



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Ana Carolina Bomfim Rodrigues

**Influência da textura da superfície no desempenho tribológico de partículas de
lubrificantes sólidos a base de carbono depositadas por *dip-coating*.**

Florianópolis
2023

Ana Carolina Bomfim Rodrigues

**Influência da textura da superfície no desempenho tribológico de partículas de
lubrificantes sólidos a base de carbono depositadas por *dip-coating*.**

Dissertação submetida ao Programa de pós-graduação
em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do título de Mestra em
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Fabio Antonio Xavier, Dr.

Coorientador: Prof. Cristiano Binder, Dr.

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Rodrigues, Ana Carolina Bomfim

Influência da textura da superfície no desempenho tribológico de partículas de lubrificantes sólidos a base de carbono depositadas por dip-coating / Ana Carolina Bomfim Rodrigues ; orientador, Fabio Antonio Xavier, coorientador, Cristiano Binder, 2023.

128 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Superfícies texturizadas . 3. Lubrificação sólida. 4. Precidor. 5. Superacabamento. I. Xavier, Fabio Antonio. II. Binder, Cristiano. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Ana Carolina Bomfim Rodrigues

Influência da textura da superfície no desempenho tribológico de partículas de lubrificantes sólidos a base de carbono depositadas por *dip-coating*.

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Fabio Antonio Xavier, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Milton Pereira, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Diego Berti Salvaro, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Guilherme Oliveira Neves, Dr.
Universidad del Bío-Bío

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestra em Engenharia Mecânica.

Prof. Henrique Simas, Dr.
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Fabio Antonio Xavier, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2023.

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais, Gerusia e Dorico, e ao meu companheiro, João.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à UFSC e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica – POSMEC por todo o suporte oferecido durante o meu mestrado.

A todos os professores do programa que compartilharam seus conhecimentos, em especial aos professores Fabio Antonio Xavier e Cristiano Binder pela orientação, ensinamentos, paciência e dedicação prestados durante a elaboração deste trabalho.

Ao Laboratório de Precisão Mecânica – LMP e ao Laboratório de Materiais - LABMAT e a todos os seus integrantes que me acolheram com imensa generosidade.

Agradeço a CAPES pelo suporte financeiro em parte deste trabalho.

Em especial, agradeço aos meus pais, Dorico e Gerusia, por se dedicarem a mim e sempre me apoiarem incondicionalmente. E a toda a minha família.

Agradeço a meu companheiro João Damasceno, por me acolher emocionalmente em todos os momentos difíceis e por tornar essa caminhada mais leve.

Agradeço também aos amigos de Florianópolis, Tainara, Larissa, Matheus e Filipe Veras pelo suporte emocional durante este período. E a todos os outros amigos, que mesmo distantes se fizeram presente.

Agradeço aos membros da banca pela imensa contribuição dada para este trabalho.

RESUMO

A constante busca de alternativas para redução do atrito em diversos segmentos industriais é crescente. Nesse sentido, estudos que avaliam o emprego de superfícies texturizadas em conjunto nano e micro partículas lubrificantes, a fim de amortizar os efeitos do atrito e prolongar a durabilidade, vêm sendo tratados na literatura. Aliado a isso, umas das principais linhas de estudo do laboratório de materiais (LABMAT) no departamento de engenharia mecânica da UFSC consistem no desenvolvimento de materiais sólidos para aplicações tribológicas. Desta forma, este trabalho tem como objetivo correlacionar a morfologia de micropartículas com a morfologia da superfície, oriunda de processos de usinagem utilizados na fabricação de superfícies de eixos e mancais. Diante disso, analisou-se o histórico de fabricação das peças, que compreendem processos como brunimento precisor e brunimento de curso de curto, sendo realizadas a caracterização da rugosidade, textura e integridade superfície. As peças, devidamente caracterizadas, foram submetidas a ensaios tribológicos com o uso de lubrificantes com inclusões de partículas e então novamente caracterizadas para estudo da interação superfície/microfluido. As micropartículas utilizadas no trabalho foram o carbono derivado de carvão (CDC) de cromo e boro ($1,66 \mu\text{m}$), o grafeno funcionalizado com amônia ($1,99 \mu\text{m}$) e o grafite cristalino ($1,10 \mu\text{m}$). O processo utilizado para a aplicação das partículas nas superfícies foi o método *dip-coating*, selecionado principalmente devido à geometria das peças. Os resultados indicaram uma variação da interação superfície/partícula. As superfícies caracterizadas dos eixos apresentaram texturas menos definidas, com alta quantidade de riscos e crateras ao longo das superfícies. Alguns dos parâmetros avaliados indicaram uma superfície com assimetria negativa, curtose em torno de 5, maior predominância de picos, com $S_{pk} = 0,42 \mu\text{m}$, $S_{vk} = 0,36 \mu\text{m}$, $S_a = 1,04 \mu\text{m}$ e $S_z = 17,40 \mu\text{m}$. Quanto aos ensaios tribológicos, a menor média das durabilidades foi obtida com o uso das partículas de CDC, que resultou em 29 Nm de deslizamento. A maior média das durabilidades foi obtida com o uso de partículas de grafite, que resultaram em 293 Nm. Os mancais apresentaram uma textura mais definida e com menor quantidade de riscos. Os parâmetros indicaram assimetria positiva, curtose em torno de 7, maior predominância dos picos em relação aos vales, com $S_{pk} = 0,76 \mu\text{m}$, $S_{vk} = 0,51 \mu\text{m}$, $S_a = 1,08 \mu\text{m}$ e $S_z = 21,44 \mu\text{m}$. Para as superfícies dos mancais, a menor média das durabilidades foi obtida utilizando as partículas de grafite, com média igual a 1062 Nm. A maior média das durabilidades foi obtida com o uso do CDC, que gerou o valor igual 2372 Nm. Para os ensaios de carga constante, as superfícies dos mancais apresentaram menores valores para o COF com relação aos eixos. O menor COF para os mancais foi obtido utilizando partículas de grafeno, 0,062, enquanto, para os eixos, o menor COF foi resultado do uso da partícula de grafite, 0,21. Os resultados indicaram semelhança com alguns trabalhos da literatura.

Palavras-chaves: Superfícies texturizadas; lubrificação sólida; precisor; superacabamento; grafeno; grafite; CDC.

ABSTRACT

The constant search for alternatives to reduce friction in several industrial segments is growing. In these terms, studies that evaluate the use of textured surfaces in combination with nano and micro lubricating particles, in order to amortize the effects of friction and prolong durability, have been addressed in the literature. Allied to this, one of the main lines of study of the materials laboratory (LABMAT) in the mechanical engineering department at UFSC is the development of solid materials for tribological applications. Therefore, this work has as objective correlate the morphology of microparticles with the surface morphology, resulting from machining processes used in the manufacture of axles and bearings surfaces. In view of this, the manufacturing history of the parts was analyzed, which comprise processes such as precision honing and short stroke honing, with the characterization of roughness, texture and surface integrity being carried out. The parts, properly characterized, were submitted to tribological tests using lubricants with particle inclusions and then again characterized to study the surface/microfluid interaction. The microparticles used in the work were carbon-derived carbide (CDC) from chromium and boron (1.66 μm), graphene functionalized with ammonia (1.99 μm) and crystalline graphite (1.10 μm). The process used to apply the particles on the surfaces was the dip-coating method, selected mainly due to the geometry of the pieces. The results indicated a variation of the surface/particle iteration. The characterized axes surfaces presented less defined textures, with a high amount of risks and craters along the surfaces. Some of the parameters evaluated indicated a surface with negative asymmetry, kurtosis around 5, greater predominance of peaks, with $S_{pk} = 0.42 \mu\text{m}$, $S_{vk} = 0.36 \mu\text{m}$, $S_a = 1.04 \mu\text{m}$ and $S_z = 17.40 \mu\text{m}$. As for the tribological tests, the lowest average durability was obtained with the use of CDC particles, which resulted in 29 Nm of slip. The highest average durability was obtained with the use of graphite particles, which resulted in 293 Nm. The bearings had a more defined texture and less risks. The parameters indicated positive asymmetry, kurtosis around 7, greater predominance of peaks in relation to valleys, with $S_{pk} = 0.76 \mu\text{m}$, $S_{vk} = 0.51 \mu\text{m}$, $S_a = 1.08 \mu\text{m}$ and $S_z = 21.44 \mu\text{m}$. For the bearing surfaces, the lowest average durability was obtained using graphite particles, with an average equal to 1062 Nm. The highest average of durability was obtained with the use of CDC, which generated a value equal to 2372 Nm. For the constant load tests, the bearing surfaces presented lower values for the COF in relation to the axles. The lowest COF for the bearings was obtained using graphene particles, 0.062, while for the axles, the lowest COF was obtained using the graphite particle, 0.21. The results indicated similarity with some works in the literature.

Keywords: Textured Surfaces. Solid Lubrication. Precidor tool. Superfinishing tool. CDC. Graphene. Graphite.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Regimes de lubrificação dos lubrificantes.....	24
Figura 2 – Atuação do grafeno ordenado (a) e desordenado (b) na região de deslizamento....	25
Figura 3 - Imagens obtidas por MEV das partículas de CDC derivado de Cr_3C_2 e B_4C	26
Figura 4 – Desempenho da aglomeração das nanopartículas no contato metal-metal.	28
Figura 5 - Imagem das nanopartículas de grafeno funcionalizado com amônia.	28
Figura 6 - Grafite cristalino com 1,10 μm , imagens via MEV.....	29
Figura 7 – Método de aplicação por <i>dip-coating</i>	30
Figura 8 - Tipos de brunimento de curso longo, em a) brunimento convencional e b) passe único.	32
Figura 9 - Superfície obtida pelos processos de brunimento de passo único (a) e convencional (b).	32
Figura 10 – Descrição do movimento axial da ferramenta durante um processo de brunimento de passe único.....	33
Figura 11 - Ferramenta Precidor.....	34
Figura 12 – Variação dos parâmetros de rugosidade utilizando uma ferramenta de brunimento precidor nova e desgastada.	35
Figura 13 - Princípio do processo de superacabamento em a) e padrão resultante do processo em b).....	36
Figura 14 - Superfície retificada em a) e superfícies superacabadas com tempo de brunimento de 3 s em b), 10 s em c) e 20 s em d), todas com os respectivos valores de R_a	37
Figura 15 – Processos de finalização convencionais e as respectivas faixas de parâmetros de rugosidade 2D e 3D.	38
Figura 16 – Microestrutura de um ferro fundido cinzento em uma matriz ferrítica (ferrita α).39	
Figura 17 - Em a) superfície desgastada de um disco de freio automotivo de ferro fundido cinzento e em b) os sítios de grafita vazios.	39
Figura 18 – Textura da superfície de ferro fundido cinzento brunida com ferramenta de a) Carbetto de Silício Ligado (VBSC) e b) Diamante (VBD) com velocidade de expansão de 4 $\mu\text{m/s}$	40
Figura 19 – Superfícies torneadas sobre velocidades de corte de a) 1200 m/min e b) 1400 m/min.	41
Figura 20 – a) Microestrutura de um Fe – 0,5 % C e b) superfície desgastada do mesmo material após um ensaio tribológico.	43
Figura 21 – Mecanismo de desgaste para a) superfície sem textura + lubrificante PAO4, b) superfície texturizada + lubrificante PAO4, c) superfície sem textura + lubrificante PAO4 com adição de grafeno e d) superfície texturizada + lubrificante PAO4 com adição de grafeno. ...	44
Figura 22 – a) Superfície da amostra após ensaio tribológico com a lixa #320 e b) superfície da amostra após ensaio tribológico com a lixa #220.....	45
Figura 23 – Resumo gráfico do trabalho.	47
Figura 24- Corte no mancal, dois cortes e 4 superfícies resultantes.....	50
Figura 25 - Corte no pistão. Um corte e 2 superfícies resultantes.....	50
Figura 26 - Superfícies de análises resultantes.....	51
Figura 27 - Regiões de análises nas caracterizações das superfícies.....	52
Figura 28: Parâmetros R_k de rugosidade e curva de Abbott.	57
Figura 29 - Parâmetros S_k de rugosidade e curva de Abbott.....	61
Figura 30 – Método de deposição das partículas na superfície, em a), e superfície niveladora para secagem da solução, b) e c).	63

Figura 31 – Tribômetro, CETR UMT-2.	65
Figura 32 - Ilustração do ensaio tribológico em (a) para os pistões e em (b) para os mancais.	66
Figura 33 – Locais de medição para caracterização das faixas de desgaste.	67
Figura 34 – Exemplo do perfil médio 2D com desgaste (a) e com acúmulo de material (b)...	68
Figura 35 – Superfície do pistão caracterizada por MO antes (a) e após ataque químico (b), respectivamente, com ampliações de 100 x e 200 x.	69
Figura 36 - Superfície do mancal caracterizada por MO antes e após ataque químico, respectivamente, com ampliações de 200 x.	70
Figura 37 – Superfície de um pistão nas regiões PMS em a) e PMI em b), obtidas via MO com 100 x de ampliação.	71
Figura 38 – Superfície do pistão na região de PMS obtidas via MO com 100 x de ampliação.	72
Figura 39 – Superfícies danificadas dos pistões na região PMS, obtidas via MO com 100 x de ampliação.	72
Figura 40 – Superfície do pistão na região PMI, obtidas via MO com 100 x de ampliação.	73
Figura 41 – Superfície do pistão na região PMS obtidas via MEV com ampliação de 1000 x nas condições SE e BSE, respectivamente.	74
Figura 42 – Cratera observada na região PMS obtidas via MEV com ampliação de 5000 x nas condições SE e BSE, respectivamente.	74
Figura 43 – Superfície de um mesmo mancal contendo as regiões a) PMS, b) RC e c) PMI, obtidas via MO com 100 x de ampliação.	75
Figura 44 – Superfície do mancal na região PMS, obtidas via MO com 100 x de ampliação.	76
Figura 45 – Superfície do mancal na região RC, obtidas via MO com 100 x de ampliação.	77
Figura 46 – Superfície do mancal na região PMI, obtidas via MO com 100 x de ampliação.	77
Figura 47 – Mancal região PMI, imagem obtida via MEV com ampliação de 1000 x.	78
Figura 48 - Mancais na região PMS, imagem obtida via MEV com ampliação de 2000 x.	79
Figura 49 – Cratera em uma região PMI, imagem obtida via MEV com ampliação de 5000 x.	79
Figura 50 - Valores obtidos para os parâmetros de rugosidade R_{sk} e R_{ku} para as superfícies dos pistões e mancais, com ampliação na região de maior concentração.	80
Figura 51 – Valores obtidos para os parâmetros de rugosidade R_a , R_q e R_z para as superfícies dos pistões e mancais, respectivamente.	81
Figura 52 - Valores obtidos para os parâmetros de rugosidade R_{pk} , R_k e R_{vk} para as superfícies dos pistões e mancais, respectivamente.	82
Figura 53 - Valores obtidos para os parâmetros de rugosidade S_{sk} e S_{ku} para as superfícies dos pistões e mancais.	83
Figura 54 - Valores obtidos para os parâmetros de rugosidade S_a , S_q e S_z para as superfícies dos pistões e mancais, respectivamente.	83
Figura 55 - Valores obtidos para os parâmetros de rugosidade S_{pk} , S_k e S_{vk} para as superfícies dos pistões e mancais.	84
Figura 56 - Valores obtidos para o parâmetro de rugosidade S_p e S_v para as superfícies dos pistões e mancais.	85
Figura 57 - Valores obtidos para o parâmetro de rugosidade S_{dq} e S_{tr} para as superfícies dos pistões e mancais.	85
Figura 58 - Valores obtidos para o parâmetro de rugosidade S_{td} para as superfícies dos pistões e mancais.	86
Figura 59 – Direções da textura para uma superfície de um pistão e mancal, respectivamente.	86

Figura 60 - Valores obtidos para o parâmetro de rugosidade S_{ci} para as superfícies dos pistões e mancais.	87
Figura 61 - Resultado da quantificação das partículas nas superfícies dos pistões quanto a área projetada (%) e altura máxima das partículas na superfície (μm).	88
Figura 62 – Resultado da quantificação das partículas nas superfícies dos mancais quanto a área projetada (%) e altura máxima das partículas na superfície (μm).	89
Figura 63 – Resultado da durabilidade dos pistões e mancais, respectivamente, nos ensaios tribológicos com as partículas de CDC, grafeno e grafite.	90
Figura 64 – Resultados dos ensaios tribológicos de durabilidade para os pistões utilizando as partículas de CDC.	91
Figura 65 - Resultados dos ensaios tribológicos de durabilidade para os pistões utilizando as partículas de grafeno.	92
Figura 66 - Resultados dos ensaios tribológicos de durabilidade para os pistões utilizando as partículas de grafite.	93
Figura 67 - Resultados dos ensaios tribológicos de durabilidade para os mancais utilizando as partículas de CDC.	95
Figura 68 - Resultados dos ensaios tribológicos de durabilidade para os mancais utilizando as partículas de grafeno.	96
Figura 69 - Resultados dos ensaios tribológicos de durabilidade para os mancais utilizando as partículas de grafite.	97
Figura 70 – Média dos coeficientes de atrito para as superfícies dos pistões e mancais.	102
Figura 71 - Resultados dos ensaios tribológicos de carga constante para os pistões utilizando as partículas de CDC.	103
Figura 72 - Resultados dos ensaios tribológicos de carga constante para os pistões utilizando as partículas de grafeno.	103
Figura 73 - Resultados dos ensaios tribológicos de carga constante para os pistões utilizando as partículas de grafite.	104
Figura 74 - Resultados dos ensaios tribológicos de carga constante para os mancais utilizando CDC.	105
Figura 75 - Resultados dos ensaios tribológicos de carga constante para os mancais utilizando grafeno.	105
Figura 76 - Resultados dos ensaios tribológicos de carga constante para os mancais utilizando grafite.	106
Figura 77 – Superfícies dos pistões nas regiões de desgaste para os ensaios de carga variada com aplicações de CDC, em a), e grafite, em b), obtidas via MO com ampliação de 100 x.	107
Figura 78 - Superfícies dos pistões nas regiões de desgaste para os ensaios de carga variada com aplicações de CDC, em a), e grafite, em b), obtidas via MEV com ampliação de 500 x e com análise química das regiões.	108
Figura 79 - Superfícies dos pistões nas regiões de desgaste para os ensaios de carga constante com aplicações de CDC, em a), e grafite, em b), obtidas via MO com ampliação de 100 x.	109
Figura 80 - Superfícies dos mancais nas regiões de desgaste para os ensaios de carga variada com aplicações de CDC, em a), e grafite, em b), obtidas via MO com ampliação de 100 x.	110
Figura 81 - Superfícies dos mancais nas regiões de desgaste para os ensaios de carga constante com aplicações de CDC, em a), e grafite, em b), obtidas via MO com ampliação de 100 x.	110
Figura 82 – Ferramenta utilizada para obtenção dos valores de área desgastada no software <i>MountainsMap</i> , com uma região com pouco desgaste em a) e uma região com alto desgaste em b).	111
Figura 83 – Taxa de desgaste, mm^3/Nm , para os ensaios de carga constante nas superfícies dos pistões (a) e mancais (b).	112

