

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

EFEITO DA DUREZA SOBRE AS PROPRIEDADES DO PAR TRIBOLÓGICO FORMADO POR
AÇO SAE 1045 E ÓXIDO DE ZIRCÔNIO

por

Arthur Koefender

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2017



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

EFEITO DA DUREZA SOBRE AS PROPRIEDADES DO PAR TRIBOLÓGICO FORMADO POR
AÇO SAE 1045 E ÓXIDO DE ZIRCÔNIO

por

Arthur Koefender

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Ney Francisco Ferreira

Comissão de Avaliação:

Prof. Cíntia C. Petry Mazzaferro

Prof. Patric Daniel Neis

Prof. Tiago Becker

Porto Alegre, 8 de dezembro de 2017.

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus pais, Eduardo e Anelise. Não só esse trabalho, mas tudo de positivo que eu já produzi na minha vida.

Amo vocês.

KOEFENDER, A. K., EFEITO DA DUREZA SOBRE AS PROPRIEDADES DO PAR TRIBOLÓGICO FORMADO POR AÇO SAE 1045 E ÓXIDO DE ZIRCÔNIO, 2017, 19 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

Abrasão e adesão são os dois principais mecanismos de desgaste encontrados em falhas ocorridas em ambientes industriais. Em situação de deslizamento, ambos são governados pela dureza e microestrutura do material. O objetivo deste trabalho é avaliar a relação entre a dureza, o desgaste e seus mecanismos em um par tribológico composto por aço SAE 1045, com diferentes tratamentos térmicos, e óxido de zircônio. Ensaios em um tribômetro foram executados, as superfícies das esferas (pino) e das trilhas desgastadas nos discos foram avaliadas. As durezas nas redondezas das trilhas foram medidas, as suas superfícies foram retratadas utilizando um microscópio e seus perfis de desgaste foram adquiridos utilizando interferometria. Dos cinco discos ensaiados, chegou-se a resultados semelhantes em três deles, devido a terem durezas elevadas e similares. Nestes discos o mecanismo de desgaste por abrasão foi predominante. Nos discos mais macios a adesão ocorreu com maior intensidade, gerando maior desgaste. Os resultados comprovaram o descrito na literatura, que a resistência ao desgaste do aço aumenta com a dureza, justificando até certo ponto a utilização desta prática na indústria.

PALAVRAS-CHAVE: resistência ao desgaste, dureza, abrasão, adesão

KOEFENDER, A. K., THE EFFECT OF HARDNESS ON PROPERTIES OF THE TRIBOLOGICAL PAIR OF SAE 1045 STEEL AND ZIRCONIA, 2017, 19 pages. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

Abrasion and adhesion are two of the most common forms of wear found in industry components failure. In sliding situations both forms of wear are governed by microstructure and material hardness. The objective of this paper is to evaluate the relation between hardness, wear and its forms in SAE 1045 steel with different heat treatments and zirconia tribological pair. Discs trails and spheres' worn surfaces were evaluated following tests run in a tribometer. The hardnesses in the surroundings of the tracks were measured, their surfaces were portrayed using a microscope and their wear profiles were acquired using interferometry. Of the five discs tested, similar results were achieved in three of them because of their similar high hardness. In these disks the mechanism of wear by abrasion was predominant. In the softer discs the adhesion occurred with greater intensity, generating more wear. The results corroborate with that described in the literature, that the wear resistance of steel increases with hardness, justifying to some extent the use of this practice in industry.

KEYWORDS: wear resistance, hardness, abrasion, adhesion

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO.....	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	4
4.1 Tribômetro.....	4
4.2 Materiais	5
4.3 Procedimentos.....	6
4.3.1 Medidas de dureza dos discos.....	6
4.3.2 Microscopia óptica.....	6
4.3.3 Medição de desgaste.....	6
4.3.3.1 Interferometria.....	6
4.3.3.2 Esfera	7
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	8
5.1 Atrito.....	8
5.2 Dureza.....	9
5.3 Volumes desgastados.....	9
5.4 Mecanismos de desgaste.....	10
6. CONCLUSÕES	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13

1. INTRODUÇÃO

Segundo Stachowiak e Batchelor, 2006, o desgaste é a maior causa do desperdício de materiais e perda da performance mecânica em componentes, e qualquer redução deste fenômeno pode resultar em ganhos consideráveis. Já estimou-se que, caso fossem aplicadas boas práticas tribológicas no cotidiano do Reino Unido, seria poupado o equivalente a 515 milhões de libras esterlinas no ano de 1965. Um estudo similar foi desenvolvido na Alemanha Ocidental em 1976 no qual concluiu-se que, no ano de 1975, o equivalente a 1% do PIB nacional foi gasto em perdas associadas a desgaste e atrito. Segundo Eyre, 1976, o desgaste é uma das três causas mais comuns de falha de componente na indústria, acompanhado pela fadiga e corrosão.

Eyre, 1976, estima que até 65% do desgaste em ambientes industriais pode ser associado aos mecanismos de abrasão e adesão. Stachowiak e Batchelor, 2006, por sua vez, propõem que resistência elevada a esses mecanismos é associada a maiores durezas dos materiais. Archard, 1980, ainda formula diversas equações que relacionam inversamente a taxa de desgaste de um material e sua dureza. Ou seja, quanto mais duro o material, mais lentamente ele é desgastado.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência da dureza de um aço 1045 tratado termicamente em relação ao desgaste resultante de ensaio em tribômetro pino sobre disco. Também são investigados os mecanismos de desgaste envolvidos no processo. A realização deste trabalho visa o desenvolvimento técnico do aluno, que passou por todas as etapas do estudo em questão.

Neste trabalho os pares tribológicos consistem de aço 1045 com diferentes durezas e esferas cerâmicas de Zircônia (óxido de Zircônio ZrO_2) estabilizada com Ytria (Y_2O_3).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Conforme apresentado por Stachowiak e Batchelor, 2006, o desgaste pode ocorrer na forma dos seguintes mecanismos: adesão, fadiga, abrasão, erosão, cavitação, corrosão, oxidação, impacto, fusão, difusão e *fretting*, esse último presente em situações de deslizamento recíproco entre dois corpos com baixa amplitude e alto número de ciclos. Os mecanismos citados dependem, de uma maneira geral, da velocidade relativa de deslizamento entre corpos, pressão de contato, materiais, temperaturas e do ambiente no qual se encontram. Archard e Hirst, 1956, também classificam o desgaste como moderado ou severo, cuja transição depende fundamentalmente da presença de adesão (contato intermetálico) entre os materiais envolvidos.

