

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

ARIADNE NEUBER

CALIBRAÇÃO E AFERIÇÃO DA REPRODUTIBILIDADE DO EQUIPAMENTO DE
ENSAIO DE DEGASTE TIPO PINO SOBRE DISCO ROTATIVO

Jaraguá do Sul

2017

ARIADNE NEUBER

CALIBRAÇÃO E AFERIÇÃO DA REPRODUTIBILIDADE DO EQUIPAMENTO DE
ENSAIO DE DEGASTE TIPO PINO SOBRE DISCO ROTATIVO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso Superior de
Tecnologia em Fabricação Mecânica
do Instituto Federal de Santa Catarina
Câmpus Jaraguá do Sul – Rau para
obtenção do título de Tecnólogo em
Fabricação Mecânica.

Orientador: Dr. Joel Stryhalski

Jaraguá do Sul

2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
por meio do programa de geração automática do câmpus Rau, do IFSC

Neuber, Ariadne

**CALIBRAÇÃO E AFERIÇÃO DA REPRODUTIBILIDADE DO EQUIPAMENTO
DE ENSAIO DE DESGASTE TIPO PINO SOBRE DISCO ROTATIVO
/ Ariadne Neuber ; orientação de Joel Stryhalski.**

Jaraguá do Sul, SC, 2017.

65 p.

**Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul -
Rau. Tecnologia em Fabricação Mecânica. .
Inclui Referências.**

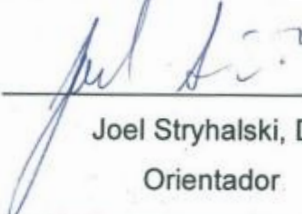
**1. Tribômetro. 2. Ensaio de desgaste tipo pino sobre
disco. 3. Tribologia. I. Stryhalski, Joel. II. Instituto
Federal de Santa Catarina. . III. Título.**

ARIADNE NEUBER

CALIBRAÇÃO E AFERIÇÃO DA REPRODUTIBILIDADE DO EQUIPAMENTO DE
ENSAIO DE DEGASTE TIPO PINO SOBRE DISCO ROTATIVO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em tecnólogo em
Fabricação Mecânica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora
abaixo indicada.

Jaraguá do Sul, 02 de agosto de 2017.



Joel Stryhalski, Dr.
Orientador

Instituto Federal de Santa Catarina Campus Jaraguá do Sul – Rau



Julio Cesar Giubilei Milan, Dr.

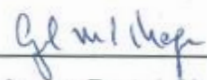
Universidade do Estado de Santa Catarina - Câmpus Universitário Prof. Avelino

Marcante



Alexandre Galiotto, Me.

Instituto Federal de Santa Catarina Campus Jaraguá do Sul – Rau



Gil Magno Portal Chagas, Dr.

Instituto Federal de Santa Catarina Campus Jaraguá do Sul – Rau

Dedico a todos aqueles que de alguma
forma contribuíram para a minha vida
pessoal, acadêmica e profissional.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, por ter me dado forças para atingir meus objetivos e enfrentar as dificuldades.

Aos meus familiares, por todo incentivo e amor.

Aos meus amigos e aos colegas de turma pelo companheirismo e amizade.

Ao meu orientador Joel Stryhalski, Dr., por todo aprendizado, dedicação e paciência.

Aos professores Gil M. P. Chagas, Alexandre Galiotto e Miriam Hennig, pelo aprendizado e incentivo na realização deste trabalho. Ao Rhafael Beppler por toda ajuda e aprendizado. Ao professor Jean S. Pimenta e a Priscila E. K. Lopes do laboratório de ensaio de materiais, pela ajuda e incentivo. Aos técnicos de laboratório Adriano e Gustavo.

Ao IFSC – Câmpus Jaraguá do Sul – Rau e a UDESC pela disponibilização dos equipamentos e laboratórios.

Aos professores e a todos que contribuíram para a minha formação.

Muito obrigada!

“Tu te tornas eternamente responsável por aquilo
que cativas.” (Antoine de Saint-Exupéry)

RESUMO

Os estudos para diminuição de problemas causados pelo desgaste, devido o efeito do atrito entre materiais, vêm recebendo um aumento significativo. A área responsável por este estudo é conhecida como tribologia, que analisa a interação entre materiais e as alterações causadas pela influência da força e a conversão desta no movimento relativo das superfícies. Desta forma, diferentes tipos de ensaios são empregados na análise de desgaste dos materiais. Um deles é o ensaio de desgaste do tipo pino sobre disco, descrito pela norma ASTM G99. Este trabalho possui como foco a aferição do tribômetro desenvolvido e construído no Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul – Rau, através de uma pesquisa laboratorial. Testes envolvendo a forma construtiva e a instrumentação do tribômetro foram realizados, assim como ajustes no equipamento. Como forma de verificação da repetibilidade dos ensaios, foram ensaiadas dez amostras do disco de aço SAE 1045, no tribômetro do IFSC, sendo cinco com a carga aplicada de 10 N e cinco com a carga de 20 N, a esfera utilizada foi a de alumina. Estes ensaios foram repetidos também em um tribômetro já validado localizado na Universidade do Estado de Santa Catarina, de modo a ser realizada uma comparação de resultados. Após os ensaios, foram avaliados os coeficientes de atrito, características da pista de desgaste e perda de volume do material do disco. O material do disco foi caracterizado quanto a sua microestrutura e dureza Brinell. Um ensaio com carga de 10 N e lubrificação também foi realizado no tribômetro do IFSC. Assim, os resultados obtidos nos ensaios demonstraram que, de maneira geral, o tribômetro avaliado apresentou uma boa repetibilidade e confiabilidade nos ensaios, necessitando de uma melhor avaliação quanto à perda de volume apresentada nas amostras dos discos.

Palavras chave: Tribômetro. Ensaio de desgaste tipo pino sobre disco. Tribologia

ABSTRACT

The studies to reduce problems caused by wear, due to the effect of friction between materials, have been receiving a significant increase. The area responsible for this study is known as tribology, which analyzes the interaction between materials and the changes caused by the relative movement of surfaces. Different types of tests are used in the analysis of wear of materials, one of them is the pin-on-disk wear test described by ASTM G99. This work focuses on the assessment of the tribometer developed and built at the Federal Institute of Santa Catarina (IFSC), Jaraguá do Sul – Rau, through a laboratory research. Tests involving constructive form and instrumentation of the tribometer were performed, as well as adjustments in the equipment. As a way of checking the repeatability of the tests, ten samples of the SAE 1045 steel disc were tested in the IFSC tribometer, five of them with the applied load of 10 N and five with the load of 20 N, the sphere used was built of alumina. These tests were also repeated in an already validated tribometer located at the State University of Santa Catarina (UDESC), in order to perform a comparison of results. After the tests, the coefficients of friction, characteristics of the wear track and disk volume loss were evaluated. The material of the disk was characterized in its hardness Brinell and microstructure. A test with load of 10 N and lubrication was also performed on the IFSC tribometer. Thus, the results obtained in the tests demonstrated that, in general, the evaluated tribometer presented a good repeatability and reliability in the tests, requiring a better evaluation regarding the disk volume loss presented in the disk samples.

Keywords: Tribometer. Pin-on-disk wear test. Tribology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aquisição de dados do teste tipo pino sobre disco	24
Figura 2 – Representação do teste tipo pino sobre disco	24
Figura 3 – Representação do teste tipo pino sobre disco no tribômetro do IFSC	25
Figura 4 – Representação teste tipo pino sobre disco linear.....	25
Figura 5 – Componentes do Tribômetro do IFSC.....	29
Figura 6 – Tribômetro do IFSC completo	30
Figura 7 – Teste de força aplicada	31
Figura 8 – Teste de balanceamento	32
Figura 9 – Montagem do relógio comparador.....	33
Figura 10 – Pesos padrão de 10 N e 20 N	34
Figura 11 – Escala e indicador do raio de ensaio no tribômetro do IFSC.....	35
Figura 12 – Medição da rugosidade das amostras.....	36
Figura 13 – Tribômetro da UDESC.....	37
Figura 14 – Estrutura de aço carbono 0,45% C após resfriamento lento, ataque Nital e ampliação 430X.....	39
Figura 15 – Micrografia do aço SAE, ataque com nital 2% e ampliação de 1000X...39	
Figura 16 – Microscópio Confocal Leica DC3D.....	43
Figura 17 – Medição dos diâmetros da indentação.....	47
Figura 18 – Micrografias do aço SAE 1045 ataque Nital 2%, a) ampliação de 400X e b) ampliação de 1000X	49
Figura 19 – Amostras após a realização do ensaio de desgaste tipo pino sobre disco com e sem <i>debris</i>	51
Figura 20 – Imagem gerada pelo microscópio Confocal Leica DC3D	51
Figura 21 – Perfil de uma pista de desgaste gerado pelo programa MountainsMap Premium 7.4.....	52
Figura 22 – Medição dos diâmetros da pista de desgaste	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Componentes elétricos e instrumentação do tribômetro do IFSC.....	30
Tabela 2 – Composição química do aço SAE 1045 (em wt%)	35
Tabela 3 – Diâmetro das indentações	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM – American Society for Testing Materials

C – Carbono

cm³ - Centímetro cúbico

g – Grama

HB – Hardness Brinell

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

ISO - International Standards Organization

kg – Quilograma

kgf – Quilograma-força

kW – Quilowatt

m - Metro

mg – Miligrama

ml – Mililitro

mm – Milímetro

mm² - Milímetro quadrado

mm³ - Milímetro cúbico

Mn – Manganês

m/s – Metro por segundo

N – Newton

P – Fósforo

Ra – Rugosidade média

rad/s – Radianos por segundo

rpm – Rotação por minuto

S – Enxofre

SAE – Society of Automotive Engineers

Si – Silício

UDESC – Universidade do Estado de Santa Catarina

V – Volt

wt% – Percentual em peso

µm – Micrometro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Problema	16
1.2 Objetivos	16
1.2.1 Objetivo geral	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
2 DESENVOLVIMENTO	18
2.1 Atrito e mecanismos de desgaste	19
2.2 Tribologia	22
2.3 Ensaio de desgaste tipo pino sobre disco e tribômetro	23
3 METODOLOGIA	28
3.1 Características construtivas do tribômetro	28
3.1.1 Construção Mecânica.....	28
3.1.2 Instrumentação.....	29
3.2 Testes da instrumentação e construção mecânica do tribômetro do IFSC .	30
3.2.1 Calibração da célula de carga	31
3.2.2 Balanceamento do braço e posicionamento do contrapeso	31
3.2.3 Alinhamento da placa de castanhas	32
3.2.4 Pesos padrão	33
3.2.5 Ajuste do raio de ensaio	34
3.3 Preparação das amostras	35
3.4 Ensaio e equipamentos	37
3.4.1 Dureza	37
3.4.2 Microestrutura	38
3.4.3 Ensaio de desgaste tipo pino sobre disco a seco.....	39
3.4.4 Ensaio de desgaste tipo pino sobre disco lubrificado	41
3.4.5 Microscópio Confocal	42
3.5 Software de armazenamento de dados do ensaio	43
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	44
4.1 Testes da instrumentação e construção mecânica do tribômetro do IFSC .	44
4.1.1 Calibração da célula de carga	44
4.1.2 Balanceamento do braço e posicionamento do contrapeso	46
4.1.3 Alinhamento da placa de castanhas	46

4.2 Dureza	46
4.3 Microestrutura	48
4.4 Rugosidade.....	49
4.5 Análise da pista de desgaste.....	50
4.6 Ensaio de desgaste tipo pino sobre disco com carga de 10N e 20 N a seco	55
4.7 Ensaio de desgaste tipo pino sobre disco com carga de 10N e lubrificado	60
5 CONCLUSÃO	61
REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

A tribologia é considerada a ciência que estuda a interação de superfícies em movimento relativo, que envolve a transmissão de força, conversão de energia e a alteração de aspectos físicos, químicos e topográficos. Também é conhecida como atrito, desgaste, lubrificação ou ciência da lubrificação, sendo que as interações entre as superfícies controlam o comportamento destes fatores. Assim, a tribologia tem como objetivo a análise e resolução de problemas relacionados aos fenômenos interfaciais (BHUSHAN, 2013, p. XXIII).

Atualmente, segundo Bayer (2004, p. 9), o foco em pesquisas voltadas a análise de desgaste de materiais, para melhoria de produtos e diminuição de falhas relacionadas a este problema vem recebendo um aumento significativo. O desgaste pode ser considerado um dano progressivo de uma superfície, causado pelo movimento relativo entre superfícies ou substâncias.

No entanto, ainda segundo Bayer (2004, p. 9), o desgaste não se limita somente a perda de material de uma peça, pode ocorrer alteração de geometria e dimensão da mesma, ou desenvolvimento de fissuras na superfície, quando em contato com componentes sólidos pode gerar erosão e em contato com fluídos a cavitação, porém ainda assim, em um estágio mais avançado a perda de material pode ser consequência do efeito repetitivo de fenômenos de desgaste.

Por vezes, uma escassez de métodos para melhor avaliação de desgaste e atrito nos componentes durante o projeto fazem com que os assuntos relacionados aos mesmos sejam deixados por último, quando normalmente já foram decididos os processos, formas e funções. Aliado a ausência de experiência ou conhecimento, pontos importantes podem passar despercebidos na concepção do projeto. O resultado é somente observado depois de o produto chegar ao cliente, o que indica que os custos envolvidos com a garantia, somente com problemas de atrito e desgaste superam os custos de engenharia com todos os outros tipos de falhas no produto. Ou seja, problemas com desgaste indesejáveis envolvem custos, perda de produtividade, qualidade e vida útil, quando não geram acidentes (LUDEMA, 1996, p. 4).

A tribologia é crucial no desenvolvimento de máquinas que possuem superfícies deslizantes e rolantes. Trata-se de um estudo para minimização das perdas resultantes dos efeitos de atrito e desgaste que possam ocorrer (BHUSHAN,

2013, p. 3). Conforme Jost (1998 *apud* BHUSHAN, 2013, p. XVII) os aspectos econômicos da tribologia são significativos, alguns estudos em diferentes países mostraram economia de cerca de 1% do produto nacional bruto com a aplicação de melhorias de práticas tribológicas.

Com a finalidade de análise e compreensão do processo de desgaste existem diferentes tipos de equipamentos de teste de desgaste, frequentemente são utilizados tribômetros. Com os tribômetros é possível realizar o ensaio de um ou dois materiais e obter os parâmetros de coeficiente de atrito e a caracterização tribológica dos materiais. Estes equipamentos são divididos basicamente em lineares e rotativos. Nos lineares um apalpador ou pino é deslizado sobre uma amostra em linha reta. Já nos rotativos, o pino é deslizado de forma circular (MARTINS, 2013).

A norma ASTM G99 (2004), estabelece critérios para o ensaio de desgaste tipo pino sobre disco, como as características construtivas do equipamento, parâmetros de ensaio, preparação das amostras e cálculos. Desta forma, a verificação e atendimento dos parâmetros descritos na norma são essenciais para a eficácia da utilização e funcionamento do equipamento.