Figura 85 - Valores obtidos para os parâmetros de rugosidade R_{sk} e R_{ku} para as regiões PMS e PMI dos pistões.	123
Figura 86 - Valores obtidos para os parâmetros de rugosidade R_{sk} e R_{ku} para as regiões PMS, RC e PMI dos mancais.	124
Figura 87- Valores obtidos para os parâmetros de rugosidade S_{sk} e S_{ku} para as regiões PMS e PMI dos pistões.	124
Figura 88- Valores obtidos para os parâmetros de rugosidade S_{sk} e S_{ku} para as regiões PMS, RC e PMI dos mancais.....	125
Figura 89 - Valores obtidos para o parâmetro de rugosidade R_c para as superfícies dos pistões e mancais.	125
Figura 90 - Valores obtidos para os parâmetros de rugosidade R_p e R_v para as superfícies dos pistões e mancais.	126
Figura 91 - Valores obtidos para o parâmetro de rugosidade R_{mr} para as superfícies dos pistões e mancais.	126
Figura 92 - Valores obtidos para o parâmetro de rugosidade S_{dr} para as superfícies dos pistões e mancais	126
Figura 93 - Valores obtidos para o parâmetro de rugosidade S_{sc} para as superfícies dos pistões e mancais.	127
Figura 94 - Valores obtidos para o parâmetro de rugosidade S_{al} para as superfícies dos pistões e mancais.	127
Figura 95 - Valores obtidos para o parâmetro de rugosidade S_{ds} para as superfícies dos pistões e mancais.	127
Figura 96 - Valores obtidos para os parâmetros de rugosidade S_{mr1} e S_{mr1} para as superfícies dos pistões e mancais.	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Planejamento experimental.....	48
Tabela 2– Configuração experimental.....	49
Tabela 3 – Parâmetros de rugosidade para a superfície obtida com lixa #320.....	51
Tabela 4 – Descrição das partículas utilizadas.	62
Tabela 5 – Caracterização da grafita e matriz do ferro fundido cinzento segundo norma ISO 945.	70
Tabela 6 – Variação dos parâmetros para o caso de maior e menor durabilidade entre os pistões.	94
Tabela 7 - Variação dos parâmetros para o caso de maior e menor durabilidade entre os mancais.	98
Tabela 8 – Análise dos parâmetros para o caso de melhor e pior durabilidade nas superfícies dos mancais e pistões.....	98
Tabela 9 - Análise dos parâmetros para o caso de melhor durabilidade nas superfícies dos mancais e pistões em relação as partículas utilizadas.....	100
Tabela 10 – Quantitativo de resultados dos ensaios de durabilidade que se mantiveram acima de 60% da média.....	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
B ₄ C	Carboneto de Boro
BSE	Elétrons Retroespehados
CBN	Nitreto de Boro Cúbico
CC	Carga Constante
CDC	Carbono Derivado de Carboneto
COF	Coefficiente de Atrito
Cr ₃ C ₂	Carboneto de Cromo
CV	Carga Variada
EHL	Elastohidrodinâmica
HB	Dureza Brinell
ISO	International Organization for Standardization
LABMAT	Laboratório de Materiais
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MO	Microscópio Óptico
MoS ₂	Dissulfeto de Molibdênio
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
RC	Região Central
SAE	Society of Automotive Engineers
SE	Elétrons Secundários
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
VBD	Diamante
VBSC	Carbeto de Silício Ligado

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto Latino

a	Amplitude de Oscilação	[mm]
A	Área das Fatias	[μm^2]
D_m	Diâmetro médio	[μm]
d_w	Diâmetro da Peça	[mm]
d	Diâmetro da Ferramenta	[mm]
f	Frequência de Oscilação da Ferramenta	[Hz]
F	Força Aplicada	[N]
F_c	Força de Corte	[N]
F_t	Força Tangencial	[N]
F_n	Força Normal	[N]
H	Curso Oscilante	[mm]
M	Momento	[Nm]
R	Resistência ao Contato	[kOhm]
R_a	Rugosidade Média da Superfície	[μm]
R_q	Média RMS – Raiz Média Quadrática	[μm]
R_z	Altura Máxima do Perfil	[μm]
R_v	Profundidade Máxima do Vale	[μm]
R_p	Altura Máxima do Pico	[μm]
R_c	Altura Média dos Elementos do Perfil	[μm]
R_{sk}	Assimetria	
R_{ku}	Curtose	
R_{mr}	Taxa de Material Relativa	%
R_k	Profundidade de Rugosidade do Núcleo	[μm]
R_{pk}	Rugosidade do Pico Reduzido	[μm]
R_{vk}	Rugosidade do Vale Reduzido	[μm]
S_q	Raiz da Altura Média Quadrática	[μm]
S_a	Altura Média Aritmética	[μm]

S_{sk}	Assimetria	
S_{ku}	Curtose	
S_p	Altura Máxima dos Picos	[μm]
S_v	Altura Máxima dos Vales	[μm]
S_z	Altura Máxima	[μm]
S_{al}	Comprimento de Autocorrelação	[μm]
S_{tr}	Proporção da Textura	
S_{ds}	Densidade de Topo	[1/ μm^2]
S_{dq}	Gradiente Médio Quadrático	
S_{dr}	Razão de Área Interfacial	%
S_{sc}	Curvatura Média do Topo	[1/ μm]
S_k	Altura do Núcleo	[μm]
S_{pk}	Altura Reduzida dos Picos	[μm]
S_{vk}	Altura Reduzida dos Vales	[μm]
S_{mr1}	Proporção de Material 1	%
S_{mr2}	Proporção de Material 2	%
S_{td}	Direção da Textura	°
S_{ci}	Índice de Retenção de Fluido Central	
V_{wa}	Velocidade Axial da Peça	[mm/min]

Alfabeto Grego

α	Ângulo de Brunimento	[°]
$\theta_{m\acute{a}x}$	Ângulo de Brunimento Máximo	[°]
ω	Velocidade Angular	[rad/s]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS	22
1.1.1	Objetivo Geral.....	22
1.1.2	Objetivos Específicos	22
2	Referencial Bibliográfico.....	23
2.1	LUBRIFICANTES SÓLIDOS	23
2.1.1	Mecanismos de Lubrificação	23
2.1.2	Particulados.....	26
2.1.3	Método de Aplicação	30
2.2	SUPERFÍCIES TEXTURIZADAS	30
2.2.1	Processo de Brunimento.....	31
2.2.1.1	<i>Processo de Brunimento Precidor.....</i>	<i>31</i>
2.2.1.2	<i>Processo de Brunimento por Superacabamento.....</i>	<i>35</i>
2.2.2	Superfícies de Ferro Fundido e Ferro sinterizado após usinagem.....	38
2.3	APLICAÇÕES DE LUBRIFICANTES COM ADIÇÃO DE PARTÍCULAS EM SUPERFÍCIES TEXTURIZADAS.	43
3	Materiais e Métodos	47
3.1	DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS	47
3.2	CORTE E TRATAMENTO	49
3.3	CARACTERIZAÇÕES DAS SUPERFÍCIES	51
3.3.1	MICROSCÓPIO ÓPTICO (MO)	52
3.3.2	INTERFERÔMETRO ÓPTICO DE LUZ BRANCA.....	53
3.3.3	PERFILÔMETRO	53
3.3.4	PROCESSAMENTO SOFTWARE MOUNTAINSMAP.....	54
3.3.5	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	54
3.4	PARÂMETROS DE RUGOSIDADE	55

3.4.1	Parâmetros bidimensionais (2D)	55
3.4.2	Parâmetros 3D	57
3.5	ETAPA DE DEPOSIÇÃO.....	62
3.6	ENSAIOS TRIBOLÓGICOS	64
3.6.1	ENSAIO DE CARGA VARIÁVEL (DURABILIDADE)	64
3.6.2	ENSAIO DE CARGA CONSTANTE	65
3.7	CARACTERIZAÇÕES DAS SUPERFÍCIES DESGASTADA.....	66
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
4.1	PROPRIEDADE DAS PEÇAS	69
4.2	ANÁLISES DAS SUPERFÍCIES	70
4.2.1	Integridade da superfície	70
4.2.2	Topografia	80
4.3	DEPOSIÇÃO DAS PARTÍCULAS	87
4.4	ANÁLISE TRIBOLÓGICA DA SUPERFÍCIE.....	89
4.4.1	Ensaio Carga Variada – Durabilidade	89
4.4.2	Ensaio de Carga Constante	101
4.5	CARACTERIZAÇÕES DAS SUPERFÍCIES DE DESGASTE.....	107
5	CONCLUSÃO	113
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	116
	REFERÊNCIAS	117
	APÊNDICE A – Parâmetros de Rugosidade	123

1 INTRODUÇÃO

O termo tribologia é derivado do grego em que *tribos* significa atrito e *logos* significa lei. A tribologia é a ciência que estuda os mecanismos correlacionados às leis do atrito, no qual inclui os mecanismos de desgaste e os meios de lubrificação. O conceito de tribologia está definido há pouco tempo na história, sendo que no ano de 1966 o termo foi cunhado pelo governo do Reino Unido. Porém, os conceitos de lubrificação, atrito e desgaste estão em estudo há um longo período, e um exemplo disso é visto em estudos nas civilizações antigas acerca do desenvolvimento de rolamento e superfícies com baixo atrito (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017; STACHOWIAK e BATCHELOR, 2000).

O estudo da tribologia tem contribuído para a redução do atrito em diversas áreas. Estudos realizados em países, como nos países que compõem o Reino Unido, indicaram que uma economia de 1 % no produto interno bruto dos países seria obtida caso a aplicação dos princípios tribológicos estabelecidos na literatura fossem implementadas, com um mínimo de investimento em pesquisas sobre o assunto. Além disso, estudos indicam ainda uma redução de cerca de 45 % nos custos com manutenção e reposição, 22 % em relação a perdas por avarias e 5 % no consumo de energia com as aplicações dos princípios tribológicos (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017).

O atrito gerado nos processos industriais reduz a eficiência dos sistemas e eleva o gasto energético, culminando no aumento dos custos de produção. De acordo com Holmberg *et al.* (2012), 33% da energia do combustível utilizado em automóveis é devido a perdas por atrito, além disso, um decréscimo de 10% de toda a perda mecânica no automóvel promoveria uma redução no consumo do combustível da ordem de 1,5%.

O atrito representa as forças contrárias ao movimento entre duas superfícies e, na maioria dos casos, deve ser minimizado (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2000). Diversos métodos são empregados na redução do atrito entre superfícies, tais como: lubrificantes líquidos, sólidos ou gasosos, materiais autolubrificantes e aplicação de texturas nas superfícies em contato tribológico (ANDERSSON *et al.*, 2007; CHEN, *et al.*, 2008; ERDEMIR, *et al.*, 2004; STACHOWIAK e BATCHELOR, 2000).

A aplicação de lubrificantes líquidos é o método convencionalmente utilizado na redução do atrito entre superfícies. Esse fator deve-se principalmente ao fato de os lubrificantes líquidos fornecerem, além da lubrificação, amortecimento e resfriamento na região de contato.

Outra característica para a alta aplicação desse método é a fácil reposição do lubrificante na região de desgaste e alta durabilidade (BHUSHAN, 2001). Uma das desvantagens da utilização desse método de lubrificação consiste em como descartar adequadamente os fluidos lubrificantes, uma vez que a maioria destes possuem componentes tóxicos ou poluentes. Segundos dados da Comissão Europeia, no tópico em relação à *Waste Oil*, um litro de óleo usado pode contaminar um milhão de litros de água além de ameaçar a vida aquática, caso descartados indevidamente (European Commission, 2022).

Devido a isso, o emprego de métodos de lubrificação alternativos, tais como lubrificantes sólidos, são cada vez mais aplicados com intuito de reduzir ou evitar o uso dos lubrificantes líquidos. Além disso, o uso de lubrificantes sólidos permite a lubrificação em máquinas dos setores alimentícios e de saúde, em que a contaminação por meio dos lubrificantes líquidos é indesejada e em setores com ambientes de alto vácuo, o que ocasionaria a evaporação/degradação/volatilização dos líquidos lubrificantes (ERDEMIR *et al*, 2004; HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017).

A utilização dos lubrificantes sólidos pode ser realizada por três meios principais: (i) incorporados nos materiais, tais como materiais autolubrificantes e materiais porosos com lubrificante sólido disperso nos vazios, (ii) por meio de finos revestimentos ou aplicação de sólidos lamelares na forma de pós sobre a superfície e (iii) por meio de aditivos de lubrificantes fluidos (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017).

Para a aplicação de sólidos lamelares como lubrificantes sólidos, algumas características são essenciais para garantir a devida lubrificação, tais como: baixos níveis de tensão de cisalhamento, forte aderência à superfície desgastada e ausência de decomposição ou degradação química nas condições de operação. O grafite e o dissulfeto de molibdênio são exemplos dentre os sólidos lamelares amplamente utilizados (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2000).

Um das principais linhas de estudo do Laboratório de Matérias (LABMAT) no Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, consiste no desenvolvimento de materiais sólidos para aplicações tribológicas. Alguns exemplos dos trabalhos desenvolvidos no laboratório, há mais de uma década, consistem na produção de materiais sólidos lamelares, compósitos autolubrificantes e filmes de revestimento sólidos. O autor Neves (2020) desenvolveu uma partícula à base de carbono, nanoestruturado com estrutura lamelar do tipo 2D turbostrática (grafite), resultante de um novo método de síntese de carbono nanoestruturado,

derivado dos carbeto de boro e cromo, no qual resultou na redução do desgaste em 70 % quando comparado com a utilização de um grafite 3D cristalino, apesar de ter alcançado maiores valores do coeficiente de atrito (COF).

Salvaro (2020) desenvolveu um estudo avaliando o comportamento tribológico de um compósito autolubrificante, produzido por moldagem de pós por injeção. O compósito em estudo consistiu em uma matriz metálica com nódulos de grafite 2D turbostrático, gerados *in situ*, pela dissociação do carbeto de silício. Os testes ocorreram a seco e sob lubrificação fluida, e em ambos os casos alcançaram menores coeficientes de atrito e maior durabilidade, quando comparados com o material de referência, além de uma taxa de desgaste no contracorpo três ordens de grandeza menor.

Uma das desvantagens da aplicação dos sólidos lamelares é a durabilidade, uma vez que as partículas são aplicadas na superfície, e o atrito tende a aumentar ao longo do deslizamento com o fim da camada lubrificante. Neste sentido, trabalhos que objetivam a redução do atrito avaliam o emprego de superfícies texturizadas, usando nano e micro lubrificantes, a fim de amortizar os efeitos do atrito e prolongar a durabilidade dos sistemas tribológicos. Estudos de Holmberg e Erdemir (2017) demonstraram que a implementação de nano e micropartículas em conjunto com a utilização de superfícies texturizadas são eficazes na redução de atrito e desgaste. Além disso, segundo os autores, apenas a utilização de superfícies texturizadas a laser em anéis de pistão diminuiu em 4% o consumo de combustível nos motores e até 50% em superfícies texturizadas por jateamento com partículas finas.

Atualmente, a combinação de superfícies texturizadas e a utilização de partículas tem sido estudada por diversos autores, tais como: Kraemer *et al.* (2020), Maldonado-Cortés *et al.* (2019) e Giacomelli (2020). Segundo os autores supracitados, a utilização destes métodos pode reduzir cerca de 41% do coeficiente de atrito, proporcionar maior durabilidade da camada isolante de lubrificação, além de menores níveis de rugosidade, deformações plásticas e marcas de abrasão.

Dado a importância do tema para o aumento da eficiência energética, o potencial para a redução das emissões e consumo de energia, o possível aumento da vida de componentes proporcionada pela redução do atrito e com as novas rotas de obtenção de micropartículas obtidas pelo LabMat há a necessidade de verificar o potencial de utilização destas micropartículas como lubrificantes e de pesquisar a correlação entre diferentes texturas e as formas e tamanhos de micropartículas adicionadas em lubrificantes líquidos.

1.1 OBJETIVOS

Nessa seção será apresentado os objetivos gerais e específicos do presente trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é correlacionar a morfologia e o tipo das micropartículas com a morfologia da superfície (tipo/forma/densidade e dimensões da estrutura da textura) oriundas de processos de usinagem utilizados na fabricação de mancais e pistão e o resultado no desempenho tribológico do par estudado.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a topografia das diferentes superfícies geradas por meio de processos de brunimento precisor (mancal) e brunimento de curso curto (pistão).
- Analisar a influência das características morfológicas das micropartículas no desempenho em relação ao desgaste e atrito.
- Estudar a influência da variação do tipo, forma e concentração das micropartículas no desempenho tribológico das superfícies texturizadas.
- Identificar a melhor combinação superfície texturizada, tipo, forma e concentração das micropartículas para o desempenho tribológico.

2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Nessa seção, são abordados tópicos referentes aos principais temas discutidos neste trabalho. Na seção 2.1 o uso de nano e micropartículas como lubrificantes é demonstrado, incluindo informações acerca das principais características que influenciam na atuação dos particulados, os mecanismos de lubrificação e as características dos particulados utilizados nessa dissertação. Na sequência, na seção 2.2, é apresentada a morfologia de superfícies obtidas por processos de retificação e brunimento. E finalmente, na seção 2.3, aplicações dos lubrificantes sólidos em superfícies texturizadas serão apresentadas.

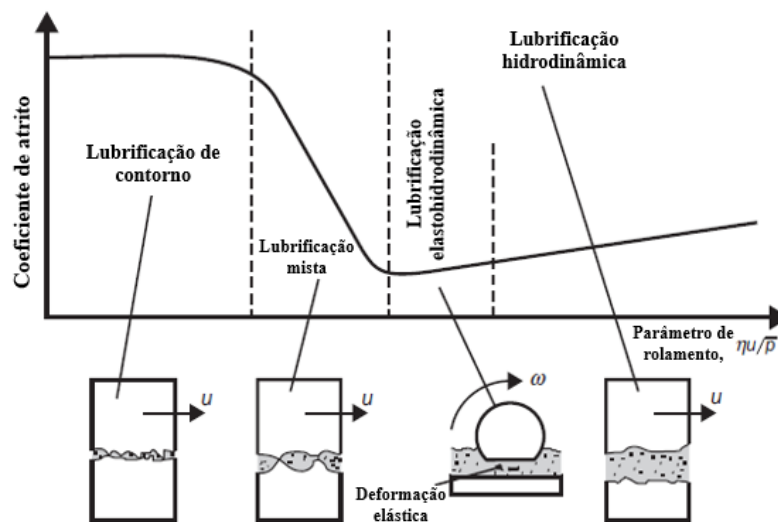
2.1 LUBRIFICANTES SÓLIDOS

Os mecanismos de lubrificação, os particulados e suas características, bem como o método de aplicação das partículas são apresentadas nessa seção.

2.1.1 Mecanismos de Lubrificação

Os mecanismos de lubrificação variam conforme os regimes de lubrificação e a atuação das partículas na região de cisalhamento. Os lubrificantes podem atuar nos seguintes regimes: lubrificação de contorno, mista, elastohidrodinâmica (EHL) e hidrodinâmica, conforme apresentado na Figura 1. Estes regimes influenciam, de modo significativo, na atuação das nano e micropartículas (DAVIM, 2011; SHANKMAN, 2014).