No caso de pares cerâmica-metal em deslizamento, os principais mecanismos de desgaste presentes são abrasão e adesão [Stachowiak et al., 1989, Liu e Xue, 1996, Gatier e Kato, 1993 e Stachowiak e Batchelor, 2006].

Uma relação generalista é estruturada por Stachowiak e Batchelor, 2006, relacionando os mecanismos de desgaste e características críticas dos materiais (Tabela 3.1). As características críticas relacionadas diretamente a ambos mecanismos de adesão e abrasão são a dureza e a heterogeneidade da microestrutura. Nesse trabalho será então avaliada a relação do desgaste com a dureza.

Tabela 3.1 – Guia geral para seleção de materiais visando controle do desgaste. Adaptado: Stachowiak e Batchelor, 2006.

Propriedades críticas dos materiais	Mecanismo de desgaste							
	Abrasão	Adesão	Erosão	Cavitação	Corrosão	Fretting	Fusão	Fadiga superficial
Dureza	√	√	√	o	o	o	o	o
Resistência Mecânica	o	o	√	√	o	o	o	√
Resistência à fadiga	√	o	√	√	o	√	o	√
Inertização	o	o	o	o	√	√	o	o
Alto ponto de fusão	o	√	o	o	o	o	√	o
Microestrutura heterogênea	√	√	o	o	x	o	o	o
Caráter não-metálico	o	√	o	o	√	o	o	o

√

 Importante

o

 Ligeiramente importante

x

 Desfavorável

Segundo Stachowiak et al., 1989, e Stachowiak e Batchelor, 2006, o mecanismo de adesão é regularmente evidenciado em situações de deslizamento de pares cerâmica-metal. Devido a necessidade de troca de elétrons entre os participantes para a formação de uma forte ligação, o mecanismo de adesão é diretamente vinculado à deformação plástica, pois essa proporciona um contato real entre os materiais. Ensaios executados por Stachowiak et al., 1989, mostram filmes do material mais macio (metal) que se deformam plasticamente e são depositados na superfície mais dura (cerâmica). Tais filmes exercem uma função de proteção ao material cerâmico, que então sofre menos desgaste. Stachowiak e Batchelor, 2006, explicam que a deposição se dá pela triboxidação do metal, que por sua vez adere à cerâmica (ver Fig 3.1). Em processos recíprocos esse material pode ser destacado da superfície por falha na adesão ou pela remoção do próprio material cerâmico ao qual está atrelado. Em contrapartida, Stachowiak e Batchelor, 2006, relatam que altas durezas, grandes módulos elásticos e elevadas energias superficiais reprimem o mecanismo de adesão.

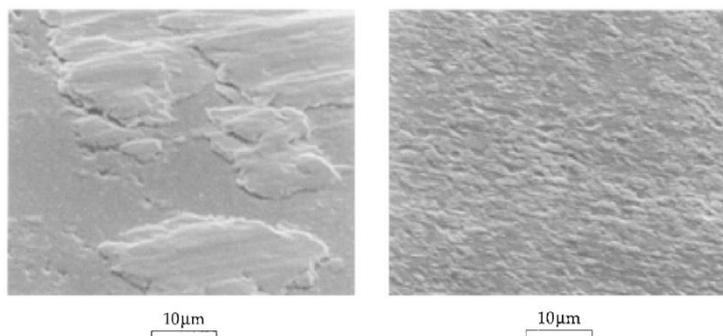


Figura 3.1 – Micrografias de MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) evidenciando filmes de transferência metálica para substrato cerâmico a temperaturas ambientes. Esquerda: metal macio (latão). Direita: metal com maior dureza (ferro fundido). Adaptado: Stachowiak e Batchelor, 2006

Stachowiak et al., 1989, examinaram especificamente o fenômeno da formação de um filme transferido na superfície do corpo cerâmico e concluíram que esse é dependente das propriedades mecânicas do metal e sua afinidade para com o material cerâmico. Diferentes níveis de afinidade foram evidenciados entre três grupo de diferentes pares pino-disco: (3.2a) latão-cerâmica (Al_2O_3), (3.2b) aço-cerâmica (Al_2O_3) e (3.2c) aço-Sialon ($SiAlON$), conforme Figura 3.2. Enquanto em (a) e (b) a cerâmica não sofreu desgaste algum devido à formação do filme em sua superfície, em (c) houve grande desgaste de ambos (pino e disco). Tais fenômenos geraram nos pinos de aço uma superfície acidentada com sulcos em meio a pequenas áreas polidas e nos de latão, superfícies com aspectos de deformação plástica proveniente da adesão ocorrida.

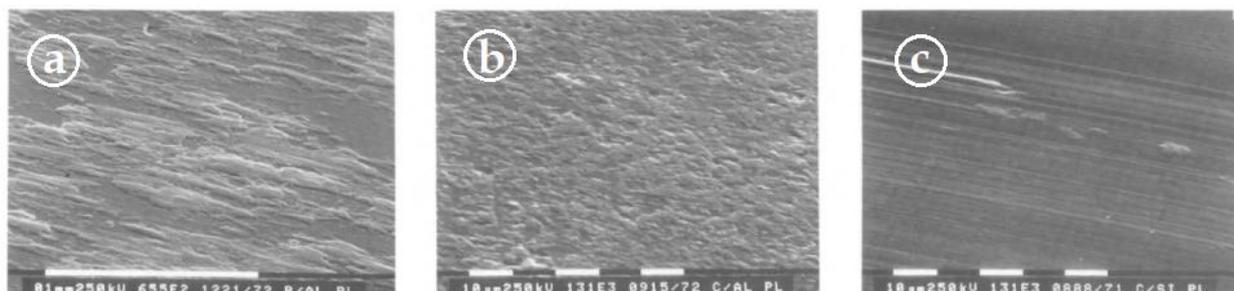


Figura 3.2 – Microscopias de superfícies cerâmicas realizadas após deslizamento contra metais. São apresentados pares de (a) Latão-cerâmica (Al_2O_3), (b) aço-cerâmica (Al_2O_3) e (c) aço-Sialon (SiAlON).

