

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL – IFRS

DIEGO CHIARELLO

**APLICAÇÃO E DESEMPENHO DE FILME FINO DE *DLC* EM PINOS
EXTRATORES DE MOLDE DE INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS**

CAXIAS DO SUL
2022

DIEGO CHIARELLO

**APLICAÇÃO E DESEMPENHO DE FILME FINO DE DLC EM PINOS
EXTRATORES DE MOLDE DE INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais para a obtenção do grau de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Tecnologia e Engenharia de Materiais
Linha de Pesquisa: Tecnologia da Transformação de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Luís Gasparin

CAXIAS DO SUL
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C532a Chiarello, Diego

Aplicação e desempenho de filme fino de DLC em pinos extratores de molde de injeção de termoplásticos / Diego Chiarello ; orientador Alexandre Luís Gasparin. – Caxias do Sul, 2022.

xvi, 86 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Caxias do Sul. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais. Mestrado Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais. Caxias do Sul, 2022.

1. Ciência dos materiais. 2. Termoplásticos. 3. Filmes finos. 3. Moldes de injeção. 4. Tribologia. I. Gasparin, Alexandre Luís. II. Título.

CDU 678.02

DIEGO CHIARELLO

**APLICAÇÃO E DESEMPENHO DE FILME FINO DE *DLC* EM PINOS
EXTRATORES DE MOLDE DE INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS**

Trabalho Final apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre Profissional em Tecnologia e Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Daniela Lupinacci Villanova – IFRS campus Farroupilha

Prof. Dr. Daniel Amoretti Gonçalves – IFRS campus Caxias do Sul

Prof. Dr. Leandro Luís Corso – Universidade de Caxias do Sul – UCS

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Luís Gasparin – IFRS campus Caxias do Sul

Apresentado e aprovado em: 12, de dezembro de 2022.

Local da defesa: Caxias do Sul

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Jaime e Jaqueline e à minha irmã Gabriela, pelos valores e ensinamentos transmitidos ao longo da vida, e pelo carinho, apoio, incentivo e compreensão durante a realização deste trabalho;

A Deus, por abençoar e permitir a realização desta etapa em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pela proteção e por ter me guiado até aqui;

Ao meu orientador, o Prof. Dr. Alexandre Luís Gasparin, pelos ensinamentos, confiança, paciência e orientação dispendidos, pois sem esta dedicação, a conclusão deste trabalho não seria possível;

Ao Dr. Tiago Marcelo Reis, por propiciar a realização dos ensaios cíclicos, através do empréstimo do dispositivo de bancada;

Aos alunos de pós-graduação da UCS, Carla Daniela Boeira, Bruna Louise Perotti e Leonardo Mathias Leidens, pela disposição e orientações durante a deposição do filme de DLC e também durante a realização dos ensaios de caracterizações;

Aos membros da banca de defesa, por terem aceito participar desta importante etapa deste trabalho;

Aos colegas, Bruno Bueno, Celso Roman Jr, Eduardo Thomazi e Marcelo Broch, pelo auxílio e incentivo para a realização deste trabalho,

A minha família, meus pais Jaime e Jaqueline e minha irmã Gabriela, pelo incentivo, confiança e principalmente por compreenderem a ausência nesta etapa;

Aos professores do PPGTEM, pelo conhecimento transmitido nas aulas;

E a todos que não mencionei, mas de alguma forma contribuíram com este trabalho; muito obrigado!

***Nenhum vento é favorável a
quem não sabe para onde ir.***

(Sêneca)

RESUMO

Neste trabalho, pinos extratores de moldes de injeção de polímeros termoplásticos, produzidos originalmente em aço AISI H13 e nitretados a gás, foram revestidos com um filme fino de DLC (*Diamond Like Carbon*), fazendo par tribológico com buchas extratoras de aços AISI P20 e AISI H13 temperadas e revenidas. O filme fino de DLC foi depositado em uma câmara com sistema PECVD (deposição química a vapor assistida por plasma) com confinamento eletrostático. O filme de DLC apresentou uma camada uniforme, com espessura média de 3,34 μm e ausência de falhas entre o filme e o substrato após a sua deposição. Um dispositivo que simula o sistema de extração de um molde de injeção foi utilizado para testar o comportamento ao desgaste dos pares pino-bucha propostos, em função do aumento do número de ciclos. Diferentes materiais e condições de lubrificação foram testadas, buscando alternativas mais eficientes ao atual sistema que utiliza pinos nitretados a gás e graxa branca para moldes como lubrificante. Microscopia óptica (MO) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram utilizadas para caracterização microestrutural das amostras e análise da camada de DLC. O desgaste nos pinos foi avaliado quantitativamente por perda de massa e pela medição da espessura de camada em MEV, após 100.000 ciclos. Análises da variação da rugosidade da topografia das amostras por MEV, foram realizadas para verificar os impactos do ensaio de desgaste sobre a superfície das amostras. A dureza e adesão do filme de DLC, foram medidas através de ensaios de nanodureza e *nanoscratch test*, respectivamente. Complementarmente, as amostras foram analisadas por nanodureza, GDOES (espectroscopia de emissão óptica por descarga luminescente) e o coeficiente de atrito, por ensaio de riscamento. Os resultados da perda de massa mostram que para as amostras sem a utilização de graxa lubrificante a taxa de desgaste foi consideravelmente menor. Os pinos de menor desgaste foram os dos conjuntos PS e HS, ambos sem utilização de graxa, que apresentaram uma perda de massa de 5,400 e 5,467 mg, respectivamente. Tais resultados encontrados comprovam a possibilidade de utilização de pinos com revestimento de DLC sem a utilização de graxa lubrificante em sistemas extratores de moldes de injeção e que isto ainda propicia uma redução considerável na taxa de desgaste. O principal mecanismo de desgaste dos sistemas com DLC e lubrificados foi abrasão, devido à pasta abrasiva criada com partículas de DLC e a graxa. Logo, a condição de pinos com DLC sem a graxa obteve um melhor desempenho nos testes de bancada.

Palavras-chave: Filmes Finos; DLC; Pino e Bucha; Moldes de Injeção; Tribologia.

ABSTRACT

In this work, extractor pins of thermoplastic polymer injection molds, originally produced in AISI H13 steel and gas nitrided, were coated with a thin film of DLC (Diamond Like Carbon), making a tribological pair with extractor bushings of AISI P20 and AISI H13 steels quenched and tempered. The DLC thin film was deposited in a PECVD (plasma enhanced chemical vapour deposition) chamber with electrostatic confinement. The DLC film presented a uniform layer, with an average thickness of 3.34 μm and no gaps between the film and the substrate after its deposition. A device that simulates the extraction system of an injection mold was used to test the wear behavior of the proposed pin-bushing pairs, as a function of the increase in the number of cycles. Different materials and lubrication conditions were tested, looking for more efficient alternatives to the current system that uses gas nitrided pins and white grease for molds as a lubricant. Optical microscopy and Scanning Electron Microscopy (SEM) were used for the microstructural characterization of the samples and analysis of the DLC layer. Wear on the pins was quantitatively evaluated by mass loss and by measuring the layer thickness in SEM after 100,000 cycles. Analysis of the roughness variation of the topography of the samples by SEM was carried out to verify the impacts of the wear test on the surface of the samples. The hardness and adhesion of the DLC film were measured through nanohardness and nanoscratch tests, respectively. In addition, the samples were analyzed by nanohardness, GDOES (glow-discharge optical emission spectroscopy), and the friction coefficient, by scratching test. The mass loss results show that for the samples without the use of lubricating grease, the wear rate was considerably lower. The pins with the least wear were those of the PS and HS sets, both without the use of grease, which showed a mass loss of 5,400 and 5,467 mg, respectively. These results prove the possibility of using DLC coated pins without the use of lubricating grease in injection mold extractor systems and that this still provides a considerable reduction in the wear rate. The main wear mechanism for DLC and lubricated systems was abrasion, due to the abrasive paste created with DLC particles and the grease. Therefore, the condition of pins with DLC without the grease had a better performance in the bench tests.

Keywords: Thin Films; DLC; Pin and Bushing; Injection Molds; Tribology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema simplificado do preenchimento da cavidade de um molde de injeção.....	21
Figura 2 - Principais componentes de um molde do tipo duas placas e seus respectivos sistemas	25
Figura 3 - Sistema de extração simples	27
Figura 4 - Principais tipos de extratores a) pino extrator cilíndrico; b) pino extrator rebaixado; c) extrator de lâmina; d) extrator tubular.....	29
Figura 5 - Representação da configuração dos orbitais nas diferentes hibridizações possíveis para o átomo de carbono	31
Figura 6 - Estruturas cristalinas: a) do grafite e b) do diamante.....	32
Figura 7 - Nanoestruturas do carbono: a) fulereno, b) nanotubos, c) grafeno e d) carbono tipo diamante.....	32
Figura 8 - Diagrama de fases ternário para ligas de C-H amorfo.....	34
Figura 9 - Dispositivo de confinamento eletrostático	36
Figura 10 – Representação esquemática de um tribossistema.....	40
Figura 11 - Mecanismos de desgaste em um par tribológico metálico sob deslizamento	41
Figura 12 - Exemplo de desgaste abrasivo a dois e a três corpos.....	42
Figura 13 - Mecanismos de desgaste abrasivo	43
Figura 14 - Dimensões dos pinos extratores.....	46
Figura 15 - Etapas da deposição do Filme Fino de DLC.....	47
Figura 16 - Dimensões das buchas extratoras.....	49
Figura 17 - Curva de aquecimento Buchas H13.....	49
Figura 18 - Curva de aquecimento Buchas P20.....	50
Figura 19 - Dispositivo para ensaio de desgaste pino/bucha. a) quadro de comando, b) válvula pneumática, c) cilindro pneumático, d) placa móvel, e) placa fixa, f) base de fixação do sistema, g) sistema de guia linear.....	51
Figura 20 - Conjunto de amostras identificadas.	53
Figura 21 - Rugosímetro digital portátil.	55
Figura 22 – Balança analítica.	55
Figura 23 – a) cortadora de precisão, b) embutidora metalográfica, c) politriz automática.....	56

Figura 24 – a) Microscópio óptico; b) Microscópio eletrônico de varredura	57
Figura 25 – Microdurômetro digital.....	58
Figura 26 - Rugosidade dos Pinos	62
Figura 27 - Rugosidade das Buchas	63
Figura 28 – Taxa de desgaste dos pinos e buchas.	64
Figura 29 – Micrografia pino sem DLC.....	66
Figura 30 - Micrografias pinos com DLC. a) pino com DLC ampliação 1.000x MO. b) pino com DLC ampliação 10.000x MEV.....	67
Figura 31 - Micrografias do núcleo dos pinos.....	67
Figura 32 - Micrografia das buchas de H13.....	68
Figura 33 - Micrografia das buchas de P20.....	68
Figura 34 - MEV da camada superficial dos pinos antes do ensaio de desgaste.	70
Figura 35 - MEV camada superficial pino do conjunto HC após desgaste.....	71
Figura 36 - MEV camada superficial pino do conjunto HS após desgaste.	71
Figura 37 - MEV camada superficial pino do conjunto PC após desgaste	72
Figura 38 - MEV camada superficial pino do conjunto PS após desgaste	73
Figura 39 - MEV da topografia superficial dos pinos com DLC. a) sem desgaste. b) conjunto HS após desgaste. c) conjunto HC após desgaste.....	74
Figura 40 - MEV da região do ensaio de nanoesclerometria linear.....	75
Figura 41 - Gráfico da carga normal e força de atrito em função da distância percorrida	76
Figura 42 - MEV superfície da amostra submetida a nanoscratch test. a) aumento de 1000x. b) aumento de 5000x.....	77
Figura 43 - Características de falha de scratch test em revestimentos duros.	78
Figura 44 - Perfil da composição química em profundidade obtido por GDOES nos pinos de AISI H13 revestidos de DLC.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de processo para limpeza de amostras, deposição de intercamada e deposição de filme de DLC. _____	48
Tabela 2 - Composição química dos aços AISI H13 e AISI P20. _____	48
Tabela 3 - Configuração de conjuntos de amostras pino/bucha para ensaio de desgaste _____	52

LISTA DE SIGLAS ABREVIATURAS

°C	-	Grau <i>Celsius</i>
2D	-	Duas dimensões
a-C	-	Carbono Amorfo não Hidrogenado
a-C:H	-	Carbono Amorfo Hidrogenado
AISI	-	<i>American Iron and Steel Institute</i>
Ar	-	Argônio
ASTM	-	<i>American Society for Testing and Materials</i>
bar	-	Unidade de medida de pressão
C	-	Carbono
C₂H₂	-	Gás acetileno
C-C	-	Ligações carbono-carbono
C-H	-	Ligações carbono-hidrogênio
CNC	-	Comando Numérico Computadorizado
C	-	Cobalto
Cr	-	Cromo
Cu	-	Cobre
DIN	-	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
DLC	-	Carbono tipo diamante (<i>diamond like carbon</i>)
Fa	-	Força de atrito
Fn	-	Força normal
g	-	Grama
GDOES	-	Espectroscopia de Emissão Óptica por Descarga Luminescente (<i>glow-discharge optical emission spectroscopy</i>)
GPa	-	Gigapascal
H	-	Hidrogênio

H13	-	Aço ferramenta para trabalho a quente classe 13
H₂	-	Gás hidrogênio
HC	-	Conjunto de amostras pino-bucha composto por pino com DLC e buchas de H13, testados com lubrificação
HiPIMS	-	<i>High-Power Impulse Magnetron Sputtering</i>
HMDSO	-	Hexametildissiloxano
HRC	-	Dureza <i>Rockwell C (Hardness Rockwell C)</i>
HS	-	Conjunto de amostras pino-bucha composto por pino com DLC e buchas de H13, testados sem lubrificação
HV	-	Dureza Vickers (<i>Hardness Vickers</i>)
IBD	-	deposição por de feixe de íons
IFRS	-	Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul
ISO	-	<i>International Organization for Standardization</i>
K⁻¹	-	Coeficiente de expansão térmica linear
kV	-	Quilovolt
LACASUNE	-	Laboratório de Caracterização de Superfícies em Nanoescala
m	-	Metro
m/s	-	Metro por Segundo
MEV	-	Microscopia Eletrônica de Varredura
mg	-	Miligrama
Min	-	Minuto
mm	-	Milímetro
Mn	-	Manganês
mN	-	Milnewton
MO	-	Microscopia óptica
Mo	-	Molibdênio

MPa	-	Megapascal
MS	-	<i>magnetron sputtering</i>
N	-	Newton
NGLI	-	Instituto Nacional de Graxas Lubrificantes (<i>National Lubricating Grease Institute</i>)
Ni	-	Níquel
NITAL	-	Solução de ácido nítrico e álcool
nm	-	Nanômetro
O	-	Oxigênio
P.A.	-	Para análise
P20	-	Aço ferramenta para moldes classe 20
Pa	-	Pascal
PC	-	Conjunto de amostras pino-bucha composto por pino com DLC e buchas de P20, testados com lubrificação
PECVD	-	deposição química a vapor assistida por plasma (<i>plasma enhanced chemical vapour deposition</i>)
ppm	-	Partes por milhão
PS	-	Conjunto de amostras pino-bucha composto por pino com DLC buchas de P20, testados sem lubrificação
RF	-	Radiofrequência
Rz	-	Rugosidade Superficial Média
sccm	-	Centímetros cúbicos padrão por minuto (<i>Standard cubic centimeters per minute</i>)
SE	-	Elétrons secundários (<i>secondary electrons</i>)
Si	-	Silício
ta-C	-	Carbono Tetraédrico
ta-C:H	-	Carbono Amorfo Tetraédrico Hidrogenado

UCS	-	Universidade de Caxias do Sul
UPFParque	-	Parque Científico Tecnológico da Universidade de Passo Fundo
V	-	Vanádio
W	-	Tungstênio
WS	-	Aço prata tungstenado
μ	-	Coefficiente de atrito
μm	-	Micrometro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 JUSTIFICATIVA E PROBLEMA.....	18
1.2 OBJETIVOS	19
1.2.1 Objetivo geral	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
2 REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1 MOLDES DE INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS.....	20
2.1.1 Classificação dos moldes de injeção.....	22
2.1.2 Sistemas de um molde de injeção.....	23
2.1.3 Sistema de extração de moldes de injeção	25
2.1.4 Sistema extrator por placa impulsora	28
2.2 CARBONO AMORFO	30
2.2.1 Estrutura química	30
2.2.2 Técnicas de deposição.....	34
2.2.3 Propriedades e aplicações do DLC	36
2.2.4 Aderência	38
2.3 TRIBOLOGIA.....	39
2.3.1 Desgaste em par metálico sob deslizamento	41
2.3.2 Atrito em par metálico sob deslizamento.....	43
2.3.3 Classificação de ensaios de desgastes.....	44
3 MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1 MATERIAIS	46
3.1.1 Pino extrator com filme fino de DLC.....	46
3.1.2 Buchas extratoras (AISI P20 e AISI H13).....	48
3.1.3 Dispositivo de simulação de sistema extrator de moldes de injeção	50
3.2 MÉTODOS	51
3.2.1 Ensaio de desgaste	51
3.2.1.1 Definição dos conjuntos de amostras.....	52
3.2.1.2 Definição dos parâmetros de ensaio	53
3.2.2 Caracterização das amostras.....	54
3.2.2.1 Rugosidade	54

3.2.2.2 Perda de massa	55
3.2.2.3 Análise Metalográfica	55
3.2.2.4 Microdureza.....	57
3.2.2.5 Nanodureza.....	58
3.2.2.6 Variação da espessura de camada	58
3.2.2.7 Topografia	59
3.2.2.8 Adesão do filme.....	60
3.2.2.7 GDOES	60
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	62
4.1 RUGOSIDADE	62
4.2 PERDA DE MASSA.....	64
4.3 METALOGRAFIA.....	65
4.4 MICRODUREZA.....	68
4.5 NANODUREZA	69
4.6 VARIAÇÃO DA ESPESSURA DE CAMADA	69
4.7 TOPOGRAFIA	73
4.8 ADESÃO DO FILME	74
4.9 GDOES.....	78
5 CONCLUSÕES.....	81

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de polímeros com propriedades melhoradas tem chamado a atenção da indústria mundial. Há uma forte tendência, por exemplo, no setor automotivo, onde busca-se a substituição de componentes metálicos por poliméricos, visando ganhos com a diminuição do peso e melhoria da eficiência energética dos veículos. O aumento da produção de peças plásticas requer constante pesquisa também no que se refere aos moldes de injeção utilizados no processo (IMIHEZRI *et al.*, 2006; SHAMEEM *et al.*, 2017).

O processo de moldagem por injeção de termoplásticos, por se tratar de um processo de produção de peças seriadas e em larga escala, requer constante evolução quanto aos materiais utilizados em seu ferramental. Os moldes de injeção facilmente atingem centenas de milhares de ciclos de injeção, o que sujeita os componentes ao desgaste por deslizamento, em função das movimentações que ocorrem durante o ciclo de injeção. Os principais componentes dos moldes sujeitos a esse tipo de desgaste são o sistema extrator, as colunas e as buchas guias e os sistemas móveis (gavetas) (MENGES; MICHAELI; MOHREN, 2001).

Manutenções preventivas e corretivas em moldes de injeção se fazem necessárias através de desmontagem para substituição dos lubrificantes (graxa) e verificação do estado geral de componentes suscetíveis a desgaste. Buscando aumento na eficiência e competitividade, medidas que visem melhorias nas propriedades superficiais dos materiais são de grande importância para a produtividade do processo. Através da melhoria das propriedades tribológicas, como por exemplo a diminuição do coeficiente de atrito, é possível aumentar os intervalos entre paradas para lubrificação dos componentes de um molde (KATO; ADACHI, 2000; PÖTSCH, 2007).

A busca por melhorias nas propriedades tribológicas de materiais têm impulsionado avanços significativos nas tecnologias de revestimentos de superfície. Os revestimentos superficiais nanoestruturados são alternativas recentes que permitem ser aplicados em componentes já fabricados, não alterando significativamente suas dimensões ou geometrias (BOEIRA, 2016).

Em função desta demanda por novas técnicas, os filmes finos de DLC (*Diamond like Carbon*) foram descobertos em meados dos anos 1970, e devido as

suas propriedades tribológicas, tornam-se candidatos a eliminar a necessidade de utilização de lubrificantes em suas utilizações (BOEIRA, 2016; NASCIMENTO, 2020).

Os filmes finos de DLC são um material de carbono amorfo hidrogenado (a-C:H) que tem atraído interesse científico e demonstrado grande sucesso industrial, devido a seu excepcional desempenho mecânico e propriedades tribológicas exclusivas, o que abre oportunidade para novas aplicações que podem contribuir solucionando problemas (A.E. CRESPI, L.M. LEIDENS, C. AGUZZOLI, F. ALVAREZ, 2010; CEMIN *et al.*, 2015).

Tendo em vista as paradas atualmente realizadas para lubrificação no sistema extrator de moldes de injeção de termoplásticos e os impactos que elas causam, o presente trabalho busca avaliar o impacto da aplicação de filmes finos de DLC sobre pinos extratores em alternativa ao sistema atual que utiliza pinos nitretados a gás. Devido as propriedades tribológicas do DLC, como o baixo coeficiente de atrito e de agir como um lubrificante sólido, o presente trabalho avalia a possibilidade de eliminação do uso de graxa branca no atual par tribológico pino-bucha de sistemas extratores.

Para tanto, tal estudo propôs quatro diferentes configurações de amostras, com diferentes materiais de bucha extratora e diferentes condições de lubrificação, à fim de verificar qual configuração melhor se adapta a esse sistema tribológico.

1.1 JUSTIFICATIVA E PROBLEMA

O uso de lubrificantes em pinos de extração é comumente aplicado no processo de injeção de termoplásticos para auxiliar na movimentação de partes móveis do sistema extrator. No entanto, o uso desses lubrificantes acarreta na necessidade de paradas para manutenção e desmontagem do molde para substituição do lubrificante em determinados intervalos de operação, bem como, pode contaminar as peças poliméricas injetadas, o que implica em perda de produtividade (KAZMER, 2007; REES, 2002)

Ao avaliar o tribossistema pino de extração e bucha, o presente trabalho busca uma alternativa para eliminar os lubrificantes (graxa branca) e apresentar as vantagens do revestimento DLC, bem como, as possíveis melhoras que ele pode proporcionar ao sistema atual através de suas características propriedades.

1.2 OBJETIVOS

Este estudo prospecta possíveis contribuições da aplicação de revestimento de DLC em componentes de moldes de injeção de termoplásticos, visando buscar melhorias no que se refere ao desgaste destes componentes.