Figura 1 - Regimes de lubrificação dos lubrificantes.



Fonte: Adaptado de DAVIM (2011).

Na lubrificação sólida, situada na região de lubrificação de contorno, os mecanismos de lubrificação variam de acordo com o material utilizado. Por exemplo, no que se refere ao emprego de nano e micropartículas em camadas, como o grafeno 2D, podem ocorrer a formação de tribocamadas, uma transformação microestrutural, um deslizamento entre camadas ou ainda efeitos sinérgicos como principais mecanismos de deslizamento das superfícies. O grafeno pode adentrar nas interfaces de deslizamento e evitar o contato direto das superfícies de deslizamento, além disso, alguns aditivos deste material conseguem preencher e reparar uma superfície desgastada por meio da formação de uma película protetora (ou tribocamada) (ZHAO *et al.*, 2021).

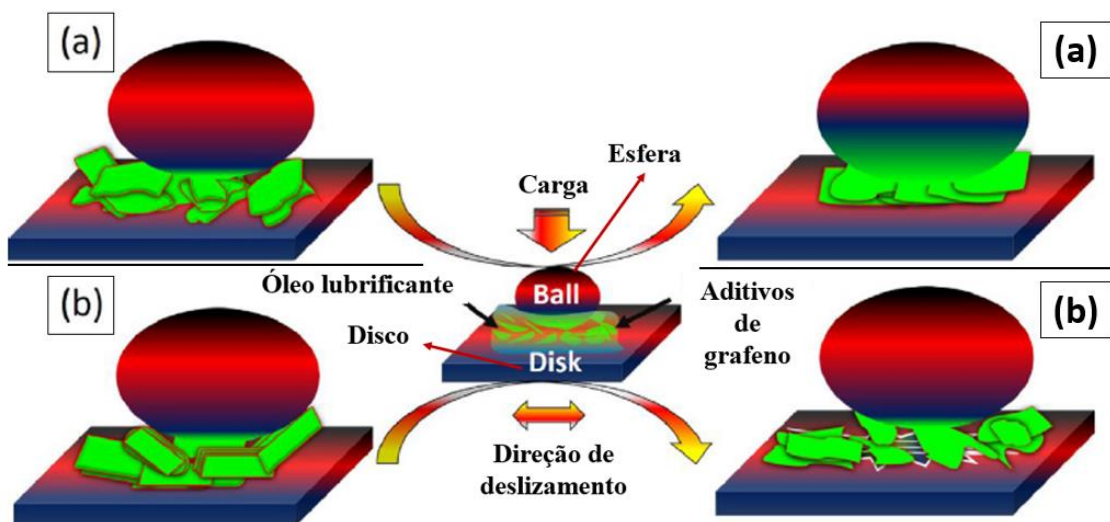
As transformações microestruturais das camadas de grafeno são influenciadas pela pressão e calor, e segundo Zhao *et al.* (2021), o grafeno pode mudar para se sobrepor ou até se tornar grafite após o atrito, fenômeno denominado grafitização.

Uma outra possibilidade de lubrificação por meio do grafeno é quando ocorre o deslizamento entre as camadas de grafeno, o que permite a auto lubrificação desses materiais. Zhao *et al.* (2021) concluem que a distância entre as intercamadas influencia nas propriedades tribológicas e que as forças de atrito nas intercamadas dos flocos diminuem com o aumento da distância entre as camadas.

Zhao *et al.* (2018) investigaram a atuação de um lubrificante com três tipos de nanopartículas de grafeno em estruturas diversas geradas pelo processo de exfoliação. O

grafeno com poucas camadas e o grafeno com estrutura lamelar não ordenada foram avaliados com dois espaçamentos entre as camadas, moderado e largo. A terceira partícula avaliada consistiu em um grafeno multicamadas, ordenado com um pequeno espaçamento entre as camadas (3 e 1,5 vezes menor que o largo e moderado). Dentre os parâmetros analisados, foram avaliadas as propriedades de lubrificação dos grafenos inseridos em óleo, bem como as marcas de desgastes e formação da tribocamada. Os resultados indicaram que menores coeficientes de atrito e taxas de desgaste foram obtidos utilizando o grafeno com estrutura não ordenada e um largo espaçamento. Os autores verificaram ainda a formação de uma estrutura ordenada e a formação de grafita durante o deslizamento. A Figura 2 (a) ilustra esse processo, em que a utilização do grafeno desordenado permitiu que o mesmo, sobre determinada pressão e ação do cisalhamento, se ordenasse na direção do deslizamento. Na Figura 2 (b), com a utilização de um grafeno ordenado, a ação de deslizamento e a pressão danificaram as camadas e influenciaram na integridade da superfície. O efeito sinérgico permitiu que o grafeno combinasse com outros átomos polares e formasse outra estrutura química, que gerou um filme triboquímico de alta resistência, diferente do filme tribofísico gerado apenas pelo grafite (ZHAO *et al.*, 2018).

Figura 2 – Atuação do grafeno ordenado (a) e desordenado (b) na região de deslizamento.



Fonte: Adaptado de Zhao *et al.* (2018).

2.1.2 Particulados

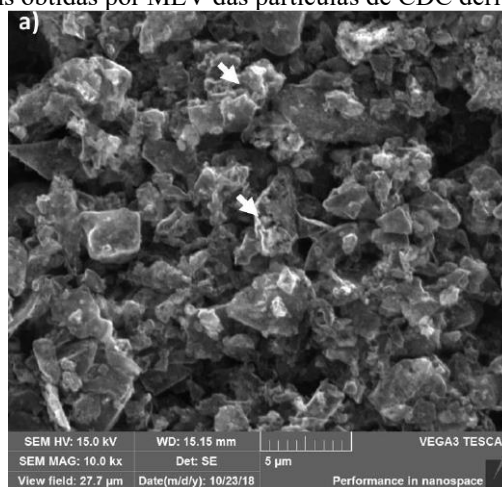
As partículas são selecionadas de acordo com as características, visando a obtenção dos resultados desejados. As características de algumas partículas estão apresentadas neste tópico.

Partículas de carbono derivado de carboneto (CDC) é um material obtido por meio do crescimento de camadas de carbono em materiais de carboneto, sendo o carboneto de silício (SiC), o carboneto comumente utilizado para a síntese deste componente (CHUN; LIM, 2014).

Chun e Lim (2014) e Erdemir *et al.* (2004) atestaram a eficiência dos CDC's como lubrificante sólido e constataram que as temperaturas de formação química e o ambiente afetam seu comportamento tribológico. Tais materiais são comumente utilizados em aplicações tribológicas devido a capacidade de autolubrificação, no qual promovem baixos coeficientes de atrito nas regiões de deslizamento. Filmes de CDC podem fornecer coeficientes de atrito menores que 0,2.

O uso desta partícula na superfície pode ser visualizado em Giacomelli (2020), em que o autor utilizou o CDC derivado de carbeto de cromo (Cr_3C_2) e boro (B_4C) em um estudo do desempenho tribológico do lubrificante. Partículas de CDC são mostradas na Figura 3. A aplicação do CDC, tanto em atmosfera úmida como em atmosfera seca, apresentou uma estrutura de carbono em forma de anéis, adsorção de água, devido a estrutura porosa, e ligações abertas com o hidrogênio, que reduz a energia livre no contato e contribui para o desempenho tribológico (PRESSER; HEON; GOGOTSI, 2011).

Figura 3 - Imagens obtidas por MEV das partículas de CDC derivado de Cr_3C_2 e B_4C .



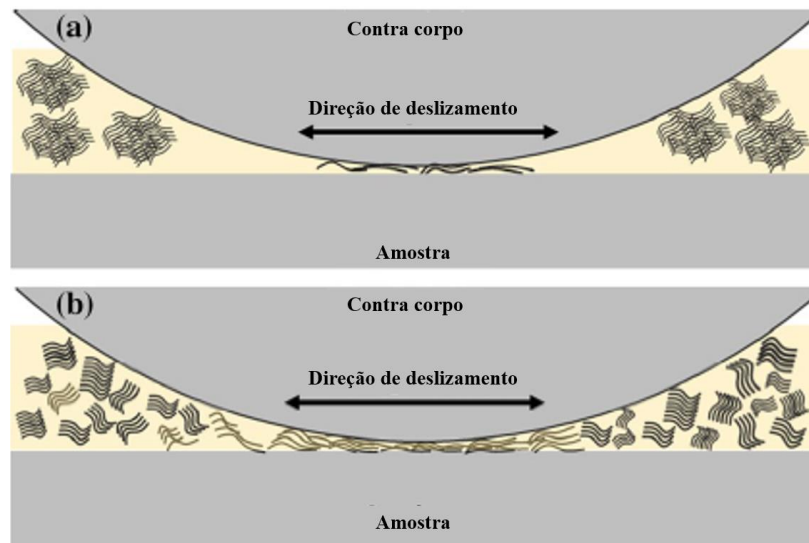
Fonte: Giacomelli (2020).

Outro material que tem sido amplamente utilizado é o grafeno, que tem sido amplamente estudado por diversos autores (BERMAN; ERDEMIR; SUMANT, 2014; CHEN *et al.*, 2019). O grafeno apresenta excelentes propriedades tribológicas devido às suas características como elevada inércia química, resistência mecânica e fácil capacidade de cisalhamento. É um material ultrafino e pode atuar em nano e microescala, tanto como lubrificante sólido, quanto adicionado em lubrificante líquido (BERMAN; ERDEMIR; SUMANT, 2014). Por outro lado, o grafeno apresenta grandes áreas de superfície específica e fortes forças de Van der Waals entre suas camadas, o que facilita a rápida aglomeração e sedimentação das partículas. Desta forma, para aprimorar suas propriedades e ampliar suas aplicações, a utilização de outros componentes ou materiais são associadas ao uso do grafeno, dando origem aos compósitos de grafeno e ao grafeno funcionalizado. A funcionalização permite alterar as propriedades do material por meio de ligações covalente ou não-covalente de grupos funcionais ao grafeno, reduzindo o empilhamento e aglomeração das partículas. A funcionalização do grafeno ocorre pelo método de funcionalização química e o material utilizado é selecionado de acordo com a aplicação (ISMAIL *et al.*, 2021).

Bordignon *et al.* (2018) realizaram um estudo avaliando o comportamento tribológico de um grafeno multicamadas, funcionalizado de duas formas distintas: (i) via plasma com Amônia - NH_3 e (ii) Nitrogênio - N_2 . Adicionalmente, o grafeno multicamadas sem tratamento também foi estudado. Durante o procedimento experimental, utilizou-se poliolester de baixa viscosidade como óleo lubrificante, as partículas foram então dispersas no óleo em uma porcentagem mássica de 0,05 %. O procedimento foi repetido sem a utilização de partículas (óleo base puro) a fim de comparação dos resultados. Propriedades tribológicas, tais como: resistência ao desgaste coeficiente de atrito e taxas de desgaste, foram avaliadas juntamente com a dispersão das partículas. Os resultados indicaram uma melhor performance antidesgaste e uma dispersão muito estável para o grafeno funcionalizado a plasma com amônia.

A aglomeração das partículas na solução resulta em uma suspensão menos estável e influencia na atuação dos nanolubrificantes nos processos de deslizamento. Esse fenômeno é ilustrado pela Figura 4. À medida que as partículas se aglomeram sua inserção entre as superfícies deslizantes é dificultada. Com a suspensão dispersa, o tribofilme formado entre os contatos é contínuo e homogêneo melhorando a capacidade de carga do nanolubrificante (BORDIGNON *et al.*, 2018).

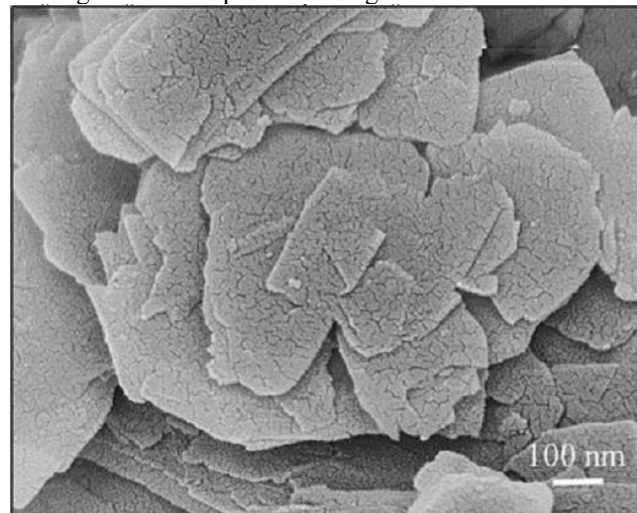
Figura 4 – Desempenho da aglomeração das nanopartículas no contato metal-metal.



Fonte: Adaptado de Bordignon *et al.* (2018).

No presente trabalho, foram utilizadas partículas de grafeno funcionalizado a plasma com amônia. A Figura 5 mostra uma ampliação deste tipo de material obtidas por meio de microscópio eletrônico de varredura com emissão de campo.

Figura 5 - Imagem das nanopartículas de grafeno funcionalizado com amônia.



Fonte: Adaptado de Bordignon *et al.* (2018).

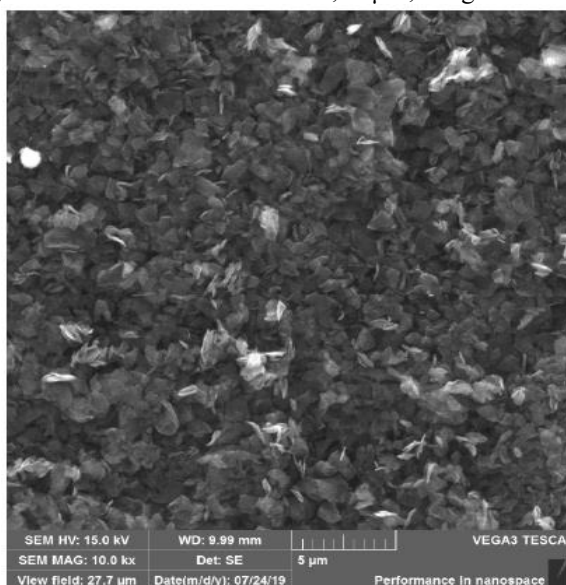
Outro material em destaque é o grafite cristalino. Chen *et al.* (2008) investigaram as propriedades tribológicas de um compósito de cobre com inclusões de grafite cristalino em variadas proporções. Os resultados indicaram menores taxas de desgaste e coeficientes de atrito em um teste tribológico de bloco sobre anel. De acordo com os autores, em virtude do grafite

possuir intercadas de ligações mais fracas, o material pode ser cisalhado facilmente e preencher efetivamente os espaços vazios formando uma tribocamada uniforme. Tais características resultaram em uma melhor resistência ao desgaste.

Furlan *et al.* (2017) constataram a eficiência de compósitos autolubrificantes com partículas de grafite por meio da obtenção de baixos coeficientes de atrito durante a execução de testes tribológicos de deslizamento alternativo, sem lubrificação e em atmosfera de nitrogênio e ar. Os autores identificaram que as partículas mais finas apresentaram valores menores e mais estáveis de coeficiente de atrito em decorrência do grau de homogeneização da microestrutura.

Rivera (2020) utilizou partículas de grafite como lubrificante sólido (aplicadas por meio de impregnação à vácuo) para analisar o desempenho tribológico destas partículas aliada a um compósito com superfície porosa, mostrando a eficácia do uso do grafite como lubrificante sob as condições estudadas na pesquisa. As partículas de grafite foram utilizadas em três tamanhos médios (1,10 μm , 6,07 μm e 21,54 μm) e foram avaliadas por meio de ensaios tribológicos. A maior durabilidade e menor taxa de desgaste foi observada para o grafite com 1,10 μm . Partículas de grafite cristalino utilizadas por Rivera (2020) são mostradas na Figura 6.

Figura 6 - Grafite cristalino com 1,10 μm , imagens via MEV.



Fonte: RIVERA (2020).

2.1.3 Método de Aplicação

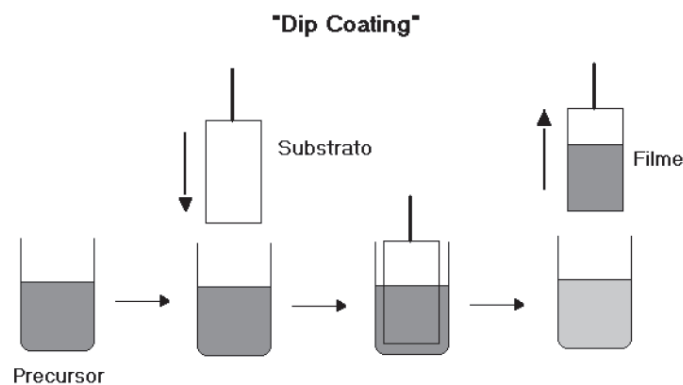
Diversos métodos para a deposição das partículas sobre a superfície podem ser aplicados, tais como *spin-coating*, *drop-casting*, *dip-coating*, entre outros. A escolha quanto ao método varia conforme a espessura do filme, dispersão das partículas e forma do corpo.

O processo de *spin-coating* consiste na aplicação da suspensão na superfície e com posterior rotação da peça para espalhamento do fluido. Durante a aplicação da suspensão a peça pode estar estática ou em rotação.

No que concerne ao *drop-casting*, a substância é espalhada sob uma superfície estacionária, com movimentos rotacionais executados pelo aplicador durante o processo (OSSILA, 2022).

O *dip-coating* é um método comumente aplicado para formas complexas, sendo um processo de fácil e rápida aplicação, e ainda é caracterizado por conceder a peça um filme fino de lubrificante. O mecanismo de deposição configura-se na imersão da peça em um precursor (solução com partículas lubrificantes), conforme Figura 7. Esse processo pode ser repetido várias vezes, respeitando o tempo de secagem do precursor, até obtenção da quantidade desejada (EFE *et al.*, 2021; NASSAR; CIUFFI, 2003).

Figura 7 – Método de aplicação por *dip-coating*.



2.2 SUPERFÍCIES TEXTURIZADAS

O uso de superfícies desenvolvidas por processos controláveis para aplicações com nano e micropartículas é um caminho para garantir uma reprodutibilidade da topografia, com

direcionalidade, tamanhos e quantidades de vales controlados. Nesse sentido, essa seção trata da morfologia das superfícies obtidas por processos de brunimento de curso curto e precidor.