Segundo Stachowiak e Batchelor, 2006, desgaste abrasivo ocorre quando um objeto sólido é atritado contra partículas de outro material com dureza igual ou superior à sua. Os autores estratificam esse processo em fenômenos de corte, fratura, fadiga superficial e extração de grão, conforme Figura 3.3. Mais de um mecanismo de abrasão pode ocorrer simultaneamente, podendo-se citar a geração de detritos com forma de placas/lamelas, provenientes de um processo do qual fazem parte os mecanismos de corte e fadiga. Quanto maior a dureza de um material, maior sua resistência ao desgaste abrasivo [Stachowiak e Batchelor, 2006, Kato, 1997, Khurschov e Bahichev, 1960 e Zum Gahr, 1989].

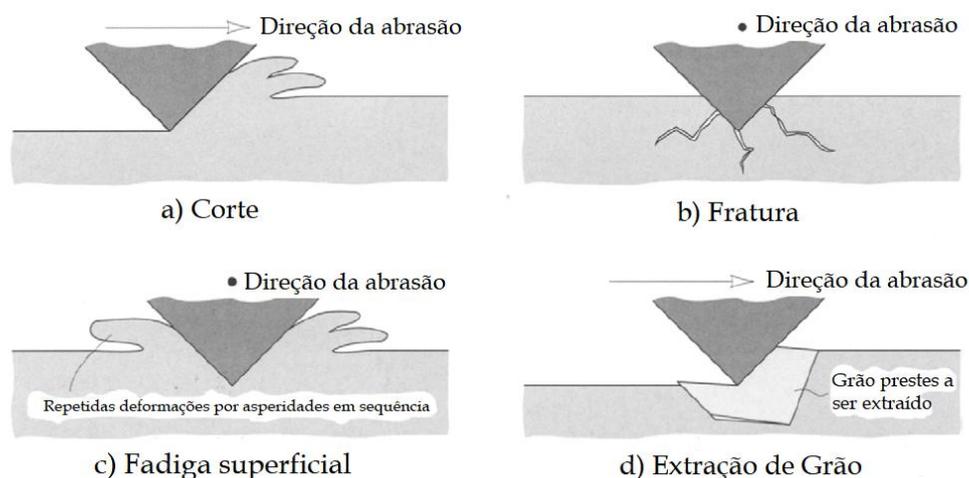


Figura 3.3 – Mecanismos do desgaste abrasivo: microcorte, fratura, fadiga superficial e extração de grão. Adaptado: Stachowiak e Batchelor, 2006

A pesquisa de Liu e Xue, 1996, avaliou situações de deslizamento em pares aço-zircônia lubrificadas com água e chegou a uma relação de carga e velocidade que pode ser vinculada a certos mecanismos de desgaste, conforme Fig. 3.4. A região de deformação plástica (I) é caracterizada por um polimento da superfície e desgaste por deformação em escala microscópica. Em sua análise verificaram que, em cargas acima de 60N, a presença de água é relacionada somente com a estabilização térmica, gerando resultados similares a ensaios a seco. Em um ensaio com carga de 60N e velocidade de 0,12m/s foi evidenciada a presença de fadiga superficial (ver Fig. 3.3c) na superfície metálica. Em outro ensaio, dessa vez com 100N e 0,4m/s, foi gerada uma superfície acidentada causada pelos grandes detritos de Zircônia inseridos nela, que geraram desgaste abrasivo severo por arrancamento de partículas (ver Fig. 3.3a). As alterações dos fenômenos entre os dois testes citados e a transição evidenciada na Figura 3.4 indicam uma forte correlação e/ou dependência entre mecanismos de desgaste e a carga normal (N).

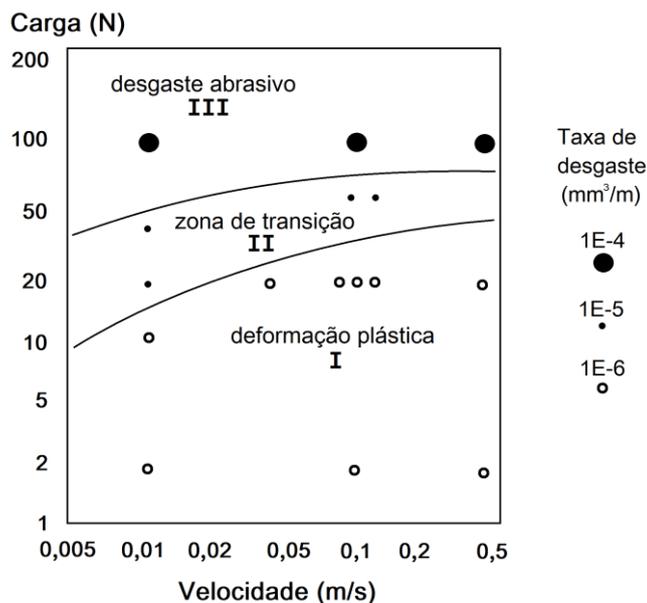


Figura 3.4 – Transição do mecanismo de desgaste do aço para rolamentos GCr15 atritado contra Zircônia e lubrificado com água. Adaptado: Liu e Xue, 1996.

Gatier e Kato, 1993, evidenciam transições de comportamento em situações de deslizamento entre óxido de Zircônio parcialmente estabilizado e discos de aço ASTM 52100 recozido. Foram evidenciados o aumento do atrito com a distância de ensaio, relacionado por eles ao aumento de ZrO_2 na interface desgastada, o aumento da dureza no local da trilha devido ao encruamento de material e o mecanismo de delaminação, caracterizado por Zum Gahr, 1989, como descolamento de camadas superficiais. Bourithisa et al., 2006, evidenciou que delaminação é o principal mecanismo de desgaste em um par cerâmica-metal composto por Alumina e aço AISI O1 em deslizamento. Foram identificadas cavidades na superfície macia que evidenciam a retirada de material metálico do substrato e sulcos provenientes de deformação plástica.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Tribômetro

O tribômetro pino sobre disco utilizado para avaliar o atrito e o desgaste em conformidade com a norma ASTM G99 é apresentado na Fig. 4.1. O equipamento em questão pertence ao Laboratório de Tribologia (LATRIB) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Os ensaios consistem basicamente de atritar o pino contra a superfície do disco com uma força regulada pelo atuador ao mesmo tempo em que o disco gira com rotação controlada. Os dados de rotação, torque, temperatura e força normal são adquiridos com a taxa de 5Hz.

