor dureza;
- Embora os ensaios tenham sido feitos todos com os mesmos parâmetros, os discos apresentaram diferentes desgastes dentro de uma mesma condição de tratamento térmico, isto é, microestruturas iguais tiveram comportamentos diferentes quanto à perda de material. De acordo com Trevisiol et al., 2017 o efeito da microestrutura no desgaste diminui para cargas normais elevadas;
- A análise ANOVA não apontou diferença entre os desgastes das trilhas DT-1 e DT-2 (disco de maior dureza) quando comparados à trilha DTR500-3 (disco de menor dureza), sugerindo desgaste semelhante entre discos com microestruturas e durezas diferentes;
- O disco temperado, apesar da dureza elevada, não foi o que apresentou o menor desgaste, provavelmente devido à fragilidade do material;
- De maneira geral, a rugosidade média das trilhas desgastadas aumenta conforme a temperatura do revenido cresce e a dureza diminui. Essas irregularidades podem ser vistas, também, nos perfis do desgaste;
- As esferas apresentaram diferentes desgastes, mesmo quando atritadas contra discos de mesma microestrutura e dureza;
- A esfera com maior desgaste foi aquela atritada contra o disco temperado, de dureza mais elevada;
- Os perfis de desgaste das esferas não se apresentaram planos, mas sim com picos na região central do desgaste;
- Os perfis do desgaste das esferas e das trilhas se complementam e, nos discos temperados e nos temperados e revenidos a 200 °C e 500 °C, maiores desgastes nos discos também correspondem a maiores desgastes nas esferas;
- A análise em EDS apontou para a presença de zircônia nas trilhas desgastadas, o que indica o arrancamento de partículas da esfera que permaneceram entre as superfícies de deslizamento e, posteriormente, ficaram aderidas ao disco;

- Os principais mecanismos de desgaste foram a abrasão e a adesão. Observou-se também o “plowing” que, segundo alguns autores, também é um mecanismo de desgaste. Além disso, a formação de óxido nas superfícies desgastadas sugere o desgaste oxidativo;
- O desgaste abrasivo predominou nos discos temperados e nos temperados e revenidos a 200 °C, cujas esferas apresentaram grande acúmulo de material nas bordas, sugerindo a troca de material entre as superfícies;
- As esferas dos discos temperados e revenidos a 500 °C praticamente não apresentaram material acumulado na marca de desgaste, o que indica que, conforme a dureza do disco diminui, as partículas provenientes do desgaste tendem a ficar em sua própria superfície;
- Os discos temperados e os temperados e revenidos a 200 °C – mais duros – apresentaram, além dos menores coeficientes de atrito médio, coeficientes mais estáveis;
- As trilhas com maior arrancamento de material – DTR300-1, DTR400-1, DTR400-3 e DTR500-3 – apresentaram as maiores rugosidades e coeficientes de atrito mais instáveis, o que está de acordo com Batchelor, 2006b. Segundo o autor, a adesão se caracteriza por um coeficiente de atrito instável.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Após o presente trabalho, sugere-se:

- Realizar ensaios com cargas menores para avaliar se há maior influência da microestrutura no comportamento do desgaste dos materiais;
- Desenvolver uma metodologia para observar o momento em que os mecanismos de desgaste começam a atuar em cada ensaio.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society for Testing and Materials, **ASTM G99: standard test method for wear testing with a pin-on-disc apparatus**, ASTM, 5 p., 2004.

ASM Handbook, **ASM HANDBOOK - Heat Treating**, ed. 4, 1991.

Batchelor, G.W.S. e A.W., Abrasive, Erosive and Cavitation Wear, **Engineering Tribology**. p. 501–551. 2006a.

Batchelor, G.W.S. e A.W., Adhesion and Adhesive Wear, **Engineering Tribology**. 2006b.

Batchelor, G.W.S. e A.W., Corrosive and oxidative wear, **Engineering Tribology**. p. 637–656. 2006c.

Batchelor, G.W.S. e A.W., Fatigue Wear, **Engineering Tribology**. 2006d.

Brown, H.R. e T., Friction, Lubrication, and Wear, **Mechanical Design Handbook**. 2006.

Chiaverini, V., **Aços e ferros fundidos**, ed. 7, São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1998.

Colpaert, H., **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**, ed. 4, São Paulo, Editora Blucher, 2008.

Elhadi, A., Bouchoucha, A., Jomaa, W., Zedan, Y., Schmitt, T. e Bocher, P., Study of Surface Wear and Damage Induced by Dry Sliding of Tempered AISI 4140 Steel against Hardened AISI 1055 Steel Tribology in Industry, **Tribology in Industry**, vol. 38, ed. 4, p.475–485, 2016.

Fernandes, G.P., Jr, W.H., 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, p.1384–1391, 2013.

Zum Gahr, K.-H., Classification of Wear Processes, **Microstructure and Wear of Materials**. p. 80–131. 1987a.

Zum Gahr, K.-H., Grooving wear, **Microstructure and Wear of Materials**. p. 132–350. 1987b.

Zum Gahr, K.-H., Introduction, **Microstructure and Wear of Materials**. p. 1–7. 1987c.

Giordani, T., **Avaliação metalúrgica e mecânica de aços cementados e temperados de forma convencional e intensiva**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2012.

Handbook, A., **ASM HANDBOOK - Metallography and Microstructures**, vol. 9, p.2733, 2004.

Handbook, A., **ASM HANDBOOK - Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys**, ed. 1, 1991.

Holmberg, K. e Erdemir, A., Influence of tribology on global energy consumption , costs and emissions, **Springer**, vol. 5, ed. 3, p.263–284, 2017.

Hutchings, I.M., **Tribology - Friction and Wear of Engineering Materials**, p.278, 1992.

Kato, K., **Wear - Materials, Mechanisms and Practice**, 1996.

Kato, K., Wear in relation to friction - A review, **Wear**, vol. 241, ed. 2, p.151–157, 2000.

Kato, K. e Adachi, K., Wear Mechanisms, **Modern Tribology Handbook**. p. 1760. 2001.

Koefender, A., **Efeito da Dureza Sobre as Propriedades do Par Tribológico Formado por Aço SAE 1045 e Óxido de Zircônio**, UFRGS. 2017.

Lancaster, J.K., **The Formation of Surface Films at the Transition between Mild and Severe Metallic Wear**, 1963.

Lee, P.M. e Carpick, R., **Tribology Opportunities For Enhancing America's Energy Efficiency**, 2017.

Lee, W. e Su, T., Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 high-strength alloy steel under quenched and tempered conditions, **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 87, p.198–206, 1999.

Lorenzo-martin, C. e Ajayi, O.O., Rapid surface hardening and enhanced tribological performance of 4140 steel by friction stir processing, **Wear**, vol. 332–333, p.962–970, 2015.

Myers, B. a., Graphical User Interface Programming, **Tribology and Interface Engineering Series**, vol. 44, ed. 1, p.1–12, 2004.

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

Nunura, C.R.N., **Correlação Numérico-Experimental da Microestrutura, Taxa de Resfriamento e Características Mecânicas do aço ABNT 1045**, UFRGS. 2005.

