

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

RELAÇÃO ENTRE DUREZA, DESGASTE E MICROESTRUTURA DO PAR TRIBOLÓGICO  
FORMADO POR AÇO SAE 1045 E ÓXIDO DE ZIRCÔNIO

por

Daniel Rech Corrêa

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, novembro de 2018



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

RELAÇÃO ENTRE DUREZA, DESGASTE E MICROESTRUTURA DO PAR TRIBOLÓGICO  
FORMADO POR AÇO SAE 1045 E ÓXIDO DE ZIRCÔNIO

por

Daniel Rech Corrêa

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  
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Comissão de Avaliação:

Prof. Cintia C. Petry Mazzaferro

Prof. Ney Francisco Ferreira

Prof. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, 16 de novembro de 2018.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família. Que este trabalho feche um ciclo de muito esforço e sacrifícios que, em breve, fará tudo valer a pena.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à minha mãe, por todo o suporte e apoio que tive durante todos os meus anos de graduação.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira*, pelos incentivos que precisei para concluir meu trabalho.

À toda a equipe do LATRIB, cuja disponibilidade, paciência e vontade de ajudar estiveram sempre presentes durante todas as minhas visitas ao laboratório.

A todos os amigos que me ajudaram na conclusão deste trabalho, abrindo mão de seus próprios tempos para me auxiliar e dar conselhos importantes.

RECH, D. C. **Relação entre Dureza, Desgaste e Microestrutura do Par Tribológico Formado por Aço SAE 1045 e Óxido de Zircônio**. 2018. 22 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

## **RESUMO**

O estudo do desgaste é de extrema importância na indústria. A utilização dos conhecimentos e tecnologias atuais de tribologia podem gerar economia significativa no mundo todo. Os principais mecanismos de desgaste encontrados em falhas em ambientes industriais são abrasão e adesão. A dureza e a microestrutura dos materiais são propriedades que influenciam esses mecanismos de desgaste. O objetivo deste trabalho é avaliar a relação entre dureza, desgaste e microestrutura e seus mecanismos de desgaste em um par tribológico formado por aço SAE 1045, temperado e normalizado, e óxido de zircônio. Foram realizados ensaios pino sobre disco em um tribômetro, no qual esferas de zircônia eram atritadas contra discos de aço. Por meio de microscopia e interferometria, foi possível avaliar os mecanismos de desgaste das peças após os ensaios. Foi constatado que os discos normalizados apresentaram menor dureza e maior desgaste. As trilhas dos discos normalizados apresentaram um desgaste severo por adesão, e as esferas utilizadas nesses ensaios apresentaram marcas elípticas devido ao material ser mais macio. Os resultados deste trabalho corroboraram o que está descrito na literatura atual de tribologia — a resistência ao desgaste aumenta proporcionalmente com o valor da dureza dos materiais.

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

RECH, D. C. **Relation between Hardness, Wear and Microstructure of the Tribological Pair Composed of SAE 1045 Steel and Zirconium Oxide**. 2018. 22 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

## **ABSTRACT**

Wear studies are extremely important in the industry. Using the current tribology knowledge and technologies can generate significant savings worldwide. The main wear mechanisms encountered in industrial environments failures are abrasion and adhesion. The hardness and microstructure of the materials are properties that influence these wear mechanisms. The objective of this paper is to evaluate the relation between hardness, wear, and microstructure and its wear mechanisms in a tribological pair composed of SAE 1045 steel, quenched and normalized, and zirconium oxide. Pin-on-disk tests were carried out in a tribometer, in which zirconia spheres were frictioned against steel discs. Through microscopy and interferometry, it was possible to evaluate the wear mechanisms of the parts after the tests. It was found that the normalized discs presented lower hardness and higher wear. The tracks of the normalized discs showed severe adhesion wear, and the spheres used in these tests showed elliptical marks because the material was softer. The results of this paper corroborate what is described in the current tribology literature — that the wear resistance increases proportionally according to the hardness of the materials.

**KEYWORDS:** abrasion, adhesion, hardness, wear resistance

## ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	1
3.1. Ensaio pino sobre disco .....	1
3.2. Mecanismos de desgaste .....	2
4. METODOLOGIA .....	5
4.1. Materiais .....	5
4.2. Tribômetro .....	5
4.3. Procedimentos .....	7
4.3.1. Metalografia .....	7
4.3.2. Dureza dos discos .....	7
4.3.3. Medição do desgaste .....	8
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	9
5.1. Microestruturas .....	9
5.2. Dureza dos discos .....	11
5.3. Atrito .....	11
5.4. Volumes desgastados .....	12
5.5. Mecanismos de desgaste .....	13
6. CONCLUSÕES .....	14
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo Jost, 1990, a palavra e o conceito de tribologia foram enunciados pela primeira vez ao mundo em um relatório do Comitê do Departamento Britânico de Educação e Ciência, no dia 9 de março de 1966. Neste relatório, tribologia foi definida como “a ciência e tecnologia das interações entre superfícies em movimento relativo – assim como de assuntos e práticas associadas”. A palavra “tribologia” vem do grego “*tribos*”, que significa “esfregar” ou “deslizar”.

Conforme Stachowiak e Batchelor, 2006, tribologia é a ciência que estuda o atrito, o desgaste e a lubrificação de superfícies em movimento relativo.

De acordo com Holmberg e Erdemir, 2017, aproximadamente 23% de todo o consumo de energia mundial é originário de contatos tribológicos. Se as novas tecnologias de tratamentos superficiais, de escolha de materiais e de lubrificantes fossem utilizadas para redução de atrito e proteção de desgaste em veículos, maquinários e outros equipamentos no mundo, as perdas energéticas poderiam reduzir, potencialmente, em 40% num período de 15 anos. Essas reduções energéticas equivaleriam a 1,4% do PIB do mundo, anualmente, e a 8,7% do consumo total de energia em uma escala mundial. Segundo Ludema, 1996, o desgaste e o atrito geram custos financeiros na forma de perda de energia e material, assim como de dispositivos mecânicos. Logo, a importância do estudo do desgaste e do atrito na economia e no consumo de energia se tornam evidentes.

As diferentes propriedades dos materiais de um par tribológico afetam a maneira com que o desgaste ocorre. O valor da dureza de um material e sua resistência ao desgaste possuem uma relação diretamente proporcional; o efeito da dureza é de diminuir a severidade do desgaste [Ludema, 1996]. Por outro lado, a resistência ao desgaste abrasivo de um aço, por exemplo, também é determinada pelas proporções relativas de austenita, bainita, martensita, perlita e ferrita, assim como pela presença de cementita [Stachowiak e Batchelor, 2006]. Logo, assim como a dureza, a microestrutura também possui uma relação com a resistência ao desgaste.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é avaliar, através de ensaios em tribômetro pino sobre disco, a relação entre dureza e microestrutura no desgaste de discos de aço SAE 1045 quando atritados contra esferas cerâmicas de zircônia.

Os objetivos específicos são:

- Caracterizar a microestrutura dos materiais a serem ensaiados;
- Avaliar a resistência ao desgaste dos materiais em um tribômetro;
- Analisar os mecanismos de desgaste.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1. Ensaio pino sobre disco

Existem vários procedimentos e equipamentos de ensaio para a avaliação de desgaste de materiais, também conhecidos como tribômetros. De acordo com Ingole et al., 2013, qualquer equipamento cuja função seja a avaliação de desgaste deve ser capaz de fornecer movimento relativo entre dois objetos, de aplicar uma carga normal mensurável, e de medir a resistência tangencial ao movimento. Os modelos comerciais mais comuns permitem o controle de variáveis tais como geometria da amostra, carga, velocidade e temperatura. Os tipos mais comuns de tribômetros são: pino sobre disco, pino sobre superfície, pino sobre cilindro, cilindros cruzados e quatro esferas. O modelo mais conhecido de tribômetro é o de pino sobre disco, cujo procedimento é normatizado pela ASTM G99-17.