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo geral, avaliar o comportamento de desgaste de um filme de DLC depositado na superfície de componentes de moldes de injeção de termoplásticos, buscando uma alternativa ao sistema atual através da eliminação do uso de graxa como agente lubrificante.

1.2.2 Objetivos específicos

- Depositar filmes finos de DLC sobre pinos extratores de moldes de injeção, pelo processo de deposição química a vapor assistida por plasma (PECVD);
- Executar a simulação dos conjuntos pino-bucha propostos, em dispositivo de bancada através de ensaio cíclico de desgaste;
- Caracterizar a composição química e microestrutura do filme fino de DLC, para melhor identificação dos fenômenos envolvidos;
- Mensurar a resistência ao desgaste e verificar a influência das diferentes condições de lubrificação dos pares pino-bucha, em ensaio cíclico;
- Verificar a influência do material da bucha extratora no desgaste dos pinos;
- Determinar a resistência ao desgaste de cada par tribológico proposto após 100.000 ciclos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

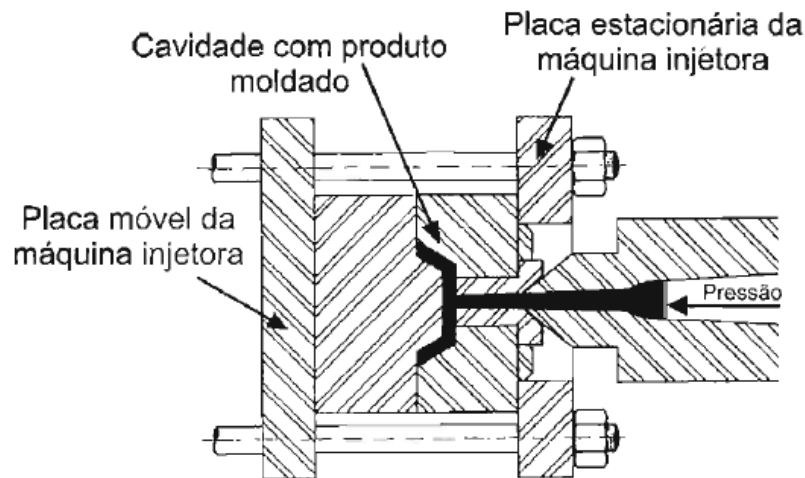
Neste capítulo encontra-se descrita uma breve abordagem teórica com base na revisão da literatura, sobre os principais tópicos relacionados ao assunto de estudo do presente trabalho. A seguir estão descritos alguns aspectos fundamentais referentes aos moldes de injeção de termoplásticos, às características e propriedades do carbono amorfo e do DLC e, também, aos aspectos teóricos referentes à tribologia.

2.1 MOLDES DE INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS

O processo de moldagem por injeção é um dos principais métodos de produção para o processamento de termoplásticos. Neste processo, é necessária a utilização de uma ferramenta capaz de dar a forma desejada à peça, a qual é chamada de molde de injeção (HARADA, 2004).

O molde é fixado na máquina de injeção, a qual transfere por meio de pressão o material termoplástico fundido para o interior das cavidades, as quais possuem o formato da peça desejada. Estando o material fundido no interior da cavidade, ocorre o resfriamento através do sistema de refrigeração do molde e a posterior abertura do molde. A parte móvel do molde se movimenta em relação à parte fixa e a peça injetada, que geralmente fica fixa na parte móvel do molde, é removida pela ação do sistema extrator, permitindo o fechamento do molde e início de um novo ciclo de injeção. A Figura 1 apresenta um esquema simplificado do preenchimento da cavidade de um molde de injeção de termoplásticos (MENGES; MICHAELI; MOHREN, 2001).

Figura 1 - Esquema simplificado do preenchimento da cavidade de um molde de injeção



Fonte: Harada (2004)

Antes que qualquer peça possa ser moldada, um molde de injeção adequado deve ser projetado, fabricado e aprovado. Ao se projetar um molde de injeção, as primeiras considerações referem-se ao peso, tamanho, desenho da peça, precisão dimensional desejada, e qualidade superficial da peça. Posteriormente, decide-se sobre a localização e a quantidade de cavidades do molde, o local mais adequado para as entradas e os elementos de extração, a necessidade de insertos metálicos, roscas e outras particularidades (HARADA, 2004).

As principais vantagens deste processo são:

- Rota direta da matéria-prima para a peça acabada;
- Pouquíssimo acabamento, ou nenhum, das peças moldadas,
- Alto nível de automatização;
- Alta reprodutibilidade;
- Baixos custos de peças para grandes volumes (MENGES; MICHAELI; MOHREN, 2001).

As maiores restrições do processo se referem à espessura da parede da peça que, geralmente, não deve exceder alguns milímetros, e à forma da peça que, deve permitir a desmoldagem (KAZMER, 2007; MENGES; MICHAELI; MOHREN, 2001).

Além do projeto inicial e manutenção durante o trabalho, a confiabilidade e a vida útil de um molde são determinadas principalmente pelo material utilizado no molde, seu tratamento térmico e a qualidade das operações de usinagem durante a fabricação (KAZMER, 2007; MENGES; MICHAELI; MOHREN, 2001).

O molde de injeção é, em si, um sistema complexo composto de vários componentes que estão sujeitos a muitos ciclos de temperatura e tensões. A constituição de um molde segue o princípio típico de montagem de placas de aço em determinada ordem, a fim de obter-se a estrutura básica do molde de injeção. O conceito de projeto e construção de um molde de injeção pode ter as mais variadas formas, dependendo da geometria do produto, do material a ser moldado, das características de qualidade do produto, da quantidade de peças a ser produzida, entre outros fatores (KAZMER, 2007; REIS, 2017).

2.1.1 Classificação dos moldes de injeção

Os moldes de injeção de termoplásticos, podem apresentar várias configurações de acordo com os requisitos de projeto do molde e do componente, seguindo diferentes critérios de classificação por diferentes autores. Harada (2004) classifica os moldes de injeção basicamente conforme os tipos de sistemas de alimentação e de extração. Esses são influenciados pela geometria do componente, matéria-prima e máquina injetora a ser utilizada, conforme a solução adotada pelo projetista.

Segundo Pötsch (2007) há diferentes princípios de unidades funcionais que podem ser usados como base para a classificação de moldes de injeção. Os critérios para essa classificação podem ser: matéria-prima processada, projeto básico do molde, sistema de extração, sistema de alimentação, número de cavidades, número de linhas de abertura e tamanho do molde.

Menges (2001) defende que a classificação dos moldes deve ser realizada somente baseada no sistema de extração, pois estes estão diretamente relacionados com a quantidade de mão de obra para fabricação do molde e, conseqüentemente, com os custos e complexidade da fabricação. Tal classificação resulta nos seguintes moldes: de duas placas, com placa extratora, com gaveta, com cavidades partidas, com núcleo rotativo (dispositivos de desrosquear) e de três placas.

Já Kazmer (2007), classifica como: moldes de injeção de duas placas, moldes de três placas e moldes com partes móveis.

Outra classificação para os moldes de injeção, é estabelecida através da norma técnica DIN E 16750 – “Moldes de Injeção e Compressão para Moldagem de Componentes”, a qual classifica os diferentes tipos de moldes como sendo: molde básico (molde de duas placas), molde de três placas, molde sanduíche, molde de canal quente, molde com elementos móveis (gavetas) e molde com placa extratora.

2.1.2 Sistemas de um molde de injeção

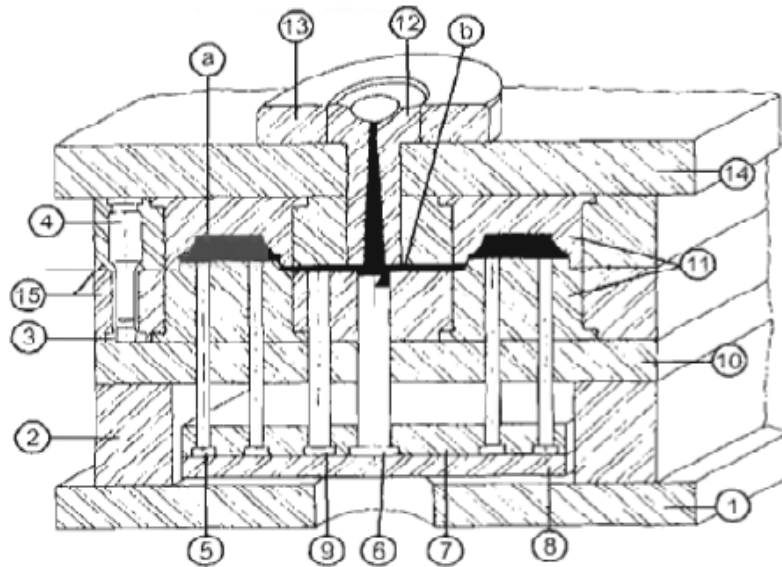
A constituição básica de um molde de injeção se dá por um conjunto de sistemas, sendo que cada um deles possui suas funções específicas. Reis (2017), classifica os sistemas de um molde da seguinte forma:

- Estrutura do molde: as placas, calços e suportes que tem como função principal suportar os outros sistemas e possibilitar a fixação do molde na máquina injetora;
- Sistema de moldagem: composto basicamente pelos machos, cavidades e postiços, tem a função de dar forma e garantir o dimensional desejado ao produto;
- Sistema de alimentação: constituído pela bucha de injeção, canais de distribuição e canais de ataque, tem como objetivo conduzir o material fundido do bico da máquina injetora até a cavidade do molde, este sistema pode ser com canais quentes ou canais frios;
- Sistema de alinhamento: possui os componentes principais as colunas e buchas guias, pinos guias e centralizadores, a função desse sistema é garantir o alinhamento entre as placas do molde, assim como o alinhamento entre as metades móvel e fixa;
- Sistema de extração: os principais componentes são os extratores, placa impulsora e sistema de guiamento da placa impulsora constituído de coluna e bucha guia; este sistema tem como função remover o produto moldado do molde;

- Sistema de refrigeração: este sistema é composto por canais usinados em várias partes do molde, sendo as principais, as cavidades, machos e postigos; este sistema tem como função permitir a circulação de fluido refrigerante para remover o calor do molde e solidificar o produto injetado;
- Sistemas móveis: apresentam como principais componentes, gavetas, pinos de arraste, placas de deslizamento e hastes de articulados, estes sistemas são utilizados quando o produto injetado apresenta orifícios ou reentrâncias em direções diferentes da direção de abertura do molde.

A Figura 2 apresenta os principais componentes de um molde de injeção do tipo duas placas, bem como, o sistema correspondente a cada componente do molde.

Figura 2 - Principais componentes de um molde do tipo duas placas e seus respectivos sistemas



Nº	Componente	Sistema
1	Placa de fixação inferior	Estrutura do molde
2	Espaçados	Estrutura do molde
3	Bucha guia	Sistema de alinhamento
4	Coluna guia	Sistema de alinhamento
5	Pino extrator	Sistema de extração
6	Extrator de canal	Sistema de extração
7	Placa porta extratores	Sistema de extração
8	Placa impulsora	Sistema de extração
9	Pino de retorno	Sistema de extração
10	Placa suporte	Estrutura do molde
11	Postiços	Sistema de moldagem
12	Bucha de injeção	Sistema de alimentação
13	Anal de centragem	Estrutura do molde
14	Placa de fixação superior	Estrutura do molde
15	Placa de montagem de postigos	Estrutura do molde
a	Cavidade	Sistema de moldagem
b	Canal de distribuição	Sistema de alimentação

Fonte: Harada (2004) e Reis (2017)

2.1.3 Sistema de extração de moldes de injeção

Após o resfriamento e a solidificação, a peça moldada deve ser removida do molde. Idealmente, a extração da peça deveria ocorrer apenas pela ação da gravidade após a abertura do molde, porém, na maioria dos casos, a peça plástica fica aderida ao macho da cavidade. Isso se deve principalmente ao formato da peça e também à contração do material que ocorre durante a solidificação. Sendo assim, se faz necessário um sistema que auxilie na remoção da peça para fora do molde; este

sistema é denominado de sistema de extração (KAZMER, 2007; MENGES; MICHAELI; MOHREN, 2001).

O extrator é geralmente acionado mecanicamente pela abertura da máquina injetora. Se esta disposição do sistema de extração não for suficiente, a extração pode ser projetada para ocorrer mecânica ou hidraulicamente (MENGES; MICHAELI; MOHREN, 2001).

O sistema de extração é normalmente construído na parte móvel do molde de injeção. A abertura do molde faz com que o sistema extrator seja acionado e movido em direção à linha de partição do molde e ejete a peça moldada (MENGES; MICHAELI; MOHREN, 2001).

Para evitar a deformação da peça injetada e obter uma extração mais suave, a quantidade de pinos extratores em um molde deve ser a maior possível assim como o tamanho destes, tendo em vista que a maior área de contato entre os pinos extratores e o produto propicia uma melhor distribuição das forças sobre o mesmo (REIS, 2017).

No projeto e desenvolvimento do sistema de extração, deve-se considerar os diversos fatores envolvidos e que resultam na força necessária para a extração, como por exemplo, ângulos de saída da peça, acabamento superficial do molde, propriedades do material e temperatura de extração. A temperatura de extração é um fator muito importante, pois o aumento desta ocasiona diretamente no aumento do coeficiente de atrito entre o polímero injetado e a superfície do molde (RODRIGUES; PONTES, 2013).

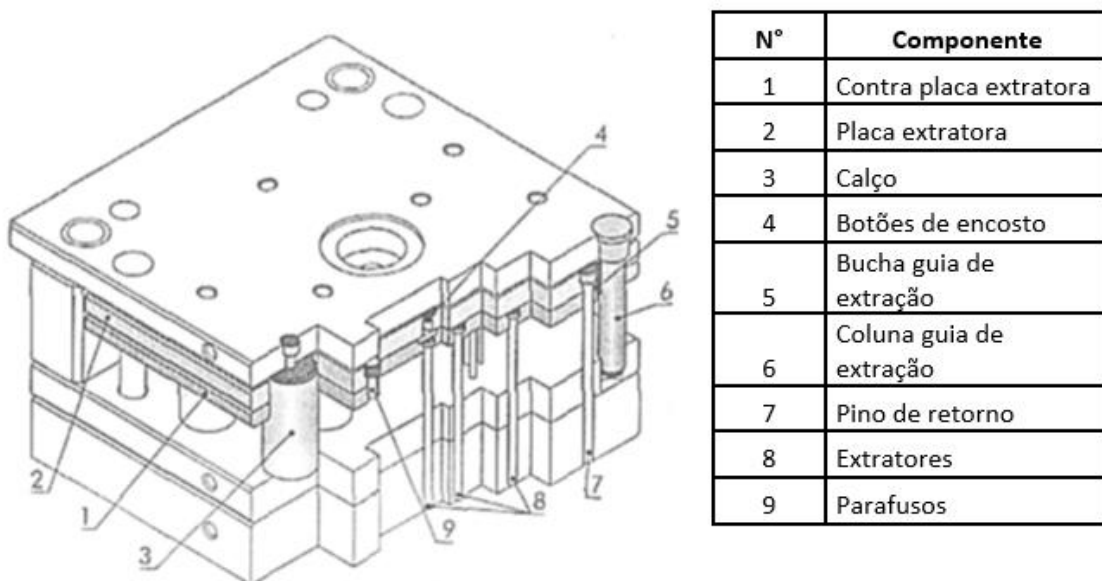
O sistema de extração de um molde de injeção é composto basicamente pelos seguintes componentes com suas respectivas funções:

- Placa extratora: posiciona os extratores e promove o seu acionamento;
- Contra placa extratora: placas onde se alojam os extratores, pinos de retorno e buchas guias;
- Pinos de retorno: promovem o recuo do sistema de extração, assegurando que os extratores estejam na posição correta no momento de início do ciclo de injeção; são normalmente pinos semelhantes aos extratores, porém com maior diâmetro;

- Botões de encosto: fazem a separação entre a placa extratora e a placa base inferior, permitindo que eventuais sujidades acumuladas nesta região durante a produção não venham a prejudicar o funcionamento do sistema;
- Colunas e buchas-guia: normalmente são quatro, distribuídas nas extremidades da contra placa extratora, têm a função de garantir o alinhamento do sistema durante a movimentação do mesmo;
- Extratores: têm a função de atuarem sobre o produto injetado com o objetivo de removê-lo do molde, os extratores podem ser de diversos tipos, dependendo da temperatura de extração, quantidade e localização dos pinos no produto (REIS, 2017).

A Figura 3 apresenta um sistema extrator simples, com os seus principais componentes.

Figura 3 - Sistema de extração simples



Fonte: Rodrigues (2007)

A classificação de um sistema de extração subdivide-se em: extração por placa impulsora, extração por ar comprimido e extração por núcleo rotativo. No sistema por placa impulsora, a extração do produto se dá pelo deslocamento de elementos de uma placa extratora que faz parte do molde e é acionada diretamente pela placa impulsora. Já no sistema de extração por ar comprimido, é realizada a introdução de ar

comprimido entre a face do molde e o produto moldado e este então, é extraído do macho do molde através da eliminação do vácuo existente entre peça e molde. Por fim, o sistema de extração por núcleo rotativo é utilizado no processo de injeção de peças que contenham roscas em sua geometria, sendo que o acionamento do sistema extrator se dá por cremalheira e pinhão, engrenagens helicoidais ou parafusos sem fim, os quais realizam o movimento de rotação dos núcleos (macho ou fêmea) e consequente liberação do produto moldado (HARADA, 2004).

2.1.4 Sistema extrator por placa impulsora

Dos sistemas anteriormente citados, o sistema por placa impulsora é o mais utilizado, pois se aplica a uma grande gama de geometrias e tamanhos de peças, desde que estas apresentem apenas uma direção de extração, ou seja, não possuam reentrâncias, negativos ou orifícios laterais. Para estes casos os extratores podem ser de diversos tipos, dependendo da temperatura de extração, quantidade de pinos utilizados e localização dos pinos no produto (MANRICH, 2013).

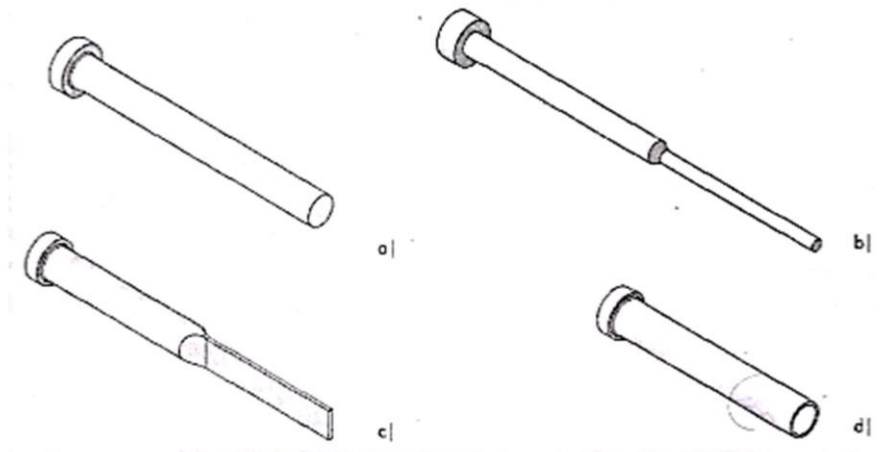
Os principais tipos de extratores são os seguintes:

- Pino extrator cilíndrico: consiste basicamente em pino cilíndrico com uma cabeça de diâmetro maior para a fixação na placa extratora; este tipo de componente é padronizado pela norma DIN 1530 (2011);
- Pino extrator rebaixado: este tipo é uma variação do pino extrator cilíndrico, é aplicado geralmente onde há a necessidade de um extrator de pequeno diâmetro, porém com grande comprimento;
- Extratores de lâmina: este tipo de extrator apresenta uma seção retangular na extremidade de contato com o produto, são aplicados geralmente em produtos que apresentam nervuras;
- Extratores tubulares: também conhecidos como buchas extradoras, são extratores cilíndricos com orifício interno passante, é aplicado para a extração em regiões com macho circular de pequeno diâmetro (REIS, 2017).

Dentre os principais tipos de extratores, o mais comumente utilizado é o pino extrator cilíndrico, pois é um pino de geometria simples e, consequentemente, menor

custo e que atende à maioria das aplicações. Já os demais tipos de extratores têm aplicação menor que ao pino cilíndrico e acabam por serem usados em casos onde não é possível utilizar o pino cilíndrico. A Figura 4 apresenta os principais tipos de extratores.

Figura 4 - Principais tipos de extratores a) pino extrator cilíndrico; b) pino extrator rebaixado; c) extrator de lâmina; d) extrator tubular.



Fonte: Rodrigues (2007)

O pino extrator cilíndrico (item “a” da Figura 4) é um componente normatizado conforme DIN 1530 (2017) e pode ser de dois tipos, variando materiais e métodos de fabricação entre si. O pino do tipo A, é fabricado em aço AISI H13, nitretado a gás, possui dureza superficial de aproximadamente 70 HRC, dureza no núcleo de aproximadamente 40 HRC e acabamento superficial retificado. Já o pino do tipo B, é fabricado em aço prata tungstenado (WS), temperado e revenido, possui dureza de 60 ± 2 HRC (núcleo e superfície) e acabamento superficial retificado.

Os pinos extratores muitas vezes têm como função, além de extrair o produto moldado, também permitir a saída de gases durante o preenchimento do molde. Para ocorrer a saída dos gases é necessária uma folga entre o pino extrator e o alojamento na cavidade do molde, esta folga é normalmente do tipo H7-g6. Porém, caso a folga seja mal dimensionada, o seu excesso pode resultar na formação de rebarbas no produto (REIS, 2017; RODRIGUES, 2007).

Para um bom funcionamento do sistema de extração é recomendado que o acabamento dos furos de alojamento dos extratores no molde seja liso e livre de

marcas de usinagem. Atualmente esses furos são fabricados pelo processo de eletroerosão a fio (REIS, 2017).