A preparação do disco inicia com o seu lixamento, que é executado com as lixas de granulometria de 240, 320, 400, 600, 1500 e 2000. Esse processo é complementado com o polimento de sua superfície. Nesse, utiliza-se pasta diamantada (3 a 6 micrometros) para obter rugosidade superficial igual ou menor que $8\mu m$, conforme indicado pela norma ASTM G99. A medida de rugosidade é então executada com o rugosímetro Mitutoyo SJ-201.

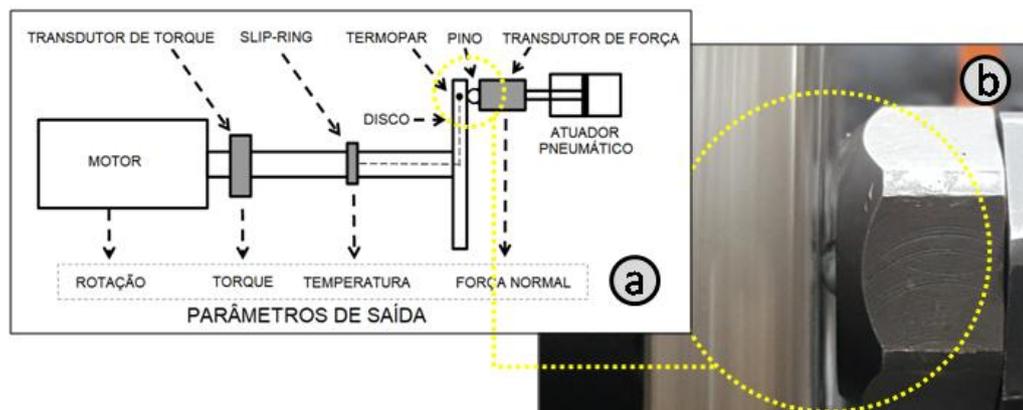


Figura 4.1 – Tribômetro utilizado para testes de desgaste. (a) Desenho esquemático. (b) Detalhe do contato pino contra disco.

O coeficiente de atrito é calculado utilizando a Eq. 1, onde T é o torque adquirido [N.m], F_N é a força normal [N] e r o raio da trilha [m].

$$\mu = \frac{T}{F_N \cdot r} \quad (1)$$

4.2. Materiais

Para a função de pino foram escolhidas esferas cerâmicas com 8mm de diâmetro compostas de Zircônia (óxido de Zircônio ZrO_2) estabilizada com Ytria (Y_2O_3). Este material tem dureza entre 87 e 91 HRA.

Foram utilizados discos de aço SAE 1045 com 10mm de espessura e 81mm de raio. Cada disco passou por tratamentos térmicos distintos, conforme Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Tratamentos térmicos aplicados aos discos

Disco	Tratamento térmico
Disco 1	Têmpera
Disco 2	Têmpera com revenimento a 200°C
Disco 3	Têmpera com revenimento a 350°C
Disco 4	Têmpera com revenimento a 500°C
Disco 5	Normalização

Ambos materiais são mostrados em detalhe na Fig. 4.2.

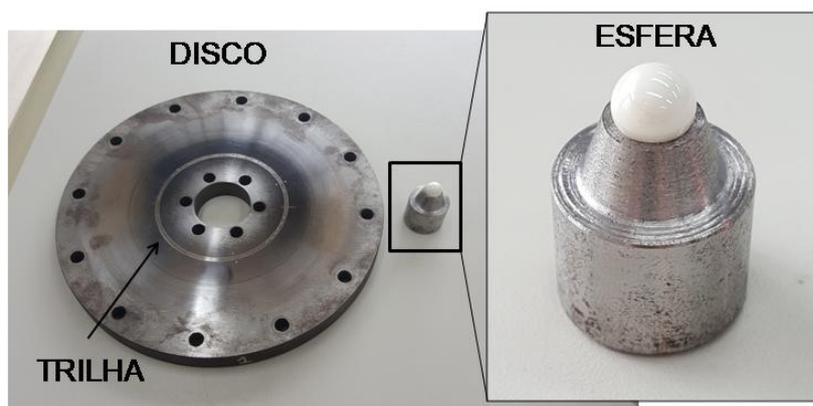


Figura 4.2 – Disco com trilha desgastada e esfera cerâmica.

4.3 Procedimentos

Os ensaios em tribômetro foram realizados com os seguintes parâmetros:

- Força: 200N;
- Velocidade linear: 0,25m/s;
- Raio da trilha: 33mm;
- Distância deslizada: 3000m.

Os parâmetros de velocidade linear e distância deslizada resultam ensaios com duração de 200 minutos. Foi executado um ensaio por disco, gerando assim uma única trilha em cada corpo de prova.

4.3.1 Medidas de dureza dos discos

A dureza do disco próximo à trilha desgastada foi medida utilizando um durômetro DuraVision da marca Emcotest que pertence ao Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS. As medidas foram distribuídas aos pares ao longo da trilha de desgaste conforme Fig. 4.3.

Os ensaios de dureza foram conduzidos utilizando o método de Brinell, conforme norma ASTM E10. A configuração utilizada foi a HBW 2.5/187.5, na qual uma esfera de carbeto de tungstênio com 2,5mm de diâmetro é pressionada na superfície do material com uma força de 187,5kgf.



Figura 4.3 – Locais de medida de dureza no disco.

4.3.2 Microscopia óptica

Foi utilizado microscopia óptica para a análise das superfícies desgastadas e o microscópio utilizado foi do modelo Axio Lab.A1 da marca Zeiss, pertencente ao Laboratório de Tribologia da UFRGS.

Múltiplas imagens foram adquiridas em sequência para reproduzir um trecho da trilha em cada disco enquanto as áreas desgastadas das esferas foram retratadas em imagens únicas, englobando a totalidade da marca.

4.3.3 Medição de desgaste

O desgaste volumétrico em cada trilha foi medido por meio de interferometria. Já o desgaste das esferas foi calculado pelo método da calota esférica utilizado na norma ASTM G99.

4.3.3.1 Interferometria

Para medir o volume desgastado na trilha do disco foi utilizado um interferômetro modelo CountourGT da marca Bruker, propriedade do Laboratório de Metalurgia (LAMEF) da UFRGS. Dados foram adquiridos em dois trechos diferentes da trilha de cada disco. De cada

trecho foram extraídos quatro perfis para medir o volume médio desgastado. A Figura 4.4 ilustra a localização e os quatro perfis retirados de cada trecho.