Oliveira, C.G. e Silva, I.P.P., Os Estudos Tribológicos no Ensino de Engenharia Mecânica, **Revista de Ensino de Engenharia**, p.3–10, 2015.

Pavlak, R.P., Poletto, J.C., Barros, L.Y., Ferreira, N.F. e Neis, P.D., **Wear**, friction and NVH characterization using a laboratory-scale, 2018.

Sasada, T., Norose, S. e Mishina, H., The Behavior of Adhered Fragments Interposed Between Sliding Surfaces and the Formation Process of Wear Particles, **Journal of Lubrication Technology**, vol. 103, ed. April 1981, 1981.

Sebhi, A. e Douib, N., Wear Behavior of a Low-Alloy (AISI-SAE) 4140 Steel after Quenching and Tempering, **Materials Today: Proceedings**, vol. 3, ed. 9, p.2841–2852, 2016.

Singh, K., Khatirkar, R.K. e Sapate, S.G., Microstructure evolution and abrasive wear behavior of D2 steel, **Wear**, vol. 328–329, p.206–216, 2015.

Tang, L., Gao, C., Huang, J., Zhang, H. e Chang, W., Tribology International Dry sliding friction and wear behaviour of hardened AISI D2 tool steel with different hardness levels, **Tribology International**, vol. 66, p.165–173, 2013.

Totik, Y., Sadeler, R., Altun, H. e Gavgali, M., The effects of induction hardening on wear properties of AISI 4140 steel in dry sliding conditions, **Materials & Design**, vol. 24, ed. 1, p.25–30, 2003.

Totten, G.E., **Steel Heat Treatment - Metallurgy and Technologies**, ed. 2 G. E. Totten, ed., Portland. 2007.

Trevisiol, C., Jourani, A. e Bouvier, S., Effect of hardness, microstructure, normal load and abrasive size on friction and on wear behaviour of 35NCD16 steel, **Wear**, vol. 388–389, ed. May, p.101–111, 2017.

Ulutun, M., Celik, O.N., Gasan, H. e Er, U., Effect of Different Surface Treatment Methods on the Friction and Wear Behavior of AISI 4140 Steel, **Journal of Materials Science & Technology**, vol. 26, ed. 3, p.251–257, 2010.

Verbeek, H.J., Tribological systems and wear factors, **Wear**, vol. 56, ed. 1, p.81–92, 1979.

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.

Wang, Y., Lei, T. e Liu, J., Tribo-metallographic behavior of high carbon steels in dry sliding, **Wear**, vol. 231, ed. 1, p.12–19, 1999.

Xu, L., Fan, X., Wei, S., Liu, D., Zhou, H., Zhang, G. e Zhou, Y., Microstructure and wear properties of high-speed steel with high molybdenum content under rolling-sliding wear, **Tribology International**, vol. 116, p.39–46, 2017.

Yang, J., Wang, T.S., Zhang, B. e Zhang, F.C., Sliding wear resistance and worn surface microstructure of nanostructured bainitic steel, **Wear**, vol. 282–283, p.81–84, 2012.

## APÊNDICE A – Metalografias



Figura A.1 – Microestrutura dos discos temperados, aumento de 500x.



Figura A.2 – Microestrutura dos discos temperados e revenidos a 200 °C, aumento de 500x.



Figura A.3 – Microestrutura dos discos temperados e revenidos a 300 °C, aumento de 500x.



Figura A.4 – Microestrutura dos discos temperados e revenidos a 400 °C, aumento de 500x.



Figura A.5 – Microestrutura dos discos temperados e revenidos a 500 °C, aumento de 500x.

## APÊNDICE B – MEV/EDS Discos e esferas

### B.1 MEV/EDS Discos

#### B.1.1 Discos temperados

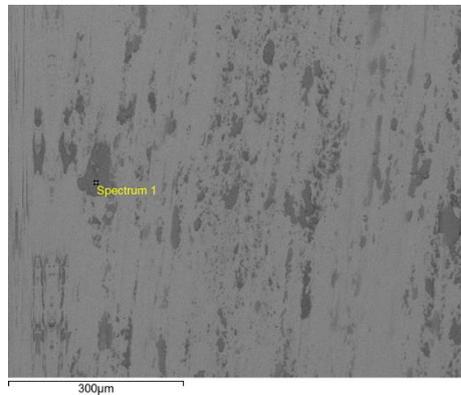


Figura B.1 – Análise região escura discos temperados.

Tabela B.1 – Análise região escura discos temperados.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	26,068	0,399	36,389
Silício	0,151	0,041	0,120
Cromo	0,510	0,068	0,219
Manganês	0,367	0,092	0,149
Ferro	45,988	0,406	18,391
Zircônio	3,294	0,158	0,806

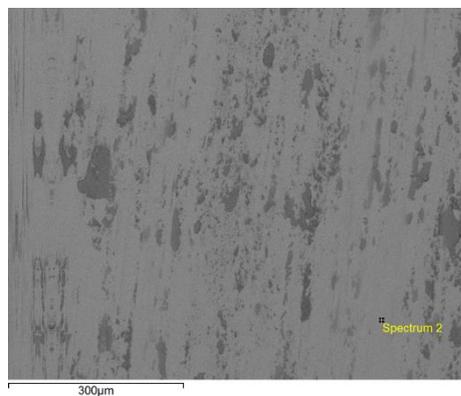


Figura B.2 – Análise região clara discos temperados.

Tabela B.2 – Análise região clara discos temperados.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Silício	0,355	0,048	0,326
Cromo	0,577	0,076	0,286
Manganês	0,553	0,106	0,260
Ferro	66,711	0,419	30,817

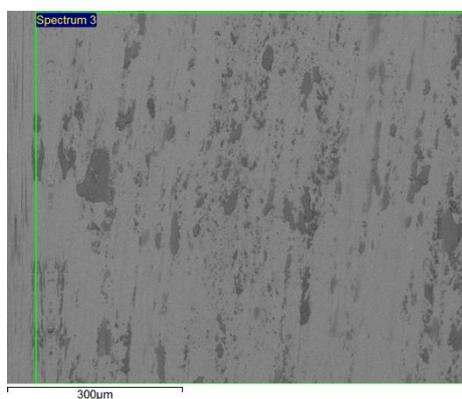


Figura B.3 – Análise da superfície discos temperados.

Tabela B.3 – Análise da superfície discos temperados.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	5,723	0,336	15,801
Silício	0,228	0,063	0,358
Cromo	0,895	0,096	0,760
Manganês	0,851	0,132	0,685
Ferro	88,096	0,575	69,678
Zircônio	0,862	0,184	0,417

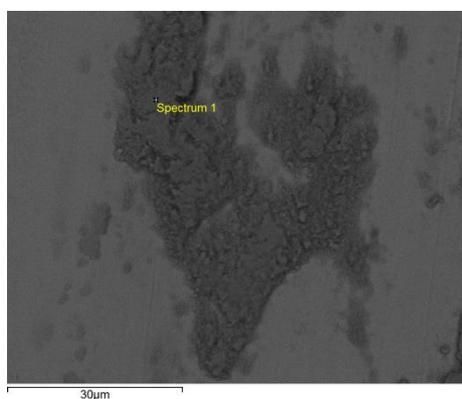


Figura B.4 – Análise região escura discos temperados.