2.2 CARBONO AMORFO

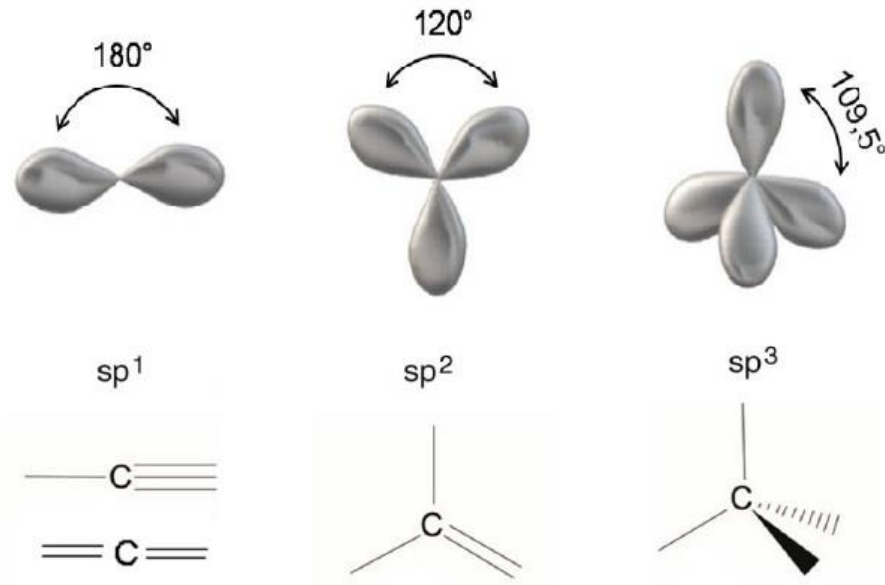
O carbono é um dos elementos químicos da tabela periódica mais abundantes na natureza, sendo muito versátil por compor diferentes materiais devido às diversas formas em que seus átomos podem se ligar e se organizar. Este fato se deve a notável propriedade de alotropia do carbono, que proporciona a formação de diversas estruturas multiatômicas com distintas propriedades, sendo o diamante e o grafite os alótropos mais conhecidos; porém existem outros arranjos atômicos, como fulereno, grafeno, nanotubos e carbono amorfo, os quais têm demandado muita pesquisa e desenvolvimento devido as suas propriedades intrínsecas e aplicações possíveis (ALMEIDA, 2021; BOEIRA, 2016).

2.2.1 Estrutura química

A formação das distintas estruturas do carbono se deve ao fato de o carbono possuir uma configuração eletrônica no estado fundamental de $1s^2 2s^2 2p^2$, em que o orbital $1s^2$ possui dois elétrons que são fortemente ligados ao núcleo, assim, não participando de ligações químicas com outros átomos. Os orbitais $2s^2$ e $2p^2$ possuem os quatros elétrons restantes, e estão localizados na camada de valência do átomo, de forma que possibilitam a participação dos mesmos em ligações químicas com outros átomos. Podem formar estruturas complexas ou participar de ligações covalentes com outros átomos de carbono, formando diferentes estruturas alotrópicas do carbono, que são dependentes da mistura do orbital s com um, dois ou três orbitais do tipo p . Assim, o carbono pode apresentar três formas de hibridizações que são classificadas como sp^1 , sp^2 e sp^3 (ALMEIDA, 2021).

As diferentes formas de hibridização do carbono influenciam diretamente na estrutura e nas propriedades dos materiais formados; dessa forma, os materiais à base de carbono se tornam versáteis a inúmeras áreas de aplicações. A Figura 5 representa as diferentes configurações de hibridização possíveis para as ligações dos átomos de carbono.

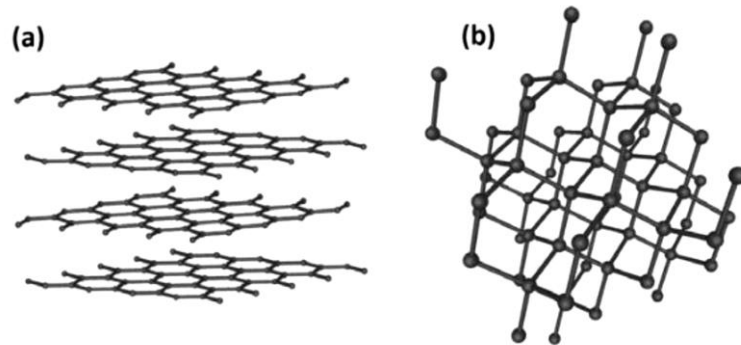
Figura 5 - Representação da configuração dos orbitais nas diferentes hibridizações possíveis para o átomo de carbono



Fonte: Adaptado de Almeida (2021) e Boeira (2016)

A estrutura cristalina do grafite é estável em condições ambientes (considerando as condições normais de temperatura e pressão), consistindo no empilhamento de folhas bidimensionais de átomos de carbono ligados com outros três carbonos com configuração sp^2 , que lembram um favo de mel. As folhas são interligadas por forças secundárias de van der Waals, que são ligações fracas, permitindo o cisalhamento das camadas e, possibilitando que o grafite se torne um material com ductilidade e baixo coeficiente de atrito, podendo ser utilizado como lubrificante sólido. Já a estrutura do diamante é formada por átomos de carbono ligados covalentemente a quatro outros átomos de carbono com hibridização sp^3 e geometria tetraédrica, que proporciona ao material rigidez, sendo um dos materiais mais duros existentes. A Figura 6 apresenta uma representação das estruturas cristalinas do grafite e do diamante (ALMEIDA, 2021).

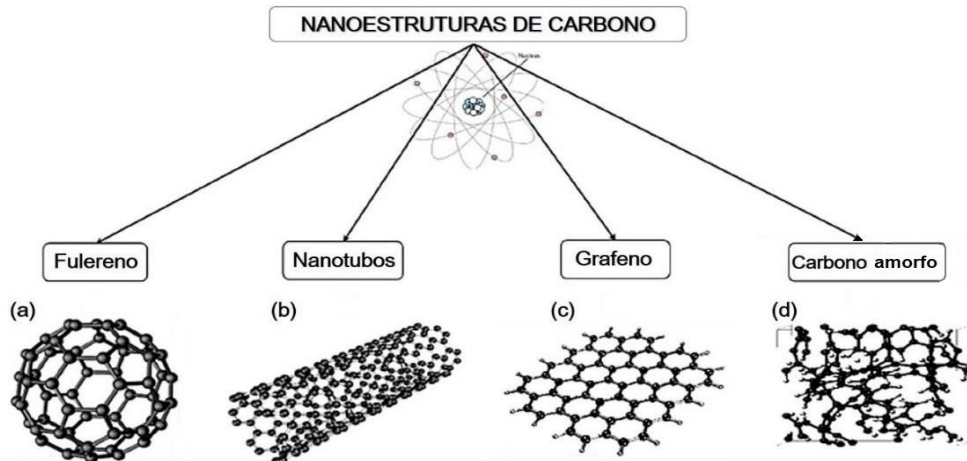
Figura 6 - Estruturas cristalinas: a) do grafite e b) do diamante



Fonte: Almeida (2021)

O carbono pode ainda formar outras estruturas além do grafite e do diamante, as quais são consideradas nanoestruturas e se destacam devido às suas diferentes propriedades. São exemplos destas estruturas o fulereno, os nanotubos de carbono, o grafeno e o carbono amorfo, cujas representações de suas estruturas são mostradas na Figura 7.

Figura 7 - Nanoestruturas do carbono: a) fulereno, b) nanotubos, c) grafeno e d) carbono tipo diamante



Fonte: Adaptado de Almeida (2021)

O fulereno é a terceira forma alotrópica mais estável do carbono e corresponde a uma esfera nanométrica que é formada por carbono baseada em uma estrutura de poliedros, contendo pentágonos e hexágonos arranjados entre si. Essa estrutura tem a forma semelhante a uma bola de futebol, possuindo ligações C-C (carbono-carbono) com hibridizações sp^2 e sp^3 , podendo apresentar estruturas contendo diferentes números de átomos de carbono. Os nanotubos de carbono são constituídos por uma

folha de grafeno enrolada na forma cilíndrica, onde ligações covalentes entre os átomos de carbono são feitas por orbitais hibridizados de sp^2 . Os nanotubos apresentam diâmetros de nanômetros e comprimentos de micrometros até milímetros (ALMEIDA, 2021).

Algumas nanoestruturas de carbono, como os fulerenos e os nanotubos de carbono são formadas a partir de uma nanoestrutura 2D, a qual é constituída por uma monocamada de átomos de carbono ligados, denominada de grafeno, que lembra um favo de mel (Figura 7-c). O grafeno pode apresentar diferentes formas, devido à variação na quantidade de folhas ou camadas que são empilhadas umas sobre as outras, logo, podendo obter grafeno de monocamada, bicamada e ou multicamadas (ALMEIDA, 2021).

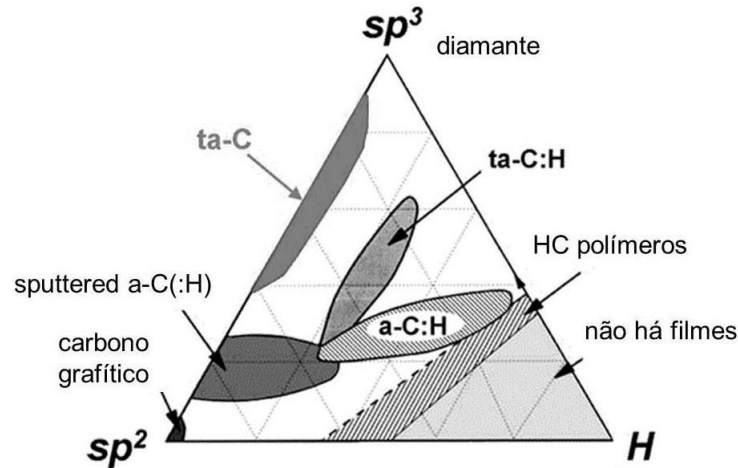
A forma alotrópica denominada de carbono amorfo possui estrutura não cristalina e trata-se de um híbrido contendo formas alotrópicas do carbono sp^3 e sp^2 . O carbono amorfo hidrogenado (a-C:H), também denominado de *diamond like carbon* (DLC), possui uma estrutura não-cristalina, formado por ligações sp^2 e sp^3 , com variada proporção de hidrogênio e frações de carbono sp^3 menores que 50%. Os filmes de carbono tetraédrico (ta-C) são os filmes que contém 85% ou mais de ligações sp^3 , e por esses motivos também conhecidos como carbono amorfo não hidrogenado (a-C) (GRILL, 1999).

Os filmes de DLC preparados a baixas temperaturas e com uma variedade de precursores são amplamente estudados desde a sua descoberta. Sua microestrutura única consiste em agrupamento de carbonos ligados pela hibridização sp^2 e interligados a carbonos ligados por ligações sp^3 . A variação destas estruturas e, conseqüentemente, de suas propriedades, são determinadas por parâmetros chaves como fração de carbonos sp^3 ligados, o conteúdo de hidrogênio, e a orientação e agrupamento de ligações sp^2 (BOEIRA, 2016).

A estrutura química dos filmes finos de carbono amorfo pode variar entre as estruturas do diamante policristalino, dos hidrocarbonetos alifáticos e do grafite. Esta composição estrutural é sempre dependente dos métodos e condições de deposição e também da composição química dos precursores utilizados, o que impacta diretamente nas propriedades do material. A variação de composições estruturais é a responsável pela grande diversidade de propriedades físicas, químicas, mecânicas, elétricas, ópticas e tribológicas dos filmes finos de DLC, tornando-o de grande

interesse nas comunidades acadêmica e industrial. A Figura 8 apresenta um diagrama de fases ternário das diversas formas de ligas amorfas C-H (carbono-hidrogênio).

Figura 8 - Diagrama de fases ternário para ligas de C-H amorfo.



Fonte: Robertson (2002)

Observa-se que no canto inferior esquerdo está indicado o carbono grafítico e no limite do canto direito estão representadas as moléculas poliméricas. Robertson (2002) afirma que variados métodos de deposição, tais como a deposição química a vapor assistida por plasma (PECVD), possibilitam atingir o interior do triângulo produzindo assim a-C:H, no qual o teor de ligações sp^3 não é tão alto e o teor de hidrogênio é elevado. Utilizando a técnica PECVD com elevada densidade de plasma, é possível produzir materiais com maior fração de ligações sp^3 e menos hidrogênio, o qual classifica-se como carbono amorfo tetraédrico hidrogenado (ta-C:H).

2.2.2 Técnicas de deposição

As primeiras deposições de filmes denominados *diamond like carbon* datam de 1972 e foram realizadas por Aisenberg e Chabot, utilizando a técnica de deposição por feixe de íons. Este termo foi utilizado para se referir a um filme duro composto principalmente de carbono que eles haviam produzido. Nos anos que seguiram, os pesquisadores desenvolveram então, diferentes processos de deposição para estes revestimentos, em diversos tipos de substratos e usando diferentes hidrocarbonetos como fonte de carbono. Foi a partir destes estudos que foi possível conhecer melhor a estrutura química dos filmes de DLC e provar que estes não eram feitos de diamante cristalino como se imaginava, mas sim de carbono amorfo (GRILL, 1999; ROBERTSON, 2002).

Desde o início dos estudos, os cientistas perceberam que os filmes de DLC eram únicos e possuíam propriedades incomuns, originando o interesse da comunidade científica e, conseqüentemente, um aumento significativo de publicações relacionados ao tema (BOEIRA, 2021).

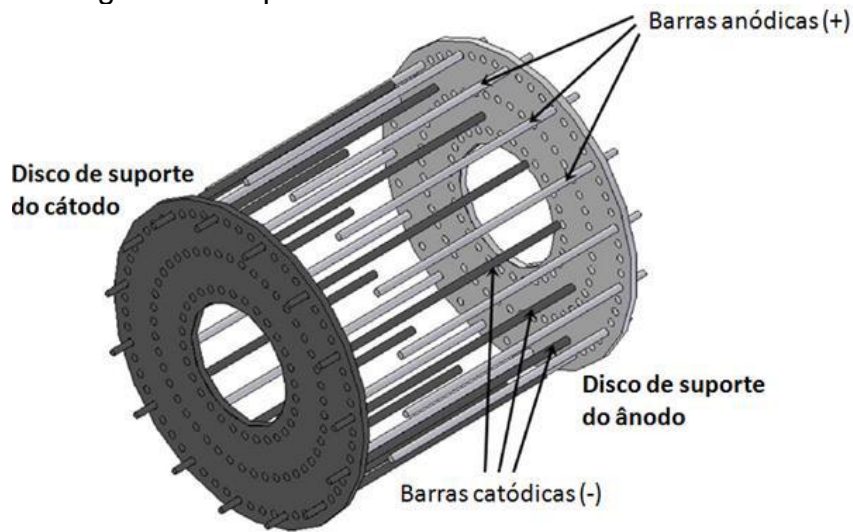
As técnicas mais usuais para a deposição de filmes de carbono amorfo são: deposição por feixe de íons (IBD), *magnetron sputtering* (MS), *high-power impulse magnetron sputtering* (HiPIMS), deposição química de vapor assistida por plasma (PECVD), deposição por *laser* pulsado, deposição física de vapor (PVD) e deposição química de vapor (CVD). Filmes de carbono amorfo hidrogenado são normalmente obtidos através da decomposição por plasma de um precursor com atmosfera contendo hidrocarbonetos. Estes métodos, que utilizam várias fontes de hidrocarbonetos, podem produzir filmes que contêm grandes quantidades de hidrogênio na sua estrutura (GRILL, 1999; ROBERTSON, 2002).

Para exemplificar a influência da técnica de deposição nas propriedades dos filmes, Petry *et al.* (2016) afirma que, se por um lado, pode-se obter filmes ta-C com alta resistência ao desgaste e alta dureza, pelo processo PVD, por outro lado, pode-se obter filmes a-C:H de ultrabaixo coeficiente de atrito (na ordem de 0,001) utilizando-se da técnica de PECVD (PETRY *et al.*, 2016).

A técnica de PECVD é muito difundida devido à sua versatilidade e relativo baixo custo: diferentes gases precursores podem ser usados, há uma fácil deposição de filmes em amostras com diferentes tamanhos e formas e apresentam baixo custo de produção. Essas tecnologias fornecem a possibilidade de desenvolver revestimentos de carbono amorfo como sistemas multifuncionais, multicamadas, nanoestruturados ou filmes nanocompósitos, ampliando o campo de propriedades e aplicações dos filmes de a-C:H (BOEIRA, 2021).

Robertson (2002) classifica o método de deposição PECVD, como sendo o método mais popular utilizado em laboratório. O reator, de forma cilíndrica, é composto por vários eletrodos carregados negativa e positivamente, dispostos de forma alternada e comportando-se como cátodo e ânodo. A Figura 9 apresenta o dispositivo de confinamento eletrostático utilizado na técnica PECVD.

Figura 9 - Dispositivo de confinamento eletrostático



Fonte: Robertson (2002)

Nas deposições de PECVD sob condições de vácuo, o plasma, fonte de energia para ativação das reações químicas, é formado utilizando uma fonte de corrente pulsada. O plasma gerado através de uma descarga elétrica, aliado ao confinamento eletrostático, aumenta a densidade de elétrons, propiciando um aumento na eficácia de ionização. A utilização do confinamento eletrostático permite a utilização de baixas tensões para uma descarga luminescente padrão, evitando assim arcos e instabilidades. Além disso, o plasma confinado neste mecanismo pode ser mantido em baixas pressões, diminuindo os efeitos de gases residuais (BOEIRA, 2021).

2.2.3 Propriedades e aplicações do DLC

Como já mencionado anteriormente, as propriedades dos filmes de carbono amorfo são dependentes da razão entre a hibridização sp^3 e sp^2 dos átomos de carbono e a quantidade de hidrogênio presente. Filmes com frações de hidrogênio constantes e um elevado valor da razão sp^3/sp^2 têm propriedades semelhantes às do diamante, tais como, elevada dureza, excelente condutividade térmica, alta resistividade elétrica, inércia química, transparência óptica e baixa taxa de desgaste em sistemas tribológicos. Filmes com um valor mais baixo da razão sp^3/sp^2 possuem propriedades mais próximas do grafite como baixa dureza, baixa resistividade elétrica e alta taxa de desgaste, combinado com baixo atrito (BOEIRA, 2016).

O fato de possuir ligações do grafite e do diamante confere ao DLC propriedades únicas, mescladas destes dois materiais. As principais características

deste material são a alta dureza, o baixo coeficiente de fricção, a alta estabilidade química, a baixa rugosidade e a biocompatibilidade (LEAL, 2017).

De modo geral, as propriedades físicas, químicas, mecânicas, elétricas e tribológicas dos filmes de DLC, propiciam que eles possam ser explorados em uma ampla gama de aplicações. Pode ser utilizado como capa protetora contra o desgaste em discos magnéticos de armazenamento, revestimentos tribológicos para peças de rolamentos metálicos e engrenagens. Por apresentar boa biocompatibilidade, permite sua utilização em ambientes biomédicos, sendo utilizados como recobrimentos de metais, polímeros, e biocomponentes para melhorar a compatibilidade com os tecidos corporais. Devido à sua capacidade de não reagir facilmente e por apresentar impermeabilidade na presença de líquidos, os filmes de DLC podem proteger os implantes contra a corrosão atuando como barreiras de difusão. O DLC depositado sobre substratos de aço inoxidável e ligas de titânio também pode ser utilizado para componentes artificiais de válvulas de coração e em implantes articulares (GONZÁLEZ, 2017).

A utilização de filmes de carbono amorfo apresenta um grande potencial para aplicações que requerem baixos coeficientes de atrito, tornando-o um possível candidato proposto para eliminar a necessidade de lubrificantes, devido às propriedades tribológicas. O coeficiente de atrito do carbono amorfo em ambientes semelhantes ao ar com umidade relativa entre 20 e 60 %, varia entre 0,01 e 0,15 podendo atingir valores ainda menores (entre 0,007 e 0,4) em vácuo. Sua aplicação como lubrificante sólido em ambientes onde a lubrificação líquida é inviável ou indesejada, como no ambiente espacial, em indústrias alimentícias, em ambiente hospitalar e também em condições de contato com elevado carregamento mecânico, pode representar uma solução simples, barata e eficaz (BOEIRA, 2016).

Revestimentos como estes, aplicados a metais, possuem propriedades tribológicas excepcionais e abrem novas possibilidades de melhorar o desempenho de componentes de motor e transmissão, que não podem mais ser alcançados apenas pela utilização de lubrificantes. Suas propriedades tribológicas também têm aplicações potenciais em superfícies de peças mecânicas em movimento relativo, visando o aumento de eficiência energética (BOEIRA, 2016; GRILL, 1999).

2.2.4 Aderência

A aderência é um parâmetro que está diretamente relacionado com tensões internas e externas ou de interface. Esta propriedade é definida como sendo o estado em que duas superfícies são mantidas juntas através de forças interfaciais que podem, por sua vez, ser constituídas por forças de valência (GONZÁLEZ, 2017).

Os filmes de DLC geralmente têm sido categorizados como filmes com baixa aderência quando são depositados diretamente sobre diferentes substratos metálicos ou cerâmicos. A baixa adesão de filmes a-C:H em tais substratos é comumente interpretada por dois diferentes mecanismos. O primeiro mecanismo trata-se do efeito químico da adesão, e depende do caráter vinculativo e da maneira a qual se combinam átomos do substrato ao filme. O segundo mecanismo refere-se ao efeito físico, no qual destacam-se a formação de bolhas e outros mecanismos de falha, causados por elevada pressão interna de compressão e incompatibilidade dos coeficientes de expansão térmica entre substrato ($11,5 \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) e filme de carbono ($2,3 \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) (BOEIRA, 2016; GONZÁLEZ, 2017).

Com o objetivo de melhorar a aderência destes filmes, diferentes conceitos têm sido desenvolvidos por muitos pesquisadores, como a utilização de diferentes técnicas de deposição em diversos materiais, além da modificação da superfície do substrato. Estas técnicas envolvem a deposição de camadas intermediárias com a utilização de um filme fino adicional, a deposição de multicamadas, modificação de superfície via sub-implantação iônica e/ou difusão de elementos químicos (GONZÁLEZ, 2017).

Intercamadas contendo silício (Si) têm sido comumente empregadas no intuito de melhorar a adesão de filmes de carbono amorfo sobre ligas ferrosas. A incorporação de Si reduz a tensão interna residual, sem sacrificar a dureza e levando a uma melhor adesão para as ligas metálicas, aços e cerâmicos. Compostos contendo Si permitem uma melhor adequação dos coeficientes de expansão térmica ($3,2 \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) e, por consequência, reduz o estresse residual térmico na interface entre o substrato e o filme. A adição de Si em sistemas dopados Si/DLC confere menor estresse, menor atrito, menor dependência do coeficiente de atrito com a umidade ambiente e maior estabilidade térmica. Estes efeitos são geralmente atribuídos à formação da ligação Si-C (BOEIRA, 2016).