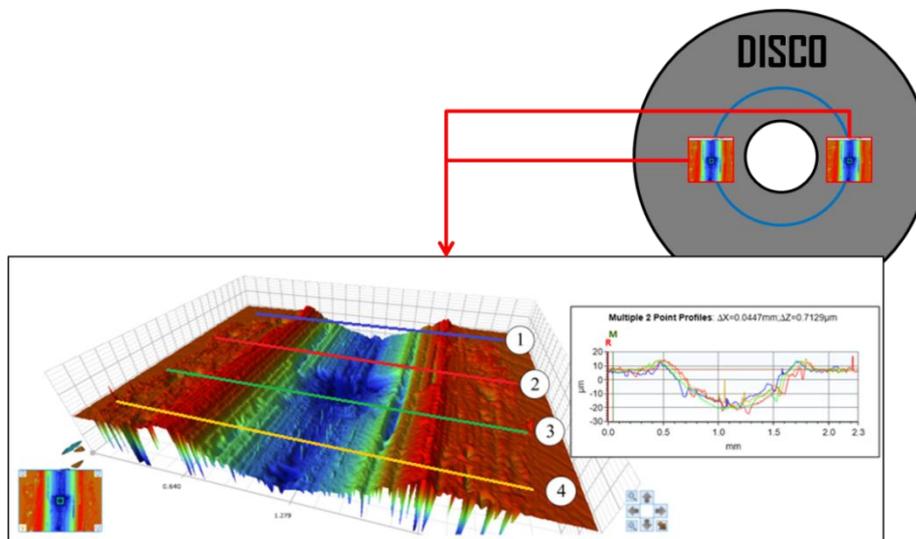


Figura 4.4 – Ilustração dos locais e dos quatro perfis extraídos de cada trecho da trilha desgastada.

Cada perfil foi avaliado conforme apresentado na Fig. 4.5: somente o volume vazio que está abaixo da linha neutra ($z=0$) é contabilizado. O volume total foi calculado a partir da Eq. 2, que revoluciona a área desgastada ao redor do centro do disco. Nesta equação, V é o volume desgastado na trilha, r a distância do ponto adquirido até o centro do disco, z a profundidade do ponto em relação a linha neutra do disco (superfície não desgastada, $z = 0$) e n é o número de pontos adquiridos.

O volume de desgaste considerado é a média dos volumes calculados nos oito perfis considerados de cada trilha.

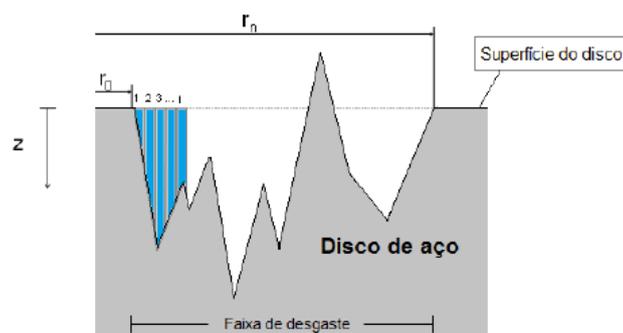


Figura 4.5 – Volume considerado dos perfis. Fonte: Streck, 2017.

$$V = \sum_{i=0}^{n-1} \pi(r_{i+1}^2 - r_i^2) \frac{(z_{i+1} + z_i)}{2} \quad [mm^3] \quad (2)$$

4.3.3.2 Esfera

O método utilizado pela norma ASTM G99 para calcular o volume desgastado em uma esfera (ou pino com ponta esférica) é o método da calota esférica. Tal método se caracteriza em utilizar geometria analítica para calcular o volume da calota mostrada na Fig 4.6a. Para isso utiliza-se a Eq. 3, onde V é o volume desgastado, h é a distância do ponto central do plano até a superfície da esfera (Eq. 4) e a é o raio do plano desgastado circular.

$$V = \frac{1}{6}\pi h(3a^2 + h^2) \quad (3)$$

$$h = r - (r^2 - a^2)^{1/2} \quad (4)$$

No entanto, em alguns casos, a superfície desgastada do pino pode adquirir caráter tridimensional, assim tornando complicada a determinação de um raio para a execução do cálculo, já que a superfície tem forma mais complexa (ver Fig. 4.6b).

Para contornar este problema, calcula-se a área da superfície não circular utilizando imagens de microscópio e seus atributos para o cálculo são retirados de um círculo com mesma área, conforme relação demonstrada entre Fig. 4.6b e 4.6c. Para a definição da área a partir de imagens de microscópio é utilizado o software ImageJ. Visando evitar erros na determinação de um raio em superfícies desgastadas aparentemente circulares, esse método de definição de um círculo equivalente é utilizado para a determinação do volume desgastado em todas as cinco esferas.

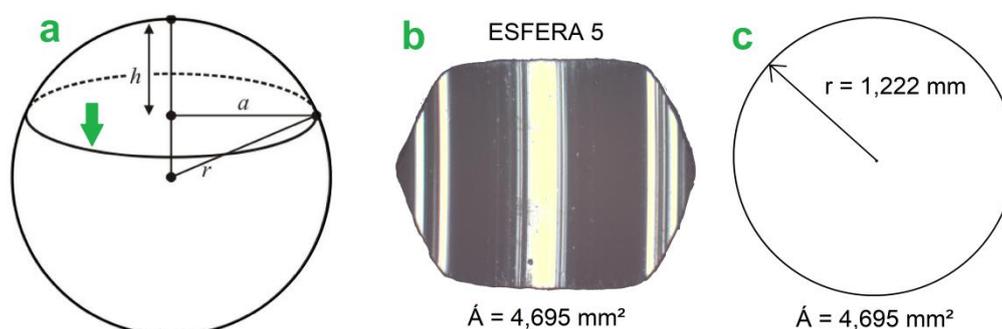


Figura 4.6 – Método da calota esférica para o cálculo de volume desgastado em uma esfera.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Atrito

As curvas de atrito adquiridas são apresentadas na Figura 5.1. Os atritos médios de cada curva foram calculados desconsiderando os primeiros 450 metros (assentamento) e também são apresentados na Figura 5.1.