A norma ASTM G99-17 define o método padrão de teste para medição de desgaste em tribômetro pino sobre disco. Este padrão de teste usa um conjunto específico de parâmetros

(carga, velocidade linear, distância deslizada, diâmetro da ponta do pino, materiais, etc.). Para ensaios cujos parâmetros de teste e particularidades forem iguais aos sugeridos pela norma, diz-se que esses ensaios seguiram os **requerimentos** da ASTM G99. Já para ensaios cujos parâmetros de testes forem diferentes, mas os procedimentos e metodologia seguirem os padrões da norma, pode-se dizer que esses ensaios seguiram os **procedimentos** da ASTM G99.

A metodologia deste trabalho utilizou parâmetros de teste diferentes dos sugeridos pela norma (tais como velocidade e força), conforme a própria ASTM G99 indica. Logo, os ensaios seguiram os procedimentos da ASTM G99 e foram usados para avaliar o atrito e desgaste dos materiais utilizados. Quanto à medição do desgaste, foi utilizada a técnica de interferometria ao invés de usar o método simplificado baseado nas marcas das trilhas e esferas, de acordo com a recomendação dada pela própria norma.

Um desenho esquemático do aparato pino sobre disco pode ser observado na Figura 3.1 a seguir:

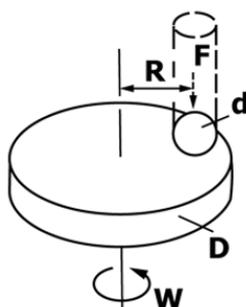


Figura 3.1 – Desenho esquemático do aparato pino sobre disco, onde:  $F$  é a força normal no pino,  $d$  é o diâmetro do pino (ou esfera),  $D$  é o diâmetro do disco,  $R$  é o raio da trilha e  $w$  é a velocidade de rotação do disco (fonte: ASTM G99-17).

### 3.2. Mecanismos de desgaste

Os diferentes tipos de mecanismos de desgaste definidos por Ingole et al., 2013, são: adesão, abrasão, delaminação, erosão, *fretting*, fadiga e corrosão/oxidação.

- O desgaste adesivo se dá pela transferência de material de uma superfície para outra, pelo arrancamento de junções sólidas que foram soldadas a uma das superfícies.
- O desgaste abrasivo ocorre devido às partículas duras ou protuberâncias que deslizam em uma superfície sólida macia.
- O desgaste por delaminação ocorre pela delaminação de finas camadas de material abaixo da interface da superfície de contato.
- O desgaste por erosão se dá pela interação mecânica entre uma superfície sólida e um fluido.
- O *fretting* é causado pela pequena amplitude de movimento tangencial oscilatório entre duas superfícies.
- O desgaste por fadiga é causado pelo crescimento de uma fratura causada por fadiga superficial.
- E o desgaste por corrosão/oxidação acontece quando o deslizamento ocorre num ambiente corrosivo ou oxidativo.

Lancaster, 1963, classificou o desgaste como sendo suave ou severo; o autor propôs que a transição entre desgaste suave e severo é influenciada pela espessura da camada de óxido. A camada de óxido é influenciada por dois fatores: o tempo disponível para a reoxidação de uma região desnudada e pela taxa de formação do óxido, conforme mostra a Figura 3.2.

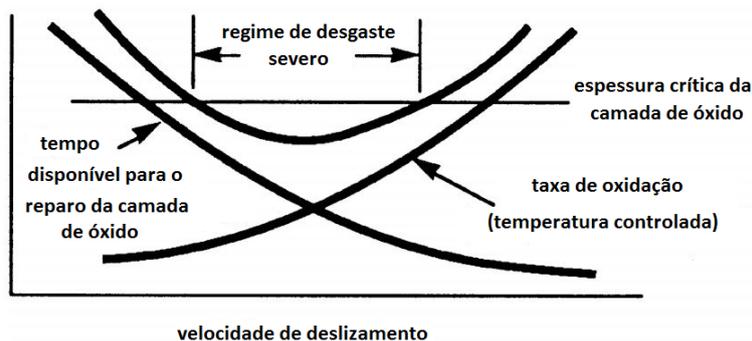


Figura 3.2 – Influência dos fatores que controlam a espessura do filme de óxido (adaptado de Lancaster, 1963).

Ravikiran e Pramila Bai, 1995, avaliaram o desgaste de um aço AISI 4340 contra esferas de óxido de zircônio. Os autores concluíram que os mecanismos de desgaste observados foram abrasão e adesão, conforme ilustrados na Figura 3.3. Ranhuras originadas do processo de abrasão podem ser vistas em (a) e (b), e em (c) observam-se irregularidades na trilha formadas pelo processo de adesão, onde transferência de material ocorre devido a altas temperaturas originárias do atrito entre disco e o pino.

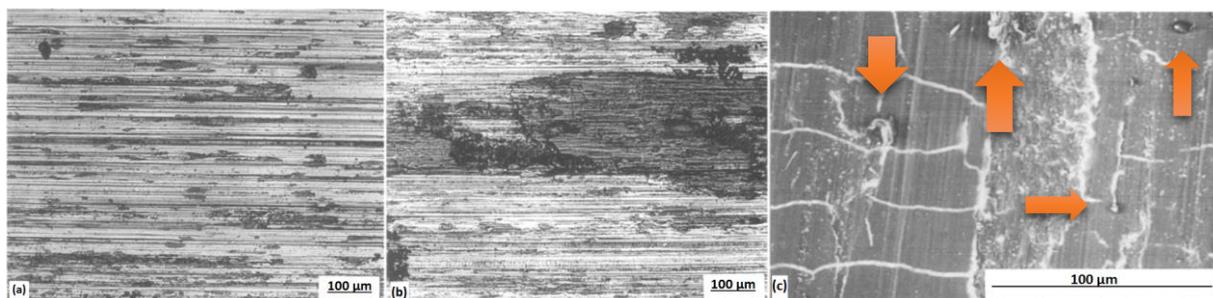


Figura 3.3 – Microscopias ópticas da superfície dos discos a (a) 1,5 m/s e (b) 4,0 m/s. Em (c) a microscopia foi feita na superfície do pino a 4,0 m/s. As setas indicam as marcas de adesão no material. (adaptado de Ravikiran e Pramila Bai, 1995).

Stachowiak e Batchelor, 2006, propuseram um guia de seleção de materiais contendo as propriedades mais críticas quando se deseja amenizar determinado tipo de mecanismo de desgaste. No caso deste trabalho, cujo par tribológico é composto por óxido de zircônio e aço (cerâmica-metal), os mecanismos de desgaste predominantes são abrasão e adesão. As propriedades dos materiais mais críticas que ambos os materiais devem possuir em comum são: elevada dureza e microestrutura heterogênea.

O desgaste abrasivo consiste na raspagem ou arrancamento de pequenos pedaços da superfície de um material por partículas, cantos, pontas ou qualquer sólido que seja duro o suficiente para produzir mais danos a esse material do que a si mesmo [Ludema, 1996]. O autor também define que o desgaste por adesão acontece quando uma força de ligação forte entre duas superfícies que estão em movimento relativo se desenvolve, produzindo uma tensão trativa cujo valor é maior que a força de coesão dos átomos da superfície do material mais fraco, sendo suficiente para deformar os materiais e gerar fraturas. Filmes do material mais macio são transferidos para a superfície mais dura.

Khruschov, 1957, estudou o efeito da dureza no desgaste abrasivo em vários tipos de metais e observou que, em geral, existe uma correlação diretamente proporcional entre a resistência ao desgaste abrasivo e a dureza de um material. Quanto mais duro o metal, mais resistente ele é ao desgaste abrasivo.

Em outro estudo, Mutton e Watson, 1978, avaliaram a resistência ao desgaste de aços com porcentagem de carbono entre 0,04 e 1,23. O resultado deste estudo está plotado na Figura

3.4, onde a resistência ao desgaste está apresentada em função da dureza Vickers em três faixas de tratamento térmico: recozimento, têmpera (de 300° a 600° C) e têmpera (de 20° a 200° C).