Os precursores de silício utilizados na deposição das intercamadas podem conter outros elementos, como oxigênio e hidrogênio, em sua composição. Os componentes que constituem os precursores utilizados na deposição influenciam as propriedades resultantes do filme. Estudos evidenciam o uso de líquidos contendo silício como precursor, como o hexametildissiloxano (HMDSO), combinados com argônio (Ar) em atmosferas de plasma. Os precursores líquidos caracterizam-se pela facilidade de obtenção e manuseio, em relação aos gases, podendo ser vaporizados e injetados no sistema de deposição. Assim, todas as etapas podem ser realizadas em um único processo de deposição por PECVD (BOEIRA, 2016).

2.3 TRIBOLOGIA

A palavra tribologia se origina da junção das palavras gregas “tribo” (esfregar) e “logos” (estudo) e foi utilizada oficialmente em 1966, em um relatório feito por H. Peter Jost para o comitê do departamento inglês de educação e ciência. Este termo foi utilizado para descrever a ciência e a tecnologia que estudam a interação entre superfícies mediante um movimento relativo. Jost foi o primeiro a estudar os impactos econômicos devido a utilização dos conhecimentos de tribologia. Este estudo é considerado o marco de criação da tribologia (NASCIMENTO, 2020).

A utilização da denominação ‘tribologia’ por Leonardo da Vinci (1452–1519), há séculos atrás, gerou importantes contribuições para o entendimento dos fenômenos de desgaste entre duas superfícies. Em seus estudos, as forças de atrito em planos horizontais e inclinados foram medidas e demonstrou-se que estas são dependentes da força normal ao deslizamento dos corpos e independentes da área de contato aparente. Além disso, foi introduzido o conceito de que o coeficiente de atrito é proporcional à carga normal aplicada (ZUM GAHR, 1987).

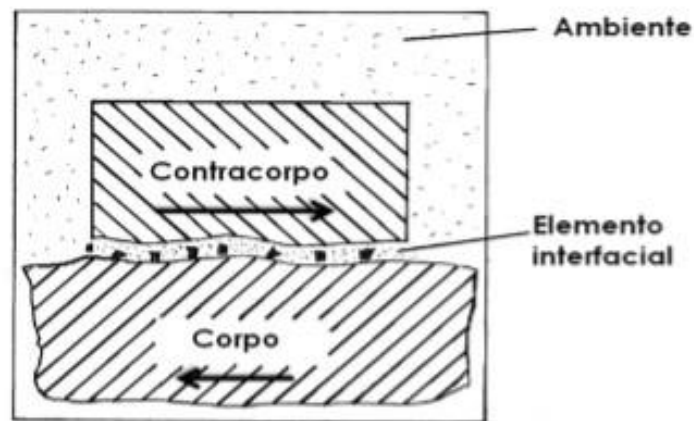
A tribologia compreende conceitos relacionados a diversas áreas do conhecimento como física, química, ciência dos materiais e mecânica, para prever e explicar o comportamento de sistemas físicos, e por isso, pode ser considerada como um dos ramos mais complexos no âmbito da engenharia mecânica (NASCIMENTO, 2020).

Atualmente, refere-se à tribologia como a ciência e tecnologia que estuda a interação de superfícies em contato entre si, e assuntos e práticas relacionadas. Ela

abrange o estudo do atrito, do desgaste e da lubrificação dessas superfícies (SILVA, 2020).

A magnitude do atrito e desgaste não depende intrinsecamente do material analisado, mas sim do sistema de engenharia, conhecido como *tribossistema*. Um tribossistema é composto por quatro elementos, como pode ser observado na Figura 10. O corpo sólido é o elemento que sofre as interações dos outros elementos; o contracorpo pode encontrar-se em diferentes estados físicos como sólido, líquido, gás ou uma mistura destes; o elemento interfacial pode ser um lubrificante ou um resíduo, sendo ainda que o resíduo pode apresentar-se em diferentes estados físicos e, por fim, o quarto elemento é o ambiente ao qual o sistema está exposto (REIS, 2017).

Figura 10 – Representação esquemática de um tribossistema



Fonte: Zum Gahr (1987)

O contato tribológico assim como o atrito e o desgaste do sistema são influenciados por variáveis operacionais tais como: a geometria do material (macrogeometria e topografia), as propriedades do material (composição química, microestrutura, elasticidade e viscosidade) e também por parâmetros de energia como a velocidade do movimento relativo, a temperatura de trabalho do sistema, a carga normal aplicada e a força tangencial entre as superfícies (SALVARO, 2015).

As interações físicas e químicas que ocorrem em um tribossistema podem ocasionar a remoção de material da superfície do corpo sólido e/ou do contracorpo, resultando em resíduos que agem como elemento interfacial. A forma como esse resíduo de desgaste se forma caracteriza o mecanismo de desgaste (REIS, 2017).

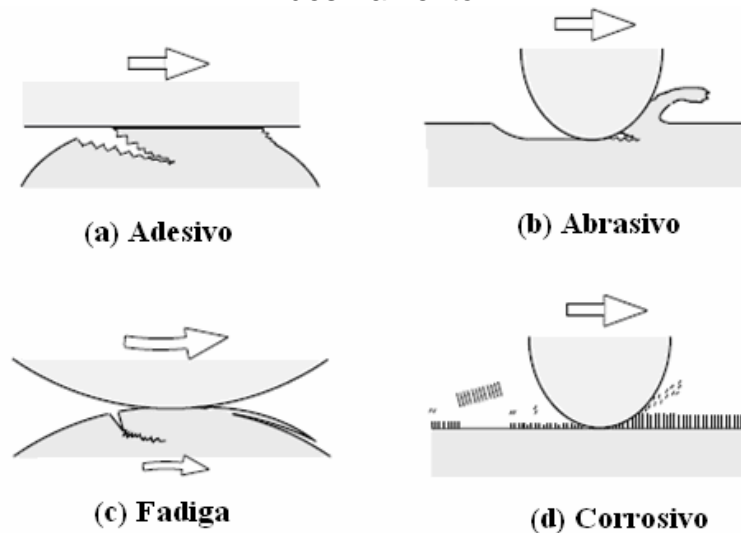
2.3.1 Desgaste em par metálico sob deslizamento

O desgaste é definido como sendo o dano ou remoção de material de uma ou ambas superfícies sólidas que estão em contato, causado pela ação mecânica de um sólido, líquido ou gás. A resistência ao desgaste é um comportamento que depende do par de materiais em contato e de vários outros parâmetros tribológicos. Por isso, as características do tribossistema influenciam na resistência do material ao desgaste, de maneira que o desgaste não é uma propriedade intrínseca do material (ZUM GAHR, 1987).

O desgaste ocorre de maneiras distintas de acordo com a cinemática do sistema, ou seja, depende do tipo das interações dinâmicas entre duas superfícies e do movimento das interfaces. O desgaste pode ocorrer por deslizamento, rolamento, oscilação, impacto, erosão, etc (NASCIMENTO, 2020).

Para sistemas envolvendo pares metálicos sob deslizamento, Kato (2000) apresenta quatro mecanismos de desgaste, podendo ser classificados como: desgaste adesivo, desgaste abrasivo, desgaste por fadiga e desgaste corrosivo (triboquímico), os quais são representados na Figura 11.

Figura 11 - Mecanismos de desgaste em um par tribológico metálico sob deslizamento



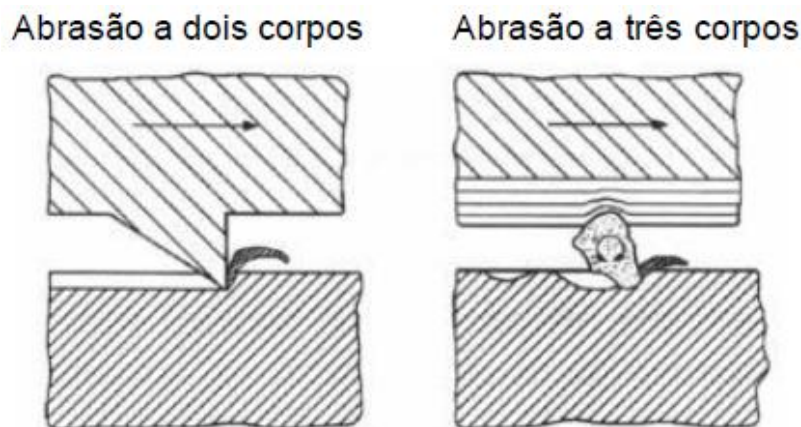
Fonte: Kato (2000)

O desgaste adesivo ocorre quando a interação entre as superfícies oferece uma resistência forte ao movimento de deslizamento; como resultado ocorre a adesão entre as superfícies de contato, gerando uma região de deformação plástica. Devido a essa deformação plástica localizada ocorre a formação de trincas que então se

propagam gerando a ruptura de um segmento do corpo sólido, formando assim um resíduo de desgaste (KATO; ADACHI, 2000; REIS, 2017).

O desgaste abrasivo ocorre quando há diferença de dureza entre os materiais de contato, sendo provocado por partículas ou protuberâncias com dureza mais elevada que o corpo sólido. O desgaste abrasivo pode ser do tipo abrasão a dois corpos, no qual a superfície dura de um dos corpos age como um agente abrasivo causando o desgaste no outro corpo sólido. Há também a abrasão a três corpos, onde o agente abrasivo é um terceiro corpo, geralmente partículas duras e pequenas presentes entre os dois corpos sólidos, podendo haver então, o desgaste de um dos corpos ou de ambos. A Figura 12 ilustra a ocorrência de desgaste por abrasão a dois e a três corpos (REIS, 2017).

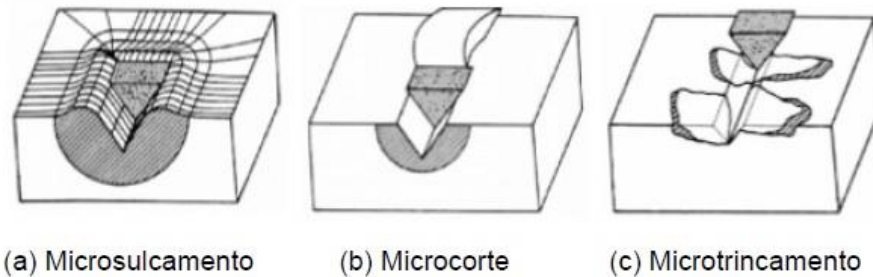
Figura 12 - Exemplo de desgaste abrasivo a dois e a três corpos



Fonte: Zum Gahr (1987)

O desgaste abrasivo pode ainda ser classificado em três modos: desgaste abrasivo com deformação plástica, que pode ser por microsulcamentos, ou por microcorte, e desgaste abrasivo por fratura frágil, quando ocorre o microtrincamento. A Figura 13 apresenta os distintos mecanismos de desgaste abrasivo possíveis (REIS, 2017; ZUM GAHR, 1987).

Figura 13 - Mecanismos de desgaste abrasivo



Fonte: Adaptado de Zum Gahr (1987)

No desgaste abrasivo as partículas de desgaste (*debris*) exercem um papel importante sobre a taxa de desgaste. As principais características das partículas de desgaste que afetam a taxa de desgaste são: o tamanho, a dureza, a forma e a tenacidade a fratura (NASCIMENTO, 2020).

O desgaste por fadiga ocorre quando há um alto número de repetições do movimento de contato, com a geração de trincas de fadiga no corpo sólido, que se propagam até a ruptura formando partículas de desgaste. O desgaste corrosivo ocorre geralmente em meios líquidos ou gasosos, mas pode ocorrer também entre corpos sólidos por ação do ambiente. Esse tipo de desgaste é devido à formação de produtos de reações eletroquímicas conhecidas como reações triboquímicas que formam uma intercâmara nas superfícies de contato (KATO; ADACHI, 2000).

2.3.2 Atrito em par metálico sob deslizamento

O atrito pode ser descrito como sendo o somatório de todas as forças que se opõem ao movimento relativo de duas superfícies; ou ainda, como a energia total dissipada pelo tribossistema. Geralmente, a força de atrito (F_a) é expressa em termos do coeficiente de atrito (μ), que é a relação entre a F_a e a força de normal (F_n) (BAYER, 1994; REIS, 2017).

Não é possível denominar o atrito como uma característica intrínseca de um material e nem de um par de materiais, pois ele depende de outros fatores, tais como a topografia da superfície e as condições de deslizamento. O atrito apresenta em geral maior dependência com as propriedades da superfície e com o acabamento superficial do que com as propriedades do substrato (REIS, 2017).

O atrito por deslizamento ocorre quando duas superfícies deslizam uma sobre a outra com uma carga de contato existente em mancais de deslizamento, dentes de

engrenagem, guias lineares e fusos rosca. O uso de lubrificação tem forte influência neste tipo de atrito (SEMBARSKI, 2018).

A geração de atrito em um tribossistema pode ocorrer por diversos eventos microscópicos físicos, químicos ou relacionados a materiais, e estes são chamados de mecanismos básicos de atrito, os quais dependem exclusivamente da natureza das superfícies, dos materiais, do meio ambiente, das condições de aplicação e de certas características do aparelho, tais como vibrações e fixação dos componentes (SEMBARSKI, 2018).

Infelizmente para a indústria mecânica, o atrito também tem um lado danoso, pois, na operação de máquinas, é responsável pela dissipação e perda de muita energia. A energia perdida por atrito é uma entrada de energia que deve ser fornecida continuamente para manter o movimento deslizante. Essa energia é dissipada no sistema principalmente como calor, que pode ter que ser removido por resfriamento para evitar danos e pode limitar as condições em que o maquinário pode operar (SEMBARSKI, 2018).

2.3.3 Classificação de ensaios de desgastes

Bayer (1994) considera que um ensaio de desgaste não é capaz de caracterizar as propriedades intrínsecas de um determinado material; portanto, não pode ser considerado como um ensaio de materiais. Através de um ensaio de desgaste, é possível caracterizar as propriedades de um determinado material em um determinado sistema; isso significa que um mesmo material pode apresentar diferentes propriedades para diferentes sistemas.

Ensaio de desgaste podem ser classificados em seis categorias:

- Ensaio em campo com sistema completo: realizado com as condições de operação reais;
- Ensaio em bancada com sistema completo: realizado sob condições de operação simuladas, simplificadas ou aceleradas;
- Ensaio em bancada com subsistema: realizado em bancada com apenas o tribossistema de interesse, sob condições simuladas, simplificadas ou aceleradas;

- Ensaio em bancada com tribocomponentes: realizado com os tribocomponentes, sob condições simuladas;
- Ensaio com amostras padrão: realizado com amostras que simulem os tribocomponentes em condições simuladas de operação;
- Ensaio com amostras arbitrárias de material do componente: realizado com amostras do material do tribocomponente em condições simuladas de operação, realizadas em laboratório (CZICHOS, 1992).

Por conta de a maioria dos ensaios de desgaste serem realizadas em condições simuladas de operação, a relevância dos resultados obtidos com os ensaios de desgaste é dependente diretamente do grau que a aplicação é simulada. Bayer (1994) divide o grau de simulação em três níveis.

O nível básico simula a situação de desgaste como o deslizamento, rolamento ou impacto; esse nível de simulação está mais associado a pesquisas básicas, pois fornece informações mais genéricas como a natureza do desgaste pode fornecer uma classificação de grupos de materiais e fatores importantes para o desgaste.

O segundo nível simula parâmetros importantes para o estudo, inclusive quantitativamente. Exemplos de parâmetros são a carga normal, a velocidade de deslizamento, a temperatura de operação entre outros. Nesse nível ainda são considerados os parâmetros de superfície como a rugosidade e as propriedades do terceiro corpo, como os lubrificantes.

O terceiro nível simula fielmente o sistema real; normalmente, neste nível aplica-se a duplicação do sistema para avaliação. Esse nível tem um custo bastante elevado e normalmente é utilizado após os níveis anteriores, geralmente para uma prova final (BAYER, 1994; REIS, 2017).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo encontram-se descritos os materiais e métodos utilizados na realização do trabalho, bem como na preparação das amostras e caracterizações realizadas para validação do método de ensaio utilizado e avaliação das amostras.

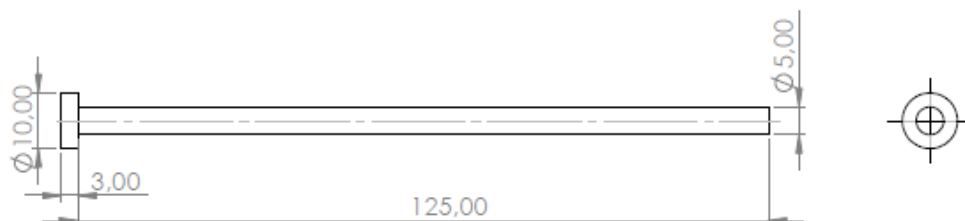
3.1 MATERIAIS

Buscando simular da forma mais fiel possível o funcionamento de um sistema extrator de um molde de injeção de termoplásticos, o tribossistema proposto foi concebido utilizando-se de materiais que compõem moldes de injeção industriais. Pinos e buchas extratoras e também um dispositivo de testes de bancada, foram utilizados para reproduzir o funcionamento do sistema extrator de um molde, vistas as dificuldades de se realizar e acompanhar um ensaio cíclico em um molde industrial. O dispositivo dos testes de bancada foi o mesmo utilizado por Reis (2017).

3.1.1 Pino extrator com filme fino de DLC

Os pinos extratores estudados no trabalho são classificados como sendo do tipo A, conforme a norma DIN 1530A, fornecidos pela empresa Sulmax Componentes e Ferramentas, de Caxias do Sul-RS. Estes pinos são fabricados em aço AISI H13, temperados, revenidos e nitretados a gás; sua resistência à tração é de aproximadamente 1500 MPa, dureza de núcleo de aproximadamente 40 HRC e superficial entre 950 e 1100 HV (aproximadamente 70 HRC). Foram utilizados pinos com comprimento útil de 125 milímetros (mm) e diâmetro de 5 mm, com tolerância ISO de ajuste g6. As dimensões dos pinos extratores são mostradas na Figura 14.

Figura 14 - Dimensões dos pinos extratores



Fonte: Autor (2022)

A deposição do filme fino de *diamond like carbon* (DLC) foi realizada na superfície dos pinos, em um reator de deposição por deposição química a vapor

assistida por plasma (PECVD), da empresa Plasmar Tecnologia, de Caxias do Sul-RS. O processo de revestimento superficial ocorreu em três etapas distintas, sendo: limpeza das superfícies, deposição da camada intermediária de silício e deposição do filme fino de DLC.

A primeira etapa, denominada de pré-tratamento de limpeza, consistiu na injeção de gás hidrogênio (H_2) no interior da câmara do reator, com a finalidade de eliminar impurezas presentes na superfície do substrato (pinos). Finalizada a etapa inicial, as amostras foram submetidas à deposição da intercamada, através da evaporação de líquido precursor hexametildissiloxano (HMDSO). A principal finalidade desta intercamada foi melhorar a adesão do filme de DLC em relação ao substrato metálico, devido ao elevado nível de tensões residuais internas e à diferença entre os coeficientes de expansão térmica do substrato metálico e do filme. Por fim, a terceira etapa realizada foi a de deposição do filme de DLC, através da inserção de gás acetileno (C_2H_2) e de gás argônio (Ar). A Figura 15 apresenta uma ilustração das etapas envolvidas no processo de deposição do filme fino (BOEIRA, 2016).



Fonte: Boeira (2016)

Os parâmetros de processo utilizados nas três etapas realizadas para obtenção do filme de DLC estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros de processo para limpeza de amostras, deposição de intercamada e deposição de filme de DLC.

Parâmetros	Limpeza	Intercamada	DLC
Pressão (Pa)	60	53	53
Precursor	H ₂	Ar + HMDSO	Ar + C ₂ H ₂
Taxa de Fluxo	10 sccm	7 sccm + 10 g/litro	7 sccm + 10 sccm
Tensão (volts)	-400	-500	-800
Tempo (min)	6	10	60
Temperatura (°C)	300	300	300

Fonte: Autor (2022)

3.1.2 Buchas extratoras (AISI P20 e AISI H13)

As buchas extratoras, que formaram o par tribológico com os pinos revestidos com DLC, foram fabricadas em aços AISI P20 e AISI H13. Tais materiais são comumente utilizados na fabricação de buchas extratoras de moldes de injeção e optou-se por utilizar estes dois materiais distintos com o intuito de verificar se há influência significativa do material da bucha extratora no desgaste do filme de revestimento do pino.

Após a aquisição destes materiais, suas composições químicas foram avaliadas por espectrometria de emissão óptica, estando o resultado obtido mostrado na Tabela 2.

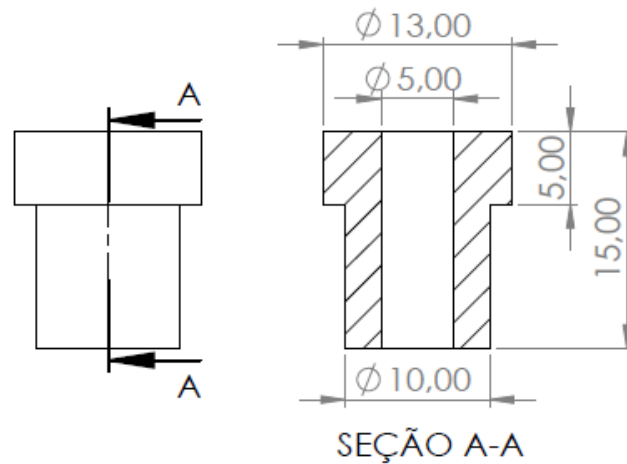
Tabela 2 - Composição química dos aços AISI H13 e AISI P20.

	Análise Química (%)									
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	Co	Cu
H13	0,38	1,02	0,39	4,91	1,29	0,18	0,83	<0,1	0,016	0,127
P20	0,38	0,27	1,41	1,83	0,19	0,97	0,01	<0,1	0,102	0,126

Fonte: Autor (2022)

A fabricação dessas buchas ocorreu por usinagem em torno CNC no IFRS Campus Caxias do Sul, seguidas de tratamento térmico de têmpera com revenimento e usinagem de acabamento do diâmetro interno por eletroerosão a fio, sendo o diâmetro interno de 5 mm com a tolerância de ajuste ISO H7, conforme ABNT NBR 6158 (1995). As dimensões das buchas extratoras são mostradas na Figura 16.

