



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



CAMILA DE SÁ MACEDO

**CONSTRUÇÃO DE UM EQUIPAMENTO DE ENSAIO DE DESGASTE MICRO-
BRASIVO POR ESFERA ROTATIVA FIXA PARA ANÁLISE DO DESGASTE EM
MATERIAIS POLIMÉRICOS PRODUZIDOS POR MANUFATURA ADITIVA**

OURO PRETO - MG
2021

CAMILA DE SÁ MACEDO
camila.macedo19@hotmail.com

**CONSTRUÇÃO DE UM EQUIPAMENTO DE ENSAIO DE DESGASTE MICRO-
BRASIVO POR ESFERA ROTATIVA FIXA PARA ANÁLISE DO DESGASTE EM
MATERIAIS POLIMÉRICOS PRODUZIDOS POR MANUFATURA ADITIVA**

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Ouro Preto
como requisito para a obtenção do tí-
tulo de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: DSc. Vinícius Carvalho Teles

OURO PRETO – MG
2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M141c Macedo, Camila de Sá .

Construção de um equipamento de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa para análise do desgaste em materiais poliméricos produzidos por manufatura aditiva . [manuscrito] / Camila de Sá Macedo. - 2021.

88 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Vinícius Carvalho Teles.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Desgaste mecânico - Microabrasivo. 2. Engenharia mecânica - Manufatura Aditiva. 3. Polímeros. I. Teles, Vinícius Carvalho . II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Camila de Sá Macedo

Construção de um equipamento de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa para análise do desgaste em materiais poliméricos produzidos por manufatura aditiva

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em 10 de Agosto de 2021

Membros da banca

DSc. Vinícius Carvalho Teles - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
DSc. Geraldo Lúcio de Faria - Universidade Federal de Ouro Preto
MSc - Túlio Miorini Vieira Alves Rodrigues

Vinícius Carvalho Teles, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 16/08/2021



Documento assinado eletronicamente por **Vinícius Carvalho Teles, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/08/2021, às 15:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0205488** e o código CRC **F9F6591F**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.008140/2021-56

SEI nº 0205488

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: (31)3559-1533 - www.ufop.br

Aos meus pais Valdeti e Edivane, aos meus irmãos Douglas e Diogo.

À Deus pela força e inspiração que me anima a cada dia.

AGRADECIMENTO

Agradeço aos meus pais, por serem meu amparo e motivação para seguir meus sonhos.

Aos meus irmãos pela inspiração, carinho e amizade.

Ao meu orientador Vinícius Carvalho Teles, pelo incentivo e orientação neste trabalho.

Aos Engenheiros Danilo Mota e Juliano Cunha pela colaboração e ensinamentos compartilhados.

Ao professor Geraldo Faria pela paciência e disponibilidade em meu primeiro projeto e por aceitar fazer parte da banca avaliadora deste trabalho.

Ao professor Túlio Miorini por aceitar o convite para participar da banca examinadora.

Aos professores da Engenharia Mecânica por contribuírem com a minha formação.

Aos colegas de graduação, em especial ao Christian Pires, por serem suporte nessa caminhada.

Aos meus amigos que Ouro Preto me presenteou, em especial a Karine Lemos Ribeiro, por tornar essa trajetória mais emocionante.

À cidade de Ouro Preto por todos os momentos inesquecíveis.

Por fim, a todos aqueles que de alguma forma contribuíram com a minha chegada até aqui

RESUMO

A manufatura aditiva é um processo de fabricação em expansão em engenharia pela possibilidade de fabricar peças com geometria complexa e/ou combinar diferentes materiais em um número reduzido de etapas quando comparado aos processos convencionais de fabricação. Entretanto, estudos sobre seus processos, aplicações e implicações são ainda incipientes. Com a finalidade de suprir essas lacunas, este trabalho tem o objetivo de projetar e construir uma máquina de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa para analisar o comportamento ao desgaste abrasivo de materiais poliméricos produzidos por manufatura aditiva para aplicação em uma indústria de bebidas. O projeto e desenvolvimento do equipamento foi baseado em um equipamento comercial. Os polímeros analisados foram de Nylon, Nylon + Fibra de Carbono, ABS, PETG e Iglidur, fabricados por manufatura aditiva conforme parâmetros recomendados pelos fabricantes. A dureza Vickers, com carga de 1 kg, foi medida e comparada com outras propriedades de catálogos. Foi empregado lama abrasiva com 10% de dióxido de silício (SiO_2) em água destilada, o tamanho médio de 80% das partículas está entre 1 a 5 μm . O contra corpo esférico fabricado em nylon possuía 25,4 mm de diâmetro. A carga normal utilizada foi de 0,5 N. Ao realizar os ensaios, os diâmetros das crateras foram medidos por microscopia óptica e, então, calculados os valores do coeficiente de desgaste (k) para cada amostra avaliada, neste momento também foi avaliado o mecanismo de desgaste predominante. O equipamento desenvolvido permitiu avaliar a resistência ao desgaste dos corpos de prova e classificá-los em função da taxa de desgaste. O Nylon apresentou menor valor de k e o ABS o maior valor de coeficiente de desgaste. Uma possível explicação pode ser em função da baixa dureza e alto alongamento na ruptura do Nylon, enquanto o ABS houve uma influência de sua alta dureza, entretanto não foi possível associar com o alongamento. O mecanismo de desgaste predominante em todas as amostras foi o microsulcamento/microcorte, este mecanismo era esperado devido às condições de teste. O Nylon com fibra de carbono apresentou a maior valor de dureza, aproximadamente 316 % maior comparado ao Nylon puro, porém, apresentou um coeficiente de desgaste 128 % maior. Este resultado mostra como o comportamento tribológico de polímeros é complexo e precisa ser bem avaliado antes de aplicado na indústria. O projeto e construção do equipamento de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa apresentou resultados satisfatórios e se comportou de maneira estável.

Palavras-chave: desgaste microabrasivo, manufatura aditiva, polímeros, Nylon, Nylon com fibra de carbono e ABS.

ABSTRACT

Additive manufacturing is an expanding manufacturing process in engineering due to the possibility of manufacturing parts with complex geometry and/or combining different materials in a reduced number of steps when compared to conventional manufacturing processes. However, studies on its processes, applications and implications are still incipient. In order to fill these gaps, this work aims to design and build a microabrasive wear testing machine by fixed rotating ball to analyze the abrasive wear behavior of polymeric materials produced by additive manufacturing for application in a drinks industry. The design and development of the equipment was based on commercial equipment. The analyzed samples were Nylon, Nylon + Carbon Fiber, ABS, PETG and Iglidur, all manufactured using parameters recommended by the manufacturers. The Vickers hardness, with a load of 1 kg, was measured and compared with other catalog properties. Abrasive slurry with 10% silicon dioxide (SiO₂) in distilled water was used, the average particle size of 80% is between 1 to 5 μm . The spherical counterbody made of nylon was 25.4 mm in diameter. The normal load used was 0.5 N. When performing the tests, the crater diameters were measured by optical microscopy and then the wear coefficient values (k) were calculated for each sample evaluated, at this time the predominant wear mechanism was also evaluated. The equipment developed made it possible to assess the wear resistance of the specimens and classify them as a function of their wear rate. Nylon had the lowest k value and ABS the highest wear coefficient value. A possible explanation may be due to the high ductility of Nylon compared to ABS. The predominant wear mechanism in all samples was micro-grooving/micro-cutting, this mechanism was expected due to the test conditions. Nylon with carbon fiber had the highest hardness value, approximately 316% higher compared to pure Nylon, however, it had a wear coefficient 128% higher. This result shows how the tribological behavior of polymers is complex and needs to be well evaluated before being applied in industry. The design and construction of the fixed rotating ball microabrasive wear tester showed satisfactory results and behaved in a stable way.

Key-words: microabrasive wear, additive manufacturing, polymers, Nylon, Nylon with carbon fiber and ABS.

LISTA DE SIMBOLOS

3DP – Impressão Tridimensional

ABS - Acrilonitrila Butadieno Estireno

AM – Manufatura Aditiva

CAD - *Computer Aided Design*

FDM - Modelagem de Deposição Fundida

FFF – Fabricação de Filamento Fundido

HDPE – Polietileno de Alta Densidade

HM – Dureza Martens

LMD – Deposição de Metal a Laser

LOM – Manufatura Objetiva Laminada

PC – Policarbonato

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

PETG - Polietileno Tereftalato de Etileno Glicol

PMMA - Polimetilmetacrilato

PP – Polipropileno

PS – Poliestireno

PVC – Policloreto de Vinila

SLA – Estereolitografia

SLS – Sinterização Seletiva a Laser

UV – Ultravioleta

2D – Duas dimensões

3D – Três dimensões

b – Diâmetro da Calota

F_N – Força Normal

F_T – Força Tangencial

h – Profundidade da Calota

k – Coeficiente de Desgaste

R – Raio da Esfera

R_a – Rugosidade Média

R_z – Rugosidade de Profundidade Média

S – Distância Deslizada

V – Volume Desgastado

ε – Deformação

σ – Tensão

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principais etapas do processo de manufatura aditiva ou impressão 3D.....	6
Figura 2: Esboço da tecnologia de MA por extrusão de material.	8
Figura 3: Representação esquemática do desgaste abrasivo (a) a dois corpos e (b) a três corpos.	10
Figura 4: Superfície de um corpo-de-prova de aço ferramenta que sofreu desgaste abrasivo por riscamento por uma esfera de aço para rolamento e partículas abrasivas de diamante.....	12
Figura 5: Superfície de um corpo-de-prova de aço ferramenta que sofreu desgaste abrasivo por rolamento por uma esfera de aço para rolamento e partículas abrasivas de SiC.....	12
Figura 6: Mecanismo de microsulcamento (a) quando uma única partícula atua e (b) quando várias partículas atuam.	13
Figura 7: Mecanismo de microcorte.....	13
Figura 8: Mecanismo de microtrincamento.....	14
Figura 9: Visão tridimensional de uma cratera de desgaste formada em um corpo de prova de ferro sinterizado oxidado a vapor, em um ensaio de desgaste por microabrasão por esfera rotativa.....	15
Figura 10: Funcionamento do equipamento de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera fixa.	16
Figura 11: Máquina de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa livre.....	17
Figura 12: a) Vista frontal de uma cratera de desgaste e seu diâmetro "b"; b) Profundidade de penetração "h" da esfera de ensaio.	17
Figura 13: Ranhuras em uma superfície de Poliamida ao percorrer 80 km de deslizamento com uma superfície de aço seco. As ranhuras são paralelas a direção de deslizamento.....	19
Figura 14: Perda de massa e coeficiente de atrito de um polímero termoplástico em função da rugosidade da superfície de um contracorpo de metal duro.	20
Figura 15: Taxa de desgaste em função da carga de alguns polímeros.....	21
Figura 16: (a) Micrografia da crista dentro da cicatriz de desgaste (direção de deslizamento de cima para baixo); (b) perfil através da cicatriz mostrando a geometria da crista.....	22

Figura 17: Volume de desgaste versus distância de deslizamento para duas cargas aplicadas ao PMMA.....	23
Figura 18: Morfologia detalhada das marcas de desgaste após microabrasão sob carga de 0,5 N e 100 revoluções da esferas: (a) HDPE; (b) PC; (c) PETG; (d) PMMA; (e) PP; (f) PS; (g) PVC. Direção de deslizamento de cima para baixo em todos os casos.....	24
Figura 19: Taxa de desgaste do polímero (sob uma carga de 0,5N) versus o inverso do produto da tensão de ruptura de tração e deformação de ruptura de tração (correlação de Ratner-Lancaster).	25
Figura 20: Taxa de desgaste dos polímeros (sob uma carga de 0,5N) versus dureza Martens.	26
Figura 21: Fluxograma do procedimento.	28
Figura 22: (a) Equipamento TE-66 Micro-Scale Abrasion Tester e (b) calota esférica.....	29
Figura 23: (a) e (b) Projeto da máquina de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa.	29
Figura 24: Equipamento de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa com todos os componentes necessários.	30
Figura 25: Equipamento de ensaio de desgaste abrasvio finalizado para realização de testes (a) vista frontal e (b) vista superior.	30
Figura 26: Vista esquemática do método de modelagem por deposição fundida.	32
Figura 27: Impressora 3D Ultimaker 5S.....	33
Figura 28: Amostras de cada material.	33
Figura 29: Equipamento para ensaio de desgaste microabrasivo do tipo esfera rotativa fixa. .	34
Figura 30: Ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa.	36
Figura 31: Vista superior do ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa.	36
Figura 32: (a) Impressão esquemática de desgaste e (b) Cratera de desgaste para a amostra de Nylon com fibra de carbono após 10 minutos de teste.....	37
Figura 33: Vista lateral do equipamento.	40
Figura 34: Vista superior do equipamento.	41
Figura 35: Vista frontal (frente) do equipamento.....	41

Figura 36: Vista frontal (trás) do equipamento.	42
Figura 37: (a) Cratera de desgaste para a amostra Iglidur e (b) área da circunferência formada pela cratera.....	43
Figura 38: (a) Cratera de desgaste para a amostra Nylon e (b) área da circunferência formada pela cratera.....	43
Figura 39: (a) Cratera de desgaste para a amostra Nylon+FC e (b) área da circunferência formada pela cratera.	44
Figura 40: (a) Cratera de desgaste para a amostra PETG e (b) área da circunferência formada pela cratera.....	44
Figura 41: (a) Cratera de desgaste para a amostra ABS e (b) área da circunferência formada pela cratera.....	45
Figura 42: Coeficiente de desgaste de cada amostra avaliada.	46
Figura 43: Resultado das propriedades mecânicas e de desgaste abrasivo DIN 53.316.	48
Figura 44: Relação dureza Vickers e coeficiente de desgaste.	49
Figura 45: Relação entre tensão de ruptura e coeficiente de desgaste.....	50
Figura 46: Relação entre alongamento máximo e coeficiente de desgaste.	50
Figura 47: (a) Cratera de desgaste obtida para a amostra de PETG e (b) ampliação do centro da calota.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades mecânicas dos materiais estudados.....	31
Tabela 2: Temperatura de fusão dos materiais.	31
Tabela 3: Características do abrasivo.	35
Tabela 4: Valores dos parâmetros estabelecidos para os ensaios.....	38
Tabela 5: Variáveis e Indicadores	39
Tabela 6: Dureza Vickers das amostras.....	45
Tabela 7: Cálculo do volume e da taxa de desgaste a partir do diâmetro das crateras.....	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	4
1.3	Objetivos.....	4
1.3.1	Geral	4
1.3.2	Específicos.....	5
1.4	Estrutura do Trabalho	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	Manufatura aditiva.....	6
2.2	Polímeros para filamentos	8
2.3	Desgaste abrasivo	10
2.3.1	Micromecanismos de desgaste abrasivo	13
2.4	Ensaio de desgaste microabrasivo	14
2.5	Desgaste abrasivo em polímeros	18
3	METODOLOGIA.....	27
3.1	Tipo de Pesquisa.....	27
3.2	Materiais e Métodos	28
3.2.1	Projeto e construção do microtribômetro	28
3.2.2	Fabricação dos corpos de prova	31
3.2.3	Ensaio de dureza Vickers	33
3.2.4	Ensaio de desgaste microabrasivo	34
3.2.5	Medição da calota esférica e cálculo do coeficiente de desgaste	37
3.3	Varáveis e Indicadores.....	38
3.4	Instrumentos de Coletas de Dados.....	39
3.5	Tabulação de Dados.....	39
3.6	Considerações Finais	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1	Equipamento e coeficiente de desgaste	40
4.2	Mecanismos de desgaste.....	51
5	CONCLUSÃO.....	53

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	54
ANEXO.....	1

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

A tribologia, de acordo com Jost (1966), é a ciência e a tecnologia de superfícies que interagem em movimento relativo e assuntos correlacionados. Jost foi o primeiro autor a estudar os impactos econômicos a partir dos conhecimentos de tribologia e, em sua pesquisa, demonstrou gastos de aproximadamente meio bilhão de libras anuais por desgaste, atrito e falhas associadas no Reino Unido.

O desgaste apresenta uma significativa parcela nos custos com manutenção nas indústrias (DAMIÃO, 2018). Adquirir conhecimentos apenas em materiais e processos mecânicos metalúrgicos de fabricação, já não são mais suficientes. Tão relevante quanto esses assuntos, é estudar e compreender os mecanismos de desgaste em condições específicas e os conceitos envolvidos.

Cerca de 50% das falhas nas indústrias são provocadas por desgaste abrasivo, seguido pelo desgaste adesivo (15%) e por erosão (8%) (EYRE, 1976). O desgaste abrasivo é definido pela perda de matéria devido ao deslizamento de partículas duras sobre uma superfície, que pode ocorrer sempre que uma superfície for carregada contra partículas com uma dureza maior ou igual a da superfície (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001). Para Gates (1998) o desgaste abrasivo ocorre quando asperidades duras na superfície de um corpo, movendo contra outro corpo, penetra e remove material do corpo com menor dureza, formando sulcos e/ou riscos. Essas asperidades podem ser pequenas partículas duras encrustadas na superfície.

Existem duas abordagens para se estudar o desgaste abrasivo: a abordagem global, que utiliza técnicas abrasométricas, e a abordagem local, que utiliza técnicas esclerométricas (DA SILVA, 2008; NOGUEIRA; DE MELLO, 1988). As técnicas abrasométricas utilizam equipamentos laboratoriais que reproduzem, em determinadas condições, o mecanismo de desgaste encontrado da análise de campo, nesses equipamentos ocorre a atuação, simultânea, de diversas partículas abrasivas. As técnicas esclerométricas utilizam um penetrador instrumentado de geometria definida, que interage com a superfície deformando-a. As forças geradas nessa interação são bem conhecidas e o mecanismo de remoção de matéria bem definido.

Peças sujeitas ao desgaste abrasivo podem falhar e causar grandes transtornos ao processo produtivo. Garantir a velocidade na produção de produtos em uma indústria é considerado um grande diferencial competitivo no mercado.

Por essas razões, é necessário aplicar alternativas favoráveis ao processo produtivo de uma companhia em situações de paradas por falhas em componentes mecânicos. Caso não haja a peça para reposição de um equipamento em falha no estoque, o tempo de parada pode se estender e causar perdas consideráveis à produção. Entretanto, para Hua *et al* (2007), gerenciar um estoque é dificultado pela grande quantidade de peças em uma indústria, em que alguns componentes são requeridos esporadicamente, com tempo de reposição elevado, principalmente em situações de urgência.

A manufatura aditiva (MA) comparada com as tecnologias tradicionais de fabricação, oferece muitas vantagens, como fabricação rápida, alta precisão e personalização do produto, capazes de agilizar o processo de aquisição de peças para reposição nas indústrias (YEH; CHEN, 2018).

Os processos de manufatura aditiva foram investigados e desenvolvidos desde o final dos anos 1980, são eles: Estereolitografia (SLA), Modelagem de Deposição Fundida (FDM), Sinterização Seletiva a Laser (SLS), Manufatura Objetiva Laminada (LOM), Impressão Tridimensional (3DP) e Deposição de Metal a Laser (LMD). Os materiais aplicados a esses processos incluem resina fotocurável, poliamida, cera, acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS), policarbonato, pó de metal / cerâmica / polímero, folhas revestidas com adesivo, etc (GUO; LEU, 2013).

De acordo com Kruth, Leu e Nakagawa (1998), há quatro categorias em que os materiais são usados pela manufatura aditiva: líquido, filamento/pasta, em pó e em folha sólida. Para cada um desses estados há diferentes formas de aplicação.

As peças tridimensionais confeccionadas por MA, são fabricadas diretamente a partir de modelos CAD e construída camada por camada. A tecnologia MA permite a fabricação de forma livre de peças geometricamente complexas, reduzem significativamente o tempo de espera, são econômicos para peças individuais e pequenos lotes e podem construir peças que não são possíveis com processos de manufatura convencionais (GUO; LEU, 2013).

Apesar de todas as vantagens oferecidas pela impressão 3D, ainda não tem sido amplamente utilizada nas organizações. Menos de 2% das indústrias fazem uso dessa tecnologia de

fabricação (YEH; CHEN, 2018). Entretanto, algumas companhias, como a indústria de bebidas em estudo neste trabalho, já fazem uso dessa inovação em seus processos produtivos.

A indústria de bebidas emprega peças produzidas por MA, a partir de filamentos poliméricos termoplásticos no processo de FDM por extrusão de material, em linhas que exigem um desempenho mecânico maior dos equipamentos em relação ao desgaste abrasivo e, conseqüentemente, uma troca mais recorrente de peças. Um exemplo, são as linhas de envaze, uma das etapas finais de fabricação de bebidas em que há elevada incidência de desgaste abrasivo nos componentes mecânicos dos equipamentos. Essa companhia também promove estudos para o desenvolvimento de melhorias e inovações em peças substituíveis e repostas dos equipamentos.

Devido à enorme variedade de filamentos, categoria estudada neste trabalho, disponíveis no mercado, deseja-se avaliar a resistência ao desgaste abrasivo de alguns desses filamentos aplicados à indústria de bebidas, para estabelecer qual seria o mais adequado às condições abrasivas.

A resistência ao desgaste abrasivo desses materiais pode ser avaliada através do ensaio de desgaste microabrasivo, pois, este ensaio permite avaliar pequenas variações tanto da microestrutura como de propriedades mecânicas. Dessa forma, foi projetado e construído um equipamento de microabrasão baseado no equipamento TE 66 micro-scale abrasion tester da empresa Phoenix Tribology, em virtude do elevado custo para adquirir um novo no mercado.

O ensaio microabrasivo forma calotas esféricas (crateras de desgaste) devido o contato entre uma esfera que gira em contato com o corpo de prova na presença de uma lama abrasiva. Conhecendo o diâmetro da esfera, partícula abrasiva e as dimensões da cratera formada, é possível estimar o comportamento do material em relação ao desgaste abrasivo em condições reais de trabalho (SILVA; BINDER; DE MELLO, 2004).

Portanto, a partir do projeto e construção da máquina de ensaio microabrasivo e da análise de corpos de prova produzidos por impressão 3D, pergunta-se:

Como construir um equipamento de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa para análise do desgaste em materiais poliméricos produzidos por manufatura aditiva?

1.2 Justificativa

A manufatura aditiva possibilita combinar em seu processo produtivo materiais e geometrias distintas em um mesmo objeto, em um número reduzido de etapas e com economia de material. Algo que não ocorre durante a produção de peças de geometria complexa por meios convencionais, por ser necessária a aplicação de diferentes máquinas, ferramental e processos de usinagem (RODRIGUES *et al.*, 2017).

Segundo Levy (2010), a manufatura aditiva é um processo de fabricação relativamente novo e com interesse crescente na área de engenharia. No entanto, estudos sobre seus processos, aplicações e implicações são ainda incipientes, de modo que existem diversas lacunas a serem supridas neste campo de pesquisa (GUO; LEU, 2013).

Uma forma de preencher lacunas e aumentar a aplicação de peças produzidas por MA, é através de ensaios que simulam as condições reais que o componente estará submetido, principalmente, pelo fato de existir uma variedade de filamentos no mercado. Entender o comportamento desses diferentes filamentos quanto ao desgaste abrasivo proporciona uma melhor seleção de materiais.

Por isso, o ensaio de desgaste microabrasivo possibilita reproduzir os diferentes micro-mecanismos de desgaste abrasivo em condições reais de trabalho e se mostra adequando para estudar diversas situações industriais. Os parâmetros de ensaio são de fácil compreensão, os testes são rápidos, as amostras são de simples confecção e é sensível suficiente para detectar pequenas variações nas propriedades mecânicas.

Então, projetar e construir um microtribômetro foi a alternativa mais viável em relação à aquisição de um equipamento novo no mercado. Dessa forma, é possível suprir algumas lacunas em relação ao comportamento de materiais produzidos por MA às condições abrasivas e, assim, melhorar a seleção de materiais e aumentar a assertividade na aplicação de peças pela indústria de bebidas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Projetar e construir um equipamento de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa para análise do desgaste em materiais poliméricos produzidos por manufatura aditiva.