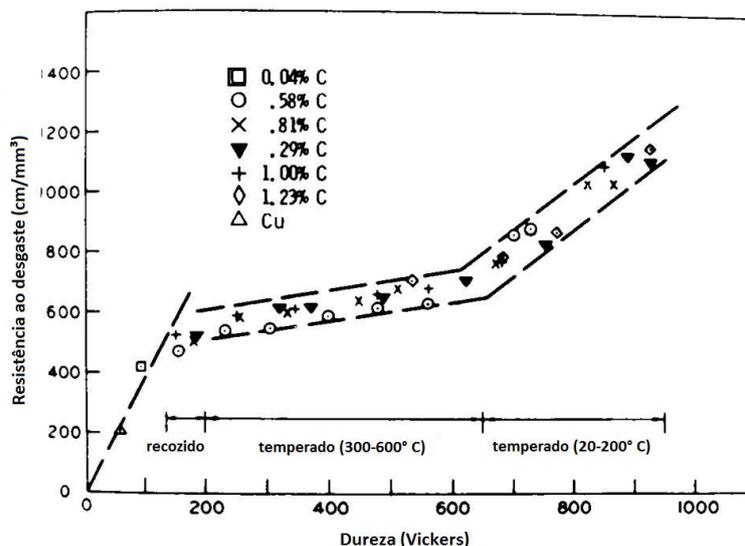


Figura 3.4 – Dureza (Vickers) em função da resistência ao desgaste ( $\text{cm/mm}^3$ ) para diferentes tipos de aços e diferentes tratamentos térmicos (adaptado de Mutton e Watson, 1978).

Zum Gahr, 1987, compara (Figura 3.5) a resistência ao desgaste por deslizamento de diferentes microestruturas do aço. Sob elevadas cargas (a), estruturas bainíticas podem ser mais favoráveis à resistência ao desgaste que estruturas martensíticas de igual dureza; nesse caso, a dureza não é um parâmetro confiável de medir a resistência ao desgaste. Estruturas perlíticas são superiores às estruturas contendo esferoidita. Além disso, pequenas quantidades de austenita retida podem ser vantajosas. Com cargas menores, a influência da dureza é menor ainda (b). A austenita retida torna-se prejudicial, e a resistência ao desgaste de estruturas perlíticas excede a de estruturas bainíticas e martensíticas. A formação de uma camada originária de reações triboquímicas de grande aderência melhora a resistência ao desgaste substancialmente.

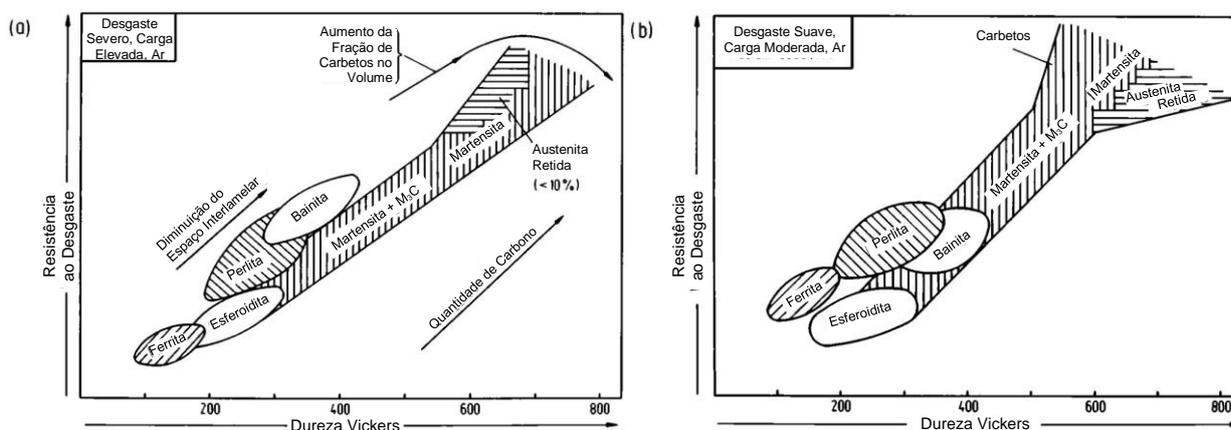


Figura 3.5 – Resistência ao desgaste por deslizamento em função da dureza Vickers de diferentes microestruturas do aço. (a) desgaste severo, (b) desgaste suave (adaptado de Zum Gahr, 1987).

## 4. METODOLOGIA

Neste capítulo, serão descritos os materiais e métodos que foram utilizados neste trabalho.

### 4.1. Materiais

Foram usinados 6 discos de aço SAE 1045 com 15 mm de espessura e 55 mm de diâmetro. Após a usinagem, todos os discos foram temperados. Para obter duas configurações de tratamentos térmicos, 3 discos foram, posteriormente, normalizados. As combinações de discos e tratamentos térmicos estão apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Material e tratamento térmico dos discos.

Disco	Tratamento Térmico	Material
1A	Temperado	Aço SAE 1045
1B		
1C		
2A	Normalizado	
2B		
2C		

Esferas cerâmicas de óxido de zircônio ( $ZrO_2$ ) com 8 mm de diâmetro foram utilizadas como pino nos ensaios do tribômetro. Os materiais podem ser vistos, em maiores detalhes, na Figura 4.1 a seguir:

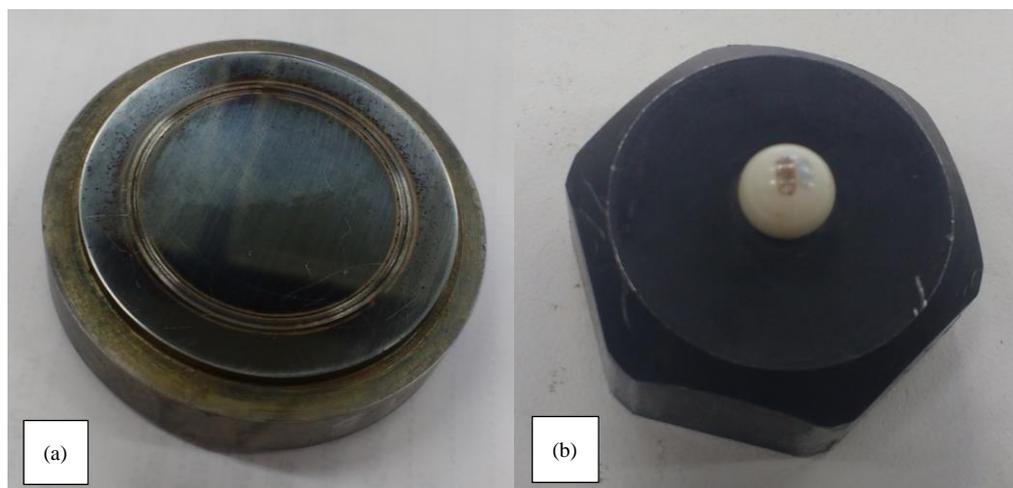


Figura 4.1 – (a) disco e (b) esfera.

### 4.2. Tribômetro

Neste trabalho, foi utilizado um tribômetro do tipo pino sobre disco do Laboratório de Tribologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Figura 4.2). Este equipamento possui capacidade de aplicar até 4700 N de força e alcançar velocidade de rotação de até 4100 rpm. O tribômetro está em conformidade com a norma ASTM G99-17.