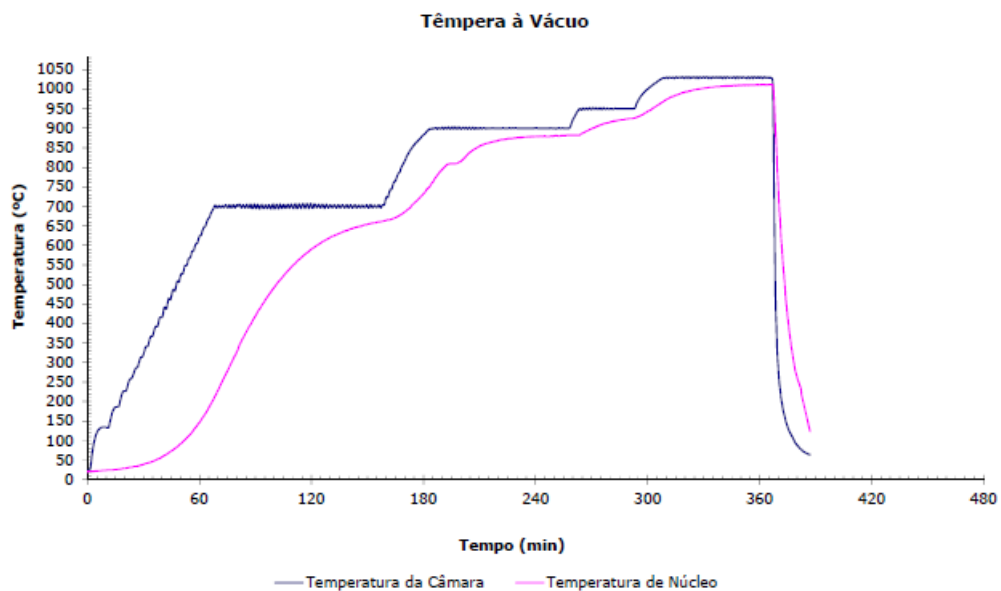
Figura 16 - Dimensões das buchas extradoras



Fonte: Autor (2022)

O tratamento térmico das buchas de AISI H13 foi realizado em forno à vácuo, à temperatura da 1030 °C, sendo a taxa de aquecimento de 10 °C/min e o resfriamento à vácuo na pressão de 4 bar, seguido de duplo revenimento imediatamente após a têmpera, na temperatura de 600 °C e por 120 minutos cada. A Figura 17 mostra a curva de aquecimento e resfriamento da etapa de têmpera das buchas de H13.

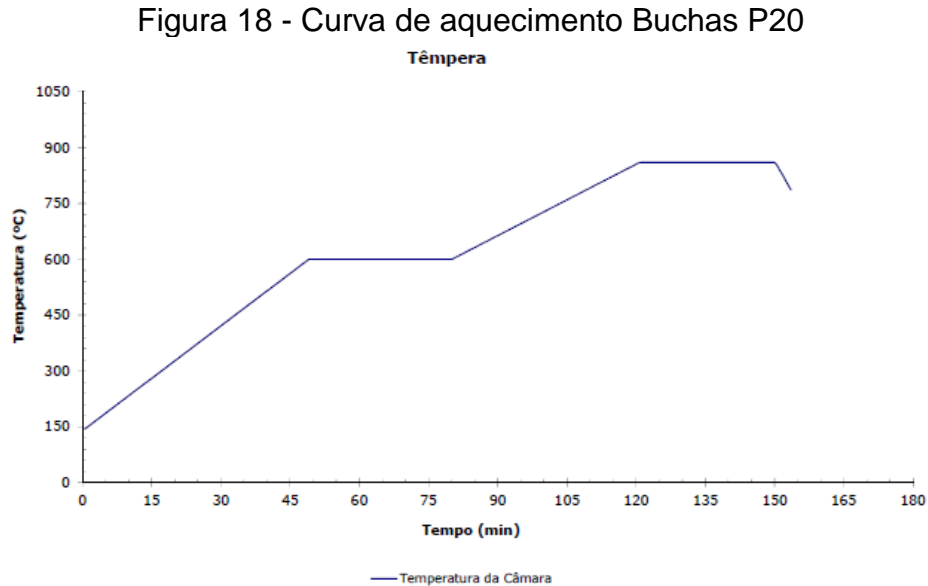
Figura 17 - Curva de aquecimento Buchas H13



Fonte: Autor (2022)

O tratamento térmico das buchas de AISI P20 foi realizado em forno de atmosfera controlada, na temperatura de 860 °C, com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min e o resfriamento em óleo. Imediatamente após a têmpera, realizou-se o

duplo revenimento à 580 °C, por 120 minutos cada. A Figura 18 mostra a curva de aquecimento da etapa de têmpera das buchas de P20.



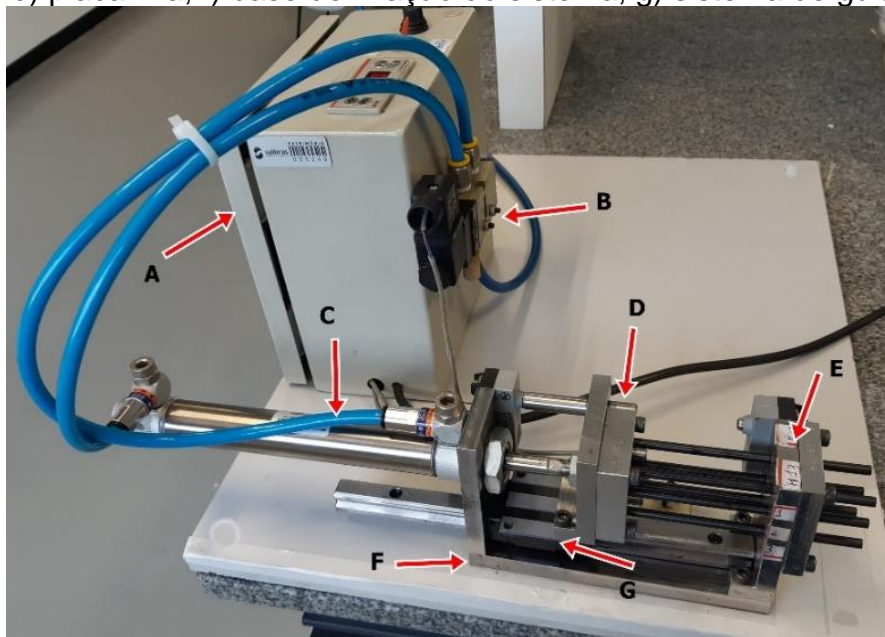
Fonte: Autor (2022)

3.1.3 Dispositivo de simulação de sistema extrator de moldes de injeção

O dispositivo de testes utilizado no ensaio de desgaste, segundo Reis (2017), foi construído para reproduzir o funcionamento do sistema extrator de um molde de injeção de termoplásticos, tendo por finalidade a avaliação do desgaste dos pares pino/bucha.

O dispositivo é composto por uma placa fixa, onde são posicionadas as buchas temperadas as quais simulam os furos de extração do macho de um molde de injeção, e por uma placa móvel guiada por sistema de rolamento linear, onde são fixados os pinos extratores revestidos com DLC. O movimento é realizado por um sistema pneumático constituído de um cilindro de dupla ação e uma válvula duplo solenoide. O comando elétrico do dispositivo possui um sistema digital para a contagem de ciclos. A usinagem dos componentes do dispositivo foi realizada seguindo as mesmas tolerâncias de ajuste utilizadas para fabricação de moldes de injeção, a fim de incluir também esta condição à simulação. A Figura 19 apresenta o dispositivo utilizado (REIS, 2017).

Figura 19 - Dispositivo para ensaio de desgaste pino/bucha.
a) quadro de comando, b) válvula pneumática, c) cilindro pneumático, d) placa móvel, e) placa fixa, f) base de fixação do sistema, g) sistema de guia linear.



Fonte: Autor (2022)

O sistema de movimentação do dispositivo de ensaio possui um curso linear de 50 mm, o qual totaliza uma distância percorrida de 100 mm por ciclo. As placas, móvel e fixa possuem a capacidade de montagem de 6 pinos e 6 buchas simultaneamente.

3.2 MÉTODOS

A metodologia de avaliação e caracterização do sistema proposto neste estudo é descrita a seguir e compreende as etapas de ensaio de desgaste em bancada e a posterior caracterização das amostras.

3.2.1 Ensaio de desgaste

A seguir estão descritos os detalhes referentes à metodologia utilizada para a definição dos conjuntos de amostras e também dos parâmetros, utilizados no ensaio de desgaste cíclico, realizado em dispositivo de simulação.

3.2.1.1 Definição dos conjuntos de amostras

Para avaliação do comportamento ao desgaste, através do ensaio no dispositivo que simula o funcionamento de um sistema de extração, foram propostas 4 configurações de amostras. Utilizaram-se buchas de dois materiais diferentes (AISI H13 e AISI P20) e cada um deles foi submetido a duas condições de lubrificação (com lubrificação e sem lubrificação) com o intuito de verificar o comportamento ao desgaste do filme fino de DLC, sob diferentes condições, quando exposto ao deslizamento linear cíclico.

Para os pares pino/bucha lubrificadas, utilizou-se graxa branca para moldes à base de sabão de lítio IGLS-B2, marca Implastec, de grau NGLI 2. A aplicação ocorreu de forma manual e diretamente sobre a superfície dos pinos antes do início dos testes de desgaste, tomando-se o cuidado para que fosse formada uma camada uniforme e que recobrisse toda superfície do pino.

Todas as 4 configurações foram testadas com pinos extratores revestidos com DLC, depositados sob as mesmas condições e parâmetros. Sendo assim, foi possível identificar como diferentes materiais de buchas e diferentes condições de lubrificação do par tribológico, atuam no desgaste no filme de DLC que reveste os pinos extratores e nas buchas que fazem par com estes.

Os conjuntos de amostras pino/bucha, bem como a denominação dada a cada um deles, estão mostrados na Tabela 3, onde a letra “H” se refere ao material do AISI H13, “P” para AISI P20, enquanto que, para a aplicação do lubrificante, a letra “S” significou sem e “C” com a camada de lubrificante no par tribológico pino/bucha.

Tabela 3 - Configuração de conjuntos de amostras pino/bucha para ensaio de desgaste

Configuração das amostras	Pino	Bucha	Lubrificação
HC	DLC	H13	Com
HS	DLC	H13	Sem
PC	DLC	P20	Com
PS	DLC	P20	Sem

Fonte: Autor (2022)

Todos os pinos e buchas utilizados foram numerados e identificados para garantir que as medições quantitativas e qualitativas após o ensaio de desgaste, fossem realizadas corretamente. A Figura 20 mostra os conjuntos de amostras devidamente identificados, antes do início do ensaio de desgaste cíclico.

Para cada configuração de conjunto de amostras pino/bucha foram utilizados três pinos e três buchas para melhor confiabilidade dos resultados obtidos, totalizando 12 pares de amostras (4 configurações de amostras x 3 amostras).

Figura 20 - Conjunto de amostras identificadas.



Fonte: Autor (2022)

3.2.1.2 Definição dos parâmetros de ensaio

Todos os parâmetros utilizados para a realização do ensaio de desgaste foram baseados no trabalho realizado por Reis, 2017, o qual, por sua vez, utilizou-se de um caso prático existente na empresa Sulbras Moldes e Plásticos de Caxias do Sul. Este fato coloca o ensaio em um nível de simulação mais próximo da realidade, aumentando a sua confiabilidade, tendo em vista que reproduz as condições que já vêm sendo utilizadas na fabricação de peças termoplásticas pelo processo de injeção (REIS, 2017).

A velocidade do deslizamento linear estipulada para o ensaio foi de 0,2 m/s. Para todos os conjuntos de amostras, definiu-se uma quantidade de 100.000 ciclos. Antes do início dos testes, as amostras foram limpas com acetona P.A. Procedeu-se

então a montagem dos pares bucha/pino devidamente identificados no dispositivo de ensaio. Para os conjuntos de amostras onde estava prevista a utilização de lubrificação, a graxa branca para moldes foi aplicada diretamente na superfície dos pinos, conforme mencionado anteriormente.

3.2.2 Caracterização das amostras

Nesta seção, são apresentadas todas as técnicas de caracterização de amostras utilizados no presente trabalho, bem como, são descritos os parâmetros utilizados e os detalhes referentes a cada técnica utilizada.

3.2.2.1 Rugosidade

A avaliação do acabamento superficial das amostras foi realizada através da medição da rugosidade superficial, com a finalidade de mensurar a variação desta, ao longo do ensaio de desgaste e possíveis relações com o desgaste dos materiais em estudo.

Os dados foram obtidos pelo parâmetro de medição Rz (rugosidade média). Estas medições foram realizadas utilizando-se de um rugosímetro portátil, marca Digimess, modelo TR200, pertencente ao Laboratório de Metrologia do IFRS Campus Caxias do Sul, o qual é mostrado Figura 21. Utilizou-se um comprimento de amostragem (*cut-off*) de 0,8 mm e comprimento total de medição de 4 mm (5 x *cut-off* 0,8 mm).

As medições foram realizadas nos pinos após a deposição do filme (0 ciclo) e após 100.000 ciclos do ensaio cíclico; nas buchas, as medições ocorreram com 0 e 100.000 ciclos. O ponto de medição nos pinos localiza-se à 45 mm da face de menor diâmetro destes; já nas buchas, o ponto localiza-se à 7,5 mm da face de menor diâmetro.

Figura 21 - Rugosímetro digital portátil.



Fonte: Autor (202)

3.2.2.2 Perda de massa

O desgaste foi medido quantitativamente através da perda de massa ocorrida nos componentes do sistema proposto, em função do ensaio de desgaste. As massas das amostras foram medidas, com 0 e 100.000 ciclos, em uma balança analítica marca Shimadzu, modelo AY220, com 220 g de capacidade e resolução de 0,1 mg; pertencente ao laboratório de metrologia do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) Campus Caxias do Sul, conforme Figura 22.

Figura 22 – Balança analítica.



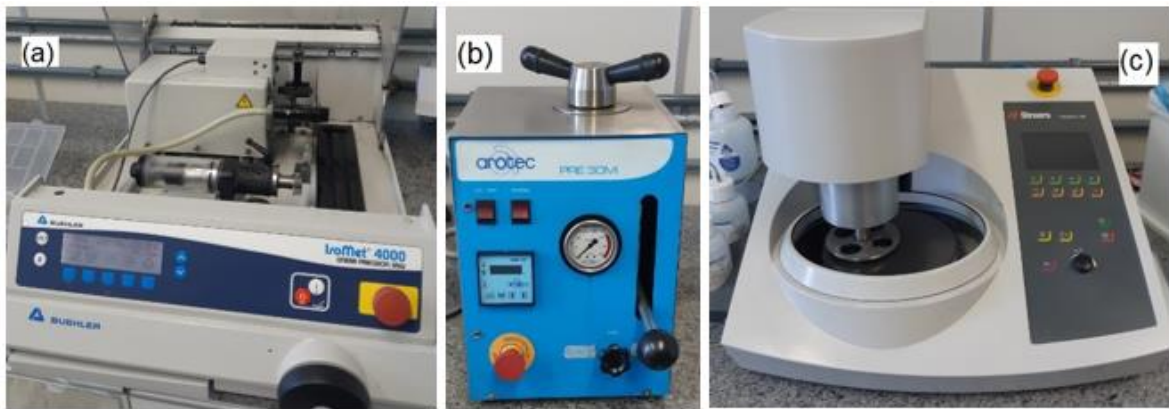
Fonte: Autor (2022)

3.2.2.3 Análise Metalográfica

A análise metalográfica das amostras foi realizada através das técnicas de microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

As etapas de preparação das amostras foram: corte metalográfico em cortadora de precisão da fabricante Buehler (Figura 23-a), modelo IsoMet 4000, embutimento em embutidora metalográfica da fabricante Arotec (Figura 23-b), modelo PRO30M, lixamento e polimento em politriz automática da fabricante Struers, modelo Tegramin-20 (Figura 23-c) e ataque químico em NITAL 3% (3 ml de ácido nítrico (HNO_3) em 97 ml de etanol). A preparação das amostras ocorreu no Laboratório de caracterização de materiais para mineração, da Universidade de Caxias do Sul (UCS).

Figura 23 – a) cortadora de precisão, b) embutidora metalográfica, c) politriz automática.



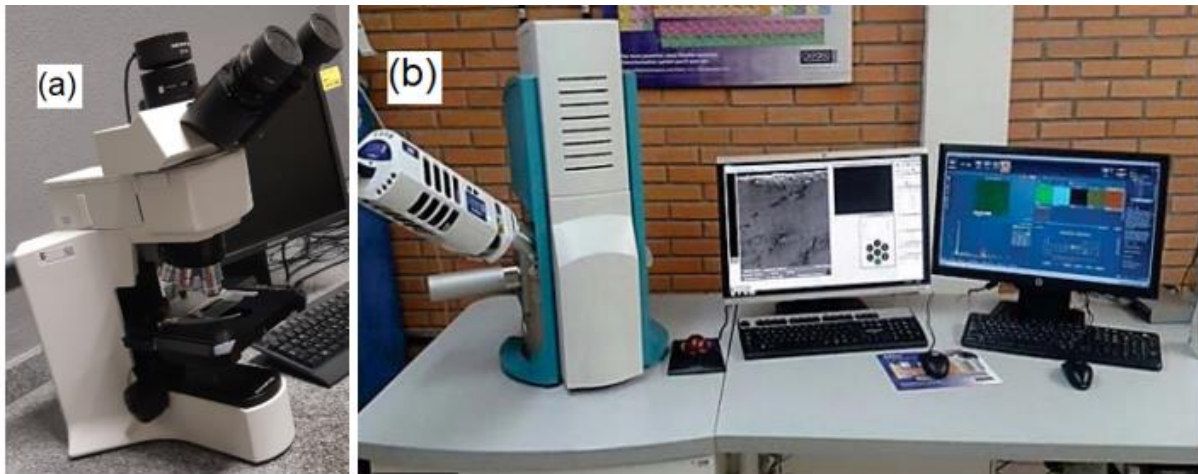
Fonte: Autor (2022)

Utilizou-se de microscopia óptica, para caracterizar a microestrutura das buchas de AISI H13 e AISI P20 e através disto, verificar a eficiência dos tratamentos térmicos realizados. A técnica de microscopia óptica também foi utilizada objetivando conhecer a composição microestrutural dos pinos sem DLC (na condição em que foi adquirido) e também com DLC, ao longo de sua seção transversal.

Para tal análise, utilizou-se um microscópio ótico, marca Olympus, modelo BX41M-LED, com capacidade de ampliação de até 1000x, pertencente ao laboratório de metalografia do IFRS Campus Caxias do Sul. O equipamento utilizado é mostrado na Figura 24-a.

Para as análises em MEV, utilizou-se um equipamento marca TESCAN, modelo VEGA LM 3, com capacidade de ampliação na ordem de 300000x, pertencente ao laboratório de microanálise do Parque Científico Tecnológico da Universidade de Passo Fundo (UPFParque). O equipamento utilizado é mostrado na Figura 24-b.

Figura 24 – a) Microscópio óptico; b) Microscópio eletrônico de varredura



Fonte: Autor (2022)

A preparação das amostras para a análise em MEV seguiu os mesmos procedimentos adotados na técnica de MO. As amostras passaram por uma limpeza por ultrassom com acetona por cerca de 5 minutos, após, foram submetidas a um jato de ar pressurizado para a eliminação de quaisquer partículas que não pertencessem às amostras. A realização das análises em MEV ocorreu em médio vácuo, utilizando uma tensão de 30 kV e utilizou-se de um detector de elétrons secundários (SE) (SILVA, 2016).

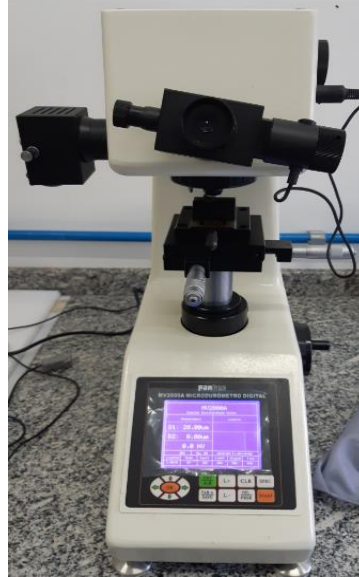
Através da análise metalográfica por MEV, foi possível realizar uma avaliação da morfologia das amostras e também, verificar características importantes relacionadas à eficiência do processo de deposição do filme de DLC, como por exemplo: regularidade na espessura de camada, deslocamento do filme ou falta de adesão, alteração no substrato, etc.

3.2.2.4 Microdureza

Após o tratamento térmico de têmpera e revenimento e a posterior usinagem de acabamento por eletroerosão a fio, uma bucha de cada material foi cortada no sentido transversal, com a finalidade de medir sua microdureza ao longo da seção.

O ensaio de microdureza foi realizado no Campus Farroupilha do IFRS, utilizando um microdurômetro digital, marca Pantec, modelo MV2000A, o qual é mostrado na Figura 25. A medição ocorreu com aplicação de carga de 200 g (HV0,2), equivalente a 1,96 N, com um tempo de indentação de 15 segundos.

Figura 25 – Microdurômetro digital.



Fonte: Autor (2022)

3.2.2.5 Nanodureza

A análise de nanodureza foi realizada com o intuito de determinar propriedades mecânicas da superfície dos filmes depositados. De forma semelhante aos testes mecânicos tradicionais (dureza e microdureza), a técnica consiste em um penetrador (ponta de diamante) que é empurrado em direção à superfície da amostra, enquanto a carga aplicada e o deslocamento do penetrador são medidos. Os resultados permitem a avaliação da carga como uma função do deslocamento em relação à área de contato que se modifica conforme a penetração (BOEIRA, 2016).

Os testes de nanodureza realizados no Laboratório de Caracterização de Superfícies em Nanoescala (LACASUNE) da Universidade de Caxias do SUL (UCS) utilizaram o equipamento da *Micro Materials* modelo *NanoTest-600*, com ponta de diamante tipo Berkovich, com taxa de carregamento de 0,05 mN/s e profundidade de indentação controlada em até 100 nm de modo a evitar a influência do substrato.

3.2.2.6 Variação da espessura de camada

Com o intuito de verificar o desgaste ocorrido no filme de DLC durante o ensaio de desgaste, realizou-se análise em MEV para determinar a diminuição da espessura de camada do filme entre o início e o fim do ensaio cíclico de bancada. A variação da espessura foi determinada pela subtração da espessura média inicial (de um pino sem desgaste) pela espessura medida nos pinos desgastados pelo ensaio. Essa análise

juntamente com a análise de perda de massa auxilia na determinação dos mecanismos de desgaste envolvidos no par tribológico pino/bucha, pois a diminuição da espessura da camada está diretamente relacionada com a perda de massa dos pinos durante o ensaio.