Tabela B.4 – Análise região escura discos temperados.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	23,013	0,456	30,934
Silício	0,306	0,047	0,234
Cromo	0,454	0,077	0,188
Manganês	0,325	0,106	0,127
Ferro	45,305	0,466	17,446
Zircônio	2,389	0,169	0,563

### B.1.2 Discos temperados e revenidos a 200 °C

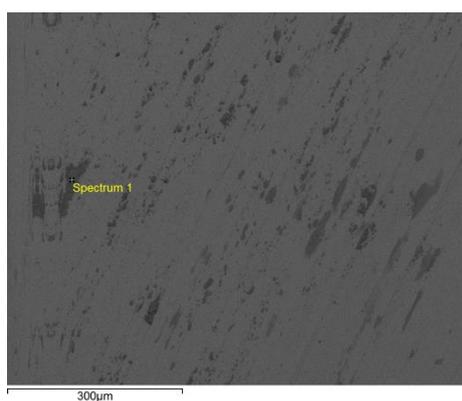


Figura B.5 – Análise região escura discos temperados e revenidos a 200 °C.

Tabela B.5 – Análise região escura discos temperados e revenidos a 200 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	24,991	0,480	32,746
Silício	0,218	0,047	0,163
Cromo	0,350	0,077	0,141
Manganês	0,431	0,105	0,164
Ferro	43,115	0,462	16,184
Zircônio	2,190	0,166	0,503

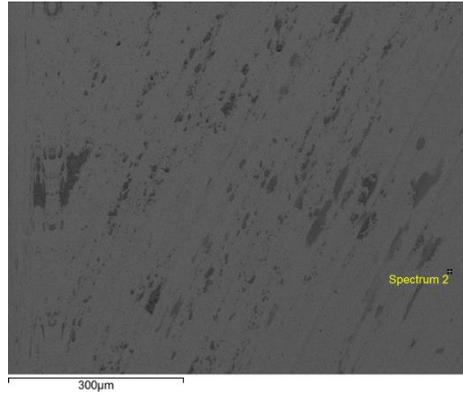


Figura B.6 – Análise região clara discos temperados e revenidos a 200 °C.

Tabela B.6 – Análise região clara discos temperados e revenidos a 200 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Silício	0,217	0,067	0,285
Cromo	1,070	0,108	0,758
Manganês	0,672	0,150	0,451
Ferro	83,987	0,539	55,401

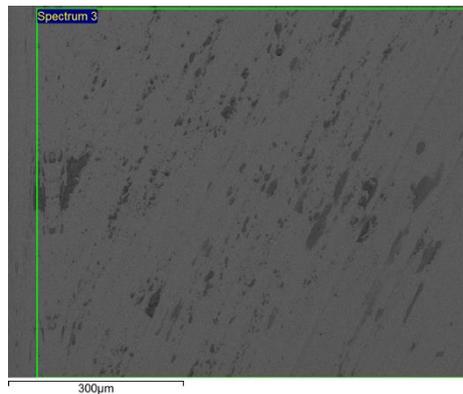


Figura B.7 – Análise da superfície discos temperados e revenidos a 200 °C.

Tabela B.7 – Análise da superfície discos temperados e revenidos a 200 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Cromo	0,963	0,115	0,860
Manganês	0,977	0,161	0,825
Ferro	92,524	0,475	76,915

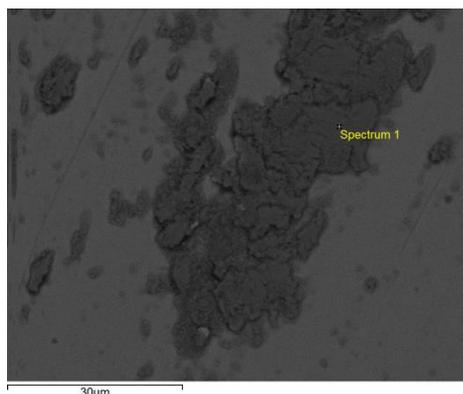


Figura B.8 – Análise região escura discos temperados e revenidos a 200 °C.

Tabela B.8 – Análise região escura discos temperados e revenidos a 200 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	25,324	0,501	31,482
Silício	0,288	0,048	0,204
Cromo	0,435	0,080	0,167
Ferro	39,299	0,462	13,996
Zircônio	2,250	0,171	0,491

### B.1.3 Discos temperados e revenidos a 300 °C

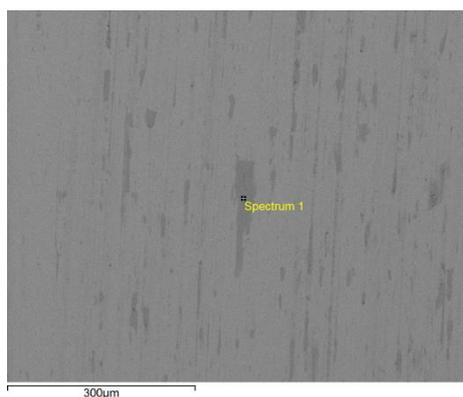


Figura B.9 – Análise região escura discos temperados e revenidos a 300 °C.

Tabela B.9 – Análise região escura discos temperados e revenidos a 300 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	22,513	0,491	28,184
Silício	0,240	0,044	0,171
Cromo	0,412	0,077	0,159
Manganês	0,352	0,100	0,128
Ferro	41,121	0,453	14,748
Zircônio	1,627	0,150	0,357

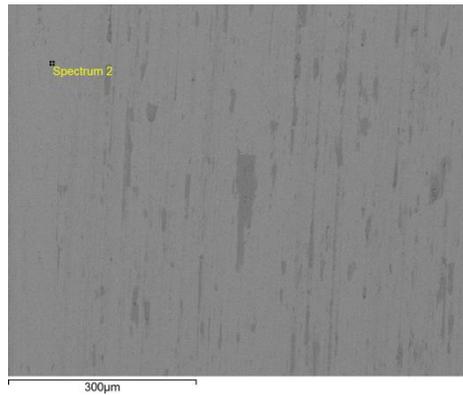


Figura B.10 – Análise região clara discos temperados e revenidos a 300 °C.

Tabela B.10 – Análise região clara discos temperados e revenidos a 300 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Silício	0,345	0,051	0,290
Cromo	0,629	0,087	0,285
Manganês	0,552	0,120	0,237
Ferro	61,105	0,462	25,807

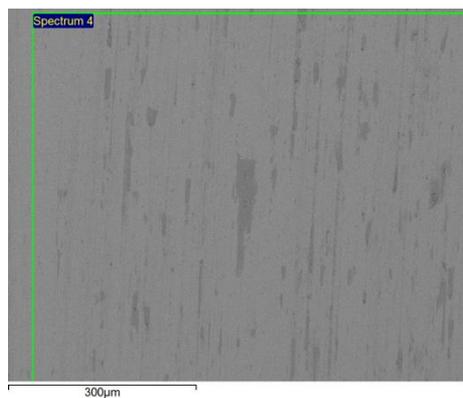


Figura B.11 – Análise da superfície discos temperados e revenidos a 300 °C.

