



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TECNOLOGIA (ILATIT)**

ENGENHARIA DE MATERIAIS

**DESENVOLVIMENTO DE UM TRIBOMETRO DO TIPO PINO SOBRE DISCO DE
BAIXO CUSTO PARA ESTUDO DE DESGASTE DO PAR TRIBOLÓGICO AÇO
MÉDIO CARBONO/ LIXA DE Al_2O_3**

LUCAS MOREIRA LUZIA

Foz do Iguaçu
2022

**DESENVOLVIMENTO DE UM TRIBOMETRO DO TIPO PINO SOBRE DISCO DE BAIXO
CUSTO PARA ESTUDO DE DESGASTE DO PAR TRIBOLÓGICO AÇO MÉDIO
CARBONO/ LIXA DE Al_2O_3**

LUCAS MOREIRA LUZIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. José Ferreira da Silva Junior

Foz do Iguaçu
2022

LUCAS MOREIRA LUZIA

**DESENVOLVIMENTO DE UM TRIBOMETRO DO TIPO PINO SOBRE DISCO DE BAIXO
CUSTO PARA ESTUDO DE DESGASTE DO PAR TRIBOLÓGICO AÇO MÉDIO
CARBONO/ LIXA DE Al_2O_3**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. José Ferreira da Silva Junior
UNILA

Prof. Dr. Rafael Drumond Mancosu
UNILA

Prof. Dra. Gislaíne Bezerra Pinto Ferreira
UNILA

Foz do Iguaçu, _____ de _____ de _____.

TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): _____

Curso: _____

Tipo de Documento	
(.....) graduação	(.....) artigo
(.....) especialização	(.....) trabalho de conclusão de curso
(.....) mestrado	(.....) monografia
(.....) doutorado	(.....) dissertação
	(.....) tese
	(.....) CD/DVD – obras audiovisuais
	(.....) _____

Título do trabalho acadêmico: _____

Nome do orientador(a): _____

Data da Defesa: ____/____/____

Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons Licença 3.0 Unported*.

Foz do Iguaçu, ____ de _____ de _____.

Assinatura do Responsável

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à Deus por ter me dado inteligência para que eu pudesse realizar este trabalho.

Agradeço a minha família pelo apoio incondicional que sempre me deram.

Agradeço aos meus pais por tudo que sempre fizeram e ainda fazem por mim.

Agradeço a todos meus professores do curso de engenharia de materiais por todo o conhecimento transmitido durante desses anos.

Agradeço a meu professor e orientador Prof. Dr. José Ferreira por toda ajuda e orientação fornecida durante este trabalho como também por sua paciência comigo.

Agradeço ao técnico do laboratório de engenharias Luciano Fiamonzini pela paciência e por toda ajuda fornecida ao longo da realização desse trabalho.

Agradeço à técnica Paula do laboratório de química por todo apoio e generosidade.

Agradeço aos professores prof. Dr. Rafael Mancosu e prof. Dr. Gislaine por participarem da banca.

Agradeço à UNILA por me proporcionar a oportunidade de estudar nessa linda instituição.

Agradeço aos meus amigos que estiveram comigo ao longo desse curso, em especial aos queridos Isabela, Julia, Michele, Bruno, Natiele, Vike, Ana Beatriz, Vinicius, Viktor.

RESUMO

Os estudos de tribosistemas possuem grande importância na indústria, pois a utilização dos conhecimentos e tecnologias atuais neste tema podem gerar economia significativa no mundo todo. Os principais mecanismos de desgaste encontrados 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 foi realizar um estudo sobre o desgaste por deslizamento do aço SAE 1045 sob lixas de Al_2O_3 com diferentes tamanhos de grãos utilizando um protótipo de um tribômetro do tipo pino sobre disco desenvolvido para este estudo. Para isto, foi construído um equipamento que seja capaz de promover o contato constante, durante os ensaios, entre o material analisado e o disco do aparelho, a fim de provocar e avaliar o desgaste gerado. Em seguida, pinos de aço SAE 1045 foram atritados sob um disco revestido com Al_2O_3 com granulometrias de 80, 120 e 400 mesh com rotação de 177 rpm e uma força de 2,772 N durante 3:30 horas. Por meio de microscopia ótica e utilizando uma balança digital de alta precisão, foi possível observar desgaste do par tribológicos supracitado. Foram observadas trilhas de desgaste no pino e, após 210 minutos de ensaio, uma variação mássica de 8,16%, 5,56% e 0,19% quando utilizado as lixas de P80, P120 e P400, respectivamente.

Palavras-chaves: tribômetro; aço SAE 1045; ensaio pino sobre disco; óxido de alumínio.

RESUMEN

Los estudios de tribosistemas son de gran importancia para la industria, ya que el uso de los conocimientos y tecnologías actuales en este tema puede generar ahorros significativos a nivel mundial. Los principales mecanismos de desgaste que se encuentran en entornos industriales son la abrasión y la adhesión. La dureza y la microestructura de los materiales son propiedades que influyen en estos mecanismos de desgaste. El objetivo de este trabajo fue realizar un estudio sobre el desgaste por deslizamiento del acero SAE 1045 bajo lijas de Al_2O_3 con diferentes granulometrías utilizando un prototipo de tribómetro pin sobre disco desarrollado para este estudio. Para eso, se construyó un equipo que es capaz de promover el contacto constante, durante las pruebas, entre el material analizado y el disco del dispositivo, con el fin de provocar y evaluar el desgaste generado. En seguida, se frotaron pernos de acero SAE 1045 bajo un disco recubierto de Al_2O_3 con granulometrías de malla 80, 120 y 400 con una rotación de 177 rpm y una fuerza de 2.772 N durante 3:30 horas. Por medio de microscopía óptica y utilizando una balanza digital de alta precisión, se pudo evaluar el desgaste del mencionado par tribológico. Se observaron huellas de desgaste en el pasador y, después de 210 minutos de ensayo, una variación de masa de 8,16%, 5,56% y 0,19% al usar lijas P80, P120 y P400, respectivamente.

Palabras clave: tribómetro; acero SAE 1045; ensayo pin sobre disco; oxido de aluminio.

ABSTRACT

The tribosystem studies are of great importance in the industry, as the use of current knowledge and technologies in this topic can generate significant savings worldwide. The main wear mechanisms found in industrial environments are abrasion and adhesion. The hardness and materials microstructure are properties that influence these wear mechanisms. The objective of this work was to carry out a study on the sliding wear of SAE 1045 steel under Al_2O_3 with sandpaper with different grain sizes using a prototype of a pin-on-disk tribometer developed for this study. For that, an equipment was built that is capable of promoting constant contact, during the tests, between the analyzed material and the device disk, in order to provoke and evaluate the generated wear. Then, SAE 1045 steel pins were rubbed under a Al_2O_3 coated disc with granulometries of 80, 120 and 400 mesh with a rotation of 177 rpm and a force of 2.772 N during 210 minutes. By means of optical microscopy and using a high precision digital balance, it was possible to evaluate the wear of the tribological pair. Wear tracks were observed on the pin and, after 210 minutes of testing, a mass variation of 8.16%, 5.56% and 0.19% when using P80, P120 and P400 sandpaper, respectively.

Key words: tribometer; SAE 1045 steel; pin on disk test; friction.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Força necessária para superar o atrito e promover movimento de: a) rolamento; b) deslizamento	16
Figura 2 - Micrografia eletrônica de varredura mostrando danos na superfície por formação de cavacos, deformação plástica e coleta de fragmentos de uma partícula de cerâmica desgastando uma superfície de cobre	19
Figura 3 – Mecanismos de desgaste abrasivo: a) Por corte b) Fratura c) Fadiga d) Retirada de grão	20
Figura 4: Diferentes mecanismos de desgaste erosivo: Diferentes mecanismos de desgaste erosivo;.....	21
Figura 5: Processo de transferência de metal por adesão	23
Figura 6: Representação do funcionamento do ensaio e diferentes formatos de pino.	26
Figura 7: Desalinhamento no teste de pino sobre disco quando um pino plano é usado. A: inicial; B: Após desgaste	27
Figura 8: Exemplos de tribômetros	29
Figura 9: Micrografia de aço 1045 recozido	31
Figura 10: Fotomicrografia de um aço eutetoide mostrando a estrutura perlita.....	33
Figura 11 - Estrutura cristalina da alumina- α	34
Figura 12: Furadeira de contato Bosch 14,4V	37
Figura 13: Corte do metalon	38
Figura 14: Máquina Inversora de Solda, V8 Brasil.....	39
Figura 15: Estrutura base soldada do tribômetro	40
Figura 16: Furadeira instalada à base da estrutura	41
Figura 17: Furadeira ligada à Fonte 12V.....	42
Figura 18: Ferro de solda 60W	42
Figura 19: Potenciômetro ajustado para 50% potência.....	43
Figura 20: Tacômetro digital a laser.....	44
Figura 21: Disco de corte de madeira	45
Figura 22: Cabeçote usado para fixar corpo de prova	46
Figura 23: Corpo de prova cilíndrico 50mm	47
Figura 24: Corte feito pela fresadora em barra de alumínio	48
Figura 25: Máquina Fresadora	49

Figura 26: Vista frontal do tribômetro	50
Figura 27: Vista superior do tribômetro	51
Figura 28: Amostra de aço 1045 embutido.....	52
Figura 29: Lixadeira metalográfica.....	53
Figura 30: Politriz modelo PLFDV	54
Figura 31: Microscópio óptico marca OPTOM	55
Figura 32: Microscópio optico de luz refletida.....	56
Figura 33: Disposição do aparelho durante o ensaio	57
Figura 34: Análise micrográfica amostra obtida em MO 500x.....	59
Figura 35: Análise micrográfica amostra em MO 1000x	60
Figura 36: Trilha de desgaste deixada sobre a lixa P80 ao fim do ensaio.	63
Figura 37: Micrografia riscos superficiais sobre corpo de prova em MO 500x.....	65
Figura 38: Micrografia riscos superficiais sobre corpo de prova em MO 1000x.....	65

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva Velocidade x Potência	43
Gráfico 2 – Perda de massa x tempo para lixa P80	60
Gráfico 3 – Perda de massa x tempo para lixa P400	60
Gráfico 4 – Perda de massa x tempo para lixa P120	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação e características dos diferentes tipos de aço	30
Tabela 2 - Composição química média do aço SAE 1045 (%p).....	30
Tabela 3 - Fases cristalográficas da Alumina	34
Tabela 4 - Propriedades do óxido de alumínio- α	35
Tabela 5 : Classificação da lixa em função do tamanho de grão em micrômetros.	57
Tabela 6 : Variação mássica obtida sob diferentes tempos e granulometrias dos abrasivos.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing Materials
NBR	Norma Brasileira
SAE	Society of Automotive Engineers
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-americana

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVO GERAL	13
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	14
1.3 JUSTIFICATIVA	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 TRIBOLOGIA	15
2.1.1 Atrito.....	15
2.1.2 Desgaste.....	17
2.2 ENSAIOS DE DESGASTE	25
2.3 TRIBÔMETROS.....	28
2.4 AÇO CARBONO	29
2.4.1 Ferrita	31
2.4.2 Cementita	32
2.4.3 Perlita.....	32
2.5 ÓXIDO DE ALUMÍNIO (Al ₂ O ₃)	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1 MANUFATURA DO TRIBÔMETRO	38
3.1.1 Base.....	39
3.1.2 Sistema de Rotação.....	41
3.1.3 Sistema de Aplicação de Carga.....	46
3.2 METALOGRAFIA	51
3.3 MATERIAIS UTILIZADOS NO ENSAIO.....	56
3.3.1 Aço Sae 1045	56
3.3.2 Lixa de óxido de alumínio	56
3.4 ENSAIO DESGASTE PINO-DISCO.....	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1 ANÁLISES MICROESTRUTURAS	59
4.2 RESULTADO ENSAIO DE DESGASTE.....	60
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	67
REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

A tribologia é definida como ‘o ramo da ciência e tecnologia preocupada com a interação de superfícies em movimento relativo e assuntos associados’, e inclui o estudo de atrito, desgaste, lubrificação e projeto de rolamentos (HUTCHINGS, 2016).

A tribologia como forma tradicional existe desde o início da história registrada. Existem diversos exemplos documentados de como as primeiras civilizações desenvolveram rolamentos e superfícies de baixo atrito. O estudo científico da tribologia tem uma longa história, e acredita-se que muitas das leis básicas de atrito, como a proporcionalidade entre a força normal e a força limite de atrito, tenham sido desenvolvidas por Leonardo da Vinci no final do século XV (STACHOWIAK, 2005).

Sempre que as superfícies se movem umas sobre as outras ocorrerá desgaste: dano a uma ou ambas as superfícies, geralmente ocorrendo perda progressiva de material. Às vezes, o desgaste é imperceptivelmente leve, mas também pode ser extremamente rápido. Na maioria dos casos o desgaste é prejudicial, talvez causando maior folga entre os componentes móveis, liberdade de movimento indesejada e perda de precisão (HUTCHINGS, 2016).

O desgaste é um dos principais fatores que levam a degradação e perda de funcionalidade em componentes industriais; em áreas como petroquímica, mecânica, energia, automotiva e aeroespacial. O desgaste de componentes pode ocorrer de diversas formas, como por fricção, deslizamento, impacto, abrasão, erosão e outras maneiras em diferentes condições de serviço (BELÉM et al, 2020).

Ao lado de fenômenos como fadiga e corrosão, o desgaste é um dos principais responsáveis pelo desperdício de material e perda de desempenho mecânico, sendo o atrito o principal fator que leva ao desgaste e dissipação de energia, assim quaisquer reduções no desgaste no campo industrial podem resultar em considerável economia. É estimado que um terço dos recursos energéticos é empregado atualmente para superar as perdas de atrito de uma forma ou de outra (STACHOWIAK, 2005).

Estima-se que com a aplicação adequada dos conceitos de tribologia, a economia do Reino Unido poderia ter economizado o equivalente a cerca de 515 milhões de libras no ano de 1965. Outro estudo semelhante, realizado na Alemanha Ocidental em 1976 indica que no ano anterior perdas econômicas causadas por atrito e desgaste custaram à economia o equivalente a 1% do Produto Interno Bruto, onde 50% dessas perdas foram devidas ao desgaste abrasivo (STACHOWIAK, 2005).