Um pino de cada um dos quatro conjuntos de amostras e também um pino que não foi submetido ao ensaio de desgaste, foram cortados em sua seção transversal em cortadora metalográfica de precisão (Figura 23-a), embutidas em embutidora metalográfica Arotec (Figura 23-b), modelo PRO30M e, por fim, lixadas e polidas em politriz automática Struers, modelo Tegramin-20 (Figura 23-c).

Finalmente, as amostras foram submetidas à análise em MEV, conforme procedimento descrito na seção 3.2.2.3 *Metalografia*.

3.2.2.7 Topografia

A determinação da topografia das áreas submetidas ao contato deslizante durante o ensaio cíclico é um fator importante para explicar o comportamento ao desgaste das amostras, pois é a partir dela que podemos observar e caracterizar os mecanismos de desgaste atuantes nos componentes analisados neste estudo. Busca-se também a detecção de possíveis defeitos, riscos e/ou trincas presentes nas amostras antes e após o ensaio de desgaste (GONZÁLEZ, 2017).

Para a realização desta análise, foram utilizados um par pino/bucha de cada um dos 4 conjuntos de amostras, após esses serem submetidos ao ensaio de desgaste. As buchas e pinos sem desgaste também foram analisados para comparação da topografia.

As amostras selecionadas foram usinadas em uma cortadora metalográfica de precisão (Figura 23-a) e posteriormente submetidas à análise no MEV, seguindo procedimento descrito na seção 3.2.2.3 *Metalografia*. As buchas foram cortadas na direção axial, permitindo a análise da superfície da área côncava (parede do furo), já os pinos foram cortados transversalmente, para que a análise fosse realizada na superfície externa do pino, onde o filme fino está depositado.

3.2.2.8 Adesão do filme

Para identificar e quantificar as propriedades referentes à adesão do filme depositado para com o substrato, utilizou-se o ensaio de *nanoscratch test* (nanoesclerometria linear), a fim de determinar a carga crítica necessária para o deslocamento dos filmes depositados nos pinos. Através desta técnica e do gráfico gerado por ela, também foi possível realizar o cálculo do coeficiente de atrito do filme de DLC, em função dos valores de força de atrito (F_a) e força normal (F_n).

Utilizou-se o equipamento Nano test-600, marca Micro Materials, localizado no LACASUNE da UCS. O equipamento possui uma ponta de diamante indentada na superfície da amostra que a risca tangencialmente, aplicando uma carga variável ou constante na direção normal à superfície do filme. Os testes de nanoesclerometria foram realizados utilizando uma ponta cônica de diamante com raio final de 25 μm , com taxa de carregamento de 0,2 mN/s, aumentando linearmente até a carga máxima final de 500 mN nos últimos 100 μm , totalizando uma distância percorrida de 2.700 μm em cada trilha. Foram realizadas 5 repetições (trilhas)

3.2.2.7 GDOES

Visando determinar a composição química do revestimento obtido, buscou-se obter os perfis qualitativos de concentração em função da profundidade através da técnica de espectroscopia de emissão óptica por descarga luminescente (GDOES). Esta análise foi realizada sobre a superfície de uma amostra revestida com o filme de DLC, sem esta ter sido submetida ao desgaste.

A técnica de GDOES permite obter perfis qualitativos de composição química elementar em função da profundidade, pois combina os processos de pulverização catódica e emissão atômica, que possui limites de detecção na ordem de 0,1 a 50 ppm, para caracterização de superfícies, revestimentos e interfaces. A técnica consiste em um sistema de vácuo com atmosfera de gás argônio, as partículas do gás ionizadas pela diferença de potencial aplicada por uma fonte de radiofrequência (RF) aceleram-se para a superfície da amostra. A amostra (catodo) é bombardeada pelos íons de Ar, que promovem a pulverização catódica do material, decompondo-o. Os átomos retirados da amostra são excitados e ionizados e quando voltam ao seu estado inicial de menor energia, emitem fótons, de tal forma que cada elemento químico

possui uma energia característica. Com diversos espectrofotômetros presentes no equipamento, é possível a detecção de diferentes energias dos fótons (comprimentos de onda) de forma simultânea. O sistema de análise dos espectrofotômetros analisa de forma proporcional, o número de átomos dos elementos presentes ao número de fótons emitidos por eles, em função da profundidade da amostra (PISONERO *et al.*, 2006).

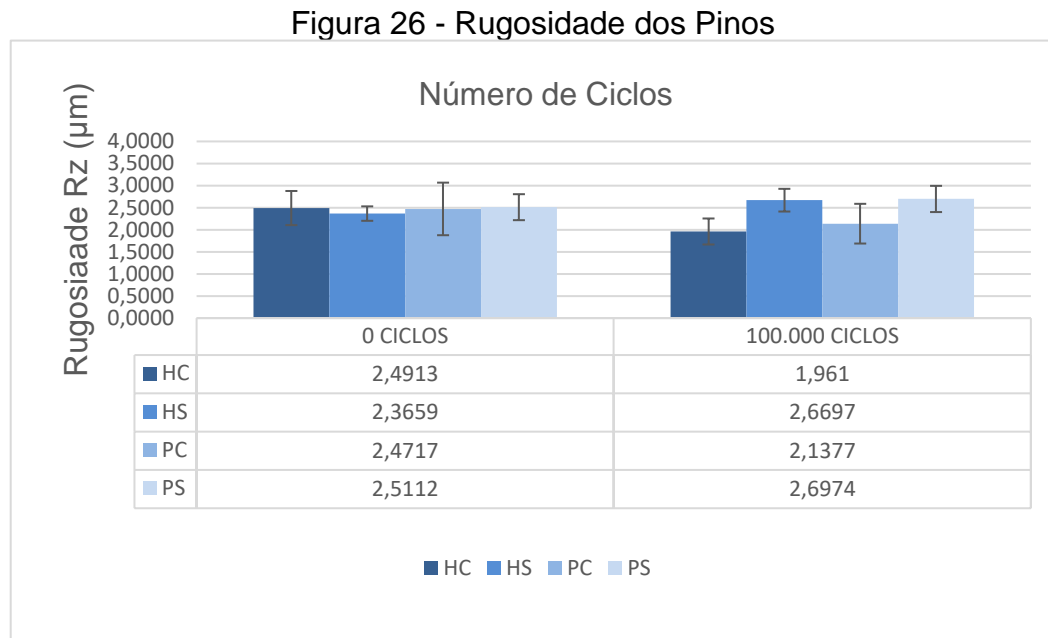
Essas análises foram obtidas utilizando o equipamento HORIBA GD-Profilier 2 do LACASUNE da UCS.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo encontram-se descritos os resultados obtidos nos ensaios e caracterizações de amostras realizados e também as discussões acerca dos resultados.

4.1 RUGOSIDADE

No gráfico da Figura 26, são apresentados os resultados da rugosidade Rz dos pinos de extração antes e após o ensaio de desgaste, bem como os valores médios e do desvio padrão.



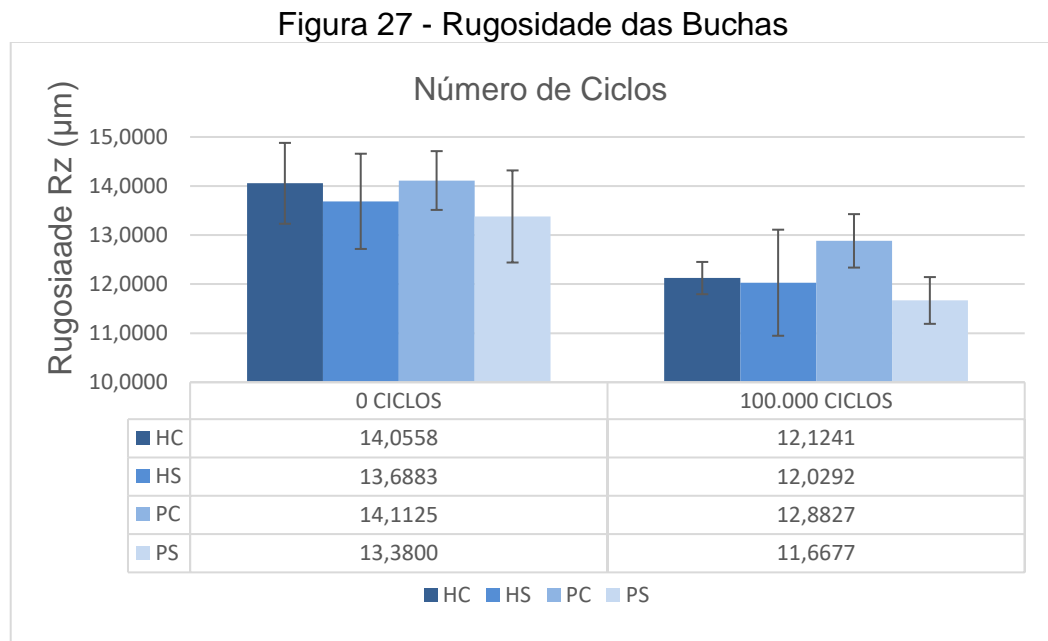
Fonte: Autor (2022)

Conforme observado na Figura 26, os pinos dos conjuntos HS e PS apresentaram um leve aumento na rugosidade superficial, o que se relaciona com o fato destes conjuntos terem sido testados sem a utilização de graxa e, portando, as partículas de DLC desprendidas durante o ensaio cíclico agiram diretamente sobre a superfície do pino ocasionando esta elevação na rugosidade superficial.

Já nos pinos dos conjuntos HC e PC, verifica-se que a rugosidade superficial foi ligeiramente reduzida após o ensaio. Devido a utilização de graxa como agente lubrificante nos pinos de ambos os conjuntos, as partículas desprendidas durante o ensaio não exerceram contato direto com a superfície dos pinos. A diminuição na rugosidade superficial destes pinos está relacionada com a formação de uma pasta

abrasiva, resultante da mistura da graxa com as partículas que se desprenderam durante o ensaio, que ocasionou um efeito de superacabamento na superfície dos pinos.

No gráfico da Figura 27, são mostrados os resultados referentes à rugosidade Rz das buchas extratoras, antes e após o ensaio cíclico de desgaste e também, os valores médios e do desvio padrão calculado.



Fonte: Autor (2022)

Observa-se que as buchas dos 4 conjuntos de amostras tiveram um comportamento semelhante entre si, quanto à rugosidade após a realização do ensaio de cíclico de desgaste dos conjuntos pino-bucha. Houve diminuição na rugosidade superficial das buchas de todos os conjuntos testados, portanto, a utilização de graxa como agente lubrificante não foi um fator que ocasionou diferenças expressivas entre as diferentes condições de ensaio em que as buchas foram testadas.

Diferente dos pinos, onde a rugosidade de alguns conjuntos aumentou e dos demais diminuiu, nas buchas o comportamento para ambos os conjuntos foi semelhante. A diminuição percentual da rugosidade variou de 8,7 a 13,74%, mostrando um comportamento similar entre os conjuntos, conforme pode ser visto no gráfico.

O fato de todas as buchas terem sua rugosidade superficial diminuída após o ensaio cíclico se explica, em parte, devido aos valores iniciais da rugosidade

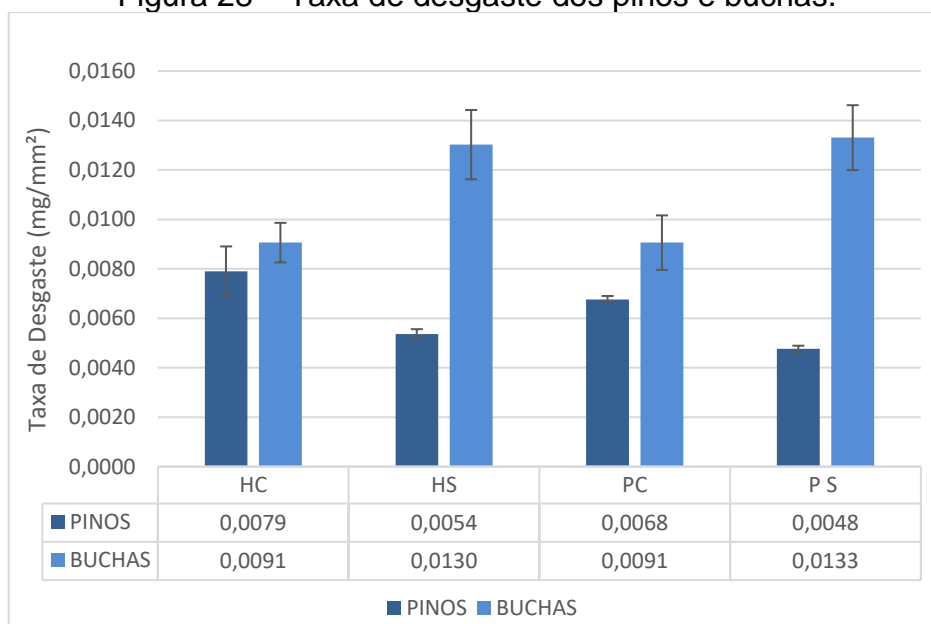
superficial média (Rz) das buchas serem altos (13,69 a 14,11 μm). Estes valores elevados de rugosidade superficial das buchas são inerentes ao processo de eletroerosão à fio, o qual foi utilizado para usinagem do diâmetro interno das buchas.

4.2 PERDA DE MASSA

A Figura 28 apresenta os valores da taxa de desgaste através da variação da massa das amostras e também o desvio padrão para cada conjunto de amostras, obtidos após 100.000 ciclos, nos quatro conjuntos de amostras testados. A unidade utilizada foi mg/mm^2 para verificar a perda de massa por área de contato. A perda de massa de cada pino foi dividida por $1.020,5 \text{ mm}^2$, que corresponde à área de contato, tendo em vista que os pinos têm 5 mm de diâmetro externo e comprimento de contato de 65 mm. Para as buchas, a perda de massa de cada amostra foi dividida por pela área de contato de $235,5 \text{ mm}^2$, à qual foi obtida em função das buchas possuírem um diâmetro interno de 5mm e comprimento de contato de 15 mm.

O erro experimental foi calculado dividindo-se o desvio padrão pela média dos valores de cada conjunto de amostras. O valor obtido para os pinos foi de 12,66% para o conjunto HC, 3,76% para o HS, 2,05% para o PC e 6,56% para o PS. Já para as buchas, o erro foi de 8,84% para o conjunto HC, 10,76% para o HS, 11,47% para o PC e 9,87% para o PS.

Figura 28 – Taxa de desgaste dos pinos e buchas.



Fonte: Autor (2022)

Pode-se observar, que para os pinos dos conjuntos nos quais se utilizou graxa branca como agente lubrificante (HC e PC), o desgaste foi maior que nos pinos onde não se utilizou a graxa (HS e PS). Este comportamento é justificado devido ao fato de que as partículas do filme de DLC que se desprenderam durante o ensaio formaram uma pasta abrasiva quando se misturaram com a graxa existente entre pino e a bucha, o que intensificou o desgaste.

Nota-se que o objetivo inicial de propor e testar um sistema pino-bucha sem utilização de graxa, em alternativa ao sistema atual que faz o uso de graxa como agente lubrificante, foi atingido. Durante o ensaio cíclico, não se notaram diferenças no comportamento dos diferentes conjuntos, sendo que o ensaio fluiu normalmente até a quantidade de 100.000 ciclos, sem travamentos ou comportamentos durante o movimento cíclico que representassem a necessidade de interrupção do ensaio.

Além disso, os conjuntos onde não se utilizou graxa mostraram-se mais eficazes, pois observou-se uma menor taxa de desgaste nos pinos. Nas amostras onde fez-se o uso de graxa, a perda de massa foi mais acentuada e também houve diminuição na rugosidade superficial. Portanto, para pinos extratores DIN 1530 tipo A (AISI H13, temperados, revenidos e nitretado a gás), com filme fino de DLC depositado sobre sua superfície, não se recomenda o uso de graxa lubrificante, pois mostrou-se mais deletéria ao promover a intensificação da perda de massa.

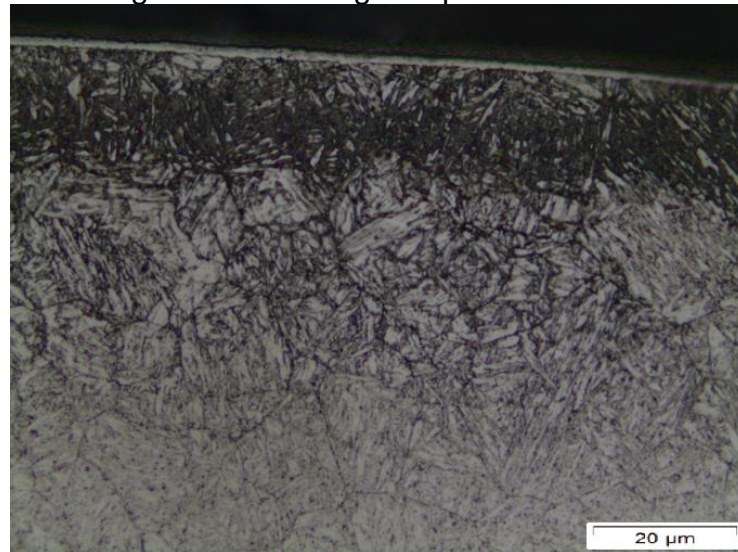
Ao observar os conjuntos HS e PS, verifica-se que as buchas tiveram um desgaste maior em relação às buchas em que se utilizou a graxa (HC e PC). Este comportamento se explica pela dureza menor das buchas em relação aos pinos e ao contato direto que as buchas tiveram com o pino durante o ensaio.

Através da Figura 28 também é possível perceber que a variação do material da bucha (H13 e P20) não resultou em grandes diferenças no comportamento ao desgaste das amostras. Conclui-se que a variável material da bucha, é menos relevante para a taxa de desgaste, do que a condição de lubrificação.

4.3 METALOGRAFIA

A Figura 29 apresenta uma micrografia, com ampliação de 1000x, da seção transversal de um pino extrator na condição que este é comercializado, ou seja, temperado, revenido, nitretado a gás e retificado.

Figura 29 – Micrografia pino sem DLC.



Fonte: Autor (2022)

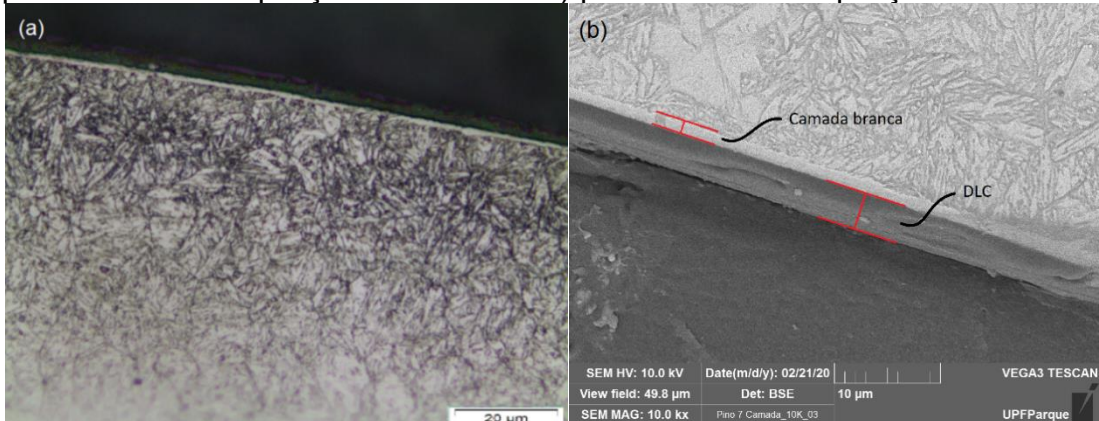
A morfologia observada na Figura 29 é característica de um aço H13 temperado e revenido, com estrutura martensítica. Na borda da amostra (parte superior da imagem) é possível observar a presença de camada branca ou camada de compostos e, logo abaixo, uma área chamada de zona de difusão. Estas por sua vez, são inerentes ao processo de nitretação a gás e formam-se pela precipitação e difusão de nitretos (AKHTAR; ARIF; YILBAS, 2010).

A Figura 30 apresenta micrografias de um pino extrator com DLC depositado sobre a sua superfície, sem desgaste. Na Figura 30-a têm-se uma microscopia óptica com ampliação de 1.000x, sendo que nesta imagem não é possível identificar com facilidade a camada de DLC, por conta de sua coloração escura ser muito similar à coloração da baquelite utilizada no embutimento metalográfico. Já na Figura 30-b, é apresentada uma imagem de MEV com 10.000x de ampliação, onde é possível identificar e diferenciar o filme de DLC e a camada branca.

É possível ainda observar, a uniformidade no filme de DLC no que se refere à espessura e também a ausência de falhas e/ou deslocamento entre o DLC e o substrato, indicando uma boa adesão do filme resultante do processo de deposição.

Figura 30 - Micrografias pinos com DLC.

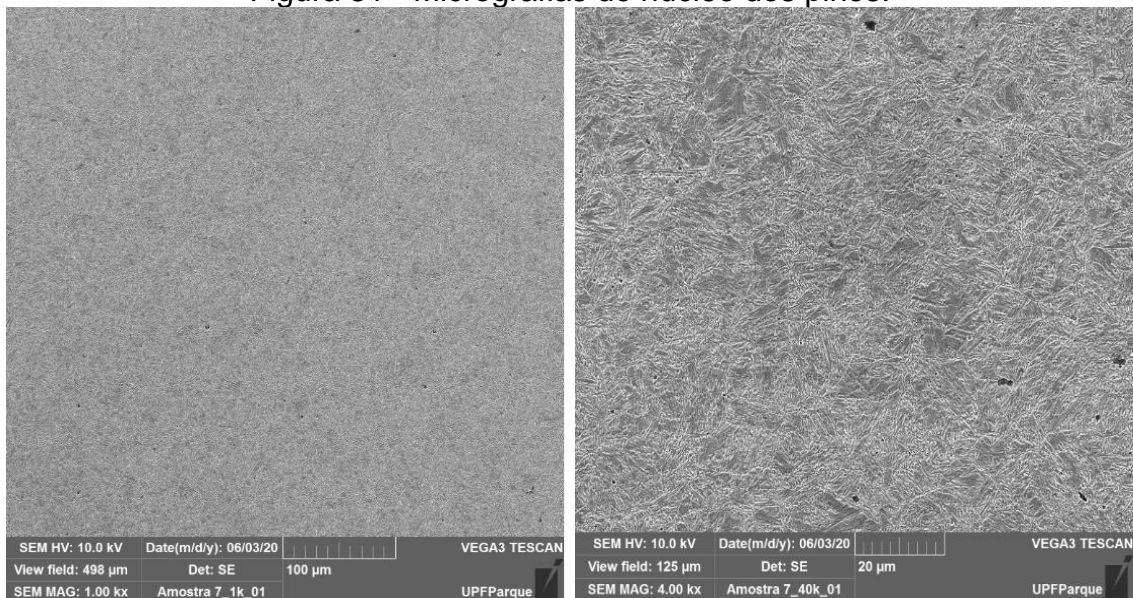
a) pino com DLC ampliação 1.000x MO. b) pino com DLC ampliação 10.000x MEV.