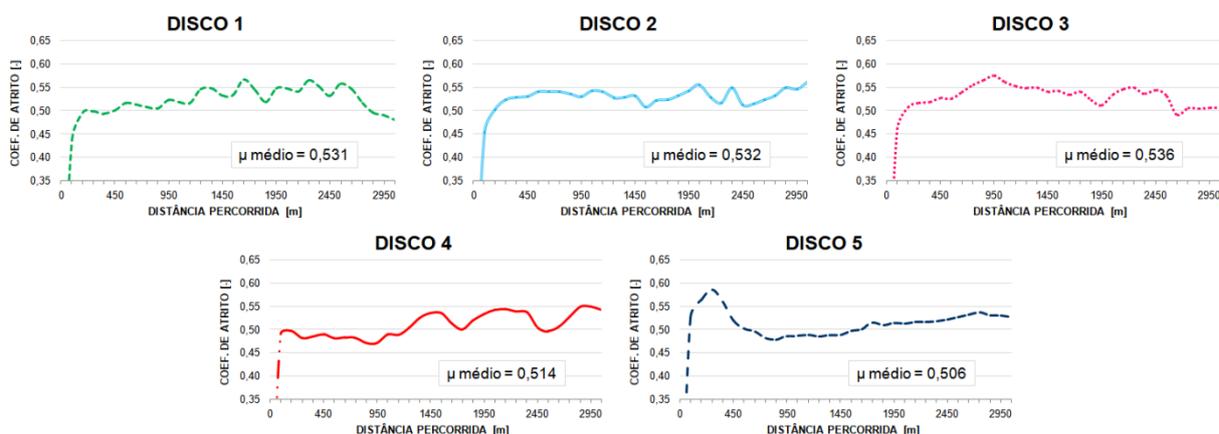


Figura 5.1 – Coeficiente de atrito por distância e médio

O gráfico de atrito do disco 5 apresentado na Fig. 5.1 tem três características marcantes: há uma distância de estabilização clara e mais extensa do que nos outros discos, o seu atrito apresenta menor oscilação no resto do ensaio e também é evidenciada uma tendência do seu valor aumentar com a distância. As possíveis causas da diferença de

comportamento do atrito no disco 5 em comparação com os outros discos são a diferença de dureza e/ou mecanismo de desgaste a serem tratadas a seguir.

A tendência a aumentar o valor do atrito com a distância pode também ser relacionada com o aumento da quantidade de Zircônia transferida para a superfície desgastada. Gatier e Kato, 1993, evidenciaram esse fenômeno.

5.2 Dureza

As medidas de dureza são apresentadas na Tabela 5.2. Medidas externas foram executadas em um raio ligeiramente superior ao raio médio da trilha e as medidas internas foram executadas em um raio ligeiramente inferior ao raio médio da trilha (ver medidas na Fig. 4.3).

Tabela 5.1 – Medidas de dureza

Medidas de dureza - Durezas Brinell						
	Relação a trilha	Disco 1 (T)	Disco 2 (T + R200)	Disco 3 (T + R350)	Disco 4 (T + R500)	Disco 5 (N)
Local 1	Medida Interna (r-)	300,0	311,0	313,0	243,0	158,0
	Medida Externa (r+)	293,0	305,0	304,0	256,0	159,0
	Média 1	296,5	308,0	308,5	249,5	158,5
Local 2	Medida Interna (r-)	304,0	313,0	287,0	246,0	158,0
	Medida Externa (r+)	278,0	293,0	294,0	256,0	164,0
	Média 2	291,0	303,0	290,5	251,0	161,0
Média total		294	306	300	250	160
Desvio		11,44	9,00	11,39	6,75	2,87

Ao avaliar as durezas médias em cada trilha em relação aos tratamentos térmicos pelos quais as peças passaram é identificada uma incoerência. O processo de revenimento foi utilizado com intuito de aliviar as tensões internas provenientes da têmpera, tratamento que torna os aços extremamente duros e frágeis. Esse alívio é diretamente relacionado à temperatura a qual o metal é aquecido e ao tempo que essa temperatura é mantida. Quanto maior a temperatura e/ou maior o tempo do tratamento térmico, mais dútil o metal se torna. Essas características levam a crer que a dureza dos quatro primeiros discos seguiriam a seguinte ordem: Dureza D1 > Dureza D2 > Dureza D3 > Dureza D4. Essa ordem não foi verificada, pois, conforme expressado pela Tabela 5.2, o disco 1 tem menor dureza do que ambos discos 2 e 3. Associou-se tal desvio com uma má execução do(s) tratamento(s) térmico(s).

5.3. Volumes desgastados

Abaixo são apresentados os volumes de desgaste medidos nos discos (Tab. 5.2) e de desgaste calculados para as esferas (Tabela 5.3).

Tabela 5.2 – Volumes desgastados nas trilhas

Medidas do volume desgastado - Discos					
Propr. Medida	Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 4	Disco 5
Trecho A [mm ³]	0,961	1,381	1,143	4,341	15,038
Trecho B [mm ³]	1,353	1,932	1,436	3,693	19,717
Vol. desgastado [mm³]	1,157	1,656	1,290	4,017	17,377

Tabela 5.3 – Volumes desgastados nas esferas

Cálculo do volume desgastado - Esferas					
Propor. Medida	Disco 1	Disco 2	Disco 3	Disco 4	Disco 5
Área [mm ²]	3,775	4,019	3,897	4,225	4,695
Raio Equivalente [mm]	1,096	1,131	1,114	1,160	1,222
Raio esfera [mm]	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
Vol. desgastado [mm³]	0,143	0,162	0,152	0,179	0,221

O comportamento evidenciado do volume desgastado entre o pino e o disco se encontra graficado na Figura 5.2. Apesar da diferença na ordem de grandeza do desgaste de ambos componentes, é possível notar que não há uma amplificação extrema no comportamento de desgaste nas esferas de Zircônia, ao contrário do que acontece com os discos de aço.

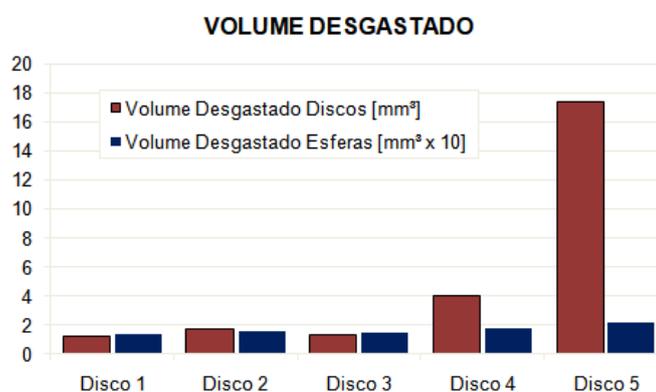


Figura 5.2 – Comportamento do desgaste entre o pino e o disco

Os resultados de desgaste nos discos e suas durezas apresentados previamente se encontram graficados na Figura 5.3. O gráfico expressa uma relação inversa entre o desgaste e a dureza do aço SAE 1045.