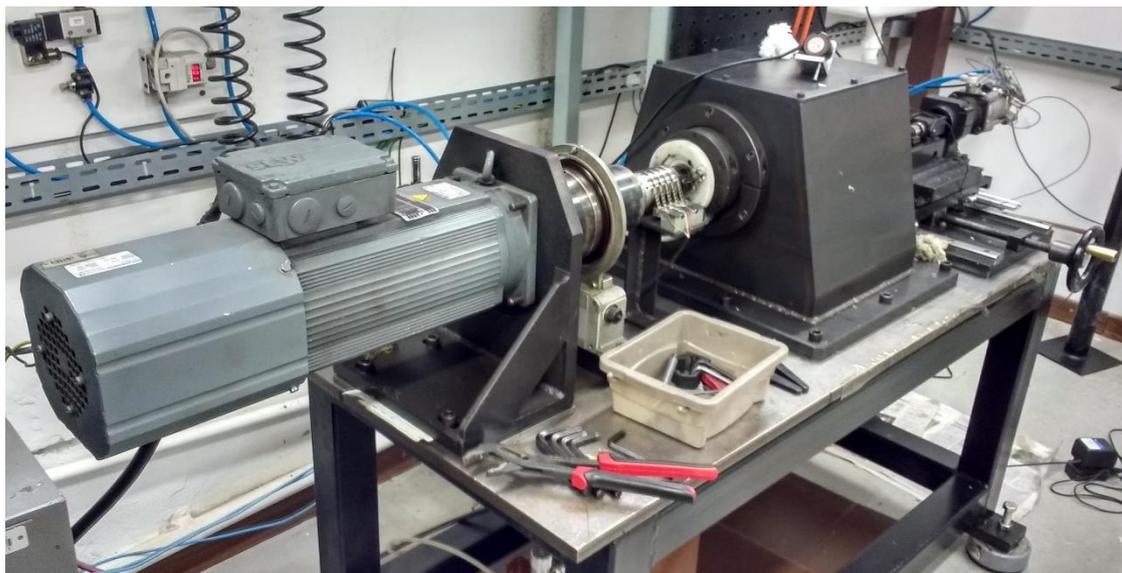


Figura 4.2 – Tribômetro pino sobre disco do LATRIB.

Os ensaios consistem das seguintes etapas: atritar a esfera (que está fazendo o papel de pino no ensaio) contra o disco através de um atuador cuja força é regulada por um sistema de controle do equipamento. A esfera é firmemente presa e tem seu movimento restrito dentro do suporte localizado na ponta do atuador. A Figura 4.3 ilustra o atuador, a esfera e seu suporte durante um ensaio.

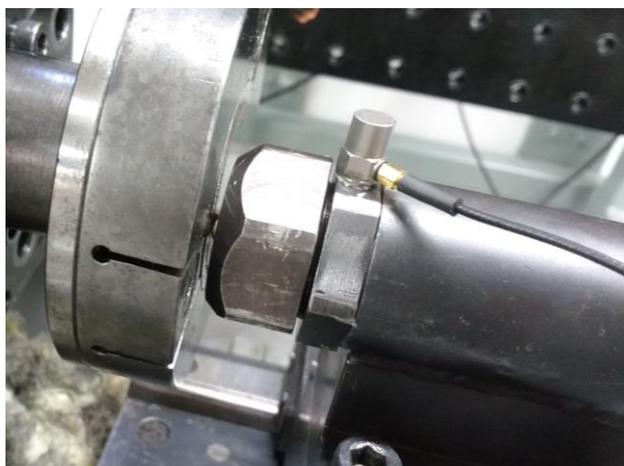


Figura 4.3 – Atuador, esfera e suporte.

O tribômetro possui um sistema de aquisição de dados (Lynx ADS1800) capaz de adquirir valores de força, rotação, torque e temperatura em função do tempo a uma taxa de 15 Hz. Os dados de temperatura não serão analisados neste trabalho, pois os ensaios serão realizados em temperatura ambiente.

O atrito foi calculado pela equação abaixo.

$$\mu = \frac{T}{F.r} \quad (1)$$

Onde T é o torque medido pelo transdutor de carga [N.m], F é a força normal medida pela célula de carga [N] e r é o raio de deslizamento de aplicação da força [m].

### 4.3. Procedimentos

Dos 6 discos usinados, apenas 4 discos foram utilizados nos ensaios de desgaste: 1B, 1C, 2A e 2B. Os outros dois discos (1A e 2C) foram utilizados para metalografia, com o objetivo de avaliar a microestrutura dos disco temperados e dos discos normalizados.

Para a realização dos ensaios, os discos 1B, 1C, 2A e 2B foram lixados visando atingir uma rugosidade inferior a  $0,8 \mu\text{m}$ . As lixas utilizadas tinham, respectivamente, as granulometrias de 180, 240, 320, 600 e 1200. Após lixados, foi medida a rugosidade média ( $R_a$ ) dos discos para verificar se estavam em conformidade com a rugosidade mínima de  $0,8 \mu\text{m}$  recomendada pela norma ASTM G99-17 para a execução dos ensaios. As medições foram realizadas, utilizando um rugosímetro portátil digital da marca Mitutoyo, modelo SJ-210, e todos os valores de rugosidade média ( $R_a$ ) foram menores que  $0,1 \mu\text{m}$ .

Os parâmetros utilizados nos ensaios no tribômetro estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros dos ensaios realizados no tribômetro.

Disco	Raio da Trilha [mm]	Força [N]	Velocidade Linear [m/s]	Distância Deslizada [m]	Rotação [rpm]	Tempo de Ensaio [s]	Taxa de Aquisição [Hz]
1B	18	200	0,25	1800	133	7200 (2 h)	5
1C							
2A							
2B							

No total, foram obtidas 6 trilhas nos ensaios do tribômetro, uma trilha para cada face de disco, arrançadas em 4 discos. Para cada tipo de tratamento térmico, foram realizadas 3 trilhas.

#### 4.3.1. Metalografia

Os discos foram cortados, embutidos, lixados, polidos e receberam um ataque químico com Nital. Para o lixamento, foram utilizadas lixas com granulometrias: 80, 120, 320, 400, 600 e 1200. As amostras foram polidas em uma politriz com o uso de uma pasta diamantada, e a metalografia foi realizada em um microscópio óptico da marca Zeiss. Todas as etapas foram executadas no LAMEF.

#### 4.3.2. Dureza dos discos

Foram realizadas medidas de dureza Brinell nos discos. Foram realizadas seis medidas ao lado de cada trilha de desgaste, conforme mostra a Figura 4.4.



Figura 4.4 – Configuração das medidas de dureza próximas às trilhas.

Foi utilizado um durômetro automático da marca EMCO-TEST, modelo DuraVision 30 G5. Os parâmetros utilizados para a medição no durômetro foram HBW 2.5/187,5; parâmetros, estes, caracterizados por uma esfera de carbeto de tungstênio com diâmetro de 2,5 mm e força de 187,5 kgf. No total, foram realizadas 36 medidas de dureza (6 medidas para cada trilha).

#### 4.3.3. Microscopia óptica

Para a identificação dos mecanismos de desgaste após os ensaios, imagens das trilhas foram coletadas utilizando um microscópio da marca Zeiss, modelo Lab.A1 e o *software* AxioVision SE64. De maneira complementar, também foi utilizada uma lupa da marca Zeiss, modelo Stemi 508 em conjunto com o *software*, para imagens com menor ampliação.

#### 4.3.3. Medição do desgaste

Foram utilizadas duas técnicas para o cálculo do volume desgastado. Para os discos, foram realizadas interferometrias e para as esferas utilizou-se um método de cálculo proposto pela ASTM G99-17.

A interferometria dos discos foi realizada em um equipamento da marca Bruker, modelo CountourGT-K 3D, localizado no LAMEF. Este método gera um modelo tridimensional da região analisada. Foram realizadas 2 interferometrias por trilha, onde cada trilha seria analisada em dois trechos distintos. Os dados de cada trecho foram analisados no *software* AxioVision SE64, onde perfis bidimensionais foram traçados na imagem tridimensional gerada pelo interferômetro. Na Figura 4.5, estão exemplificadas a imagem tridimensional e o plano de corte. No total, são traçados 4 perfis bidimensionais por trecho tridimensional, perfis estes que são exportados do AxioVision após processamento. Na parte superior da Figura 4.5 está representado um exemplo de um perfil bidimensional de um dos trechos de uma das trilhas.

Os dados dos trechos foram importados para o *software* MATLAB e os volumes de cada trilha foram calculados utilizando-se um programa desenvolvido para esta aplicação. Este programa utiliza o perfil bidimensional de cada trecho para calcular o volume desgastado de cada trilha, através da área vazia abaixo da linha neutra do disco e revolucionando esta área para obter um valor de volume. O ponto central utilizado para gerar o sólido de revolução é o ponto central do disco, cuja distância até a trilha é o raio de deslizamento.