Portanto, este tema é correlato à fabricação mecânica, e a necessidade de confirmar a reprodutibilidade e confiabilidade de todo e qualquer equipamento é pertinente. Desta forma, como há um tribômetro no Câmpus, no qual não foi realizada esta confirmação ainda, justifica-se esse trabalho. Assim, o equipamento poderá posteriormente contribuir para o desenvolvimento de novas pesquisas relacionadas ao assunto, com análise de diferentes materiais e comportamento destes em ensaios a seco e também lubrificados, por exemplo.

1.1 Problema

Qual a reprodutibilidade e confiabilidade dos resultados apresentados pelo equipamento de ensaio de desgaste tipo pino sobre disco do Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus Jaraguá do Sul – Rau?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Aferir o equipamento de ensaio de desgaste do tipo pino sobre disco rotativo,

conhecido como tribômetro, desenvolvido e fabricado no Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus Jaraguá do Sul - Rau, para garantir a reprodutibilidade dos ensaios observando a norma ASTM G99.

1.2.2 Objetivos específicos

- Aferir e calibrar os instrumentos de medição do tribômetro existente no IFSC - Câmpus Jaraguá do Sul - Rau;
- Realizar testes que envolvam a forma construtiva e instrumentos que compõem o tribômetro, seguindo os parâmetros descritos na norma ASTM G99, como velocidade constante, executar o número de revoluções pré-determinadas e garantir que a carga aplicada no disco seja constante, para uma uniformidade do ensaio;
- Realizar a caracterização do material utilizado para fabricar o corpo de prova, através da análise da microestrutura e dureza do material;
- Analisar o coeficiente de atrito e de desgaste dos materiais ensaiados, perfil e características da pista de desgaste;
- Determinar a confiabilidade dos resultados obtidos, através de testes comparativos de desgaste para o mesmo material e condições, ensaiados no tribômetro do IFSC. Para uma melhor avaliação dos resultados, estes ensaios foram repetidos em um tribômetro já validado, que está na UDESC.

2 DESENVOLVIMENTO

Para a realização de um ensaio é necessário um estudo das diferentes variáveis que podem incidir sobre este e afetar o resultado para convergir com a situação real, por isso, a análise laboratorial deve procurar reproduzir de forma mais próxima possível o fenômeno que ocorre na prática. Assim, uma pesquisa laboratorial foi conduzida, pois ocorreu em condições controladas.

Diante disto, realizou-se uma revisão sobre conceitos e estudos sobre atrito e mecanismos de desgaste, tribologia, tribômetro e teste tipo pino sobre disco, descritos nos tópicos a seguir.

2.1 Atrito e mecanismos de desgaste

O desgaste é considerado um importante fenômeno, que pode afetar a condição de operação de certos componentes. Isto porque, quando um componente interage com outras superfícies, o desgaste pode causar deterioração do material que compõe o mesmo. Em máquinas, este fenômeno é comum, já que, os componentes em movimento estão sujeitos ao desgaste.

As características do material definem como este reagirá ao desgaste, destacam-se dentre as características a tenacidade, a dureza e acabamento superficial (CHIAVERINI, 1986, p. 222).

Uma maneira de definir o desgaste é apresentada por Bayer (2004, p.10) e Tipler (2013, p.127), que o define como um dano a uma superfície causado pela interação mecânica com outra superfície, corpo ou fluido, que está se movendo em relação ao mesmo. Já o atrito é causado pela força tangente que ocorre em oposição ao movimento relativo de dois corpos em contato. Normalmente, a magnitude da força de atrito é descrita em termos de um coeficiente de atrito, μ , que é a relação entre a força de atrito e a força normal, conforme a Equação 1 encontrada em Bayer (2004, p. 10).

$$\mu = \frac{F}{F_n} \quad (1)$$

Na qual:

μ : coeficiente de atrito

F : força de atrito

F_n : força normal

A constante de proporcionalidade associada à força de atrito, quando não há deslizamento entre superfícies é chamada de coeficiente estático de atrito, μ_e . Durante a aplicação de uma força externa, tentando fazer o corpo de prova deslizar, uma força de atrito estático, F_e , surge em oposição ao deslizamento e aumenta com o crescimento da magnitude da força externa, porém, quando a magnitude da força externa aplicada, excede a um limite máximo de atrito $F_{em\acute{a}x}$ ocorre o deslizamento. Sendo assim, a magnitude da força máxima de atrito é proporcional à força normal F_n e também ao coeficiente de atrito estático μ_e conforme Equação 2 (TIPLER, 2013,

p. 127).

$$F_{em\acute{a}x} = \mu_e * F_n \quad (2)$$

Sendo:

$F_{em\acute{a}x}$: força de atrito estático

μ_e : coeficiente de atrito estático

F_n : força normal

Ainda segundo Tipler (2013, p. 127), a constante de proporcionalidade μ_c , é o coeficiente de atrito dinâmico ou cinético, que varia de acordo com os materiais e temperaturas das superfícies, assim como ocorre com o coeficiente de atrito dinâmico. O atrito cinético F_c é a força que se opõe ao movimento relativo entre uma superfície que está deslizando sobre outra. A velocidade constante do movimento depende da aplicação de uma força de magnitude igual e oposta à força de atrito cinético, causada pela superfície em repouso. Ou seja, F_c é proporcional à força normal, F_n , exercida por uma superfície sobre outra.

$$F_c = \mu_c * F_n \quad (3)$$

Na qual:

F_c : força de atrito cinético

μ_c : coeficiente de atrito cinético

F_n : força normal

Conforme Rodrigues e Martins (2010, p. 563), os tipos de desgaste mais comuns são o desgaste adesivo, o abrasivo, o erosivo, o corrosivo, por oxidação ou reação química, e desgaste de fadiga.

O desgaste adesivo está associado à formação de junções adesivas na interface e para isto, as superfícies devem estar em contato. Este desgaste depende principalmente das características físico-químicas das superfícies. O desgaste adesivo pode ser descrito pelas etapas: deformação das asperezas de contato, remoção de filmes da superfície, formação da junção adesiva, falha da junção adesiva e transferência de material, modificação de fragmentos transferidos, remoção dos fragmentos transferidos e perda de partículas por desgaste

(STOLARSKI, 1990, p. 19). Segundo Rodrigues e Martins (2010, p. 563) a fratura normalmente ocorre onde a resistência do material for mais baixa, embora ambas as superfícies sofram desgaste ao longo do processo.

Já o desgaste abrasivo, segundo Stolarski (1990, p. 20) é um tipo muito comum de desgaste. Para que ele ocorra é necessário que exista a ação de uma carga normal, que duas superfícies estejam em interação e em contato físico direto, e uma delas seja mais dúctil que a outra. Desta forma, as asperezas da superfície mais dura penetram na mais macia, gerando uma deformação plástica. Quando um movimento tangencial é aplicado estas asperezas removem material da superfície dúctil. Segundo a ASM International (1992, p. 337) o desgaste abrasivo é causado principalmente pela presença de partículas ou protuberâncias rígidas que se movem e são forçadas contra outra superfície sólida, causando dano a esta por meio de uma perda progressiva de material.

O desgaste erosivo é considerado um tipo de desgaste por abrasão. É caracterizado pelo desgaste gradual, causado pelo fluxo de partículas abrasivas livres na interface de contato entre as superfícies (RODRIGUES E MARTINS, 2010, p.567).

Conforme Stolarski (1990, p. 22) o desgaste por reação química é influenciado principalmente pelo meio ambiente, como temperatura, e sua interação ativa nos materiais em contato. Rodrigues e Martins (2010, p. 569) destacam que a ação de outros mecanismos de desgaste, como a abrasão, podem expor a superfície do material a corrosão, oxidação ou ataque químico, formando um desgaste progressivo.

O desgaste por fadiga ocorre em ciclos contínuos de aplicação de cargas e gera uma falha do material nas superfícies de contato. Estes contatos são conhecidos como hertzianos, pois as falhas são atribuídas às múltiplas reversões do campo de tensão de contato. Este tipo de desgaste pode ocorrer em superfícies rolantes e deslizantes, sendo gerado pela transmissão de tensões em pontos de contato, crescimento da deformação plástica por ciclo, formação de nódulos e nucleação de fissuras, formação e propagação de fissuras e criação de partículas de desgaste (STOLARSKI, 1990, p. 21).

Conforme Hutchings (1992, p. 83) o desgaste de materiais pode ser quantificado por meio de um modelo desenvolvido por Archard, o qual relaciona o volume desgastado por unidade de deslizamento, com a força normal e a dureza do

material mais mole. Obtém-se assim, o coeficiente de desgaste adimensional K , utilizado para comparação da severidade do desgaste.

Já o coeficiente de desgaste dimensional k é mais utilizado em aplicações de engenharia, é obtido através da perda de volume de material da amostra em função de uma distância percorrida, apresentada na Equação 4 (HUTCHINGS, 1992, p. 84). Este cálculo, leva em consideração ainda a dureza do material e a carga aplicada no ensaio.

$$k = \frac{HV}{PL} \quad (mm^3/N.m) \quad (4)$$

Sendo:

k : coeficiente de desgaste

H : dureza

P : carga aplicada (N)

V : perda de volume (mm^3)

L : distância percorrida (m)

2.2 Tribologia

A tribologia não se trata de uma ciência independente, é necessário um conhecimento em variadas ciências para entender os diferentes aspectos e fenômenos que fazem parte desta. Além das ferramentas comumente abordadas e relacionadas à tribologia como mecânica dos fluídos, propriedades mecânicas dos materiais, ciência dos materiais, dinâmica e transferência de calor, assuntos mais específicos também são importantes no aprofundamento e conhecimento das variáveis envolvidas na área de tribologia, como plasticidade, contatos mecânicos, materiais e estruturas em camadas, química de superfície (oxidação, adesão) e de lubrificantes, dentre outros (LUDEMA, 1996, p. 5).

Conforme Bauer, Westfall e Dias (2012, p.123), a tribologia pode ser considerada de maneira geral a ciência do atrito. Isto porque, o atrito é o responsável pela quebra de partículas de superfícies, quando atritadas, ocasionando o desgaste. Desta forma, a busca por maneiras de minimizar o atrito, ou o coeficiente de atrito cinético, vem crescendo. Um exemplo disto são as pesquisas realizadas sobre lubrificantes e seus impactos sobre este coeficiente, visando

melhorias em componentes como motores automobilísticos.

A tribologia pode ser definida como a ciência e tecnologia de interação de superfícies em movimento relativo. Busca melhorias em variadas aplicações, nas quais o desgaste é indesejável, através de um aprofundamento a cerca das interações superficiais, que envolvem principalmente o atrito, desgaste e lubrificação (KUMAR; SEN, 2014, p.1).

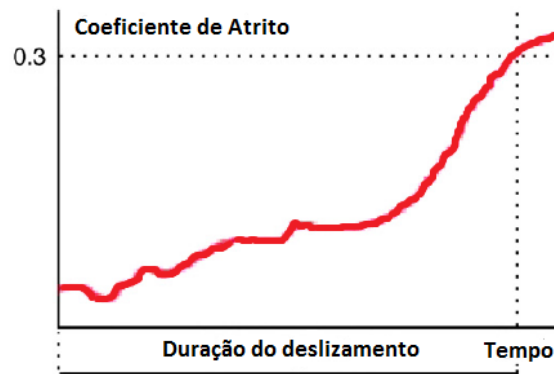
Diante disto, diferentes ensaios são empregados na análise tribológica. Os ensaios de desgaste permitem uma simulação e estudo da degradação acelerada de componentes através de práticas laboratoriais, conduzidas em um determinado período de tempo e em condições controladas. Bayer (2004, p. 259), classifica os ensaios de desgaste em dois grupos, ensaios de desgaste fenomenológicos e ensaios de desgaste operacionais. Os fenomenológicos focam em uma situação geral do fenômeno de desgaste, como erosão, abrasão ou oxidação. Já os operacionais, focam em aplicações ou situações específicas de componentes, como desgaste de engrenagens ou rolamentos.

Este trabalho é voltado para um tipo de ensaio de desgaste fenomenológico, denominado ensaio de desgaste tipo pino sobre disco.

2.3 Ensaio de desgaste tipo pino sobre disco e tribômetro

O ensaio de pino sobre disco é realizado utilizando-se um equipamento conhecido como tribômetro, este tipo de teste pode auxiliar na medição da vida útil de uma superfície ou revestimento. A construção do tribômetro constitui-se de uma placa de castanhas ou um mandril, no qual a amostra pode ser fixa e rotacionada por um motor a uma velocidade predeterminada. Uma esfera ou um pino estático ficam em contato com a amostra através de um braço elástico, equipado com um sensor que possibilita a medição das forças tangenciais de atrito. Um sistema faz o registro destas forças em função no número de rotações ou tempo e permite encontrar o valor do coeficiente de atrito entre as superfícies, tendo um resultado semelhante demonstrado na Figura 1, na qual ao longo do tempo o coeficiente de atrito teve um aumento de até 0,3 (NAIR, GRIFFIN e RANDALL, 2009, p 824).

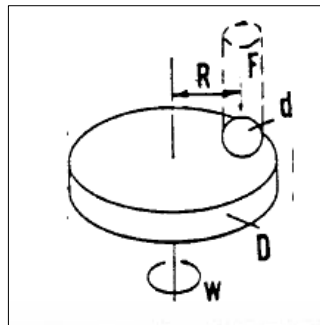
Figura 1 – Aquisição de dados do teste tipo pino sobre disco



Fonte: Adaptado de Nair, Griffin e Randall (2009, p 824).

O ensaio de pino sobre disco, para determinação do desgaste e coeficiente de atrito, é descrito pela *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, na norma G99 - “*Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*”, do ano de 2004. Uma representação típica do teste descrito anteriormente é apresentada na Figura 2. Conforme esta norma, D é o diâmetro do corpo de prova, rotacionado em uma velocidade W , sendo R o raio da pista de desgaste, em que uma esfera com diâmetro d desliza sobre o corpo de prova sob uma força normal F_n .

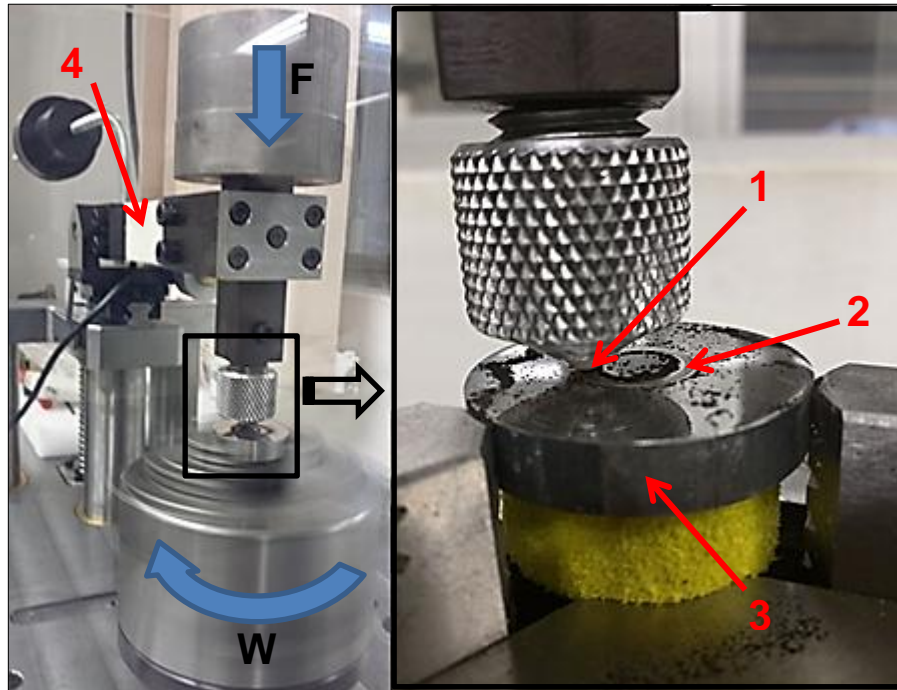
Figura 2 – Representação do teste tipo pino sobre disco



Fonte: ASTM G99 (2004).