2.2.1 Processo de Brunimento

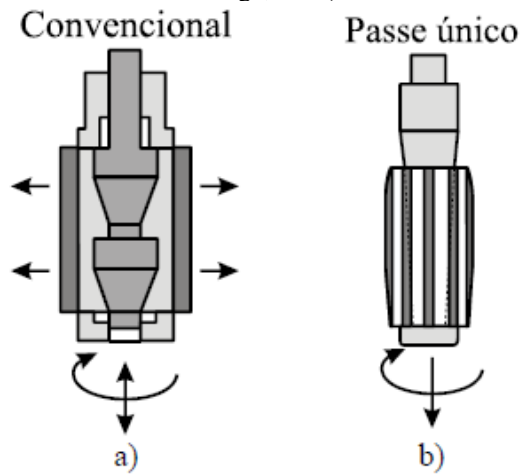
O processo de brunimento é considerado um processo de acabamento de superfícies e é comumente utilizado visando alcançar especificações que são complexas em processos precedentes, como torneamento de desbaste ou de acabamento, e é caracterizado por permitir a modificação da textura ou topografia da superfície, a obtenção de uma superfície livre de danos, principalmente térmicos, e pelo aprimoramento de fatores como a integridade da superfície, acurácia geométrica e fatores visuais. Superfícies de cilindros para aplicações em motores, geralmente, são finalizadas por processos como o brunimento. Esse processo gera nas superfícies padrões de texturas que são favoráveis para essas aplicações, visto que esse tipo de padrão facilita o controle da quantidade de óleo durante o deslizamento, promovendo retenção e melhor distribuição do mesmo (SPENCER; ALMQVIST; LARSSON, 2011; HASHIMOTO *et al.*, 2016).

O processo de brunimento pode ser caracterizado em dois tipos principais, o denominado brunimento de curso curto ou superacabamento, e o brunimento de curso longo. Nesse capítulo, apenas o brunimento de curso curto será apresentado.

2.2.1.1 Processo de Brunimento Precidor

O brunimento de curso longo pode ser dividido em duas categorias: brunimento convencional e brunimento de passe único, conforme Figura 8. Diferente do brunimento convencional, no brunimento de passe único a ferramenta não é expansível, tornando o processo mais rígido e com baixas taxas de remoção. Os movimentos realizados durante o processo correspondem a rotação em torno do eixo e avanço axial. Ademais, a remoção de material é feita em um único passe com uma quantidade de remoção de material menor e previamente determinada (FREITAS, 2018; SCHMIDT, 1999).

Figura 8 - Tipos de brunimento de curso longo, em a) brunimento convencional e b) passe único.



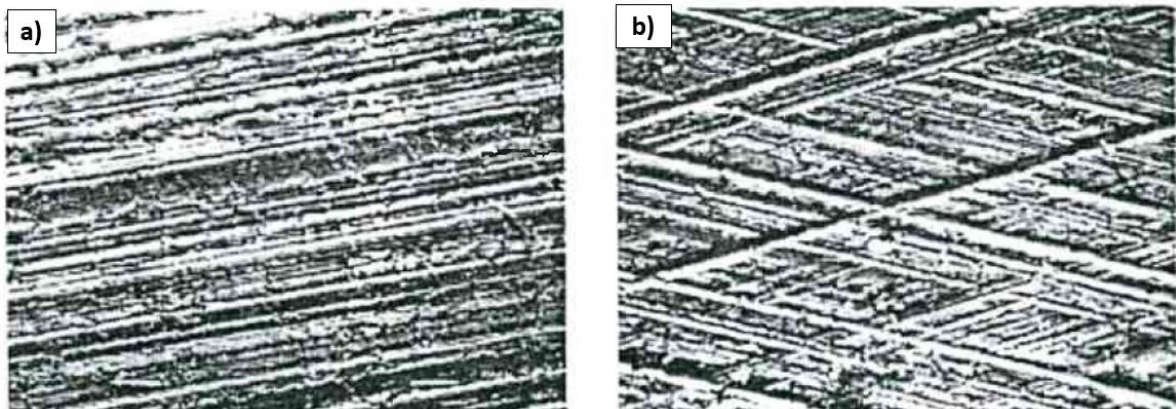
Fonte: Marvin (1993 apud FREITAS, 2018).

A velocidade de corte V_c [m/min] em um brunimento de passe único é obtida pelas componentes de velocidades resultantes no processo, velocidade axial V_a [mm/min] e velocidade tangencial V_t [m/min], conforme a Equação 1. A remoção de material nesse processo ocorre em um único movimento de corte na entrada e, em consequência disso, a textura apresentada pela superfície não corresponde as ranhuras cruzadas como no processo convencional. As ranhuras são caracterizadas por uma única direção e possuem maior profundidade, que é obtida pelo processo de saída da ferramenta. Uma ilustração comparando as texturas resultante em ambos os processos é apresentada na Figura 9.

$$V_c = \sqrt{V_a^2 + V_t^2}$$

Equação 1

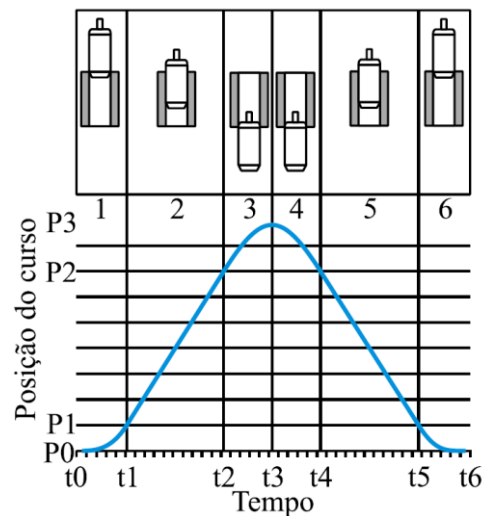
Figura 9 - Superfície obtida pelos processos de brunimento de passo único (a) e convencional (b).



Fonte: Schmidt (1999).

A velocidade axial do processo mantém-se constante ao longo do curso, com exceção nas regiões de reversão do movimento, no qual a velocidade desacelera, fica nula, e reacelera no sentido oposto. Uma ilustração do processo pode ser observada pela Figura 10, representando as diferentes fases do movimento axial. No ponto P0, ponto morto superior, a ferramenta começa o movimento de descida até atingir a velocidade do processo em P1. Do ponto P1 ao ponto P2, o processo se mantém a velocidade constante, com valores positivos. A partir do P2 a ferramenta sofre uma desaceleração até atingir o ponto morto inferior P3 com velocidade nula, e partir deste ponto volta ao processo de aceleração, subida da ferramenta, retornando o ponto P2. Durante o processo de ascensão da ferramenta a velocidade axial é negativa. Do ponto P2 ao ponto P1 a velocidade é constante e negativa. No ponto P1 a ferramenta é submetida a uma desaceleração até atingir o ponto morto superior P0 (FREITAS, 2018).

Figura 10 – Descrição do movimento axial da ferramenta durante um processo de brunimento de passe único.



Fonte: Freitas (2018).

As forças de corte atuantes no processo de brunimento de passe único estão relacionadas com a quantidade de gumes ativos atuantes na parede das peças. A força de corte F_c resultante pode ser obtida pela Equação 2, onde F_a corresponde a força axial e F_t a força tangencial. A força de corte é resultante da deformação elástica e plástica do material, da formação de cavaco e pelo atrito formado entre ferramenta e peça (FREITAS, 2018).

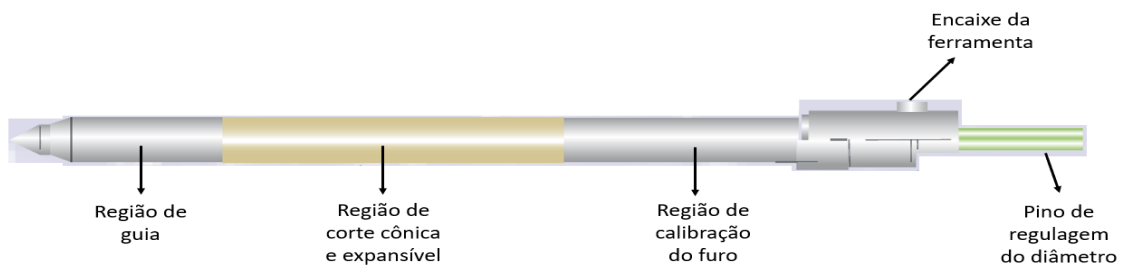
$$F_c = \sqrt{F_a^2 + F_t^2} \quad \text{Equação 2}$$

O momento de corte resultante M gerado durante o processo é proporcional a força tangencial F_t e o diâmetro da ferramenta de brunimento d . A expressão para obtenção do momento está apresentada na Equação 3 (FREITAS, 2018).

$$M = F_t \frac{d}{2} \quad \text{Equação 3}$$

Precidor é uma ferramenta desenvolvida pela empresa alemã Nagel para o processo de brunimento de passe único em furos passantes, conforme a Figura 11. A ferramenta consiste em um mandril ajustável, juntamente com regiões de corte e guia, em que a região de corte é composta por uma camada abrasiva expansível. Quando utilizada, permite alcançar precisão geométrica e de forma menor que 0,001 mm (NAGEL, 2021).

Figura 11 - Ferramenta Precidor.

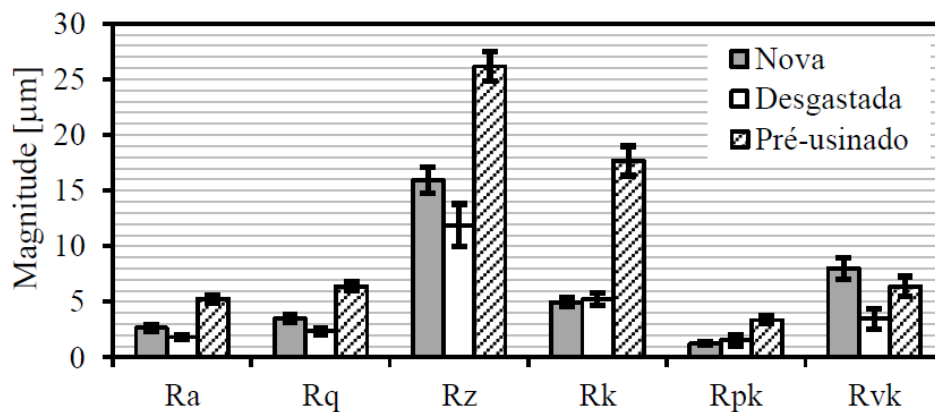


Fonte: Adaptado de Nagel (2021).

Freitas (2018) avaliou a influência do desgaste da ferramenta de brunimento de passe único (precidor) nas forças de corte atuantes no processo, além da forma e textura da superfície após usinagem. Observou-se que durante o movimento ascendente da ferramenta de brunir, na saída da ferramenta, ocorreu uma remoção de material e a formação de uma superfície com ranhuras levemente cruzadas. Quanto maior for este retorno, maior será o riscamento da superfície. Entretanto, conforme o autor, tais esforços ocorrem devido à parte deformada

elasticamente induzida pela ferramenta que não é removida no processo de avanço dela. Além disso, observou-se que dentre os parâmetros analisados, tais como força axial e parâmetros de rugosidade, houve variação ao se utilizar a ferramenta nova ou desgastada. A variação dos parâmetros analisados está apresentada na Figura 12, e releva uma diminuição dos valores em decorrência do desgaste da ferramenta. Segundo o autor, essa diminuição é consequência da perda do corte dos grãos superabrasivos das pastilhas, que reduz a capacidade de penetração no material da peça. Dessa maneira, ocorre a predominância dos efeitos do atrito e deformações no processo.

Figura 12 – Variação dos parâmetros de rugosidade utilizando uma ferramenta de brunimento precidor nova e desgastada.

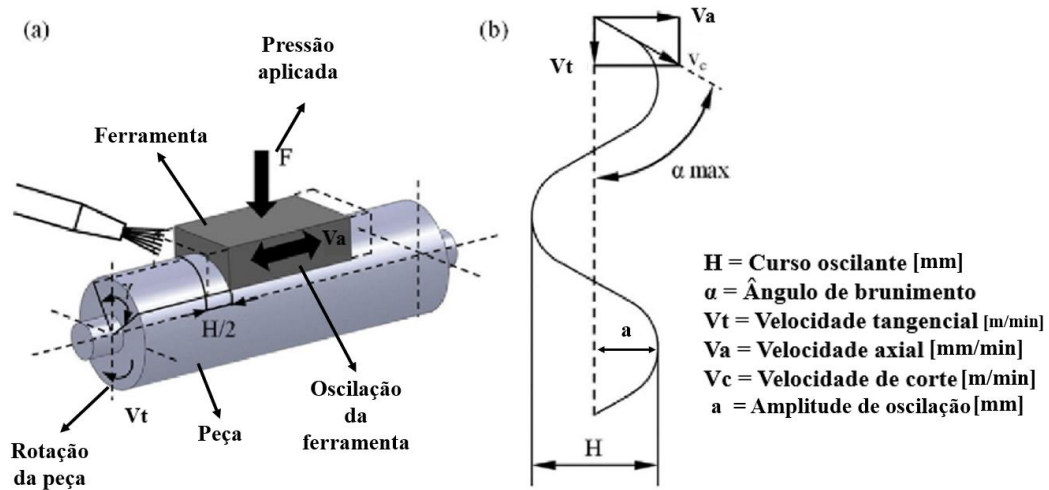


Fonte: Freitas (2018).

2.2.1.2 Processo de Brunimento por Superacabamento

No brunimento de curso curto, conhecido como *superfinishing* ou superacabamento, o movimento de rotação é aplicado na peça e a ferramenta movimenta-se axialmente em um curso curto oscilante, menor que o comprimento da peça. Conforme apresentado na Figura 13(a), o superacabamento atua por meio de uma pastilha de brunir ou por fita com inclinações variantes em uma faixa de 1000 a 3000 oscilações/min. A velocidade de corte média V_c desse processo pode ser obtida utilizando a Equação 4, e o máximo ângulo de brunimento $\theta_{m\acute{a}x}$, a partir de um ponto qualquer, pode ser obtido utilizando a Equação 5.

Figura 13 - Princípio do processo de superacabamento em a) e padrão resultante do processo em b).



Fonte: Adaptado de Uhlmann, Spur e Kleinschnitker (2015).

$$V_c = \sqrt{V_t^2 + (H\pi f \cos(\omega t) + V_{wa})^2} \quad \text{Equação 4}$$

$$\theta_{m\acute{a}x} = \tan^{-1} \frac{V_a + V_{wa}}{V_t} \quad \text{Equação 5}$$

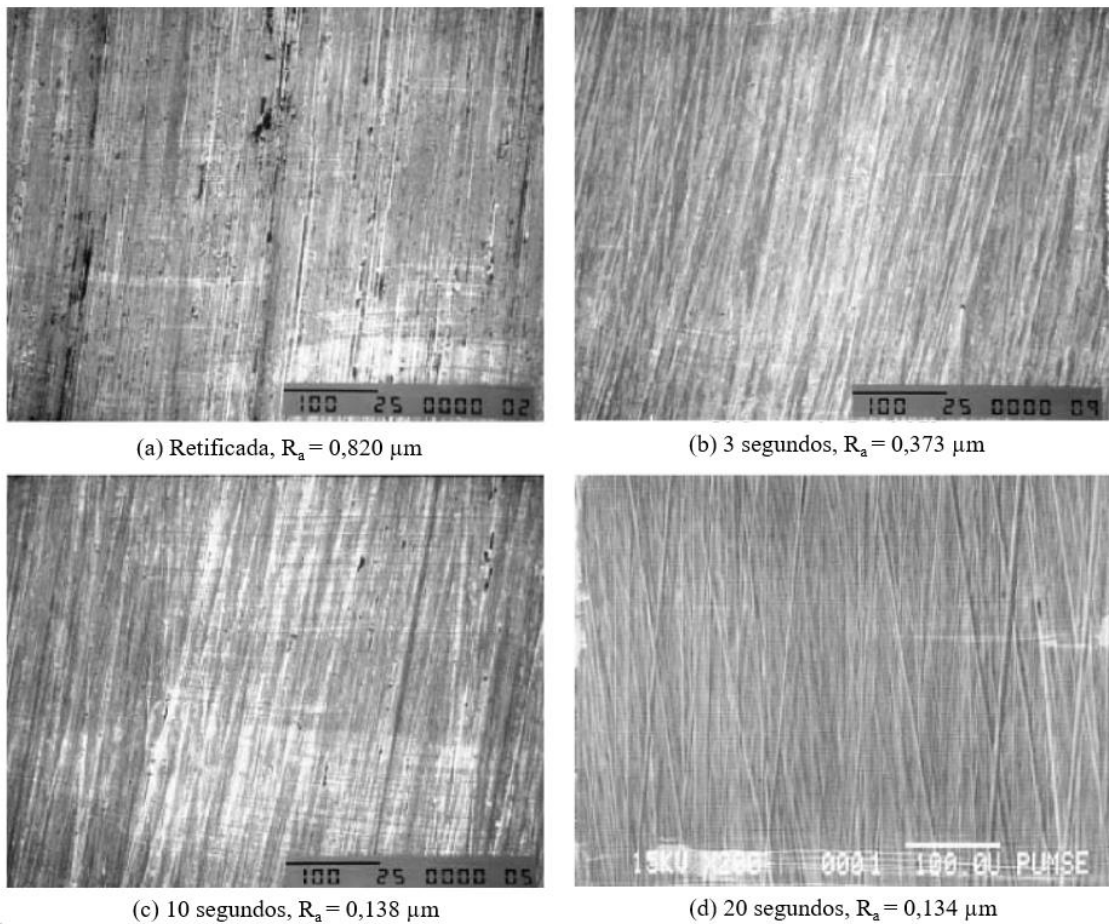
em que d_w [mm] corresponde ao diâmetro da peça, f [Hz] é a frequência de oscilação da ferramenta, ω [rad/s] a velocidade angular e V_{wa} [mm/min] é a velocidade axial da peça. A velocidade tangencial é geralmente constante e a velocidade axial corresponde a um movimento oscilatório descrito por uma onda senoidal.

Na Figura 13 (b) é apresentado um esquema do curso da ferramenta e o padrão de textura resultante na superfície, que pode resultar em texturas cruzadas quando houver mudança de direção da ferramenta (UHLMANN; SPUR; KLEINSCHNITKER, 2015). A ferramenta de brunir atua de maneira que a velocidade axial influencia nas forças de alimentação perpendicular à superfície de trabalho, enquanto que na direção tangencial é possível controlar a profundidade de corte por instrumentos hidráulicos ou mecânicos (KLOCKE, 2009). O processo de superacabamento possibilita diminuir a rugosidade da superfície e aumentar a precisão geométrica dos componentes, sendo comumente aplicados com esse objetivo (HASHIMOTO *et al.*, 2016).

Chang, Farris e Chandrasekar (2008) avaliaram experimentalmente a textura de uma superfície superacabada. A análise foi realizada em peças de aço endurecido e ferramentas de

óxido de alumínio e nitreto de boro cúbico (CBN). Os autores identificaram a variação da textura da superfície com o tempo de brunimento, conforme apresentado na Figura 14. Observa-se que após 10 segundos, os vales mais profundos visualizados na superfície retificada desaparecem e a característica de textura cruzada torna-se perceptível, ficando mais acentuada com 20 segundos de brunimento. Os autores concluíram que a característica da rugosidade da superfície, sem variação das condições de usinagem testadas, depende apenas do tipo de pedra de brunir.

Figura 14 - Superfície retificada em a) e superfícies superacabadas com tempo de brunimento de 3 s em b), 10 s em c) e 20 s em d), todas com os respectivos valores de R_a .



Fonte: Adaptado de Chang, Farris e Chandrasekar (2008).