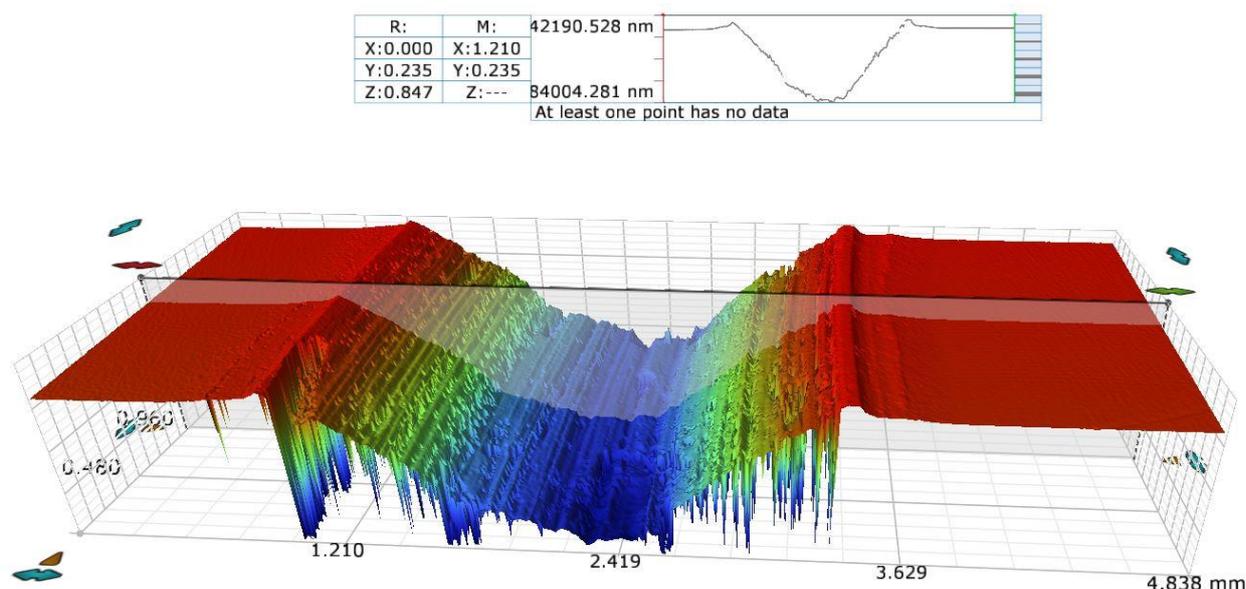


Figura 4.5 – Representação do perfil tridimensional, bidimensional e de um plano de corte de uma trilha do disco.

Na Figura 4.6 está representado o resultado do programa utilizado no MATLAB para uma das trilhas. É calculada a área vazia abaixo da linha horizontal traçada a partir do valor zero do eixo Y (que representa a superfície do disco), e esta área é revolucionaada, gerando o valor de volume desgastado da trilha.

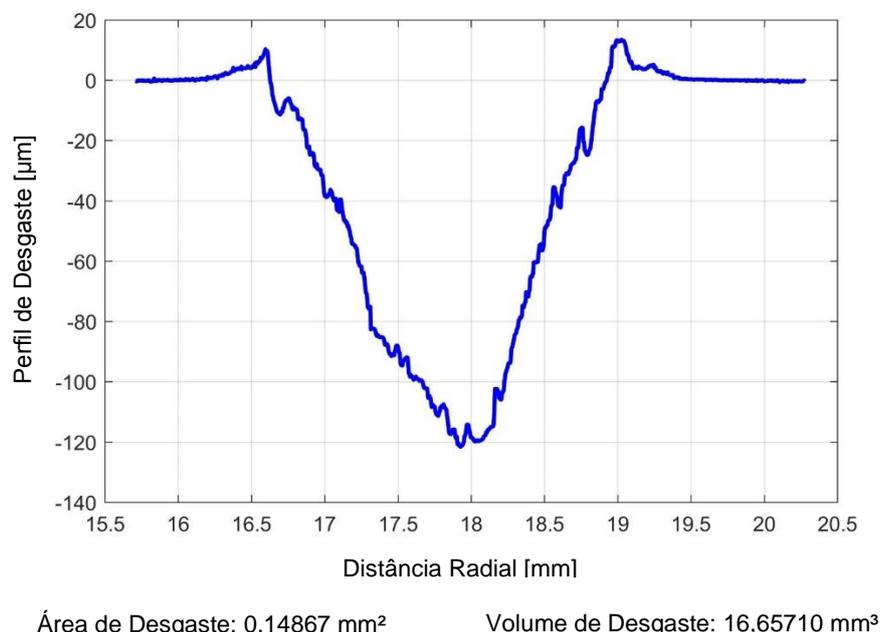


Figura 4.6 – Perfil bidimensional do trecho da trilha utilizado no MATLAB. Na parte inferior da figura, estão representados os valores de área e volume desgastados.

Para o cálculo do volume desgastado das esferas, foi utilizado o método proposto pela ASTM G99-17. Este método utiliza a Equação 2 para calcular o volume  $V$ , onde  $h$  é a distância do ponto central do plano até a superfície da esfera e  $a$  é o raio do plano circular desgastado.

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

$$h = r - \sqrt{r^2 - a^2} \quad (3)$$

Para obter o raio do plano circular desgastado, é necessário saber a área desgastada da marca da esfera. O valor desta área foi obtido utilizando o software ImageJ nas imagens geradas com lupa das marcas das esferas. Com base na ampliação e na escala da imagem, o *software* permite calcular a área da marca da esfera utilizando-se de uma ferramenta para traçar a área ao redor da marca.

Para o caso das esferas utilizadas nos discos normalizados, onde as marcas não apresentaram perfis circulares, e sim perfis elípticos, foram considerados no cálculo do volume círculos de áreas iguais às áreas obtidas pelo *software* ImageJ.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Microestruturas

As amostras foram analisadas na direção transversal das peças. A periferia representa a região mais próxima das faces dos discos e o núcleo representa a região que está geometricamente entre as faces.

Na Figura 5.1, é apresentada a microestrutura do disco temperado (1A).

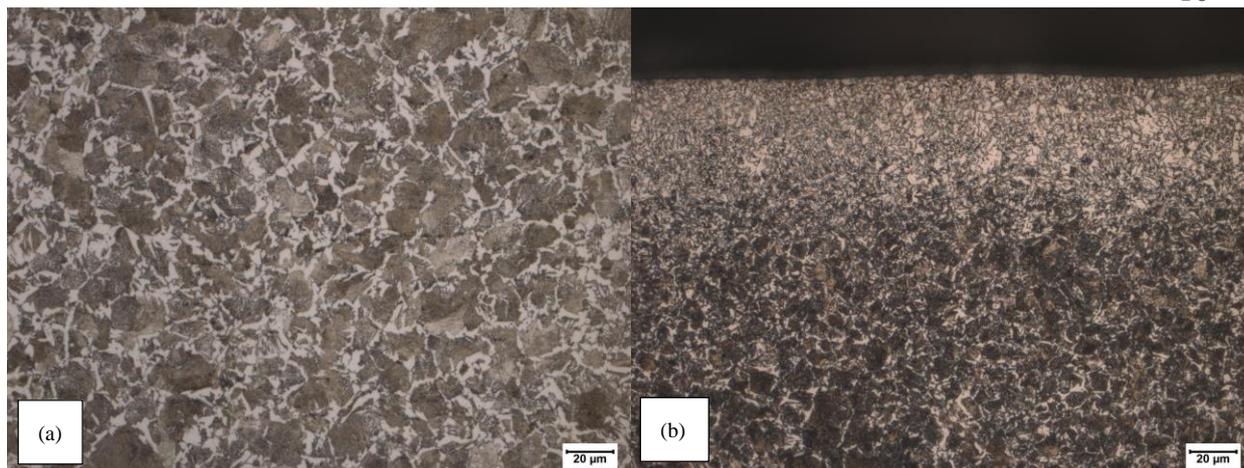


Figura 5.1 – Metalografia do disco temperado. (a) microestrutura do núcleo, escala de 20  $\mu\text{m}$  e ampliação de 500x. (b) microestrutura da periferia da amostra, 20  $\mu\text{m}$  e ampliação de 500x.