A Figura 3 demonstra o funcionamento do tribômetro do IFSC, com as características construtivas conforme descrito acima. Deste modo, tem-se a carga aplicada F , o W que indica a rotação do disco através de um motor que está acoplado a uma placa de castanhas, o diâmetro da esfera (1), o raio da pista (2), o diâmetro do disco (3) e a célula de carga (4) para medição do coeficiente de atrito.

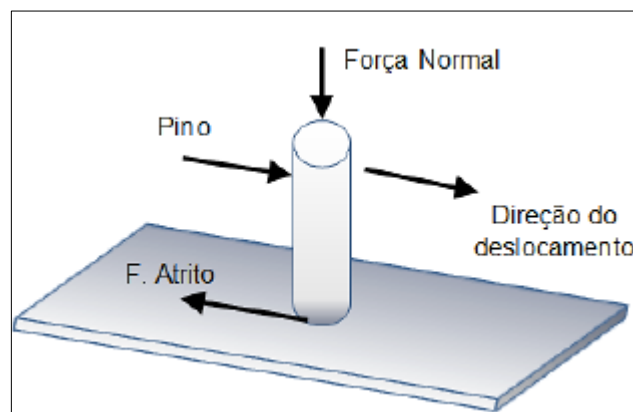
Figura 3 – Representação do teste tipo pino sobre disco no tribômetro do IFSC



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Além da forma descrita na norma, existe o método linear para ensaio de desgaste, no qual um pino desliza sobre um disco ou placa de forma linear gerando uma força de atrito. O coeficiente de atrito é obtido através da Equação 1. Esta força de atrito é medida também por uma célula de carga (MARTINS, 2013, p. 5 e 6). A Figura 4 demonstra um exemplo deste tipo de método.

Figura 4 – Representação teste tipo pino sobre disco linear



Fonte: Castro (2015, p. 44).

A norma ASTM G99 (2004), que trata dos métodos e procedimentos para o ensaio rotativo relata que o valor ou a taxa de desgaste dependerá de um número de fatores envolvidos no sistema, como carga aplicada, características construtivas

da máquina, velocidade e distância de deslizamento, o ambiente e propriedades dos materiais. Desta forma, ela determina uma série de especificações e recomendações que devem ser respeitadas no ensaio e estão descritas a seguir:

- Motor: velocidade constante com variação de $\pm 1\%$ da velocidade nominal.
- Velocidade de rotação entre 0,3 a 3 rad/s (60 a 600 rpm).
- Contador de revoluções: a máquina deve conter este componente que permite contar o número de voltas da amostra e se possível desligar o equipamento quando o valor determinado é atingido.
- Suporte do pino e braço: o suporte do pino preso ao braço deve ser estático e pode, como opcional, permitir a adição de pesos. O contato do pino com o disco deve ser perpendicular ($\pm 1^\circ$) e balanceado para evitar carregamentos estranhos. O braço deve ser construído de tal forma a evitar vibrações.
- Sistemas de medição de desgaste: os instrumentos para este fim devem possuir uma sensibilidade de 2,5 μm ou mais. A balança utilizada para medir perda de massa uma sensibilidade de 0,1 mg ou mais.
- Materiais: devem ser descritos pelas dimensões, acabamento superficial, tipo de material, forma, microestrutura, tratamentos e dureza.
- Especificações: o pino cilíndrico ou esférico deve possuir o diâmetro de 2 até 10 mm. O disco diâmetro de 30 a 100 mm, com uma espessura de 2 a 10 mm.
- Acabamento de superfície do disco: rugosidade Ra de 0,8 μm ou menor.

A perda de volume do disco deve ser avaliada como um resultado do ensaio, este valor pode ser obtido pesando-se a amostra antes e depois do ensaio e utilizando o valor da perda de massa da mesma em gramas e a densidade do material em g/cm^3 para o cálculo, conforme Equação 5.

$$\text{Perda de volume} = \frac{\text{Perda de massa (g)}}{\text{Densidade } \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)} \times 1000 \quad (\text{mm}^3) \quad (5)$$

Outra equação mais completa apresentada pela norma que indica a perda de volume é a apresentada na Equação 6, esta desconsidera que a esfera ou o pino está suscetível a sofrer desgaste, considerando apenas o desgaste no disco. As informações sobre a pista de desgaste podem ser obtidas utilizando-se equipamentos como um perfilômetro ou um microscópio confocal.

$$\text{Perda de volume} = 2\pi R \left[r^2 \sin^{-1} \left(\frac{d}{2r} \right) - \left(\frac{d}{4} \right) (4r^2 - d^2)^{1/2} \right] \quad (\text{mm}^3) \quad (6)$$

Sendo:

R : raio da pista de desgaste (mm)

d : largura da pista de desgaste (mm)

r : raio da esfera (mm)

Nos casos onde há perda de volume no pino ou esfera a Equação 7 deve ser utilizada, assumindo que não houve perda significativa por desgaste no disco.

$$\text{Perda de volume do pino} = \left(\frac{\pi h}{6} \right) \left[\frac{3d^2}{4} + h^2 \right] \quad (\text{mm}^3) \quad (7)$$

Na qual:

$$h: r - \left[r^2 - \frac{d^2}{4} \right]^{1/2}$$

d : diâmetro da cratera de desgaste

r : raio da extremidade do pino

Os resultados apresentados para os ensaios da perda de volume devem apresentar, quando devidamente feitos em laboratórios e sob as mesmas condições, um coeficiente de variação de 20% ou menos entre os ensaios (ASTM G99, 2004).

3 METODOLOGIA

Para que a realização dos objetivos fosse atingida foram necessários testes e avaliações conforme descrito nos procedimentos a seguir. Foram descritas também, de forma resumida, as características construtivas do tribômetro desenvolvido e fabricado por alunos, professores e técnicos de laboratório do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) Câmpus Jaraguá do Sul - Rau.

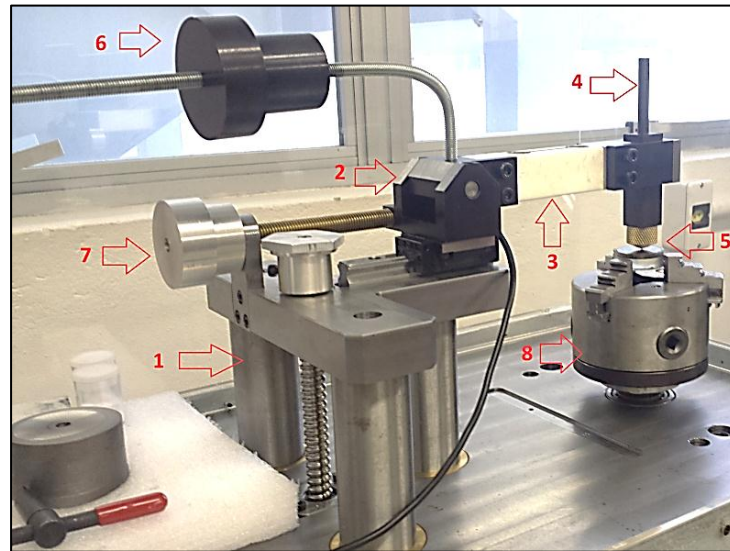
3.1 Características construtivas do tribômetro

O equipamento para teste de desgaste do IFSC possui as características construtivas descritas a seguir.

3.1.1 Construção Mecânica

A parte mecânica do equipamento, demonstrada na Figura 5, é composta por colunas e uma base que possuem regulagem de altura vertical (1). Nesta base existe um braço (2), no qual está fixa a célula de carga (3), o mesmo possui também um suporte de encaixe do bloco de peso morto que exercerá a força normal F_n (4), um encaixe para a esfera (5), um suporte para fixação de um contrapeso para balanceamento do braço (6) e um sistema de ajuste de posição através de um fuso de movimentação horizontal (7). Este último sistema permite a alteração de raio da trilha de desgaste que será feito no disco. O tribômetro é composto ainda por um acoplamento do motor, o qual faz a movimentação de uma placa de castanhas utilizada para a fixação do corpo de prova (8).

Figura 5 – Componentes do Tribômetro do IFSC



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

3.1.2 Instrumentação

A norma ASTM G99 (2004), cita alguns fatores que devem ser controlados e a especificação de componentes para a eficácia do ensaio, como carga aplicada, velocidade e distância de deslizamento entre as faces em contato, temperatura e ambiente. O controle de velocidade de rotação do ensaio é um fator importante, sendo determinado pelo diâmetro da pista na amostra. Para variar a velocidade do motor e garantir que ela seja constante utilizou-se um inversor de frequência.

A célula de carga utilizada possui capacidade máxima de 3 kgf equivalente a aproximadamente 30 N, sendo comumente utilizada para aplicação de cargas de 10 N nos ensaios. A medida do sinal da célula de carga é tratada por um condicionador de sinal, que possui um mostrador digital e saída tipo RS232, permite também a comunicação e armazenamento dos dados pelo computador.

Para o controle da distância percorrida, feita através da contagem do número de voltas, foi utilizado um sensor indutivo fixo próximo ao motor. No eixo do motor está acoplado um parafuso, que possibilita o acionamento do sensor de um contador de voltas digital. Este contador é programável de acordo com o número de voltas e permite o acoplamento ao inversor de frequência para desligamento automático após o número de voltas pré-estabelecido, permitindo, portanto, o controle da distância total percorrida pela esfera sobre o corpo de prova.

Os componentes utilizados estão listados na Tabela 1.

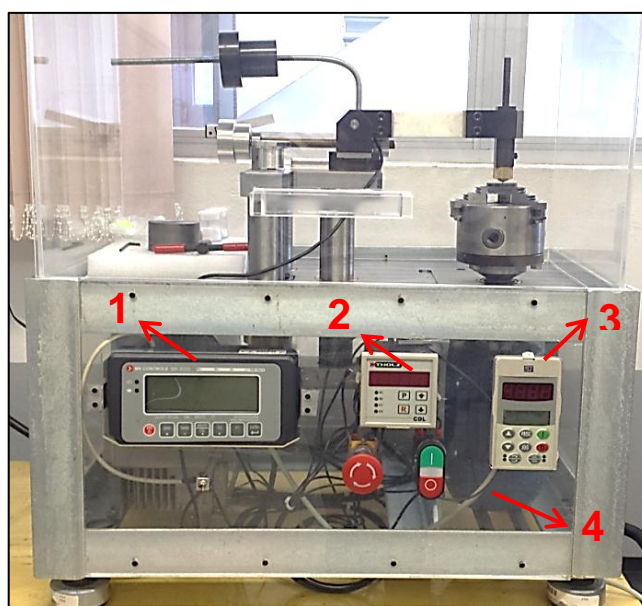
Tabela 1 – Componentes elétricos e instrumentação do tribômetro do IFSC

Equipamento	Descrição
Motor de indução tipo gaiola	0,25 kW, 220/380 V (WEG)
Inversor de frequência	CFW09 (WEG)
Contador de voltas digital multisensor	CDL339N-90~240VCA-P469 (THOLZ)
Sensor indutivo	PNP Ø8 mm, Sn 2mm (BN)
Célula de carga 3kgf	PWZL-2F (MK Controle e Instr. Ltda)
Indicador digital célula de carga	MMK-5030 saída RS232 (MK Controle e Instr. Ltda)
Disjuntor trifásico	SDZ C25 3P 6000 A (STECK)
Botão emergência	LAY-8 LA 39 LA 38/203 (JNG)
Botão liga-desliga	CSW-BD WH (WEG)

Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Assim, conforme a Figura 6 tem-se o equipamento finalizado com os instrumentos necessários ao controle e realização dos testes. Dentre eles, o indicador digital da célula de carga (1), o contador de voltas digital (2), o inversor de frequência (3) e o motor (4) estão destacados na Figura 6.

Figura 6 – Tribômetro do IFSC completo



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

3.2 Testes da instrumentação e construção mecânica do tribômetro do IFSC

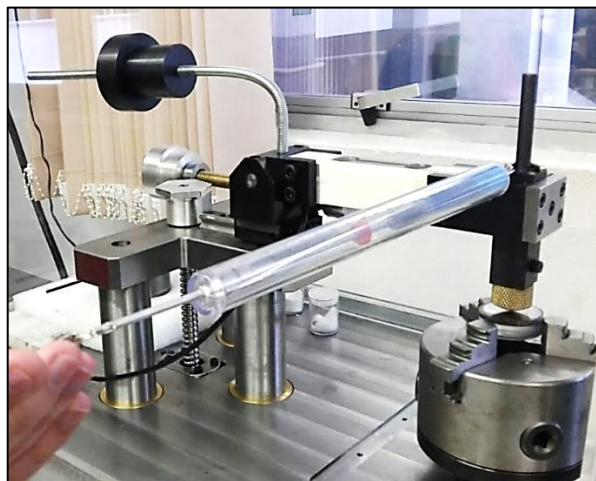
Testes foram realizados na instrumentação e construção mecânica do tribômetro do IFSC, de maneira a garantir o correto funcionamento e atingimento de resultados satisfatórios. Alguns ajustes foram feitos também para melhoria dos resultados. Os testes e ajustes realizados são descritos a seguir.

Conforme descrito por Beppler *et al* (2016a, p.3), testes empregados anteriormente na instrumentação do tribômetro do IFSC, determinaram um fator de escorregamento de aproximadamente 5% na rotação do ensaio e uma variação da velocidade do ensaio de $\pm 0,77\%$, o que demonstra que estes fatores atendem os requisitos solicitados pela norma, não sendo necessária a realização de ajustes ou de uma nova medição deste fatores.

3.2.1 Calibração da célula de carga

Com o intuito de verificar se a força aplicada na ponteira seria a mesma indicada pela célula de carga, realizou-se o teste com dois dinamômetros, um de 5 N e outro de 10 N, possibilitando a variação da força aplicada tangencial de 0,5 N até 10 N, com um incremento na medição de 0,5 N, conforme Figura 7. Sendo assim, para cada valor de força aplicada um determinado valor de saída de sinal era indicado no mostrador digital, que está conectado a célula de carga, e para uma melhor precisão realizou-se esta medição três vezes para cada valor de força aplicada, por fim foi realizada a média destes valores.