Tabela B.11 – Análise da superfície discos temperados e revenidos a 300 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Silício	0,318	0,074	0,503
Cromo	1,041	0,114	0,890
Manganês	0,659	0,161	0,534
Ferro	91,078	0,506	72,514

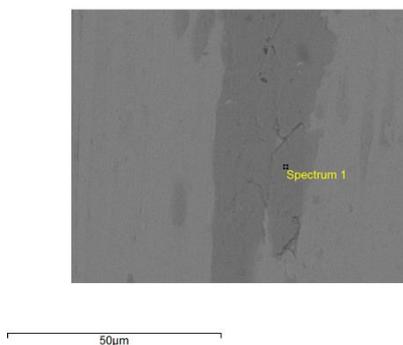


Figura B.12 – Análise região escura discos temperados e revenidos a 300 °C.

Tabela B.12 – Análise região escura discos temperados e revenidos a 300 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	21,064	0,519	27,980
Silício	0,336	0,051	0,254
Cromo	0,421	0,086	0,172
Manganês	0,380	0,115	0,147
Ferro	45,676	0,523	17,381
Zircônio	1,802	0,172	0,420

#### B.1.4 Discos temperados e revenidos a 400 °C

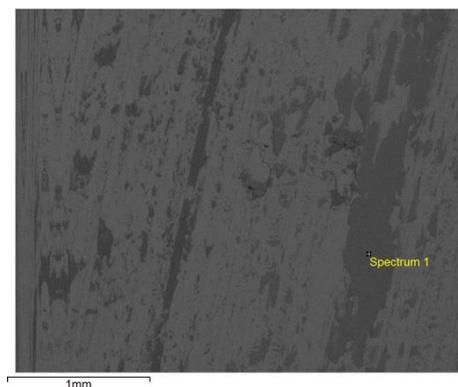


Figura B.13 – Análise região escura discos temperados e revenidos a 400 °C.

Tabela B.13 – Análise região escura discos temperados e revenidos a 400 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	24,836	0,482	49,891
Cromo	0,668	0,113	0,413
Ferro	65,156	0,636	37,497
Zircônio	5,505	0,285	1,940

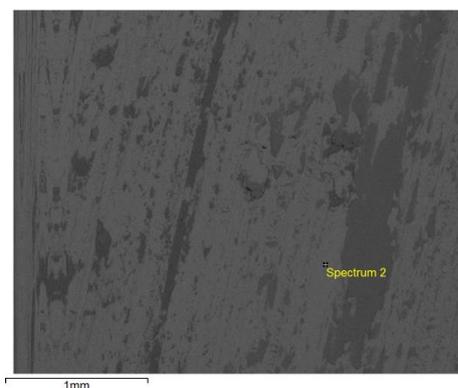


Figura B.14 – Análise região clara discos temperados e revenidos a 400 °C.

Tabela B.14 – Análise região clara discos temperados e revenidos a 400 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Silício	0,340	0,077	0,538
Cromo	0,847	0,114	0,724
Manganês	0,780	0,160	0,631
Ferro	91,123	0,501	72,531

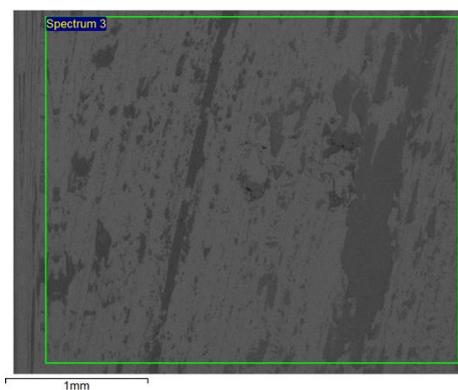


Figura B.15 – Análise da superfície discos temperados e revenidos a 400 °C.

Tabela B.15 – Análise da superfície discos temperados e revenidos a 400 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	8,686	0,441	24,930
Cromo	0,896	0,119	0,791
Manganês	0,659	0,167	0,551
Ferro	87,817	0,741	72,202
Zircônio	1,776	0,251	0,894

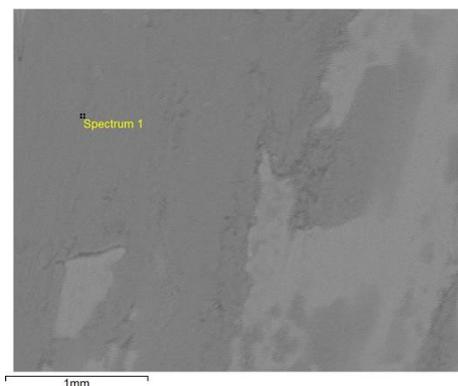


Figura B.16 – Análise região escura discos temperados e revenidos a 400 °C.

Tabela B.16 – Análise região escura discos temperados e revenidos a 400 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	23,509	0,503	46,410
Cromo	0,549	0,114	0,334
Manganês	0,579	0,152	0,333
Ferro	65,707	0,673	37,161
Zircônio	4,217	0,280	1,460

### B.1.5 Discos temperados e revenidos a 500 °C

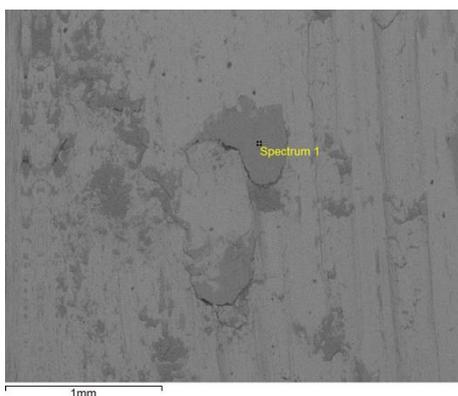


Figura B.17 – Análise região escura discos temperados e revenidos a 500 °C.

Tabela B.17 – Análise região escura discos temperados e revenidos a 500 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	17,821	0,462	32,351
Cromo	0,641	0,100	0,358
Manganês	0,431	0,137	0,228
Ferro	63,816	0,646	33,187
Cobalto	0,063	0,271	0,031
Zircônio	3,720	0,230	1,184

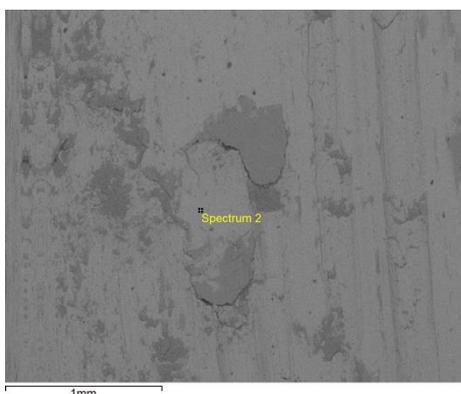


Figura B.18 – Análise região clara discos temperados e revenidos a 500 °C.