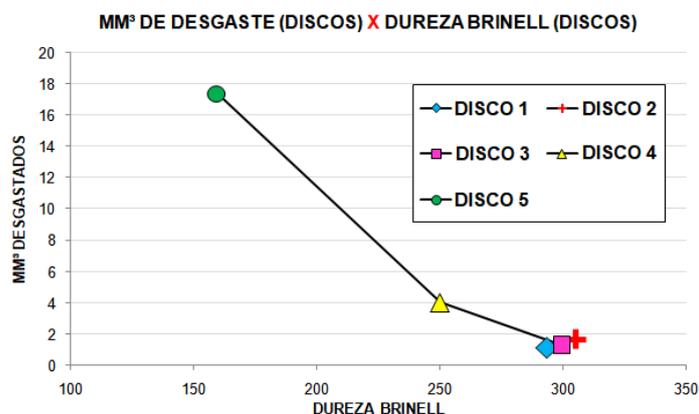


Figura 5.3 – Relação de desgaste e dureza dos disco ensaiados.

5.4. Mecanismos de desgaste

A Fig. 5.4 apresenta trechos da trilha desgastada de cada disco.

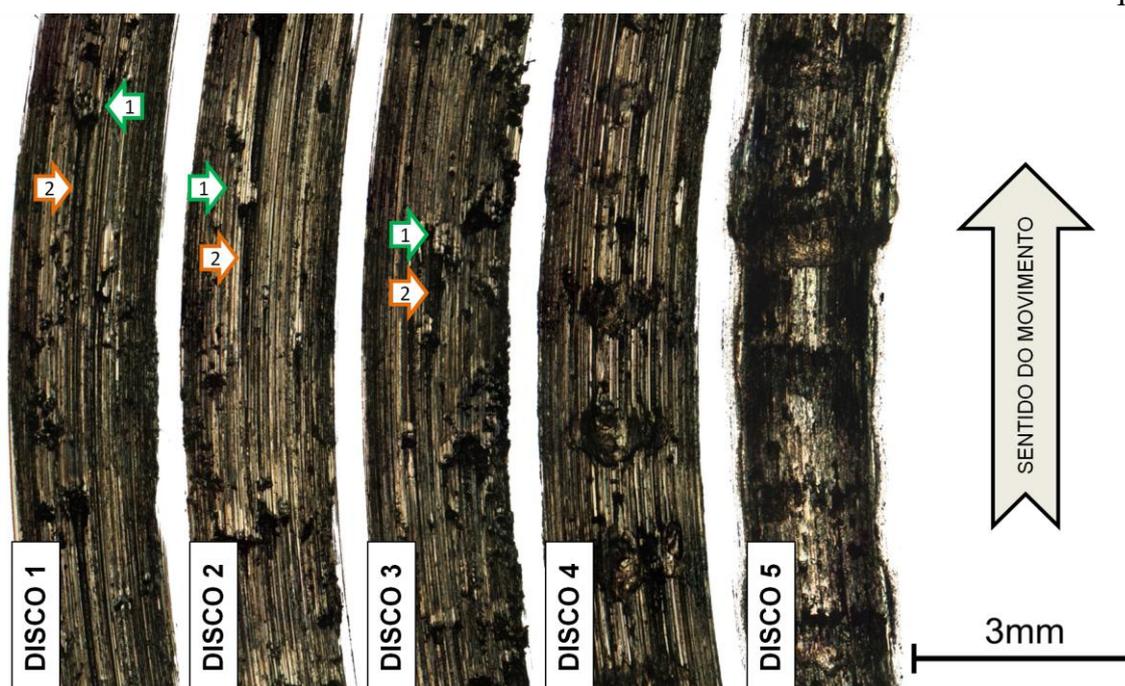


Figura 5.4 – Microscopia de trechos das trilhas desgastadas. Nas três primeiras trilhas é possível evidenciar o encruamento de partículas na superfície (1), que formam sulcos (2) de desgaste.

Analisando a Fig. 5.4 é evidenciado uma similaridade entre os mecanismos de desgaste presentes nos três primeiros discos. O conjunto microscopia, dureza, atrito médio, volume desgastado na trilha e volume desgastado na esfera leva a crer que as variações entre os três primeiros discos são relativamente pequenas. Por isso, os três primeiros discos serão avaliados de maneira conjunta.

A aparência geral das três primeiras trilhas denota a presença do mecanismo abrasivo de microcorte, que fornece um aspecto “lixado” ao substrato. O mesmo aspecto está presente de uma forma mais grosseira no disco 4, o que pode ser relacionado a maior ductibilidade do material, que então forma sulcos mais largos. Ainda nas trilhas dos três primeiros discos é possível identificar partículas provenientes da própria camada transferida (camada superficial encruada desgastada, que contém aço, óxidos e provavelmente indícios de Zircônia) que foram novamente encruadas, dessa vez ao serem arrastadas contra a superfície. Essas partículas endurecidas (Fig. 5.4 – setas 1) funcionam como um abrasivo e são arrastadas pela superfície formando sulcos (Fig. 5.4 – setas 2), também conhecidos como *grooves* [Stachowiak e Batchelor, 2006], por onde passam.

As trilhas de desgaste dos disco 4 e 5, por sua vez, também compartilham alguns aspectos. A menor dureza desses discos, a força de contato elevada envolvida nos ensaios (200N), os maiores volumes desgastados, tanto na esfera quanto nos discos, e a existência do que parecem áreas com material plastificado (áreas escuras) levam a crer que o mecanismo de adesão teve grande presença em ambos ensaios. A visível existência de uma periodicidade nos mecanismos presentes nessas trilhas, a grande probabilidade da ocorrência de adesão e os volumes desgastados possibilitam propor a ordem dos acontecimentos que geram esse desgaste. Primeiro, há a adesão entre o material cerâmico e o metálico. Em seguida, o movimento relativo entre as superfícies leva a camada metálica superior (camada transferida) a deformar plasticamente, gerando encruamento e, em consequência, o aumento da dureza. A adesão não aguenta o aumento da dureza e da resistência mecânica e então desfaz suas conexões metálicas, gerando desgaste na forma de detritos. Há então um deslizamento abrasivo até o próximo local aonde é encontrado o metal em sua forma mais dútil, e a partir desse ponto o ciclo recomeça. Esse ciclo é esquematizado na Figura 5.5. Foi utilizada a trilha do disco 4 pois nessa os mecanismos estão mais demarcados.