Como apresentado nas seções anteriores, os processos brunimento precidor e superacabamento são, comumente, aplicados com finalidades distintas e devido a isso, resultam em integridades e topografias distintas nas superfícies. Na Figura 15 são apresentados valores

típicos de rugosidade 2D e 3D, obtidos por alguns processos de finalização, incluindo brunimento convencional e superacabamento (HASHIMOTO *et al.*, 2016).

Figura 15 – Processos de finalização convencionais e as respectivas faixas de parâmetros de rugosidade 2D e 3D.

Processo		Parâmetros de rugosidade 2D					Parâmetros de rugosidade 3D		
		Ra μm	Rt μm	Rz μm	Rsk	Del-q $^\circ$	Sa μm	Sz μm	Str μm
Base	Retificação	0.3~0.8	3~5	3~5	0~-1	12~18	0.2~0.4	2~4	0.01~0.05
	Torneamento duro	0.2~1.0	2~4	2~5	0.5~0	8~12	0.2~0.8	3~5	0~0.02
Processos de finalização - abrasivos finos	Superacabamento	0.05~0.15	1~2	1~2	-0.5~-1.5	5~12	0.2~0.3	2~5	0~0.05
	Superacabamento com fita	0.05~0.2	1~2	1~2	-0.5~-1.5	5~12	0.1~0.2	2~5	0~0.05
	Brunimento	0.25~0.5	3~7	2.5~6	-2~-4	10~15	0.3~0.4	3~6	0.01~0.05
	Tamboreamento	0.05~0.1	0.5~1	0.5~1	-0.5~-1.5	1~3	0.05~0.1	0.5~1	0.4~1
	Lapidação	0.05~0.12	0.5~1	0.5~1	-0.2~-1.0	3~5	0.05~0.12	0.5~1	0.4~1
	Polimento	0.01~0.05	0.05~0.1	0.05~0.1	-0.5~-1.5	2~4	0.01~0.05	0.05~0.1	0.6~1
	Esmerilhamento	0.005~0.01	0.02~0.05	0.05~0.1	-0.5~-1.5	1~3	0.005~0.01	0.01~0.05	0.6~1
	Usinagem de fluxo abrasivo	0.1~0.25	1~2.5	1~2.5	-0.5~-1.5	1~3	0.1~0.25	1~2.5	0~0.1
	Acabamento abrasivo magnético	0.003~0.07	0.03~0.7	0.03~0.7	0~-2	3~5	0.003~0.07	0.03~0.7	0~0.05

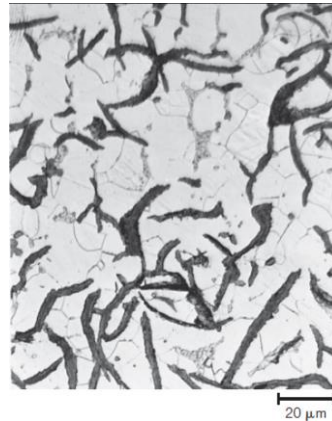
Fonte: Adaptado de Hashimoto *et al.* (2016).

2.2.2 Superfícies de Ferro Fundido e Ferro sinterizado após usinagem

As características das superfícies após o processo de usinagem variam de acordo com o material, processos e condições de usinagem. O ferro fundido cinzento e o ferro + 0,5%C sinterizado são os materiais utilizados neste trabalho. Em virtude disso, trabalhos relatando a variação das superfícies após processos de usinagem nestes materiais são apresentados nesta seção.

Os ferros fundidos são classificados como ligas ferrosas e possuem em sua estrutura teores de carbono acima de 2,14 %peso. Os ferros fundidos cinzento, em específico, possuem teores de carbono na ordem de 2,5 %peso a 4,0 %peso, e são assim denominados por apresentarem uma aparência acinzentada quando fraturados. A microestrutura típica desses materiais é caracterizada por flocos de grafita em uma matriz ferrítica (ferrita α) ou perlítica, ver Figura 16 (CALLISTER Jr. e RETHWISCH, 2016; GUESSER, 2019).

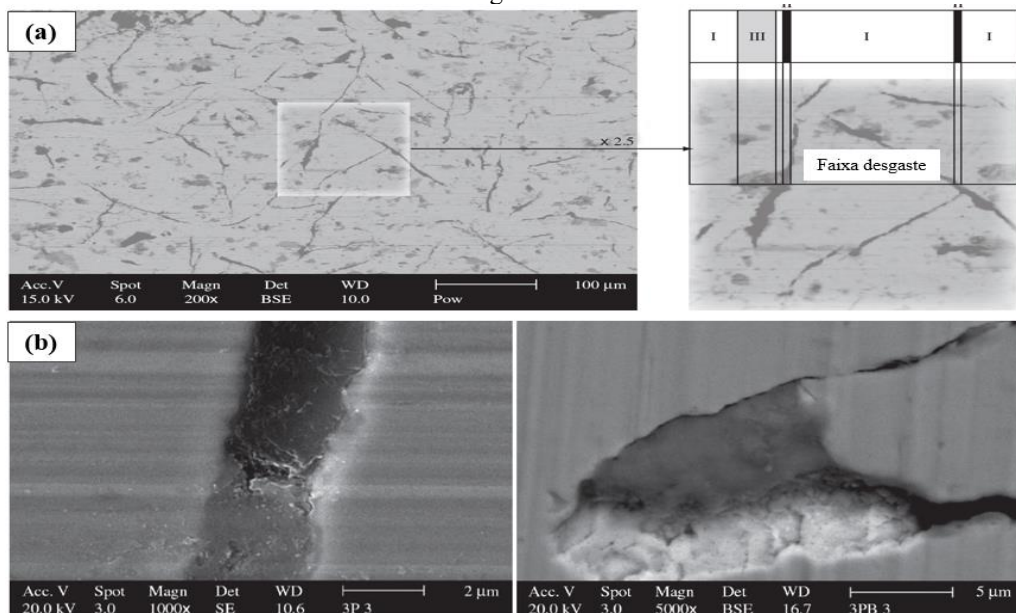
Figura 16 – Microestrutura de um ferro fundido cinzento em uma matriz ferrítica (ferrita α).



Fonte: Callister Jr. e Rethwisch (2016).

Os ferros fundidos possuem características desejáveis tais como: boas resistência e ductilidade sob cargas de compressão, capacidade de amortecimento de energia vibracional, elevada resistência ao desgaste, alta fluidez na temperatura de fundição, permitindo a obtenção de formas complexas e de baixo custo (CALLISTER Jr.; RETHWISCH, 2016). Polak e Grzybek (2005) estudaram os mecanismos de mudança na camada da superfície de discos de freios automotivos constituídos de ferro fundido cinzento. Os resultados indicaram uma superfície desgastada, caracterizada por um material heterogêneo, conforme apresentado na Figura 17 (a).

Figura 17 - Em a) superfície desgastada de um disco de freio automotivo de ferro fundido cinzento e em b) os sítios de grafita vazios.



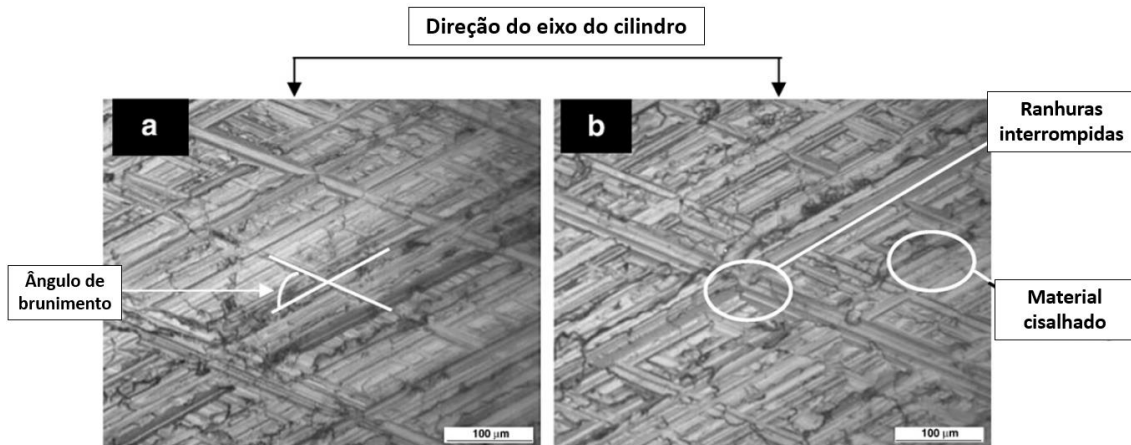
Fonte: Adaptado de Polak e Grzybek (2005).

Ainda na Figura 17 (a), três faixas estão em destaque: I - representa a estrutura metálica, II – representa os flocos de grafite, que fornece grafite a superfície e altera as condições de deslizamento e III – representa a região em que o grafite foi removido, dando lugar a uma região de armazenamento de detritos, essa região é apresentada de forma ampliada na Figura 17(b).

O processo de brunimento em ferro fundido pode resultar em trincas, dobras e deformações plásticas, e, devido a isso, esses danos podem expor e arrancar as grafitas contidas no material, tornando-se pontos de acúmulo de materiais como sólidos lubrificantes e detritos. Além disso, o processo pode influenciar na formação do fenômeno *blechmantel*, que consiste no fechamento das ranhuras devido à existência de material fundido ou de deformações plásticas, resultantes de processos de usinagem inadequados, que se alojam nos vales (TOMANIK, 1992; SABRI; MANSORI, 2009).

Sabri e Monsori (2009) também verificaram o fenômeno *blechmantel* durante a avaliação de um processo de brunimento convencional de curso longo em superfícies de ferro fundido cinzento sob diferentes velocidades de expansão. Os autores utilizaram ferramentas com dois tipos de abrasivos: Carbeto de Silício Ligado (VBSC) e Diamante (VBD). Os resultados indicaram um aumento no surgimento do *blechmantel* para a ferramenta de VBD ao se utilizar maiores velocidades, mesmo com melhores valores de cilindricidade e menores valores de rugosidade para a ferramenta de VBSC. A Figura 18 apresenta a textura das superfícies brunidas com ferramenta de VBSC, em a), e VBD, em b), utilizando velocidade de expansão de 4 $\mu\text{m/s}$.

Figura 18 – Textura da superfície de ferro fundido cinzento brunida com ferramenta de a) Carbeto de Silício Ligado (VBSC) e b) Diamante (VBD) com velocidade de expansão de 4 $\mu\text{m/s}$.

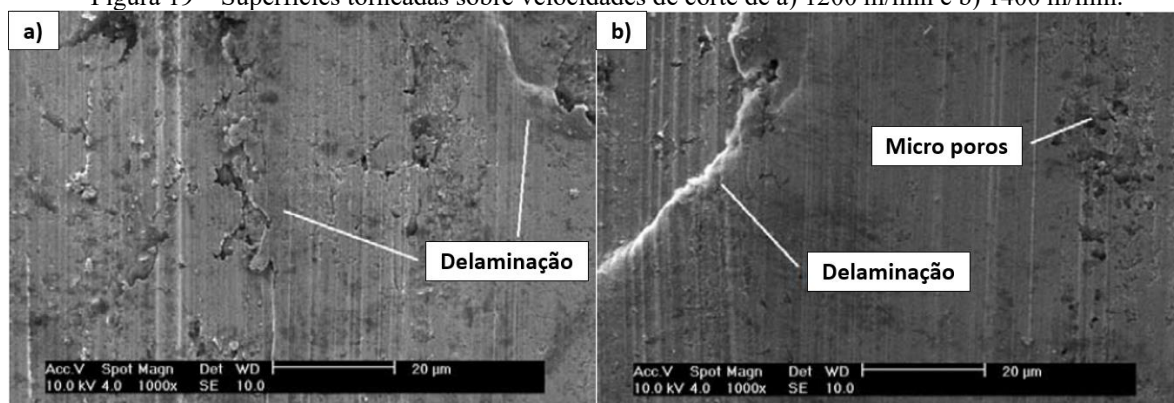


Fonte: Adaptado de Sabri e Monsori (2009).

Dimkovski *et al* (2009) avaliaram quantitativamente os efeitos do *blechmantel*. O processo de usinagem foi realizado por brunimento com ferramenta de diamante em camisas de cilindros de ferro fundido. Os autores desenvolveram um algoritmo que permitiu quantificar a porcentagem de *blechmantel* existentes ao longo das camisas de cilindros. A partir dos resultados obtidos pelo algoritmo, verificou-se que a quantidade de *blechmantel* reduzia com o alisamento da superfície, resultado ratificado pela redução dos parâmetros de rugosidade de superfície S_a , S_{sc} e S_{pk} .

Guesser, Pereira e Boehs (2016) avaliaram superfícies de ferro fundido cinzento sob diferentes valores de velocidades de cortes em um processo de torneamento. A variação da rugosidade final da superfície, por meio dos parâmetros R_a , R_y e R_z , foram observadas ao se variar as velocidades de corte em 400, 700, 1200 e 1400 m/min. Os resultados indicaram a redução da rugosidade com o aumento da velocidade, exceto para a velocidade de 1400 m/min em que ocorreu um aumento da rugosidade. Para todos os valores de velocidades, a superfície final (observada via MEV) foi caracterizada por delaminações, poros e debris. Segundo os autores, o fenômeno da delaminação aumenta para maiores velocidades de corte e é caracterizado por uma alta deformação plástica da superfície, associadas a rasgos e microsoldagens. Por outro lado, os poros observados na superfície podem ser resultado de fraturas ou um arrancamento dos flocos de grafite. Na Figura 19 são mostrados os defeitos corresponde aos valores de velocidade de corte de 1200 e 1400 m/min. Desse modo, a aplicações de processos posteriores devem ser realizados visando retirar os danos oriundos desta etapa, com o intuito de melhorar a performance do componente durante a aplicação tribológica.

Figura 19 – Superfícies torneadas sobre velocidades de corte de a) 1200 m/min e b) 1400 m/min.



Fonte: Adaptado de Guesser, Pereira e Boehs (2016).

Por sua vez, o ferro sinterizado é obtido por meio da metalurgia do pó e é assim denominado por não apresentar quantidade significativa de carbono ou elementos de liga em sua constituição. Dentre os materiais sinterizados, o ferro e o aço representam os materiais mais importantes, sendo comumente produzidos em massa e possuindo baixo custo. De maneira geral, os materiais sinterizados possuem propriedades dependentes da rota de fabricação, porosidade, entre outros fatores (THUMMLER; OBERACKER, 1993). Quando comparados com processos convencionais tais como fundição e forjamento, tendem a ser mais macios e consequentemente, mais susceptíveis a modificações durante usinagem (ZHANG e YUAN, 2018). Processos mais agressivos, tais como torneamento de desbaste e furação, podem alterar a microestrutura da superfície e ocasionar em distorções das partículas na microestrutura e microtrincas. Por outro lado, processos menos agressivos possuem pouca influência na superfície do material, conforme verificado em Zhang e Yuan, (2018).

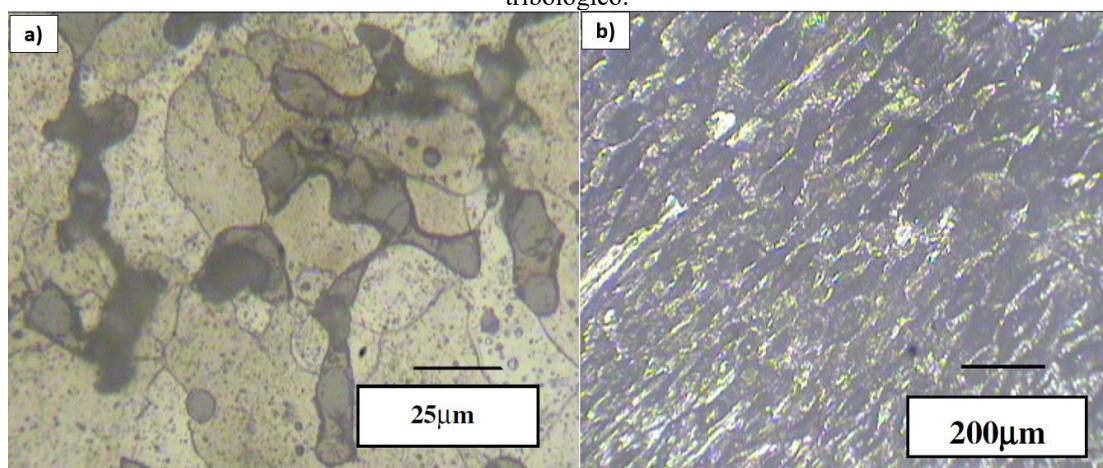
O ferro com baixa porcentagem de carbono é considerado um material de baixa usinabilidade por suas características, tais como: baixa dureza e alta ductilidade. Essas características corroboram com a formação de gume posição de corte e aumento da tendência de soldagem a frio (ŠALAK; SELECKÁ; DANNINGER, 2005).

Kandavel *et al.* (2013) investigaram as propriedades tribológicas de três materiais sinterizados, sendo eles: (i) Fe – 0,5 % C; (ii) Fe – 0,5 % C – 2 % Cu e (iii) Fe – 0,5 % C – 2 % Mo. Segundo os autores, devido a microestrutura do Fe – 0,5 % C ser constituída por ferrita e perlita dúcteis (ver Figura 20a), o mesmo apresentou baixo coeficiente de atrito e maior taxa de desgaste em relação aos outros dois materiais testados. Imagens obtidas por microscopia óptica da superfície do Fe – 0,5 % C revelam marcas de desgaste uniforme e alterações na coloração da superfície (ver Figura 20b). De acordo com os autores, tais alterações na coloração são devidas a oxidação da superfície, consequência de maiores velocidades e cargas durante o ensaio.

Bendo *et al.* (2020) também obtiveram baixos coeficientes de atrito e maior taxa de desgaste em superfícies polidas de ferro puro sinterizado quando comparados com outros três materiais sinterizados testados (FeMo, FeC e FeMoC). Os resultados foram obtidos por testes tribológicos em um tribômetro CETR, com carga de 15 N durante 60 minutos. Além disso, análises de rugosidade (R_q , S_{ku} e S_{sk}) e microdureza foram realizados antes dos ensaios tribológicos. Segundo os autores, a alta taxa de desgaste pode ter relação com a baixa dureza

visualizada para o Fe puro. Ademais, a superfície do Fe puro apresentou ainda menores valores do parâmetro de rugosidade S_q , valores de S_{ku} maiores que 3 e valores de S_{sk} negativos, o que caracteriza uma superfície com predominância de vales.

Figura 20 – a) Microestrutura de um Fe – 0,5 % C e b) superfície desgastada do mesmo material após um ensaio tribológico.