Pela análise da microestrutura, observa-se que a têmpera não foi executada corretamente. Espera-se que a microestrutura de um aço médio carbono (como o aço SAE 1045) temperado tenha uma matriz formada por martensita, bainita e perlita. Porém, a microestrutura predominante no núcleo é a perlítica com ferrita no contorno de grão. Constatou-se que, na periferia da peça, há uma pequena formação de martensita (grãos na forma de agulhas), indicando que a o resfriamento do processo de têmpera não foi rápido o suficiente para a formação de martensita de maneira homogênea por todo o disco. A razão que explica a têmpera inadequada do disco se dá pelo fato de que o aço SAE 1045 possui uma baixa temperabilidade. A espessura do disco foi responsável pela baixa taxa de resfriamento obtida na têmpera, ocasionando pouca formação de martensita. No caso deste material, para alcançar uma têmpera adequada, seria necessário um disco com espessura menor (considerando que a peça teria o mesmo diâmetro).

A microestrutura do disco normalizado (2C) é apresentada na Figura 5.2.

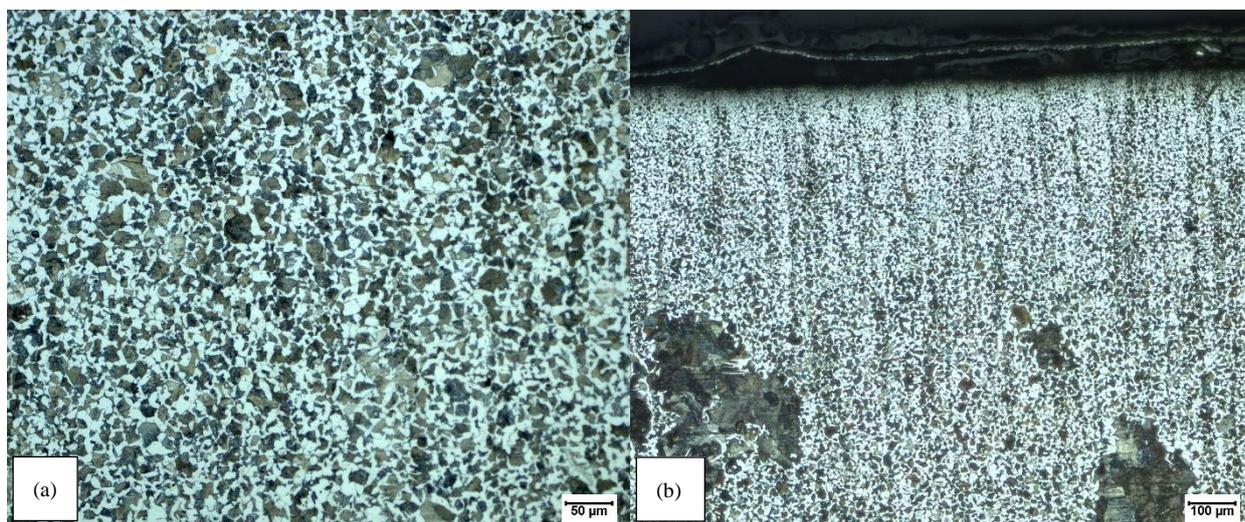


Figura 5.2 – Metalografia do disco normalizado. (a) microestrutura do núcleo, escala de 50  $\mu\text{m}$  e ampliação de 200x. (b) microestrutura da periferia da amostra, 100  $\mu\text{m}$  e ampliação de 100x.

Em uma peça de aço médio carbono normalizada, a matriz da microestrutura caracteriza-se pela presença de ferrita e perlita. Tal característica foi confirmada pela análise das imagens obtidas na metalografia. Para efeito de comparação, observa-se que a presença de ferrita no disco normalizado (Figura 5.2) é muito maior que a do disco temperado (Figura 5.1a). A peça temperada possui uma concentração de perlita muito maior que a normalizada, enquanto que a

normalizada possui uma concentração maior de ferrita que a temperada. Este resultado está de acordo com o esperado, já que, no processo de têmpera, o rápido resfriamento faz com que a austenita se transforme em martensita, bainita ou perlita; logo, a presença de ferrita não deve ser alta.

## 5.2. Dureza dos discos

Na Tabela 5.1 são mostradas as durezas medidas nos quatro discos ensaiados. A dureza média nas trilhas dos discos temperados foi de 286 HB, enquanto que para os discos normalizados foi de 191 HB.

As medidas de dureza estão de acordo com o previsto, visto que o disco temperado deveria ter maior dureza, devido à maior presença de perlita e menor presença de ferrita. Enquanto que o disco normalizado deveria ter dureza menor por apresentar uma presença dominante de ferrita como microestrutura.

Tabela 5.1 – Medidas de dureza nas trilhas ensaiadas em Brinell.

Temperados						Normalizados					
Disco 1B		Disco 1C				Disco 2A				Disco 2B	
Trilha 2		Trilha 1		Trilha 2		Trilha 1		Trilha 2		Trilha 2	
Externa	Interna										
308,0	286,0	285,0	275,0	274,0	268,0	196,0	181,0	192,0	186,0	185,0	192,0
304,0	285,0	286,0	275,0	273,0	274,0	192,0	185,0	190,0	188,0	200,0	195,0
300,0	287,0	281,0	278,0	273,0	276,0	189,0	186,0	195,0	182,0	196,0	194,0
Média	Média										
304,0	286,0	284,0	276,0	273,3	272,7	192,3	184,0	192,3	185,3	193,7	193,7
Média da trilha		Média da trilha		Média da trilha		Média da trilha		Média da trilha		Média da trilha	
295,0		280,0		273,0		188,2		188,8		193,7	
Média do disco		Média do disco				Média do disco				Média do disco	
295,0		276,5				188,5				193,7	

## 5.3. Atrito

Na Figura 5.3, estão representadas as curvas de atrito para todos os ensaios. Um atrito médio de cada ensaio foi obtido desconsiderando-se os primeiros 30 minutos do ensaio, etapa essa considerada como assentamento.

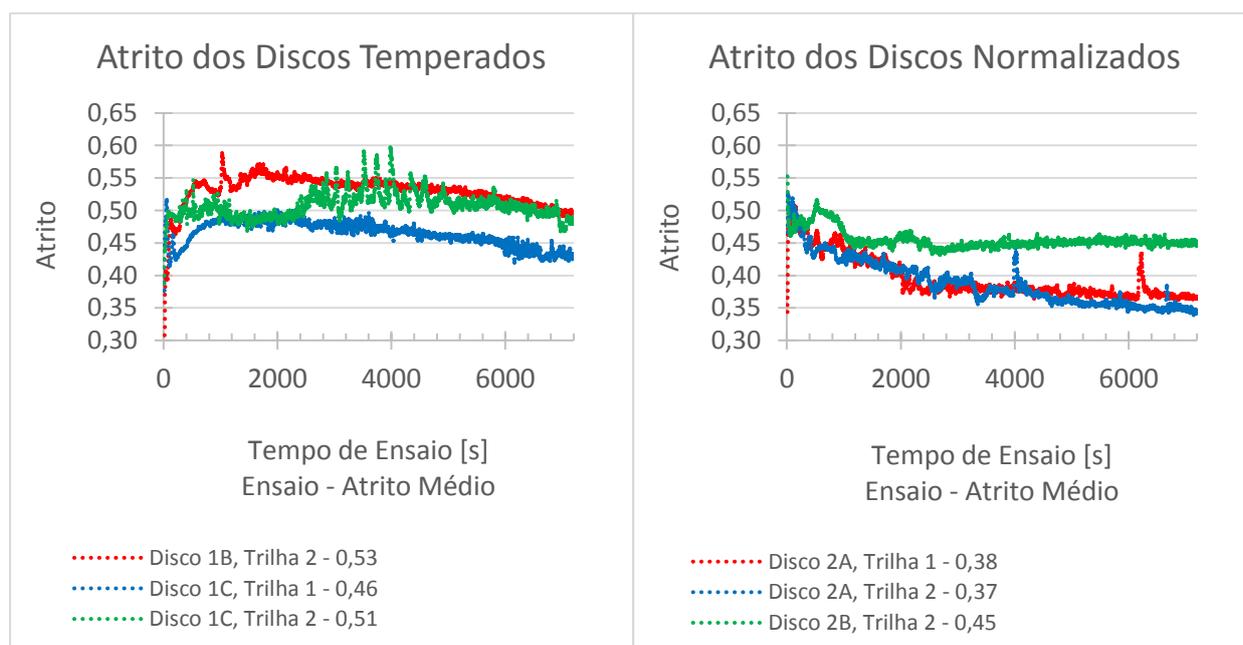


Figura 5.3 – Curvas de atrito das trilhas.