Figura 7 – Teste de força aplicada



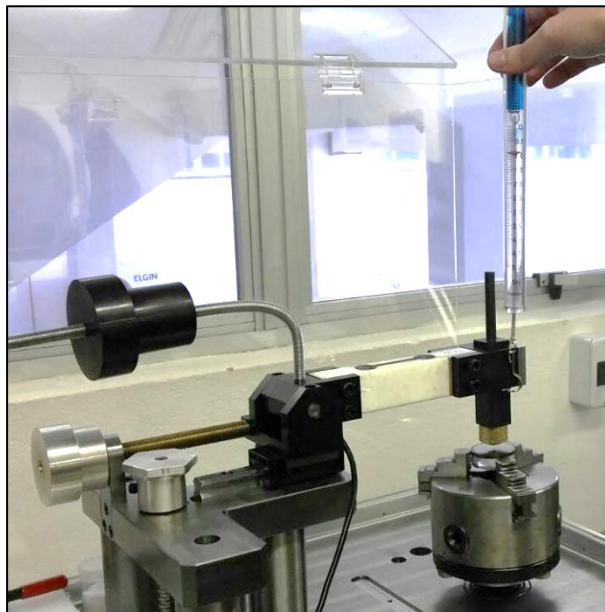
Fonte: Produção do próprio autor (2017).

3.2.2 Balanceamento do braço e posicionamento do contrapeso

Com relação ao balanceamento do braço e correto posicionamento do contrapeso, utilizou-se um dinamômetro de 5 N para esta verificação. Após o ajuste do conjunto do braço num raio aproximado de 6 mm, um dinamômetro foi posicionado verticalmente em relação à célula de carga e apoiado no braço, próximo ao local de encaixe do peso morto. Como o posicionamento do braço estava negativo, foram sendo aplicadas pequenas forças com o dinamômetro e então foi ajustado o posicionamento do contrapeso. Isto porque, quando não há força aplicada, o braço não deve ficar sobre influência de qualquer outra força, como estava acontecendo anteriormente, na qual a força da gravidade estava agindo sobre ele. Esta verificação pode ser visualizada na Figura 8.

Desta forma, garante-se também que a aplicação da força será tangencial a superfície do disco. O alinhamento do braço, quando a esfera estava em contato com o disco, também foi verificado com um indicador de nível tipo bolha, posicionado em cima do braço.

Figura 8 – Teste de balanceamento



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

3.2.3 Alinhamento da placa de castanhas

Outro fator importante é o alinhamento da placa de fixação do disco, pois o mesmo afetará a trilha de desgaste e pode gerar vibração no sistema. O procedimento de verificação foi feito com uma amostra do disco de superfície plana e retificada presa na placa de castanhas, devidamente alinhada, utilizando um

indicador de nível tipo bolha. Sobre esta superfície a ponta de contato de um relógio comparador foi deslizada, através da rotação da placa. Conforme observado, o ponteiro do mostrador do relógio comparador marca Digimes e com resolução de 0,01 mm, apresentava variação de 0,50 mm. Portanto, havia um desalinhamento na placa, o que gerava um movimento desbalanceado.

Este mesmo procedimento foi feito radialmente na placa de castanhas, que também indicava uma variação devido à influência do desalinhamento axial. A Figura 9 exemplifica a montagem do relógio comparador para essas duas medições, na esquerda a axial e na direita a radial.

Figura 9 – Montagem do relógio comparador



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Após isto, a placa foi desmontada, a superfície da placa e a de encaixe desta foram levemente lixadas para eliminação de rebarbas e óxidos e limpas com álcool. Na montagem da placa foram realizados ajustes relacionados ao aperto cuidadoso e distribuído dos parafusos para amenizar este desalinhamento.

3.2.4 Pesos padrão

Analisaram-se também os pesos padrão utilizados nos ensaios para garantia da massa dos mesmos, utilizando uma balança modelo AS5000C da marca Marte, com resolução de 0,1 g. Os pesos padrão empregados nos ensaios para as duas condições definidas possuem a massa de 1000,0 g e 2000,0 g, e podem ser

visualizados na Figura 10.

Figura 10 – Pesos padrão de 10 N e 20 N



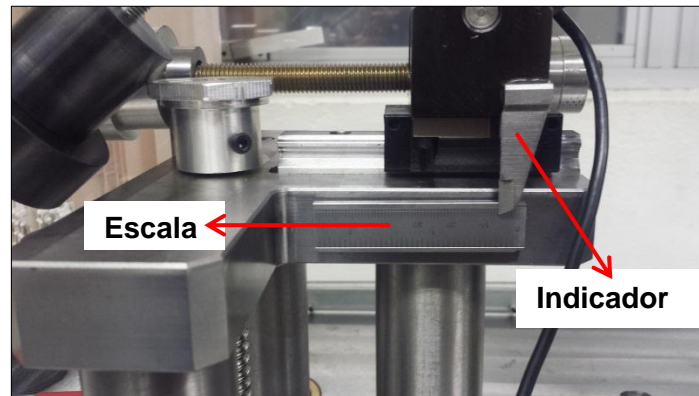
Fonte: Produção do próprio autor (2017).

A carga de 2000,0 g foi confeccionada para possibilitar a realização dos ensaios com mais uma variável para comparação de resultados e, desta forma, verificar a repetibilidade dos ensaios para diferentes condições. Na confecção da mesma, primeiramente realizou-se a geração de um modelo sólido utilizando o programa *SolidWorks*, de modo a verificar quais dimensões do material bruto, neste caso ferro fundido, possibilitariam a fabricação de uma peça com a massa de 2000 g, isto porque, através do programa é possível selecionar o tipo de material e com o modelo definir a massa do componente. Após, realizou-se a usinagem do peso padrão em um torno convencional. Quando o material estava com as dimensões próximas às estipuladas, realizou-se um controle da massa utilizando a balança, ajustando-se as medidas até que a massa determinada fosse atingida. Para um ajuste mais preciso utilizou-se também uma lixa d'água de granulometria 220.

3.2.5 Ajuste do raio de ensaio

O raio definido é um fator importante nos ensaios, pois controla o número de voltas necessárias para atingir a distância de ensaio determinada. Portanto, para possibilitar a verificação do raio determinado foi fixada na base do tribômetro uma escala milimétrica e um indicador na base do braço, que podem ser vistos na Figura 11.

Figura 11 – Escala e indicador do raio de ensaio no tribômetro do IFSC



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Os ajustes do raio foram ocorrendo a cada ensaio, ou seja, após a finalização do mesmo o diâmetro médio da pista era medido e ajustes de posicionamento do braço eram realizados, isto para tentar chegar o mais próximo possível do raio determinado para o ensaio. Tomando-se sempre o cuidado para verificar se o balanceamento do braço não foi alterado, controlando isto com um indicador de nível tipo bolha. No entanto, como os ajustes foram pequenos, eles não influenciaram significativamente no balanceamento do braço, não sendo preciso alterar a posição do contrapeso.

3.3 Preparação das amostras

O material escolhido para o disco foi uma liga de aço-carbono SAE 1045. A escolha deve-se ao fato de ser um material comum e acessível, além de ser utilizado em grande escala pelas indústrias. Por ser um material conhecido, já se encontra bastante literatura sobre ele, o que facilita a comparação com os resultados obtidos.

O aço SAE 1045 apresenta a composição química conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química do aço SAE 1045 (em wt%)

C	Mn	P máx	S máx	Si máx
0,43 – 0,50	0,60 – 0,90	0,040	0,050	0,60

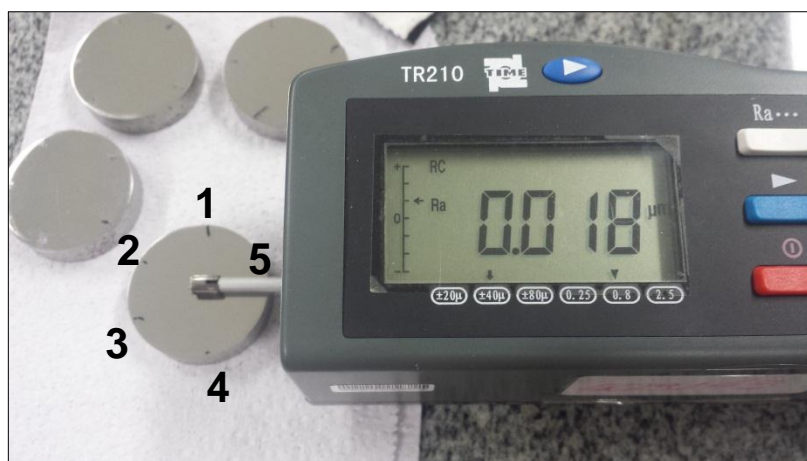
Fonte: adaptado de Souza (1989).

Para a realização do teste comparativo, foram fabricadas 5 amostras de aço-carbono SAE 1045 com diâmetro de 38,1 mm espessura de 8 mm, utilizadas nos

ensaios com carga de 10 N, e mais 6 amostras com diâmetro de 30 mm e espessura de 7 mm, sendo 5 destas utilizadas nos ensaios com carga de 20 N e uma no ensaio com carga de 10 N e lubrificado. As amostras foram cortadas na eletroerosão a fio, e a amostra de 30 mm de diâmetro foi usinada em um torno convencional para atingir esta dimensão.

Como garantia de rugosidade, conforme valor inferior a 0,8 Ra especificado na norma ASTM G99, as amostras foram lixadas seguindo uma sequência de granulometria, 120, 220, 320, 400, 600, 800, 1200 e polidas com alumina 0,3 μm . Após isso, as amostras foram limpas com algodão, álcool e ar quente antes da realização do teste. A rugosidade da superfície foi medida utilizando o rugosímetro da marca Time modelo TR210, com um comprimento de amostragem (*cut-off*) de 0,8 mm e range de medição de $\pm 40 \mu\text{m}$, sendo que para cada amostra foram realizadas cinco medições nas posições indicadas na Figura 12.

Figura 12 – Medição da rugosidade das amostras



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

A esfera utilizada foi de alumina (Al_2O_3), um material cerâmico, de 6 mm de diâmetro com superfície polida, esta esfera foi doada pela UDESC para possibilitar a realização dos ensaios. O raio da trilha definido foi de 6 mm e a carga aplicada para a primeira condição de 1000,0 g ou aproximadamente 10 N e para a segunda condição de 2000,0 g ou aproximadamente 20 N.

As amostras foram ensaiadas no tribômetro desenvolvido no Câmpus e em um desenvolvido e utilizado no laboratório da UDESC, aplicando-se os mesmos parâmetros em ambos os testes. O tribômetro da UDESC possui o mesmo princípio e conceito físico do desenvolvido no IFSC como pode ser observado na Figura 13.

Figura 13 – Tribômetro da UDESC



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

3.4 Ensaios e equipamentos

3.4.1 Dureza

A dureza do material é considerada um importante fator para a determinação do desgaste. Pode ser definida de diferentes maneiras, sendo as principais, resistência à deformação e penetração, absorção de energia sob cargas dinâmicas, resistência à ação do risco, à abrasão e ao corte (CHIAVERINI, 1986, p.134). Para a verificação da dureza do material das amostras do disco, realizou-se o teste de dureza Brinell.

Conforme Rodrigues e Martins (2010, p. 317), este tipo de teste de dureza consiste basicamente em penetrar gradualmente um indentador esférico, de aço temperado ou metal duro, com uma determinada carga aplicada, na superfície da amostra do material. Para a especificação desta dureza devem ser indicadas as condições do ensaio. Assim, indica-se o valor da dureza, após o HB de dureza Brinell, seguido de S para esferas de aço ou W para esferas de metal duro, diâmetro da indentação (mm), carga aplicada (kg) e tempo de aplicação da carga (s). O valor da dureza Brinell é obtido pela Equação 8.

$$HB = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \text{ kg/mm}^2 \quad (8)$$

Na qual:

P : carga aplicada (kg)

D : diâmetro da esfera (mm)

d : diâmetro da indentação (mm)

As amostras dos discos já polidas foram devidamente limpas com álcool e ar quente. A máquina de ensaio de dureza modelo EQTRB-250 (562) da marca Equilam foi calibrada conforme recomendações do fabricante. Os testes foram realizados em duas amostras e em cada amostra foram feitas três indentações simetricamente distribuídas, totalizando seis análises para o material. O indentedor esférico escolhido para o ensaio foi o de aço temperado de 2,5 mm de diâmetro e a carga de 187,5 kg, aplicada durante 20 segundos.

Com o auxílio do estereoscópio modelo Stemi 2000-C da marca ZEISS foram medidos os diâmetros das indentações de cada amostra, para possibilitar a realização dos cálculos de dureza.

3.4.2 Microestrutura

Com o intuito de analisar a microestrutura do aço SAE 1045 utilizado nos ensaios, uma amostra do material foi usinada em um diâmetro menor e cortada no equipamento de eletroerosão a fio Agie Charmilles FW1U. Após isto, realizou-se o embutimento da amostra em baquelite e lixou-se esta com uma sequência de granulometria de lixas d'água. A sequência utilizada foi 50, 150, 240, 320, 400, 600 e 1200, sendo que a cada lixa diferente a amostra foi rotacionada em 90° para alterar a direção do lixamento, lixando-se sempre até eliminar os riscos provenientes do lixamento de granulometria anterior. Posteriormente, a amostra foi polida com alumina 0,3 µm. O ataque foi realizado com o reagente de Nital a 2%, composição de 2 ml de HNO₃ (ácido nítrico) e 98 ml de etanol (álcool etílico), com duração de quinze segundos de ataque, conforme Colpaert (2008, p.79).

As imagens das microestruturas foram analisadas no microscópio da marca KOZ-004, modelo XJM404 e os resultados comparados com imagens de microestruturas do aço-carbono SAE 1045.

A Figura 14 demonstra uma micrografia do aço 1045. Os grãos mais claros

são denominados ferrita e os mais escuros perlita. Segundo Silva e Mei (2006, p.20), um aço com 0,4% de carbono apresentará uma porcentagem de cerca de 50% de perlita e 50% de ferrita.

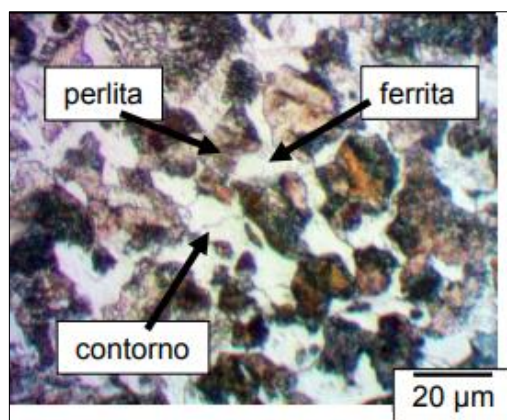
Figura 14 – Estrutura de aço carbono 0,45% C após resfriamento lento, ataque Nital e ampliação 430X



Fonte: adaptado de Silva e Mei (2006, p.18).

Outra imagem de microestrutura do aço SAE 1045 pode ser observada na Figura 15, que apresenta as mesmas características descritas acima, presença de ferrita e perlita, sendo possível também visualizar com mais clareza o contorno de grão.

Figura 15 – Micrografia do aço SAE, ataque com nital 2% e ampliação de 1000X



Fonte: adaptado de Bepler (2016b, p.44).

3.4.3 Ensaio de desgaste tipo pino sobre disco a seco

O teste de desgaste, após a preparação e limpeza das amostras e da esfera, seguiu-se da seguinte forma. Devido à possibilidade de dispersão de resultados que podem ser registrados nos testes, foram ensaiadas cinco amostras em cada tribômetro para cada condição de forma a garantir a reprodutibilidade do experimento (ROVANI, 2014).