O emprego de aços e ligas metálicas nos diversos setores da indústria e de engenharia está diretamente associado a suas propriedades mecânicas, ou seja, na capacidade que esses materiais possuem de suportar as cargas a que estão sujeitas em serviço (CHIAVERINI, 2008). Essas propriedades estão relacionadas com sua composição química e suas fases microestruturais (CALLISTER, 2012).

Nesse contexto, existem inúmeras técnicas e aparelhos empregados para avaliação de atrito e desgaste em que peças possam ser submetidas. Os ensaios de desgaste, são um conjunto de procedimentos realizados de modo a permitir a simulação e estudo da degradação acelerada de componentes mecânicos através de práticas laboratoriais.

Frequentemente são utilizados um tipo de equipamento conhecido como tribômetros para esses tipos de testes, os quais permitem realizar o ensaio de um ou mais materiais e se obter os parâmetros de coeficiente de atrito e caracterização tribológica (MARTINS, 2013).

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo de desgaste por deslizamento do aço SAE 1045 sob diferentes lixas de Al_2O_3 , utilizando um protótipo de tribômetro do tipo pino sobre disco desenvolvido para este trabalho.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Caracterizar a matéria prima
- Desenvolver o tribômetro
- Obter a variação mássica do corpo de prova através dos ensaios
- Comparar o desgaste sofrido pelo corpo de prova utilizando abrasivos de diferentes granulometrias

1.3 JUSTIFICATIVA

O desgaste de peças e componentes mecânicos é um fenômeno presente em quase todos os campos da indústria, sendo um dos problemas que acarretam enormes prejuízos a estas, seja por meio da degradação de material ou dissipação de energia. Esse fenômeno pode ser definido como um dano progressivo a uma superfície causado pelo movimento relativo entre dois ou mais corpos. O atrito é, no entanto, o principal agente responsável pelo fenômeno do desgaste entre materiais. Nesse contexto, o tribômetro é um instrumento utilizado para avaliar o atrito e desgaste entre duas superfícies, possibilitando o estudo e compreensão dos fenômenos tribológicos de diferentes materiais sobre diferentes superfícies.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentado uma breve revisão bibliográfica a respeito dos principais temas que abrangem esse trabalho, de forma a embasar e validar os procedimentos para a realização do estudo proposto.

2.1 TRIBOLOGIA

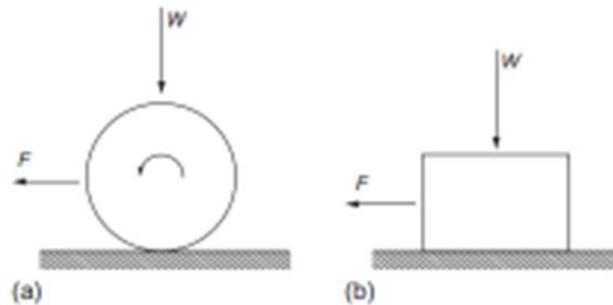
O termo tribologia, com origem no grego onde (tribo - esfregar) e (logos - estudo), foi utilizado pela primeira vez em 1966 durante o comitê do departamento inglês de educação, sendo definido, e utilizado até hoje, como o ramo da ciência e tecnologia interessada no estudo da interação entre duas superfícies em movimento relativo, que abrangem objetos de estudos como atrito, desgaste e lubrificação (JOST,1991).

Desgaste é considerado o principal responsável pelo desperdício de material e perda de desempenho mecânico de peças empregadas na indústria, assim quaisquer reduções no desgaste significam expressiva economia. Dessa forma, o atrito é o principal causador do desgaste e dissipação de energia mecânica (STACHOWIAK, 2005). Assim como o atrito é o principal fator pelo desgaste de componentes, a lubrificação é o equivalente para a atenuar esse efeito, sendo um dos meios mais eficazes para controlar e diminuir o atrito (STACHOWIAK, 2005). Isso é, a tribologia é um ramo da ciência e tecnologia, de grande importância para conservação de material e energia, com pilares definidos no atrito, desgaste e lubrificação.

2.1.1 Atrito

A força de atrito pode ser entendida como a resistência ao deslocamento relativo de um corpo em relação a outro. Essa definição abrange duas classes de movimentos relativos: rolamento e deslizamento. Podendo ocorrer os dois simultaneamente, e mesmo um movimento aparentemente puro de rolamento quase sempre poderá estar incluído uma parcela de deslizamento (HUTCHINGS, 2016).

Figura 1 - Força necessária para superar o atrito e promover movimento de: a) rolamento; b) deslizamento



Fonte: HUTCHINGS, 2016.

Quando dois corpos sólidos estão em contato, sob a ação de uma força normal e uma outra força atuante, com componente paralela à superfície (tangencial), o movimento pode não ocorrer (Figura 1). Para que se tenha o movimento relativo, a força atuante F deve ser suficiente para superar a força de atrito que se opõe a ela (BLAU, 2008). O coeficiente de atrito (μ) é visto como a razão da força que resiste ao movimento tangencial entre dois corpos à força normal pressionando esses corpos juntos. Assim a força de atrito é calculada através da expressão:

$$F = \mu N \quad (\text{Eq.1})$$

O atrito pode ser caracterizado em atrito estático, quando as superfícies estão em repouso entre si, se opondo à tendência de movimento, e em atrito dinâmico, quando as superfícies estão em movimento relativo (Blau, 2008). A força necessária para resistir apenas ao início do movimento relativo, ou seja, à iminência de movimento, nos permite definir o coeficiente de atrito estático e pode ser encontrado através da equação 2 (BLAU, 2008):

$$F_s = \mu_s N \quad (\text{Eq. 2})$$

E a força (F_k) que resiste ao movimento relativo dado o início do movimento dá origem à definição para o coeficiente de atrito cinético (μ_k), e pode ser verificado através da Equação 3:

$$F_k = \mu_k N \quad (\text{Eq. 3})$$

A magnitude da força de atrito atuante é convenientemente descrita como o valor do coeficiente de fricção, podendo variar por uma ampla faixa de valores. Para os materiais mais comuns em movimento no ar na ausência de lubrificante o valor de seu coeficiente se encontra na faixa de valores entre 0,1 e 1 (HUTCHINGS, 2016).

2.1.2 Desgaste

O desgaste pode ser definido como um dano progressivo a uma superfície sólida causado pela alteração ou remoção de material pela ação de um sólido, líquido ou gás em contato com este corpo. Ao contrário do que se imagina, o fenômeno do desgaste ocorre não só na superfície do material, porém por todo o corpo do material, apesar de ser acentuado na superfície. Geralmente há deterioração gradual que deve ser levada em conta na análise de problemas e falhas causadas por desgaste. O maior desafio referente aos problemas causados pelo desgaste é prever o tipo de mecanismo de desgaste a que o componente será submetido (ASM Internacional, 1992).

Desgaste é um termo familiar para a maioria das pessoas, e que no geral se tem um bom entendimento sobre o termo. No entanto, é difícil um consenso para uma definição que seja precisa e abrangente. Há várias classificações, baseadas nos mecanismos que esse fenômeno atua, de modo que alguns autores divergem entre si, pois os esquemas de classificação provêm de autores com diferentes experiências e abordagens do desgaste (HALLING, 1978). Um comitê do Instituto de Engenheiros Mecânicos definiu como sendo 'a perda progressiva de substância da

superfície de um corpo provocada por ação mecânica'. No entanto, Kragelski (1965), o definiu como sendo 'a destruição de material produzida como resultado de repetidas perturbações de ligações de atrito'. As duas definições por exemplo diferem quanto à abordagem, enquanto a primeira parece eliminar a erosão por centelha como uma forma de desgaste, a segunda talvez coloque muita ênfase nos efeitos da fadiga como desgaste (HALLING, 1978).

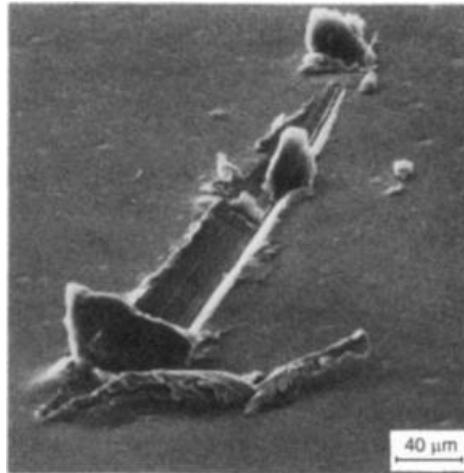
Budinski (1988) classifica os processos de desgaste em quatro categorias, quanto a seus mecanismos atuantes, ou seja, abrasão, erosão, adesão e fadiga superficial

1. Desgaste Abrasivo
2. Desgaste Erosivo
3. Desgaste Adesivo
4. Fadiga Superficial

2.1.1.1 Desgaste Abrasivo

O desgaste abrasivo é definido como o desgaste que ocorre devido a partículas ou protuberâncias duras forçadas ao longo de uma superfície sólida (Figura 2). Esta forma de desgaste em metais é mais frequentemente causada por materiais não metálicos, contudo partículas metálicas também podem causar abrasão. Geralmente um material é muito desgastado ou arranhado somente quando em contato com partículas mais duras do que elas mesmas (ASM Internacional, 2001).

Figura 2 - Micrografia eletrônica de varredura mostrando danos na superfície por formação de cavacos, deformação plástica e coleta de fragmentos de uma partícula de cerâmica desgastando uma superfície de cobre

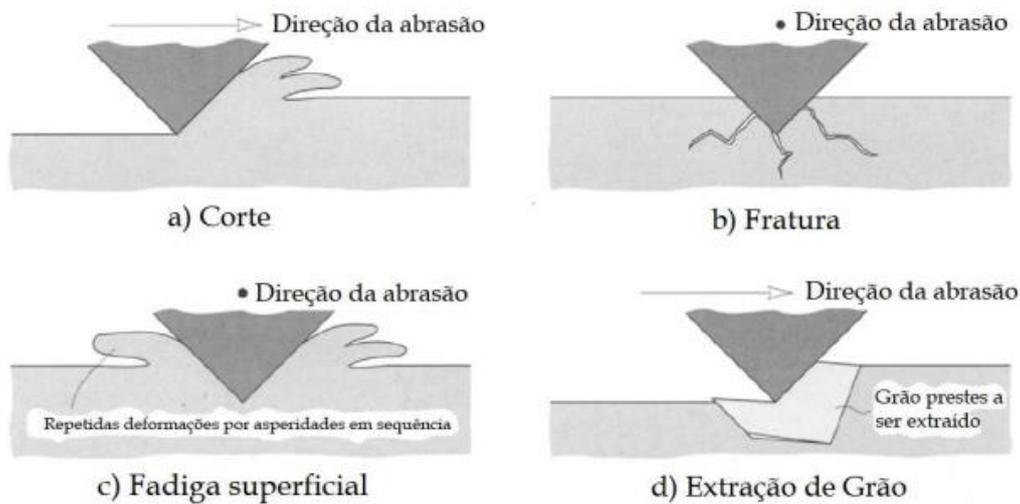


Fonte: ASM Internacional, 2001.

O termo desgaste abrasivo abrange dois tipos de situações. Em ambos os casos, o desgaste é ocasionado pela retirada de material mais macio, ou seja, o de menor dureza, por uma superfície mais dura. No primeiro caso, uma superfície áspera desliza contra uma superfície mais macia. No segundo caso, a abrasão é causada por partículas duras soltas que deslizam entre as superfícies de atrito. A ação de uma lixa contra um metal mais macio representa um exemplo do primeiro tipo de abrasão. Há duas condições para isso ocorrer: uma superfície deve ser mais dura que a outra e a superfície dura deve ser áspera (HALLING, 1978). Assim, a taxa de desgaste abrasivo determinado pela interação de duas superfícies diferentes vai depender das características de cada superfície, da velocidade de contato, da presença de abrasivo entre elas, da pressão exercida e até outras condições ambientais. (HUTCHINGS, 1992).

Uma grande dificuldade referente a prevenção ao controle do desgaste abrasivo é que o termo 'desgaste abrasivo' não descreve com precisão os mecanismos de desgaste envolvidos. Existem, de fato, quase sempre vários mecanismos diferentes de desgaste (Figura 3) atuando em conjunto, todos eles com características distintas (STACHOWIAK, 2005).

Figura 3 – Mecanismos de desgaste abrasivo: a) Por corte b) Fratura c) Fadiga d) Retirada de grão



Fonte: Stachowiak, 2005.

O primeiro mecanismo (Figura 3-a), corte, representa o modelo clássico onde um grão afiado corta uma superfície mais macia. O material que é cortado é removido como detritos de desgaste. Quando o material desgastado é quebradiço, por exemplo, cerâmica, pode ocorrer fratura da superfície desgastada (Figura 3-b). Neste caso, os detritos de desgaste são o resultado da convergência de trincas. Quando um material dúctil é desgastado por um grão sem corte, o corte é improvável e a superfície desgastada é repetidamente deformada (Figura 3-c). Neste caso, os detritos de desgaste são o resultado da fadiga do metal. O último mecanismo ilustrado (Figura 3-d) representa o desprendimento de grãos, ou remoção, de grãos. Este mecanismo aplica-se principalmente a cerâmicas onde a fronteira entre os grãos é relativamente fraca. Neste mecanismo todo o grão é perdido como detritos de desgaste (STACHOWIAK, 2005).