1.3.2 Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica acerca dos temas: manufatura aditiva, polímeros para filamentos, desgaste abrasivo, ensaio de desgaste microabrasivo e desgaste abrasivo em polímeros;
- Desenvolver a metodologia para construção do equipamento;
- Avaliar a resistência em relação ao desgaste microabrasivo em peças poliméricas fabricadas por manufatura aditiva;

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho é dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta a formulação do problema, a justificativa, o objetivo geral e os objetivos específicos.

O segundo capítulo se refere a fundamentação teórica relacionada ao tema em estudo.

O capítulo três detalha a metodologia empregada para construção do equipamento e realização do ensaio de desgaste microabrasivo, além, também, de abordar os materiais envolvidos no estudo.

O quarto capítulo apresenta os resultados e discussão em relação aos diferentes coeficientes de desgaste encontrado nos ensaios para cada amostra avaliada.

Por último, o capítulo cinco trata das conclusões dos resultados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Manufatura aditiva

A manufatura aditiva pode ser definida, de acordo com Volpato *et al.* (2017), como um processo de fabricação através da adição sucessiva de material na forma de camadas, com informações advindas diretamente de uma representação computacional geométrica 3D do componente, como pode ser observado na Figura 1.



Figura 1: Principais etapas do processo de manufatura aditiva ou impressão 3D.
Fonte: Munhoz *et al.* (2017)

Geralmente, a representação da forma do modelo geométrico 3D é realizada em um sistema CAD (*computer-aided design*). A partir do modelo 3D da peça é possível obter as “curvas de nível” 2D que definirão, em camadas, onde haverá adição ou não de material. A peça física é, então, produzida por meio do empilhamento (e da adesão) sequencial das camadas, partindo de sua base até atingir seu topo. O processo de fabricação aditiva é totalmente automatizada e acontece de maneira relativamente rápida, se comparado aos meios tradicionais de produção (VOLPATO *et al.*, 2017).

A produção de apenas uma peça de geometria complexa em processos convencionais de fabricação, exige o emprego de diversas máquinas, ferramental específico e de alguns processos de usinagem e de acabamento até o produto final. Em contrapartida, a fabricação da mesma peça através de uma máquina de manufatura aditiva, pode ser realizada em apenas uma etapa ou em um número significativamente reduzido de etapas (RODRIGUES *et al.*, 2017).

A manufatura aditiva permite a produção de peças de alto valor, complexas e personalizadas individualmente. Os custos de fabricação e o tempo de colocação no mercado podem ser reduzidos comparado aos processos convencionais de fabricação. Por essas razões, a manufatura aditiva pode ser um diferencial competitivo às indústrias (BOURELL; LEU; ROSEN, 2009).

Na década de 1980 começou a surgir os primeiros equipamentos de manufatura aditiva, chamadas de máquinas de prototipagem rápida (*rapid prototyping*). Este termo advém da finalidade de se produzir protótipos tridimensionais de produtos de forma rápida e generalizada (CAMPBELL; BOURELL; GIBSON, 2012). Entretanto, atualmente não se limitam à produção de protótipos, estão presentes, também, na manufatura final de produtos com uma maior variedade de materiais aplicados ao processo de fabricação, como plásticos, cerâmicas e ligas metálicas (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2019).

A norma ASTM F2792-12a apud Wits, García e Becker (2016), em 2012, categorizou os processos de manufatura aditiva em sete áreas, dependendo do método de fusão ou solidificação do material, chamadas:

1. Fotopolimerização de cuba (*Vat photopolymerization*)
2. Jateamento de material (*Material jetting*)
3. Jateamento de aglutinante (*Binder jetting*)
4. Extrusão de material (*Material extrusion*)
5. Fusão de leito de pó (*Power Bed fusion*)
6. Adição de materiais em lâminas (*Sheet lamination*)
7. Deposição de energia direcionada (*Directed energy deposition*)

A extrusão de material, dentre os sete grupos categorizados, apresenta menor complexidade e custo de implantação. A partir de 2010, a popularidade das tecnologias que envolvem a extrusão de material se multiplicou com a prescrição da patente da tecnologia FDM, sob domínio da empresa Stratasys e que resultou em diferentes opções de soluções, principalmente envolvendo tecnologias abertas (*open source*) (JONES *et al.*, 2011; TURNER; STRONG; GOLD, 2014).

A impressão 3D por extrusão de material, é uma técnica de fabricação aditiva, também conhecida como Fabricação de Filamento Fundido (FFF) ou Modelagem de Deposição Fundida

(FDM), em que uma matéria prima de filamento termoplástico é aquecida e, em seguida, extrudada através de um bico de impressão. (OLANYK, 2018; ROWAT; LEGGE; MORESOLI, 2021). A Figura 2 mostra um esboço do princípio de manufatura aditiva por extrusão de material, composto por um bico extrusor e por uma plataforma de construção. Tanto a plataforma quanto o bico, podem realizar deslocamento vertical (eixo z), porém, os deslocamentos no plano x-y, geralmente são realizados pelo bico extrusor.

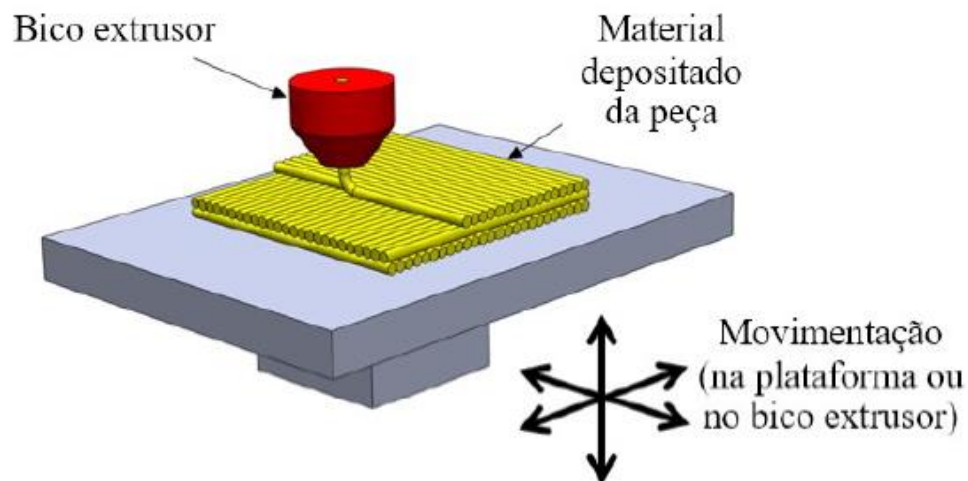


Figura 2: Esboço da tecnologia de MA por extrusão de material.
Fonte: Volpato *et al.* (2017)

No processo de extrusão, qualquer material suscetível a extrusão possui potencial de aplicação como matéria-prima nessa tecnologia, entretanto é bastante comum a utilização de polímeros termoplásticos previamente moldados na forma de um filamento contínuo (OLANYK, 2018).

2.2 Polímeros para filamentos

A palavra polímero vem do grego “poli” (muitos) e “mero” (unidade de repetição). Um polímero, conceitualmente, é a denominação para uma macromolécula composta por milhares de unidades de repetição, os meros. A estrutura de uma cadeia polimérica é formada por muitas ligações covalentes entre átomos de carbono. Grande parte das propriedades físicas de um polímero estão ligadas ao tamanho da macromolécula, bem como, sua massa molar, temperatura de fusão ou amolecimento e ligações cruzadas (CANEVAROLO Jr., 2006).

A formação da massa sólida através das cadeias moleculares dos polímeros, pode ser classificada como, desordenada (fase amorfa) ou ordenada, regular e repetitiva (fase cristalina). A maioria dos polímeros possuem regiões amorfas e cristalinas, e proporcionam, simultaneamente, flexibilidade e resistência (CANEVAROLO, 2006; SEYMOUR; CARRAHER, 2003).

Os polímeros podem também ser classificados em relação a sua fusibilidade e/ou solubilidade também chamados de termoplásticos e termorrígidos. Os polímeros termoplásticos fundem por aquecimento e solidificam por resfriamento. Os termorrígidos, possuem fortes ligações covalentes entre cadeias poliméricas chamadas ligações cruzadas, o que os impedem de fundirem durante o aquecimento (CANEVAROLO, 2006).

São inúmeras as possibilidades de materiais termoplásticos aplicados ao FDM. Um deles é o ABS (acrilonitrila butadieno estireno). O ABS é um dos materiais mais empregados na impressão FDM e apresenta resistência ao calor. Entretanto possui baixa adesão entre as camadas, sensibilidade à radiação UV e emissão de gases durante a impressão (BATES-GREEN; HOWIE, 2017).

As poliamidas, também conhecidas como Nylon, possuem boa resistência ao impacto para um filamento não flexível, boa resistência à fadiga, ao calor, ao desgaste e forte adesão entre camadas. Entretanto, durante a impressão, a poliamida pode se deformar devido ao seu elevado coeficiente de expansão térmica e costuma ser mais cara que outros materiais de impressão por FDM (BATES-GREEN; HOWIE, 2017).

O Iglidur é um material polimérico sintético, desenvolvido pela empresa “Igus Qualitäts Management”, que apresenta alta resistência à abrasão em baixas velocidades superficiais, não necessita de lubrificação, possui longa vida útil e apresenta facilidade no processo de fabricação (IGUS, 2020).

Outro material aplicado ao FDM é o PETG (Polietileno Tereftalato de Etileno Glicol). É um material termoplástico com alta resistência mecânica, elevada tenacidade (capaz de absorver cargas antes do rompimento) e com boas propriedades à adesão em camadas (DURGASHYAM *et al.*, 2019).

Pesquisadores e desenvolvedores de materiais têm sido atraídos pelas possibilidades de fabricação de compósitos através da MA. Esse interesse é devido a ampla possibilidade de combinar uma gama de materiais compósitos em um processo produtivo que permite grande liberdade de projeto e customização dos componentes ((PIZZORNI; PARMIGGIANI; PRATO, 2021).

Por meio da MA, com a tecnologia FFF ou FDM, é possível desenvolver combinações de filamentos termoplásticos com fibras curtas, como: fibras de carbono, fibras de vidro, nanotubos de carbonos. Essas possíveis combinações conferem ao compósito melhores propriedades mecânicas, como maior resistência mecânica e rigidez (PIZZORNI; PARMIGGIANI; PRATO, 2021).

Um exemplo é o Nylon com Fibra de Carbono. Este material apresenta maior resistência mecânica, alta resistência a temperatura, apresenta estabilidade dimensional, fácil utilização, baixa absorção de umidade e rigidez (PEI *et al.*, 2021).

2.3 Desgaste abrasivo

Para Zum Gahr (1987) o desgaste abrasivo é provocado pelo deslocamento de material causado pela presença de partículas duras entre duas superfícies em movimento. Pode ocorrer, também, com a presença de protuberâncias duras em uma, ou nas duas superfícies móveis.

O desgaste abrasivo pode ser classificado como: desgaste abrasivo a dois corpos e desgaste abrasivo a três corpos. O primeiro ocorre quando uma das superfícies em contato apresenta protuberâncias ou partículas duras incrustadas e, ao deslizar, provoca cortes ou sulcos na outra superfície. A segunda situação se caracteriza por apresentar um terceiro corpo, geralmente uma pequena partícula abrasiva, presa entre as duas superfícies em contato e dura o suficiente para causar desgaste em uma ou nas duas superfícies, como mostrado na Figura 3 (BURWELL JR, 1957).

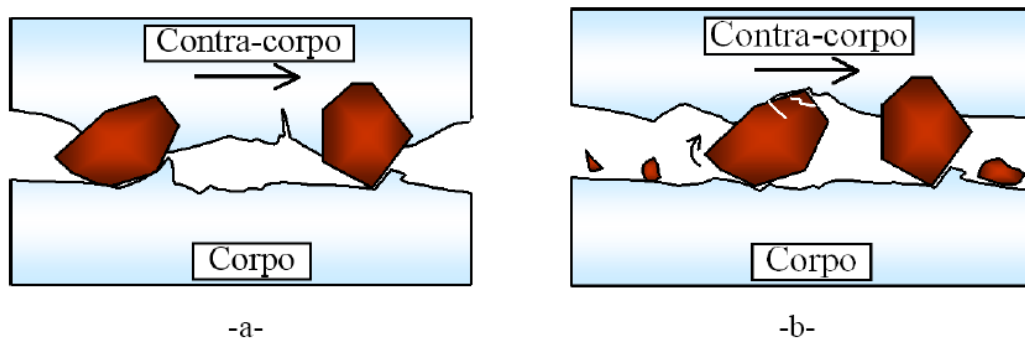


Figura 3: Representação esquemática do desgaste abrasivo (a) a dois corpos e (b) a três corpos. Fonte: Bozzi e De Mello (1999)

A Figura 3 (a) mostra as partículas incrustadas na superfície superior, responsável por causar riscos e sulcos na superfície inferior. Já a Figura 3 (b) apresenta a presença da partícula abrasiva livre entre as duas partículas. Esta partícula possui liberdade para rolar ou deslizar entre as duas superfícies, a dinâmica das partículas irá depender de diversos fatores como: dureza das superfícies, tamanho e forma da partícula abrasiva e carregamento por partícula (TERZANO; ALLSOPP; HUTCHINGS, 1999; WILLIAMS; HYNICICA, 1992)

Gates (1998) também classifica a abrasão em abrasão de alta tensão (*high-stress abrasion*) e abrasão de baixa tensão (*low-stress abrasion*). Durante o processo de abrasão de alta tensão as partículas abrasivas estão sujeitas a cargas altas o suficiente para se fraturar durante o processo abrasivo e no de baixa tensão as partículas permanecem intactas. Em casos de desgaste excessivo com partículas grosseiras, o processo abrasivo pode se classificar como *gouging abrasion*.

Trezona, Allsopp e Hutchings (1999) propuseram uma classificação baseada na dinâmica das partículas abrasivas observadas nas marcas de desgaste provocadas por essas partículas. Assim, o desgaste abrasivo também pode ser classificado como *grooving abrasion* e *rolling abrasion* correspondendo, respectivamente, a desgaste abrasivo por deslizamento de partículas abrasivas e desgaste abrasivo por rolamento de partículas abrasivas, como pode ser observado na Figura 4 e Figura 5 (TREZONA; ALLSOPP; HUTCHINGS, 1999).

O desgaste abrasivo por deslizamento de partículas abrasivas é causado por partículas abrasivas que se aderem ao contracorpo ou, no caso de partículas livres, quando a resultante de forças que agem sobre ela é nula o que as fazem deslizar entre as superfícies em contato provocando sulcos e riscos, como é demonstrado pela Figura 4 (TREZONA; ALLSOPP; HUTCHINGS, 1999).

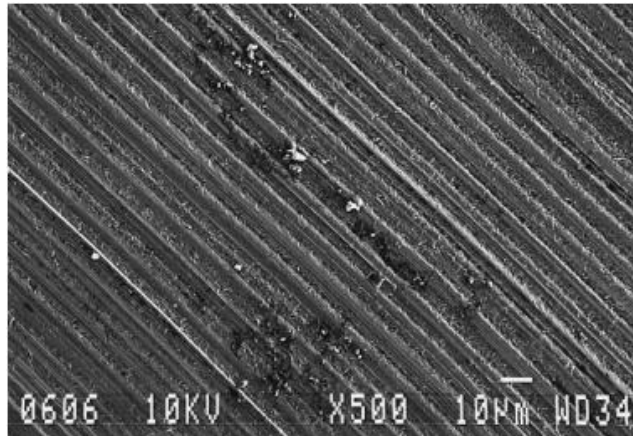


Figura 4: Superfície de um corpo-de-prova de aço ferramenta que sofreu desgaste abrasivo por riscamento por uma esfera de aço para rolamento e partículas abrasivas de diamante.

Fonte: Trezona, Allsopp e Hutchings (1999)

O desgaste abrasivo por rolamento de partículas abrasivas é provocado pelo rolamento das partículas abrasivas entre o corpo e o contracorpo, levando a uma série de microindentações na superfície de ambos os corpos, como mostra a Figura 5 (TREZONA; ALLSOPP; HUTCHINGS, 1999). Essas microindentações são semelhantes a impressões de dureza.

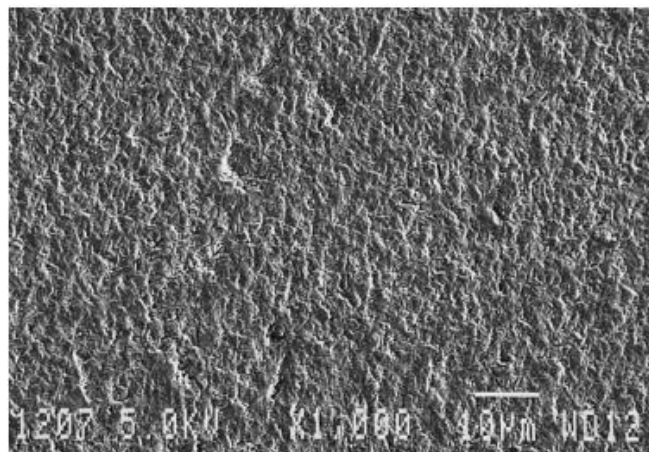


Figura 5: Superfície de um corpo-de-prova de aço ferramenta que sofreu desgaste abrasivo por rolamento por uma esfera de aço para rolamento e partículas abrasivas de SiC.

Fonte: Trezona; Allsopp; Hutchings (1999)

2.3.1 Micromecanismos de desgaste abrasivo

Os micromecanismos de desgaste ou simplesmente mecanismos de desgaste definem os processos de interação entre o abrasivo ou asperidade dura e a superfície desgastada (ZUM GAHR, 1987).

A Figura 6 mostra o mecanismo de microsulcamento.

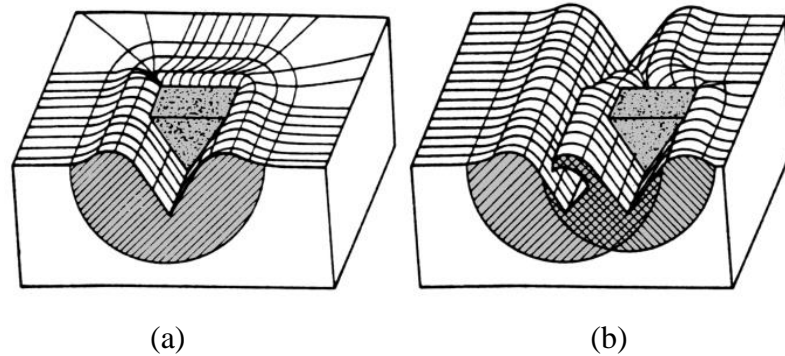


Figura 6: Mecanismo de microsulcamento (a) quando uma única partícula atua e (b) quando várias partículas atuam.
Fonte: Zum Gahr (1988)

No microsulcamento, como observado na Figura 6, todo o volume de material deformado pela partícula é descolado para as laterais do sulco ou frente formando saliências. No microsulcamento puro não há perda de material. Entretanto, durante a abrasão as partículas podem interagir simultaneamente ou sucessivamente e provocar vários microsulcamentos repetidamente, o que causa o esgotamento plástico da superfície e acarreta na perda de material (ZUM GAHR, 1987).

A Figura 7 ilustra o mecanismo de microcorte.

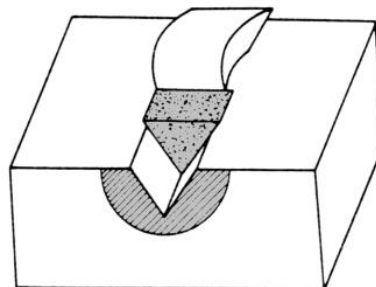


Figura 7: Mecanismo de microcorte.
Fonte: Zum Gahr (1987)

No microcorte, Figura 7, a perda de massa ocorre devido à formação de microcavacos pelo abrasivo. Se as condições favorecem o microcorte puro, o volume de material retirado da amostra é igual ao volume do risco produzido pela partícula abrasiva (ZUM GAHR, 1987).

A Figura 8 mostra o mecanismo de microtrincamento.

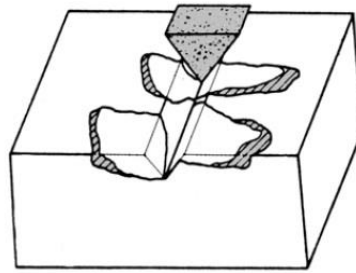


Figura 8: Mecanismo de microtrincamento.
Fonte: Zum Gahr (1987)

No micromecanismos denominado microtrincamento a interação entre a partícula e o material leva ao arrancamento de grandes fragmentos. Esses fragmentos surgem devido a nucleação e a propagação de trincas causadas pelas tensões produzidas pelas partículas abrasivas que ultrapassam o limite crítico de ruptura do material. Este mecanismo se restringe aos materiais com características frágeis.

2.4 Ensaio de desgaste microabrasivo

O desgaste abrasivo tem sido estudado através de uma configuração de equipamento, denominada máquina de desgaste microabrasiva por esfera rotativa. O teste consiste de uma esfera de raio conhecido que gira em torno de seu eixo em contato com o corpo de prova na presença de uma lama abrasiva. Forma-se, assim, calotas esféricas (crateras de desgaste) como mostra a Figura 9. Ao analisar essas crateras, é possível estimar o comportamento do material em relação ao desgaste abrasivo em condições reais de trabalho (SILVA; BINDER; DE MELLO, 2004).

Neste ensaio é possível controlar os seguintes parâmetros: a rotação da esfera de ensaio (n), a distância deslizada entre a esfera e o corpo de prova (S), a força normal e a concentração de abrasivos na lama abrasivo (c) (COZZA, 2006).

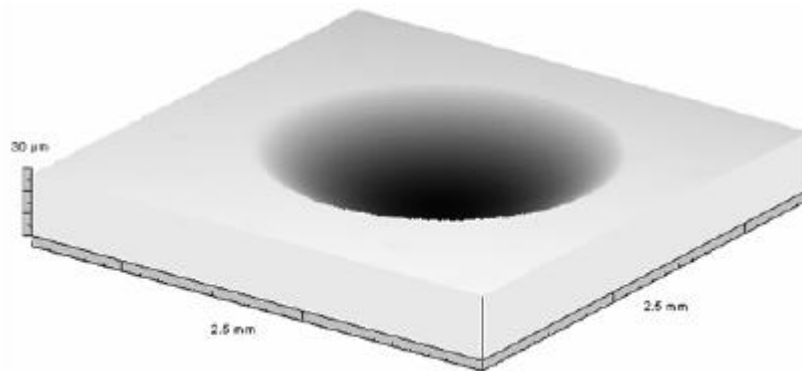


Figura 9: Visão tridimensional de uma cratera de desgaste formada em um corpo de prova de ferro sinterizado oxidado a vapor, em um ensaio de desgaste por microabrasão por esfera rotativa.
Fonte: Silva *et al.* (2004).

Há dois tipos de configurações do equipamento para o ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa: i) esfera rotativa fixa e ii) esfera rotativa livre (COZZA, 2006; TREZONA; ALLSOPP; HUTCHINGS, 1999)

Na máquina de ensaio microabrasivo por esfera rotativa fixa, como ilustrada na Figura 10, é aplicada sobre a esfera de ensaio, uma força normal (F_N) definida pelo usuário. O contato e o movimento relativo entre esses dois objetos, produz uma força tangencial de atrito (F_T) (COZZA, 2006).