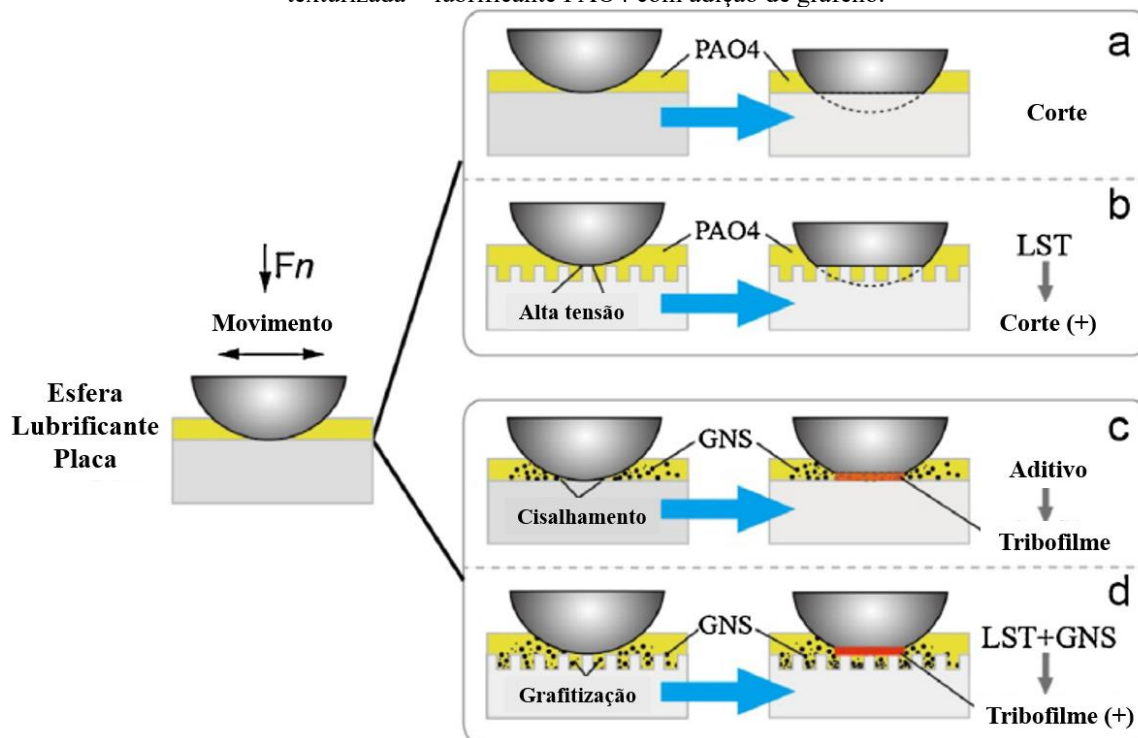
Fonte: Adaptado de Kandavel *et al.* (2013).

2.3 APLICAÇÕES DE LUBRIFICANTES COM ADIÇÃO DE PARTÍCULAS EM SUPERFÍCIES TEXTURIZADAS.

O uso de nanopartículas teve sua eficácia otimizada através da aplicação em superfícies texturizadas, na qual os padrões de ranhuras passaram a atuar como reservatório para essas nanopartículas, influenciando a durabilidade dos lubrificantes na região de atuação (KRAHMER *et al.*, 2020).

Esse mecanismo é exemplificado na Figura 21. Em a), cenário com uma superfície sem textura, observa-se que após o ensaio o contracorpo tende a sofrer um desgaste, reduzindo seu tamanho. Em b), cenário com uma superfície texturizada, a alta tensão resultante da texturização pode acarretar em um maior desgaste da esfera. Quando o grafeno é adicionado ao óleo, Figura 21c e d, a presença de um tribofilme pode ser observada na região de contato, o qual protege e evita o contato metal-metal, tendendo a reduzir o desgaste da esfera. O caso em que a superfície texturizada é utilizada, Figura 21d, a alta tensão no local influencia ainda na grafitação do grafeno, resultando na melhora das propriedades tribológicas (ZHENG *et al.*, 2016).

Figura 21 – Mecanismo de desgaste para a) superfície sem textura + lubrificante PAO4, b) superfície texturizada + lubrificante PAO4, c) superfície sem textura + lubrificante PAO4 com adição de grafeno e d) superfície texturizada + lubrificante PAO4 com adição de grafeno.



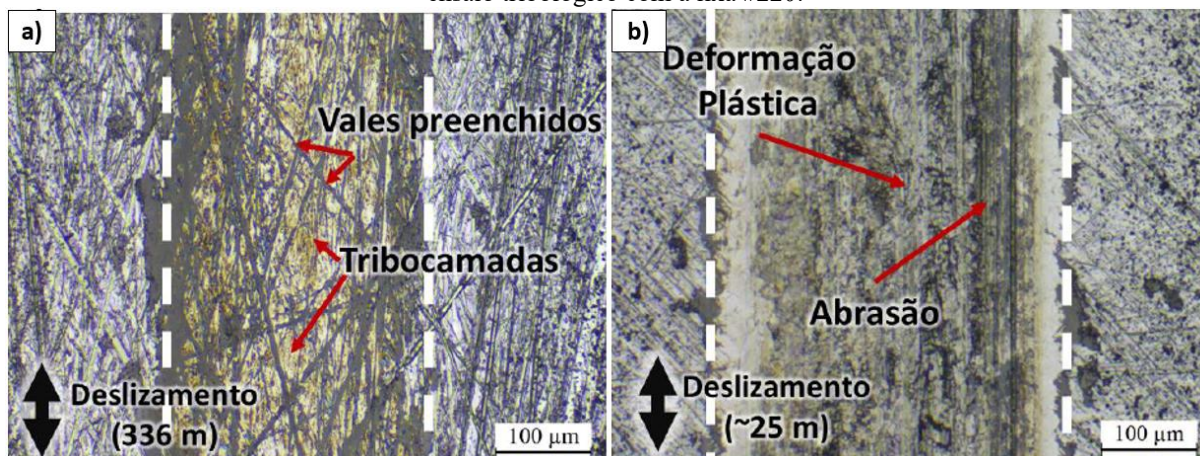
Fonte: Adaptado de Zheng *et al.* (2016).

Arenas *et al.* (2018) avaliaram os efeitos da combinação da texturização, em uma liga de Ti (Ti6Al4V Grau 5) com lubrificação sólida aplicando partículas de dissulfeto de molibdênio e grafeno. As texturas no formato cruzado, similar ao resultado de um processo de brunimento, foram obtidas por meio de microusinagem por laser pulsado, com variação do ângulo entre ranhuras, densidade de área texturizada e direção de deslizamento. Os resultados indicaram valores do coeficiente de atrito próximo a 0,2 para ambos os lubrificantes, com durabilidade dependente do ângulo entre ranhuras e densidade de área. Os melhores resultados foram alcançados com o grafeno, para densidade de área superior a 64 % e 60° entre as ranhuras, obtendo-se durabilidade de 370 m para o COF menor que 0,5.

No trabalho desenvolvido por Giacomelli (2020), avaliou-se o potencial tribológico na macro escala de novas nanopartículas a base de carbono: um CDC derivado do carbeto de boro (B_4C) e de cromo (Cr_3C_2), e um grafeno funcionalizado com amônia. Em um primeiro momento, o autor analisou a deposição do lubrificante na superfície comparando duas metodologias, o *Drop-casting* e *Spin-coating*. Nas peças estudadas, para se obter um

acabamento inicial padronizado, o autor realizou um processo de lixamento, utilizando lixas de #220, #320 e #600 em uma politriz. As topografias das superfícies foram avaliadas com relação ao método de *drop-casting* e com 10 aplicações do lubrificante sobre a superfície. Os resultados das análises das topografias da superfície indicaram que a lixa #600 apresentou a menor variação da rugosidade. Entretanto, a camada isolante entre pista e contra corpo se manteve por maior tempo com a superfície obtida com a lixa #320, que, por sua vez, suportou maior incremento de carga sem sofrer variação considerável do coeficiente de atrito. Essas superfícies apresentaram vales preenchidos e tribocamadas nas pistas de deslizamento e contra corpo, conforme ilustrado na Figura 22. Para as topografias das superfícies com #220 e #600 verificou-se o aumento do coeficiente de atrito acima do ponto limite com deformação plástica e abrasão na pista de deslizamento, como evidenciado na Figura 22.

Figura 22 – a) Superfície da amostra após ensaio tribológico com a lixa #320 e b) superfície da amostra após ensaio tribológico com a lixa #220.



Fonte: Giacomelli (2020).

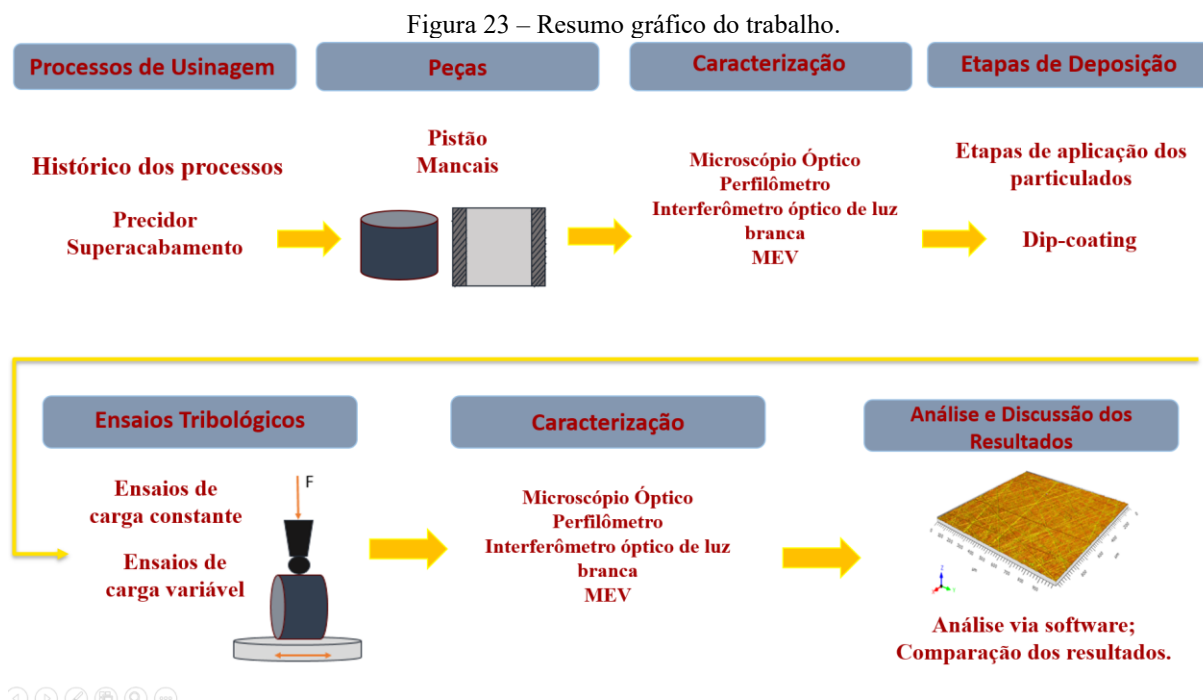
Rosenkranz *et al.* (2021) revisaram os principais efeitos da combinação de lubrificantes sólidos com superfícies texturizadas. O foco do trabalho, no que se refere aos lubrificantes sólidos, foram o uso de metais moles, politetrafluoretileno, carbono tipo diamante e materiais lamelares 2D, como o grafeno/grafite e MoS₂ (dissulfeto de molibdênio). Os autores relataram a eficiência desses lubrificantes combinados com variadas características de textura da superfície e para variadas aplicações. Entretanto, ainda não existe um consenso estabelecido acerca do uso efetivo dessa combinação e dos mecanismos envolvidos neste processo. Neste sentido, existe a necessidade de otimização da textura da superfície com boas propriedades tribológicas, por meio da obtenção dos parâmetros de textura ideais (largura, profundidade e

densidade) que permitam o armazenamento efetivo dos detritos e o fornecimento de lubrificação adequado nas superfícies deslizantes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os passos para o desenvolvimento do presente trabalho estão descritos nesta seção. Uma visão global inicial do trabalho é apresentada por um resumo gráfico, ver Figura 23. A primeira etapa consistiu na busca acerca do histórico de fabricação das peças, que compreende processos como brunimento precidor e superacabamento, e a influência teórica destes processos na textura da superfície.

Após este processo, as peças foram caracterizadas por uma sequência de análises para descrever as condições de integridade das superfícies. Com estes resultados, as peças foram submetidas a ensaios tribológicos com o uso de lubrificantes sólidos, que foram depositados na superfície por meio do método *dip-coating*. Após os ensaios, as superfícies foram novamente caracterizadas para estudo da interação superfície/microfluido.



Fonte: Autora.

3.1 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Para avaliar a interação superfície/partícula, os tipos de tratamentos previstos no planejamento foram: superfícies, partículas e regiões de análise. Os níveis de cada tratamento foram considerados: I: brunimento precidor e superacabamento + lixamento (para as

superfícies); II: CDC, Grafite e Grafeno (partículas) e III: ponto morto superior (PMS), região central (RC) e ponto morto inferior (PMI) como regiões de análises. O planejamento experimental foi desenvolvido e a configuração está ilustrada na Tabela 1.

Tabela 1– Planejamento experimental.

Tratamentos	Superfícies	Partículas	Regiões
Níveis	Precidor	CDC	PMS
			RC
			PMI
		Grafite	PMS
			RC
			PMI
		Grafeno	PMS
			RC
			PMI
	Superacabamento + Lixamento	CDC	PMS
			PMI
		Grafite	PMS
PMI			
Grafeno		PMS	
		PMI	

Fonte: Autora.

Com o planejamento experimental efetuado, a configuração final de todos os experimentos, considerando também um total de 5 réplicas para cada situação é apresentada na Tabela 2. A configuração final resultou em um total de 30 experimentos que foram realizados nas peças e, dada a configuração apresentada, 15 superfícies de cada processo foram utilizadas no trabalho.

Tabela 2– Configuração experimental.

Tratamentos	Superfícies	Partículas
1	Precidor	CDC
2	Precidor	CDC
3	Precidor	CDC
4	Precidor	CDC
5	Precidor	CDC
6	Superacabamento + Lixamento	CDC
7	Superacabamento + Lixamento	CDC
8	Superacabamento + Lixamento	CDC
9	Superacabamento + Lixamento	CDC
10	Superacabamento + Lixamento	CDC
11	Precidor	Grafite
12	Precidor	Grafite
13	Precidor	Grafite
14	Precidor	Grafite
15	Precidor	Grafite
16	Superacabamento + Lixamento	Grafite
17	Superacabamento + Lixamento	Grafite
18	Superacabamento + Lixamento	Grafite
19	Superacabamento + Lixamento	Grafite
20	Superacabamento + Lixamento	Grafite
21	Precidor	Grafeno
22	Precidor	Grafeno
23	Precidor	Grafeno
24	Precidor	Grafeno
25	Precidor	Grafeno
26	Superacabamento + Lixamento	Grafeno
27	Superacabamento + Lixamento	Grafeno
28	Superacabamento + Lixamento	Grafeno
29	Superacabamento + Lixamento	Grafeno
30	Superacabamento + Lixamento	Grafeno

Fonte: Autora.

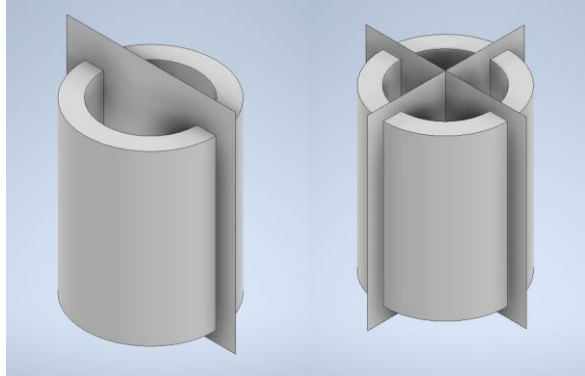
3.2 CORTE E TRATAMENTO

As peças recebidas compreendem um mancal e um pistão e, as superfícies sob análise compreendem a parte interna do mancal e a parte externa do pistão. As superfícies dos mancais são de ferro fundido cinzento e foram finalizadas por processo de brunimento precidor. As superfícies dos pistões foram fabricadas em Fe + 0,5%C por um processo de sinterização e

foram finalizadas por processos de retificação e brunimento superacabamento. Não foram fornecidas informações acerca dos parâmetros utilizados nos processos de fabricação e usinagem.

Devido à geometria das peças adquiridas, as mesmas foram submetidas a cortes para obtenção de superfícies adequadas para análises. Para o mancal (precidor) dois cortes foram realizados, totalizando um total de 4 superfícies para cada peça recebida, conforme exemplificado na Figura 24.

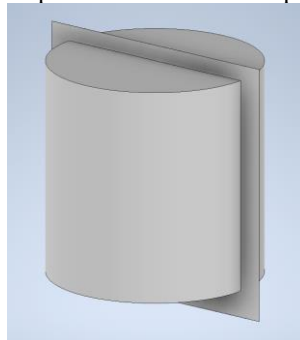
Figura 24- Corte no mancal, dois cortes e 4 superfícies resultantes.



Fonte: Autora.

Para a peça do pistão (superacabamento + lixamento), a melhor configuração encontrada consistia em um único corte da peça, exemplificado na Figura 25, totalizando 2 superfícies para cada peça.

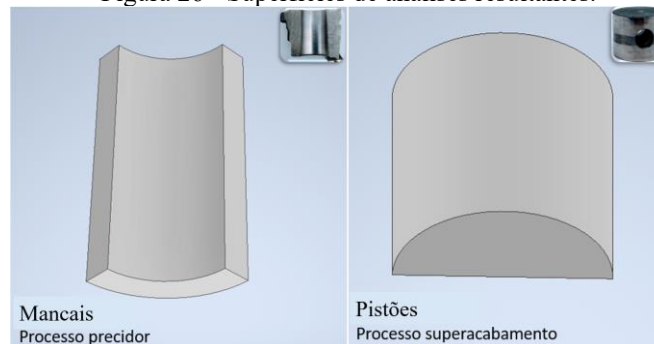
Figura 25 - Corte no pistão. Um corte e 2 superfícies resultantes.



Fonte: Autora.

Os cortes foram realizados em uma máquina serra-fita (marca FRANHO, modelo FM400) com lubrificação apropriada e finalizadas por um processo manual utilizando um arco de serra. Na Figura 26 está apresentada uma ilustração das superfícies de análise resultantes.

Figura 26 - Superfícies de análises resultantes.



Fonte: Autora.

Para realização da análise metalográfica, duas amostras das superfícies foram embutidas, lixadas (de #80 a #1200) e polidas com alumina (3 μm) até obtenção de uma superfície especular. Estas foram caracterizadas via microscópio óptico (MO) e em seguida atacadas quimicamente utilizando Nital 2 % por um período de 10 s, após isso, limpas e caracterizadas novamente via MO para visualização da microestrutura da superfície.

Com o intuito de melhorar a aderência das partículas nas superfícies dos pistões as superfícies foram submetidas a um processo de lixamento, visando modificar alguns parâmetros de rugosidade. Conforme Giacomelli (2020), a superfície apresentou menores taxas de desgaste e COF ao se utilizar a lixa de granulometria #320. Assim, optou-se por utilizar a lixa #320 nos pistões, no sentido transversal da peça, até obtenção de parâmetros similares indicados no trabalho de Giacomelli (2020). A Tabela 3 apresenta os parâmetros referidos anteriormente e seus respectivos valores.

Tabela 3 – Parâmetros de rugosidade para a superfície obtida com lixa #320.