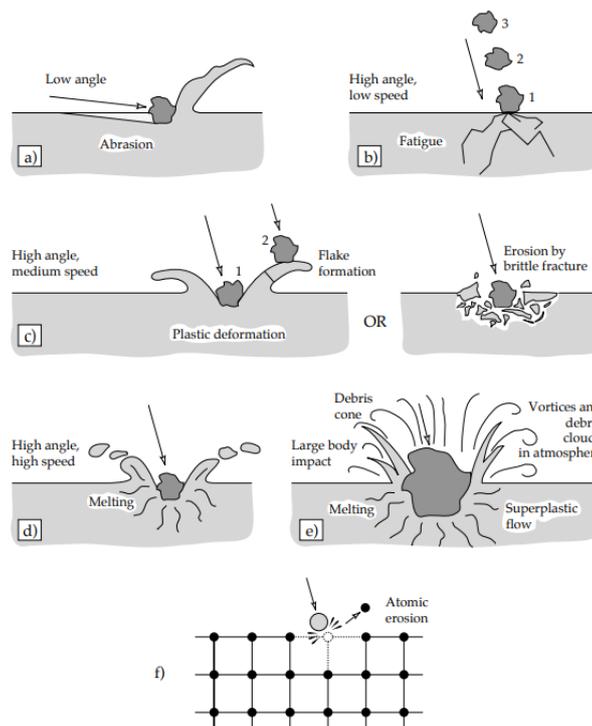
A diferença principal entre os modos de desgaste, abrasivo e erosivo, é o modo de incidência de entre as partículas. A erosão por partículas sólidas refere-se a uma série de partículas que atingem e ricocheteiam na superfície, enquanto a abrasão resulta do deslizamento de partículas abrasivas através de uma superfície sob a ação de uma força aplicada externamente (ASM Internacional, 2001).

2.1.2.2 Desgaste Erosivo

O desgaste erosivo por partículas sólidas, como é chamado, corresponde a perda de material da superfície que resulta do impacto repetitivo de pequenas partículas sólidas sob uma superfície. Em alguns casos, o desgaste erosivo por partículas sólidas é um fenômeno útil, como no jateamento de areia e no corte com jato de água abrasivo de alta velocidade, mas é um problema sério em muitos sistemas de engenharia, incluindo turbinas a vapor, tubulações e válvulas transportando material particulado e sistemas de combustão de leito fluidizado (ASM Internacional, 2001).

O termo "desgaste erosivo" se refere a um número não especificado de mecanismos de desgaste que ocorrem quando partículas relativamente pequenas colidem contra componentes mecânicos. Essa definição é empírica por natureza e se relaciona mais a considerações práticas do que a qualquer compreensão fundamental do desgaste. Os mecanismos conhecidos de desgaste erosivo estão ilustrados na Figura 4 (STACHOWIAK, 2005).

Figura 4: Diferentes mecanismos de desgaste erosivo: Diferentes mecanismos de desgaste erosivo;



Fonte: Stachowiak, 2005.

Na figura 4 estão representados os mecanismos: a) abrasão em ângulos de baixo impacto; b) fadiga superficial em baixa velocidade, impacto de ângulo de impacto alto; c) fratura frágil ou deformação plástica múltipla durante velocidade média, impacto de ângulo de impacto grande; d) fusão superficial em altas velocidades de impacto; e) erosão macroscópica com efeitos secundários; f) degradação da rede cristalina do impacto pelos átomos.

Segundo Both (2011), há três classes principais de variáveis que afetam a erosão: variáveis que descrevem o impacto e o fluxo das partículas, variáveis que descrevem as partículas propriamente ditas e variáveis do material. Na primeira classe são relevantes a velocidade das partículas, o ângulo de incidência (ângulo entre partículas e superfície) e o fluxo (concentração das partículas).

Há uma diferença em como materiais dúcteis e frágeis reagem quanto ao ângulo de incidência. Em materiais dúcteis a condição de máximo desgaste é a incidência de partículas em ângulos rasos, enquanto para materiais frágeis é a incidência em ângulos normais. Características das partículas incluem o formato, tamanho, dureza e friabilidade (facilidade de fraturar). Quanto ao material, são relevantes propriedades como dureza, comportamento frente a deformação e microestrutura.

2.1.2.3 Desgaste Adesivo

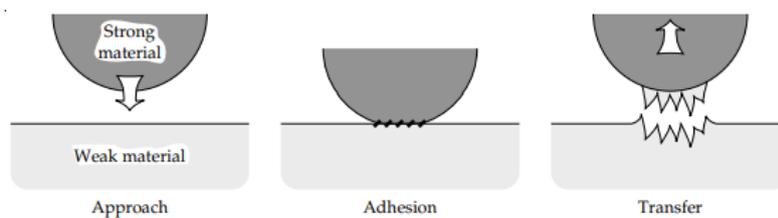
O desgaste adesivo é definido como o desgaste por transferência de material de uma superfície a outra, durante o movimento relativo sob um carregamento devido a um processo de soldagem no estado sólido. As partículas que são removidas de uma superfície são permanentemente ou temporariamente aderidas à superfície do outro material. O desgaste pode ocorrer entre materiais metálicos, cerâmicas ou polímeros, ou combinações destes. É dependente da adesão entre o material, e esta, por sua vez, depende de filmes superficiais como óxidos ou lubrificantes, bem como da afinidade mútua de um material por outro. (ASM Internacional, 2001). Esse tipo de desgaste ocorre quando a ligação adesiva entre as superfícies é suficientemente forte para resistir ao deslizamento. Como resultado dessa adesão, uma deformação plástica é causada na região de contato

gerando uma trinca que pode se propagar levando à geração de um terceiro corpo e a uma transferência completa de material (RADI et al, 2007).

A maioria dos sólidos irá aderir em contato com outro sólido até certo ponto, desde que certas condições sejam satisfeitas. A adesão entre dois objetos colocados casualmente juntos não é observada porque as camadas contaminantes intermediárias de oxigênio, água e óleo estão geralmente presentes. A adesão também é reduzida com o aumento da rugosidade da superfície ou dureza dos corpos de contato. A observação real da adesão tornou-se possível após o desenvolvimento de sistemas de alto vácuo que permitiram a preparação de superfícies livres de contaminantes. Experimentos de adesão e deslizamento realizados sob alto vácuo mostraram um comportamento tribológico totalmente diferente de muitos materiais comuns daquele observado ao ar livre (STACHOWIAK, 2005).

O desgaste adesivo se apresenta como uma forma severa de desgaste caracterizada por altas taxas de desgaste e um elevado e instável coeficiente de atrito. Os contatos deslizantes podem ser rapidamente destruídos pelo desgaste do adesivo e, em casos extremos, o movimento de deslizamento pode ser evitado por coeficientes de fricção ou gripagem muito grandes. Os metais são particularmente propensos ao desgaste adesivo, daí seu significado prático. A maioria das falhas de lubrificantes em contatos entre peças metálicas deslizantes resulta em desgaste adesivo, uma vez que isso resulta de uma quebra na função básica do lubrificante de fornecer algum grau de separação entre as superfícies deslizantes (STACHOWIAK, 2005).

Figura 5: Processo de transferência de metal por adesão



Fonte: STACHOWIAK, 2005.

Com o conhecimento dos mecanismos desse tipo de desgaste foi possível desenvolver equações que descrevessem o fenômeno, como a Equação 4:

$$V = \frac{kSL}{3H} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde V representa o volume do desgaste, S a distância de deslizamento, L a carga aplicada, H o limite de escoamento de recuo (dureza) da superfície mais macia e K um fator de probabilidade de que uma determinada área de contato irá fraturar dentro do material mais fraco do que na interface original (ASM Internacional, 2001).

A severidade com que esse desgaste vai ocorrer está relacionada com a presença, ou não, de filmes como óxidos ou lubrificantes. Sob cargas baixas, a remoção do filme de óxidos pode equilibrada pela formação de novos óxidos, e ocorre baixa taxa de desgaste. No entanto, se a carga for elevada o suficiente para romper ou remover a camada de óxidos mais rápido do que ela pode se recuperar haverá contato íntimo entre duas superfícies metálicas e ocorrerá o fenômeno da adesão (BOTH, 2011).

2.1.2.4 Fadiga Superficial

Em muitos contatos lubrificadas, a adesão entre as duas superfícies é insignificante, mas ainda há uma taxa significativa de desgaste. Este desgaste é causado por deformações sustentadas pelas asperezas e camadas superficiais quando as asperezas de superfícies opostas entram em contato. Contatos entre asperezas acompanhados por tensões locais muito altas são repetidos um grande número de vezes durante o deslizamento ou rolamento, e partículas de desgaste são geradas por trincas propagadas por fadiga, daí o termo ‘desgaste por fadiga’. O desgaste nestas condições é determinado pela mecânica de início de trincas, crescimento de trincas e fratura (STACHOWIAK, 2005).

O termo “fadiga de contato” ou “fadiga de superfície” comumente usados na literatura é um termo técnico para danos superficiais causados por um contato de rolamento repetido. Refere-se ao dano inicial em uma superfície lisa e é

mais frequentemente usado no contexto de rolamentos. Os rolamentos contam com superfícies de contato lisas e não danificadas para um funcionamento confiável. Deve ocorrer um certo número de ciclos, ou rolamentos, antes que os defeitos superficiais sejam formados. Sua formação é chamada 'fadiga de contato'. Uma vez que as superfícies de rolamento de um rolamento estejam desgastadas, seu uso posterior é evitado devido à vibração excessiva causada pelas cavidades que passam pelo contato de rolagem. A falha do rolamento causada por fadiga de contato é geralmente repentina e é altamente indesejável, especialmente quando o rolamento que é crítico para o funcionamento adequado da máquina, por exemplo, num motor a jato, está envolvido (STACHOWIAK, 2005).

2.2 ENSAIOS DE DESGASTE

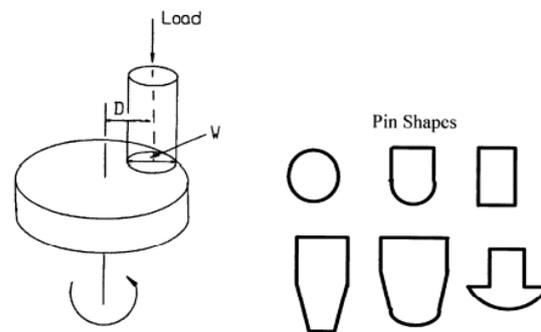
O desgaste de componentes de equipamentos, provocado pela interação de superfícies, é preocupação corrente no ambiente industrial em função da correspondente diminuição da chamada vida útil. É um problema relacionado com a perda progressiva de massa, que pode acarretar danos superficiais e alterações dimensionais, levando a um comprometimento da operacionalidade dos componentes envolvidos e, conseqüentemente, do equipamento do qual constituem elementos essenciais. Os ensaios de desgaste são práticas muito importantes, pois com eles é possível realizar um estudo de degradação acelerada de dispositivos, simulando longos tempos de utilização em um período relativamente curto. Os ensaios de laboratório se dividem em dois grupos. O primeiro grupo é formado por testes fenomenológicos que focam em alguma situação particular de desgaste como erosão, abrasão ou oxidação. O segundo grupo é constituído por testes operacionais, que focam mais na aplicação do dispositivo como um todo (GARCIA, 2012).

2.2.1 Ensaio de Desgaste Pino-Disco

É um tipo de teste geral que pode ser empregado para avaliar o comportamento de desgaste por deslizamento de pares de materiais (BAYER, 2004).

Essa técnica de ensaio é aplicada para determinar o desgaste provocado pelo deslizamento de contatos com áreas reduzidas. A máquina ou dispositivo de teste deve rotacionar o disco ou provocar movimentos circulares com o pino para que haja um movimento discordante entre o pino e o disco. O resultado do ensaio é um risco circular no disco (GARCIA, 2012). A Figura 6 retrata um diagrama do teste pino sobre disco e seções transversais das formas dos pinos usadas com este tipo de teste. Com superfícies curvas, o desgaste é geralmente confinado à região curva.

Figura 6: Representação do funcionamento do ensaio e diferentes formatos de pino.



Fonte: Bayer, 2004.

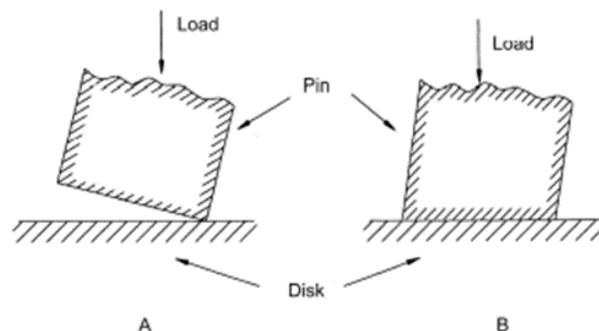
O padrão ASTM para este teste, ASTM G99, que especifica o uso de um pino arredondado, não especifica valores específicos para os parâmetros, mas permite que eles sejam selecionados pelo usuário para fornecer simulação de uma aplicação. Os parâmetros que podem variar incluem tamanho e formato do pino, carga, velocidade e pares de materiais. O ensaio pode ainda ser realizado em atmosferas controladas ou com utilização de lubrificantes. (BAYER, 2004).

Com a aplicação de uma carga pré-determinada, o pino é pressionado sobre o disco que está em movimento, sendo possível simular a carga

utilizando dispositivos mecânicos, hidráulicos, pneumáticos e elétricos. A determinação do desgaste é feita através da análise de perda de massa ou variação das medidas do disco e do pino realizadas antes e depois dos testes. O volume de desgaste é resultado de uma combinação de fatores como a força aplicada, velocidade de deslizamento, distância percorrida, o meio em que teste é realizado e as propriedades do material. As características dos sistemas reais como meio corrosivo, temperatura, lubrificação, geometria podem levar o teste a resultados não condizentes com valores reais, logo é necessário simular o maior número possível de variáveis na realização dos ensaios (GARCIA, 2012).

Ensaio com o uso de pinos com extremidade plana, existe ainda uma preocupação adicional, que é o alinhamento inicial. Nesse caso, é necessário permitir que as amostras se desgastem para que seja possível obter o contato uniforme antes que dados úteis possam ser obtidos. Assim como na Figura 7:

Figura 7: Desalinhamento no teste de pino sobre disco quando um pino plano é usado. A: inicial; B: Após desgaste



Fonte: Bayer, 2004.

O método de teste ASTM permite métodos geométricos e de perda de massa para determinar o desgaste, mas em ambos os casos a medição deve ser convertida em perda de volume para relatório (BAYER, 2004). O volume de desgaste é resultado de uma combinação de fatores como força aplicada, velocidade de deslizamento, distância percorrida, o meio em que o teste é realizado e as propriedades dos materiais (GARCIA, 2012).