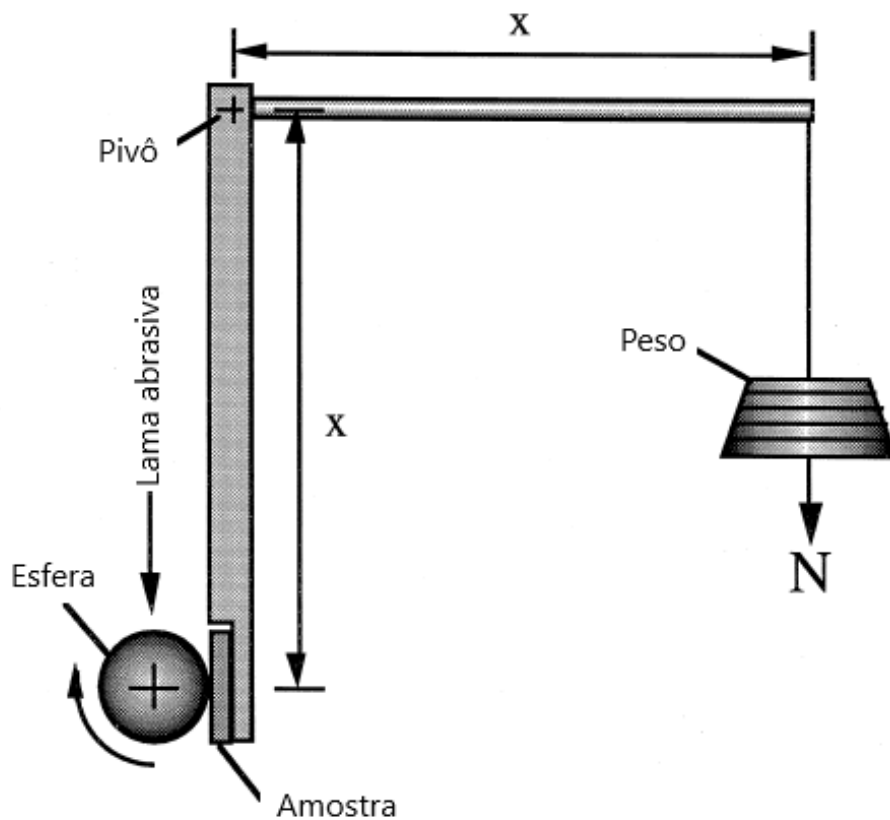


Figura 10: Funcionamento do equipamento de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera fixa.
Fonte: Trezona, Allsopp e Hutchings (1999)

Na máquina de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa livre, Figura 11, a combinação do próprio peso da esfera, inclinação do corpo de prova, posicionamento em relação ao eixo do motor e o coeficiente de atrito define a força normal aplicada (SILVA, 2003).

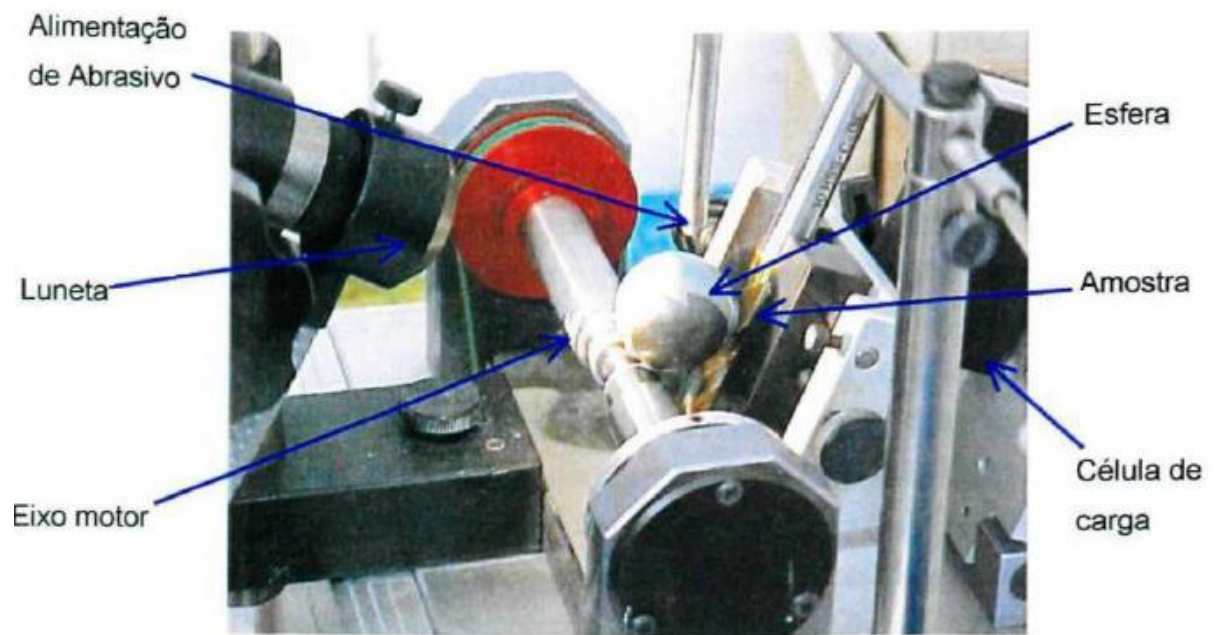


Figura 11: Máquina de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa livre.
 Fonte: Silva (2003)

A Figura 12 mostra uma cratera de desgaste gerada após um ensaio de microabrasão.

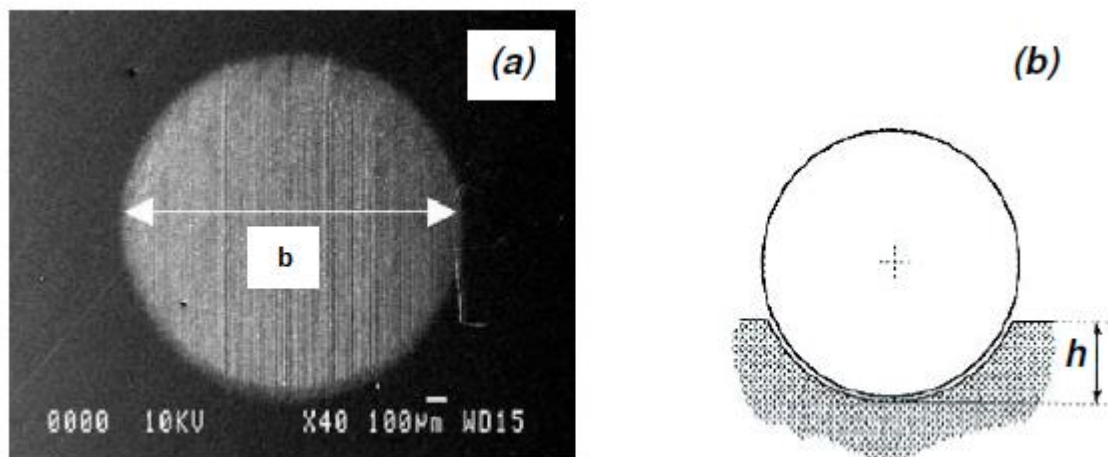


Figura 12: a) Vista frontal de uma cratera de desgaste e seu diâmetro "b"; b) Profundidade de penetração "h" da esfera de ensaio.
 Fonte: Kelly e Hutchings (2001)

Para materiais homogêneos, pode ser demonstrado um modelo de desgaste abrasivo equivalente à equação Archard para desgaste por deslizamento, Eq. 1 (TREZONA; ALLSOPP; HUTCHINGS, 1999).

$$V = k.S.F_N \quad (1)$$

Onde V é o volume desgastado, k é o coeficiente de desgaste, S é a distância deslizada e F_N é a força normal aplicada.

O volume desgastado é calculado em função da geometria da esfera e da cratera formada na amostra, Eq. 2 ou Eq. 3 (TREZONA; ALLSOPP; HUTCHINGS, 1999).

$$V \approx \frac{4.b^4}{64.R}, \text{ para } R \gg b \quad (2)$$

Onde b é o diâmetro externo da calota produzida na amostra e R é o raio da esfera.

$$V \approx \pi.h^2.R, \text{ para } h \ll R \quad (3)$$

Sendo h a profundidade da calota produzida na superfície da amostra, Eq 4 (COZZA, 2006).

$$h = 12,7 - \sqrt{161,29 - 0,25d^2} \quad (4)$$

2.5 Desgaste abrasivo em polímeros

O uso de polímeros em aplicações que envolvem os fenômenos tribológicos como: rolamentos, engrenagens, biomateriais, etc., tem aumentado. Estudar o desgaste de polímeros é, portanto, importante para o desenvolvimento científico e tecnológico (ABDELBARY, 2014).

O polímero e o contracorpo, em um tribosistema, interagem em um ambiente operacional submetidos a condições determinadas pela carga aplicada, velocidade, temperatura, etc., em que resulta num processo de desgaste do polímero (ABDELBARY, 2014).

Biscoe apud Zum Gahr (1987) classifica o desgaste em polímeros de duas formas: o desgaste coesivo e o desgaste interfacial. O coesivo inclui abrasão e fadiga superficial, influenciados pela tenacidade ou força coesiva dos polímeros. O interfacial abrange adesão (desgaste de transferência) e reação triboquímica (desgaste químico ou corrosivo), que são restritos a superfícies finas adjacentes à interface.

Para Bartenev e Lavrenter (1981) o desgaste abrasivo em polímeros, consiste em riscar a superfícies através de ranhuras provocadas por protuberâncias pontiagudas. Ou seja, é a remoção de material por asperezas duras presentes no contracorpo, que penetram na superfície do polímero e removem material semelhante a uma microusinagem, ranhuras de desgaste, arranhão, arranhões e rachaduras na superfície, como pode ser observado na Figura 13 (ABDELBARY, 2014).

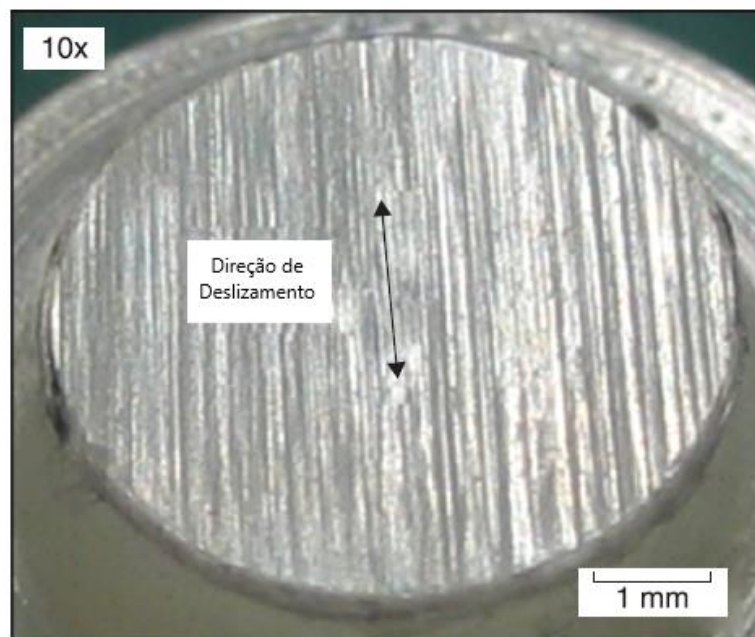


Figura 13: Ranhuras em uma superfície de Poliamida ao percorrer 80 km de deslizamento com uma superfície de aço seco. As ranhuras são paralelas a direção de deslizamento.

Fonte: Abdelbary (2014)

A morfologia dos polímeros apresenta variados formatos devido aos diferentes arranjos de macromoléculas. Alguns efeitos morfológicos, afetam o comportamento do polímero sob

desgaste abrasivo, como: o grau de cristalinidade, tamanho das esferulitas e anisotropias devido a fenômenos de orientação causados pelo contato abrasivo deslizante (ZUM GAHR, 1987).

Geralmente, o ensaio de desgaste em polímeros é realizado por deslizamento entre uma amostra de polímero e um aço com a superfície áspera. A Figura 14 mostra, de forma geral, em um contato por deslizamento sem lubrificação, o comportamento da perda de massa e do coeficiente de atrito em função da rugosidade do contra corpo (ZUM GAHR, 1987).

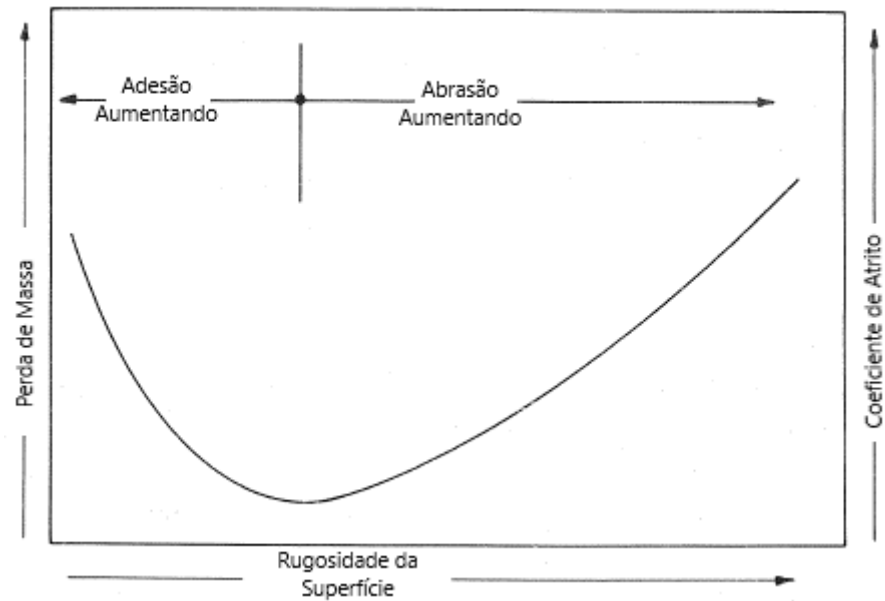


Figura 14: Perda de massa e coeficiente de atrito de um polímero termoplástico em função da rugosidade da superfície de um contracorpo de metal duro.
Fonte: Adaptado de Zum Gahr (1987)

Pode ser visto na Figura 14 que, a princípio, tanto o volume desgaste como o coeficiente de desgaste diminuem com o aumento da rugosidade superficial do contracorpo. Porém, ao ultrapassar um valor limite ambos, volume desgastado e coeficiente de desgaste, aumentam. Por exemplo, para um polietileno de alta densidade (PEAD) o valor de Ra (rugosidade média) ótimo da superfície do aço inoxidável foi de $0,03 \mu\text{m}$ e para a poliamida $6 \mu\text{m}$ e $66 \mu\text{m}$ contra o aço AISI 52100 o valor ótimo de Rz (rugosidade de profundidade média) foi de $0,15 \mu\text{m}$ (CZICHOS, 1983). Então, o valor da rugosidade da superfície que resulta em um mínimo de atrito e perda de massa, depende do polímero e das condições de ensaio utilizadas (ZUM GAHR, 1987).

No início de um ensaio entre polímero e alguma superfície, há uma momentânea união formada a partir de forças de van der Waals, ou pelo amolecimento térmico ou fusão superficial

do polímero. Com o tempo, essa interação pode vencer o limite elástico do material polimérico e, dessa forma, causar corte, sulcagem ou rasgamento do polímero se houver a presença de asperezas mais duras na contraface. Portanto, há essa transição entre desgaste adesivo para abrasivo como visto pela Figura 14, a depender das condições de ensaio realizada (KAWAKAME; BRESSAN, 2000).

Para Hutchings e Shipway (2017), se o contracorpo é “liso” o desgaste resulta da adesão entre as superfícies e envolve deformação apenas na superfície do polímero. Por outro lado, se o contracorpo é rugoso, as asperezas causarão deformação plástica no polímero por abrasão devido ao aparecimento de trincas por fadiga na região de deformação.

Shipway e Ngao (2003) avaliou o comportamento de alguns polímeros por ensaio de desgaste microabrasivo. Através dos resultados alcançados, Figura 15, separou os polímeros em dois grupos com base nos resultados: HDPE, PP e PVC mostraram um aumento da taxa de desgaste com o aumento da carga, os outros polímeros, aumentaram a taxa de desgaste até um momento em que tiveram uma queda acentuada de desgaste.

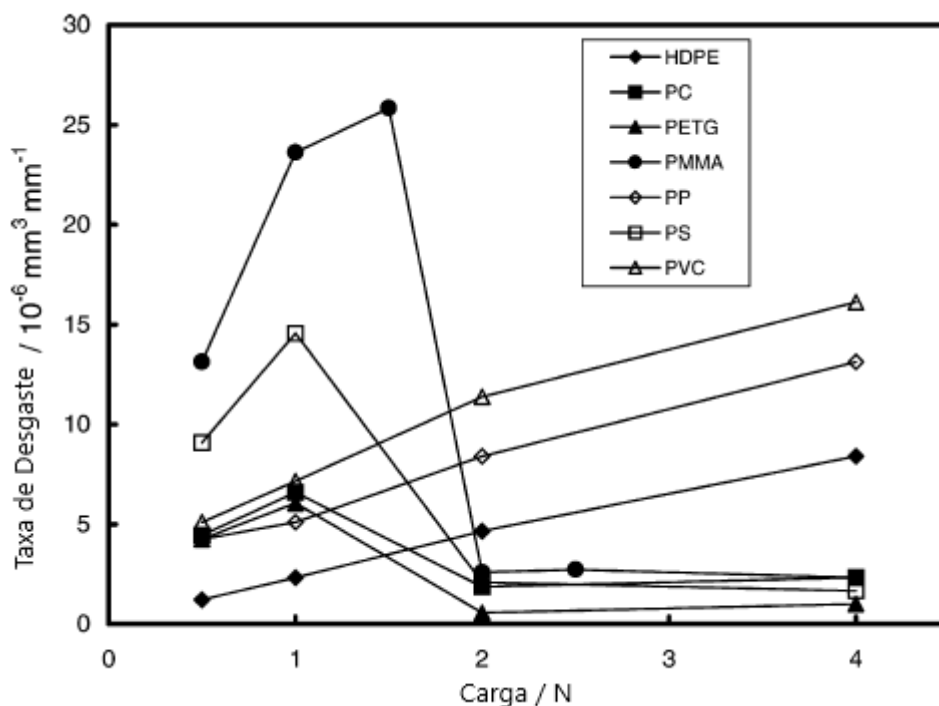
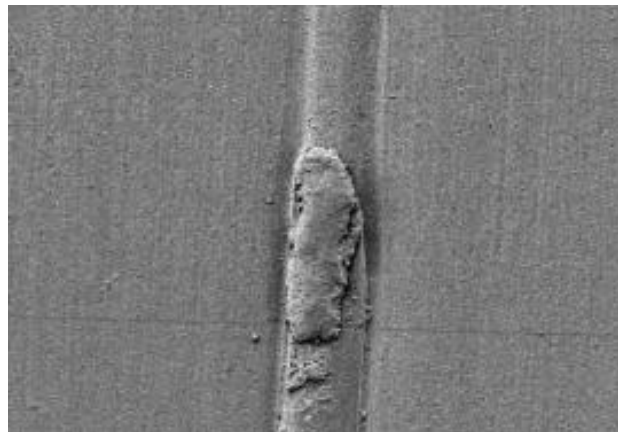
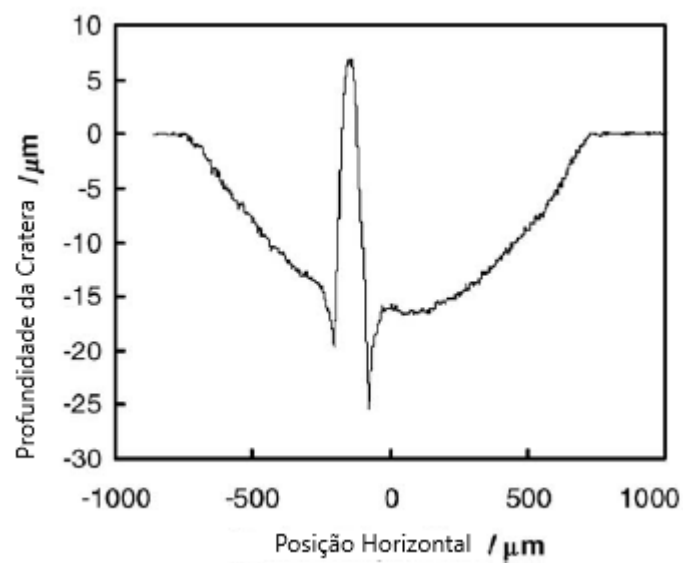


Figura 15: Taxa de desgaste em função da carga de alguns polímeros.
Fonte: Adaptado de Shipway e Ngao (2003)

Essa queda está associada à formação de sulcos dentro da marca de desgaste. Isso resultou na deposição de abrasivo, SiC (carbeto de silício), nos sulcos que levou a formação de uma crista mais elevada que a altura original do polímero, como pode ser observado pela Figura 16. Com isso, houve apenas desgaste mínimo sem apresentar ranhuras (SHIPWAY; NGAO, 2003).



(a)



(b)

Figura 16: (a) Micrografia da crista dentro da cicatriz de desgaste (direção de deslizamento de cima para baixo); (b) perfil através da cicatriz mostrando a geometria da crista.

Fonte: Adaptado de Shipway e Ngao (2003)

Shipway e Ngao (2003) realizou uma série de testes para examinar o desenvolvimento do volume de desgaste com a distância de deslizamento. Verificou-se um aumento linear no volume de desgaste com o aumento da distância de deslizamento para o PMMA, Figura 17.

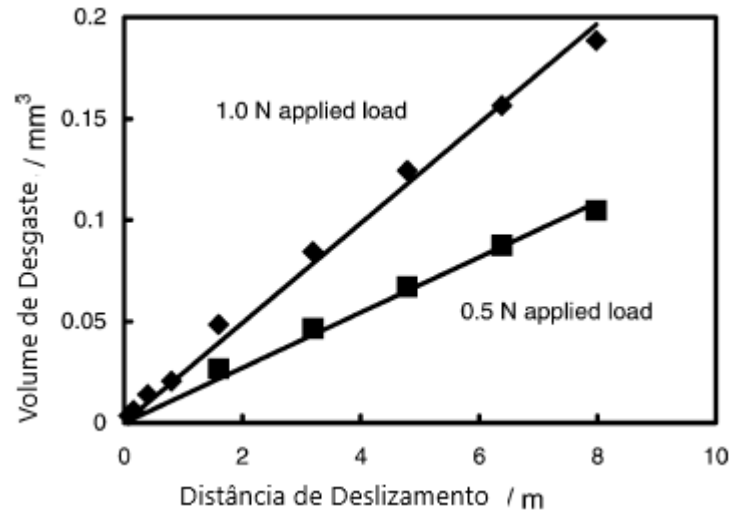


Figura 17: Volume de desgaste versus distância de deslizamento para duas cargas aplicadas ao PMMA.

Fonte: Adaptado de Shipway e Ngao (2003)

Devido a formação de cristas de abrasivo nos sulcos formados pelos materiais durante o ensaio microabrasivo, os autores Shipway e Ngao fizeram a comparação do comportamento ao desgaste entre os tipos de polímeros analisados sob uma carga de 0,5N em que não houve formação de cristas em nenhuma das amostras, Figura 18 (SHIPWAY; NGAO, 2003).