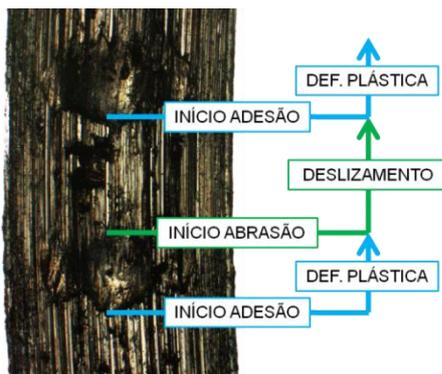


Figura 5.5 – Ciclicidade do desgaste que ocorreu nas trilhas dos discos 4 e 5.

O desgaste da trilha do disco 5 se comporta de maneira curiosa. Esse disco sofreu o maior desgaste e gerou uma das trilhas mais estreitas. Por isso, acredita-se que a deformação plástica foi tão acentuada que nos segmentos de trilha nos quais ocorreu esse fenômeno a esfera não entrou mais em contato, gerando pequenos trechos com aspecto escuro. Isso foi auxiliado pela criação de elevações do material metálico ao lado da trilha (efeito da maior ductibilidade do material) que então impediram o avanço da esfera contra o disco.

O aspecto da superfície desgastada das esferas cerâmicas é apresentado na Fig. 5.6. Percebe-se um padrão similar de riscos tanto em disco quanto em esferas das trilhas de 1 a 4, corroborando com o descrito por Kato, 1997, como característica de desgaste abrasivo. As marcas do par tribológico em desgaste abrasivo são complementares. É evidenciado, nas esferas que atritam contra os discos com menores durezas (4 e 5), o alongamento da dimensão perpendicular da marca desgastada.



Figura 5.6 – Aspecto e forma das superfícies desgastadas nas esferas.

Ao contrário do que é possível ser visualizado nas microscopias das três primeiras trilhas, as imagens adquiridas das superfícies das esferas evidenciam a ocorrência de adesão em todos os ensaios. A Fig. 5.6 destaca as evidências desse fenômeno. Uma das possibilidades é que, nos três primeiros discos, a adesão evidenciada se deu entre a esfera e os detritos metálicos que foram atritados contra a superfície devido à maior pressão de contato gerada no momento em que essas partículas foram encruadas.

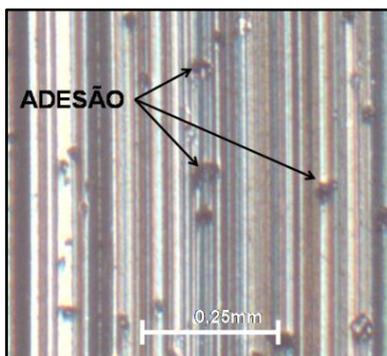


Figura 5.7 – Evidências de adesão na superfície cerâmica da esfera.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi concluído que a elevação da dureza no aço SAE 1045 por meio de tratamentos térmicos resulta em alterações nos mecanismos de desgaste que ocorrem em situação de atrito contra um esfera de Zircônia, aumentando a resistência do material ao desgaste. Os resultados corroboraram com o que foi encontrado em bibliografia.

Foi evidenciado um aumento substancial no desgaste em durezas abaixo de 260 Brinell conforme o estabelecimento de um desgaste periódico caracterizado por adesão, deformação plástica e perda de material por falha na adesão. Também foi possível evidenciar um aumento na dimensão perpendicular ao movimento nas marcas de desgaste formadas nas esferas que atritaram contra superfícies mais macias. Isso se dá pela maior inserção da esfera no disco metálico, que provavelmente auxiliou na amplificação do desgaste.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society for Testing Materials, “**ASTM G99-04: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disc Apparatus**”, ASTM, 32 p., 2004

American Society for Testing Materials, “**ASTM E10-08: Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials** ASTM, 5 p., 2004

Archard, J. F., Hirst, W., “**The wear of metals under unlubricated conditions**”, Proc. R. Soc. Lond., pp. 397-410, 1956

Archard, J. F., “**Wear Theory and Mechanisms**”, Wear Control Handbook, 1ª Edição, ASME, pp 35-80, 1980

Bourithisa, L., Papadimitriou, G. D., Sideris, J., “**Comparison of wear properties of tool steels AISI D2 and O1 with the same hardness**”, Tribology International 39, pp. 479–489, 2006

Eyre, T. S., “**Wear characteristics of metals**”, Tribology International, pp. 203–212, 1976

Gautier, P., Kato, K., “**Wear mechanisms of silicon nitride, partially stabilized zirconia and alumina in unlubricated sliding against steel**”, Wear 162-164, pp. 305-313, 1993

Kato, K., “**Abrasive wear of metals**”, Tribology International vol. 30, pp. 333-338, 1997

Khurschov, M. M., Bahichev, M. A., “**Research on Wear of Metals**”, National Engineering Laboratory, East Kilbridge, Capítulo 8, 1960

Liu, H., Xue, Q., “**Wear mechanisms of zirconia/steel reciprocating sliding couple under water lubrication**”, Wear 201, pp. 51-57, 1996

Stachowiak, G.W., Batchelor, A.W., “**Engineering Tribology**”, Tribology Series 24, 3a Edição, 2006

Stachowiak, G.W., Stachowiak, G.B., Batchelor, A.W., “**Metallic film transfer during metal-ceramic unlubricated sliding**”, Wear 132, pp. 361-381, 1989

Streck, W. F., “**Análise do comportamento tribológico do cobre e do latão**”, 17 páginas, LUME, UFRGS, 2017

Zum Gahr, K. H., "**Sliding wear of ceramic-ceramic, ceramic-steel and steel-steel pairs in lubricated and unlubricated contact**", *Wear* 133, pp. 1-22, 1989