#### 5.4. Volumes desgastados

A seguir, estão apresentados os valores calculados de volume desgastado dos discos (Tabela 5.2) e esferas (Tabela 5.3).

Tabela 5.2 – Medidas de volume desgastado dos discos em mm<sup>3</sup>.

Temperados						Normalizados					
Disco 1B		Disco 1C				Disco 2A				Disco 2B	
Trilha 2		Trilha 1		Trilha 2		Trilha 1		Trilha 2		Trilha 2	
Trecho 1	Trecho 2										
1,84	1,52	2,27	1,50	3,23	4,03	17,12	16,66	14,84	14,36	9,95	13,50
1,77	1,44	2,60	1,48	3,07	4,11	17,70	15,88	16,01	14,81	9,92	13,49
1,76	1,43	1,07	1,52	3,08	4,09	17,26	15,86	15,05	14,33	9,95	13,66
1,78	1,41	1,00	1,62	3,16	4,12	17,32	16,50	15,01	14,49	10,01	13,22
Média	Média										
1,79	1,45	1,73	1,53	3,13	4,09	17,35	16,22	15,23	14,50	9,96	13,47
Volume desgastado médio		Volume desgastado médio		Volume desgastado médio		Volume desgastado médio		Volume desgastado médio		Volume desgastado médio	
1,62		1,63		3,61		16,79		14,86		11,71	

Tabela 5.3 – Medidas de volume desgastado das esferas.

	Temperados			Normalizados		
	Disco 1B	Disco 1C		Disco 2A		Disco 2B
	Trilha 2	Trilha 1	Trilha 2	Trilha 1	Trilha 2	Trilha 2
Área desgastada (A) [mm <sup>2</sup> ]	3,42	4,05	4,73	5,15	5,18	5,11
Raio equivalente (a) [mm]	1,04	1,13	1,23	1,28	1,28	1,28
Raio da esfera (r) [mm]	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Distância do ponto central até superfície (h) [mm]	0,14	0,16	0,19	0,21	0,21	0,21
Volume desgastado [mm <sup>3</sup> ]	0,24	0,33	0,46	0,55	0,55	0,54

Na figura 5.4, estão representados, de forma comparativa, os valores de volume desgastado dos discos e das esferas.

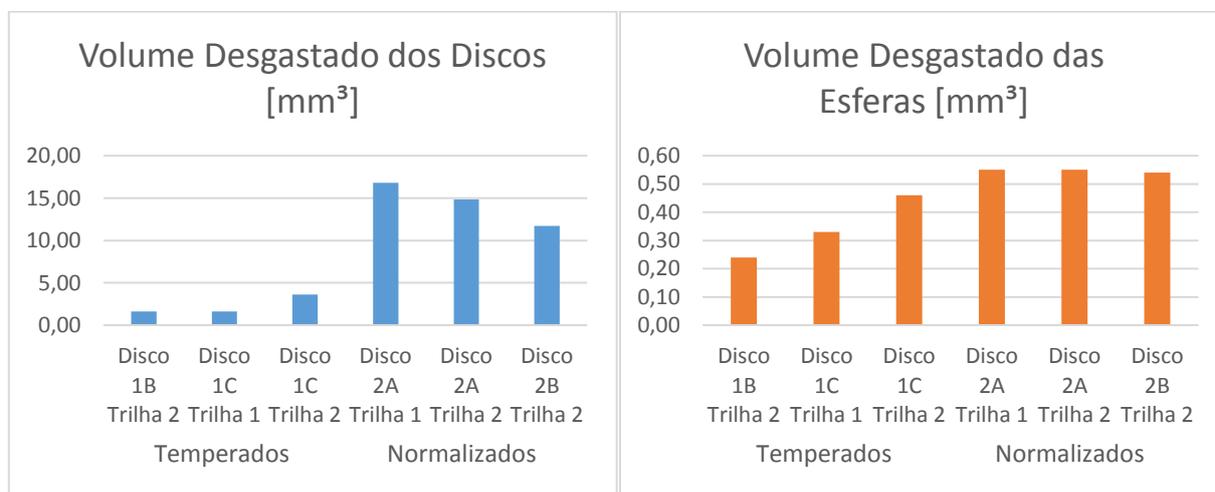


Figura 5.4 – Valores de volume desgastado.

Observa-se que os desgastes dos discos temperados foram muito menores que os dos discos normalizados. Este resultado está de acordo com o estudo de Mutton e Watson, 1978, que mostra que, quanto maior a dureza do aço, maior sua resistência ao desgaste.

### 5.5. Mecanismos de desgaste

As microscopias de todas as trilhas podem ser observadas na Figura 5.5.

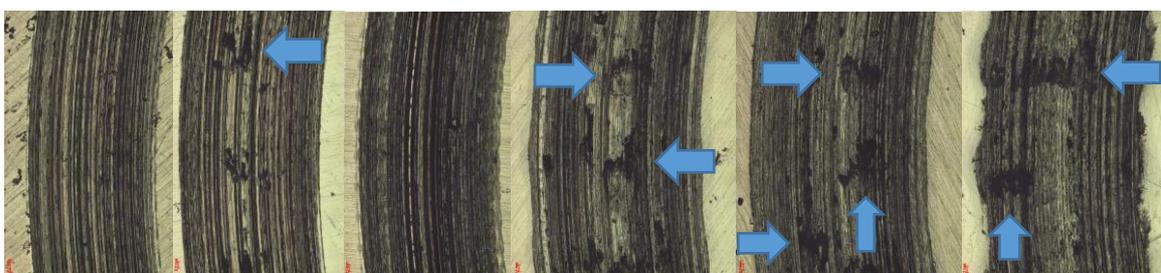


Figura 5.5 – Microscopias de cada disco. As três primeiras trilhas, da esquerda para a direita, são de discos temperados, e as três últimas de discos normalizados. As setas indicam as marcas de adesão.

É possível observar similaridades nos mecanismos de desgaste das 6 trilhas. Os mecanismos de desgaste predominantes nas trilhas foram abrasão e adesão, corroborando o que foi descrito por Stachowiak e Batchelor, 2006, em um estudo realizado sobre o par tribológico de aço-cerâmica. Contudo, os desgastes nos discos normalizados foram muito mais severos, apresentando marcas de adesão maiores que aquelas evidenciadas nos discos temperados. Conforme descrito por Ludema, 1996, a natureza mais macia do aço normalizado foi responsável pela força de coesão dos átomos de sua superfície serem menores que as do aço temperado, logo, a tensão trativa ocasionada pela força de ligação entre as superfícies em movimento relativo foi maior do que a força de coesão nas trilhas dos discos normalizados.

A aparência geral das trilhas é formada por sulcos gerados pelo desgaste abrasivo. Nos discos temperados, os sulcos foram mais profundos. De acordo com Ludema, 1996, isso deve-se ao fato de que o material é mais duro, logo, as partículas arrancadas por adesão funcionam como um abrasivo que são arrastadas pela superfície formando os sulcos.

Na Figura 5.6 estão apresentadas as microscopias dos desgastes das esferas.