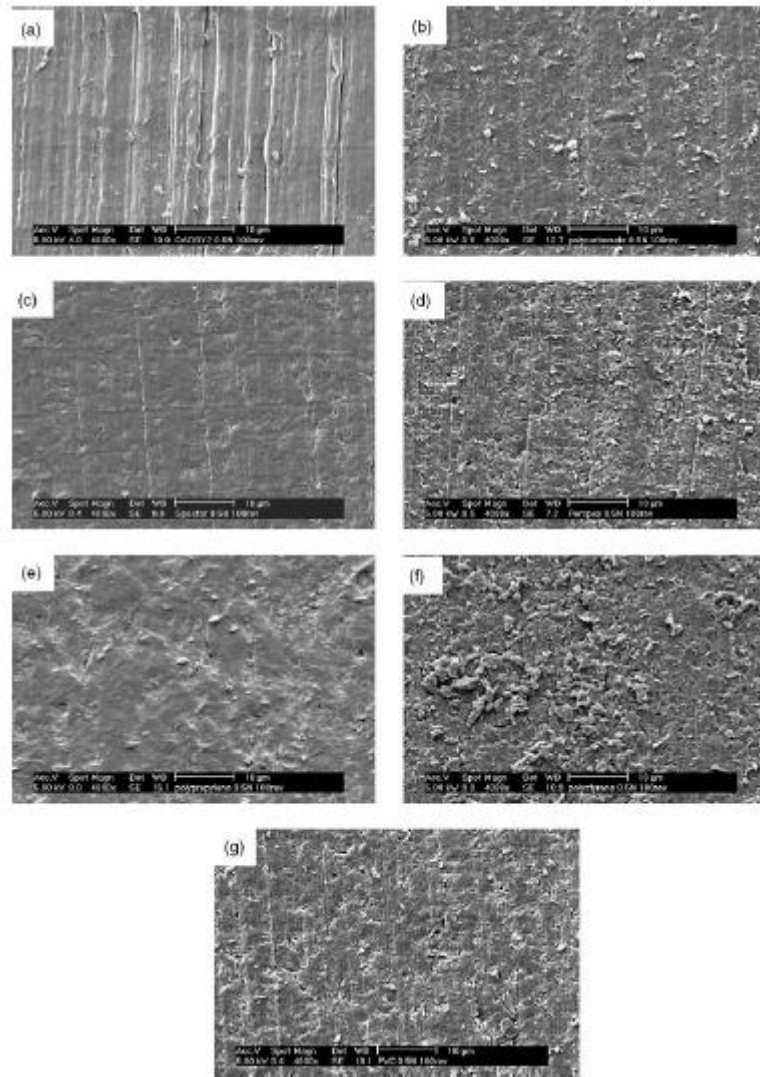


Figura 18: Morfologia detalhada das marcas de desgaste após microabrasão sob carga de 0,5 N e 100 revoluções da esferas: (a) HDPE; (b) PC; (c) PETG; (d) PMMA; (e) PP; (f) PS; (g) PVC. Direção de deslizamento de cima para baixo em todos os casos.
 Fonte: Shipway e Ngao (2003)

As marcas de desgaste no HDPE, Figura 18 (a), é distinta de todas as outras marcas. Não há nenhuma evidência de rolamento, mas apresenta sulcos paralelos profundos e longos na direção do deslizamento. As marcas em PP, Figura 18 (e), também são diferentes das demais. Há pouca evidência de indentação de partícula e não apresenta uma direção de deslizamento tão evidente quanto as outras (SHIPWAY; NGAO, 2003).

As outras amostras exibem morfologias semelhantes com uma combinação de ranhura, paralela à direção de deslizamento (desgaste abrasivo a dois corpos) e também corrosão devido à indentação de partículas em rolamento (desgaste abrasivo a três corpos). O grau de dano difere em todas as amostras (SHIPWAY; NGAO, 2003).

As Figuras 19 e 20 mostram as taxas de desgaste dos vários polímeros (0,5 N, 100 revoluções da esfera) pela correlação de Ratner-Lancaster $1/\sigma_b \epsilon_b$ e contra HM (dureza martens), respectivamente. Em ambos os casos, existe uma correlação razoável. Pode ser observado que os polímeros que exibiram as maiores taxas de desgaste também exibiram os menores valores de $(\sigma_b \epsilon_b)$ e as maiores durezas. Por outro lado, aqueles com as menores taxas de desgaste apresentaram altos valores de $(\sigma_b \epsilon_b)$ e baixa dureza (SHIPWAY; NGAO, 2003).

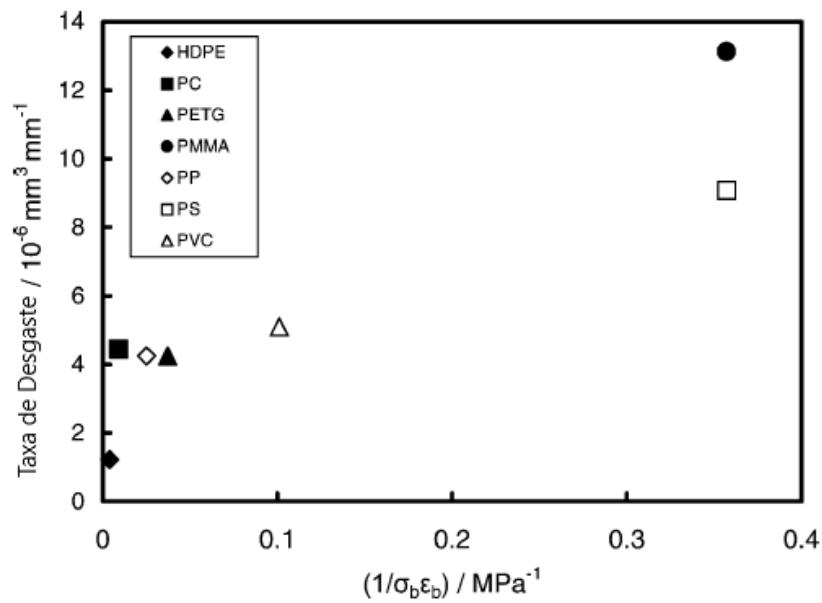


Figura 19: Taxa de desgaste do polímero (sob uma carga de 0,5N) versus o inverso do produto da tensão de ruptura de tração e deformação de ruptura de tração (correlação de Ratner-Lancaster).

Fonte: Adaptado de Shipway e Ngao (2003)

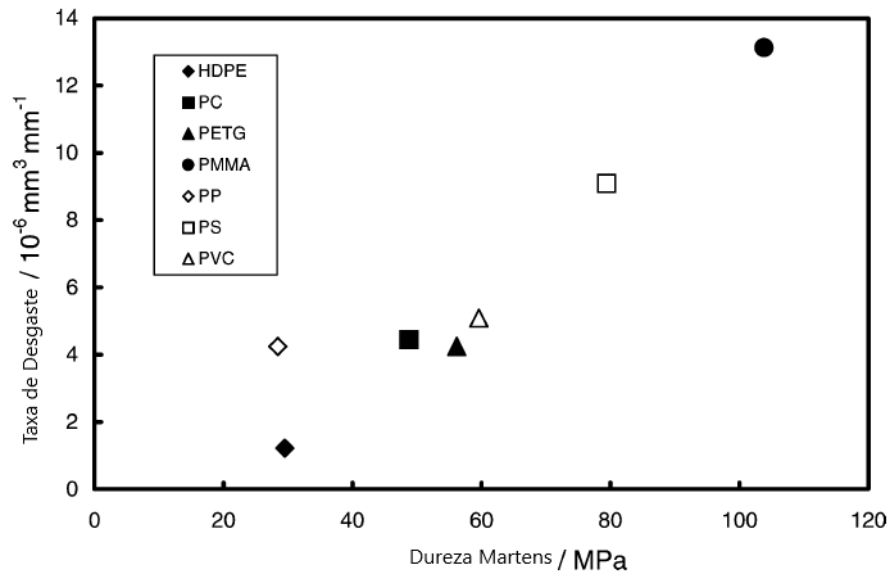


Figura 20: Taxa de desgaste dos polímeros (sob uma carga de 0,5N) versus dureza Martens.
Fonte: Adaptado de Shipway e Ngao (2003)

Neste capítulo foram abordados os conceitos fundamentais para o desenvolvimento e entendimento do trabalho proposto.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para o desenvolvimento e realização deste trabalho. São abordados o tipo de pesquisa, os materiais e métodos, variáveis e indicadores, instrumentos de coleta de dados, tabulação dos dados e as considerações finais.

3.1 Tipo de Pesquisa

Segundo Creswell (2007) a pesquisa qualitativa aborda um aprofundamento da compreensão e do porquê das informações, a partir de diferentes alegações de conhecimento, estratégias de investigação e métodos de coleta e análise de dados. Sua finalidade é desenvolver novas informações ilustrativas e aprofundadas através de significados, motivos e aspirações dos fenômenos que não são representados numericamente.

Ao contrário da pesquisa qualitativa, a pesquisa quantitativa apresenta resultados quantificados através da análise de dados baseados na linguagem matemática para descrever as causas de um fenômeno. São utilizadas as regras de lógica, de estatísticas e outros atributos que tornem possível a quantificação numérica de um problema de pesquisa (FONSECA, 2002).

Dessa forma, o presente trabalho se enquadra como uma pesquisa qualitativa e quantitativa, pois foi desenvolvido um equipamento para avaliar o coeficiente de desgaste das amostras, ou seja, análise quantitativa e o mecanismo de desgaste que é uma análise qualitativa. A utilização conjunta dessas duas formas de abordagem de pesquisa permite recolher mais informações do que realizada com as abordagens isoladas.

De acordo com Gil (2002) as pesquisas podem ser classificadas segundo seus objetivos gerais que se dividem em três grandes grupos: exploratórias, descritivas e explicativas. A pesquisa exploratória objetiva proporcionar maior familiaridade com o problema estudado, a partir do aprimoramento de ideias ou descobertas de intuições que visam torná-la mais explícita ou colaborar para construção de hipóteses. A descritiva visa estabelecer relações entre variáveis a partir da descrição de características de determinada população ou fenômeno. Por último, a pesquisa explicativa busca identificar quais são os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência de determinados fenômenos, com a explicação, razões e o porquê das coisas. Desta forma, o presente trabalho pode ser classificado como exploratório por buscar conhecer e tornar

mais explícito o fenômeno do desgaste abrasivo nos materiais e explicativo por buscar compreender as causas do fenômeno.

Em relação ao procedimento técnico da pesquisa, neste trabalho foi utilizada a modalidade de pesquisa bibliográfica e experimental.

A pesquisa bibliográfica é realizada através do estudo de teorias, artigos e trabalhos científicos publicados por meio escrito ou eletrônico (GERHARDT; SILVEIRA, 2009).

A pesquisa experimental seleciona variáveis capazes de influenciar, definir formas de controle e observação dos efeitos que as variáveis podem produzir no objeto em estudo (GIL, 2002). Neste trabalho, os procedimentos experimentais foram feitos variando o tipo de material polimérico aplicado no ensaio de desgaste microabrasivo.

3.2 Materiais e Métodos

As etapas utilizadas para alcançar os resultados esperados por este trabalho são apresentados no fluxograma da Figura 21.

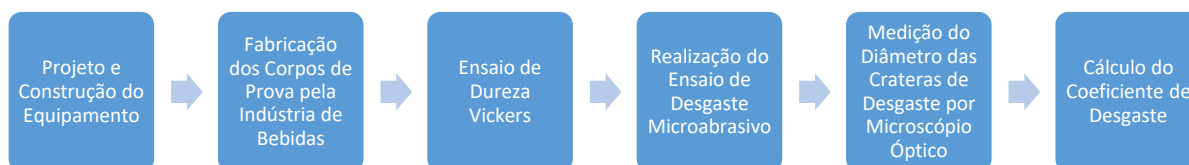
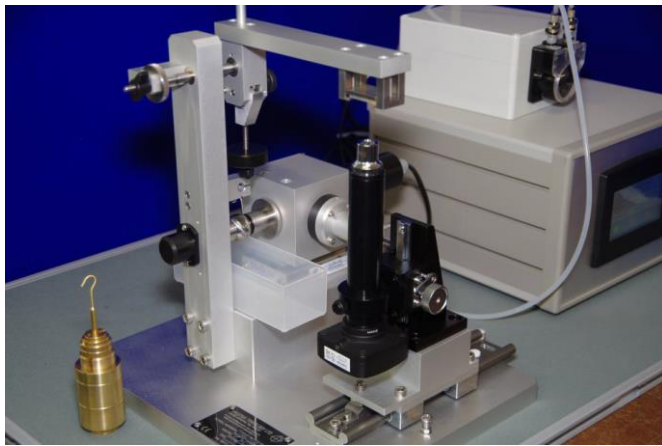


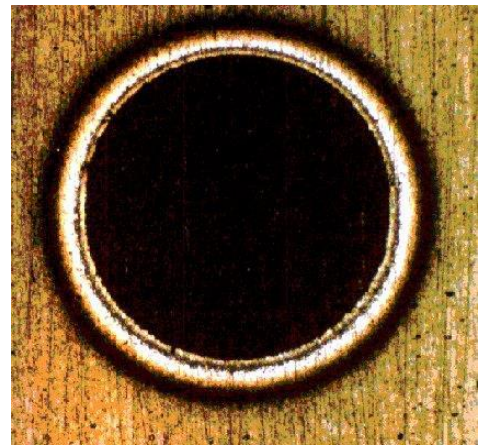
Figura 21: Fluxograma do procedimento.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

3.2.1 Projeto e construção do microtribômetro

O projeto e construção do equipamento foi baseado no “*TE-66 Micro-Scale Abrasion Tester*” fabricado pela empresa Phoenix Tribology. É um equipamento de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa, que em contato com uma amostra na presença de uma lama abrasiva, forma calotas esféricas. A partir da medição do diâmetro da cratera desgastada é possível encontrar o coeficiente de desgaste (k). A Figura 22 mostra a configuração do equipamento e a calota formada em um ensaio.



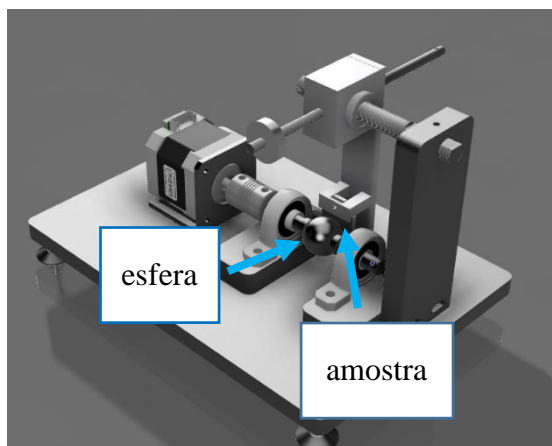
(a)



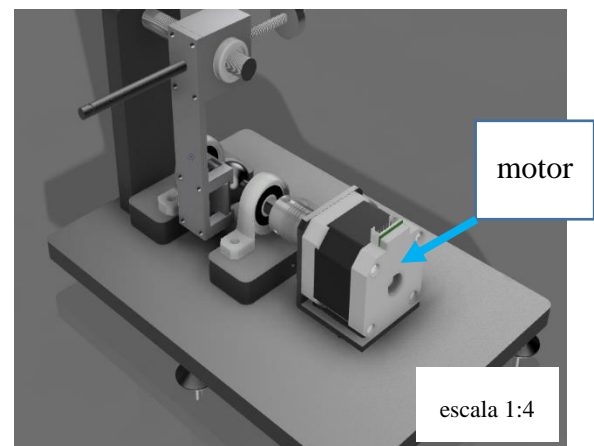
(b)

Figura 22: (a) Equipamento TE-66 Micro-Scale Abrasion Tester e (b) calota esférica.
Fonte: Phoenix Tribology (2021).

Com o auxílio do programa *SolidWorks* foi realizado o modelamento do protótipo virtual, Figura 23, para a máquina de desgaste microabrasiva com o mesmo princípio de funcionamento do equipamento *TE-66 Micro-Scale Abrasion Teste*.



(a)



(b)

Figura 23: (a) e (b) Projeto da máquina de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

Após realização do projeto, foi feita a seleção de material para fabricação, sendo escolhido o Alumínio por ser mais leve e diminuir a inercia do braço de alavanca.

O material foi encaminhado à um centro de usinagem, junto ao projeto, para confecção das peças e montagem do equipamento.

Foi adquirido, também, um agitador, um béquer, uma bomba peristáltica, um motor de passo Nema 17 de torque 0,42 N.m e um arduino para controlar o motor. O motor de passo foi selecionado pelo fácil controle da rotação, fácil controle da distância deslizada e apresenta um torque dez vezes superior ao torque necessário para girar a esfera de 25,4 mm em contato com o corpo de prova ao apresentar coeficiente de atrito de 0,5 e força normal de 5 N. Com todos esses itens foi possível reproduzir os ensaios do equipamento da empresa Phoenix Tribology, Figura 24.

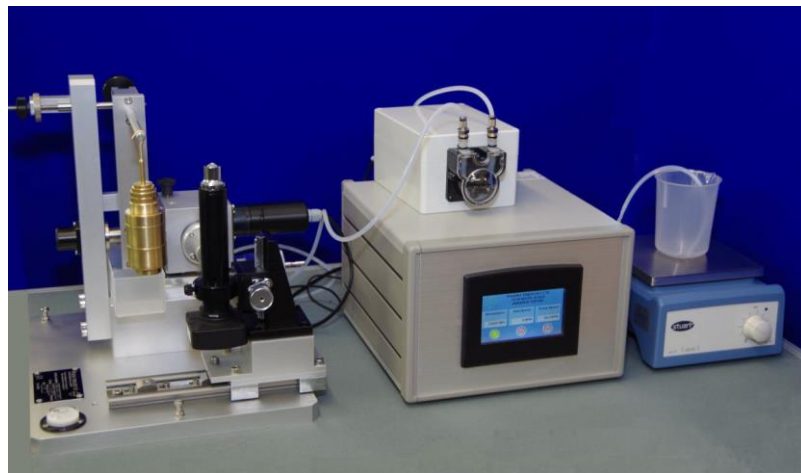


Figura 24: Equipamento de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa com todos os componentes necessários.
Fonte: Phoenix Tribology (2021)

Após fabricado e adquirido todos os componentes do equipamento, foi possível dar seguimento aos testes. A Figura 25 mostra o equipamento construído e preparado.

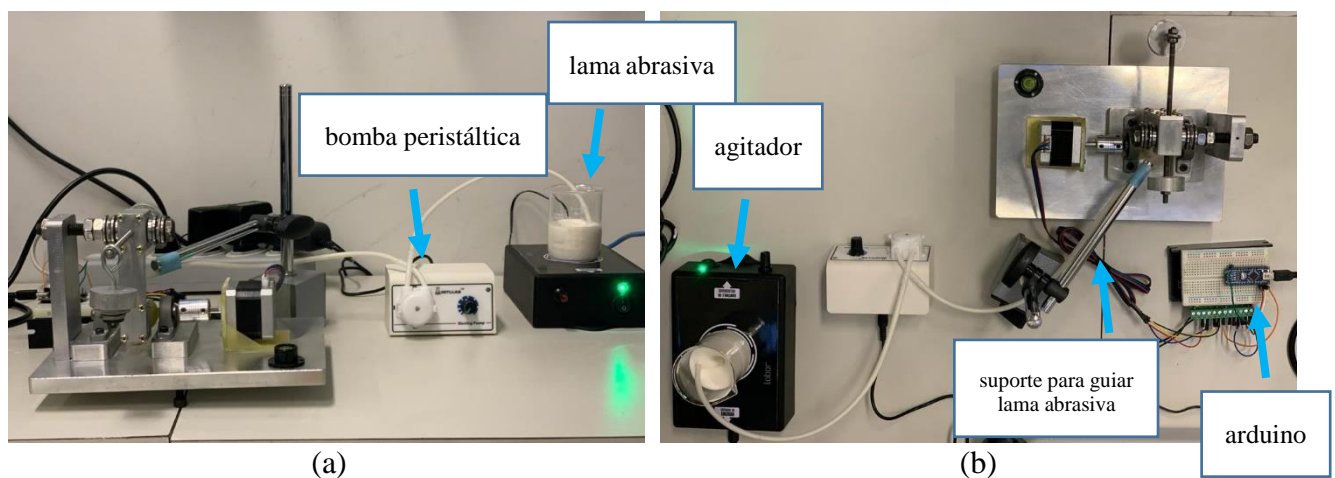


Figura 25: Equipamento de ensaio de desgaste abrasivo finalizado para realização de testes (a) vista frontal e (b) vista superior.
Fonte: Pesquisa direta (2021).

Os desenhos técnicos enviados para fabricação são apresentados no Anexo.

3.2.2 Fabricação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram produzidos por manufatura aditiva através do processo de extrusão de filamentos termoplásticos. Foram empregados cinco tipos diferentes de materiais, denominados tecnicamente como: ABS, Iglidur, Nylon, Nylon + Fibra de Carbono e PETG. A Tabela 1 apresenta algumas propriedades fornecidas pelos fabricantes. Os campos em branco são informações não fornecidas pelo fabricante.

Tabela 1: Propriedades mecânicas dos materiais estudados.

Propriedade	Nylon + FC	Nylon	ABS	Iglidur	PETG
Densidade [kg/m ³]	1232	-	-	-	1260
Tensão de ruptura [MPa]	103,2	34,4	33,9	-	66
Alongamento [%]	1,8	210	4,8	-	1,18
Módulo de tração [MPa]	8386	579	1681,5	-	2110
Dureza Shore D	-	74	76	62	-
Izod [kJ/m ²]	4,9	34,4	10,5		-
Módulo de flexão [MPa]	8258	463,5	2070	1700	-
Resistência à flexão [MPa]	160,7	24	70,5	54	-

Fonte: Ficha técnica dos fabricantes (2021)

A impressão 3D dos corpos de prova foi realizada com os seguintes parâmetros: 100% de preenchimento, a técnica de adesão a mesa foi o Brim para assegurar uma superfície lisa e a velocidade de deposição foi de 50 mm/s. A temperatura de fusão utilizada no processo foi a indicada pelo fabricante e, portanto, variou para cada material, como demonstra a Tabela 2.

Tabela 2: Temperatura de fusão dos materiais.

Material	Nylon+FC	Nylon	ABS	Iglidur	PETG
Temperatura de fusão °C	260	185	225	250	220

Fonte: Ficha técnica (2021)

As cinco amostras foram produzidas pelo método de extrusão de material por FDM (*fusion deposition modeling*). O filamento é aquecido até o seu ponto de fusão e, em seguida, é extrudado por um bico extrusor que se movimenta nas direções X e Y. O material é depositado em camadas sobre uma mesa que se movimenta no eixo Z. A Figura 26 esquematiza o processo de fabricação por Modelagem de Deposição Fundida (FDM) realizado na manufatura dos corpos de prova.

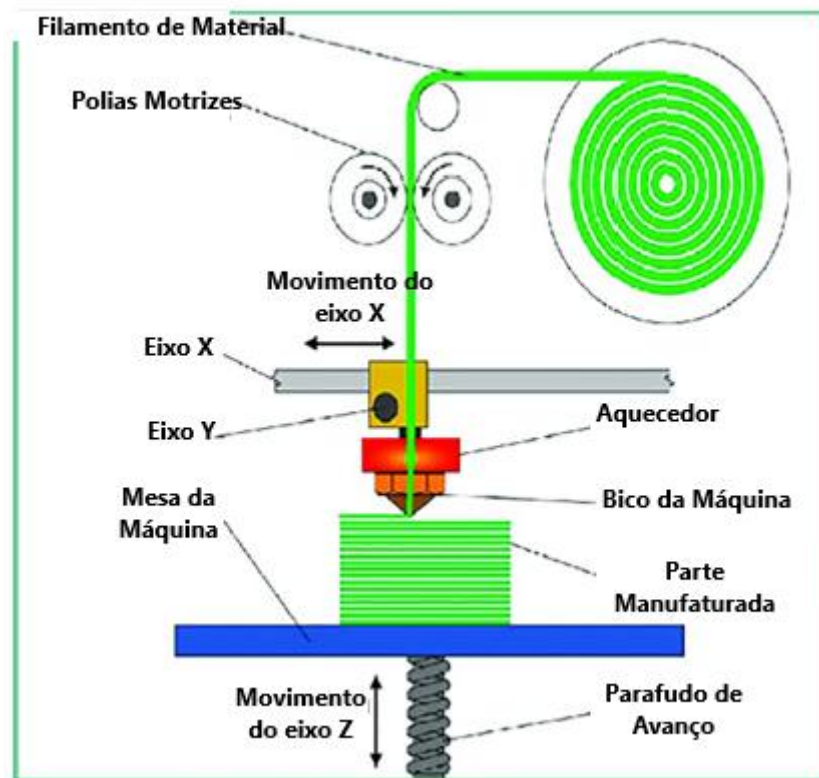


Figura 26: Vista esquemática do método de modelagem por deposição fundida.
Fonte: Adaptado de Durgashyam *et al.* (2019)

A máquina utilizada para fabricação dos corpos de prova foi a Ultimaker 5S, como mostra a Figura 27.