Tabela B.18 – Análise região clara discos temperados e revenidos a 500 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	6,858	0,460	11,376
Silício	0,218	0,055	0,206
Cromo	0,661	0,091	0,337
Manganês	0,661	0,128	0,319
Ferro	65,201	0,645	30,986
Zircônio	0,816	0,164	0,238

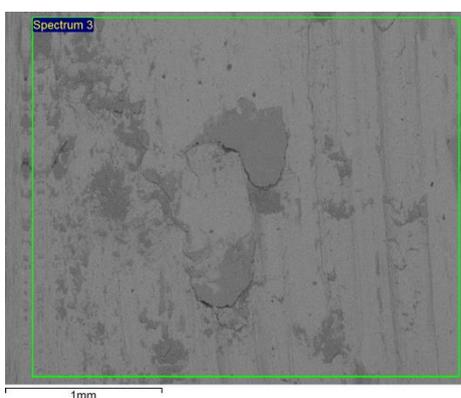


Figura B.19 – Análise da superfície discos temperados e revenidos a 500 °C.

Tabela B.19 – Análise da superfície discos temperados e revenidos a 500 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	6,519	0,397	18,275
Silício	0,246	0,073	0,393
Cromo	0,923	0,116	0,796
Manganês	0,686	0,160	0,560
Ferro	87,538	0,682	70,295
Zircônio	1,722	0,222	0,846

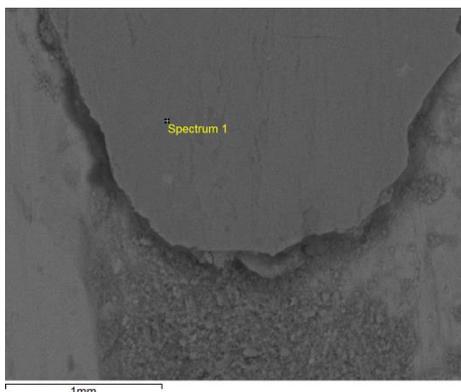


Figura B.20 – Análise região escura discos temperados e revenidos a 500 °C.

Tabela B.20 – Análise região escura discos temperados e revenidos a 500 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	17,556	0,497	25,310
Silício	0,218	0,053	0,179
Cromo	0,445	0,093	0,197
Manganês	0,484	0,123	0,203
Ferro	51,534	0,579	21,284
Zircônio	2,596	0,199	0,656

## B.2. MEV/EDS Esferas

### B.2.1 Esferas Discos temperados

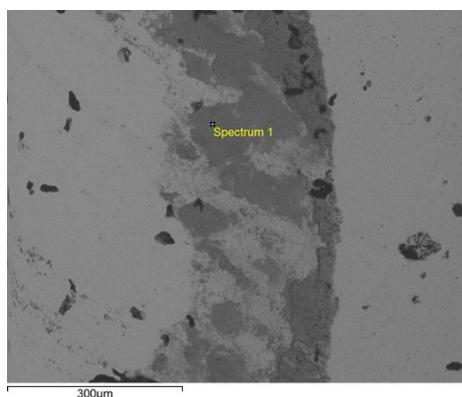


Figura B.21 – Análise região acinzentada esfera discos temperados.

Tabela B.21 – Análise região acinzentada esfera discos temperados.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	21,841	0,485	43,051
Silício	0,227	0,074	0,255
Cromo	0,645	0,118	0,391
Manganês	0,737	0,154	0,423
Ferro	58,580	0,627	33,079
Zircônio	10,694	0,336	3,697

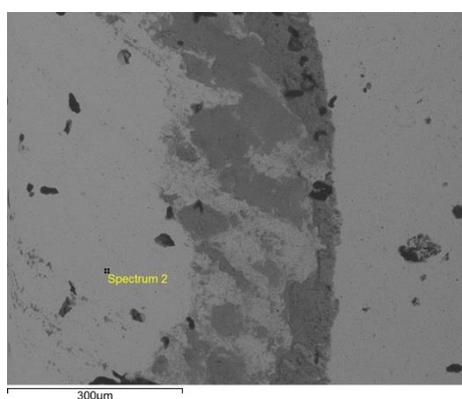


Figura B.22 – Análise região clara esfera discos temperados.

Tabela B.22 – Análise região clara esfera discos temperados.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	27,429	0,552	52,454
Ferro	2,993	0,191	1,639
Zircônio	57,918	0,743	19,426
Háfnio	1,356	0,203	0,233

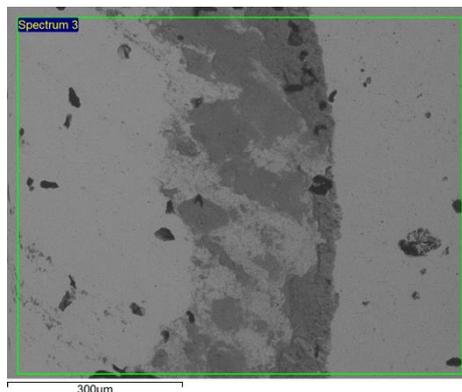


Figura B.23 – Análise da superfície (borda) esfera discos temperados.

Tabela B.23 – Análise da superfície (borda) esfera discos temperados.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	28,315	0,683	49,421
Cromo	0,491	0,132	0,264
Ferro	15,709	0,364	7,855
Zircônio	42,865	0,679	13,122

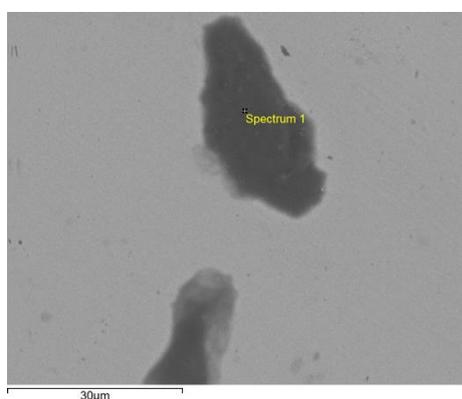


Figura B.24 – Análise dos pontos escuros esfera discos temperados.

Tabela B.24 – Análise dos pontos escuros esfera discos temperados.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	40,533	0,937	73,774
Sódio	2,604	0,230	3,298
Cloro	4,863	0,270	3,994
Potássio	4,093	0,243	3,048
Ferro	2,931	0,405	1,528
Zircônio	44,977	0,879	14,358

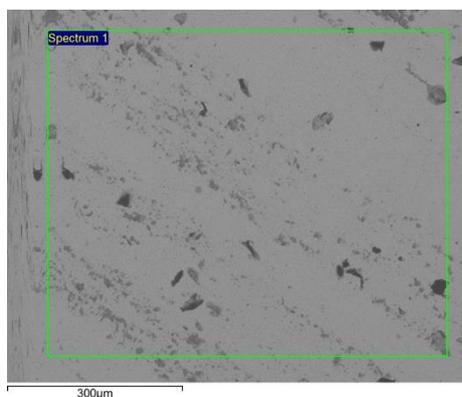


Figura B.25 – Análise da superfície (centro) esfera discos temperados.