2.3 TRIBÔMETROS

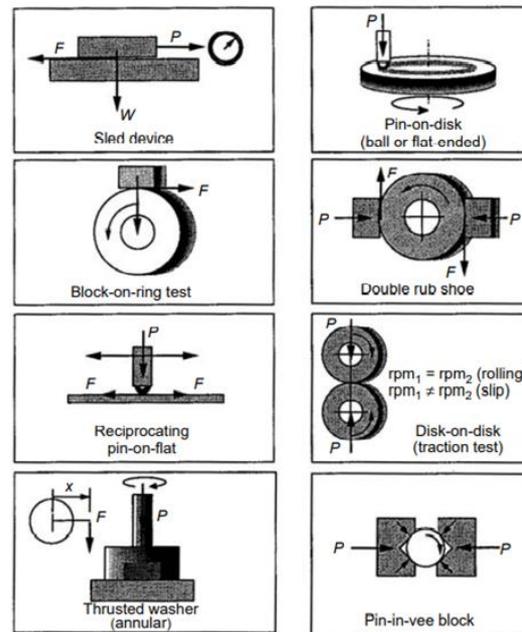
O estudo de desgaste de corpos geralmente é feito por aparelhos conhecidos como tribômetros. No aparelho se cria um movimento relativo entre dois corpos de prova em contato um com outro. O contato entre os dois corpos gera um atrito e conseqüentemente ocorre o desgaste de um, ou dos dois corpos (CHLUM. et al, 2010).

Os tribômetros de atrito estático são dispositivos que se encarregam de caracterizar interações com resistência ao movimento iminente, enquanto os de movimento deslizante (cinético) compreendem uma gama de condições de operação, variando de deslizamento unidirecional de velocidade constante até máquinas de articulação com uma série complexa de acelerações, desacelerações e mudanças de direção (BLAU, 2008).

O princípio fundamental do aparelho é gerar atrito entre dois corpos de prova e observar seus comportamentos (DRUET et al, 2001). Três elementos caracterizam o método experimental:

1. O modelo físico
2. O dispositivo para gerar o atrito
3. O procedimento experimental

Figura 8: Exemplos de tribômetros



Fonte: Blau, 2008.

Segundo Neis (2008), um tribômetro padrão, ou do tipo pino sobre disco, é constituído por dois corpos de prova, sendo um pino fixo, e um rotor (geralmente plano). O pino pode ser de qualquer geometria, onde deve ser pressionado perpendicularmente contra o disco, formando uma superfície de deslizamento circular. O usual é o disco girar enquanto o pino é pressionado, no entanto, também pode acontecer o contrário. O plano do disco pode ter orientação horizontal ou vertical, dependendo do equipamento. A força aplicada sobre o pino pode ser dada através de pesos ou de um sistema pneumático ou hidráulico.

2.4 AÇO CARBONO

Os aços são ligas dos elementos ferro-carbono, podendo conter concentrações residuais de outros elementos devido a processos de fabricação, cujas propriedades estão relacionadas com o teor de carbono presente (CALLISTER, 2012). É a liga ferro-carbono contendo geralmente de 0,008% até 2,11% de carbono. O limite inferior, de 0,008% corresponde à solubilidade mínima do carbono no ferro à temperatura ambiente e o limite superior 2,11% correspondente à máxima quantidade de carbono que se dissolve no ferro e que

ocorre a 1148°C. Os produtos com concentrações entre 2,11% à 6,7% são chamados de ferro fundidos. (CHIAVERINI, 2008). Essa classe de materiais pode ser classificada segundo o teor de carbono presente em suas estruturas.

Tabela 1 - Classificação e características dos diferentes tipos de aço

Classificação	Teor Carbono (%p)	Características
Aço baixo carbono	<0.25%	Baixa dureza e resistência, boa ductilidade e tenacidade
Aço médio carbono	0.25% a 0.6%	Boa resistência, ductilidade e temperabilidade ótima
Aço alto carbono	0.6% a 1.4%	Elevadas durezas e resistência

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Callister, 2012.

Os diferentes tipos de aços são classificados segundo a SAE (*Society of Automotive Engineers*). Eles são divididos em grupos principais e dentro desses grupos em famílias com propriedades semelhantes. A classificação dessas é feita no formato de 4 algarismos YYXX. Onde o conjunto YY representa a família do aço e XX a centésima porcentagem de carbono presente na liga (SILVA, 2008). Por exemplo, o aço carbono SAE 1040 representa um aço da família 10 (aços carbono comuns) que possui cerca de 0,40% de carbono em sua composição. A classificação indicada por 10XX é usada para representar os aços-carbono comuns com um mínimo de elementos de liga (VAN VLACK, 1984).

O aço SAE 1045, classificado como médio teor de carbono, de acordo com a NBR NM 87/2000 apresenta composição química de acordo com a Tabela 2.

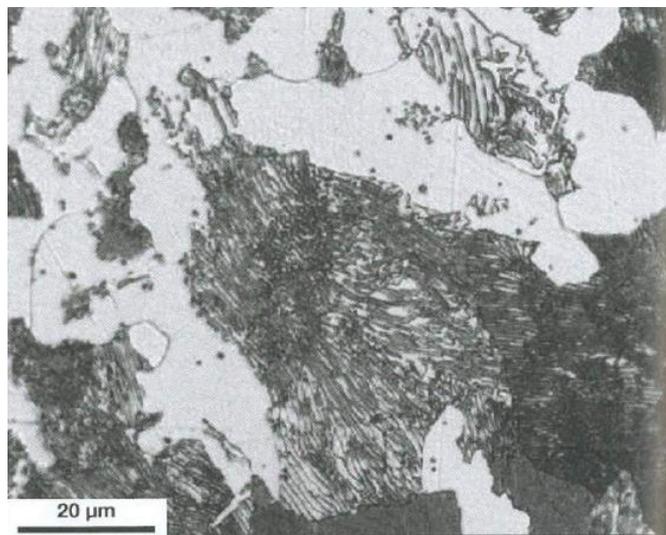
Tabela 2 - Composição química média do aço SAE 1045 (%p)

C	Mn	P	S	Si	Ni
0,43 - 0,50	0,60 - 0,90	0,03	0,05	0,10 - 0,60	-

Fonte: Elaborador pelo autor a partir de Ito, 2020.

Aços carbono, ou baixa liga como também podem ser chamados, com menos de 0,77% de carbono são chamados hipoeutetóides. Suas microestruturas são caracterizadas pela variação da fração volumétrica de perlita entre 0 e 100%. A fração de perlita e ferrita pode ser estimada nesses aços pelo percentual de carbono. Da mesma forma, o percentual de teor de carbono pode ser estimado pela observação da fração volumétrica de perlita e ferrita. A figura 11 ilustra a microestrutura de um típico aço hipoeutetoide (COLPAERT, 2008).

Figura 9: Micrografia de aço 1045 recozido



Fonte: Colpaert, 2008.

A Figura 9 apresenta os aspectos típicos dos aços eutetóides, com a presença dos constituintes ferrita e perlita.

2.4.1 Ferrita

A modificação estrutural do ferro puro em temperatura ambiente é denominada ferrita ou ferro- α . A ferrita é uma solução sólida de carbono no ferro, com estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), estável a temperaturas abaixo de 910°C. A solubilidade máxima de carbono no ferro com estrutura CCC é de 0,025% a 723°C, sendo ainda mais baixa a temperatura ambiente ($2,7 \times 10^{-7}\%$). A ferrita ainda possui baixa dureza e resistência mecânica, com boa ductilidade (SANTOS, 2008).

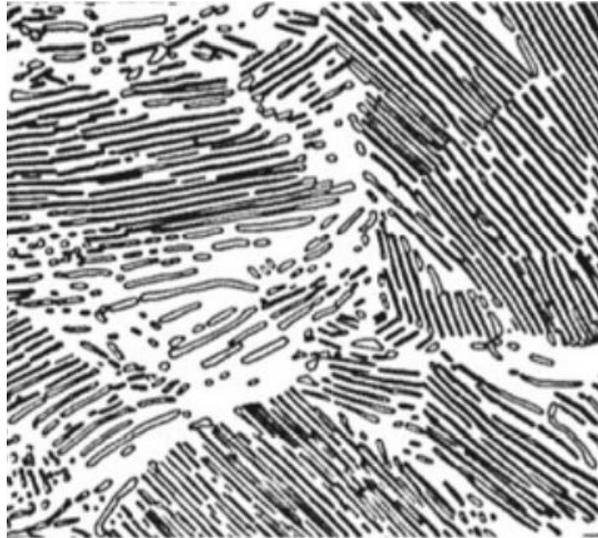
2.4.2 Cementita

A cementita (Fe_3C), ou carbeto de ferro, é uma fase que se apresenta como um reticulado cristalino baseado em uma célula unitária ortorrômbica (forma de paralelepípedo com os 3 lados diferentes) contendo 12 átomos de ferro e 4 de carbono, correspondendo a 6,7% de carbono em peso (SANTOS, 2008). A cementita se forma quando o limite de solubilidade para o carbono na ferrita- α é excedido abaixo de 727°C . Rigorosamente falando, a cementita é uma fase metaestável, isto é, a temperatura ambiente ela permanece indefinidamente como um composto (CALLISTER, 2012). A cementita apresenta elevada dureza, e por isso muito frágil e sua resistência mecânica é extremamente baixa em consequência de sua fragilidade (CHIAVERINI, 2008).

2.4.3 Perlita

É uma estrutura formada por uma mistura de duas fases, ferrita e cementita, produzida a 723°C quando a composição é de 0,8 %. Sua estrutura está constituída por lâminas alternadas de ferrita e cementita, sendo a espessura das lâminas de ferrita superior ao das de cementita. A perlita é mais dura e resistente que a ferrita, porém mais branda e maleável que a cementita. Apresenta-se em forma laminar, reticular e globular (SANTOS, 2008). Os aços com composição correspondente à composição da austenita no ponto eutetóide, correspondente a concentração de 0,77% carbono no sistema Fe-C, transformam-se completamente de austenita para perlita quando as condições de transformação são adequadas para a redistribuição de carbono (COLPAERT, 2008). A Figura 10 apresenta a configuração da estrutura perlita.

Figura 10: Fotomicrografia de um aço eutetoide mostrando a estrutura perlita



Fonte: Callister, 2012

2.5 ÓXIDO DE ALUMÍNIO (Al_2O_3)

A alumina é o nome pelo qual é conhecido o óxido de alumínio (Al_2O_3), é um dos óxidos mais importantes na indústria cerâmica, sendo muito utilizado na forma de alumina fundida ou calcinada. Dentre suas principais propriedades estão baixa condutividade térmica e elétrica, alta resistência química e resistência mecânica. Essas propriedades se relacionam diretamente com a pureza química do material, distribuição do tamanho de partículas, densidade, estrutura do pó e distribuição de tamanho de poros (ALVES, 2005). No entanto, algumas propriedades como baixa tenacidade a fratura limita sua gama em aplicações estruturais (KLOSTER, 2012).

A alumina é atualmente utilizada em diversas áreas, que vão desde a produção energética até a indústria farmacêutica. É uma das matérias-primas mais empregadas na produção de produtos cerâmicos porosos avançados. Esta vasta gama de aplicações está associada à sua diversidade de propriedades, que resulta das suas diferentes fases cristalinas (DO ROSÁRIO, 2012).

Existem aproximadamente 15 diferentes formas polimórficas do óxido de alumínio até a formação da α -alumina. Essas fases de transição são indicadas pelos símbolos η , γ , τ , ϵ , ρ , θ , κ e têm principal aplicação no uso como catalisadores. As aluminas de transição apresentam estrutura cristalina parcialmente desordenadas com base em uma sub-rede compacta de oxigênio com variações na

configuração do alumínio intersticial (KLOSTER, 2012). A Tabela 3 apresenta algumas das diferentes fases cristalográficas da alumina e suas respectivas densidades.

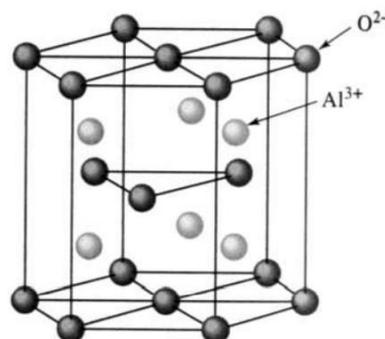
Tabela 3 - Fases cristalográficas da Alumina

	Sistema Cristalino	Densidade (g/cm³)
α	Hexagonal	3,98
η	Cúbico	2,5 - 3,6
γ	Tetragonal	3,2
κ	Hexagonal	3,1 - 3,3
θ	Monoclínico	3,56
χ	Cúbico/ Hexagonal	3

Fonte: Adaptado de Worrall, W.E, 1986

No entanto, suas principais formas polimórficas são α-alumina e β-alumina, sendo que a fase β (beta) não é um óxido puro, mas sim um aluminato, de fórmula $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (KLOSTER, 2012). A sua forma mais estável em todas as temperaturas, e como é encontrada na natureza é a alumina-α, também chamada de coríndon, possui uma estrutura cristalina romboédrica que corresponde a uma rede hexagonal, onde na estrutura os íons Al^{3+} estão coordenados a seis íons de oxigênio, representadas na Figura 11 (SANTOS, 2016).

Figura 11 - Estrutura cristalina da alumina-α



FONTE: John et al. 1999.