Parâmetros de Rugosidade	Valor
S_q	$0,36 \pm 0,02 \mu\text{m}$
S_{vk}	$0,59 \pm 0,06 \mu\text{m}$
S_{dq}	$0,33 \pm 0,01 \mu\text{m}$

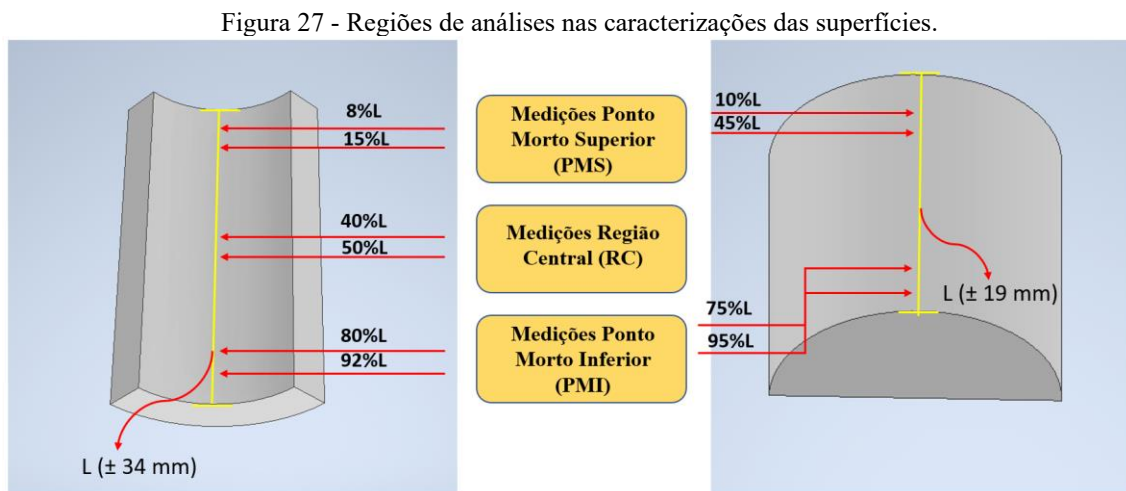
Autor: Adaptado de Giacomelli (2020).

3.3 CARACTERIZAÇÕES DAS SUPERFÍCIES

Com o intuito de analisar a integridade das superfícies antes e após os ensaios tribológicos, caracterizações foram realizadas nas superfícies. A integridade das superfícies

pode variar ao longo da peça e, com objetivo de padronizar os resultados, algumas regiões foram selecionadas e as análises ocorreram sempre nestes locais. As regiões selecionadas estão apresentadas na Figura 27.

Para a superfície do mancal (precidor), tem-se o ponto morto superior (PMS), região central (RC) e ponto morto inferior (PMI). Enquanto que, por questões geométricas, apenas as regiões PMS e PMI foram analisadas no pistão (superacabamento + lixamento). Duas medições foram realizadas em cada região.



A seguir estão listados os equipamentos utilizados nas caracterizações, bem como uma breve descrição destes.

3.3.1 MICROSCÓPIO ÓPTICO (MO)

O microscópio óptico foi utilizado para realizar fotografias da superfície por meio de ampliações pequenas (50x, 100x e 200x) para identificar e medir as texturas da superfície, bem como as características das trilhas dos ensaios tribológicos. As análises ocorreram nos locais indicados previamente. O equipamento utilizado para as medições foi o Microscópio LEICA, DM 4000.

3.3.2 INTERFERÔMETRO ÓPTICO DE LUZ BRANCA

O Interferômetro óptico de luz branca é um equipamento que utiliza a técnica de interferência de feixes de luz para medir a topografia da superfície. Por meio dessa técnica as texturas das superfícies podem ser caracterizadas com precisão nanométrica (KLOCKE, 2011). As medições com o interferômetro de luz branca foram realizadas após MO, buscando medir os níveis de rugosidade, profundidade e modificações das texturas, quantificar os efeitos da lubrificação com particulados e caracterizar as marcas de desgaste após ensaios tribológicos. O equipamento utilizado foi interferômetro óptico de luz branca Zygo Newview 7300. Para caracterização das superfícies utilizou-se uma varredura de 1 mm² de área, com lentes de 20 x e *zoom* de 1 x, realizadas nos locais mencionado anteriormente. As configurações das demais medições estão apresentadas nos tópicos a seguir.

3.3.3 PERFILÔMETRO

O perfilômetro mecânico é um instrumento cuja função consiste em determinar a rugosidade da superfície. A superfície a ser avaliada é percorrida por uma ponta cone-esférica de diamante, que transforma o movimento vertical em um perfil topográfico da superfície. Por ser uma técnica e fácil aplicação, o perfilômetro mecânico é bastante utilizado. Entretanto, esse instrumento possui algumas desvantagens, visto que a precisão de medição da rugosidade pode ser influenciada pela forma da ponta do equipamento e da geometria da superfície. Além disso, o contato da ponta com a superfície pode ocasionar danos na superfície (LEACH, 2011).

O perfilômetro foi utilizado para medição da rugosidade bidimensional nas superfícies. Esse equipamento foi selecionado com o objetivo de comparar com os resultados apresentados pelo interferômetro e garantir uma padronização, visto que a maioria dos processos industriais utilizam esse método.

O equipamento utilizado foi o *Form Talysurf i-Series* da Taylor Hobson, Modelo FTS i-120, com apalpador de diamante, raio de 2 µm, ângulo de conicidade de 90° e velocidade de avanço/escaneamento de 0,5 mm/s.

3.3.4 PROCESSAMENTO SOFTWARE MOUNTAINSMAP

As imagens obtidas via interferometria e perfilometria foram processadas por meio do software *MountainsMap Universal 7.4* da Digital Surf. O software permite a análise, processamento e medições de perfis 2D e superfícies 3D obtidas por diversos instrumentos de medições de superfícies (Digital Surf, 2022).

Para as imagens obtidas via interferometria, o fluxo padrão inicial de processamento de análise consistiu em: (i) nivelamento (método dos mínimos quadrados); (ii) preenchimento dos pontos não mensurados; (iii) filtro Gaussiano de 250 μm de cut-off, para separação da ondulação e da rugosidade; e (iv) obtenção dos parâmetros desejados. Essa sequência foi realizada conforme Giacomelli (2020). Os parâmetros de rugosidade 2D e 3D obtidos de cada superfície estão descritos na seção 3.4.

Para processamento das imagens obtidas por perfilometria, a sequência de análises ocorreu de acordo com a norma ISO 16610-61, sendo elas: (i) remoção de microrugosidades por meio de um filtro de 2,5 μm , (ii) nivelamento (método dos mínimos quadrados), (iii) remoção da forma por meio de um polinômio de grau 2, (iv) filtro padrão gaussiano com cut-off de 0,8 mm, e (v) obtenção dos parâmetros desejados.

3.3.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

O MEV é um equipamento que pode ser utilizado para analisar diversas características da amostra, como por exemplo, topografia da superfície, cristalografia e composição. Esse equipamento permite examinar a amostra em escala nanométrica (nm) (GOLDSTEIN *et al.*, 2003). Com as imagens obtidas via MO e interferômetro, algumas regiões com características expressivas foram selecionadas para análise via MEV, modelo TESCAM VEGA 3. Por meio dessa análise pôde-se verificar com grandes aumentos (de 100 x a 20000 x) a integridade das superfícies, bem como a presença de particulados aderidos as texturas. O equipamento permite obter imagens por meio de elétrons secundários (SE) e elétrons retroespalhados (BSE), além da realização de análise química da amostra.

3.4 PARÂMETROS DE RUGOSIDADE

A seguir, estão apresentados os parâmetros de rugosidade 2D e 3D utilizados no presente trabalho. As descrições de cada parâmetro foram retiradas de várias fontes disponíveis na literatura, sendo elas: ISO 13565-2 (1998), ISO 25178-2 (2012), NBR ISO 4287 (2002), Griffiths (2001), Leach (2013), Stout (2000) e Melentiev *et al.* (2019). Os parâmetros 2D e 3D são convenientemente subdivididos em subáreas com o intuito de fornecer uma caracterização geral destes parâmetros (GRIFFITHS, 2001).

3.4.1 Parâmetros bidimensionais (2D)

Nessa seção serão apresentados os parâmetros bidimensionais utilizados na dissertação.

i. Parâmetros de altura

São parâmetros bidimensionais que consideram simplesmente a altura e a profundidade dos perfis em análise. Um dos métodos para caracterizar os efeitos externos superficiais é análise da rugosidade da superfície. A rugosidade pode ser caracterizada por diversos parâmetros (GRIFFITHS, 2001; ISO 4287:2002).

R_a , rugosidade média da superfície [μm], é utilizado em medições e representa uma média dos picos e vales da superfície partindo de uma linha média.

R_q , média RMS – raiz média quadrática [μm], corresponde a um desvio padrão do perfil em relação a linha média.

R_z , altura máxima do perfil [μm], é a distância vertical do pico mais alto ao vale mais profundo de um dado comprimento experimental. Normalmente são utilizados a média de 5 valores de **R_z** .

R_v , profundidade máxima do vale [μm], corresponde a máxima profundidade medida da linha média central ao vale mais profundo, dentro do perfil analisado.

R_p , altura máxima do pico [μm], corresponde a máxima altura medida da linha média central ao pico mais alto, dentro do perfil analisado.

R_c , altura média dos elementos do perfil [μm], é o valor médio das alturas dos elementos no perfil analisado.

ii. Parâmetros de distribuição de amplitude

Esses parâmetros caracterizam a função de distribuição de amplitude ou curva de área de apoio que descreve sua forma.

R_{sk} , assimetria, é a inclinação da função de distribuição de amplitude.

R_{sk} pode assumir tanto valores positivos quanto negativos. Um perfil de superfície simétrico, em que os picos e os vales estão distribuídos simetricamente em relação a linha central apresenta valor de assimetria igual a zero. Esse parâmetro é fortemente influenciado pelo processo de manufatura. Superfícies processadas por processos como retificação, brunimento e fresamento possuem valores de assimetria negativos. Enquanto que, superfícies obtidas por processos como torneamento, EDM (usinagem por eletroerosão) e jateamento, possuem valores de assimetria positivos.

R_{ku} , curtose, corresponde a um fator de achatamento do perfil avaliado, representando uma homogeneidade da altura dos picos e profundidade dos vales.

Uma superfície gaussiana, distribuída simetricamente, possui valor da curtose igual a 3. Se um perfil possuir altos valores de picos ou vales, o valor da curtose será maior que 3. Enquanto que, para perfis com baixos valores de picos e vales, o valor da curtose será menor que 3.

R_{mr} , taxa de material relativa %, é a razão portante determinada em uma seção do perfil, determinada pela diferença de altura entre o nível da altura de referência e o nível da altura da seção do perfil.

Além dos parâmetros de rugosidade apresentados, uma família de parâmetros R_k foi desenvolvida para caracterizar a rugosidade da superfície, suas configurações englobam uma análise do perfil de rugosidade excluindo os valores dos picos salientes e dos vales profundos, conforme apresentado na Figura 28, (ISO 13565-2, 1998; GRIFFITHS, 2001).

R_k , profundidade de rugosidade do núcleo [μm], representa a profundidade do perfil na região de rugosidade central.

R_{pk} , rugosidade do pico reduzido [μm], é a altura média dos picos salientes acima da região de rugosidade central.

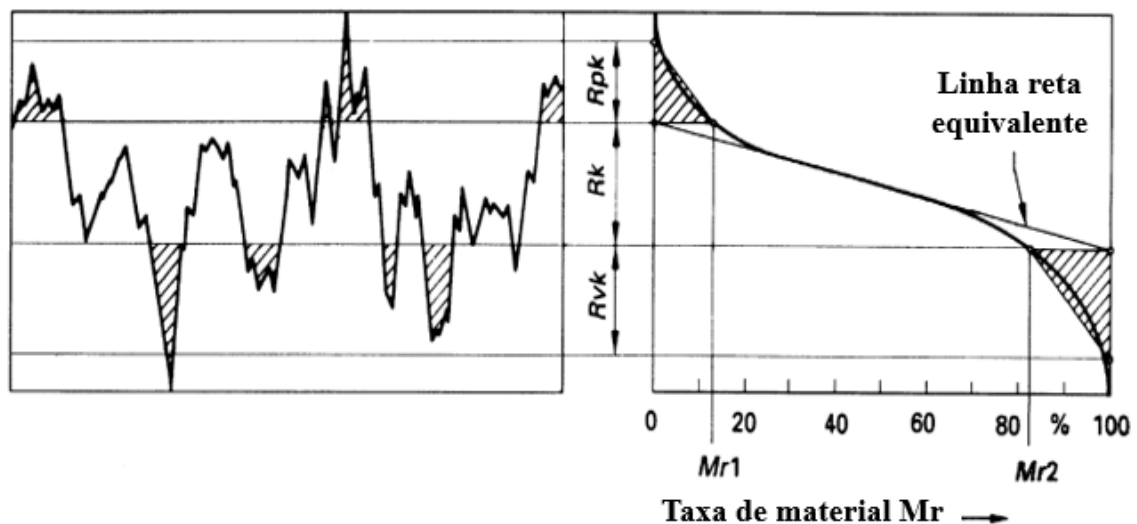
Esse parâmetro representa a região que será rapidamente desgastada em uma interação com outra superfície.

R_{vk} , rugosidade do vale reduzido [μm], é a profundidade média dos vales abaixo da região de rugosidade central.

Esse parâmetro permite analisar a capacidade de retenção de óleo de uma superfície.

A curva de Abbott é gerada a partir dos perfis das superfícies e corresponde a uma descrição da proporção de material da superfície. A taxa de material M_{r1} [%], Figura 28, corresponde a proporção de material na região dos picos acima do perfil de rugosidade central, enquanto que M_{r2} [%] corresponde a proporção de material na região dos vales abaixo do perfil central (ISO 13565-2, 1998; GRIFFITHS, 2001).

Figura 28: Parâmetros R_k de rugosidade e curva de Abbott.



Fonte: (ISO 13565-2, 1998).

3.4.2 Parâmetros 3D

As análises bidimensionais possuem limitações em expressar os desgastes sofridos pelas superfícies e métodos de análises tridimensionais permitem obter essas características de maneira mais detalhadas. Os parâmetros tridimensionais mais utilizados são S_a , S_q , S_{sk} , S_{ku} e

S_z , denominado parâmetros de campo, e são definidos a partir de todos os pontos de uma superfície com escala limitada. Alguns parâmetros possuem semelhanças com os parâmetros bidimensionais.

i. Parâmetros de altura (ISO 25178-2:2012)

S_q , raiz da altura média quadrática, valor da raiz da altura média quadrática de uma superfície com escala limitada com uma área definida A.

S_a , altura média aritmética, média aritmética dos valores ordinários absolutos em uma definição de área A.

S_{sk} , assimetria, quociente do valor médio do cubo dos valores das ordenadas e do cubo de S_q dentro de uma área de definição A.

S_{ku} , curtose, quociente do valor quártico médio dos valores das ordenadas e a quarta potência do quadrado dentro de uma área de definição A.

Assim, semelhante ao discutido para o parâmetro 2D, a assimetria (S_{sk}) representa o grau de simetria dos picos e vales em relação a linha média. O parâmetro S_{sk} pode apresentar valores positivos, negativos ou zero, e por meio desse parâmetro é possível analisar, por exemplo, o suporte de carga e porosidade da superfície. Para superfícies simétricas, como a descrita pela distribuição gaussiana, o grau de assimetria corresponde a zero. Valores positivos de S_{sk} descrevem uma quantidade dominante de picos e valores negativos revelam uma tendência de dominância dos vales. Além disso, valores negativos de S_{sk} caracterizam uma boa superfície de rolamento, devido a pouca quantidade de picos e boa profundidade dos vales, o que permite a retenção de lubrificantes (ISO 25178-2:2012; LEACH, 2013)

O parâmetro Curtose (S_{ku}) determina a distribuição de altura da superfície, relacionando a homogeneidade da altura dos picos e profundidade dos vales. Um exemplo de superfície distribuída homogeneamente é a superfície gaussiana, que apresenta valor de curtose igual a 3. Os demais valores de curtose são relacionados com a superfície gaussiana, para valores maiores que 3, a superfície é caracterizada por uma maior quantidade de picos e vales protusos, e para valores inferiores a 3, a ausência de picos e vales protusos é observada, resultando em picos e vales achatados (ISO 25178-2:2012; LEACH, 2013; SOUZA, 2016).

S_p , altura máxima dos picos, maior valor de altura de pico em uma área de definição A.

S_v , altura máxima dos vales, maior valor de profundidade de vale em uma área de definição A.

S_z , altura máxima, soma do valor da altura máxima do pico e do valor da profundidade máxima do vale em uma área de definição A.

Os parâmetros S_p e S_v são representados positivos para o pico e negativo para o vale por corresponder a uma análise em relação ao plano central. Estes são fortemente influenciados por picos e vales isolados e devem ser utilizados com cautela. Em contrapartida, esses valores podem exemplificar situações extremas indesejadas, como a presença de rebarbas na superfície. S_z corresponde a soma dos módulos dos valores de S_p e S_v (ISO 25178-2:2012; LEACH, 2013; SOUZA, 2016).

ii. Parâmetros Espaciais (STOUT, 2000).

S_{al} , comprimento de autocorrelação, distância horizontal de $f_{ACF}(t_x, t_y)$ no qual tem um decaimento mais rápido para um valor especificado de s , com $0 \leq s \leq 1$.

O valor de S_{al} é medido em uma direção perpendicular à camada da superfície para os casos de superfícies anisotrópicas. Valores de S_{al} pequenos revelam uma superfície com textura de alta frequência. Enquanto que maiores valores de S_{al} indicam uma superfície com baixa frequência de textura ou comprimento de onda longo (STOUT, 2000).

S_{tr} , proporção da textura, razão da distância horizontal do $f_{ACF}(t_x, t_y)$ que tem o decaimento mais rápido para um valor especificado de s para a distância horizontal do de $f_{ACF}(t_x, t_y)$ que tem o decaimento mais lento para s , com $0 \leq s \leq 1$.

Esse parâmetro identifica a padronização e direcionalidade da textura da superfície. Os valores de S_{tr} comumente variam entre 0 e 1. Este parâmetro permite uma avaliação da isotropia da textura da superfície. Superfícies isotrópicas possuem valores próximo a 1, enquanto que, superfícies anisotrópicas possuem valores próximos a 0, indicando uma alta direcionalidade. Para superfícies retificadas, torneadas e brunidas, por exemplo, os valores de S_{tr} são geralmente menores que 0,3. Para superfícies usinadas por EDM (eletroerosão), por

exemplo, os valores de S_{tr} são geralmente maiores que 0,5 (STOUT, 2000; LEACH, 2013; GRIFFITHS, 2001).

S_{ds} , densidade de topo, corresponde ao número de topos por unidade de área da amostra.

iii. Parâmetros Híbridos (ISO 25178-2:2012).

S_{dq} , gradiente médio quadrático, raiz quadrada média do gradiente de superfície dentro da área de definição A de uma superfície limitada por escala.

É um parâmetro adimensional e, permite avaliar a superfície para aplicações de vedação e a estética da mesma. Para superfícies fresadas, retificadas e brunidas este parâmetro é tipicamente abaixo de 20° (ISO 25178-2:2012; LEACH, 2013; Melentiev *et al.*, 2019).

S_{dr} , razão de área interfacial, razão do incremento da área interfacial da superfície limitada em escala dentro da área de definição A sobre a área de definição.