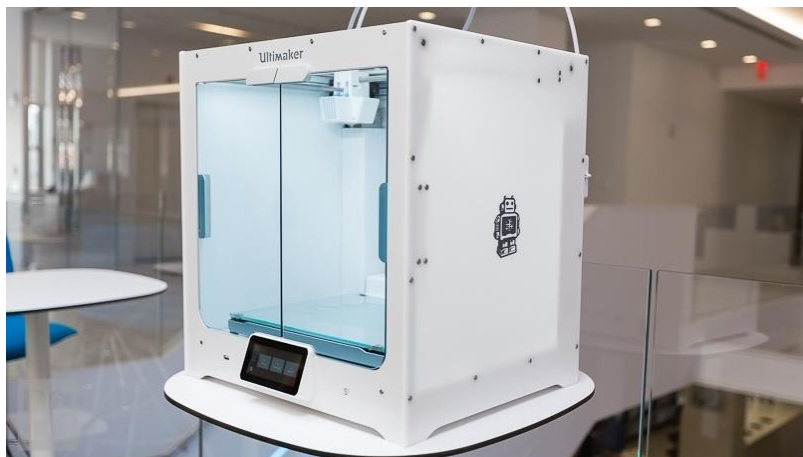


Figura 27: Impressora 3D Ultimaker 5S.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

As amostras de cada material foram produzidas com as seguintes dimensões: 20 mm x 18mm x 3mm. A Figura 28 mostra uma amostra de cada material estudado.

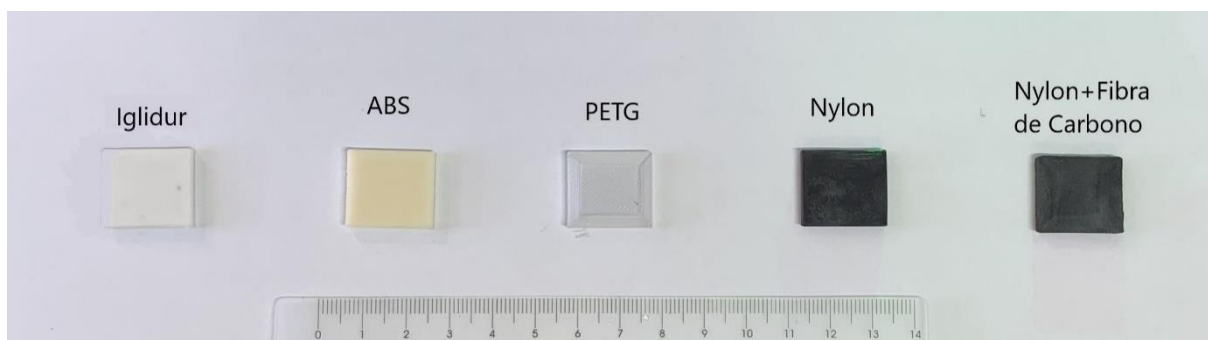


Figura 28: Amostras de cada material.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

3.2.3 Ensaio de dureza Vickers

O ensaio de dureza foi realizado com o indentador Vickers padrão, no equipamento Mitutoyo Vickers HM-100, foi utilizada uma carga de 1kg, com tempo de manutenção da carga de 15 segundos e velocidade de carregamento de 60 μ m/s. Foram realizados cinco ensaios para cada amostra e as indentações foram distantes o suficiente para que não houvesse influência entre os resultados em cada teste.

3.2.4 Ensaio de desgaste microabrasivo

Os ensaios de desgaste abrasivo foram realizados em um equipamento de microabrasão do tipo esfera fixa, mostrado na Figura 29. Neste ensaio, a esfera, movida por um eixo motor, gira em contato com a amostra. A amostra é fixada em um porta-amostra. A esfera, ou contra-corpo, é de nylon com diâmetro de 25,4 mm (uma polegada), sendo devidamente limpa antes de cada ensaio.

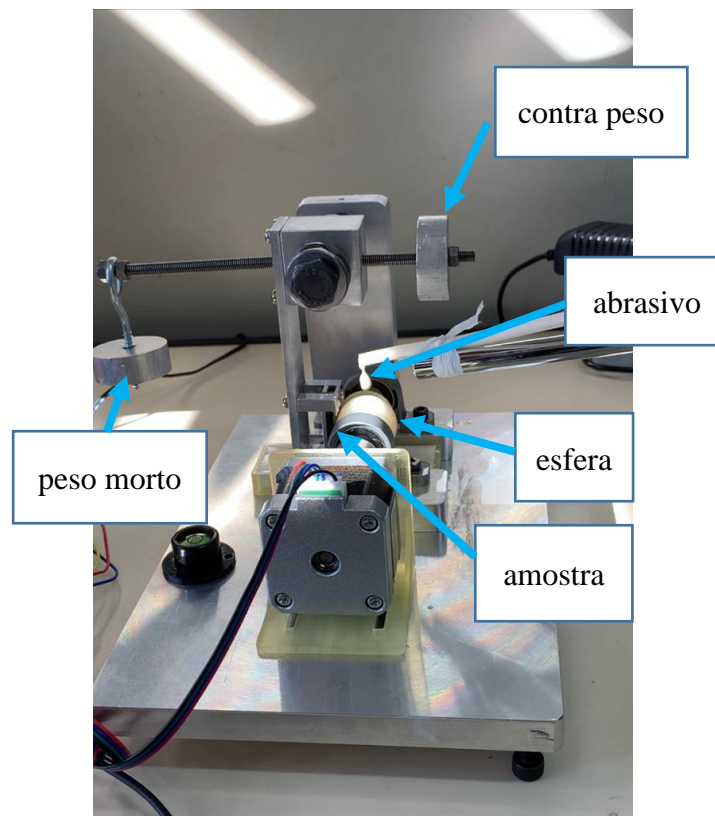


Figura 29: Equipamento para ensaio de desgaste microabrasivo do tipo esfera rotativa fixa.

Fonte: Pesquisa direta (2021)

O meio abrasivo foi uma lama composta de partículas abrasivas de Dióxido de Silício (SiO_2) em suspensão em água destilada, a uma concentração de 10% em massa de abrasivo. A Tabela 3 apresenta algumas características do abrasivo. O Dióxido de Sílica é um abrasivo mais condizente com os abrasivos encontrados em aplicações reais por apresentar dureza parecida.

Tabela 3: Características do abrasivo.

Abrasivo	Dióxido de Silício (Sigma-Aldrich)
Fórmula	SiO_2
Dureza (HV)*	750-1260
Tamanho nominal**	Tamanho da partícula: 0,5 – 10 μm (aproximadamente 80% entre 1 – 5 μm)

Fonte: Silva (2003)*, Hutchings (1992)* e Sigma-Aldrich (2021)**

Durante cada teste, a lama abrasiva foi agitada continuamente, por um agitador, para prevenir a decantação das partículas abrasivas. Através de uma bomba peristáltica, a mistura abrasiva é bombeada até a esfera com uma vazão de uma gota a cada 3 segundos para todos os testes. A rotação do eixo motor foi fixada em 100 rpm, gerando uma velocidade entre a superfície da esfera e a amostra de aproximadamente $0,13 \text{ m.s}^{-1}$. A força normal do teste é determinada por um sistema de alavanca e peso morto, sendo mantida em 0,5 N. O tempo de teste foi de 10 minutos e foram feitos três testes para cada amostra.

As Figuras 30 e 31 mostram a realização do ensaio de desgaste microabrasivo com todos os componentes utilizados.

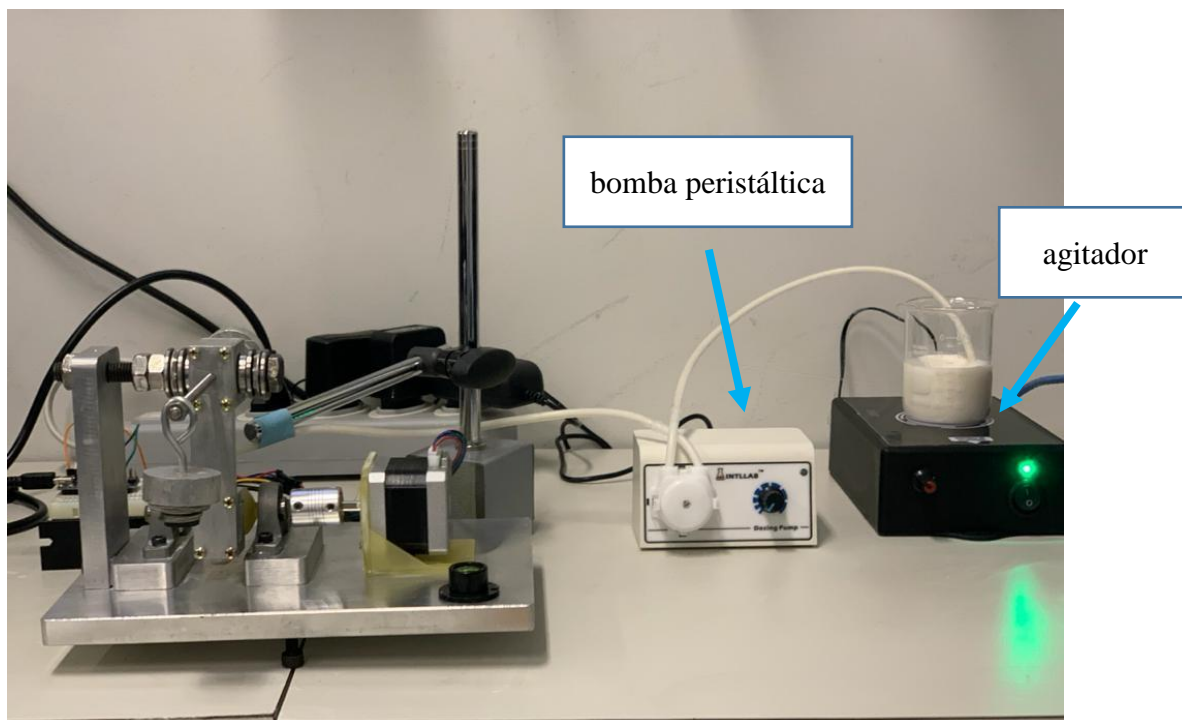


Figura 30: Ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

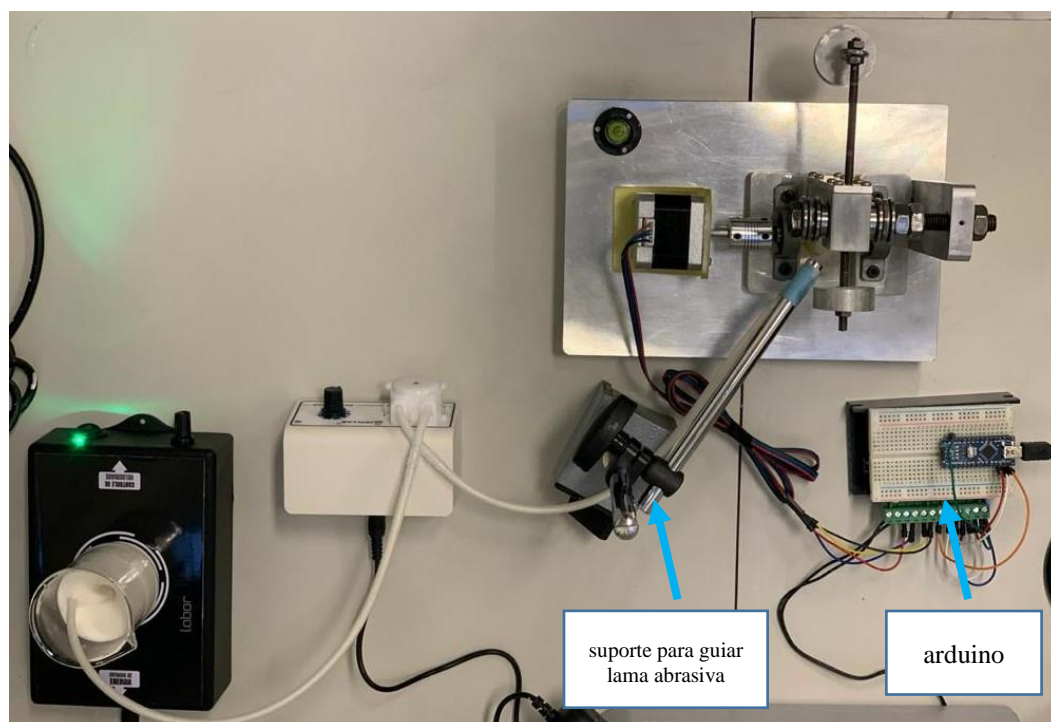


Figura 31: Vista superior do ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa.
Fonte: Pesquisa direta (2021).

3.2.5 Medição da calota esférica e cálculo do coeficiente de desgaste

A impressão de desgaste é mostrada, esquematicamente, na Figura 32. O diâmetro da impressão foi mensurado através de um microscópio ótico.

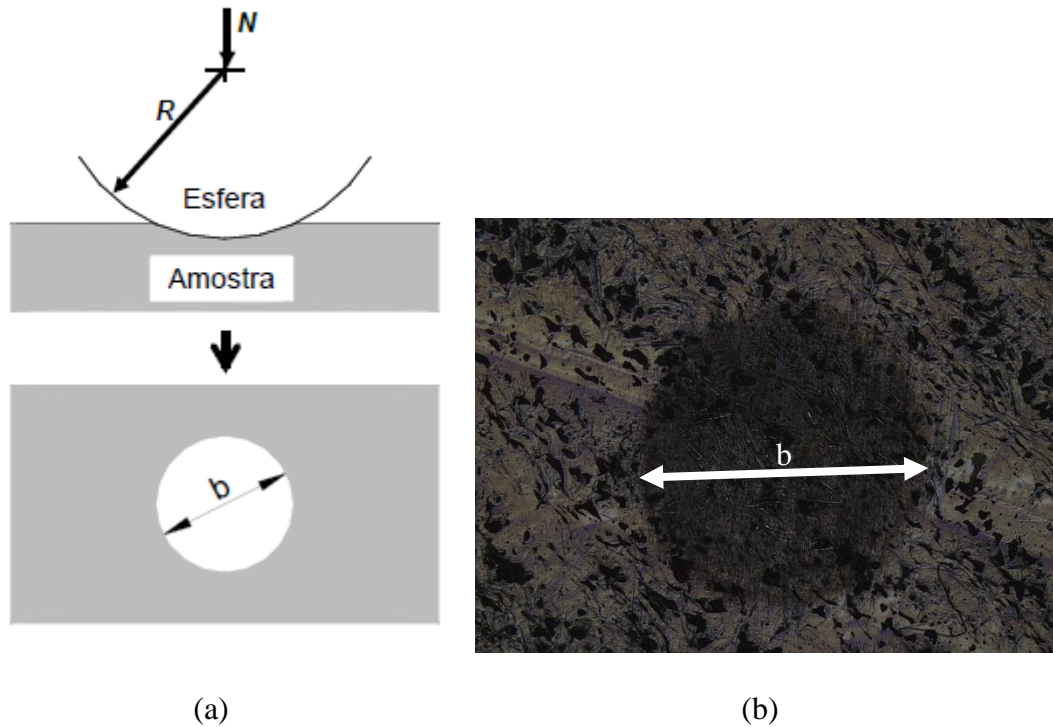


Figura 32: (a) Impressão esquemática de desgaste e (b) Cratera de desgaste para a amostra de Nylon com fibra de carbono após 10 minutos de teste.
Fonte: Silva (2003) e Pesquisa direta (2021)

O volume desgastado é calculado em função da geometria da esfera e da cratera formada na amostra, Eq. (2) (TREZONA; ALLSOPP; HUTCHINGS, 1999). Onde b é o diâmetro externo da calota formada e R é o raio da esfera (12,7 mm) utilizada nos testes.

A partir das Eq. (1) e (2) é possível definir o coeficiente de desgaste, k , em função dos parâmetros medidos nos testes, que pode ser expresso pela Eq. (5) (TREZONA; ALLSOPP; HUTCHINGS, 1999):

$$k = \frac{\pi \cdot b^4}{64 \cdot R \cdot S \cdot N} \quad (5)$$

A Tabela 4 apresenta um resumo de todos os parâmetros do ensaio.

Tabela 4: Valores dos parâmetros estabelecidos para os ensaios.

Esfera de Nylon	25,4 mm
Abrasivo	SiO ₂
Concentração de abrasivo	10 % em água destilada
Tempo de ensaio [min]	10
Força Normal [N]	0,5
Rotação da esfera [rpm]	100
Distância de deslizamento [m]	79,80
Gotejamento do abrasivo	1 gota/3s
Número de repetições por amostra	3

Fonte: Pesquisa direta (2021)

3.3 Varáveis e Indicadores

Variável é uma classificação ou medida, uma quantidade que pode variar, um conceito operacional que contenha valores, aspecto, propriedade ou um fator que seja um objeto de estudo e que seja possível mensurar (MARCONI; LAKATOS, 2003).

Para Takashina e Flores (1997, p. 19) “indicadores são formas de representação quantificáveis das características de produtos e processos”. Ou seja, são usados para controlar e melhorar a qualidade de produto e processos ao longo do tempo.

As variáveis e os indicadores deste trabalho são dispostos na Tabela 5.

Tabela 5: Variáveis e Indicadores

Variáveis	Indicadores
Construção do equipamento	Princípio de funcionamento
	Projeto
	Seleção de materiais
	Usinagem
	Funcionamento
Material do filamento	Propriedades mecânicas dos materiais
	Taxa de desgaste em microabrasão

Fonte: Pesquisa direta (2021)

3.4 Instrumentos de Coletas de Dados

Equipamento de ensaio microabrasivo, microscópio óptico e análise bibliográfica.

3.5 Tabulação de Dados

Para a realização deste trabalho foi utilizado o seguinte *software* para tabular, organizar, tratar e documentar os dados: Microsoft Excel.

3.6 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentadas a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste estudo, assim como os parâmetros envolvidos nos experimentos. No próximo capítulo são apresentados os resultados encontrados nos ensaios realizados, seguido das discussões.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados encontrados empregando o equipamento projetado e fabricado. Os resultados encontrados serão comparados e discutidos em relação às suas propriedades mecânicas encontradas em catálogos e, por fim, haverá uma caracterização do mecanismo de desgaste resultante nas crateras de desgaste.

4.1 Equipamento e coeficiente de desgaste

O equipamento fabricado neste estudo funcionou como esperado. Houve a formação das calotas de desgaste e, dessa forma, foi possível encontrar os coeficientes de desgaste de cada amostra ao medir o diâmetro dessas crateras. As Figuras 33, 34, 35 e 36 mostram diferentes perspectivas do equipamento construído.

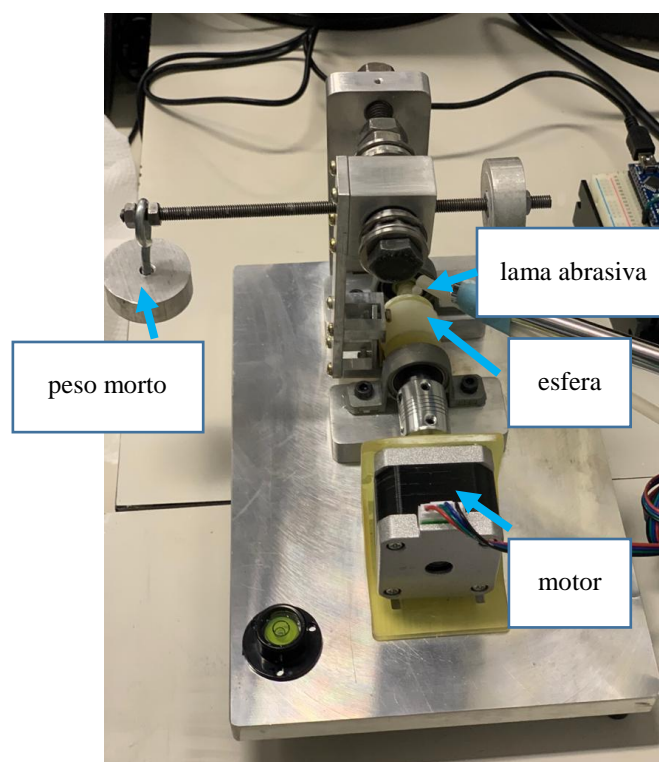


Figura 33: Vista lateral do equipamento.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

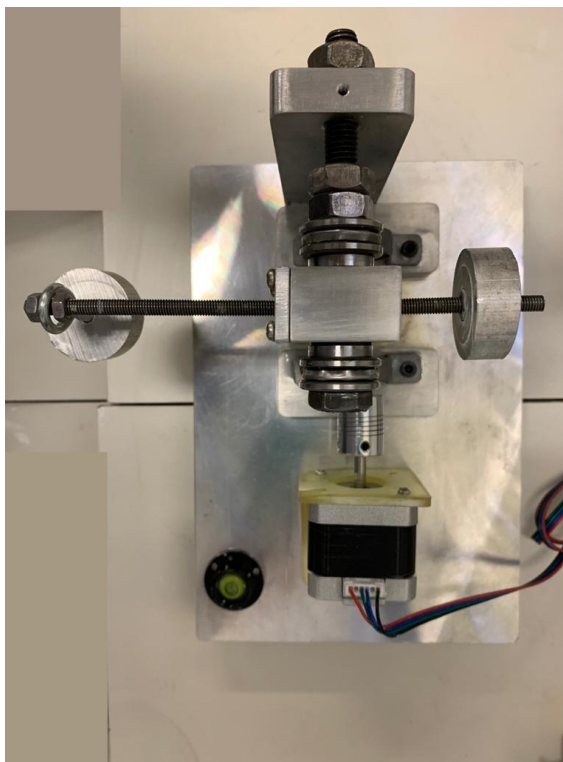


Figura 34: Vista superior do equipamento.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

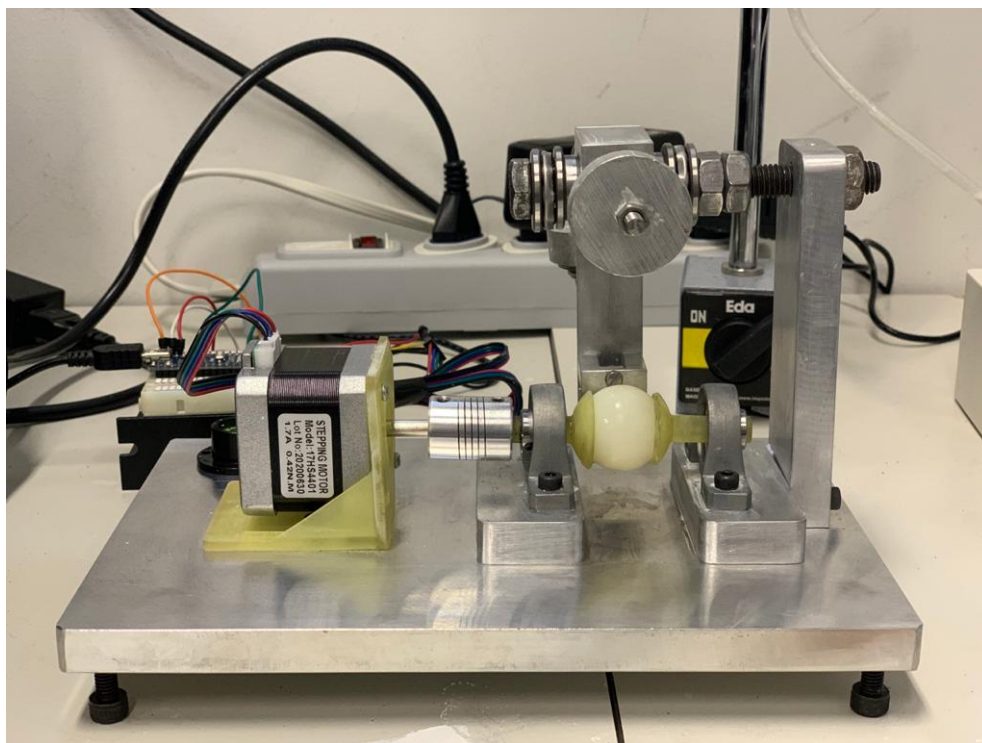


Figura 35: Vista frontal (frente) do equipamento.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

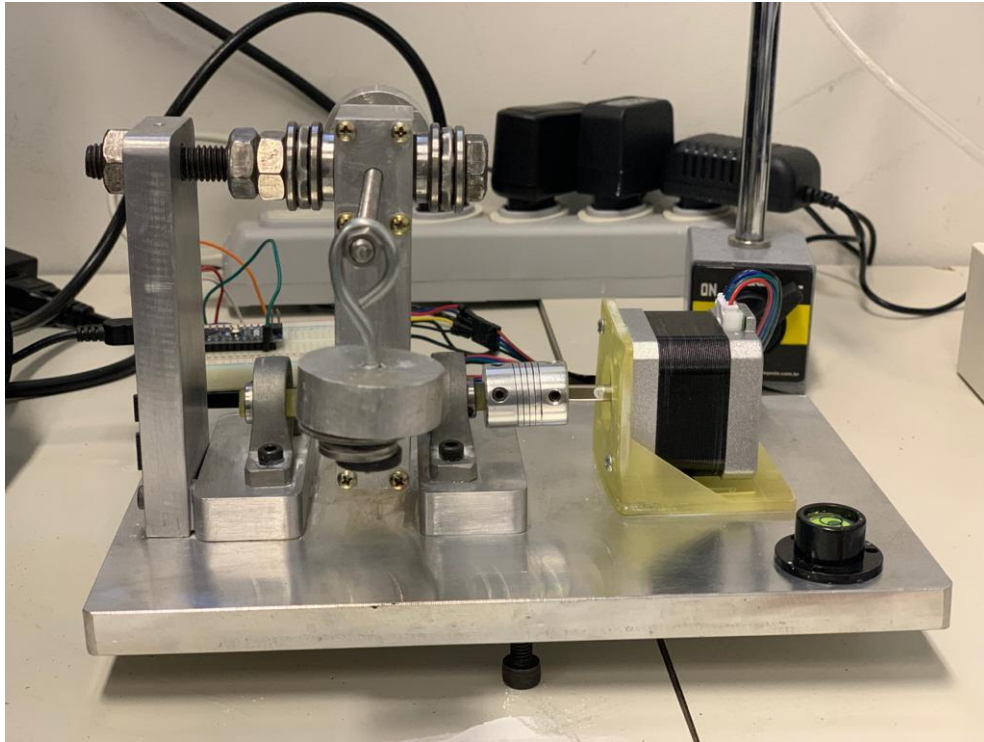


Figura 36: Vista frontal (trás) do equipamento.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

Os ensaios foram realizados em uma mesma condição para os cinco corpos de prova. Para cada amostra os testes foram repetidos três vezes. Foi avaliado o diâmetro (b) da calota formada e, assim, calculou-se o volume (V) e coeficiente de desgaste (k). A calota de desgaste, após 10 min de ensaio, de cada material é mostrada nas Figuras 37, 38, 39, 40 e 41.