Essa fase desse óxido destaca-se principalmente pela sua dureza e apresenta estrutura do tipo A_2X_3 (KLOSTER, 2012). Sua elevada dureza é um dos fatores que

a levam a ser empregada como um dos principais materiais abrasivos, tendo sua dureza superada apenas pelo diamante e alguns compostos sintéticos que apresentam a estrutura do diamante (SOUZA, 2016). As principais propriedades da alumina- α estão representadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades do óxido de alumínio- α

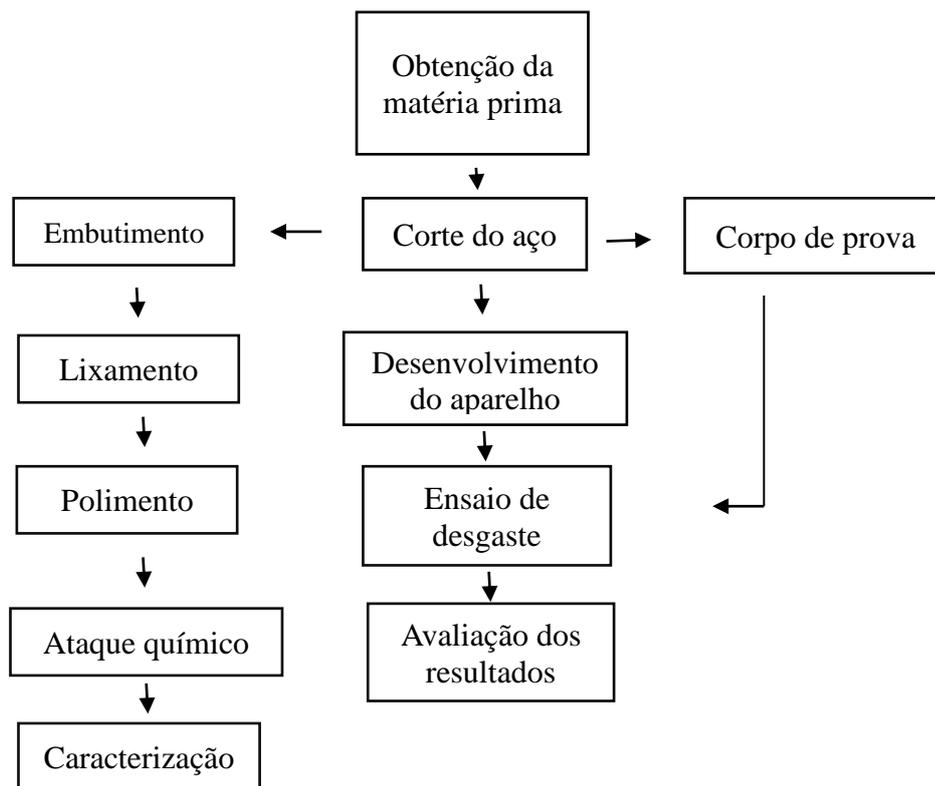
Propriedades	Faixa de valores
Densidade relativa (g/cm ³)	3,4 – 4,0
Resistência a compressão (MPa)	1000 – 2800
Resistência a tração (MPa)	140 – 170
Resistência a flexão (MPa)	280 – 420
Tenacidade a fratura (Mpa.m ^{1/2})	3,0 – 4,0
Módulo elástico (GPa)	350 – 400
Dureza (HV)	2370
Microdureza (kg.mm ⁻²)	1400 – 1800

Fonte: Elaborado pelo autor adaptado de Silva, 2014

Segundo Addisson et al. (2007), o tamanho de partícula, dureza, velocidade, morfologia, fluxo e ângulo de impacto são fatores que determinam a proporção da abrasão do material e o padrão de rugosidade criado na superfície em que essa é friccionada.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo será reservado para descrição dos materiais e equipamentos utilizados para realização deste trabalho, bem como a metodologia empregada para a realização dos ensaios e preparação das amostras analisadas. A seguir será apresentado um fluxograma com a ordem em que os procedimentos deste trabalho foram realizados.



3.1 PROJETO DO TRIBÔMETRO

A ideia inicial deste projeto consiste na construção do aparelho tribômetro, do tipo pino sobre disco, a fim de conduzir ensaios inicialmente para avaliação de desgaste, por meio da avaliação de perda de massa, de modo a elucidar o comportamento de materiais metálicos em condições de atrito. O tribômetro elaborado tem seu funcionamento associado principalmente a furadeira de impacto Bosch (Figura 11), a qual é a responsável por provocar o movimento de rotação no disco.

Figura 12: Furadeira de contato Bosch 14,4V



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a realização do trabalho foram feitas algumas considerações julgadas essenciais para o aparelho cumprir com seu objetivo de auxiliar na compreensão do comportamento do atrito e desgaste de materiais de fricção utilizados em sistemas mecânicos.

- O aparelho deve ser capaz de operar com pressões de contato e velocidades ajustáveis de maneira que melhor se adequar ao ensaio proposto;
- O manuseio do equipamento deve ser simples e prático a fim de permitir ensaios de menores custo;
- O aparelho deve ser projetado de modo que permita fácil troca de corpos de prova e de discos;

Para melhor compreensão do aparelho construído, sua estrutura está dividida em: base, sistema de rotação e sistema de aplicação de carga.

3.1 MANUFATURA DO TRIBÔMETRO

Nessa seção serão apresentados os processos, técnicas, ferramentas e materiais que foram empregados durante o desenvolvimento e produção do aparelho, bem como a divisão de seus principais componentes estruturais.

Para o desenvolvimento do tribômetro foi utilizado tubos retangulares de aço metalon, uma liga de aço 1020, com dimensões de 30mmx20mm como material para estrutura de todo o aparelho. A escolha desse material se deu pelas boas propriedades mecânicas e por ser mais economicamente viável que outros tipos de metais.

A primeira etapa do processo consistiu em cortar perfis de metalon nas dimensões adequadas para o projeto.

Figura 13: Corte do metalon



Fonte: Elaborado pelo autor

Após a etapa de corte das secções estruturais do metalon, foi realizado o lixamento das extremidades cortadas com a finalidade de remover as rebarbas geradas durante o corte.

A união das seções foi feita por meio de soldagem. O processo de soldagem foi realizado pelo técnico do laboratório de usinagem, utilizando processo de solda por eletrodo revestido. Para isso foi utilizada máquina inversora de solda apresentada na Figura 14.

Figura 14: Máquina Inversora de Solda, V8 Brasil.



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.1 Base

A base, ou suporte, do tribômetro corresponde a parte inferior do aparelho a funcionar como estrutura de sustentação para o restante de todo aparelho. Pensada para dar apoio e estabilidade aos outros componentes sendo: furadeira, disco, braço de apoio e sistema de aplicação de carga.

Inicialmente a base do aparelho foi arranjada com 3 pés de apoio. Sendo uma seção do tubo de metalon de 12cm e uma seção menor de 6cm instalada perpendicularmente na região central e duas barras na vertical, segundo a Figura 15.

Figura 15: Estrutura base soldada do tribômetro



Fonte: Elaborado pelo autor

No entanto, após testes foi decidido instalar uma barra a mais, de modo para o aparelho adquirir maior estabilidade à bancada durante a operação. Permanecendo por fim a estrutura de apoio confeccionada com 4 pés de apoio, instalados perpendicularmente entre si.

As duas barras de metalon posicionadas na vertical correspondem à região onde a furadeira foi posicionada. Para a furadeira se manter numa posição estável durante todo o ensaio, ela foi presa à estrutura do tribômetro com uma fita de aço perfurada, a qual foi parafusada junto às barras na vertical e a furadeira, segundo a Figura 16:

Figura 16: Furadeira instalada à base da estrutura



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.2 Sistema de Rotação

O sistema de rotação do aparelho apresentado consiste no conjunto de peças e componentes responsáveis pelo funcionamento da furadeira e de rotação do disco, composto por: disco de corte, Fonte 12V e potenciômetro. A bateria da furadeira utilizada neste projeto foi removida em virtude de não estar funcionando. Para a furadeira poder ser utilizada normalmente durante a operação dos ensaios, ela foi ligada diretamente a uma Fonte de 12V, de acordo com a Figura 17.

Figura 17: Furadeira ligada à Fonte 12V.



Fonte: Elaborado pelo autor

O procedimento para ligar a furadeira à Fonte, foi de utilizar um ferro de solda 60W, conectando fios ao terminal do sistema elétrico da furadeira com a Fonte, conforme a Figura 18:

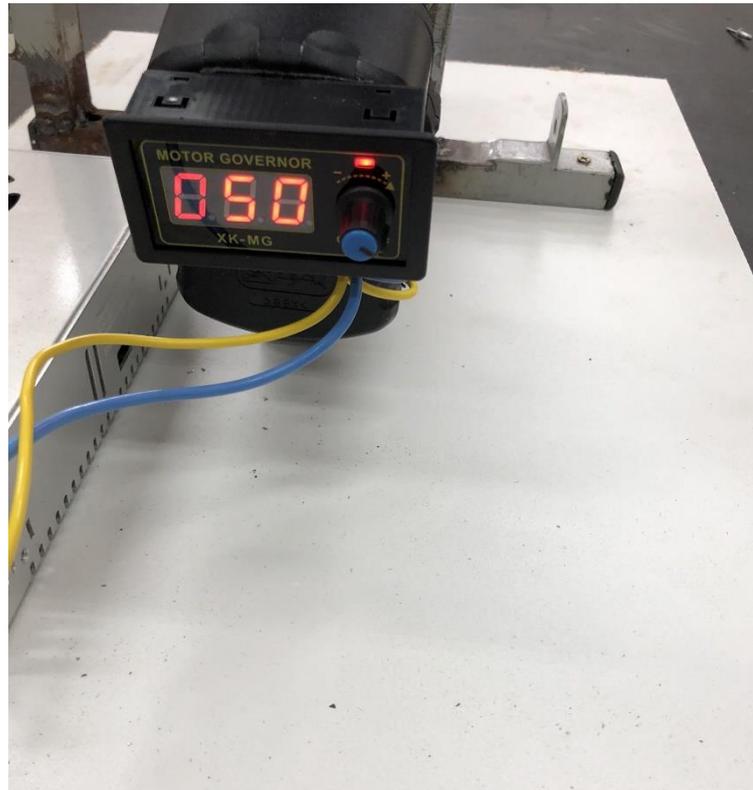
Figura 18: Ferro de solda 60W



Fonte: Elaborado pelo autor

Para se ter um controle sobre a velocidade de rotação do disco durante a operação foi instalado um potenciômetro digital (Figura 19) entre a fonte e a furadeira. Este potenciômetro atua como um controlador de velocidade, projetado para controlar motores com tensões entre 5V a 30V. Atua no controle de tensão transmitida ao dispositivo, através da variação do valor resistivo do circuito, controlados através de um regulador digital.

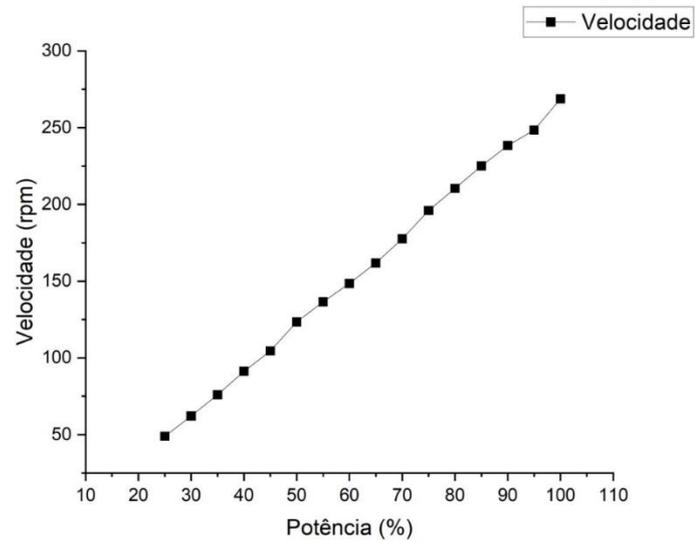
Figura 19: Potenciômetro ajustado para 50% potência



Fonte: Elaborado pelo autor

Com o potenciômetro instalado foram registradas as velocidades de rotação do disco do tribômetro com os respectivos percentuais de potência transmitida ao aparelho.

As velocidades de rotação do disco foram registradas por meio de um tacômetro digital a laser (Figura 20). Com o registro das velocidades pôde-se plotar um gráfico (Gráfico 1) com a velocidade do aparelho em função da potência utilizada, utilizando o software *originlab20*.

Gráfico 1 - Curva velocidade x potência

Fonte: Elaborado pelo autor

O tacômetro digital a laser (Figura 20) é um aparelho que opera de modo a se posicionar o laser emitido em direção a um objeto em rotação e em seguida se tem o registro de sua velocidade em rotações por minuto (rpm) do objeto em movimento.

Figura 20: Tacômetro digital a laser

Fonte: Elaborado pelo autor

Foi empregado um disco para corte de madeira (Figura 21) para ser utilizado com disco do tribômetro. O disco escolhido foi julgado ideal devido ao seu diâmetro de 9 polegadas ser compatível com o tamanho de toda a estrutura do projeto. Parâmetros como sua espessura também foram fundamentais na escolha devido principalmente a apresentar boa estabilidade no sistema furadeira-tribômetro em funcionamento.

Figura 21: Disco de corte de madeira



Fonte: Elaborado pelo autor

O disco de corte foi conectado à furadeira por meio de um parafuso de 10mm. Durante esta etapa se viu necessário a aplicação de algum material entre o disco e o parafuso para que durante os ensaios o disco adquirisse maior estabilidade, e assim garantir que durante os ensaios a amostra permaneça em contato constante com o disco. Foi aplicado um bloco de Teflon entre o parafuso e o disco e apertado por uma porca na face inferior do disco para garantir a estabilidade do conjunto.

Para a realização dos ensaios de desgaste foi colado sobre o disco diferentes lixas d'água com a finalidade de analisar o desgaste sofrido pelo corpo de

prova em superfícies com diferentes condições de atrito, pela interação do corpo de prova com lixas de diferentes granulometrias.

3.1.3 Sistema de Aplicação de Carga

O sistema de aplicação de carga construído é composto basicamente pelos componentes braço de apoio construído por uma barra de liga de alumínio 9cm e cabeçote, conforme a Figura 22.

Figura 22: Cabeçote usado para fixar corpo de prova



Fonte: Elaborado pelo autor

Esse conjunto de componentes corresponde a fração do projeto encarregada pela aplicação da carga sobre o disco e mantê-los em contato durante a operação dos ensaios. Através da força peso exercida por esse conjunto de componentes, contendo o corpo de prova no interior do cabeçote, sobre o disco em rotação irá gerar atrito entre os dois corpos em contato e conseqüentemente um desgaste. O corpo de prova (Figura 23) avaliado neste trabalho se configura como o

pino do tribômetro, sendo o corpo de prova pressionado contra o disco em movimento.