Fonte: Autor (2022)

A microestrutura do núcleo dos pinos foi obtida por MEV e esta é apresentada na Figura 31, com ampliação de 1.000x e 4.000x.

Figura 31 - Micrografias do núcleo dos pinos.

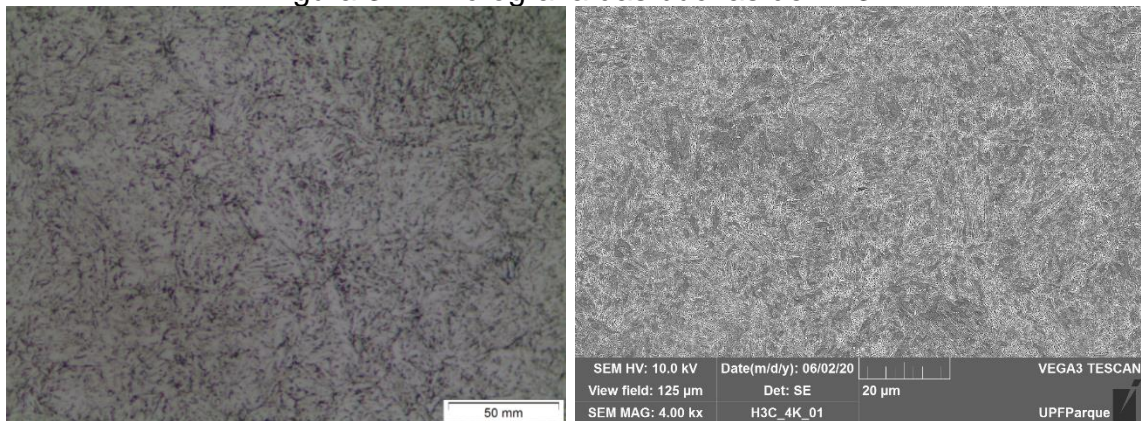


Fonte: Autor (2022)

A microestrutura que compõe o núcleo dos pinos mostrada na Figura 31, é característica de um aço H13 temperado e revenido, sendo composta por martensita revenida (AKHTAR; ARIF; YILBAS, 2010).

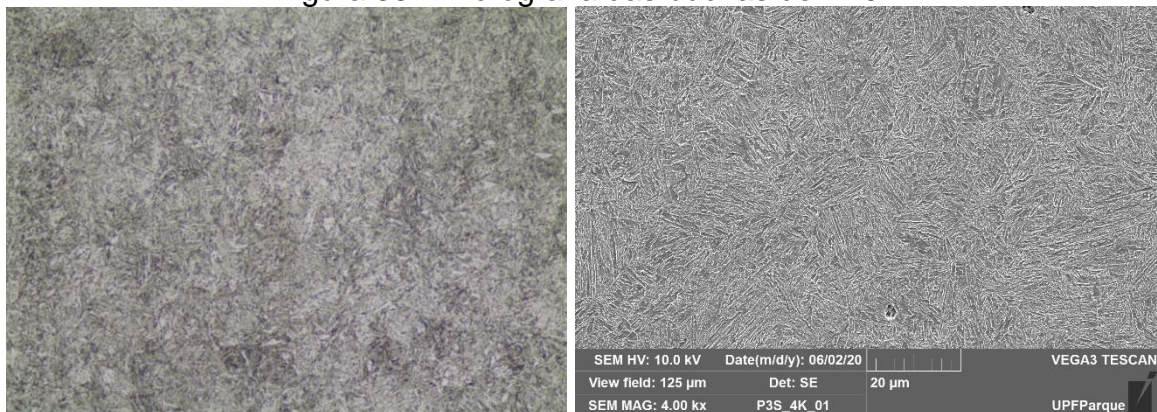
A Figura 32 apresenta micrografias da bucha de H13, com ampliação de 1000x obtida por MO e 4000x obtida por MEV. A Figura 33 apresenta micrografias da bucha de P20, com ampliação de 1000x obtida por MO e 4000x obtida por MEV.

Figura 32 - Micrografia das buchas de H13.



Fonte: Autor (2022)

Figura 33 - Micrografia das buchas de P20.



Fonte: Autor (2022)

As microestruturas observadas em Figura 32 e Figura 33 são compostas por martensita revenida, que é um constituinte resultante da têmpera e revenimento destes aços. Através disto, evidenciou-se a eficiência dos tratamentos térmicos empregados, os quais resultaram em uma microestrutura totalmente transformada pelos ciclos térmicos.

4.4 MICRODUREZA

O valor médio da microdureza, medido na seção transversal da bucha de AISI H13, foi de 554,6 HV 0,2, com um erro experimental de 9,58%. Na bucha de AISI P20, o valor médio obtido foi de 477 HV 0,2, com um erro experimental de 6,48%. O erro experimental foi calculado dividindo-se o desvio padrão pela média dos valores de cada bucha.

Os valores de microdureza encontrados para ambos os materiais estão de acordo com o esperado para os ciclos térmicos de têmpera e revenimento aplicados e também com a microestrutura martensítica revenida, observada na análise metalográfica.

4.5 NANODUREZA

A nanodureza dos filmes depositados foi obtida através de uma taxa de carregamento de 0,05 mN/s até a profundidade máxima de 100 nm, a fim de evitar a influência do substrato na análise.

O valor obtido pela análise de nanodureza foi de $9,51 \pm 1,55$ GPa, sendo este o valor médio de 20 indentações. A estimativa de erro experimental para a nanodureza foi de 16,25%.

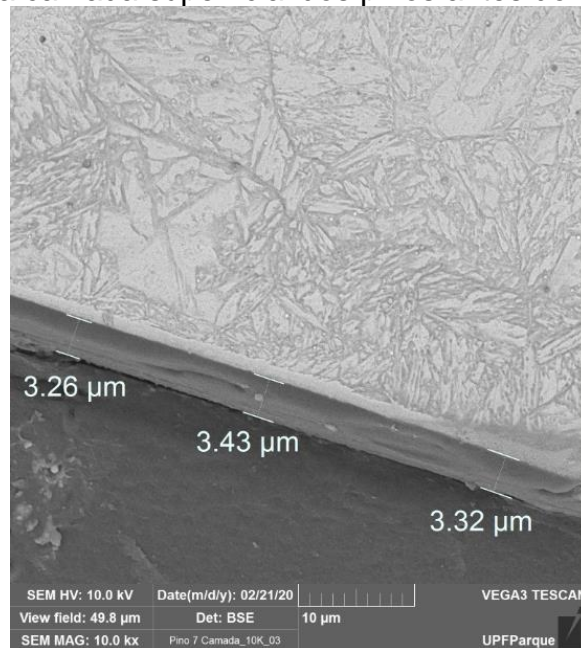
A literatura, por simplificação, classifica os materiais com propriedades de lubrificantes sólidos, em função da dureza, sendo que materiais com dureza inferior a 10 GPa são denominados de lubrificantes sólidos macios e os que possuem dureza superior a 10 GPa, são denominados de lubrificantes sólidos duros. Sendo assim, o filme de *DLC* objeto de estudo do presente trabalho, possui uma dureza que está no limite entre as duas classificações (considerando o desvio padrão das medições) (DONNET; ERDEMIR, 2004).

A literatura ressalta ainda que a presença de oxigênio incorporado nos filmes finos de carbono diminui a densidade do filme resultando em uma menor dureza. A semelhança dos valores de dureza observada entre a literatura e os valores obtidos se deve ao fato que a mesma técnica foi utilizada para a obtenção do filme de carbono amorfo (ROBERTSON, 2002).

4.6 VARIAÇÃO DA ESPESSURA DE CAMADA

Na Figura 34, é apresentada uma imagem obtida por MEV com aumento de 10.000x, de um pino extrator após a deposição do filme fino de DLC e previamente ao ensaio de desgaste.

Figura 34 - MEV da camada superficial dos pinos antes do ensaio de desgaste.

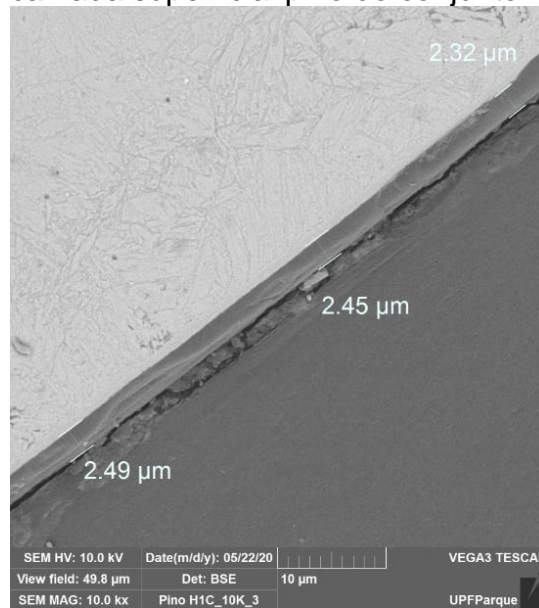


Fonte: Autor (2022)

A espessura de camada da amostra visualizada no Figura 34 foi medida para fins de comparação com as amostras que foram submetidas ao ensaio de desgaste. Como pode-se observar, o filme de DLC possui uma camada uniforme e com pouca variação de espessura. O valor médio encontrado para a espessura de camada inicial foi de 3,34 μm . Esse valor foi considerado como a espessura inicial, pois o filme de DLC de todas as amostras foi depositado utilizando-se dos mesmos parâmetros, o que permite a comparação entre as amostras.

A Figura 35 apresenta uma imagem MEV da camada superficial de um pino do conjunto HC, após ensaio cíclico de desgaste. Pode-se observar que não houve desgaste completo da camada, tampouco delaminação ou deslocamento da camada em relação ao substrato. A espessura média resultante do ensaio de desgaste para o conjunto HC foi de 2,42 μm , que representa uma redução de 27,54% em relação à espessura inicial das amostras.

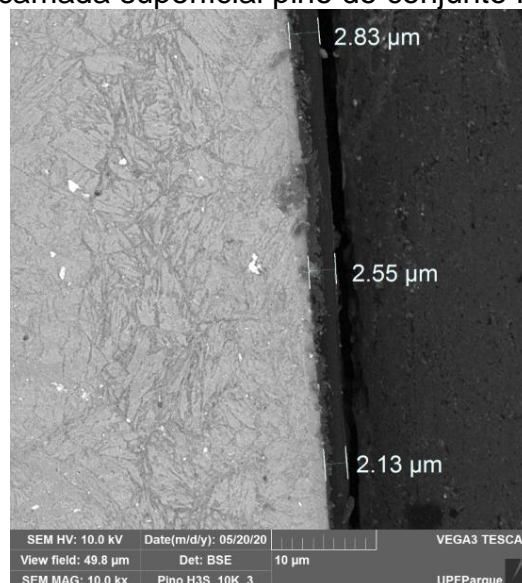
Figura 35 - MEV camada superficial pino do conjunto HC após desgaste



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 36 é apresentada uma imagem MEV da camada superficial de um pino do conjunto HS, após ensaio cíclico de desgaste. Como é possível observar, a camada de DLC ainda está presente na amostra, demonstrando que o ensaio de desgaste até 100.000 ciclos não ocasionou o desgaste total da camada. Também é possível notar que não há falhas que poderiam ocasionar em delaminação ou deslocamento da camada em relação ao substrato. A espessura média resultante do ensaio de desgaste para o conjunto HS foi de 2,50 μm , que representa uma redução de 25,06% em relação à espessura inicial das amostras.

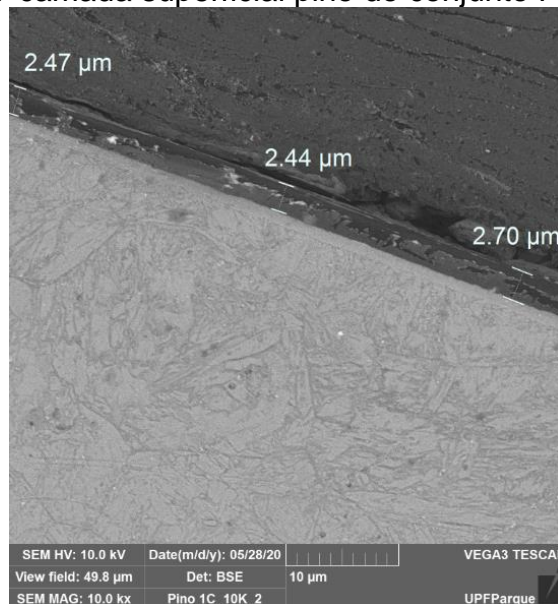
Figura 36 - MEV camada superficial pino do conjunto HS após desgaste.



Fonte: Autor (2022)

A Figura 37 apresenta uma imagem MEV da camada superficial de um pino do conjunto PC, após ensaio cíclico de desgaste. Nota-se a presença de uma camada de DLC remanescente do ensaio de desgaste, indicando que no ensaio cíclico não houve desgaste completo da camada. Não é possível observar defeitos de trincas, delaminação ou deslocamento da camada em relação ao substrato. A espessura média resultante do ensaio de desgaste para o conjunto PC foi de 2,54 μm , que representa uma redução de 24,04% em relação à espessura inicial das amostras.

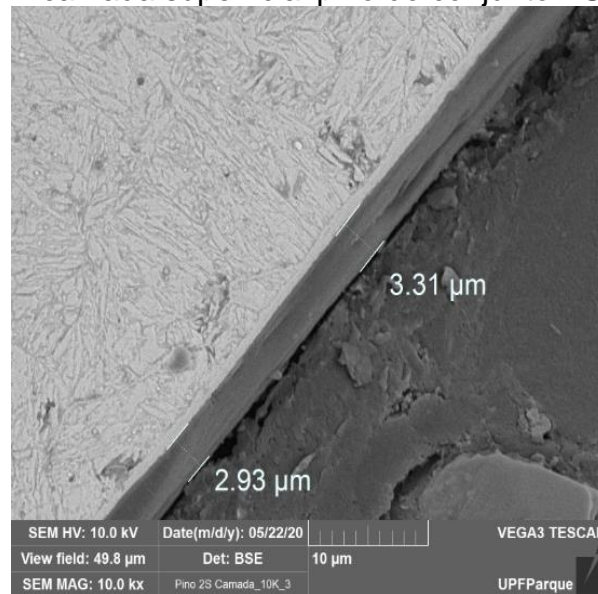
Figura 37 - MEV camada superficial pino do conjunto PC após desgaste



Fonte: Autor (2022)

A Figura 38 apresenta uma imagem MEV da camada superficial de um pino do conjunto PS, após o ensaio cíclico de desgaste. Observa-se que a camada de DLC ainda está presente na amostra, indicando que o ensaio cíclico não foi suficiente para o desgaste total da camada depositada sobre a superfície do pino. Visualmente, não se nota presença de falhas que poderiam resultar na ocorrência de defeitos como trincas ou deslocamento do filme fino. A espessura média resultante do ensaio de desgaste para o conjunto HS foi de 3,12 μm , que representa uma redução de 6,59% em relação à espessura inicial das amostras.

Figura 38 - MEV camada superficial pino do conjunto PS após desgaste



Fonte: Autor (2022)

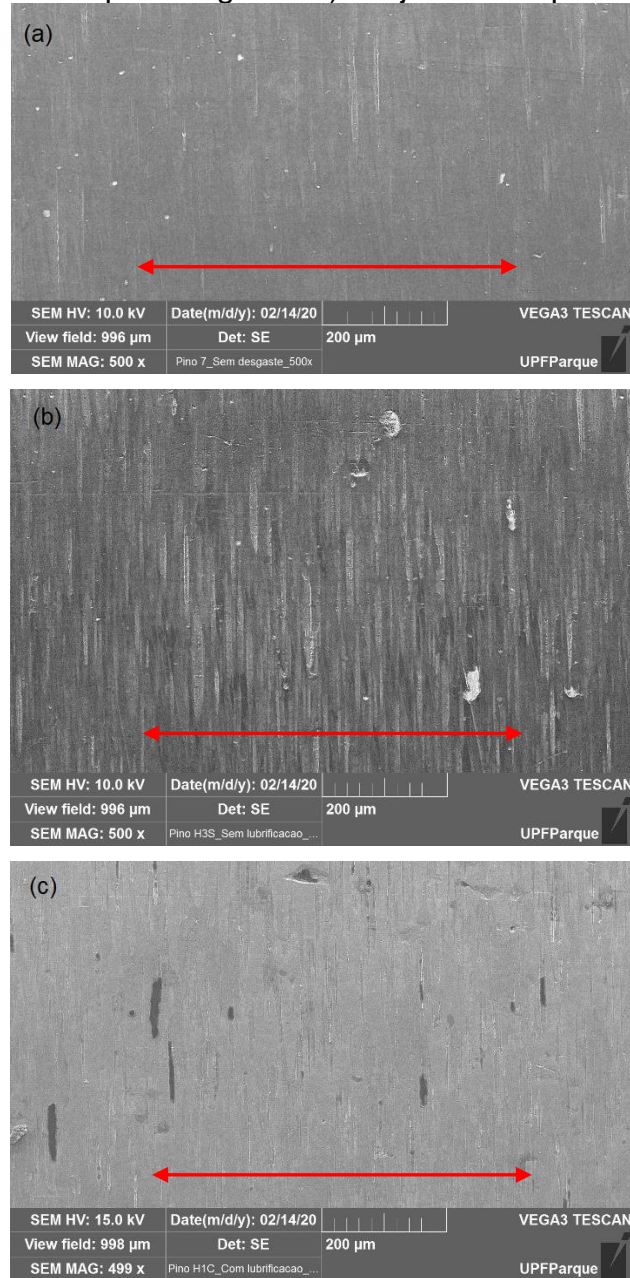
4.7 TOPOGRAFIA

Após obtenção das imagens de MEV verificando a espessura média do filme de DLC (3,34 µm), foram analisados os pinos com DLC com e sem lubrificação após o teste de bancada. A Figura 39-a mostra o filme de DLC sobre o pino antes do ensaio de desgaste. A direção da seta vermelha na Figura 39 indica a posição longitudinal do pino e também o sentido de medição da rugosidade.

Nas Figura 39-b e Figura 39-c, apresentam-se as imagens dos pinos sem e com o uso de graxa, após 100.000 ciclos de ensaio, respectivamente. Na ciclagem de 100.000 ciclos, foram observados desgastes devido ao atrito com a bucha. O filme de DLC sofreu abrasão, soltando do substrato em algumas regiões conforme mostram as imagens.

Visualiza-se na Figura 39-b uma maior rugosidade em relação à amostra com graxa da Figura 39-c (riscos no sentido vertical das imagens). Partículas de DLC quando misturadas com a graxa funcionaram como uma pasta de polimento por abrasão diminuindo as rugosidades do filme de DLC.

Figura 39 - MEV da topografia superficial dos pinos com DLC. a) sem desgaste. b) conjunto HS após desgaste. c) conjunto HC após desgaste

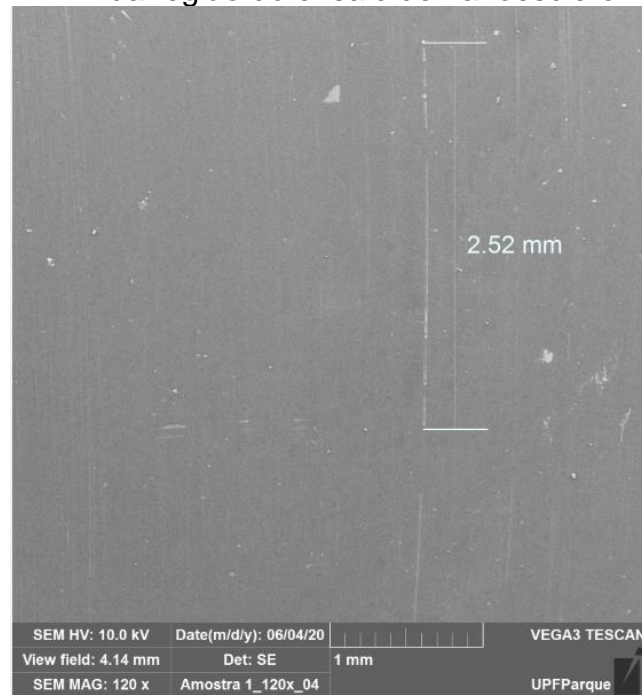


Fonte: Autor (2022)

4.8 ADESÃO DO FILME

Com intuito de quantificar as propriedades de adesão do filme de DLC, uma amostra foi submetida ao ensaio de nanoesclerometria linear. A Figura 40 mostra a amostra após ser submetida ao ensaio, sendo possível observar a trilha oriunda do riscamento realizado.

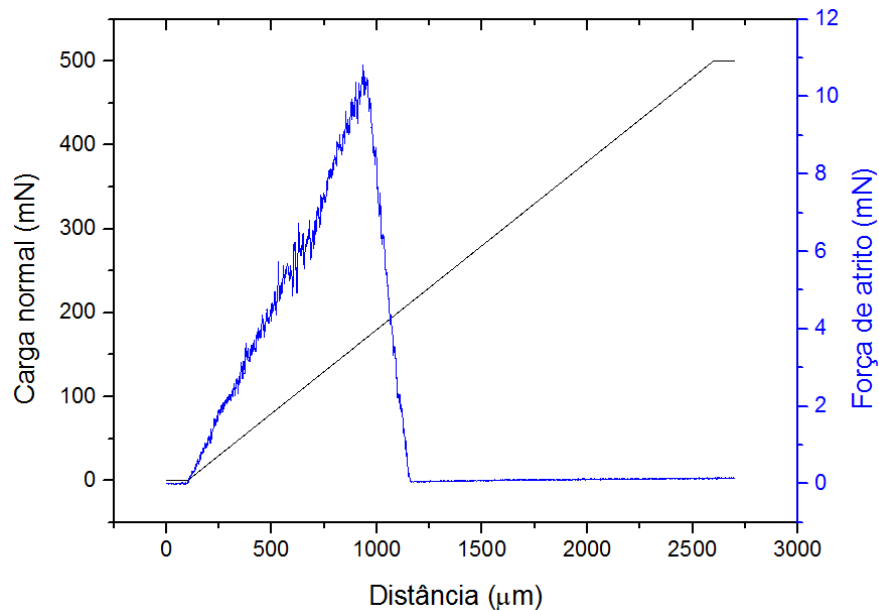
Figura 40 - MEV da região do ensaio de nanoesclerometria linear



Fonte: Autor (2022)

A Figura 41 apresenta os resultados em um gráfico da carga normal e da força de atrito gerados em função da distância de riscamento. Observa-se que, enquanto a carga normal aplicada aumenta linearmente de 0 a 500 mN (linha preta), a força de atrito aumenta gradativamente, em um comportamento típico do processo de deformação plástica, até atingir limite do equipamento que é de 500 mN. Na representação da linha da força de atrito (linha azul), não é possível observar uma variação brusca da força, a qual indicaria um comportamento típico de delaminação do filme a partir daquele ponto da amostra.