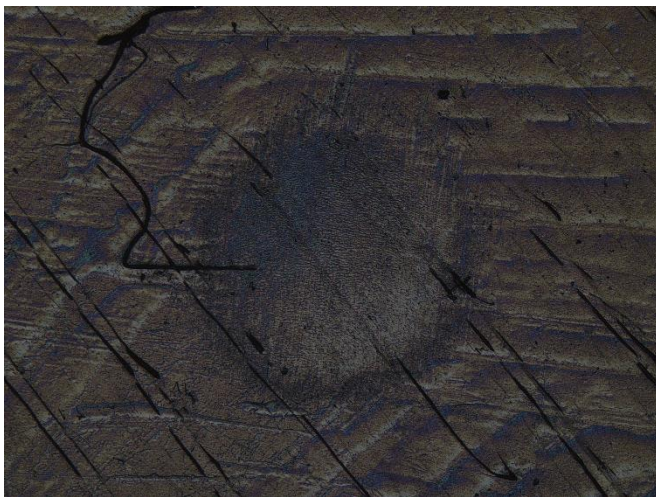


(a)



(b)

Figura 37: (a) Cratera de desgaste para a amostra Iglidur e (b) área da circunferência formada pela cratera.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

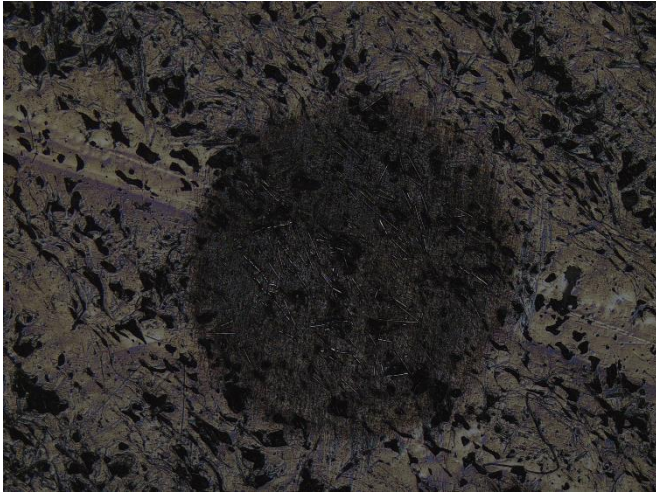


(a)

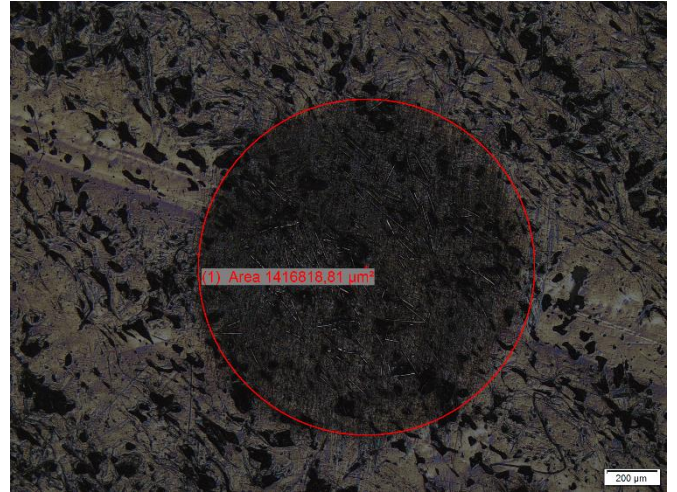


(b)

Figura 38: (a) Cratera de desgaste para a amostra Nylon e (b) área da circunferência formada pela cratera.
Fonte: Pesquisa direta (2021)



(a)



(b)

Figura 39: (a) Cratera de desgaste para a amostra Nylon+FC e (b) área da circunferência formada pela cratera.
Fonte: Pesquisa direta (2021)



(a)



(b)

Figura 40: (a) Cratera de desgaste para a amostra PETG e (b) área da circunferência formada pela cratera.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

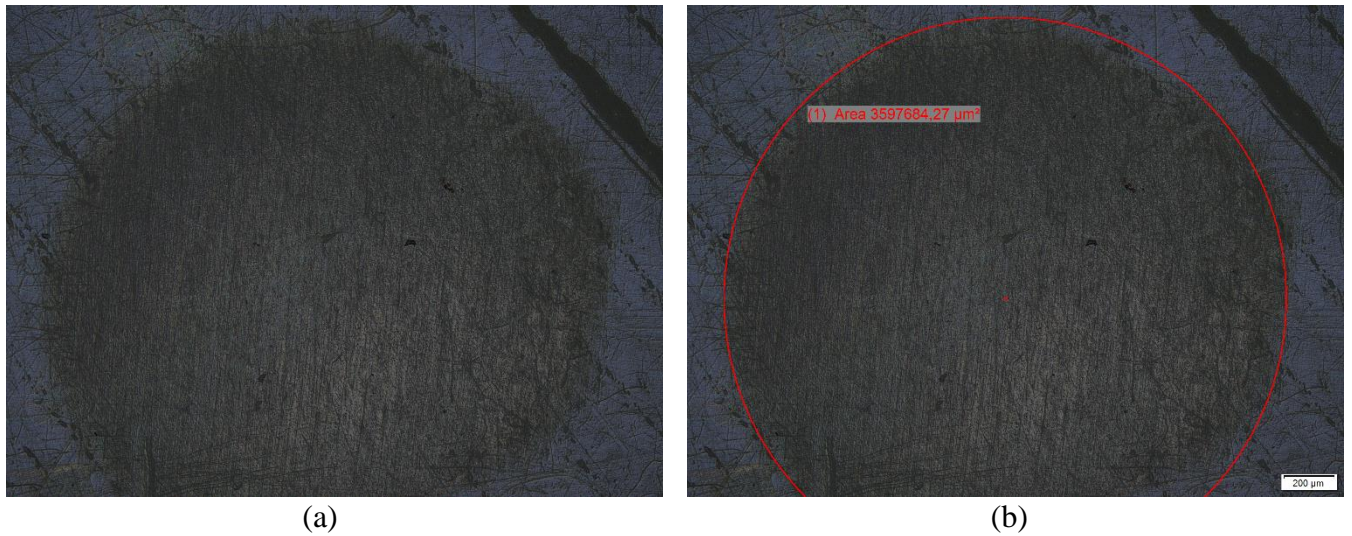


Figura 41: (a) Cratera de desgaste para a amostra ABS e (b) área da circunferência formada pela cratera.
 Fonte: Pesquisa direta (2021)

Foi realizado ensaio de dureza Vickers para cada amostra, como mostra a Figura 6.

Tabela 6: Dureza Vickers das amostras.

Amostra	Dureza Vickers
Nylon + FC	13,84 HV \pm 0,90
Nylon	3,94 HV \pm 0,43
ABS	10,76 HV \pm 0,13
Iglidur	10,88 HV \pm 0,32
PETG	10,36 HV \pm 0,089

Fonte: Pesquisa direta (2021)

A partir Eq (1) e (3) foram calculados o volume e o coeficiente de desgaste para cada amostra nos três testes realizados, conforme Tabela 7.

Tabela 7: Cálculo do volume e da taxa de desgaste a partir do diâmetro das crateras.

ensaio	amostra	b [m]	V [m ³]	k [m ² /N]	k x 10 ⁻¹³
1	Nylon + FC	0,0014794	1,85E-11	4,64E-13	4,64
	Nylon	0,0011478	6,71E-12	1,68E-13	1,68
	ABS	0,0021595	8,41E-11	2,11E-12	21,07
	Iglidur	0,0017863	3,94E-11	9,86E-13	9,86
	PETG	1,65E-03	2,85E-11	7,14E-13	7,14
2	Nylon + FC	0,0014202	1,57E-11	3,94E-13	3,94
	Nylon	0,0011664	7,15E-12	1,79E-13	1,79
	ABS	0,0021403	8,11E-11	2,03E-12	20,33
	Iglidur	0,0017499	3,62E-11	9,08E-13	9,08
	PETG	1,60E-03	2,51E-11	6,30E-13	6,30
3	Nylon + FC	0,0013431	1,26E-11	3,15E-13	3,15
	Nylon	0,0011447	6,64E-12	1,66E-13	1,66
	ABS	0,0020933	7,42E-11	1,86E-12	18,60
	Iglidur	0,0016796	3,08E-11	7,71E-13	7,71
	PETG	1,65E-03	2,84E-11	7,12E-13	7,12

Fonte: Pesquisa direta (2021)

A Figura 42 mostra a média da taxa de desgaste com os seus respectivos desvios padrão.

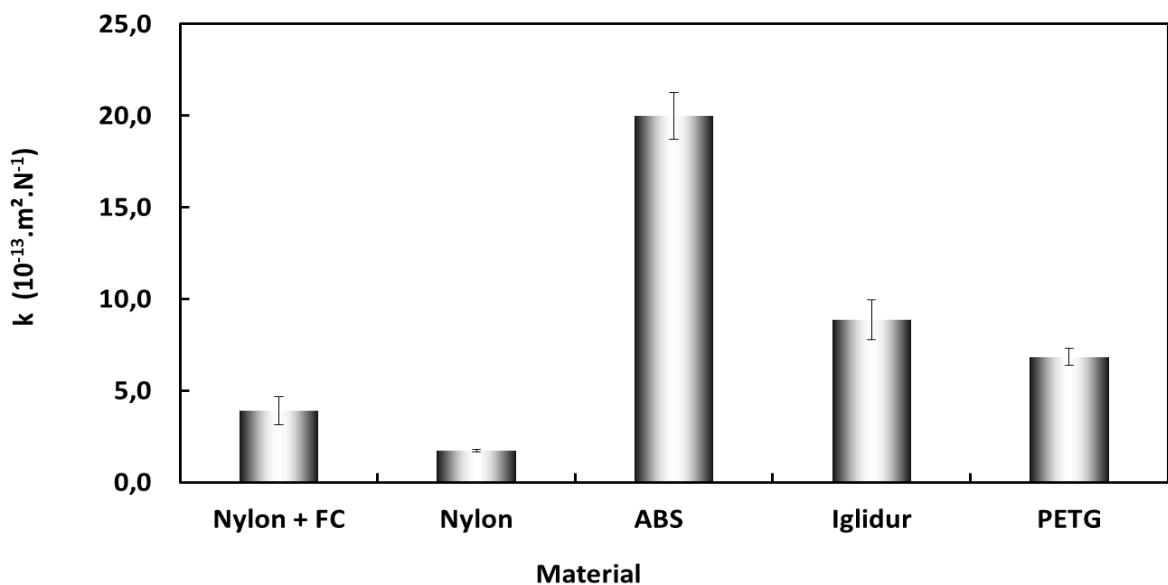


Figura 42: Coeficiente de desgaste de cada amostra avaliada.

Fonte: Pesquisa direta (2021)

Primeiramente pode ser observado que o equipamento permitiu diferenciar as amostras quanto a resistência a microabrasão.

A Figura 42 também mostra que a amostra que obteve o menor coeficiente de desgaste, nas condições ensaiadas, foi o Nylon. Enquanto o ABS apresentou a maior valor de taxa de desgaste.

As outras amostras Nylon + FC, Iglidur e PETG, apresentaram valores intermediários, mais próximos do resultado alcançado pelo Nylon do que pelo ABS.

Esses diferentes resultados são causados em virtude das diferentes propriedades mecânicas apresentadas por cada tipo de material das amostras analisadas.

Para Hutchings e Shipway (2017) o contato entre polímeros, ou entre polímero e um metal, é predominantemente elástico. Por isso, o atrito de polímeros difere fundamentalmente dos metais. A razão E/H , onde E é o módulo de Young e H é a dureza do material, determina a extensão da plasticidade na região de contato; sendo que a rugosidade da superfície, na escala micrometros, também é importante. Para metais, o valor típico de E/H é maior ou igual a 100, enquanto que para polímeros E/H fica em torno de 10. Então, o índice de plasticidade ψ para polímeros é, aproximadamente, um décimo do valor do índice de plasticidade de um metal e o contato é, portanto, quase que completamente elástico, exceto contra superfícies rugosas. Polímeros comuns para os quais isso é verdadeiro incluem polietileno (alta e baixa densidade - HDPE e LDPE), politetrafluoroetileno (PTFE), nylons, polimetilmetacrilato (PMMA) e algumas resinas epóxi.

O Nylon, portanto, de acordo com Hutchings e Shipway (2017), se deforma mais elasticamente do que plasticamente, comparado aos outros materiais e de baixa dureza vickers, conforme Tabelas 1 e 6, com uma maior zona elástica e, dessa forma, apresentou menor coeficiente de desgaste abrasivo em relação às outras amostras analisadas.

Franco *et al* (2004) observaram que com o aumento de dureza dos polímeros, há um aumento na perda de resistência ao desgaste abrasivo. Estas perdas, provavelmente ocorreram devido à influência nas propriedades de alongamento do material, pois o aumento da resiliência e do alongamento máximo na ruptura colaboraram para um aumento na resistência ao desgaste abrasivo, como pode ser observado na Figura 43. Isso poderia explicar o comportamento do Nylon com fibra de carbono em relação ao Nylon puro. O Nylon + FC com uma dureza 316 % maior que o Nylon puro, apresentou uma taxa de desgaste 128 % maior. Conforme Tabela 1, o

Nylon com fibra de carbono possui um alongamento de 1,8 % enquanto o Nylon puro um alongamento de 210 %.

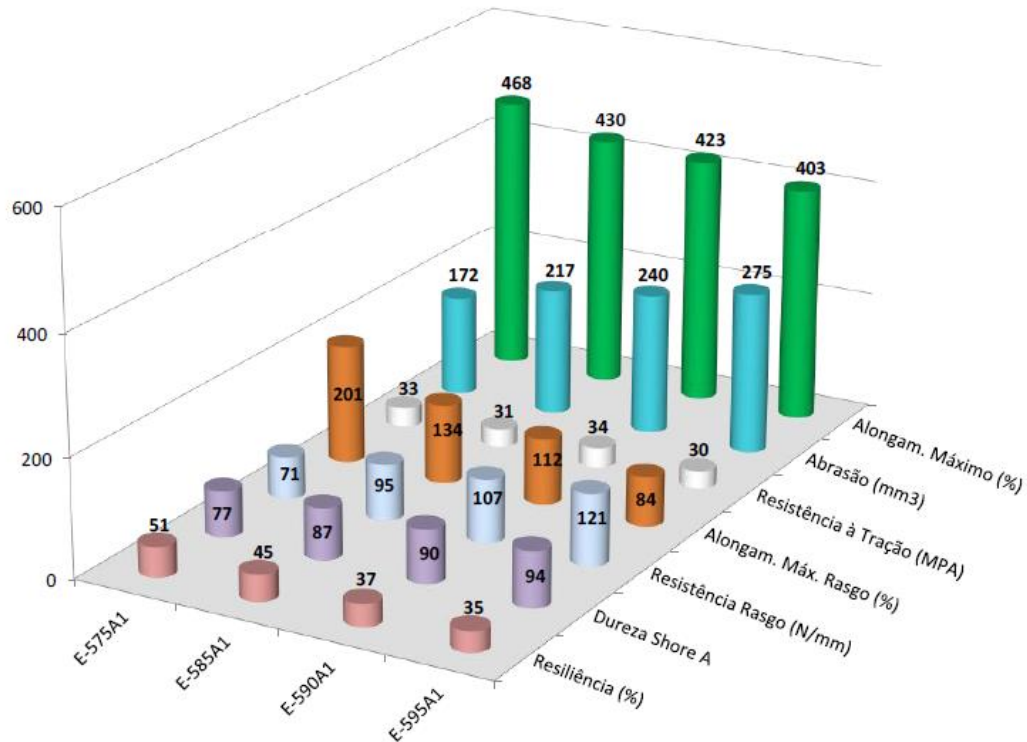


Figura 43: Resultado das propriedades mecânicas e de desgaste abrasivo DIN 53.316.
Fonte: Franco *et al* (2004)

Shipway e Ngao (2003) concluíram também que polímeros de alta dureza apresentam baixo alongamento na ruptura, tornando um fator predominante no comportamento de teste de abrasão.

Foi estabelecida uma correlação entre a taxa de desgaste e as propriedades mecânicas por Yousif e El-Tayeb (2010), que estudaram o desgaste abrasivo em fibras de vidros reforçados com poliésteres. Não fica clara a influência da tensão de ruptura na taxa de desgaste, enquanto a dureza e o alongamento na ruptura se apresentam mais atuantes neste processo.

Observou-se uma correlação entre a taxa de desgaste e as propriedades dureza, limite de ruptura e alongamento (Shipway e Ngao (2003), Yamaguchi (1990), Czichos (1983), Friedrich e Cyffka (1985) e Giltrow (1970)). Esses autores observaram que a taxa de desgaste aumenta ao aumentar a dureza e também ao aumentar o valor da relação $1/\sigma_t \cdot \epsilon$.

Assim como Shipway e Ngao (2003) apresentaram uma relação ruim entre as propriedades mecânicas de dureza, tensão de ruptura e alongamento máximo com a taxa de desgaste, neste trabalho também não foi possível obter uma boa relação, como pode ser visto nas Figuras 44, 45, 46. Portanto, a relação entre propriedades mecânicas do material e a taxa de desgaste já não foi possível perceber nas amostras de ABS, Iglidur e PETG, a não ser nas análises isoladas realizadas para o Nylon e o Nylon + FC.

As propriedades de tensão de ruptura e alongamento máximo foram retiradas do catálogo de fabricante dos materiais, entretanto, essas propriedades não foram encontradas para o Iglidur.