Figura 23: Corpo de prova cilíndrico 50mm



Fonte: Elaborado pelo autor

Foi utilizada a máquina de corte fresadora (Figura 24) para realizar um corte transversal na barra de alumínio, empregada como braço de apoio do aparelho.

A operação do equipamento durante o corte foi realizada pelo técnico do laboratório de usinagem da UNILA. Este recorte sobre o braço de aplicação da carga foi realizado para que se pudesse ter um controle sobre a região do disco em que o corpo de prova seria colocado em contato, podendo o corpo de prova ser posto em contato mais à extremidade ou ao centro do disco.

Figura 24: Corte feito pela fresadora em barra de alumínio



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 25: Máquina Fresadora

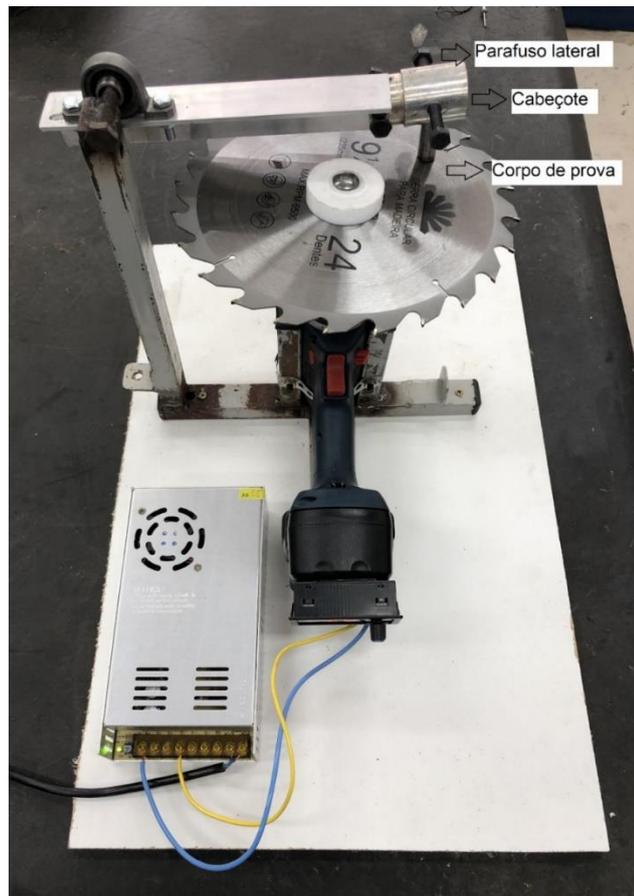


Fonte: Elaborado pelo autor

Para conectar o cabeçote à extremidade da barra de alumínio foi necessário serrar uma pequena região do cabeçote. Esse procedimento foi realizado com uma máquina de serra, pelo técnico do laboratório de usinagens da UNILA.

Com o corte feito, essa peça pôde ser encaixada à extremidade da barra de alumínio e fixado por meio de 2 parafusos nas laterais (Figura 26). A maneira encontrada para fixar o corpo de prova para a realização dos ensaios, foi a de prender o corpo de prova em formato de pino na cavidade interior deste cabeçote. O procedimento para mantê-lo preso foi de apertá-lo também por 2 parafusos pelas laterais dessa peça. Esta peça possui 2 furos em cada lateral o que se mostrou uma maneira prática e eficaz de se prender à barra de alumínio e também o corpo de prova.

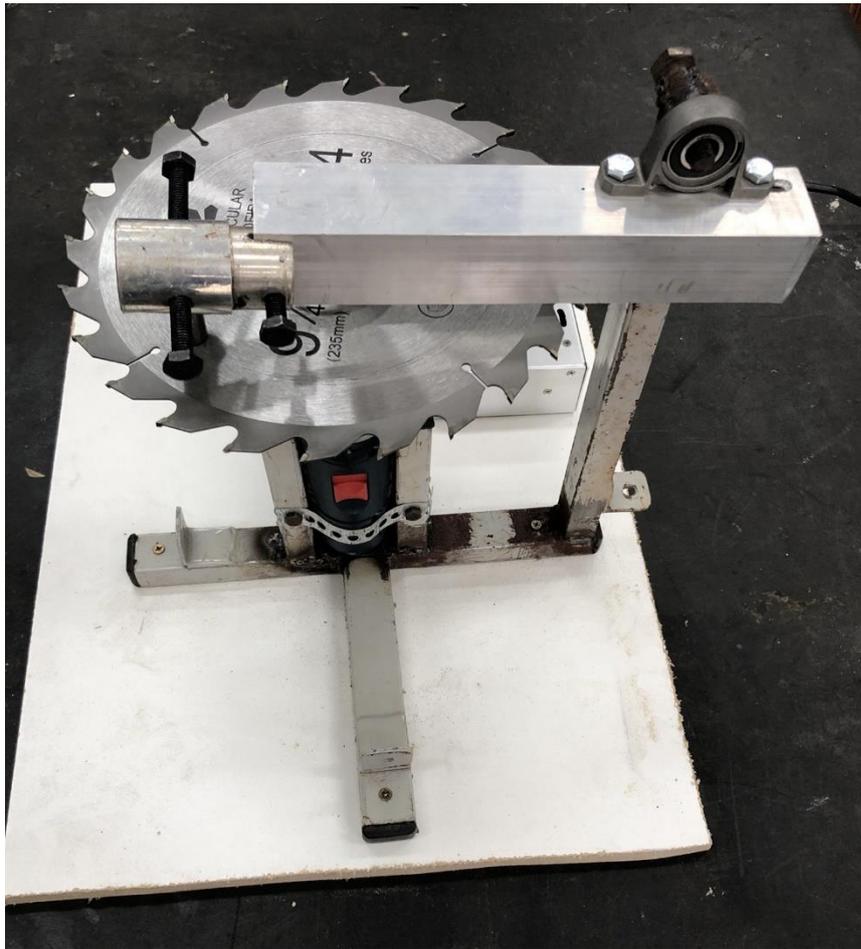
Figura 26: Vista frontal do tribômetro



Fonte: Elaborado pelo autor

Através da Figura 26 se pode ver a disposição final do aparelho, fixado sobre uma base de madeira MDF 40cmx60cm. Estão evidenciados os componentes responsáveis pela aplicação da carga do corpo de prova sob o disco, além de como os elementos corpo de prova e cabeçote foram organizados para exercerem sua função. Nele o cabeçote preso por 2 parafusos laterais na barra de alumínio e também o corpo de prova mantido preso ao cabeçote, apertado por 2 parafusos em suas laterais.

Figura 27: Vista superior do tribômetro



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2 METALOGRAFIA

Essa seção apresenta o conjunto de procedimentos adotados para a preparação dos corpos de prova para análise microscópica e obtenção de imagens.

Primeiramente foi preparado o embutimento da amostra do aço utilizado como corpo de prova. O embutimento da amostra é realizado para facilitar o manuseio de pequenas amostras, evitar a contaminação da lixa ou pano de polimento, abaulamento da superfície. Esse procedimento consiste em circundar a amostra com um material adequado, formando um corpo único (ROHDE, 2010).

O procedimento de embutimento adotado foi de embutimento a frio, utilizando resina em pó acrílica e catalisador, na proporção de 2:1. Para o procedimento foi utilizado 25g de resina e 12,5g de catalisador, misturados e a

mistura depositada dentro de um molde, onde permaneceu em repouso até solidificar. A Figura 28 mostra o corpo de prova já embutido.

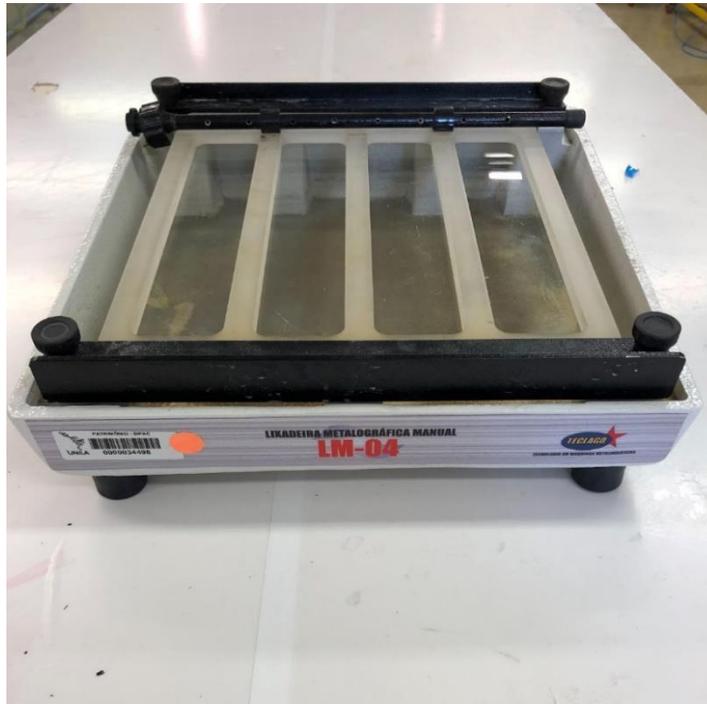
Figura 28: Amostra de aço 1045 embutido



Fonte: Elaborado pelo autor

Com a amostra embutida procedeu-se à etapa de lixamento das amostras, seguido do polimento. Primeiramente na etapa do lixamento foram utilizadas lixas d'água para a preparação da superfície, passando pelas lixas de numeração: 220, 400, 600, 800 e 1200. Para a realização da etapa de lixamento foi utilizada uma lixadeira metalográfica do tipo manual de acordo com a Figura 29.

Figura 29: Lixadeira metalográfica



Fonte: Elaborado pelo autor

Durante o procedimento as amostras tiveram seus sentidos de lixamento alterados em 90° a cada troca de lixa subsequente, de menor granulometria. Esse processo ocorreu até o desaparecimento dos riscos e marcas deixadas pela lixa anterior. O lixamento seguiu-se utilizando um fluxo de água com intuito de remoção de dendritos.

Após a realização da etapa de lixamento, seguiu-se com o polimento. Esta operação visa alcançar um acabamento superficial isento de marcas e riscos deixados pelas lixas utilizadas na etapa anterior. Antes de realizar o polimento deve ser feita a limpeza da superfície da amostra de modo a retirar possíveis partículas abrasivas, poeiras, solvente ou outro (ROHDE, 2010).

Para a realização dessa etapa foi utilizada uma politriz de modelo PLFDV (Figura 30) da marca Fortel, ajustada para 400 rpm girando em sentido horário, com suspensão de alumina (Al_2O_3) aquosa.

Figura 30: Politriz modelo PLFDV



Fonte: Elaborado pelo autor

O polimento foi realizado utilizando suspensão aquosa de alumina como material abrasivo, utilizando suspensões com tamanhos de partículas de $1\mu\text{m}$ e $0,3\mu\text{m}$ sequencialmente, aplicados sobre pano para polimento metalográfico (200 mm) na politriz, até a superfície das amostras atingir um aspecto especular.

Após a etapa de polimento, as amostras foram submetidas ao ataque químico. O primeiro passo para a realização do ataque é a escolha do reagente a ser utilizado para revelar a estrutura do aço analisado. O reagente a ser utilizado no ataque químico de aços pode ser o Nital, com concentração entre 1 a 5% (COLPAERT, 2008). Para a realização desse procedimento com a amostra foi utilizado uma solução de Nital 3%.

Figura 31: Microscópio óptico marca OPTOM



Fonte: Elaborado pelo autor

Depois do ataque químico realizado à amostra, ela foi levada ao microscópio óptico (Figura 31) para a visualização da microestrutura do aço. Em seguida levadas ao microscópio óptico de luz refletida (Figura 32) para a etapa de visualização e obtenção das imagens. O microscópio de luz invertida é conectado a um computador com o software “AXIO-vision” que permite a obtenção de fotos das microestruturas observadas no microscópio.

Figura 32: Microscópio óptico de luz refletida



Fonte: Elaborado pelo autor

3.3 MATERIAIS UTILIZADOS NO ENSAIO

3.3.1 Aço Sae 1045

Para realização dos ensaios de desgaste foi utilizado um corpo de prova composto de aço 1045 de massa inicialmente de $m = 49,98\text{g}$, formato cilíndrico e 50mm de comprimento, de acordo com a Figura 22.

3.3.2 Lixa de óxido de alumínio

Lixas com três tamanhos grãos de óxido de alumínio (Al_2O_3) foram utilizadas para sob disco metálico e foram fixadas utilizando uma fita dupla face de papel. A seguir, será apresentada uma tabela contendo a granulometria de todas as lixas utilizadas nesse trabalho.

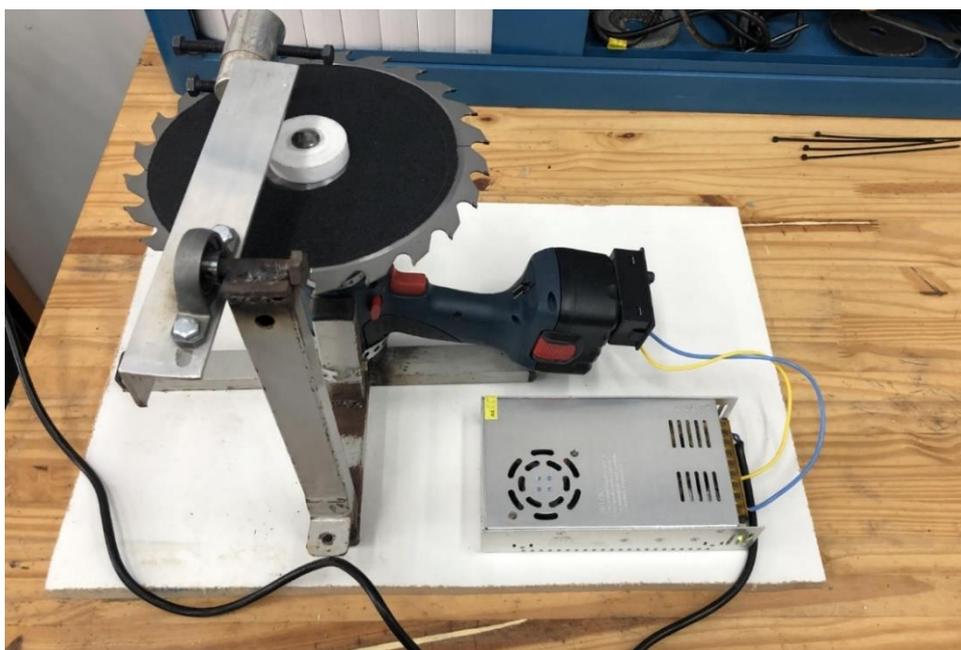
Tabela 5: Classificação da lixa em função do tamanho de grão em micrômetros.