Tabela B.25– Análise da superfície (centro) esfera discos temperados.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	28,294	0,668	50,678
Ferro	2,614	0,226	1,341
Zircônio	56,410	0,904	17,721

### B.2.2 Esferas Discos temperados e revenidos a 200 °C

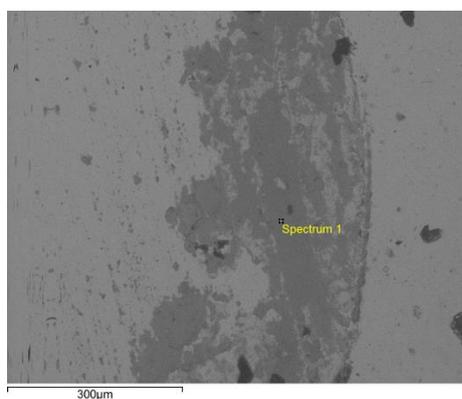


Figura B.26 – Análise região acinzentada esfera discos temperados e revenidos a 200 °C.

Tabela B.26 – Análise região acinzentada esfera discos temperados e revenidos a 200 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	32,266	0,583	53,698
Silício	0,237	0,076	0,224
Cromo	0,676	0,117	0,346
Ferro	49,615	0,648	23,655
Cobalto	0,231	0,292	0,104
Zircônio	8,135	0,334	2,374

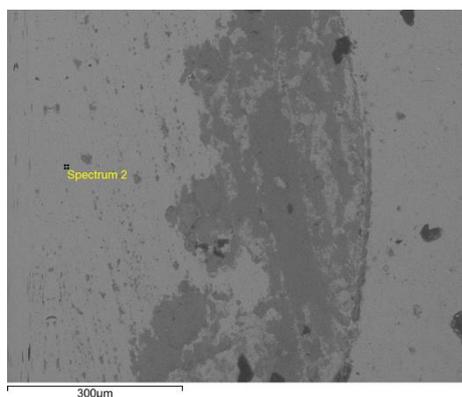


Figura B.27 – Análise região clara esfera discos temperados e revenidos a 200 °C.

Tabela B.27 – Análise região clara esfera discos temperados e revenidos a 200 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	28,416	0,669	53,587
Ferro	2,001	0,207	1,081
Zircônio	57,875	0,922	19,142
Háfnio	1,375	0,241	0,232

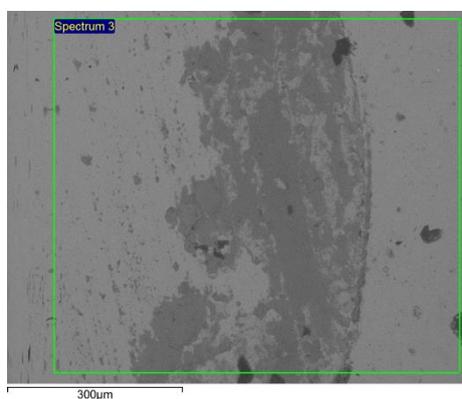


Figura B.28 – Análise da superfície (borda) esfera discos temperados e revenidos a 200 °C.

Tabela B.28 – Análise da superfície (borda) esfera discos temperados e revenidos a 200 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	32,414	0,765	56,721
Cromo	0,545	0,142	0,294
Ferro	17,326	0,424	8,686
Zircônio	40,308	0,718	12,371

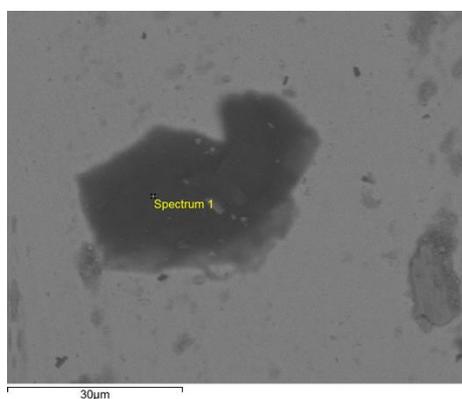


Figura B.29 – Análise dos pontos escuros esfera discos temperados e revenidos a 200 °C.

Tabela B.29 – Análise dos pontos escuros esfera discos temperados e revenidos a 200 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	36,500	0,899	72,636
Sódio	1,426	0,215	1,974
Cloro	2,126	0,223	1,909
Potássio	1,885	0,197	1,535
Ferro	7,604	0,450	4,335
Zircônio	50,460	0,866	17,612

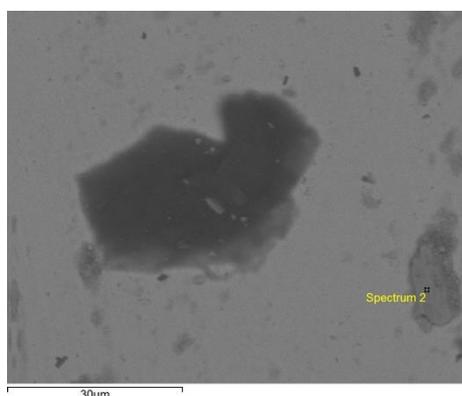


Figura B.30 – Análise ponto acinzentado esfera discos temperados e revenidos a 200 °C.

Tabela B.30 – Análise ponto acinzentado esfera discos temperados e revenidos a 200 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	30,023	0,718	53,477
Ferro	2,374	0,221	1,211
Zircônio	55,861	0,955	17,451

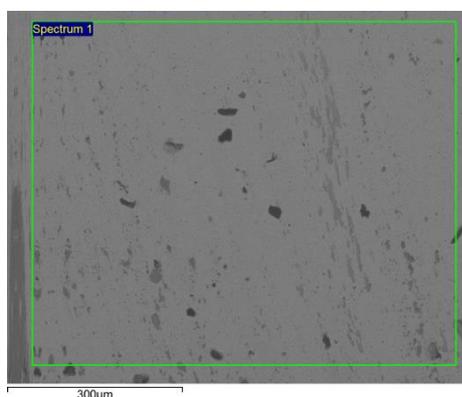


Figura B.31 – Análise da superfície (centro) esfera discos temperados e revenidos a 200 °C.

Tabela B.31 – Análise da superfície (centro) esfera discos temperados e revenidos a 200 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	30,348	0,724	57,875
Ferro	3,331	0,243	1,820
Zircônio	58,105	0,976	19,435

### B.2.3 Esferas Discos temperados e revenidos a 300 °C

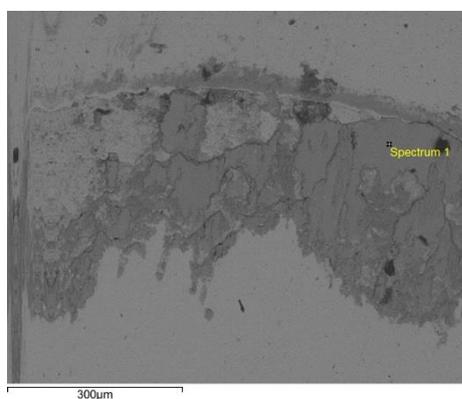


Figura B.32 – Análise região acinzentada esfera discos temperados e revenidos a 300 °C.