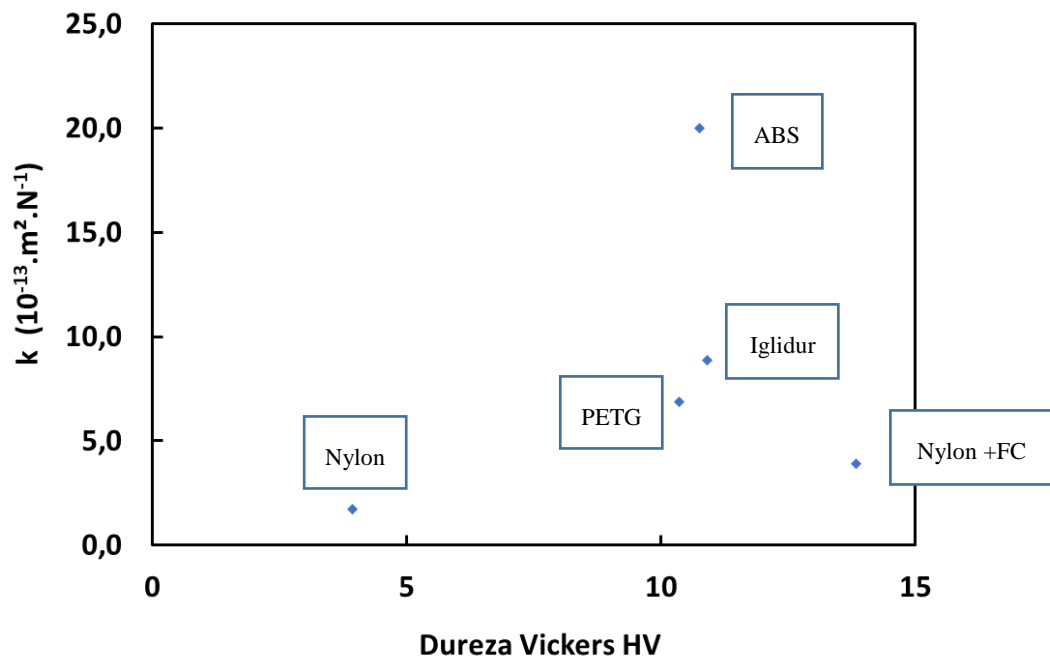


Figura 44: Relação dureza Vickers e coeficiente de desgaste.
Fonte: Pesquisa direta (2021)

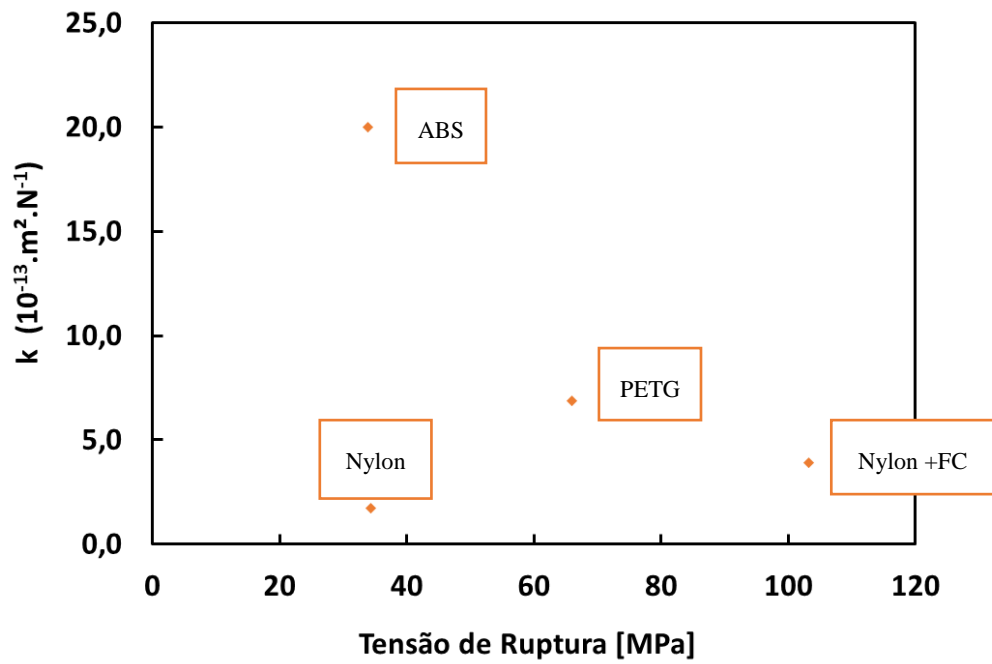


Figura 45: Relação entre tensão de ruptura e coeficiente de desgaste.
 Fonte: Pesquisa direta (2021)

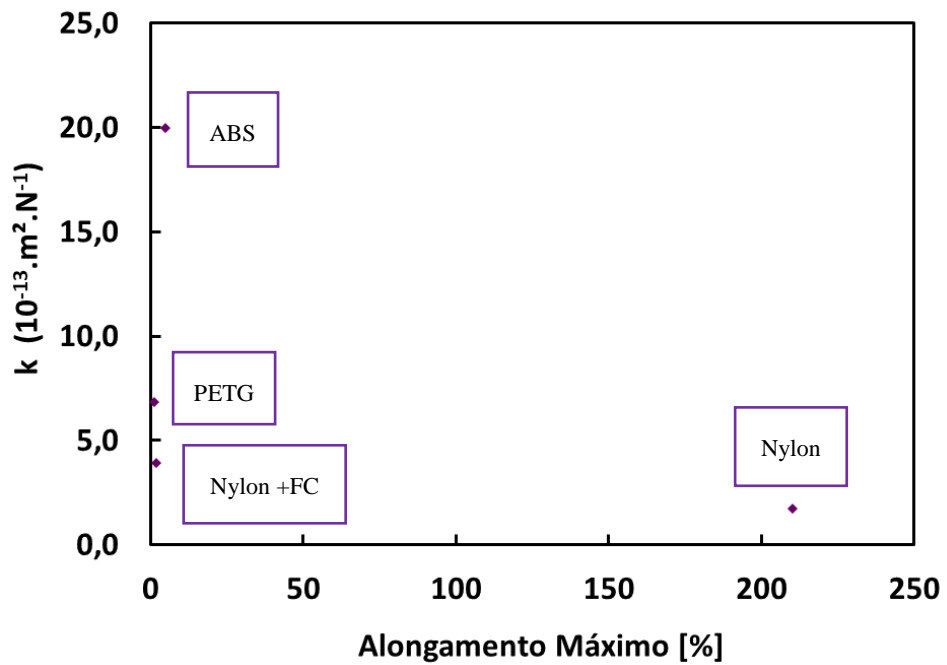


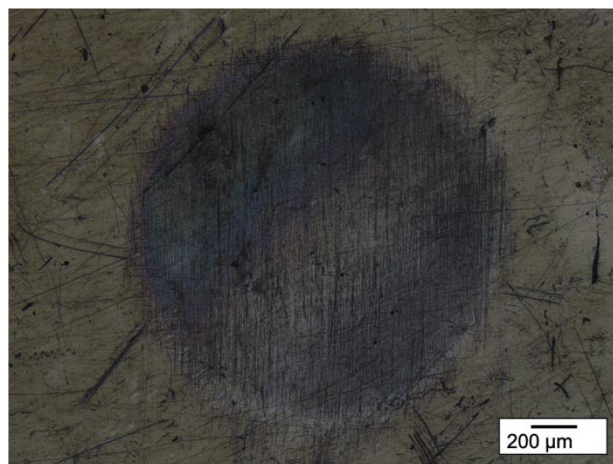
Figura 46: Relação entre alongamento máximo e coeficiente de desgaste.
 Fonte: Pesquisa direta (2021)

Como pode ser visto acima ainda há questões no desgaste abrasivo de polímeros, especialmente o ABS, PETG e Iglidur, que precisam ser melhor exploradas para geração de maior entendimento da influência das diversas propriedades mecânicas neste mecanismo de desgaste.

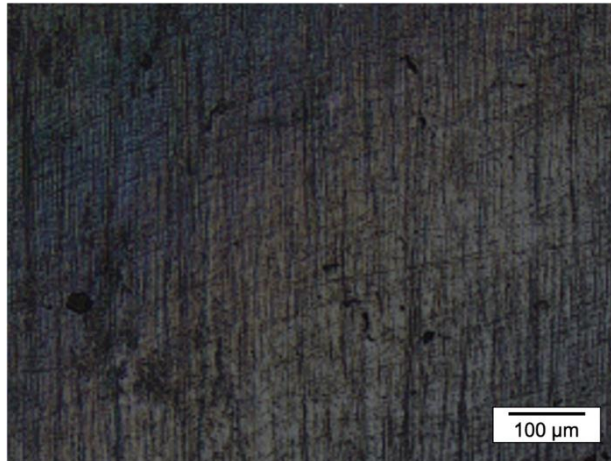
4.2 Mecanismos de desgaste

O desgaste abrasivo em polímeros é caracterizado pela remoção de material por partículas abrasivas, que penetram na superfície e resultam em uma microusinagem, ranhuras de desgaste, aração, arranhões e rachaduras na superfície, conferindo desgaste abrasivo por riscamento (ABDELBARY, 2014).

Por meio das análises conduzidas por microscopia ótica das crateras de desgaste obtidas neste trabalho, indicaram que o modo de desgaste abrasivo “riscamento”, ocorreu em todas as calotas esféricas, como pode ser observado na Figura 44, a imagem capturada por microscópio óptico da amostra de PETG.



(a)



(b)

Figura 47: (a) Cratera de desgaste obtida para a amostra de PETG e (b) ampliação do centro da calota.

Fonte: Pesquisa direta (2021)

O desgaste abrasivo por riscamento é causado por partículas abrasivas aderidas ao contracorpo, ou pelo deslizamento de partículas livres entre as superfícies em contato, provocando sulcos e riscos (TREZONA; ALLSOPP; HUTCHINGS, 1999).

Conforme Trezona, para elevadas concentrações de pasta abrasiva e baixas forças normais, há o predomínio do desgaste abrasivo por rolamento e para elevadas forças normais e baixas concentrações de pasta abrasiva, há o domínio do desgaste abrasivo por riscamento.

5 CONCLUSÃO

O projeto e construção de um equipamento de ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa fixa apresentou resultados satisfatórios e se comportou de maneira estável.

Foi possível conhecer o comportamento das amostras analisadas.

O Nylon apresentou o menor coeficiente de desgaste (k), isso o confere melhor resistência aos meios abrasivos. Foi possível comprovar este resultado a partir da relação entre o módulo de Young (E) e sua dureza (H), que demonstram que o Nylon possui um baixo índice de plasticidade. Dessa forma, é um material com comportamento elástico, apresenta um alongamento na ruptura elevado e, assim, se desgasta menor.

A adição de fibra de carbono ao Nylon, conferiu maior dureza ao material, mas sacrificou sua resistência ao desgaste abrasivo. Isso ocorreu em virtude da relação de dureza, alongamento e a taxa de desgaste. O aumento de dureza provocou redução no alongamento na ruptura e, então, aumentou a taxa de desgaste sofrida pelo material.

Não foi possível encontrar essa mesma relação ao ABS, Iglidur e PETG.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ABDELBARY, A. **Wear of Polymers and Composites**. [s.l.] WoodHead Publishing, 2014.
- ASTM G 40 – 96 Standard Terminology Relating to Wear and Erosion
- BARTENEV, G. M.; LAVRENTER, V. V. **Friction and Wear of Polymers**. Amsterdam: Elsevier Science, 1981.
- BATES-GREEN, K.; HOWIE, T. Materials for 3D Printing by Fused Deposition. **Edmons Community College**, p. 21, 2017.
- BOURELL, D. L. (THE U. OF T. AT A.); LEU, M. C. (MISSOURI U. OF S. AND T.); ROSEN, D. W. (GEORGIA I. OF T.). Roadmap for Additive Manufacturing. **The University of Texas at Austin**, p. 92, 2009.
- BOZZI, A. C.; DE MELLO, J. D. B. Wear resistance and wear mechanisms of WC-12%Co thermal sprayed coatings in three-body abrasion. **Wear**, v. 233–235, p. 575–587, 1999.
- BURWELL JR, J. T. Survey of possible wear mechanisms. **Wear**, v. 1, n. 2, p. 119–141, 1957.
- CAMPBELL, I.; BOURELL, D.; GIBSON, I. Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age. **Rapid Prototyping Journal**, v. 18, n. 4, p. 255–258, 2012.
- CANEVAROLO, S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006.
- COZZA, R. C. Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste micro-abrasivo. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, v. 11, n. 2, p. 117–124, 2006.
- CRESWELL, J. W. **Projeto de pesquisa: método qualitativo, quantitativo e misto**. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2007.
- CZICHOS, H. Influence of Adhesive and Abrasive Mechanisms on The Tribological Behaviour of Thermoplastic Polymers. **Wear**, v. 88, p. 27–43, 1983.
- DAMIÃO, C. A. **Efeito Da Textura Metalúrgica Na Resistência À Abrasão De Aços Ao Manganês**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2018.
- DURGASHYAM, K. et al. Experimental investigation on mechanical properties of PETG material processed by fused deposition modeling method. **Materials Today: Proceedings**, v. 18, p. 2052–2059, 2019.

- EYRE, T. S. Wear characteristics of metals. **Tribology International**, v. 9, n. 5, p. 203–212, 1976.
- FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002.
- FRANCO, S. D. et al. **Efeito das Propriedades Mecânicas no Desgaste Abrasivo de Poliuretanos MDI-BD**Uberlândia15º POSMEC - Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, , 2004.
- FRIEDRICH, K.; CYFFKA, M. On the wear of reinforced thermoplastics by different abrasive papers. **Wear**, v. 103, n. 4, p. 333–344, 1985.
- GATES, J. D. Two-body and three-body abrasion : A critical discussion. **Wear**, v. 214, p. 139–146, 1998.
- GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de Pesquisa**. Universidade Aberta do Brasil - UAB/UFRGS - Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.
- GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies - 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing**. 2. ed. Nova York: Springer, 2019.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- GILTROW, J. P. A relationship between abrasive wear and the cohesive energy of materials. **Wear**, v. 15, n. 1, p. 71–78, 1970.
- GUO, N.; LEU, M. C. Additive manufacturing: Technology, applications and research needs. **Frontiers of Mechanical Engineering**, v. 8, n. 3, p. 215–243, 2013.
- HUA, Z. et al. A new approach of forecasting intermittent demand for spare parts inventories in the process industries. **Journal of The Operational Research Society**, v. 58, p. 52–61, 2007.
- HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology - Friction and Wear of Engineering Materials**. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2017.
- JONES, R. et al. Reprap - The replicating rapid prototyper. **Robotica**, v. 29, n. 1 SPEC. ISSUE, p. 177–191, 2011.
- JOST, P. Jost Report. London, 1966
- KAWAKAME, M. S.; BRESSAN, J. D. Atrito e desgaste em polímeros. **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, 14, p. 53401–53412, 2000.

KELLY, D. A.; HUTCHINGS, I. M. A new method for measurement of particle abrasivity. **Wear**, v. 250–251, n. PART 1, p. 76–80, 2001.

KRUTH, J. P.; LEU, M. C.; NAKAGAWA, T. Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 47, n. 2, p. 525–540, 1998.

LEVY, G. N. The role and future of the Laser technology in the Additive Manufacturing environment. **Physics Procedia**, v. 5, n. PART 1, p. 65–80, 2010.

MARCONI, M.; LAKATOS, E. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

OLANYK, L. Z. **Desenvolvimento de polímero termoplástico de glicerina para aplicação na manufatura aditiva por extrusão de material**. [s.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

PEI, S. et al. Process-structure-property analysis of short carbon fiber reinforced polymer composite via fused filament fabrication. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 64, n. November 2020, p. 544–556, 2021.

PIZZORNI, M.; PARMIGGIANI, A.; PRATO, M. Adhesive bonding of a mixed short and continuous carbon-fiber-reinforced Nylon-6 composite made via fused filament fabrication. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 107, n. March, p. 102856, 2021.

RODRIGUES, V. et al. Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações. **Revista GEPROS**, v. 12, n. 3, p. 1, 2017.

ROWAT, S. J.; LEGGE, R. L.; MORESOLI, C. Plant protein in material extrusion 3D printing: Formation, plasticization, prospects, and challenges. **Journal of Food Engineering**, v. 308, n. April, p. 110623, 2021.

SEYMOUR, R.; CARRAHER, C. **Polymer chemistry**. 6. ed. Nova York: Marcel Dekker, 2003.

SHIPWAY, P. H.; NGAO, N. K. Microscale abrasive wear of polymeric materials. **Wear**, v. 255, n. 1–6, p. 742–750, 2003.

SILVA, W. M. DA. **Efeito da pressão de compactação e tamanho do pó de ferro na microabrasão do ferro sinterizado oxidado a vapor**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2003a.

SILVA, W. M. DA. **EFEITO DA PRESSÃO DE COMPACTAÇÃO E TAMANHO DO**

PÓ DE FERRO NA ABRASÃO DO FERRO SINTERIZADO OXIDADO A VAPOR.

[s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2003b.

SILVA, W. M.; BINDER, R.; DE MELLO, J. D. B. Abrasive wear of steam-treated sintered iron. **Wear**, v. 258, n. 1- 4 SPEC. ISS., p. 166–177, 2004.

TAKASHINA, N. T.; FLORES, M. C. X. **Indicadores de Qualidade e do Desempenho**. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1997.

TREZONA, R. I.; ALLSOPP, D. N.; HUTCHINGS, I. M. Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test. **Wear**, p. 225–229, 1999.

TURNER, B. N.; STRONG, R.; GOLD, S. A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. **Rapid Prototyping Journal**, v. 20, n. 3, p. 192–204, 2014.

VOLPATO, N. et al. **Manufatura Aditiva: Tecnologias e Aplicações da Impressão 3D**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2017.

WITS, W. W.; GARCÍA, J. R. R.; BECKER, J. M. J. How Additive Manufacturing Enables more Sustainable End-user Maintenance, Repair and Overhaul (MRO) Strategies. **Procedia CIRP**, v. 40, p. 693–698, 2016.

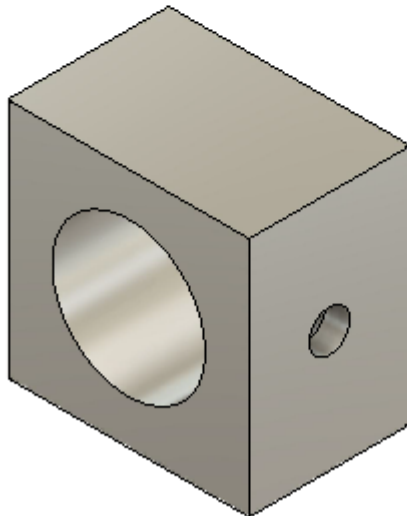
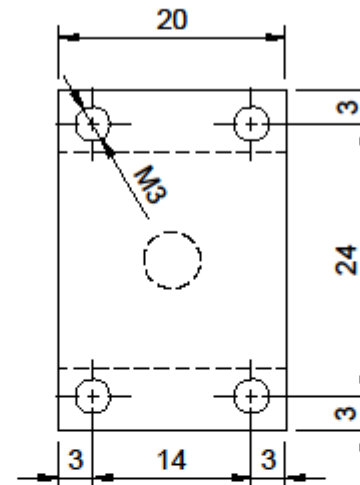
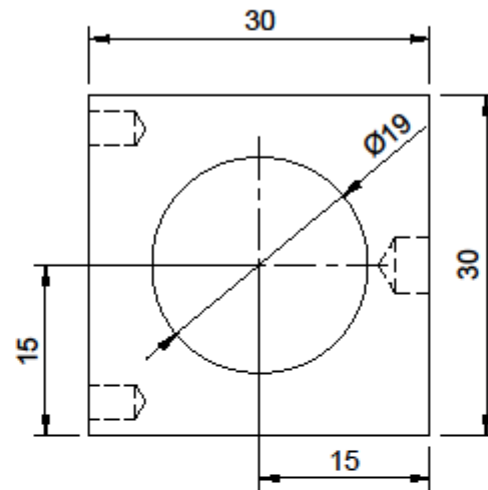
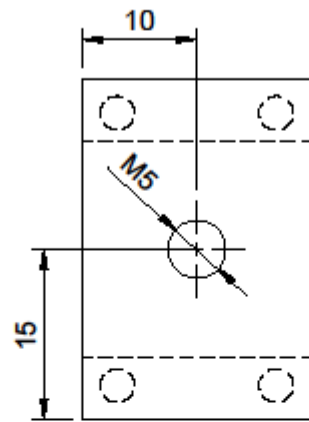
YAMAGUCHI, Y. **Tribology of Plastic Materials**. Nova York: Elsevier Science, 1990.

YEH, C. C.; CHEN, Y. F. Critical success factors for adoption of 3D printing. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 132, n. June 2017, p. 209–216, 2018.

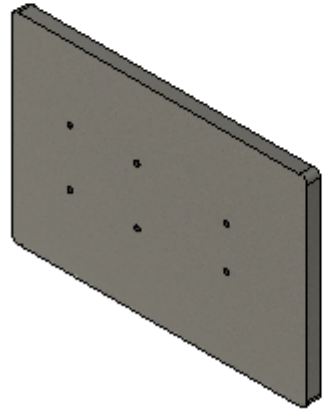
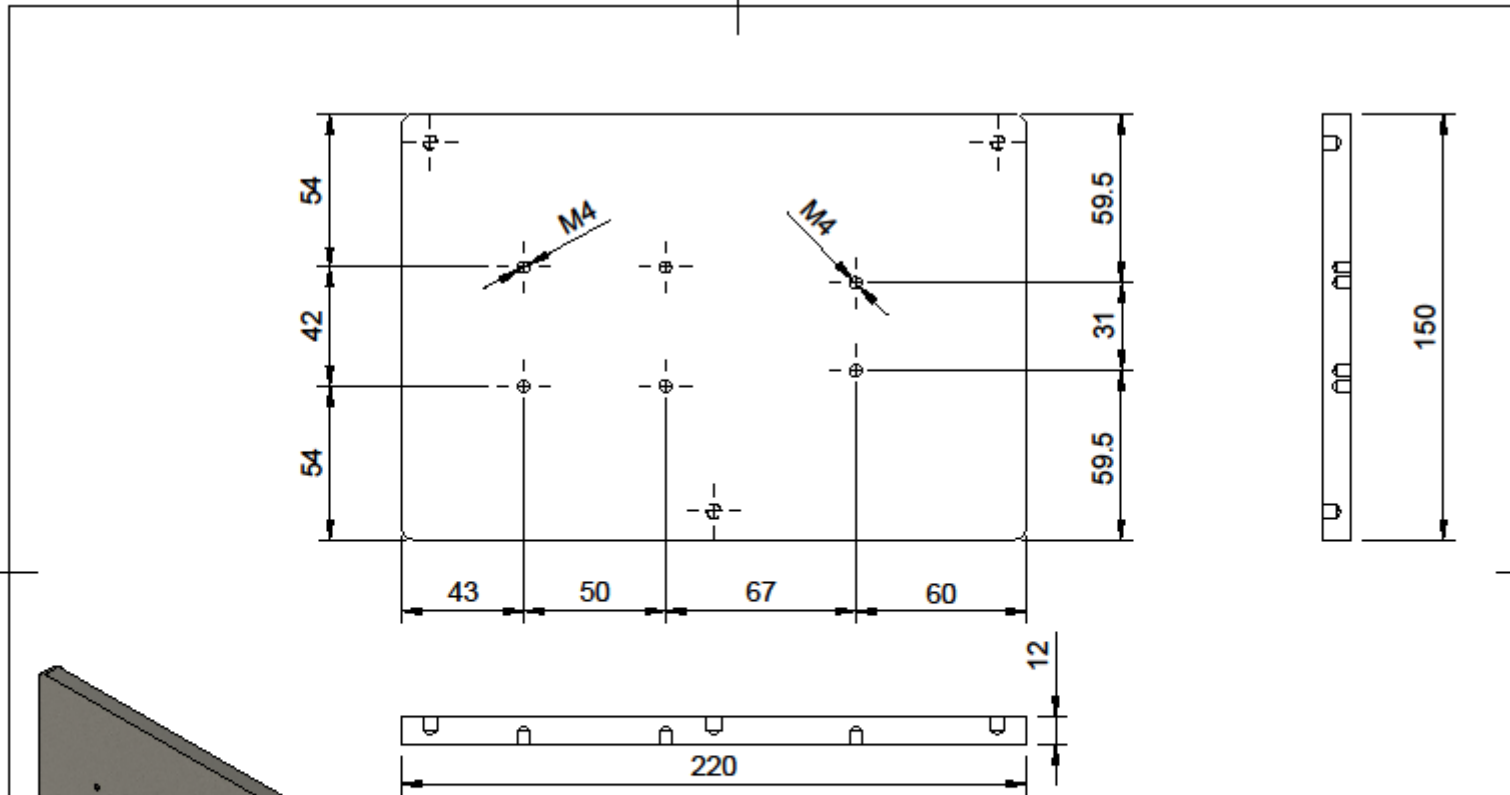
YOUSIF, B. F.; EL-TAYEB, N. S. M. Wear characteristics of thermoset composite under high stress three-body abrasive. **Tribology International**, v. 43, n. 12, p. 2365–2371, 2010.

ZUM GAHR, K. L. “**Microstructure and wear of materials**”. Volume 10 ed. [s.l.] Elsevier Science Publishers B. V., 1987.