O ensaio foi realizado com os seguintes parâmetros, velocidade de deslizamento de 0,1 m/s, distância de deslizamento de 1000 m, temperatura de aproximadamente 23°C e umidade entre 30 e 50%, sendo que a temperatura e a umidade sofriam uma pequena variação a cada ensaio, mas, ainda assim foram controladas para que ficassem próximas aos valores indicados. O equipamento utilizado para medição de temperatura foi o baro-termo-higrômetro da marca Oregon Scientific.

Então, cada amostra foi fixa e devidamente alinhada na placa de castanhas, com o auxílio de um nível tipo bolha. A esfera de alumina foi fixa na ponteira, ajustou-se o raio da trilha e aplicou-se o peso morto sobre o disco.

Um importante fator considerado a cada ensaio foi a alteração do posicionamento da esfera dentro da ponteira de fixação, isto porque, os óxidos gerados no ensaio anterior podem aderir à esfera ou desgastar a mesma, modificando a sua superfície. Assim, pode-se garantir que todos os ensaios apresentaram as mesmas condições, pois se utilizou uma região da esfera sem desgaste.

Dependendo das variáveis do ensaio, o número de voltas e velocidade do mesmo podem sofrer alterações também. Através da Equação 9, foi possível determinar o número de voltas necessárias para os ensaios.

$$\text{Número de voltas} = \frac{L}{\pi * D} \quad (9)$$

Na qual:

L: Distância do ensaio (mm)

D: Diâmetro da pista (mm)

Assim, com a distância estabelecida para o ensaio de 1000 m e o diâmetro da pista de 12 mm, foram realizadas as devidas conversões e utilizando a equação apresentada anteriormente, foi determinado o valor de aproximadamente 26525

voltas. Após isto, regulou-se o contador do tribômetro com este valor, utilizando o manual do equipamento para esta programação.

A velocidade do ensaio é programada no inversor de frequência, e para definir o valor a ser configurado no mesmo utilizou-se a Equação 10.

$$Velocidade = \frac{60}{(\pi * D)/V} \text{ (rpm)} \quad (10)$$

Na qual:

D: Diâmetro da pista (mm)

V: Velocidade (mm/s)

Desta maneira, sabendo-se que o diâmetro da pista seria de 12 mm e a velocidade do ensaio de 0,1 m/s, fazendo-se as devidas conversões e substituindo os valores na Equação 10, chegou-se ao valor de 159 rpm de velocidade no ensaio. O inversor de frequência foi então programado neste valor e também para exibir a velocidade durante os ensaios, como forma de garantia e possibilidade de verificação de que esta fosse constante. O método de programação do inversor foi feito utilizando o manual do fabricante.

Depois, o equipamento foi ligado, assim como a coleta de dados no *software RS 232 Data Logger freeware versão 2.7* do computador e iniciaram-se os testes para cada uma das amostras.

No término dos ensaios, as amostras foram limpas com algodão e ar quente para remoção de óxidos e de detritos do material, chamados também de *debris*, devido ao desgaste na formação da pista.

A medição do diâmetro interno e externo das pistas foi feita utilizando o estereoscópio modelo Stemi 2000-C da marca ZEISS, sendo que para cada pista foram realizadas duas medições de diâmetro interno e externo.

3.4.4 Ensaio de desgaste tipo pino sobre disco lubrificado

Uma variação do ensaio detalhado acima foi realizada utilizando lubrificação, somente para fins de verificação do comportamento do tribômetro do IFSC, quando acrescentado mais uma variável no ensaio. O objetivo foi analisar o valor do coeficiente de atrito durante o ensaio.

Assim, uma amostra do aço SAE 1045 de 30 mm de diâmetro e 7 mm de

espessura foi preparada da mesma forma que nas outras amostras, descritas no item 3.3. A carga utilizada neste ensaio foi de 10 N, a distância e a velocidade do ensaio foram as mesmas utilizadas para os outros ensaios. A rugosidade Ra também foi medida 5 vezes nesta amostra.

O óleo utilizado para a lubrificação foi o ISO VG68, comumente utilizado na lubrificação de barramentos de tornos mecânicos. Uma gota de óleo foi aplicada na pista de desgaste em dois momentos do ensaio, quando o contador de voltas marcava 2500 e 12500 voltas.

3.4.5 Microscópio Confocal

A verificação do perfil de desgaste formado pela esfera de alumina no disco foi realizada utilizando o microscópio confocal Leica DC3D.

Este equipamento, através de um aumento do contraste da imagem microscópica faz uma varredura do perfil em várias alturas e reproduz este de forma tridimensional e em escalas aumentadas. A varredura ocorre perpendicularmente ao plano da amostra, sendo registradas imagens através de lentes e um dispositivo de carga acoplada a cada 0,2 μm . As imagens são enviadas para um computador que faz o processamento destas e gera em forma tridimensional a imagem final da análise (STRYHALSKI, 2015, p. 63). A Figura 16 demonstra o equipamento utilizado.

A lente utilizada para o teste teve ampliação de 10 vezes e para cada amostra foram feitas quatro análises na pista de desgaste, simetricamente distribuídas.

Figura 16 – Microscópio Confocal Leica DC3D



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

A análise das imagens da pista, geradas pelo microscópio confocal foram realizadas utilizando-se o *software MountainsMap Premium 7.4*, de versão teste por trinta dias. Com o *software* a imagem foi planificada, extraíram-se as camadas, estas camadas foram convertidas em uma série de perfis, para extrair o perfil, extraiu-se o perfil médio e por fim determinou-se a área do perfil. O *software* indica também a área do pico do perfil, formado pelo material acumulado ao redor da pista. Assim, descontou-se a área do pico do valor da área do vale. Por fim, realizou-se a média dos quatro valores de área de cada amostra. Estas áreas foram utilizadas para o cálculo da perda de volume.

3.5 Software de armazenamento de dados do ensaio

O equipamento de desgaste é integrado a um computador através de uma saída de comunicação serial RS232, e com a utilização do *software RS 232 Data Logger freeware versão 2.7* foi possível coletar os dados do teste para posterior interpretação dos mesmos. Os dados de coeficiente de atrito coletados foram exportados em formato de texto, e, inseridos em uma planilha eletrônica para geração dos gráficos de coeficiente de atrito.

Segundo Beppler *et al* (2016a, p.4), os testes realizados para a coleta de dados durante os ensaios, utilizando o tribômetro do IFSC e o programa citado acima, demonstraram uma taxa da coleta de 9,95 leituras por segundo.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

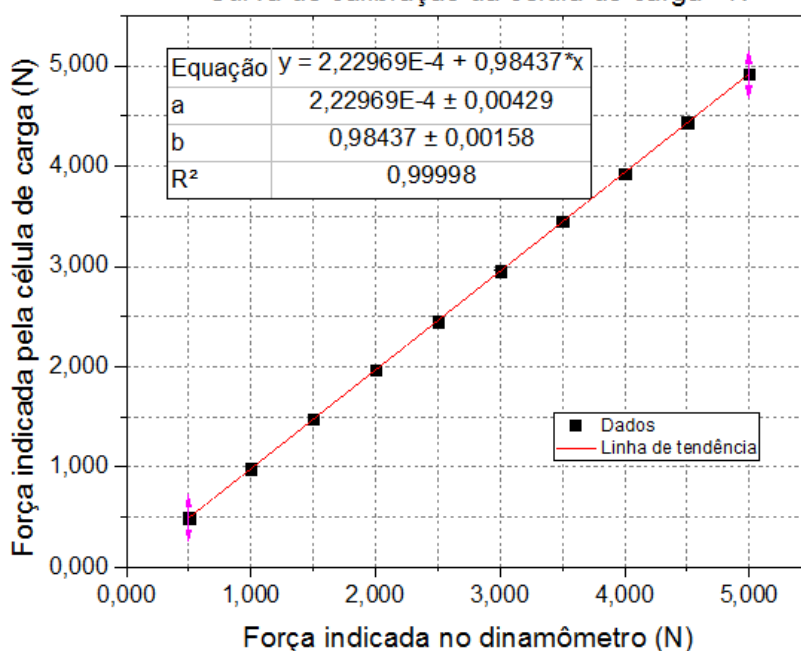
Neste capítulo são apresentados os resultados da pesquisa bem como uma análise dos mesmos. Desta forma, são expostos os resultados dos testes da instrumentação do tribômetro do IFSC, da dureza e microestrutura do material utilizado nas amostras dos discos, a rugosidade destas amostras, os ensaios de desgaste, apresentando o coeficiente de atrito e desgaste, características da pista de desgaste e perda de volume das amostras.

4.1 Testes da instrumentação e construção mecânica do tribômetro do IFSC

4.1.1 Calibração da célula de carga

Todo sistema de aquisição de dados foi calibrado com objetivo de obter a relação entre a medição de saída da célula de carga e a força real aplicada. Para isto, foram feitas medições de força com dinamômetros de 5 N e de 10 N e o valor indicado no condicionador de sinais da célula de carga foi aferido, assim foi obtida uma curva de calibração linear. O resultado da calibração com o dinamômetro de capacidade de medição de até 5 N, pode ser verificado no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Teste indicação de força pela célula de carga com dinamômetro de 0 - 5 N.
Curva de calibração da célula de carga - N



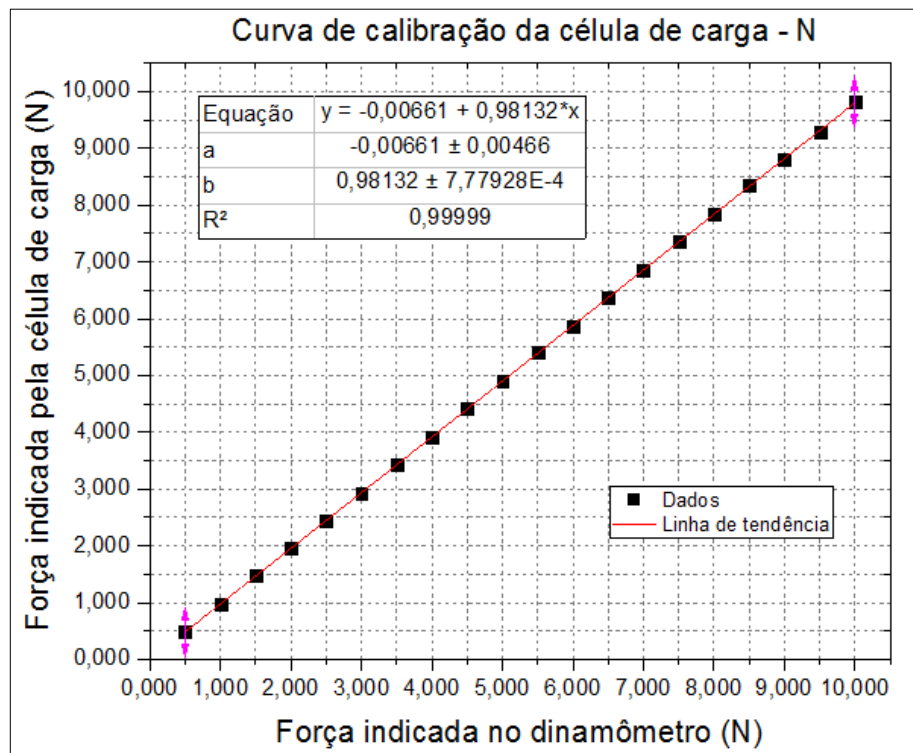
Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Neste processo deve-se ter cuidado para não exceder a carga máxima da

célula de carga que é de 30 N. A equação entre força real aplicada aferida com o dinamômetro e a força indicada pelo condicionador de sinais é dada pela equação apresentada no Gráfico 1, com coeficiente de determinação R^2 de 0,99998, que mede quanto o modelo da curva ajustada pela equação se ajusta aos valores reais.

Já esta mesma calibração, repetida com o dinamômetro de 0 até 10 N pode ser verificada no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Teste indicação de força pela célula de carga com dinamômetro de 0 - 10 N.



Para a calibração utilizando o dinamômetro de 0 até 10 N, obteve-se a equação da reta conforme apresentado no Gráfico 2, e um coeficiente de determinação R^2 de 0,99999.

Da equação da reta obtém-se a relação entre a força real aplicada aferida com o dinamômetro e a força indicada pelo condicionador de sinais da célula de carga. Esta relação é importante, para calibração e aferição da leitura da força indicada no condicionador de sinais da célula de carga e conseqüentemente do sinal medido no *software* de aquisição de dados.

Como pode ser visualizada nos dois gráficos apresentados, a indicação da força em N pela célula de carga apresentou linearidade, o que indica que do valor indicado no dinamômetro para o valor indicado pela célula de carga há

confiabilidade, repetibilidade e garantia de que a célula de carga e o indicador digital estão calibrados.

4.1.2 Balanceamento do braço e posicionamento do contrapeso

Com o devido posicionamento do contrapeso verificou-se que o braço apresentava um bom alinhamento, pois utilizando o indicador de nível tipo bolha verificou-se que a bolha ficava centralizada no indicador. Desta forma, para o raio de 6 mm determinado nos ensaios o braço apresentou um bom alinhamento, esta verificação foi realizada a cada ensaio, de modo a garantir a reprodutibilidade dos ensaios.

No entanto, para testes futuros, nos quais o raio seja diferente de 6 mm, faz-se necessário a verificação e ajuste do contrapeso e balanceamento do braço novamente.

4.1.3 Alinhamento da placa de castanhas

O alinhamento axial da placa de castanhas que apresentava variação de 0,50 mm em uma volta, após ajustes mecânicos aferidos com relógio comparador passou a apresentar uma variação de 0,01 mm no diâmetro de 12 mm e de 0,05 mm na parte mais externa da amostra, em um diâmetro aproximado de 35 mm. Já o alinhamento radial apresentou uma variação de 0,07 mm a 0,11 mm nas medições realizadas com o relógio comparador.

Isto indica que os ajustes foram eficientes e que a variação apresentada reduzirá a influência nos resultados dos ensaios, como ocorria anteriormente, pois, em alguns ensaios realizados antes foi possível identificar uma pequena excentricidade na pista de desgaste, formando uma pista elíptica.

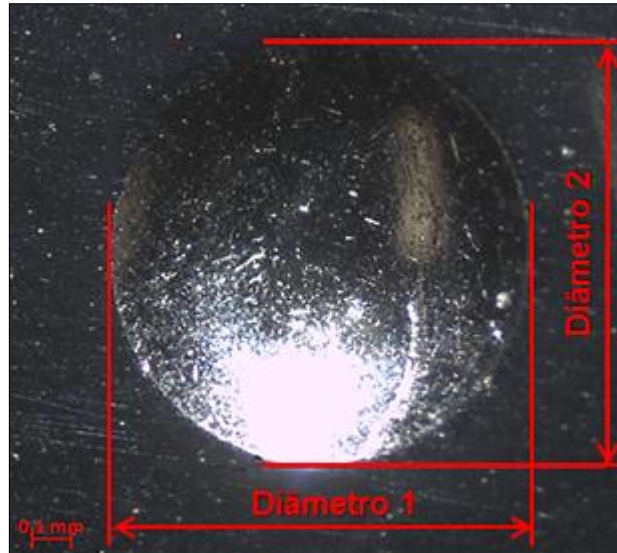
4.2 Dureza

Medições de dureza foram realizadas para caracterizar o material utilizado como corpo de prova. Assim, foi medida a dureza Brinell com uma esfera de aço (HBS), de diâmetro 2,5 mm, aplicando-se uma carga de 187,5 kg por 20 segundos.