Tabela B.32 – Análise região acinzentada esfera discos temperados e revenidos a 300 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	26,402	0,524	54,209
Cromo	0,619	0,118	0,391
Manganês	0,658	0,156	0,394
Ferro	60,144	0,645	35,378
Zircônio	9,970	0,346	3,590

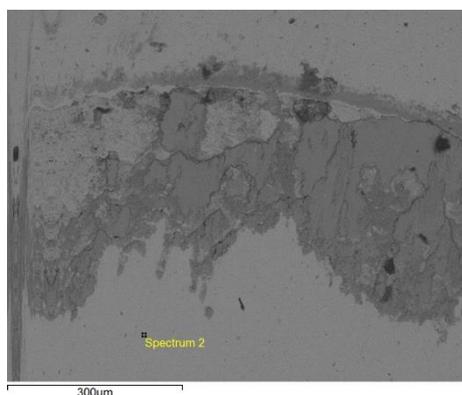


Figura B.33 – Análise região clara esfera discos temperados e revenidos a 300 °C.

Tabela B.33 – Análise região clara esfera discos temperados e revenidos a 300 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	27,838	0,666	53,180
Ferro	1,858	0,208	1,017
Zircônio	60,235	0,938	20,182

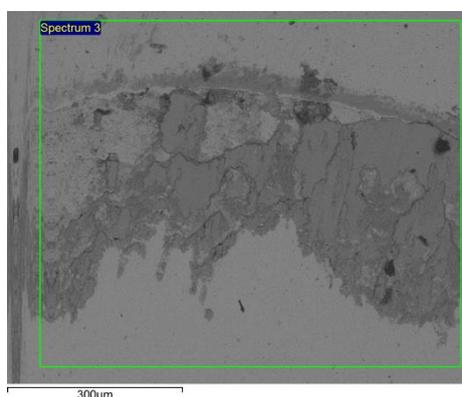


Figura B.34 – Análise da superfície (borda) esfera discos temperados e revenidos a 300 °C.

Tabela B.34 – Análise da superfície (borda) esfera discos temperados e revenidos a 300 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	31,080	0,599	57,681
Ferro	24,950	0,462	13,265
Zircônio	37,103	0,601	12,077

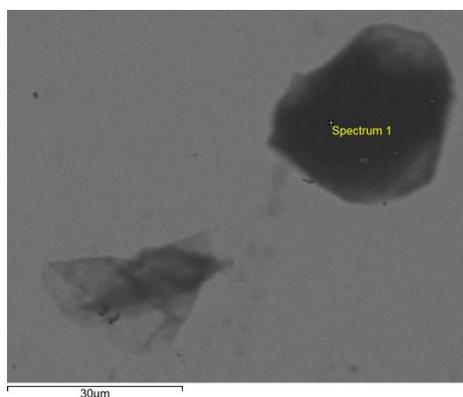


Figura B.35 – Análise dos pontos escuros esfera discos temperados e revenidos a 300 °C.

Tabela B.35 – Análise dos pontos escuros esfera discos temperados e revenidos a 300 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	33,360	0,820	66,801
Sódio	3,654	0,200	5,092
Cloro	6,899	0,257	6,234
Potássio	3,907	0,200	3,201
Ferro	1,557	0,301	0,893
Zircônio	50,623	0,767	17,779

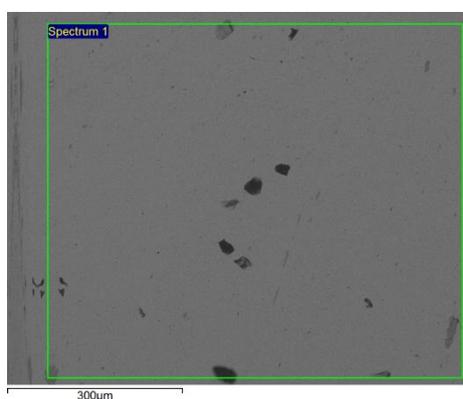


Figura B.36 – Análise da superfície (centro) esfera discos temperados e revenidos a 300 °C.

Tabela B.36 – Análise da superfície (centro) esfera discos temperados e revenidos a 300 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	26,585	0,739	58,543
Ferro	0,862	0,216	0,544
Zircônio	65,531	1,145	25,310
Háfnio	1,825	0,276	0,360

#### B.2.4 Esferas Discos temperados e revenidos a 400 °C

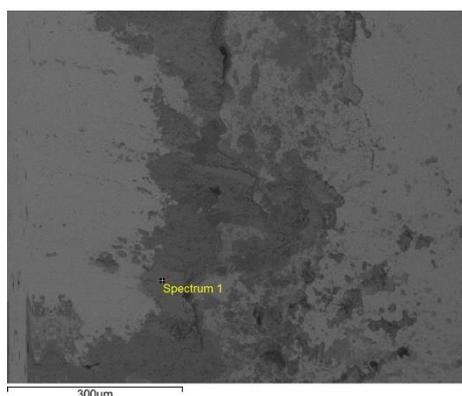


Figura B.37 – Análise região acinzentada esfera discos temperados e revenidos a 400 °C.

Tabela B.37 – Análise região acinzentada esfera discos temperados e revenidos a 400 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	30,432	0,568	52,108
Silício	0,251	0,079	0,245
Cromo	0,582	0,116	0,306
Ferro	49,873	0,630	24,464
Zircônio	10,171	0,358	3,055

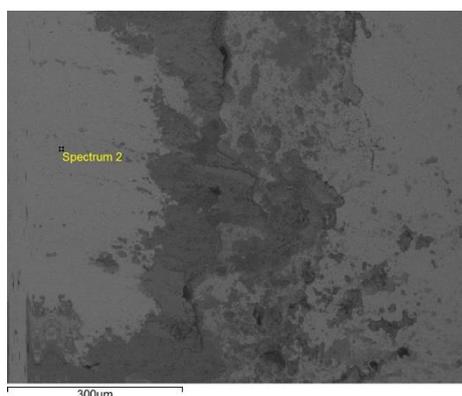


Figura B.38 – Análise região clara esfera discos temperados e revenidos a 400 °C.

Tabela B.38 – Análise região clara esfera discos temperados e revenidos a 400 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	25,371	0,664	44,936
Ferro	2,216	0,223	1,124
Zircônio	57,064	0,926	17,727

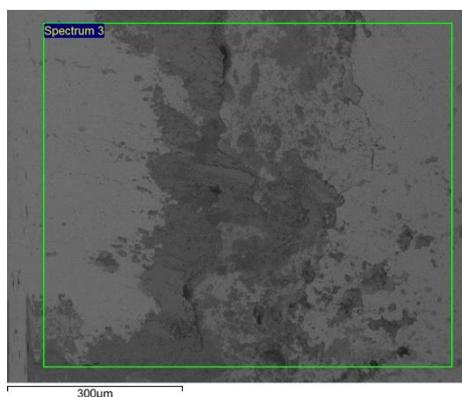


Figura B.39 – Análise da superfície (borda) esfera discos temperados e revenidos a 400 °C.