Figura 41 - Gráfico da carga normal e força de atrito em função da distância percorrida



Fonte: Autor (2022)

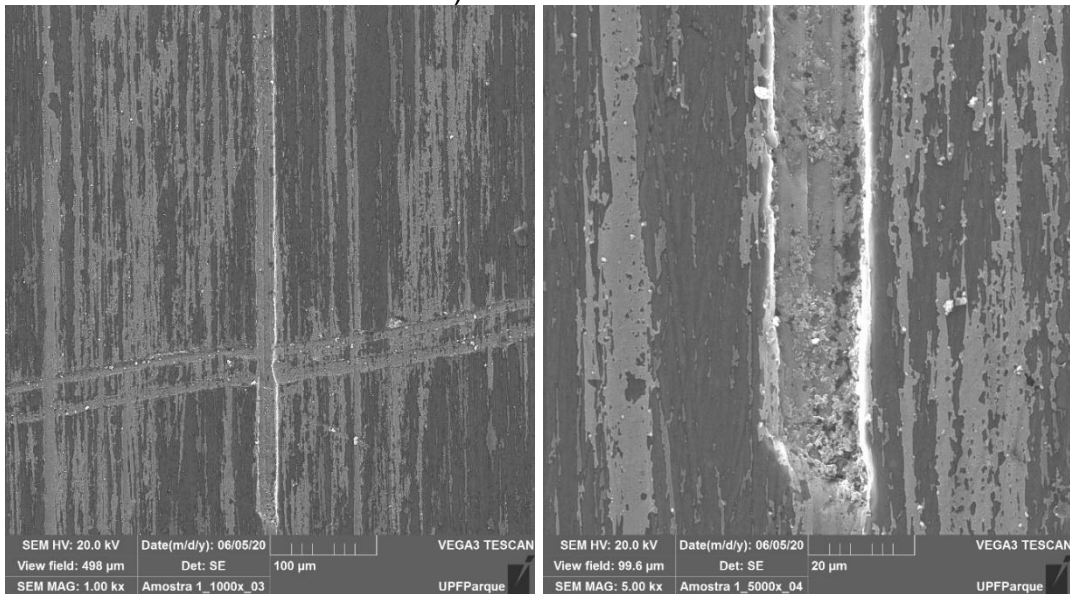
Este comportamento observado na Figura 41 indica que houve apenas ocorrência do processo de deformação plástica no filme, pois o carregamento até 500 mN não foi o suficiente para que os mecanismos de falha do filme de DLC e consequente delaminação ocorressem. Petry (2016) atribuiu a adesão alta ao fato de à medida que a temperatura de deposição dos filmes de DLC aumenta (temperaturas iguais ou superiores a 100 °C), a presença de H, Si e O diminuem em relação ao C. A presença de mais átomos de C na interface mais externa (DLC/Intercamada) em combinação com menos átomos de hidrogênio, oxigênio e silício permite a formação de mais ligações químicas C-C do que ligações químicas de Si-C na interface mais externa, fato este que aumenta a adesão dos filmes DLC no aço (PETRY *et al.*, 2016).

Portanto, pode-se concluir que a boa adesão observada tanto no ensaio cíclico de desgaste quanto no ensaio de nanoesclerometria linear, tem relação com os parâmetros de deposição do filme de DLC sobre os pinos de extração, sendo que se utilizou a temperatura de 300 °C, tempo de 60 minutos e líquido precursor HMDSO à base de silício para formação da intercamada.

A Figura 42 apresenta imagens de MEV das trilhas de riscamento geradas durante o ensaio de *nanoscratch test*. Como é possível observar, não há indicativos de falha do filme de DLC, apenas marcas de deformação plástica. Esta avaliação colabora com os resultados observados no gráfico da Figura 41, para demonstrar que

não houve falha do filme de DLC. Conclui-se que a carga crítica para ocorrência da delaminação do filme de DLC é superior a 500 mN.

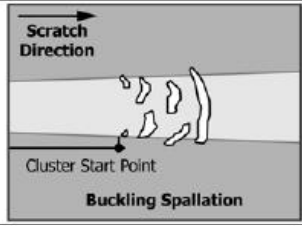
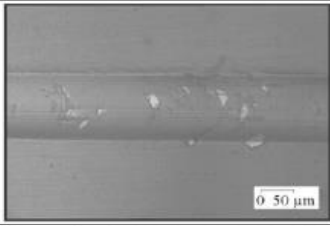
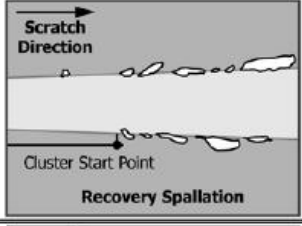
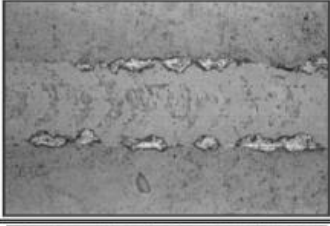
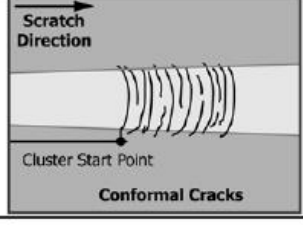
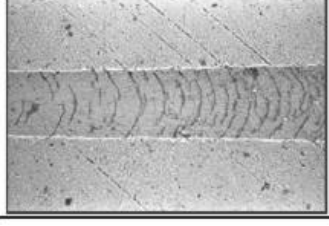
Figura 42 - MEV superfície da amostra submetida a *nanoscratch test*. a) aumento de 1000x. b) aumento de 5000x.



Fonte: Autor (2022)

A norma ASTM C1624-22 classifica os mecanismos de falha em ensaios *scratch test*. Os mecanismos observados na Figura 42, assemelham-se a: trincas de conformação (*conformal cracks*), *buckling spallation* e também *recovery spallation*, como é mostrado na Figura 43 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2022).

Figura 43 - Características de falha de *scratch test* em revestimentos duros.

Buckling Spallation			<p>Buckling Spallation PVD DLC (2.0 μm) on hardened and polished M42 steel (66 HRC); Lc = 57 N (Micrograph Source 1)</p>
Recovery Spallation			<p>Recovery Spallation at the Border of the Scratch Crack PVD TIN (1.4 μm) on hardened and polished M2 steel (64 HRC); Lc = 37 N (Micrograph Source 3)</p>
Conformal Cracks			<p>Conformal Cracks Arc-discharge DLC (0.4 μm) on annealed and polished 440B steel (260 HB); Lc = 8 N (Micrograph Source 1)</p>

Fonte: Autor (2022)

O ensaio de *nanoscratch test* também foi utilizado para calcular o coeficiente de atrito do filme de carbono amorfo. Utilizando dos valores de força de atrito (F_a) e força normal (F_n) obtidos no gráfico da Figura 41 e utilizando-se da Equação 1, obteve-se um valor médio para o coeficiente de atrito (μ) de 0,02, onde:

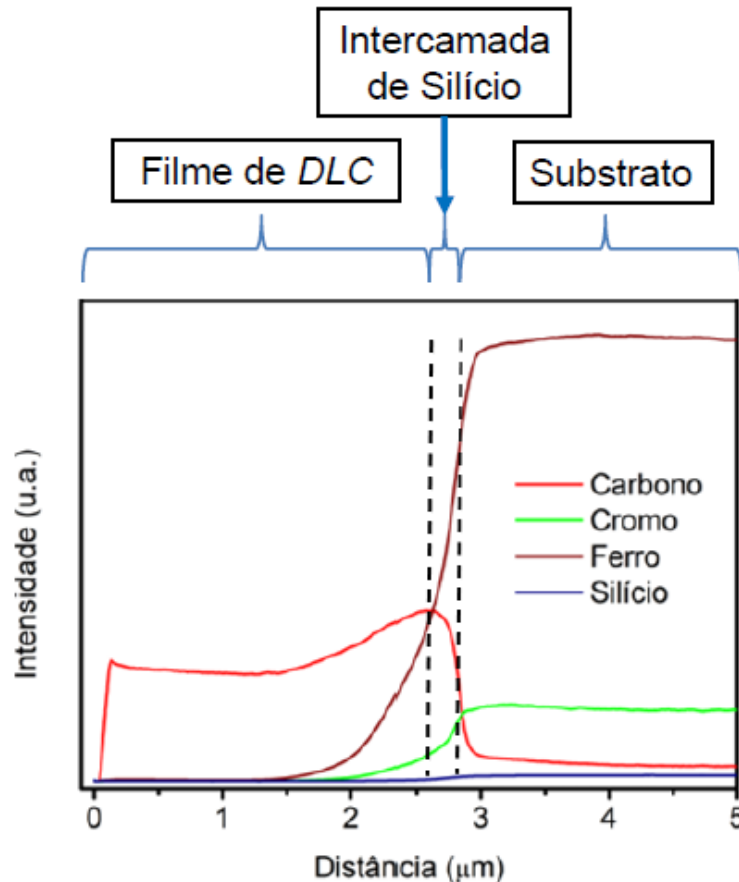
$$F_a = \mu \times F_n \quad (1)$$

O valor de coeficiente de atrito está dentro do esperado para o DLC contendo intercâmara de silício (BOEIRA, 2016), de acordo com a Figura 41 e a Equação 1, o valor encontrado do coeficiente de atrito está na faixa esperada para os filmes de DLC, conforme GRILL, 1999 esse valor deve ficar entre 0,007 a 0,4.

4.9 GDOES

A Figura 44 apresenta um gráfico do perfil de concentração dos elementos químicos detectados em função da profundidade, na amostra plana revestida com DLC.

Figura 44 - Perfil da composição química em profundidade obtido por GDOES nos pinos de AISI H13 revestidos de DLC



Fonte: Autor (2022)

A região mais externa do material, (à esquerda das linhas tracejadas) apresenta alta intensidade relativa do carbono, além de ferro e cromo em menor intensidade. A alta intensidade do elemento carbono provém do filme fino, portanto, tal composição está dentro do esperado para um filme de DLC depositado a partir de C_2H_2 .

Dentro da faixa delimitada pelas linhas tracejadas no gráfico da Figura 44, observa-se o surgimento de um sinal pequeno, porém perceptível, de Si, o que indica que a profundidade onde a interface DLC/intercamada localiza-se foi atingida. Com o avançar da profundidade, esse sinal aumenta suscitamente até atingir o ponto cruzado pela segunda linha tracejada, a qual representa a interface intercamada/substrato. Esta composição química encontrada é consistente com a composição do precursor à base de silício utilizado (HMDSO), o qual possui a fórmula química $O[Si(CH_3)_3]_2$.

Entra as duas linhas tracejadas, também é possível observar o aumento da intensidade do sinal dos elementos ferro e cromo, o que indica que a análise está

aproximando-se do material de substrato. Observa-se também, a partir da primeira linha, uma queda abrupta da intensidade do sinal do elemento carbono, que indica que a profundidade referente ao final do filme de DLC foi ultrapassada. Esta queda da intensidade do carbono só não é mais intensa, pelo fato de que o precursor utilizado na deposição da intercamada, possui o elemento carbono em sua composição.

A representação do gráfico a partir da segunda linha tracejada, corresponde ao material do substrato. Nota-se após a segunda linha, um leve aumento da intensidade do carbono e também do cromo, seguida da estabilização destes elementos; também se nota a continuidade da diminuição da intensidade do elemento carbono, que já foi observada na intercamada, porém agora de forma mais suave, até atingir um comportamento estável (sinal linear), como observado para os demais elementos acima citados. A presença de sinais para os elementos ferro, carbono, cromo e também silício na região do substrato, estão de acordo com o esperado para o material utilizado, pois trata-se de um aço AISI H13.

Como a análise de um material por GDOES envolve um processo de *sputtering*, fica implícito que a rugosidade da superfície a ser analisada influencia fortemente a resolução da técnica. Em regiões de interfaces com composições e rugosidade diferentes, esse efeito é facilmente observado. Como pode-se observar na primeira região do gráfico da Figura 44, o sinal do elemento ferro e também do cromo começam a aumentar de intensidade ainda na região do filme de DLC e antes da região da intercamada. Quando o processo de *sputtering* se aproxima do substrato, atinge um “pico” de ferro e começa a remover material do substrato simultaneamente ao material do revestimento, causando assim um aumento do sinal de Fe antes de atingir a superfície do substrato propriamente dita (NELIS; PAYLING, 2003; PETRY, 2016).

5 CONCLUSÕES

A deposição de revestimento superficial de DLC em pinos extratores comerciais, com a finalidade de melhoria das propriedades tribológicas, se mostrou satisfatória, pois, além do recobrimento completo e uniforme da superfície dos pinos, não se observaram defeitos de deslocamento ou falta de adesão do filme, mesmo após serem submetidos a ensaio cíclico, demonstrando que os parâmetros utilizados para deposição do filme fino de DLC em câmara pelo processo PECVD foram adequados.

A execução do ensaio cíclico em dispositivo de bancada permitiu a observação do comportamento dos tribossistemas propostos em condições que simulam o sistema extrator de moldes de injeção de termoplásticos. O ensaio cíclico ocorreu dentro da normalidade, sendo que não foram observados comportamentos inesperados até os 100.000 ciclos, como por exemplo, travamento do dispositivo pelo não uso de agente lubrificante. Os resultados do ensaio de bancada têm grande relevância, pois os parâmetros utilizados são de um caso industrial prático utilizado na produção de peças injetadas.

Através do trabalho também foi possível verificar a influência da utilização de diferentes materiais nas buchas extratores e de diferentes condições de lubrificação no par pino-bucha. Através das caracterizações de rugosidade superficial, perda de massa, espessura de camada e topografia, foi possível estimar os fatores mais influentes no desgaste dos tribossistemas propostos. A variação no material da bucha extratora se mostrou menos influente na taxa de desgaste medida, do que a variação da condição de lubrificação.

Em função da variação das condições de lubrificação utilizada no ensaio cíclico, foi possível identificar o aumento da taxa de desgaste quando se utilizou graxa lubrificante na superfície de contato entre pino e bucha; portanto, a utilização de pinos revestidos com DLC atuando no sistema extrator sem o uso de graxa, mostrou-se ideal para aplicações nas quais o uso de graxa para lubrificação do sistema extrator é desaconselhado ou proibido. Neste caso, o filme de carbono amorfo cumpriu uma das propriedades tribológicas atribuída a ele, atuando como um lubrificante sólido do tribossistema e dispensando o uso de graxa. A graxa atuou como um agente abrasivo, que, juntamente com partículas de DLC, provocou o maior desgaste no filme de DLC.

As análises por MO e MEV possibilitaram a verificação dos microconstituintes dos materiais das buchas e pinos, estando esses, de acordo com o esperado para os tratamentos térmicos aplicados.

Através de análise por MEV na superfície dos pinos e buchas, foi possível ainda identificar que o principal mecanismo de desgaste atuante nos tribossistemas foi a abrasão, devido ao desprendimento de partículas ocasionado pelo movimento relativo cíclico durante o ensaio.

O ensaio de *nanoscratch test* permitiu a obtenção de resultados quanto à adesão do filme de DLC. A carga máxima do equipamento, que corresponde a 500 mN, não foi suficiente para provocar a delaminação do filme, portanto, não foi possível identificar a carga máxima para a ruptura do filme, apenas sendo possível indicar que esta carga é superior a 500 mN. Tal comportamento é positivo e está de acordo com os resultados de ensaio de desgaste, no qual não se observou rompimento ou deslocamento do filme, apenas o desgaste em função do deslizamento cíclico. Este ensaio também permitiu o cálculo do coeficiente de atrito do filme, que ficou em 0,02, indo ao encontro da literatura, que indica valores entre 0,007 e 0,4.

A análise por GDOES permitiu observar a composição química do filme de DLC em função da profundidade, sendo os elementos químicos observados em cada camada (DLC, intercamada e substrato), coerentes com gases e líquidos utilizados na deposição do filme e com o material do substrato.

REFERÊNCIAS

A.E. CRESPI, L.M. LEIDENS, C. AGUZZOLI, F. ALVAREZ, C. A. F. Influence of hydrogen etching on the adhesion of coated ferrous alloy by hydrogenated amorphous carbon deposited at low temperature. **Journal of African Earth Sciences**, v. 58, n. 2, p. 331–340, 2010.

AISENBERG, S.; R.CHABOT. Deposition of carbon films with diamond properties. **Carbon**, v. 10, n. 3, p. 356, 1972.

AKHTAR, S. S.; ARIF, A. F. M.; YILBAS, B. S. Evaluation of gas nitriding process with in-process variation of nitriding potential for AISI H13 tool steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 47, n. 5–8, p. 687–698, 2010.

ALMEIDA, L. S. DE. **Produção e Caracterização de Nanoestruturas de Carbono por PECVD**. [s.l.] Universidade Federal de São Carlos, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1624-22: Standard Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch Testing**ASTM International, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6158: Sistema de tolerâncias e ajustes**São Paulo, 1995.

BAYER, R. G. **Mechanical Wear Prediction and Prevention**. New York: Marcel Dekker, 1994.

BOEIRA, C. D. **Comparação entre diferentes intercamadas contendo silício para adesão de filmes de DLC sobre substrato de aço AISI 4140**. [s.l.] Universidade de Caxias do Sul, 2016.

BOEIRA, C. D. **Entendimento químico da adesão de filmes de carbono amorfo em ligas ferrosas por meio de intercamadas contendo silício**. [s.l.] Universidade de Caxias do Sul, 2021.

CEMIN, F. et al. The influence of different silicon adhesion interlayers on the tribological behavior of DLC thin films deposited on steel by EC-PECVD. **Surface and**

Coatings Technology, v. 283, p. 115–121, 2015.

CZICHOS, H. **Design of friction and wear experiments**. 18. ed. [s.l.: s.n.].

DONNET, C.; ERDEMIR, A. Solid lubricant coatings: Recent developments and future trends. **Tribology Letters**, v. 17, n. 3, p. 389–397, 2004.

GONZÁLEZ, D. C. L. **Estudo da aderência e do coeficiente de atrito de filmes em Ti-6Al-4V com deposição de interface de silício para aplicação espacial**. [s.l.] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2017.

GRILL, A. Diamond-like carbon: State of the art. **Diamond and Related Materials**, v. 8, n. 2–5, p. 428–434, 1999.

HARADA, J. **Moldes pra injeção de termoplásticos: projeto e princípios básicos**. São Paulo: [s.n.].

IMIHEZRI, S. S. S. et al. Mould flow and component design analysis of polymeric based composite automotive clutch pedals. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 171, n. 3, p. 358–365, 2006.

KATO, K.; ADACHI, K. Wear mechanisms. **Modern Tribology Handbook**, v. 1, p. 273–300, 2000.

KAZMER, D. O. **Injection Mold Design Engineering**: Munich: Hanser, 2007.

LEAL, G. **Estudo de Filmes Finos de DLC com Diferentes Dopantes para Aplicação em Sensores Piezoresistivos**. [s.l.] Universidade Federal de São Paulo, 2017.

MANRICH, S. **Processamento de Termoplásticos - 2 Edição**. São Paulo: Artliber, 2013.

MENGES, G.; MICHAELI, W.; MOHREN, P. **How to Make Injection Molds**. Third Edit ed. Munich: Hanser, 2001.

NASCIMENTO, J. A. **Comportamento em desgaste do par polimérico polipropileno e poliuretano, lubrificadas com água destilada, água do mar sintética e sem lubrificação**. [s.l.] Universidade Federal do Espírito Santo, 2020.

NELIS, T.; PAYLING, R. **Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy: a Practical Guide**. Cambridge: RSC, 2003.

PETRY, E. R. et al. Physicochemical structure of SiC_x:H to improve DLC

adhesion on steel. **Surface Engineering**, v. 32, n. 10, p. 779–785, 2016.

PETRY, E. R. **Efeito da temperatura na estrutura físico-química de intercamadas depositadas a partir de HMDSO para adesão de DLC em aço**. [s.l.: s.n.].

PISONERO, J. et al. Glow-discharge spectrometry for direct analysis of thin and ultra-thin solid films. **TrAC - Trends in Analytical Chemistry**, v. 25, n. 1, p. 11–18, 2006.

PÖTSCH, G. **Injection Molding 2E**. Ohio: Hanser Publications, 2007.

REES, H. **Mold Engineering**. Second ed. Munich: Hanser, 2002.

REIS, T. M. **Avaliação tribológica do tratamento de nitretação a plasma com pós-oxidação aplicada em sistema de extração de moldes para injeção de termoplásticos**. [s.l.] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Caxias do Sul, 2017.

ROBERTSON, J. Diamond-like amorphous carbon. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 37, n. 4–6, p. 129–281, 2002.

RODRIGUES, A. F. **Sistema de extração**. Canoas: ULBRA, 2007.

RODRIGUES, Â.; PONTES, A. J. Medição de coeficientes de atrito em condições de extração em moldes de injeção. **Molde – Microfabricação**, v. 99, p. 39–41, 2013.

SALVARO, D. B. **Universidade Federal de Santa Catarina Universidade Federal de Santa Catarina**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

SEMBARSKI, P. R. B. **Influência do tipo de lubrificação no desgaste por deslizamento de metais**. [s.l.] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, 2018.

SHAMEEM, K. M. M. et al. A hybrid LIBS–Raman system combined with chemometrics: an efficient tool for plastic identification and sorting. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, v. 409, n. 13, p. 3299–3308, 2017.

SILVA, L. C. DA. **Aplicação de filmes finos sobre superfície metálica para redução de desgaste em sistema de injeção de combustível**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2020.

SILVA, L. E. DA. **Efeito da mesogeometria da broca e das condições de lubrificação sobre o acabamento do furo em aço DIN S700MC.** [s.l.] Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2016.

Tools for moulding: DIN 1530. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG Berlin, 2017.

ZUM GAHR, K.-H. **Microstructure and wear of materials.** New York: Elsevier, 1987.