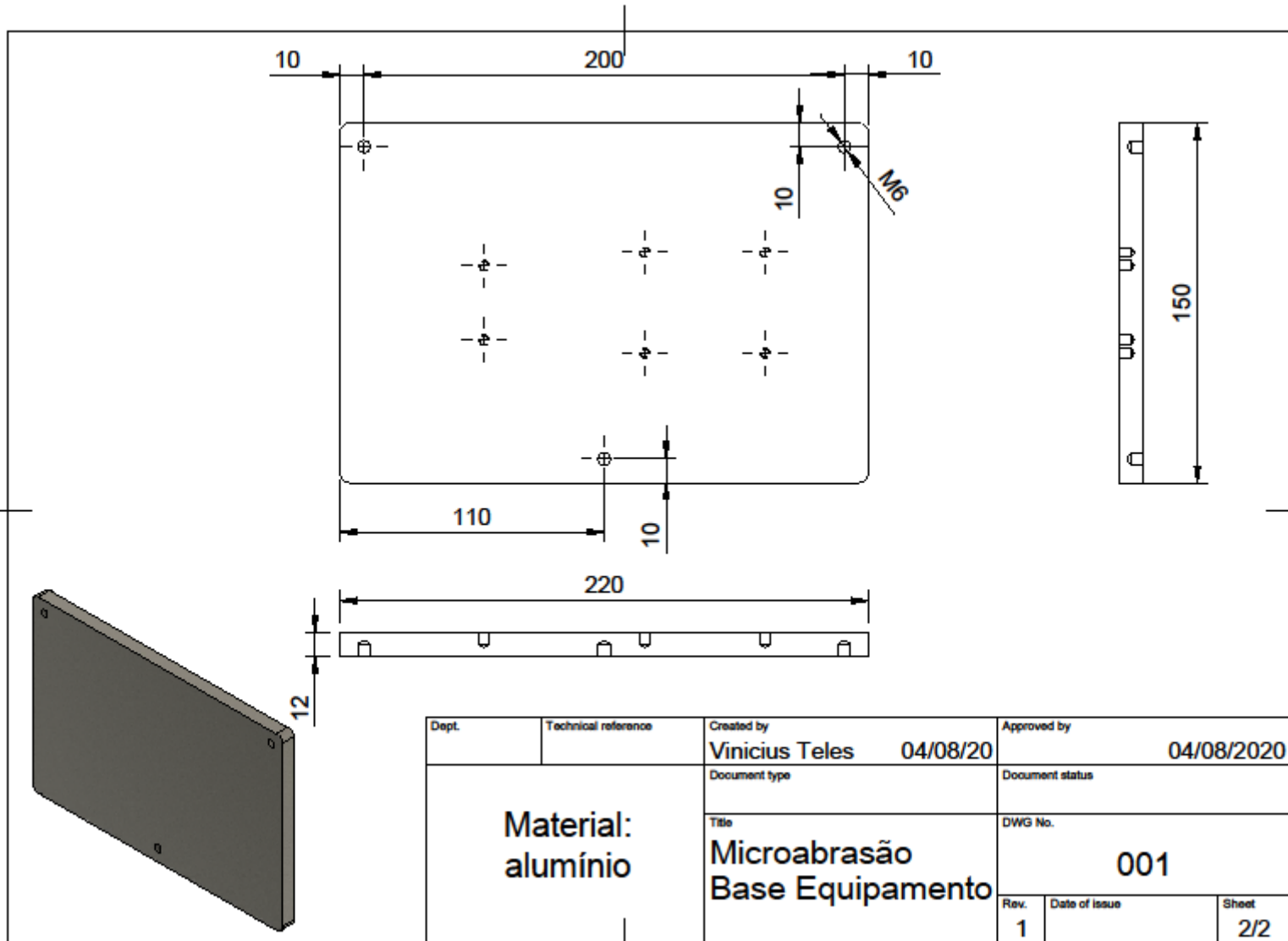
ANEXO

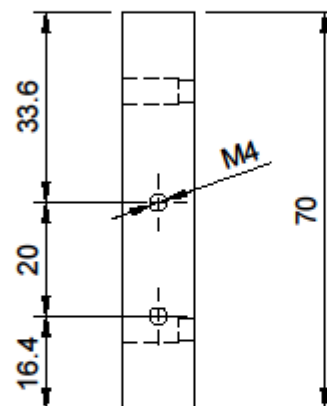
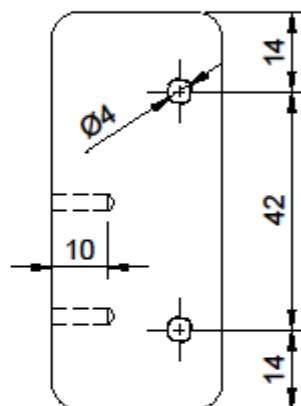
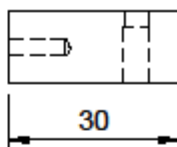


Dept.	Technical reference	Created by Vinicius Teles 04/08/2020	Approved by 04/08/2020
Material: alumínio		Document type	Document status
		Title Microabrasão Base alavanca	DWG No. 008
		Rev. 1	Date of issue

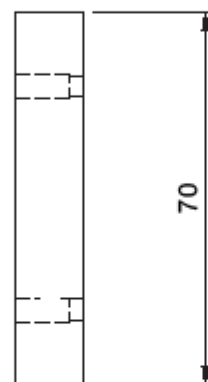
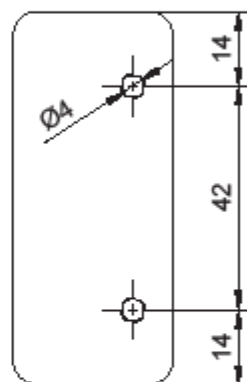
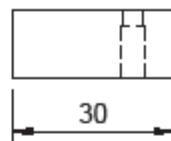


Dept.	Technical reference	Created by Vinicius Teles 04/08/20	Approved by 04/08/2020
Material: alumínio		Document type	Document status
		Title Microabrasão Base Equipamento	DWG No. 001
Rev. 1	Date of issue	Sheet 1/2	

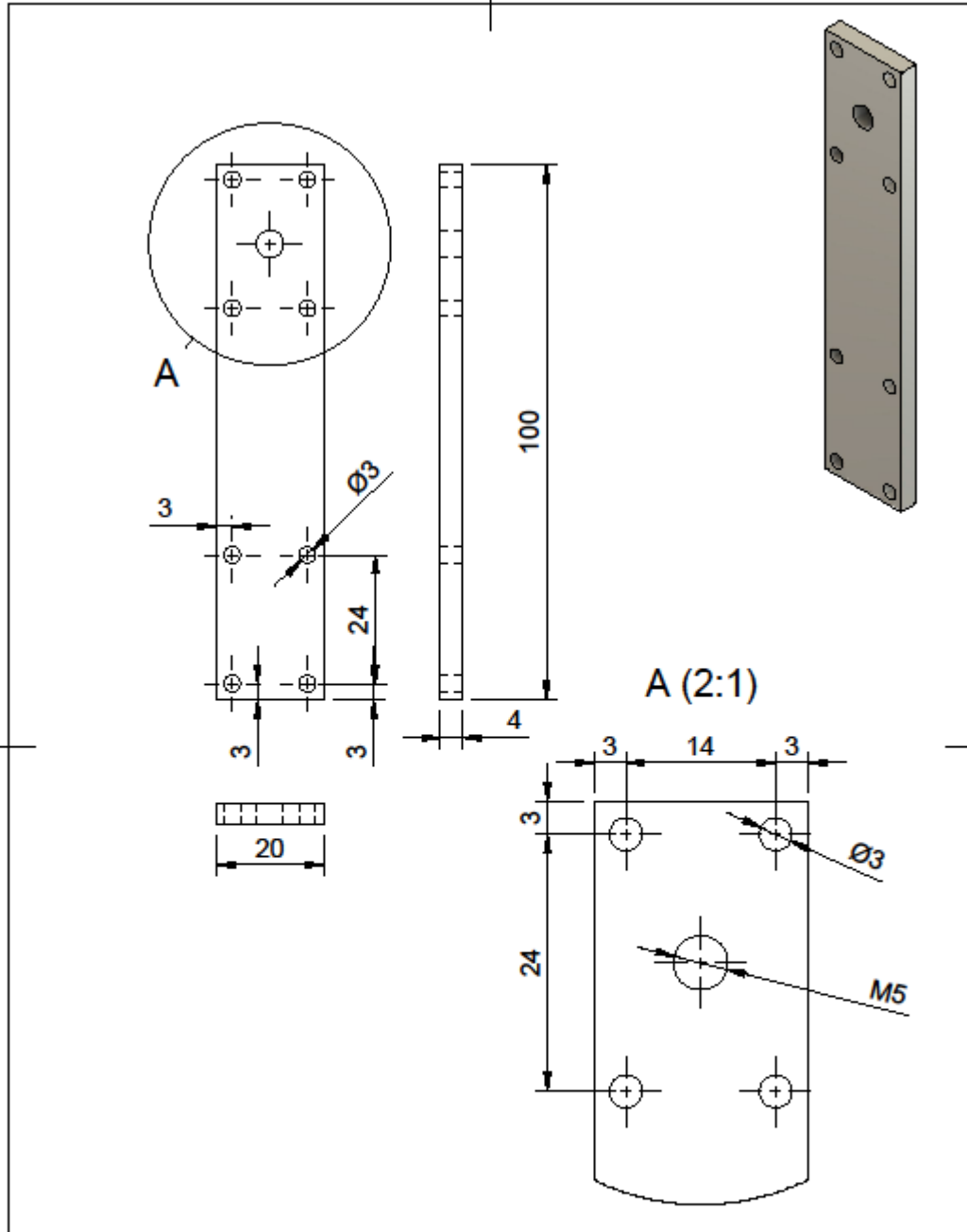




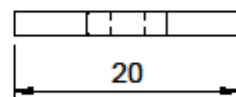
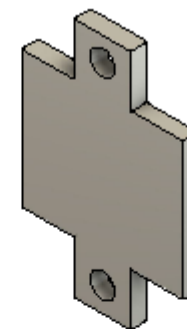
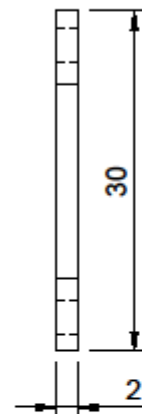
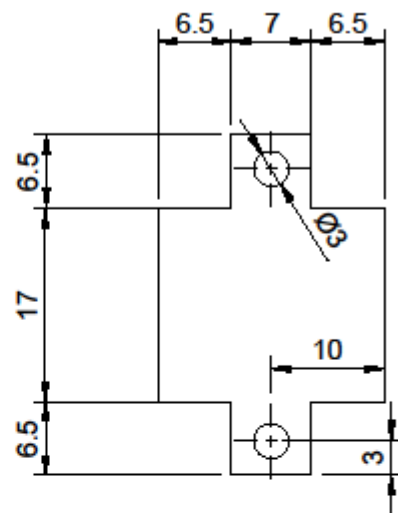
Dept.	Technical reference	Created by Vinicius Teles 04/08/2020	Approved by 08/04/2020	
Material: alumínio		Document type	Document status	
		Title Microabrasão Base mancal I	DWG No. 002	
		Rev. 1	Date of issue	Sheet 1/1



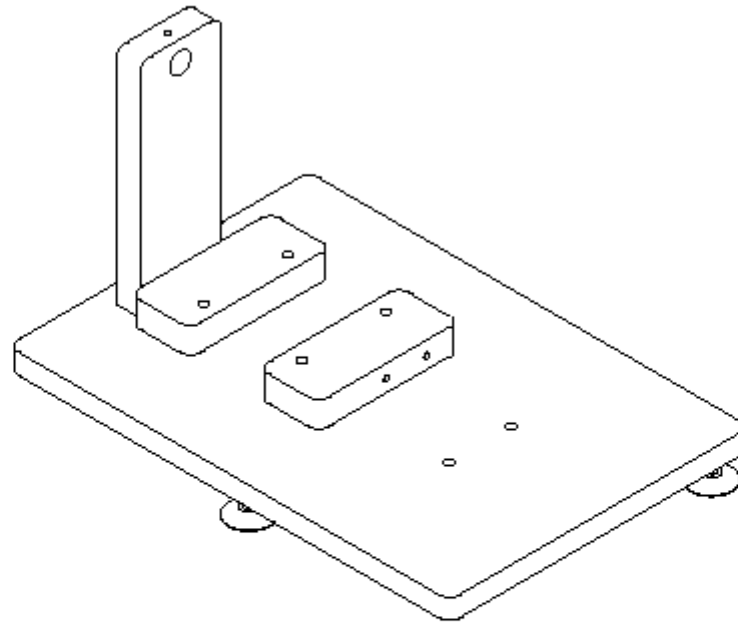
Dept.	Technical reference	Created by Vinicius Teles 04/08/2020	Approved by 08/04/2020	
Material: alumínio		Document type	Document status	
		Title Microabrasão Base mancal II	DWG No. 003	
		Rev. 1	Date of issue	Sheet 1/1



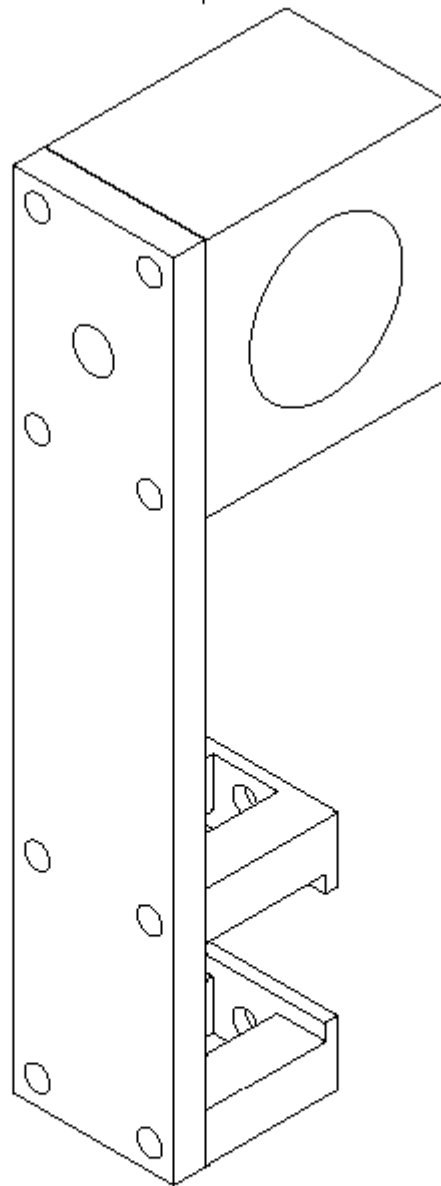
Dept.	Technical reference	Created by Vinicius Teles 04/08/2020	Approved by 04/08/2020
Material: alumínio	Document type	Document status	
	Title Microabrasão Braço alavanca	DWG No. 007	
		Rev. 1	Date of issue



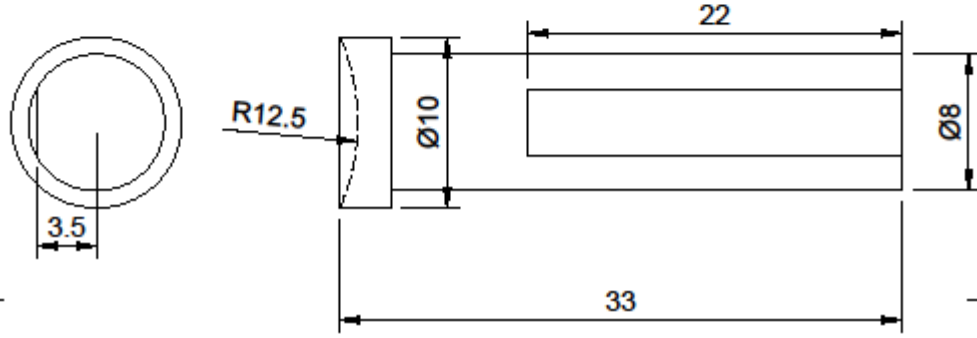
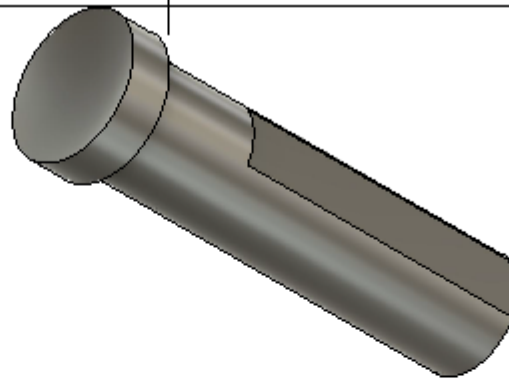
Dept.	Technical reference	Created by Vinicius Teles 04/08/2020	Approved by 04/08/2020	
Material: alumínio		Document type	Document status	
		Title Microabrasão Contra amostra	DWG No. 004	
		Rev. 1	Date of issue	Sheet 1/1



Dept.	Technical reference	Created by Vinicius Teles 04/08/2020	Approved by 04/08/2020	
Material: alumínio		Document type	Document status	
		Title Microabrasão	DWG No. 010	
		Rev. 1	Date of issue	Sheet 1/1

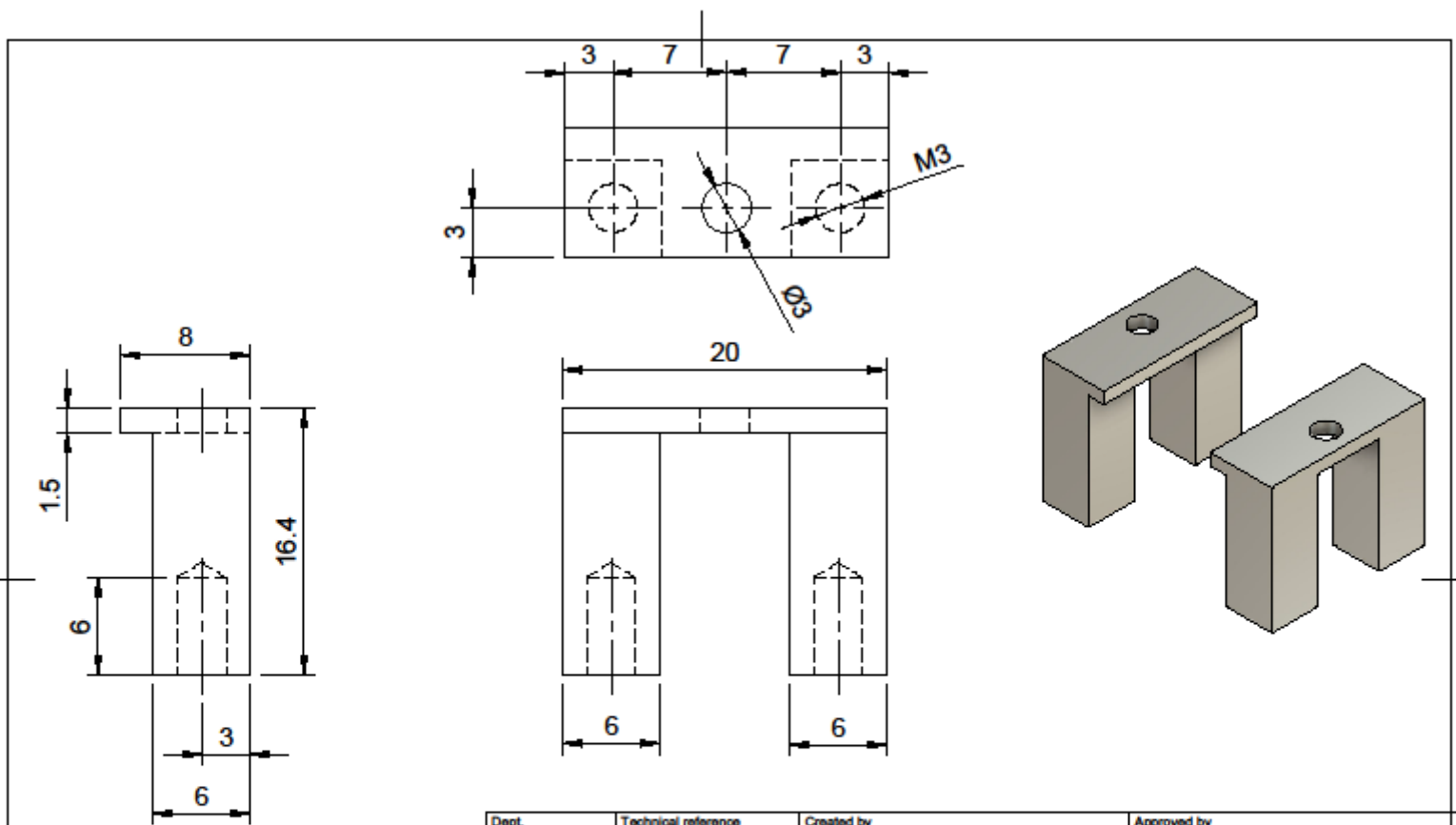


Dept.	Technical reference	Created by Vinicius Teles 04/08/2020	Approved by 04/08/2020	
Material: alumínio	Document type	Document status		
	Title Microabrasão Alavanca	DWG No. 009		
		Rev. 1	Date of issue	Sheet 1/1



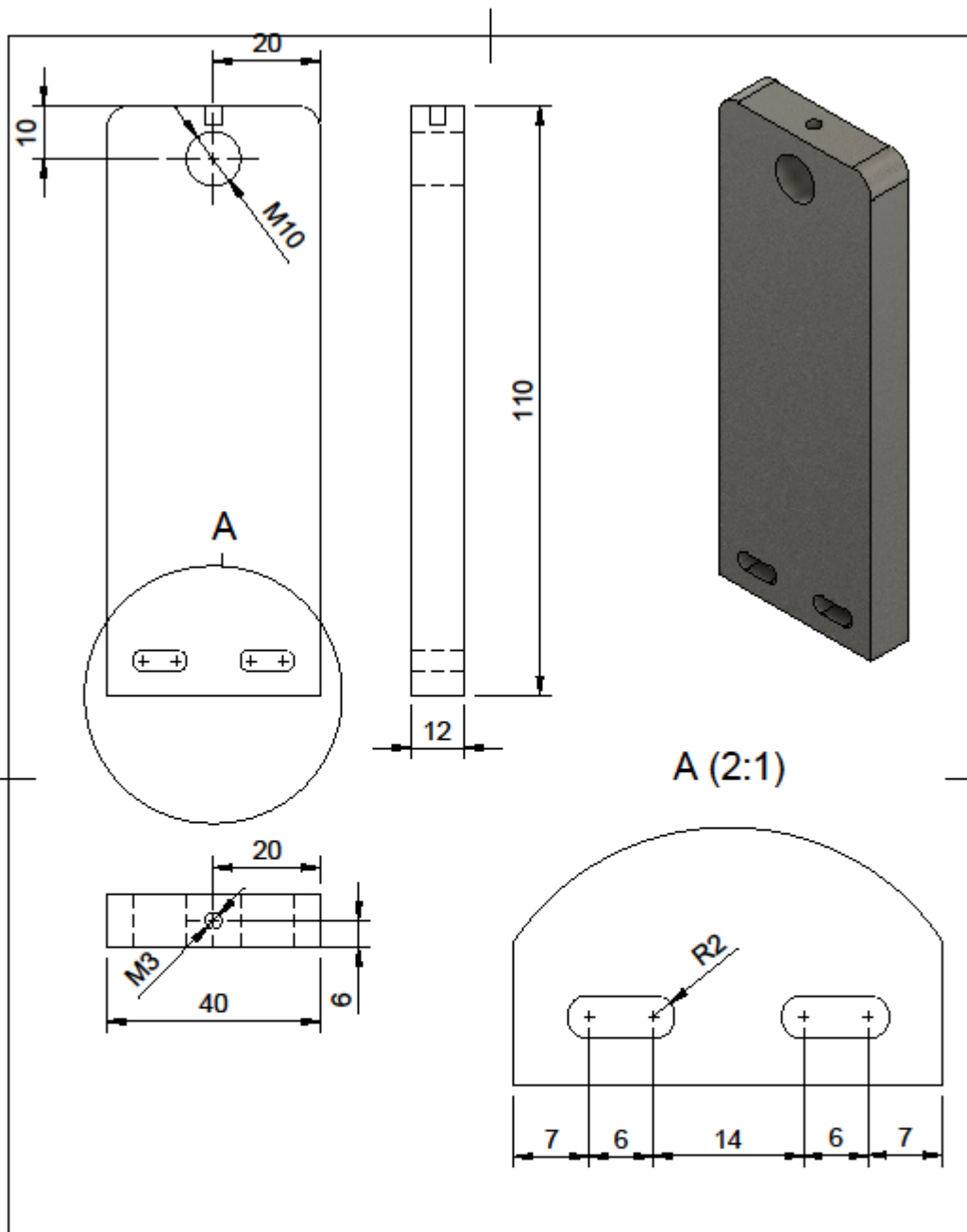
Quantidade: 2 peças

Dept.	Technical reference	Created by Vinicius Teles 04/08/2020	Approved by 04/08/2020
Material: alumínio	Document type	Document status	
	Title Microabrasão Porta esfera	DWG No. 008	
		Rev. 1	Date of issue



Quantidade: 2 peças

Dept.	Technical reference	Created by Vinicius Teles 04/08/2020	Approved by 04/08/2020
Material: alumínio		Document type	Document status
		Title Microabrasão Porta amostras	DWG No. 006
		Rev. 1	Date of issue



Dept.	Technical reference	Created by Vinicius Teles 04/08/2020	Approved by 04/08/2020
Material: alumínio	Document type	Document status	
	Title Microabrasão Torre	DWG No. 004	
		Rev. 1	Date of issue