Tabela B.39 – Análise da superfície (borda) esfera discos temperados e revenidos a 400 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	32,339	0,707	68,143
Cromo	0,690	0,161	0,447
Ferro	28,447	0,506	17,172
Zircônio	38,524	0,602	14,237

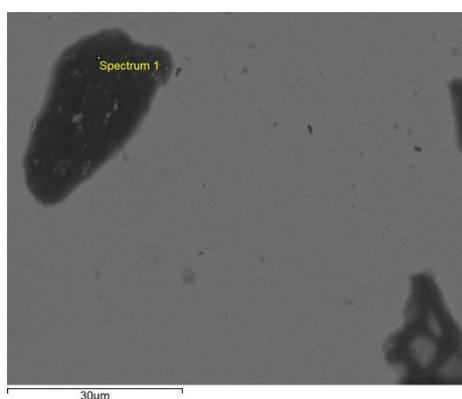


Figura B.40 – Análise dos pontos escuros esfera discos temperados e revenidos a 400 °C.

Tabela B.40 – Análise dos pontos escuros esfera discos temperados e revenidos a 400 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	31,488	0,874	69,831
Sódio	0,684	0,172	1,055
Cloro	2,239	0,216	2,241
Potássio	1,404	0,181	1,274
Ferro	2,570	0,347	1,633
Zircônio	61,615	0,875	23,966

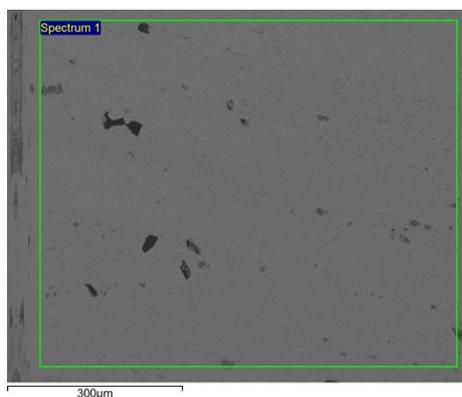


Figura B.41 – Análise da superfície (centro) esfera discos temperados e revenidos a 400 °C.

Tabela B.41 – Análise da superfície (centro) esfera discos temperados e revenidos a 400 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	27,510	0,735	57,218
Ferro	1,191	0,222	0,710
Zircônio	64,622	1,106	23,574

### B.2.5 Esferas Discos temperados e revenidos a 500 °C

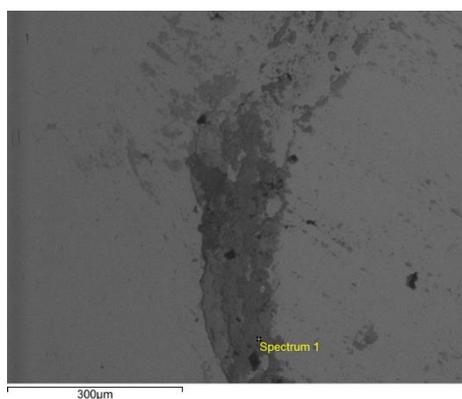


Figura B.42 – Análise região acinzentada esfera discos temperados e revenidos a 500 °C.

Tabela B.42 – Análise região acinzentada esfera discos temperados e revenidos a 500 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	36,400	0,592	68,823
Potássio	0,307	0,082	0,238
Cromo	0,517	0,130	0,301
Manganês	0,612	0,164	0,337
Ferro	46,116	0,543	24,979
Zircônio	16,047	0,425	5,321

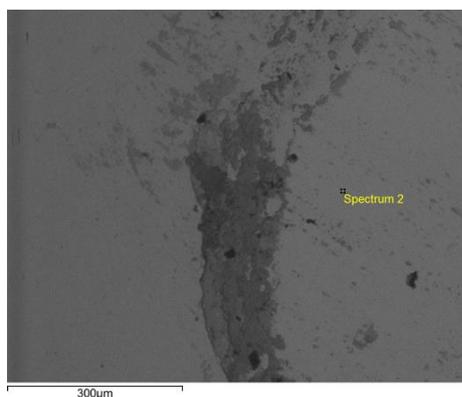


Figura B.43 – Análise região clara esfera discos temperados e revenidos a 500 °C.

Tabela B.43 – Análise região clara esfera discos temperados e revenidos a 500 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	29,776	0,728	62,362
Ferro	2,082	0,218	1,249
Zircônio	61,599	1,040	22,627
Háfnio	1,727	0,262	0,324

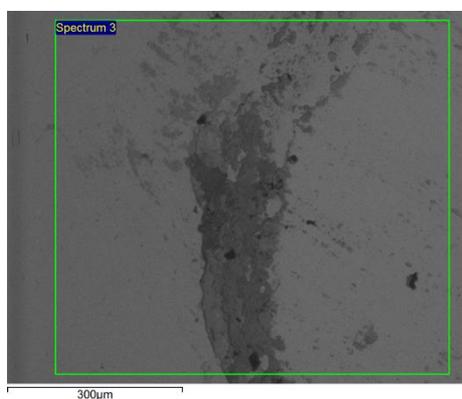


Figura B.44 – Análise da superfície (borda) esfera discos temperados e revenidos a 500 °C.

Tabela B.44 – Análise da superfície (borda) esfera discos temperados e revenidos a 500 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	35,602	0,754	61,089
Cromo	0,512	0,123	0,270
Ferro	9,192	0,289	4,519
Zircônio	45,794	0,754	13,781

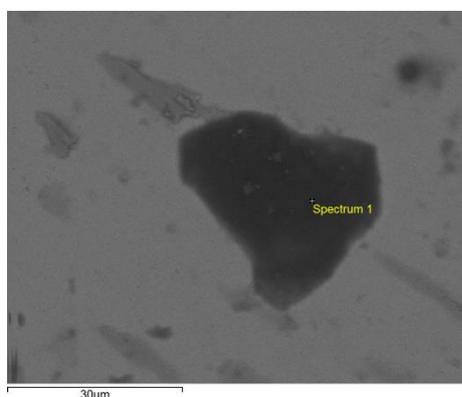


Figura B.45 – Análise dos pontos escuros esfera discos temperados e revenidos a 500 °C.

Tabela B.45 – Análise dos pontos escuros esfera discos temperados e revenidos a 500 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	39,560	0,780	70,175
Sódio	4,305	0,231	5,314
Cloro	7,207	0,256	5,769
Potássio	6,181	0,230	4,486
Ferro	4,855	0,357	2,467
Zircônio	37,892	0,710	11,789

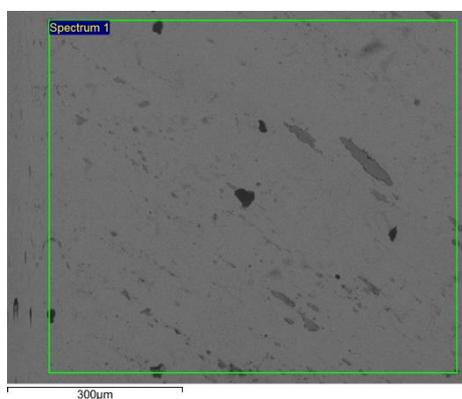


Figura B.46 – Análise da superfície (centro) esfera discos temperados e revenidos a 500 °C.

Tabela B.46 – Análise da superfície (centro) esfera discos temperados e revenidos a 500 °C.

Elemento	Peso%	Peso% $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	28,662	0,677	52,497
Ferro	2,078	0,208	1,090
Zircônio	57,855	0,917	18,585