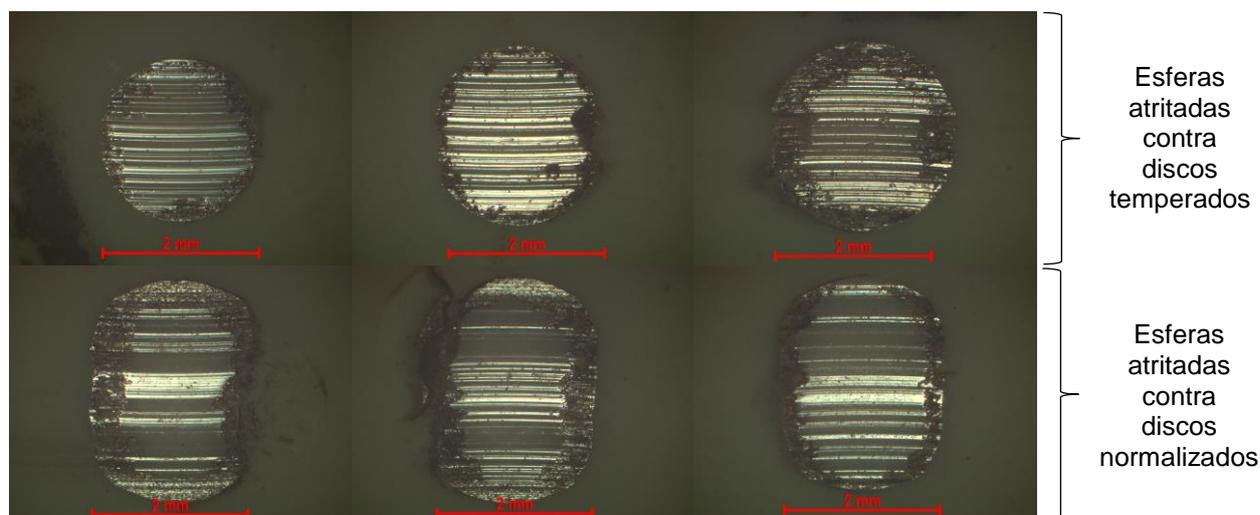


Figura 5.6 – Microscopias dos desgastes das esferas. Na linha superior, as esferas usadas nos discos temperados. Na linha inferior, as esferas usadas nos discos normalizados.

Observou-se que esferas utilizadas nos discos normalizados apresentaram marcas em formato oval, diferente das marcas utilizadas nos discos temperados que apresentaram marcas circulares. A explicação para isso deve-se ao fato de que os discos normalizados eram mais macios que os discos temperados, gerando um perfil de marca que, além de não ser circular, não é plano. Na Figura 5.7 estão representadas duas interferometrias de marcas: uma gerada por um disco temperado e outra gerada por um disco normalizado.

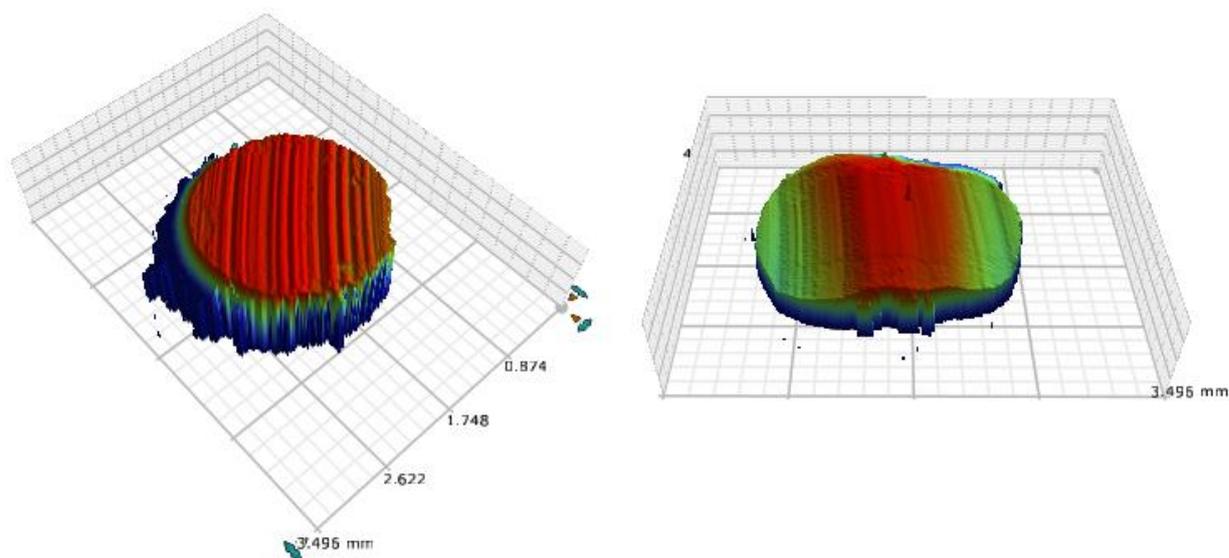


Figura 5.7 – Interferometria das marcas geradas nas esferas quando atritadas contra um disco temperado (à esquerda) e normalizado (à direita).

Pela interferometria, foi possível observar que, enquanto o desgaste gerado na esfera quando atrita contra um disco temperado apresentou um nivelamento homogêneo, o desgaste gerado contra um disco normalizado foi maior nas bordas da marca, gerando um perfil não plano de desgaste. A causa dessa diferença de perfis de desgaste, provavelmente, se dá pela natureza mais macia do aço normalizado.

## 6. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi possível concluir que alterações no nível de dureza do aço SAE 1045 resultam em mudanças na severidade dos mecanismos de desgaste que ocorrem na situação onde discos deste material são atritados contra esferas de zircônia. Foi evidenciado um aumento considerável de desgaste nos discos cujas durezas foram menores, evidenciando a importância da dureza na resistência ao desgaste. Estes resultados estão de acordo com a literatura atual sobre tribologia.

Os mecanismos de desgaste previstos (abrasão e adesão) foram observados ao final dos ensaios, corroborando a literatura.

Pela avaliação da microestrutura, constatou-se que os discos de aço SAE 1045 que foram somente temperados não apresentaram uma matriz formada por martensita, bainita e perlita devido à baixa temperabilidade do material. A microestrutura avaliada continha, predominantemente, perlita com ferrita no contorno de grão. A espessura do disco deveria ser menor para que houvesse uma presença predominante de martensita, bainita e perlita após o processo de têmpera. A baixa resistência ao desgaste dos discos normalizados foi causada pela presença predominante de uma matriz ferrítica. Foi observado neste trabalho que este tipo de

microestrutura apresentou menor resistência ao desgaste, estando de acordo com as informações encontradas na literatura.

Observou-se, também, a diferença na geometria das marcas das esferas, causada pela diferença de dureza entre os discos com diferentes tratamentos térmicos.

## 7. 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., 2017

Holmberg, K.; Erdemir, A.; “**Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions**”, Friction, v. 5, n. 3, pp. 263-284, 2017.

Ingole, S., et al.; “**Tribology for scientists and engineers**”, New York: Springer, 2013.

Jost, H. P.; “**Tribology-origin and future**”, Wear, v.136, pp. 1-17, 1990.

Khruschov, M. M.; “**Resistance of Metals to Wear by Abrasion, as Related to Hardness**”, Proceedings of the Conference on Lubrication and Wear, Institute of Mechanical Engineers, pp. 655-659, London, 1957.

Lancaster, J. K.; “**The Formation of Surface Films at the Transition between Mild and Severe Metallic Wear**”, Proceedings Of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, [s.l.], v. 273, n. 1355, pp. 466-483, 11 jun. 1963.

Ludema, K. C.; “**Friction, Wear, Lubrication: A Textbook in Tribology**”, CRC Press, 1<sup>st</sup> edition, 1996.

Mutton, P. J.; Watson, J. D.; “**Some Effects of Microstructure on the Abrasion Resistance of Metals**”, Wear, vol. 48, pp. 385-398, 1978.

Ravikiran, A.; Pramila Bai, B. N.; “**Sliding wear of YTZP ceramic against steel: observations on ceramic transfer and wear transition**”, Journal of Materials Science, [s.l.], v. 30, n. 8, pp. 1999-2007, 1995.

Stachowiak, G. W.; Batchelor, A. W.; “**Engineering Tribology**”, Tribology Series 24, 3<sup>rd</sup> edition, 2006.

Zum Gahr, K.; “**Microstructure and wear of materials**”, 1<sup>st</sup> edition, Amsterdam: Elsevier, 1987.