Após a medição dos diâmetros obtidos pelas indentações provenientes do ensaio de dureza, realizou-se a média dos mesmos para determinação do diâmetro da indentação, d , do cálculo da dureza, mostrado na Equação 8. A cada indentação

foram realizadas duas medições do diâmetro obtido, conforme Figura 17, apresentada abaixo.

Figura 17 – Medição dos diâmetros da indentação



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados destas medições tanto para a amostra 1 quanto para a amostra 2. O ensaio de dureza Brinell foi realizado em duas amostras e com três indentações em cada, para melhorar a confiabilidade no resultado, uma vez que esta medição pode sofrer variações provenientes de diferentes fatores, como por exemplo, heterogeneidade do material e incrustações.

Tabela 3 – Diâmetro das indentações

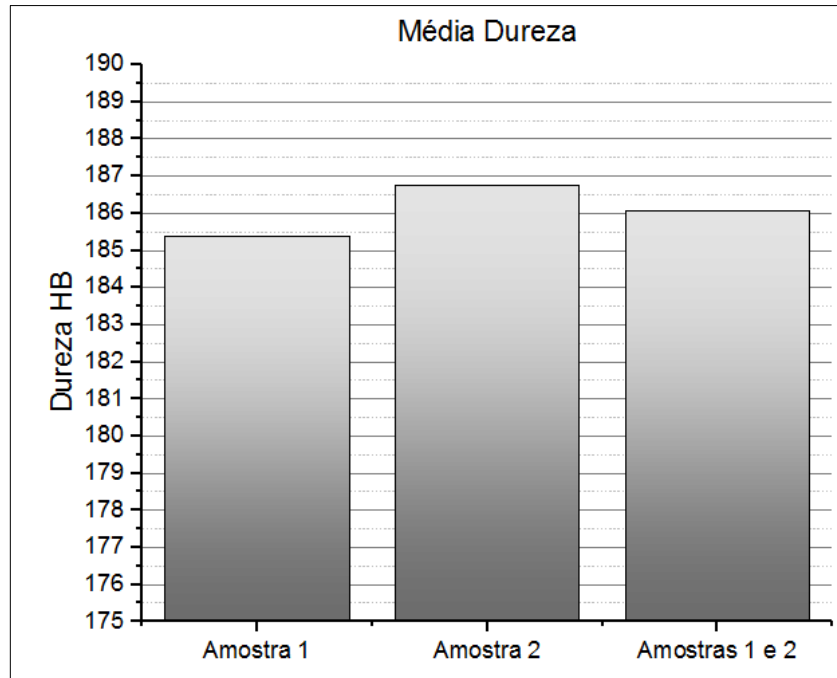
Amostra 1	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Média (mm)
Indentação 1	1,108	1,093	1,101
Indentação 2	1,117	1,102	1,110
Indentação 3	1,112	1,099	1,106

Amostra 2	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Média (mm)
Indentação 1	1,092	1,102	1,097
Indentação 2	1,109	1,099	1,104
Indentação 3	1,119	1,087	1,103

Fonte: Produção do próprio autor (2017).

O cálculo da dureza foi realizado conforme a Equação 8 descrita anteriormente. No Gráfico 3, pode-se verificar o valor da dureza média obtida na amostra 1, na amostra 2 e por fim em ambas as amostras.

Gráfico 3 – Média da dureza para o aço SAE 1045



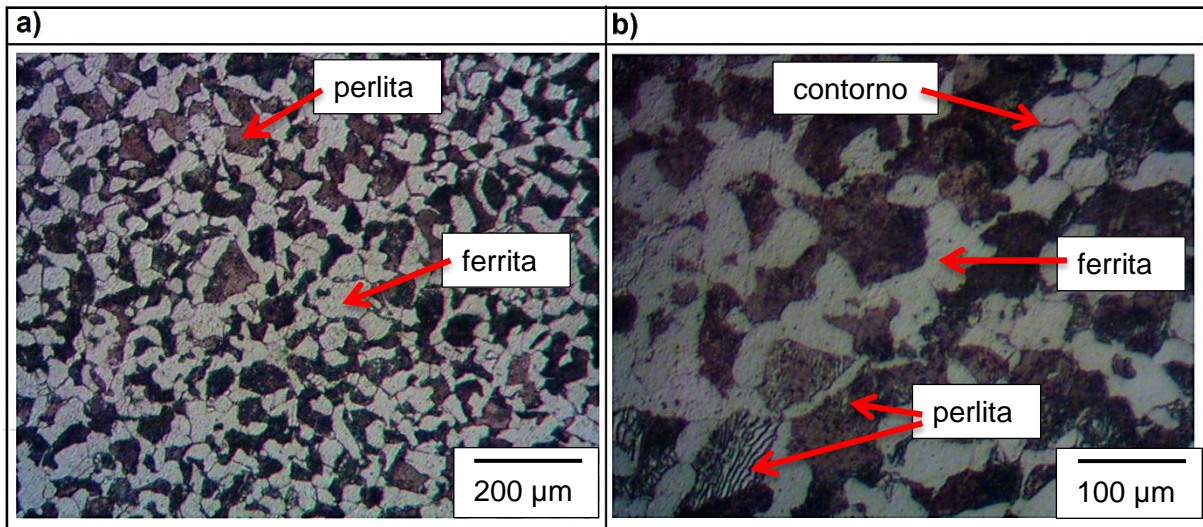
Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Diante disto, o valor de dureza média obtida para as amostras do aço SAE 1045 foi de 186,1 HBS 2,5/187,5/20.

4.3 Microestrutura

Uma análise da microestrutura do material utilizado nas amostras dos discos foi realizada de maneira a garantir que o material apresentava as características de um aço SAE 1045. Os resultados desta análise da microestrutura são apresentadas na Figura 18.

Figura 18 – Micrografias do aço SAE 1045 ataque Nital 2%, a) ampliação de 400X e b) ampliação de 1000X



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

A micrografia do aço SAE 1045, foi semelhante às encontradas nas referências deste material e apresentadas anteriormente. Na imagem a) conforme indicado, nota-se a presença de perlita e ferrita com clareza.

Já na imagem b) com maior ampliação, percebe-se também, além da ferrita e perlita, o contorno de grão. O ataque utilizado revelou com eficácia a microestrutura do material. Pode-se perceber ainda que em alguns pontos da micrografia a perlita apresenta uma estrutura lamelar.

4.4 Rugosidade

A rugosidade medida utilizando o rugosímetro em cinco pontos das amostras gerou a média das rugosidades Ra. Assim, a média das rugosidades das vinte amostras utilizadas nos ensaios foi de 0,028 μm com um desvio padrão de 0,009 μm . Este valor de rugosidade ficou dentro do especificado pela norma, que é de no máximo 0,8 μm Ra. O Quadro 1 indica o resultado da média das rugosidades das amostras com seus respectivos desvios padrão.

Quadro 1 – Rugosidade Ra das amostras

Amostras IFSC - 10 N	Média da Rugosidade (μm)		Amostras UDESC - 10 N	Média da Rugosidade (μm)
Amostra 1	0,018		Amostra 1	0,018
Amostra 2	0,022		Amostra 2	0,021
Amostra 3	0,022		Amostra 3	0,017
Amostra 4	0,020		Amostra 4	0,020
Amostra 5	0,017		Amostra 5	0,020
Média	0,020		Média	0,019
Desvio padrão	0,002		Desvio padrão	0,002
Amostras IFSC - 20 N	Média da Rugosidade (μm)		Amostras UDESC - 20 N	Média da Rugosidade (μm)
Amostra 1	0,030		Amostra 1	0,035
Amostra 2	0,033		Amostra 2	0,032
Amostra 3	0,033		Amostra 3	0,036
Amostra 4	0,034		Amostra 4	0,032
Amostra 5	0,052		Amostra 5	0,042
Média	0,036		Média	0,035
Desvio padrão	0,009		Desvio padrão	0,004

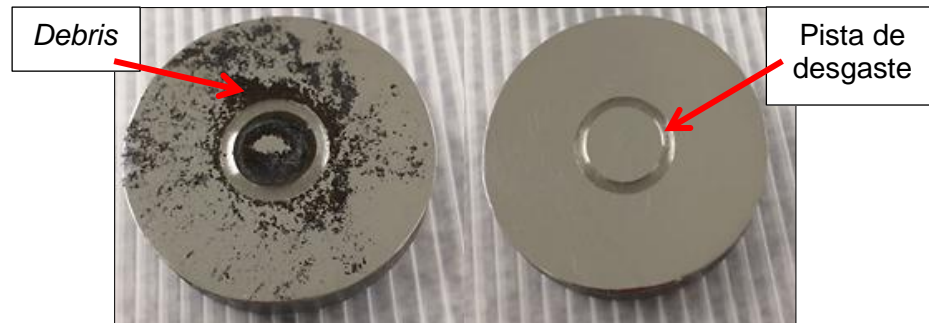
Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Como se trata de uma média, os valores apresentam variação. No entanto, os valores de desvio padrão demonstram que mesmo com esta variação, o valor de rugosidade atende a especificação da norma ASTM G99, inclusive com um valor inferior ao solicitado.

4.5 Análise da pista de desgaste

Quando os testes para todas as amostras e condições foram finalizados, realizou-se a análise da pista de desgaste gerada nos ensaios. Na Figura 19 pode-se verificar a pista de desgaste com os *debris* formados durante o ensaio, depois de ser devidamente limpa a amostra fica como demonstrado na amostra à direita.

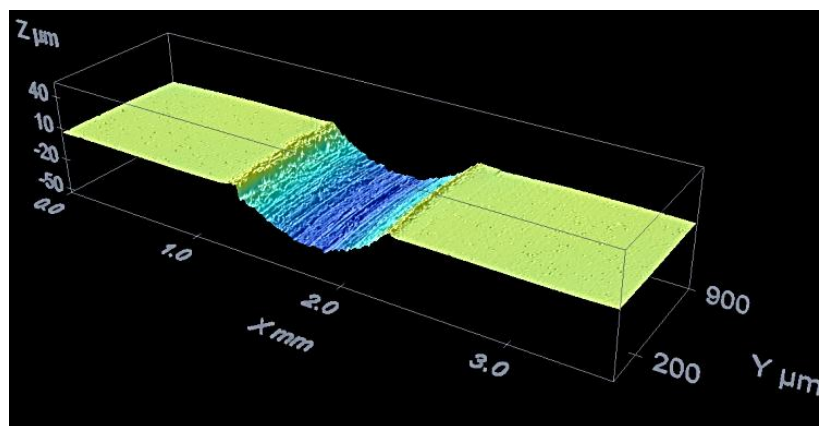
Figura 19 – Amostras após a realização do ensaio de desgaste tipo pino sobre disco com e sem *debris*



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Então, prosseguiram-se as análises das pistas. Com a utilização do equipamento confocal Leica DC3D, da UDESC, foi possível fazer uma varredura da pista de desgaste e obter o perfil da amostra de forma tridimensional. Esta varredura foi realizada em quatro locais da pista, simetricamente distribuídos. A Figura 20, demonstra a imagem gerada pelo microscópio confocal.

Figura 20 – Imagem gerada pelo microscópio Confocal Leica DC3D

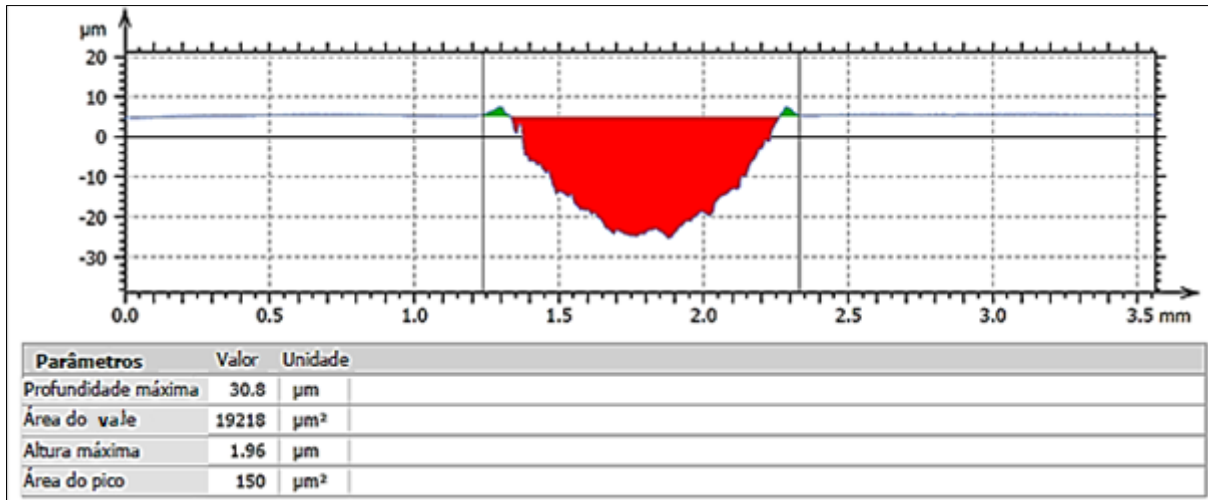


Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Após isto, os arquivos de dados do microscópio confocal foram transferidas para o programa *MountainsMap Premium 7.4* para a geração do perfil das pistas. Através da geração dos perfis das pistas, obtenção das áreas dos vales e picos, sendo quatro para cada amostra, foi possível calcular o volume de material removido no ensaio. Na Figura 21 é possível visualizar o perfil de uma das amostras ensaiadas no tribômetro do IFSC com carga a de 10 N, e em um dos quatro pontos da varredura da pista. A região em vermelho corresponde a área do vale e a região em verde a área do pico. É possível extrair ainda a profundidade e a altura máxima

do perfil. A faixa de medição é representada na figura por duas linhas verticais, que compreendem o perfil gerado, e nas análises esta foi ajustada para que ficasse o mais próxima do final do pico na amostra.

Figura 21 – Perfil de uma pista de desgaste gerado pelo programa *MountainsMap Premium 7.4*

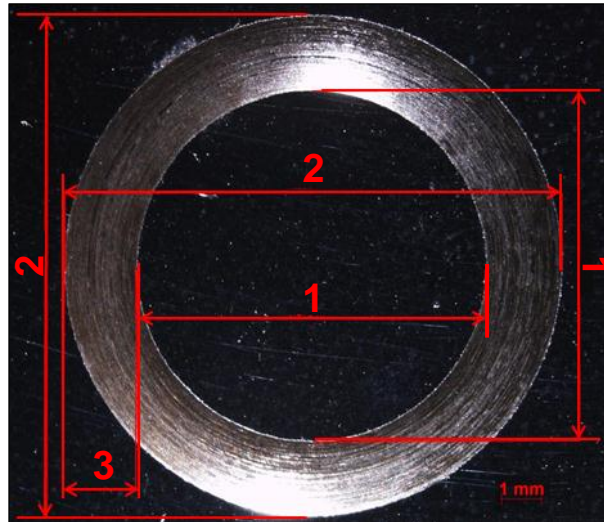


Fonte: Produção do próprio autor (2017).