Tipo de Lixa	Tamanho do grão (mm)
Lixa P80	197,0
Lixa P120	127,0
Lixa P220	65,0
Lixa P400	35,0
Lixa P600	27,8
Lixa P800	21,8
Lixa P1200	15,3

Fonte: Organização técnica de abrasivos, 2020.

3.4 ENSAIO DESGASTE PINO-DISCO

Com a manufatura do equipamento concluída sucedeu-se à etapa de ensaios de desgaste. O ensaio foi realizado com o intuito da avaliação do comportamento de desgaste do corpo de prova sobre diferentes lixas. Previamente o corpo de prova teve sua superfície lixada e polida através do procedimento já descrito na seção (3.2), a fim de garantir o pleno contato de sua superfície com as lixas sobre os discos. Foram utilizadas as lixas de óxido de alumínio (Al_2O_3) P80, P120 e P400 para a realização dos ensaios, coladas sobre o disco com fita dupla face.

Figura 33: Disposição do aparelho durante o ensaio

Fonte: Elaborado pelo autor

A velocidade de rotação do disco permaneceu constante durante todos os ensaios. Foi ajustada a velocidade de rotação do disco do aparelho através do potenciômetro, configurado para 70% da capacidade do sistema, correspondente a velocidade de 177rpm (Gráfico 1). A carga aplicada sobre o disco foi estabelecida como a força peso do conjunto do corpo de prova e cabeçote. Esse conjunto foi pesado separadamente em uma balança de precisão, onde se encontrou $m = 0,2826\text{kg}$, como massa do conjunto. E calculados a força transmitida ao disco através da seguinte expressão:

$$P = mg \quad (\text{Eq. 5})$$

$$P = (0,2826) \times (9,81) = 2,772\text{N}$$

Assim foi verificado que a força transmitida ao disco durante os ensaios é de $P = 2,772\text{N}$.

Os ensaios realizados tiveram duração de 210 minutos, com intervalos de 30 em 30 minutos para o registro de perda de massa do corpo de prova, utilizando uma balança de precisão.

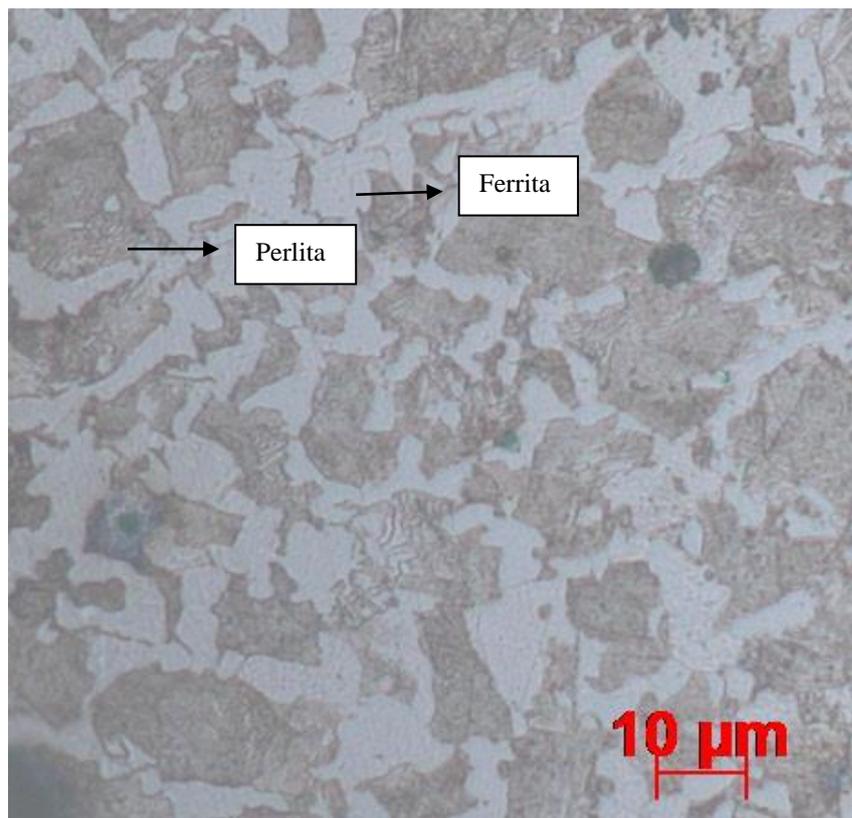
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção serão apresentados os resultados obtidos tanto sobre a caracterização da amostra do material avaliado, quanto ao ensaio de desgaste realizado no equipamento construído.

4.1 ANÁLISES MICROESTRUTURAS

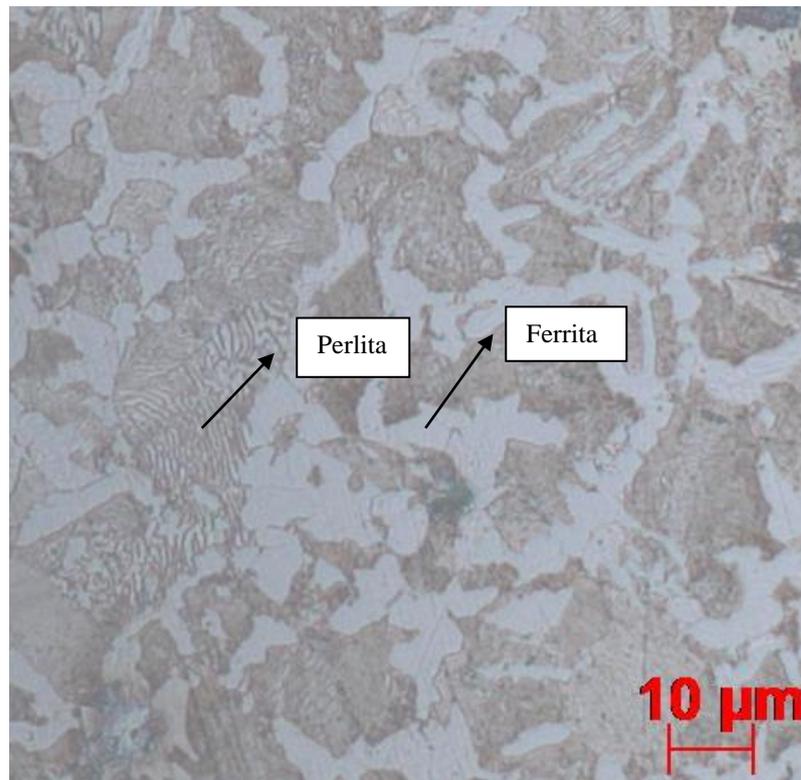
Com a realização dos ensaios metalográficos foi possível obter as micrografias, com imagens da microestrutura da amostra. As imagens da Figura 34 e Figura 35 evidenciam a microestrutura do aço obtido, com aumentos de 500x e 1000x respectivamente

Figura 34: Análise micrográfica amostra obtida em MO 500x



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 35: Análise micrográfica amostra em MO 1000x

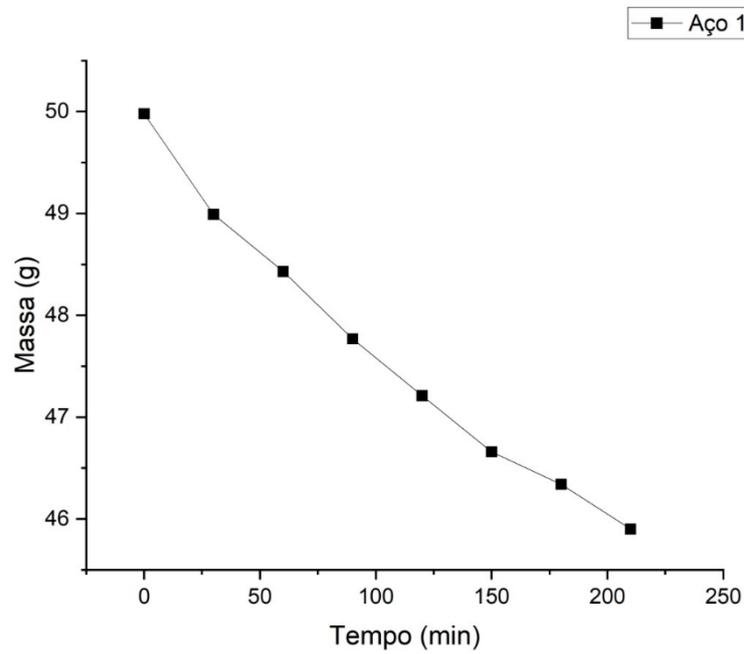


Fonte: Elaborado pelo autor

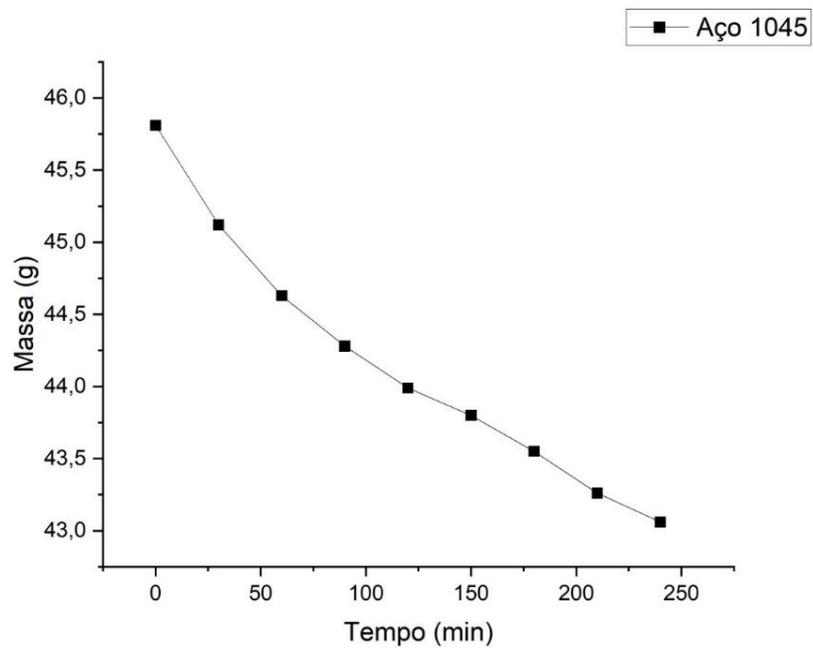
Ao analisar imagens da micrografia das amostras se nota uma microestrutura formada por uma matriz composta por ferrita (região clara) e perlita (lamelas na região escura). Segundo Colpaert (2008), essa constituição é característica de aços de médio carbono (Figura 10), indicando que o material obtido se trata de fato de um aço carbono de médio teor de carbono.

4.2 RESULTADO ENSAIO DE DESGASTE

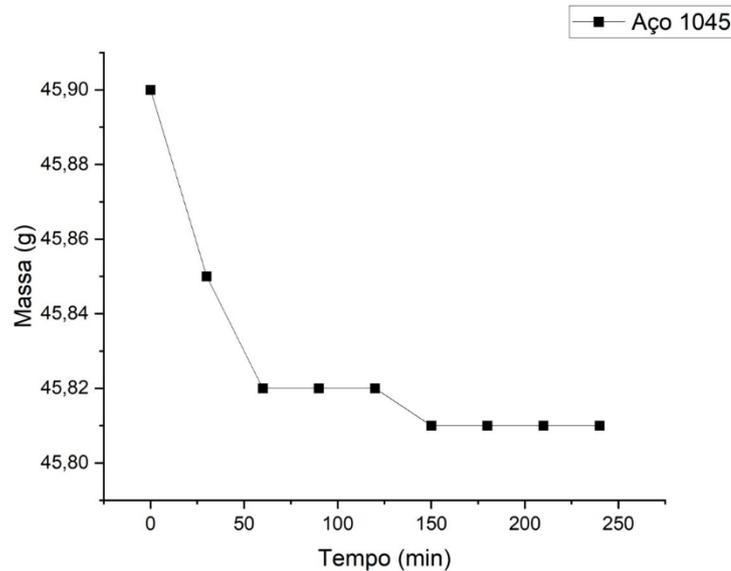
Após a finalização dos ensaios de desgaste, foram registradas as perdas de massa parciais e totais do corpo de prova referente a cada lixa utilizada durante o procedimento. A avaliação do desgaste provocada pelos diferentes abrasivos foi realizada através do registro das perdas de massa das amostras referente às lixas P80, P120 e P400, e estão apresentadas nas seguintes curvas de massa vs tempo.

Gráfico 2 - Perda de massa x tempo para lixa P80

Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 3 - Perda de massa x tempo para lixa P120

Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 4 - Perda de massa x tempo para lixa P400

Fonte: Elaborado pelo autor

A seguir é apresentada uma tabela com as respectivas variações mássicas da amostra com cada lixa utilizada.

Tabela 6: Variação mássica obtida sob diferentes tempos e granulometrias dos abrasivos.