A Figura 21 indica também que houve uma boa perpendicularidade da esfera em relação à superfície da amostra, já que, a profundidade máxima está praticamente centralizada com a largura do perfil e devido ao formato do perfil de desgaste, pode-se dizer que a aplicação da carga foi igualmente distribuída na amostra.

Outra medição realizada foi a dos diâmetros internos e externos da pista de desgaste utilizando o estereoscópio. Isto porque, estes valores foram necessários para o cálculo de volume de material removido do disco. Então, para cada diâmetro da pista foram realizadas duas medições, tanto do diâmetro interno (1), quanto do diâmetro externo (2), que determinam a largura da pista (3), como exemplo desta medição tem-se a Figura 22.

Figura 22 – Medição dos diâmetros da pista de desgaste



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Diante disto, a média da medição destes diâmetros foi realizada. O valor utilizado nos cálculos de perda de volume foi o do raio médio da pista, obtido descontando-se o valor do diâmetro médio interno da pista do diâmetro médio externo, e dividindo-se este por dois. Os resultados desta medição podem ser visualizados no Quadro 2.

O cálculo do valor da perda de volume da amostra do disco foi realizado utilizando-se a Equação 11, que considera o perímetro da pista e a área do material removido. Como a esfera apresentava dureza superior a amostra disco, considerou-se que somente o disco sofreu perda de volume de material, e, portanto, o cálculo foi realizado somente para a amostra do disco.

$$\text{Perda de volume} = 2 * \pi * Rm * A \quad (11)$$

Na qual:

Rm : raio médio da pista (mm)

A : média da área da pista (mm²)

Os resultados dos cálculos de perda de volume são também expostos no Quadro 2.

Quadro 2 – Resultados da análise da pista das amostras após os ensaios

Ensaio IFSC - Carga de 10 N						
	Média Área da pista (mm ²)	Raio médio (mm)	Média Diam. Externo da pista (mm)	Média Diam. Interno da pista (mm)	Média Largura da pista (mm)	Média perda de volume (mm ³)
Amostra 1	0,020	5,166	11,367	9,297	1,035	0,650
Amostra 2	0,035	5,811	12,816	10,428	1,194	1,281
Amostra 3	0,038	5,779	12,802	10,313	1,245	1,382
Amostra 4	0,028	6,020	13,121	10,960	1,081	1,070
Amostra 5	0,021	6,018	13,083	10,989	1,047	0,782
Média	0,028	5,759	12,638	10,397	1,120	1,033
Desvio padrão	0,008	0,350	0,726	0,687	0,094	0,314

Ensaio IFSC - Carga de 20 N						
	Média Área da pista (mm ²)	Raio médio (mm)	Média Diam. Externo da pista (mm)	Média Diam. Interno da pista (mm)	Média Largura da pista (mm)	Média perda de volume (mm ³)
Amostra 1	0,024	5,920	12,998	10,683	1,158	0,893
Amostra 2	0,021	5,887	12,928	10,620	1,154	0,792
Amostra 3	0,018	5,912	12,881	10,767	1,057	0,663
Amostra 4	0,084	5,870	13,350	10,129	1,611	3,107
Amostra 5	0,049	5,973	13,317	10,577	1,370	1,830
Média	0,039	5,912	13,095	10,555	1,270	1,457
Desvio padrão	0,028	0,039	0,222	0,249	0,222	1,031

Ensaio UDESC - Carga de 10 N						
	Média Área da pista (mm ²)	Raio médio (mm)	Média Diam. Externo da pista (mm)	Média Diam. Interno da pista (mm)	Média Largura da pista (mm)	Média perda de volume (mm ³)
Amostra 1	0,033	5,393	11,951	9,621	1,165	1,127
Amostra 2	0,053	5,388	12,161	9,391	1,385	1,783
Amostra 3	0,055	5,386	12,144	9,402	1,371	1,874
Amostra 4	0,046	5,201	11,715	9,088	1,314	1,506
Amostra 5	0,045	5,216	11,708	9,155	1,277	1,473
Média	0,046	5,317	11,936	9,331	1,302	1,553
Desvio padrão	0,009	0,099	0,221	0,214	0,088	0,294

Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Devido a um problema ocorrido no tribômetro da UDESC antes da realização dos testes com a carga de 20 N, a célula de carga teve que ser substituída e calibrada novamente. No entanto, os valores apresentados após isto apresentaram variações. Sendo assim, os valores obtidos nos experimentos no tribômetro da UDESC com carga de 20 N não estão apresentados neste trabalho.

Os raios médios apresentados no Quadro 2, sofreram variação no tribômetro do IFSC devido os ajustes realizados, conforme descrito no tópico 3.2.5. Após os ajustes, verifica-se que nos últimos ensaios de 10 N e os de 20 N apresentaram

valores mais próximos de 6 mm, o que indica que o procedimento realizado foi eficiente.

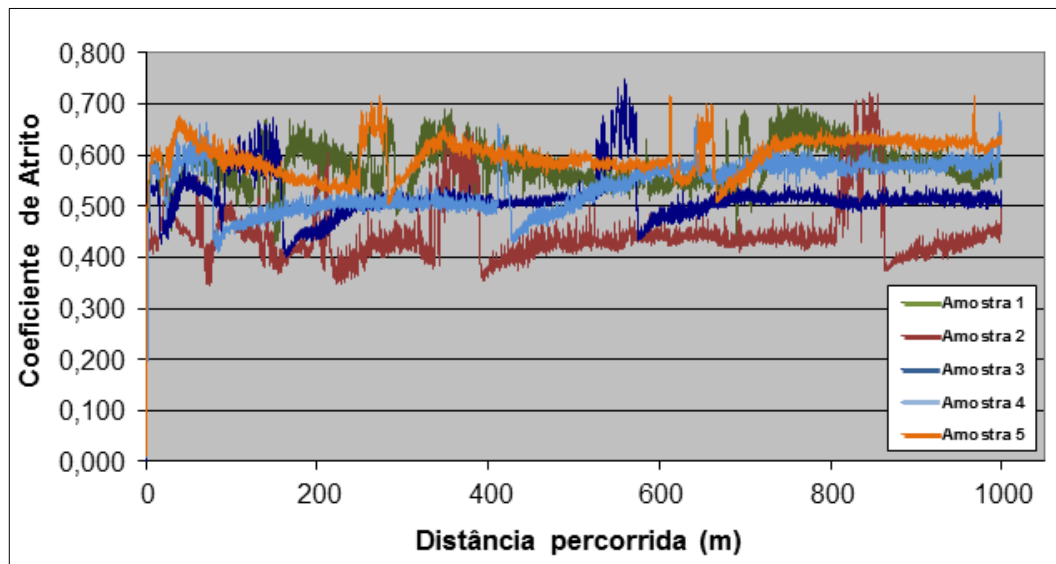
As médias de perda de volume das amostras apresentaram uma significativa variação, porém, este comportamento deve-se ao fato de que diversos fatores podem influenciar no resultado do ensaio, como as condições de contato entre as superfícies, características do material, o ambiente do ensaio, entre outros.

4.6 Ensaio de desgaste tipo pino sobre disco com carga de 10 N e 20 N a seco

Os valores dos coeficientes de atrito coletados nos ensaios foram transferidos para uma planilha eletrônica para que pudessem ser convertidos em gráficos, permitindo uma melhor interpretação dos resultados.

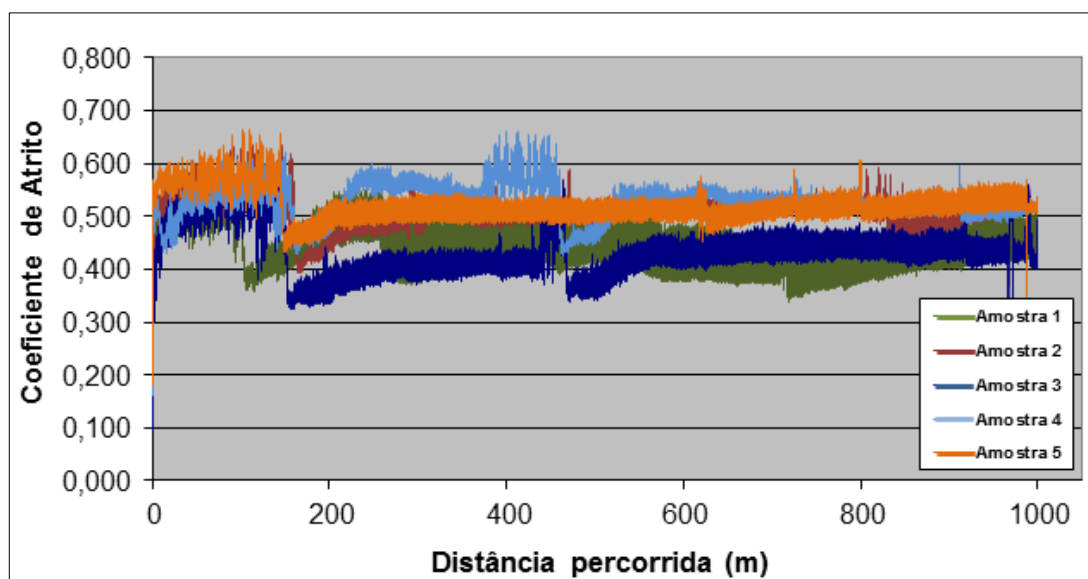
Os Gráficos 4, 5 e 6, indicam as características dos ensaios e coeficientes de atrito para as amostras testadas com carga de 10 e 20 N no tribômetro do IFSC, e com carga de 10 N no tribômetro da UDESC.

Gráfico 4 – Coeficientes de atrito para as cinco amostras ensaiadas com carga de 10 N no tribômetro do IFSC



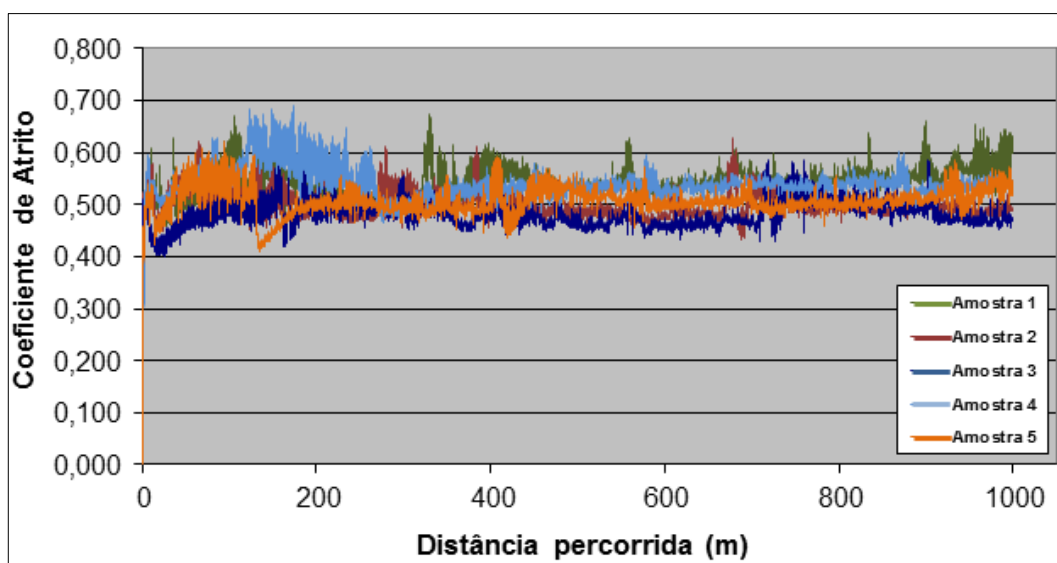
Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Gráfico 5 – Coeficientes de atrito para as cinco amostras ensaiadas com carga de 10 N no tribômetro da UDESC



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Gráfico 6 – Coeficientes de atrito para as cinco amostras ensaiadas com carga de 20 N no tribômetro do IFSC



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

O Gráfico 4 indica que houve uma maior variação do coeficiente de atrito durante o ensaio, que pode ser causada pela remoção da camada de óxidos da pista, estando mais acentuado na amostra 2. Nas demais amostras o gráfico tem menor dispersão, indicando que a repetibilidade dos ensaios está dentro do comum para este tipo de ensaio.

Já o Gráfico 5, que representa o ensaio realizado na UDESC demonstrou que

houve uma boa repetibilidade nos ensaios, pois, a dispersão dos ensaios foi menor. Pode-se dizer que após os primeiros 150 m o ensaio entrou em regime, apresentando pouca variação no coeficiente de atrito. Como ocorrido nos resultados do tribômetro do IFSC, alguns picos no coeficiente de atrito também podem ser visualizados.

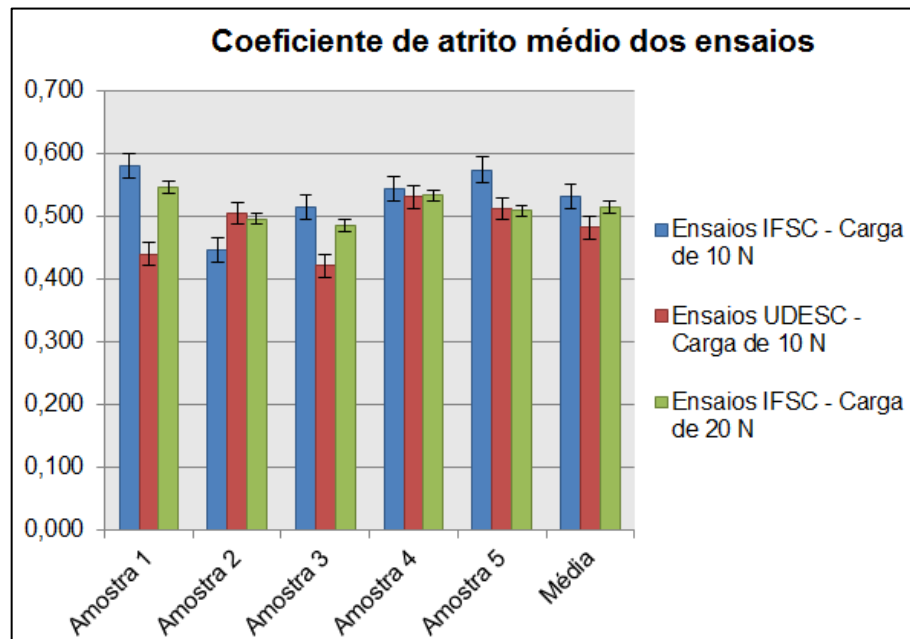
O ensaio com carga de 20 N realizado no tribômetro do IFSC, apresentado no Gráfico 6, demonstrou menor dispersão no coeficiente de atrito em relação ao ensaio com carga de 10 N realizado no IFSC. Apresentando uma maior variação inicial, e após um regime. Houve também picos nos ensaios, conforme ocorrido nos demais. A formação de óxidos reduz o coeficiente de atrito, gerando a queda do mesmo e formando uma camada na pista de desgaste. Os picos do coeficiente de atrito, apresentados nos ensaios, ocorrem quando esta camada de óxidos é removida da pista de desgaste.

A amplitude dos coeficientes de atrito demonstradas nos ensaios foi pequena, o que pode indicar que vibrações e interferências nas medições são de baixa influência nos resultados. A maior variabilidade, dentro de um ensaio, no tribômetro da UDESC pode ser atribuída a sensibilidade da célula de carga de 20 N contra a célula de carga de 30 N do IFSC.

Foram gerados também gráficos da média dos ensaios descritos acima, com seus devidos desvios padrão em relação à linha de tendência apresentada nos gráficos. Vale ressaltar que devido à variação ocorrida nos primeiros metros do ensaio, entre 0 e aproximadamente 200 metros, estes valores não foram considerados no cálculo da média de coeficiente de atrito.

Os resultados da média do coeficiente de atrito para os ensaios realizados nos IFSC com carga de 10 N e 20 N, e na UDESC com carga de 10 N, estão apresentados no Gráfico 7.

Gráfico 7 – Resultado do coeficiente de atrito médio dos ensaios



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Desta forma, conforme apresentado no Gráfico 7, os ensaios apresentaram um coeficiente de atrito similar, com uma boa repetibilidade nos resultados, sobretudo nos últimos ensaios realizados no tribômetro do IFSC com carga de 20 N, apresentado anteriormente no Gráfico 6. Os valores dos coeficientes de atrito médios obtidos foram característicos para estas condições, ficando dentro da faixa estipulada, conforme Castro (2015, p.107), a faixa de valores de coeficiente de atrito para materiais metálicos é de 0,4 a 0,6.

A compilação destes resultados e os valores de coeficiente de desgaste podem ser vistos no Quadro 3. Estes valores de coeficiente de desgaste foram obtidos utilizando a Equação 4, que leva em consideração o volume de material removido, dureza Brinell, carga aplicada e distância percorrida no ensaio.

Quadro 3 – Resultados dos ensaios para o coeficiente de atrito, perda de volume e coeficiente de desgaste

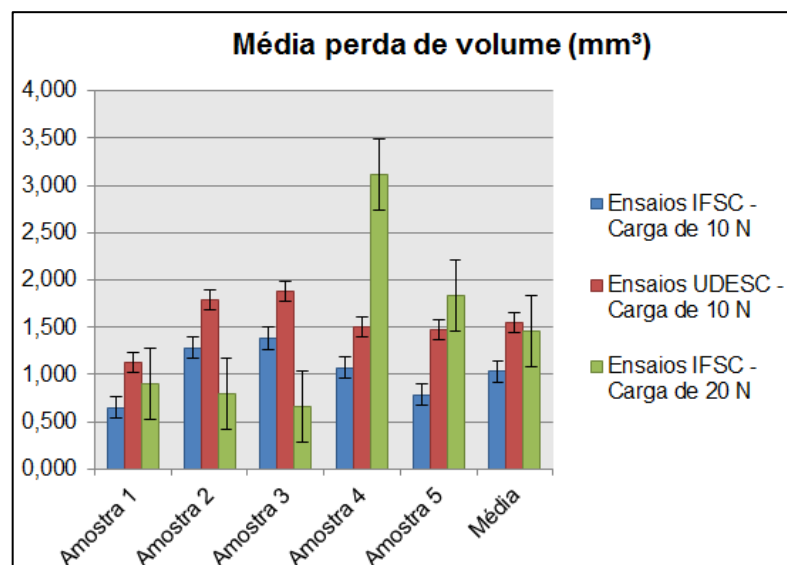
Ensaio IFSC - Carga de 10 N				Ensaio UDESC - Carga de 10 N			
	Coeficiente de atrito médio	Média perda de volume (mm ³)	Coeficiente de desgaste - k (mm ³ /N.m)		Coeficiente de atrito médio	Média perda de volume (mm ³)	Coeficiente de desgaste - k (mm ³ /N.m)
Amostra 1	0,581	0,650	1,51E-02	Amostra 1	0,440	1,127	2,36E-02
Amostra 2	0,446	1,281	2,98E-02	Amostra 2	0,505	1,783	4,15E-02
Amostra 3	0,514	1,382	3,21E-02	Amostra 3	0,421	1,874	4,11E-02
Amostra 4	0,544	1,070	2,39E-02	Amostra 4	0,531	1,506	3,50E-02
Amostra 5	0,574	0,782	1,51E-02	Amostra 5	0,512	1,473	3,21E-02
Média	0,532	1,033	2,32E-02	Média	0,482	1,553	3,46E-02
Desvio padrão	0,055	0,314	7,97E-03	Desvio padrão	0,048	0,294	7,35E-03

Ensaio IFSC - Carga de 20 N			
	Coeficiente de atrito médio	Média perda de volume (mm ³)	Coeficiente de desgaste - k (mm ³ /N.m)
Amostra 1	0,547	0,893	1,04E-02
Amostra 2	0,496	0,792	9,21E-03
Amostra 3	0,486	0,663	6,54E-03
Amostra 4	0,533	3,107	3,97E-02
Amostra 5	0,509	1,830	2,13E-02
Média	0,514	1,457	1,74E-02
Desvio padrão	0,025	1,031	1,37E-02

Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Destaca-se também, que a perda de volume teve variações mais significativas, pois de acordo com a Equação 11, leva em conta o raio médio da pista e a área de da pista, que estão bastante suscetíveis a variações devido a não homogeneidade do material, incrustações no material, e até mesmo variações no raio da pista no momento de fixação da amostra e ajuste da distância. Esta variação da perda de volume das amostras pode ser visualizada também no Gráfico 8.

Gráfico 8 – Resultado da média da perda de volume das amostras



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

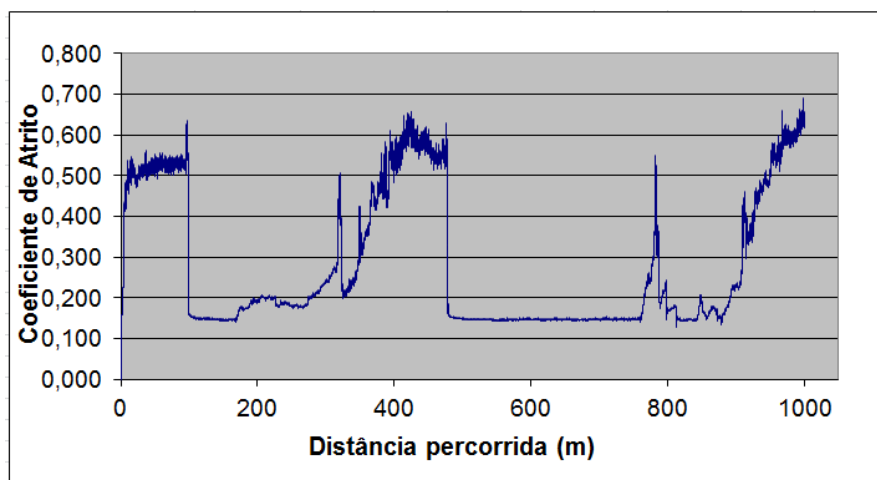
4.7 Ensaio de desgaste tipo pino sobre disco com carga de 10N e lubrificado

Com o intuito de verificar o comportamento do equipamento de ensaio de desgaste, quanto ao coeficiente de atrito com a aplicação de lubrificação durante o ensaio, realizou-se um teste utilizando as mesmas variáveis do ensaio com a carga de 10 N, porém, aplicando-se óleo lubrificante na pista de desgaste.

A rugosidade medida nos cinco pontos da amostra seguiu-se conforme realizado para as demais amostras, a disposição destas medições foi apresentada anteriormente na Figura 11. A média das rugosidades medidas para esta amostra foi de 0,031 μm com um desvio padrão de 0,002. Este valor foi bem similar aos obtidos nas outras amostras, portanto condiz com o valor solicitado pela norma.

O ensaio de desgaste do pino sobre disco com carga de 10N realizado com lubrificação no tribômetro do IFSC, apresentou a variação do coeficiente de atrito em função da distância percorrida no ensaio conforme demonstrado no Gráfico 9.

Gráfico 9 – Ensaio de desgaste tipo pino sobre disco lubrificado com carga de 10N, tribômetro do IFSC



Fonte: Produção do próprio autor (2017).

Como pode ser observado, nos pontos onde houve a aplicação do lubrificante, em cerca de 100 m e 470 m, ocorreu uma diminuição significativa do coeficiente de atrito, que ficou entre 0,1 e 0,2, o que é característico de ensaios lubrificados. O aumento deste valor ocorreu devido à remoção e degradação do filme de óleo do lubrificante.

5 CONCLUSÃO

Um tribômetro para realizar o ensaio de desgaste entre dois materiais para se analisar os parâmetros de coeficiente de atrito e desgaste e a caracterização tribológica dos materiais foi avaliado.

A norma ASTM G99 (2004), estabelece critérios para o ensaio de desgaste tipo pino sobre disco, características construtivas do equipamento, parâmetros de ensaio, preparação das amostras e cálculos. Desta forma, a verificação e atendimento dos parâmetros descritos na norma foram observados para verificar a confiabilidade e reprodutibilidade do equipamento.

Diante disto, com os testes realizados pode-se confirmar que as características mecânicas e a instrumentação do tribômetro do IFSC atendem os requisitos estabelecidos pela norma ASTM G99, como velocidade e carga aplicada constantes no ensaio, executa o número de revoluções estabelecidas, após calibração apresenta bom alinhamento no braço e na placa de castanhas e os desalinhamentos axiais foram reduzidos de 0,50 mm para 0,01 mm a 0,05 mm. Já os radiais apresentaram variação final de 0,07 mm a 0,11 mm.

A caracterização do material das amostras dos discos indicou que o material trata-se realmente de um aço SAE 1045, devido à microestrutura apresentada. A dureza do material também pode ser medida de forma satisfatória, sendo importante para os cálculos de coeficiente de desgaste do ensaio.

O coeficiente de atrito apresentado nos ensaios está dentro da faixa de valores característicos de materiais metálicos, sendo que os melhores resultados de ensaio apresentado para o tribômetro do IFSC foram para os ensaios com carga de 20 N, que apresentaram resultados com menor dispersão e com um menor desvio padrão entre os ensaios. Durante a realização dos ensaios, pequenos ajustes foram sendo feitos para melhorar a reprodutibilidade e a confiabilidade dos resultados, visto que para 20 N apresentam menores dispersões.

No ensaio realizado no tribômetro do IFSC com carga de 10 N e lubrificado foram obtidos resultados para o coeficiente de atrito dentro do esperado, o que indica que o tribômetro apresenta um bom comportamento e é sensível a variação de coeficiente de atrito quando utilizada lubrificação.

A perda de volume mostra maiores diferenças, visto que esta é mais sensível a variações no raio da pista (posição em que o braço é colocado durante o ajuste do

raio de 6 mm). A área de desgaste também é usada para estimar a perda de volume, isso pode originar diferenças nos resultados, já que é dependente de vários fatores operacionais e do material analisado.

De maneira geral, o tribômetro avaliado apresentou uma boa confiabilidade e repetibilidade nos ensaios realizados.

Sugere-se como trabalho futuro a realização de novos ensaios para melhor avaliação da perda de volume apresentada, assim como a variação da mesma entre os ensaios. Com isto, novos trabalhos relacionados ao assunto podem ser realizados no tribômetro de IFSC, como análise de diferentes materiais, com e sem tratamentos e revestimentos superficiais, analisando o comportamento destes em ensaios a seco e também lubrificados.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **G99**: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. United States: West Conshohocken, 2004. 6 p.

ASM International. ASM HANDBOOK. **Friction, Lubrication, and Wear Technology**: Vol 18. 1992. 1879 p.

BAUER, Wolfgang; WESTFALL, Gary D.; DIAS, Helio. **Física para universitários**: Mecânica. São Paulo: AMGH Editora Ltda, 2012. 484 p.

BAYER, Raymond G. **Mechanical Wear Fundamentals and Testing**: Second Edition, Revised and Expanded. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 2004. 396 p.

BEPPLER, Rhafael et al. Determinação de erros e desvios da instrumentação de um equipamento de desgaste tribômetro tipo pino sobre disco. In: XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 2016, Vitória - ES. Congresso Brasileiro de Automática - **Conference Proceedings**, 2016. p. 1734 - 1737.

BEPPLER, Rhafael. **Comparação da revelação entre reagentes metalográficos monocromáticos e de coloração nos aços SAE 1045, 4140, 52100, 304 e 420**. Jaraguá do Sul: [s.n.], 2016. 65 f. Disponível em: <<http://gw.ifsc.edu.br/site/images/TCCs/CSTFM/2016/TCCFAB2016RhafaelBeppler.pdf>>. Acesso em: 13 jul. 2017.

BHUSHAN, Bharat. **Introduction to tribology**: Second Edition. Ohio: John Wiley & Sons, 2013. 74 p.

CASTRO, Richard de Medeiros. **Desenvolvimento de um tribômetro rotativo com sistema automatizado de medição e monitoramento dos dados**. 2015. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Mecatrônica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica**: Estrutura e Propriedades das Ligas Metálicas: volume 1. 2. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1986. 266 p.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos processos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2008. Revisão Técnica André Luiz V. da Costa e Silva.

HUTCHINGS, I. M.. **Tribology**: Friction and Wear of Engineering Materials. Cambridge: British Library Cataloguing In Publication Data, 1992. 278 p.

KUMAR, Sanjay; SEN, Dr. S. S. Selection of the Material on the Basis of Wear and Friction in Journal Bearing. **International Journal Of Innovative Research In Science, Engineering And Technology**, [s.l.], v. 03, n. 09, p.16003-16013, 15 set. 2014. Ess & Ess Research Publications.
<http://dx.doi.org/10.15680/ijirset.2014.0309032>.

LUDEMA, K. C. **Friction, Wear, Lubrication: A textbook in tribology.** Florida: Crc Press, 1996. 263 p.

MARTINS, José Pedro Lopes. **Estudo, conceção, desenvolvimento e construção de um tribómetro linear para ensaios em superfícies flexíveis.** 2013. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Engenharia Mecânica, Universidade do Minho, Portugal, 2013.

NAIR, Rahul Premachandran; GRIFFIN, Drew; RANDALL, Nicholas X.. The use of the pin-on-disk tribology test method to study three unique industrial applications. **Elsevier: Wear**, Needham, p.823-827, 6 fev. 2009.

RODRIGUES, Jorge; MARTINS, Paulo. **Tecnologia Mecânica - Tecnologia da Deformação Plástica: Vol 1 - Fundamentos teóricos.** 2. ed. Lisboa: Escolar Editora, 2010.

ROVANI, Ane Cheila. **Estudo da transição do regime de desgaste moderado para o desgaste severo a seco e sob o regime de lubrificação limítrofe.** 2014. 191 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais.** 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2006. 646 p. Revista e ampliada.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Composição Química Dos Aços.** São Paulo: Blucher, 1989. 134 p.

STOLARSKI, T.a. **Tribology in Machine Design.** Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. 298 p. Reprinted. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/21216228/elsevier-mechanical-engineering-tribology-in-machine-design>>. Acesso em: 22 jun. 2017.

STRYHALSKI, Joel. **Propriedades óticas e elétricas de filmes de óxido de Titânio dopados com Nióbio.** 2015. 127 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Joinville, 2015.

TIPLER, Paul Allen. **Física para cientistas e engenheiros: volume 1: mecânica, oscilações e ondas, termodinâmica.** 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2013. Tradução e revisão de: Paulo Machado Mors [Reimpr.]