Tempo	Lixa P80		Lixa P120		Lixa P400	
	Massa (g)	Variação mássica (%)	Massa (g)	Variação mássica (%)	Massa (g)	Variação mássica (%)
0 min	49,98	0	45,81	0	45,9	0
30 min	48,99	1,98	45,12	1,51	45,85	0,10
60 min	48,43	3,10	44,63	2,57	45,82	0,17
90 min	47,77	4,42	44,28	3,33	45,82	0,17
120 min	47,21	5,54	43,99	3,97	45,82	0,17
150 min	46,66	6,64	43,8	4,38	45,81	0,19
180 min	46,34	7,28	43,55	4,93	45,81	0,19
210 min	45,9	8,16	43,26	5,56	45,81	0,19

Fonte: Elaborado pelo autor

Através da análise dos gráficos e da Tabela 6, se nota que as maiores taxas de desgaste ocorrem nos instantes iniciais, registradas nos primeiros 30 a 60 minutos, evidenciados pelas maiores perdas de massa nas curvas

apresentadas e evidenciadas na Tabela 6. Notou-se que as taxas de desgaste diminuíram gradualmente, à medida que as lixas utilizadas também se desgastavam, caso em que ocorre desgaste sobre as duas superfícies.

Foi evidenciado o mecanismo de desgaste abrasivo pela formação de sulcos de desgaste, observados por microscopia ótica. Como resultado também se observou a formação de uma trilha de desgaste circular sobre as lixas utilizadas sob o disco (Figura 36).

Figura 36: Trilha de desgaste deixada sobre a lixa P80 ao fim do ensaio.



Fonte: Elaborado pelo autor

A análise de cada gráfico de maneira separada permite compreender o comportamento do corpo de prova diante das diferentes superfícies em contato.

O Gráfico 2, representando o teste com lixa P80, evidencia o maior desgaste sofrido dentre todas as lixas utilizadas, totalizando $m = 4,08g$,

correspondente a 8,16% de variação mássica ao longo de 210 minutos. À medida que houve desgaste contra a lixa notou-se queda em sua taxa de desgaste, se mostrando uma superfície menos abrasiva ao material.

O Gráfico 3, referente ao teste com a lixa P120, apresentou um desgaste intermediário aos outros dois meios, com remoção de material de $m = 2,55\text{g}$ perdidas durante 210 minutos de ensaio, correspondente a 5,56% de variação mássica. Esse resultado indica um comportamento dentro do esperado para o ensaio com uma superfície de granulometria intermediária às outras duas.

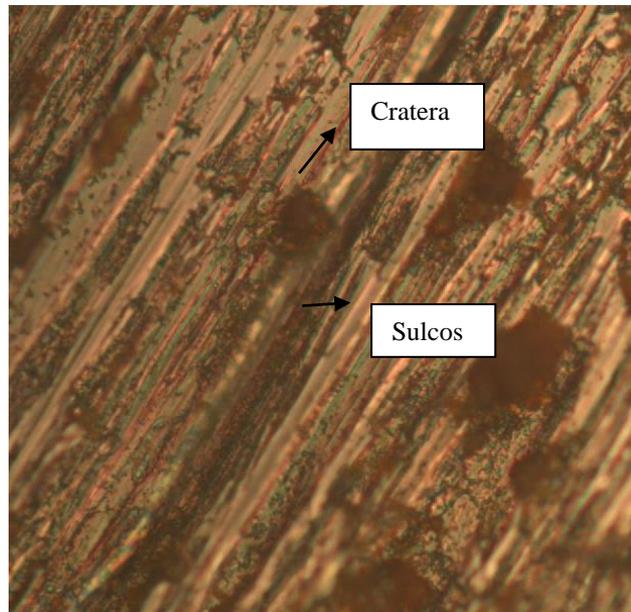
Em contrapartida o Gráfico 4, referente ao teste com a lixa P400, apresentou resultado dentro do esperado com a menor percentual de material removido, para lixa de menor granulometria, apresentando massa perdida de $m = 0,09\text{g}$ dentro de 210 minutos de ensaio, correspondente a 0,19% de variação mássica. Durante a realização desse ensaio, conforme houve desgaste dessa lixa se notou que cessou o desgaste sobre o corpo de prova, evidenciados pela não variação de massa do corpo de prova nas últimas horas de operação, vide formação de uma linha horizontal nos instantes finais sobre a curva deste ensaio. Esse comportamento indica que conforme a lixa se desgastou já não se caracterizava mais como uma superfície abrasiva para o corpo de prova avaliado.

Portanto os resultados dos ensaios de desgaste condizem com a literatura, conforme as lixas de maiores granulometrias apresentarem as maiores remoções de material.

4.3 MICROSCOPIA ÓTICA DO PINO DESGASTADO

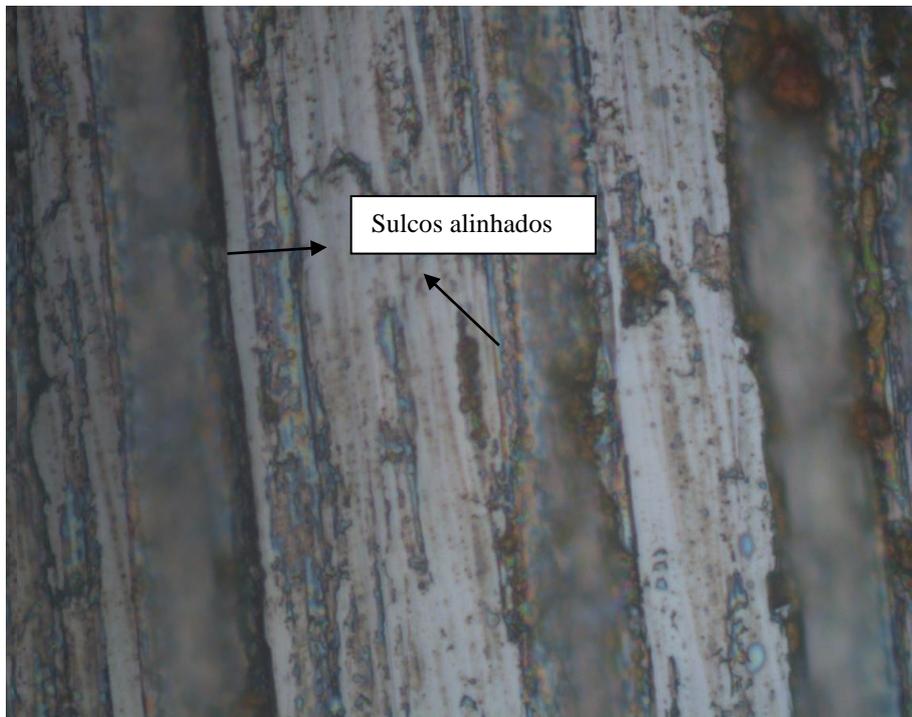
Após a realização dos ensaios de desgaste prosseguiu-se com a realização da microscopia óptica para avaliar o desgaste sofrido pela superfície do corpo de prova.

Figura 37: Micrografia riscos superficiais sobre corpo de prova em MO 500x



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 38: Micrografia riscos superficiais sobre corpo de prova em MO 1000x



Fonte: Elaborado pelo autor

Através das imagens obtidas é possível identificar pequenas cavidades e sulcos alinhados, formados pela remoção de material metálico pelo agente abrasivo, um aspecto típico de desgaste do tipo abrasivo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho buscou o desenvolvimento de um equipamento que pudesse ser utilizado como ferramenta auxiliar no estudo de fenômenos tribológicos e realizar um estudo de desgaste do par tribológico aço de médio teor de carbono/ lixa de Al_2O_3 . Com base no que se foi apresentado pode-se concluir que os objetivos (geral e específicos) foram alcançados. A manufatura de um tribometro funcional de baixo custo para avaliar o desgaste de materiais diante de diferentes superfícies com diferentes características.

Pode-se afirmar que foram alcançados os resultados esperados, uma vez que o corpo de prova apresentou maiores taxas de desgastes diante das superfícies de maior granulometria, sendo as lixas P80 e P120 apresentando variação mássica de 8,16% e 5,56% respectivamente, se confirmando superfícies mais abrasivas. Em contrapartida o teste utilizando a lixa P400, apresentou redução significativa na taxa de desgaste, se mostrando a superfície menos abrasiva pela variação mássica ínfima de 0,09g e percentual total de remoção de material em 0,19% ao fim dos ensaios.

Pode-se afirmar que a partir da microscopia do corpo de prova utilizado houve o mecanismo de desgaste do tipo abrasivo através da observação de sulcos alinhados formados a partir do contato das partículas abrasivas contra a superfície do corpo de prova.

Ainda não se pode avaliar o equipamento construído quanto a sua reprodutibilidade, tendo em vista o número de ensaios realizados. Foram realizados 3 ensaios utilizando parâmetros diferentes no mesmo corpo de prova. Apesar dos resultados condizentes com a literatura, com as lixas de maiores granulometrias provocando maior remoção de material, ainda não se pode garantir sua reprodutibilidade diante de um espaço amostral tão pequeno.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Construir um dispositivo acoplado ao aparelho que permita a variação da carga aplicada no pino sobre o disco. Para isso se sugere a construção

de um compartimento sobre o braço que se possa controlar a carga aplicada através do acréscimo ou retirada de pesos.

REFERÊNCIAS

1. ADDISON, O., MARQUIS, P. M., FLEMING, G. J. P. **The impact of modifying alumina air abrasion parameters on the fracture strength of a porcelain laminate restorative material.** Dental Materials, Vol. 23, 2007.
2. ALVES, A. K. **Obtenção e controle da morfologia de Aluminas sintetizadas por sol-gel.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2005.
3. ASM Handbook, Vol. 18, **Friction, Lubrification and Wear Technology**, ASM International, Cleveland, USA, 1992.
4. ASM Handbook. (Ed.) **Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance**, ASM International, 2001.
5. BAYER, Raymond G. **Mechanical Wear: Fundamentals and Testing.** Marcel Decker: New York, 395p., 2004.
6. BELÉM, Maria Julia Xavier, et al. **Avaliação da resistência ao desgaste erosivo e abrasivo de revestimentos WC 12Co aplicados por aspersão térmica HVOF.** Revista Matéria, Rio de Janeiro - RJ, ano 2020, v. 25, n. 1, p. 1 - 13, 6 abr. 2020.
7. BLAU, P., J., **Friction Science and Technology: from concepts to applications.** 2ª ed., CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2009.
8. BOTH, Guilherme Brandes. **Caracterização e avaliação tribológica de superfícies resistentes ao desgaste para aplicação em ferramentas de conformação a frio.** 2011.
9. BUDINSKI, Kenneth G. **Surface Engineering for Wear Resistance. (Retroactive Coverage).** Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, United States, 1988.
10. CALLISTER, D.W; **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, Ed.8, 2012.
11. CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos.** 2a Edição, São Paulo, Brasil, 2008.
12. CHLUM, B.; Hanson, K.; Lindsay, S.; e Pascoe, B. **Multi-Function Tribometer Design.** 2010.
13. **Classificação da granulometria de abrasivos.** Disponível em: <https://ota-abrasivos.com/2020/10/14/como-se-mede-a-granulometria-dos-abrasivos/>. Acesso em 11 ago. 2022.
14. COLPAERT, H. et al; **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns.** 4

- a Edição, São Paulo, Brasil, 2008.
15. DO ROSÁRIO, D. C. C. **Estudo da influência dos íons Mg²⁺ e Zr⁴⁺ na Transição de Fase Amorfo-Gama da Alumina**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
 16. DRUET, K.; ŁUBIŃSKI, T.; LUBIŃSKI, J. I. **Reciprocating motion tribometer**. In: papers from 2nd World Tribology Congress. Vienna, Austria. 2001.
 17. HALLING, J., **Principles of Tribology**, 2^a ed., The Macmillan Press Ltd., London, UK, 1978.
 18. HUTCHINGS, Ian, and Philip Shipway. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. Butterworth-Heinemann, 2016.
 19. ITO, Miyako. **Aços Especiais para Construção Mecânica** – Gerdau, 2020. Disponível em <https://www2.gerdau.com.br/sites/default/files/2020-10/Tabela_Composicao_Quimica.pdf>. Acesso em: 12 de junho de 2022.
 20. JOST, H. P., **Tribology-origin and future**, Wear, v.136, pp.1-17, 1991.
 21. KLOSTER, M.J. **Síntese de pós de Alumina dopados com MgO obtidos pelo método de emulsificação com ácido oleico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa - PR, 2012.
 22. MARTINS, José Pedro LOPES. **Estudo, concepção, desenvolvimento e construção de um tribômetro linear para ensaios em superfícies flexíveis**. 2013. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Engenharia Mecânica, Universidade do Minho, Portugal, 2013.
 23. RADI, Polyana Alves, et al. **Tribologia, conceitos e aplicações**. ANAIS DO 13º ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO ITA (XIII ENCITA). XIII., São José dos Campos. Anais [...]. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2007.
 24. ROHDE, Regis Almir. **Metalografia preparação de amostras. Laboratório de ensaios mecânicos**. Universidade Regional Integrada do alto Uruguai e Missões, 3^a Edição, Rio Grande do Sul, 2010.
 25. SANTOS, R.G. **Transformações de fases em materiais metálicos**, Ed. Unicamp. 2008.
 26. SANTOS, P.S. **Síntese de alumina pelo método sol-gel empregando se diferentes álcoois e aplicação da ozonólise do negro de eriocromo T**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Joao del-Rei – MG, 2016.

27. SCOTT, D., JONES, M., H., **Industrial Tribology: The Practical Aspects of Friction, Lubrication and Wear**, 2^a Ed, Elsevier Science Publishing Company, New York, USA, 1991.
28. SILVA, A. L., MEI, P. R., **Aços e Ligas Especiais**, 2. ed. São Paulo, Edgard Blucher, 2006.
29. SILVA, M. V.; STAINER, D.; AL-QURESHI, H. A.; HOTZA, D. **Blindagens cerâmicas para aplicações balísticas: uma revisão**. *Cerâmica*, v. 60, n. 355, 323-331, 2014.
30. STACHOWIAK, G.W., Batchelor, A.W., **Engineering Tribology**, Tribology Series 24, 3a Edição, 2005
31. VAN VLACK, L. H., **Princípio de Ciência e Tecnologia dos Materiais**, 4^a. ed. Rio de Janeiro, Campus, 1984.
32. WORRAL, W.E. **Clays and ceramics raw materials**. 2 ed., Elsevier Applied Science, 1986.