Podem ser representados por valores positivos sem unidade ou por porcentagem. Esse parâmetro reflete a área de superfície adicional em relação a um plano gerado pela textura. Superfícies perfeitamente planas e lisas possuem valores de S_{dr} iguais a 0 % (ISO 25178-2:2012; LEACH, 2013; Melentiev *et al.*, 2019).

S_{sc} , curvatura média do topo, corresponde à média das curvaturas dos picos principais dentro de uma área de amostragem.

Varia conforme a quantidade de picos e o critério de identificação de pico definido. Comparando duas superfícies usinadas por microjateamento, os valores de S_{sc} é duas vezes maior quando se utiliza partículas com tamanho de 280 μm em relação a partículas de 5 μm (STOUT, 2000; GRIFFITHS, 2001; Melentiev *et al.*, 2019).

iii. Funções e parâmetros relacionados (ISO 25178-2:2012).

S_k , altura do núcleo, distância entre nível mais alto e mais baixo da superfície do núcleo.

S_{pk} , altura reduzida dos picos, altura média dos picos saliente acima do núcleo da superfície.

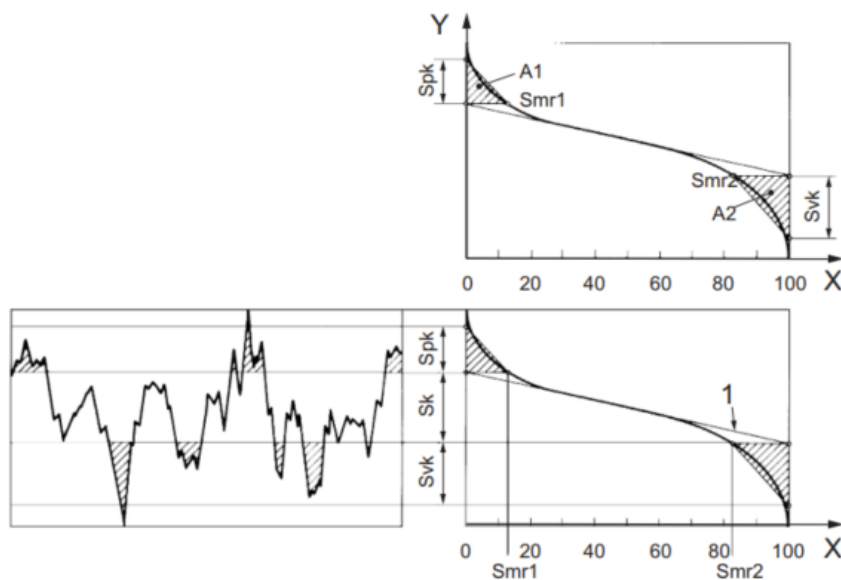
S_{vk} , altura reduzida dos vales, altura média dos vales salientes abaixo do núcleo da superfície.

S_{mr1} , proporção de material, razão da área do material na linha de interseção que separa os picos salientes da superfície do núcleo da área de avaliação.

S_{mr2} , proporção de material, razão da área do material na linha de interseção que separa os vales profundos da superfície do núcleo da área de avaliação.

Similarmente ao que foi apresentado para a curva de Abbott nos parâmetros bidimensionais, a representação da curva de Abbott para a família S_k tridimensional é apresentada na Figura 29, (ISO 25178-2:2012; LEACH, 2013; GRIFFITHS, 2001).

Figura 29 - Parâmetros S_k de rugosidade e curva de Abbott.



Fonte: (GRIFFITHS, 2001).

iv. Parâmetros diversos (STOUT, 2000).

S_{td} , direção da textura, ângulo com respeito a direção específica θ , do valor máximo absoluto do espectro angular.

Esse parâmetro define a inclinação preferencial da textura com relação ao eixo y . Para superfícies com textura perpendicular ao eixo y o valor de S_{td} é 0° (STOUT, 2000).

S_{ci} , índice de retenção de fluido central, corresponde ao desvio médio quadrático da taxa de volume vazio por unidade de área unitária na região do núcleo da superfície.

Por meio deste parâmetro é possível avaliar a capacidade de retenção do fluido na zona central. Esse parâmetro é adimensional. Superfícies gaussianas apresentam valores próximos a 1,56. Conforme o desgaste de uma superfície aumenta, o valor do parâmetro diminui (STOUT, 2000; GRIFFITHS, 2001).

3.5 ETAPA DE DEPOSIÇÃO

Conforme descrito anteriormente, as partículas utilizadas neste trabalho foram: CDC derivado de carbetto de boro (B_4C) e de cromo (Cr_3C_2), grafeno funcionalizado com amônia e grafite cristalino. A Tabela 4 apresenta as principais características das partículas e os respectivos fornecedores.

Tabela 4 – Descrição das partículas utilizadas.

Partículas	Tamanho das partículas	Forma	Fornecedor
CDC	$D_m^* = 1,66 \mu m$	Irregular	LABMAT - UFSC
Grafeno funcionalizado com amônia	$D_m = 1,99 \mu m$ Espessura máxima = 50 nm	Placas	Graphene Laboratories Inc. (Graphene Supermarket)
Grafite cristalino	$D_m = 1,10 \mu m$	Placas	Nacional de grafite

* D_m = diâmetro médio.

Fonte: Autora.

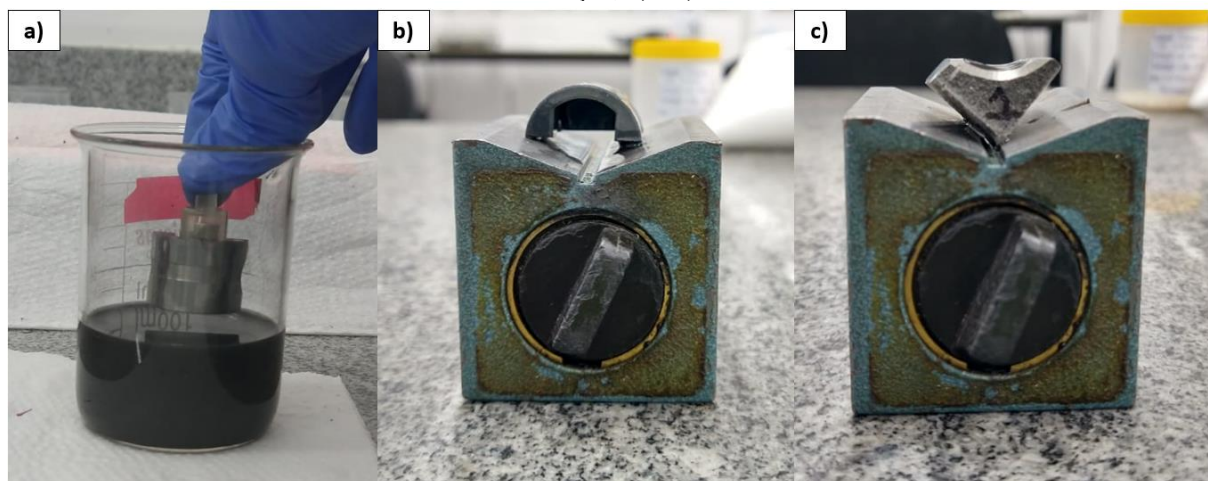
Para deposição nas superfícies, as partículas foram dispersas em solução de Álcool isopropílico P.A, em proporções mássicas de 0,05 % (para os mancais) e 0,5 % (pistões). A quantidade superior de partículas utilizadas nos pistões ocorreu devido às características destas

superfícies, tais como geometria e baixa rugosidade, o que dificultou a adesão das partículas nas mesmas.

Após isso, as soluções foram submetidas a um processo de sonicação para dispersão das partículas e assegurar uma distribuição homogênea durante a aplicação. O equipamento utilizado consistiu de uma ponteira ultrassônica (marca MISONIX e modelo S-4000) e o processo foi realizado por um total de 2 minutos, com intervalos de 30 segundos a cada 30 segundos. Antes das aplicações, as superfícies foram limpas com acetona em ultrassom por 20 minutos e secas com ar quente.

Os lubrificantes foram depositados na superfície por meio da técnica de *Dip-coating*. Essa técnica consiste em submergir a peça na solução de interesse e pode ser repetida até a obtenção da quantidade de deposição desejada (EFE *et al.*, 2021). Para a superfície dos mancais e pistão, 5 aplicações foram efetuadas com intervalos de 4 minutos entre as aplicações para secagem completa das superfícies. A secagem ocorreu em uma superfície niveladora de forma que a solução atingisse a superfície de forma completa ao longo do comprimento. Uma representação do processo de deposição e a superfície niveladora utilizada para secagem é apresentada na Figura 30.

Figura 30 – Método de deposição das partículas na superfície, em a), e superfície niveladora para secagem da solução, b) e c).



Fonte: Autora.

A quantificação das partículas depositadas nas superfícies foi realizada de acordo com o método proposto por Giacomelli (2020). Esse método consiste em uma análise para obtenção dos dados das superfícies e posteriormente, esses dados são analisados via software

MountainsMap 7.4, seguindo uma sequência descrita pelo autor. Cada medição foi realizada com uma área de 0,25 mm² (0,5 x 0,5 mm), com lente objetiva de 20x e *zoom* de 1x, com resolução lateral de 0,552 µm. As superfícies foram analisadas nas regiões PMS, RC e PMI, além disso, duas aferições foram efetuadas em cada região.

Após a obtenção dos dados, a sequência de tratamentos realizadas no software foram: (i) nivelamento por plano dos mínimos quadrados, (ii) limiar por proporção do material analisado entre 0,01 % e 99,5 %, (iii) preenchimento dos pontos não mensurados e (iv) uso da ferramenta “Volume de ilhas”. Além disso, a ferramenta “fatias” também foi utilizada por apresentar valores em porcentagens. Para utilizar ambas as ferramentas, é necessário definir uma altura limítrofe, em que acima desse ponto apenas os aglomerados possam ser identificados. Essa altura é obtida de forma visual, realizada caso a caso.

3.6 ENSAIOS TRIBOLÓGICOS

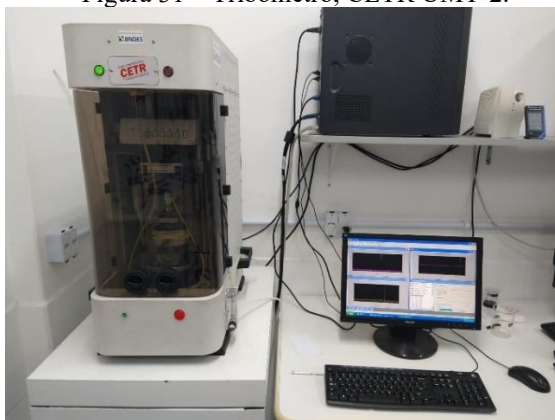
Os ensaios tribológicos realizados no presente trabalho consiste em: Ensaio de Carga Variável, ou durabilidade, e Ensaio de Carga Constante. Uma breve descrição dos ensaios será apresentada nessa seção.

3.6.1 ENSAIO DE CARGA VARIÁVEL (DURABILIDADE)

O ensaio de carga variável para determinação da durabilidade da camada do lubrificante foi demonstrado pelos autores Mello e Binder (2006). Nesse ensaio, por meio da aplicação incremental de uma carga normal em incrementos de intervalo de tempos constantes, a durabilidade da superfície do filme fino e do lubrificante sólido pode ser determinada.

Os ensaios tribológicos foram realizados em um tribômetro CETR UMT-2 disponível no laboratório de materiais da UFSC, apresentado na Figura 31. A carga inicial aplicada foi de 7 N, com incremento de 7 N a cada 10 minutos de deslizamento (12 metros). O movimento alternativo foi realizado com frequência de 2 Hz e comprimento da pista de 5 mm até atingir o valor de 0,2 para o COF. Esse limite foi proposto pelos autores Mello e Binder (2006) para materiais autolubrificantes sólidos. O contra corpo utilizado foi uma esfera de 10 mm de diâmetro de aço SAE52100. O ensaio foi realizado em ar ambiente com temperatura de 23 °C e umidade relativa entre 40 e 50 %.

Figura 31 – Tribômetro, CETR UMT-2.



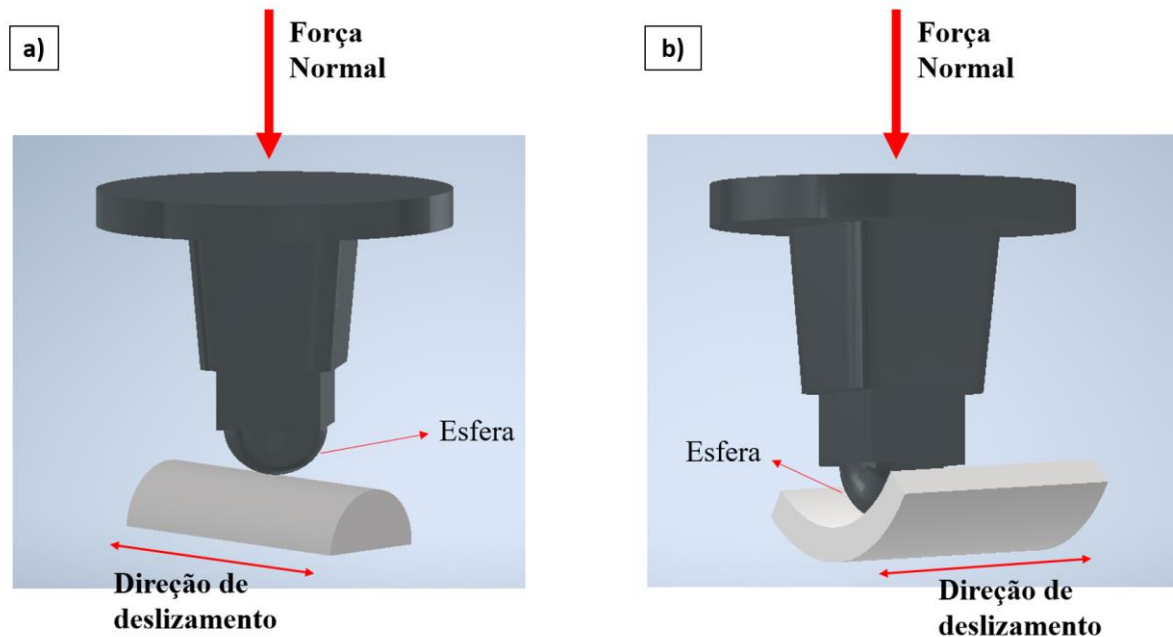
Fonte: Autora.

3.6.2 ENSAIO DE CARGA CONSTANTE

O método de aplicação desse ensaio consiste no emprego de uma esfera sob carga constante deslizando contra uma superfície durante um determinado período de tempo. Esse ensaio gera uma marca de desgaste sobre as superfícies, que são posteriormente analisadas para análise dos efeitos do lubrificante. Durante o deslizamento, é possível obter informações acerca do coeficiente de atrito e as taxas de desgaste podem ser posteriormente averiguadas para comparar os possíveis efeitos da utilização do lubrificante com partículas sólidas (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Assim como nos ensaios de carga variável, foi utilizado um tribômetro CETR UMT-2. A carga aplicada foi de 7 N, com frequência de deslizamento de 2 Hz, comprimento da pista de 5 mm e duração de 60 minutos. O contra corpo utilizado foi uma esfera de 10 mm de diâmetro de aço SAE52100. O ensaio foi realizado em ar ambiente com temperatura de 23 °C e umidade relativa entre 40 e 50 %. Uma ilustração de ambos os ensaios é apresentada na Figura 32.

Figura 32 - Ilustração do ensaio tribológico em (a) para os pistões e em (b) para os mancais.



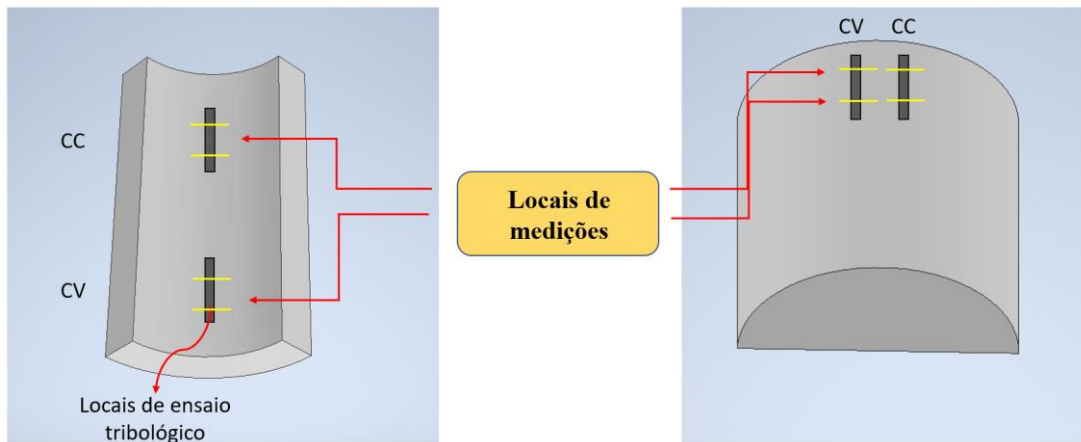
Fonte: Autora.

3.7 CARACTERIZAÇÕES DAS SUPERFÍCIES DESGASTADA

Após os ensaios tribológicos, as amostras foram lavadas com álcool isopropílico em ultrassom por 20 minutos e secas em ar quente para remoção dos debrís na região de desgaste. Sequencialmente, as superfícies desgastadas foram caracterizadas para avaliações das alterações de integridade e textura das superfícies. Os equipamentos foram os mesmos utilizados na seção 3.5, entretanto, algumas alterações foram realizadas e estão descritas a seguir.

As caracterizações ocorreram em dois locais (nas faixas de desgaste) para cada um dos ensaios realizados nas superfícies (carga constante – CC e carga variada – CV), resultando em um total de 4 medições por superfície, conforme descrito na Figura 33.

Figura 33 – Locais de medição para caracterização das faixas de desgaste.



Fonte: Autora.

Para a análise de interferometria óptica, a avaliação da região desgastada ocorreu baseada na metodologia apresentada em Giacomelli (2020), em que foi possível obter o volume de desgaste nos corpos de prova. Duas análises por região de desgaste foram obtidas, com lentes de 20 x e redução de 0,5 x. Devido à geometria das peças sob estudo possuir certa concavidade, não foi possível manter o foco em toda a seção transversal da peça. Assim, o comprimento de cada fatia foi inferior ao realizado por Giacomelli (2020), obtendo uma área igual a 2 mm x 0,5 mm.

Após a coleta dos dados, estes foram processados no *software MountainsMap 7.4* seguindo a seguinte sequência: (i) nivelamento por plano dos mínimos quadrados, (ii) limiar 99,99 % e 0,01 % para remoção de pontos espúrios, (iii) preenchimento de pontos não mensurados, (iv) conversão para série de perfis perpendiculares ao deslizamento e geração do perfil médio da pista, (v) nivelamento do perfil médio utilizando somente os pontos fora da marca de desgaste e (vi) análise da área abaixo ou acima da linha média (Giacomelli, 2020). Para medições do volume desgastado total do corpo de prova a Equação 6 foi utilizada.

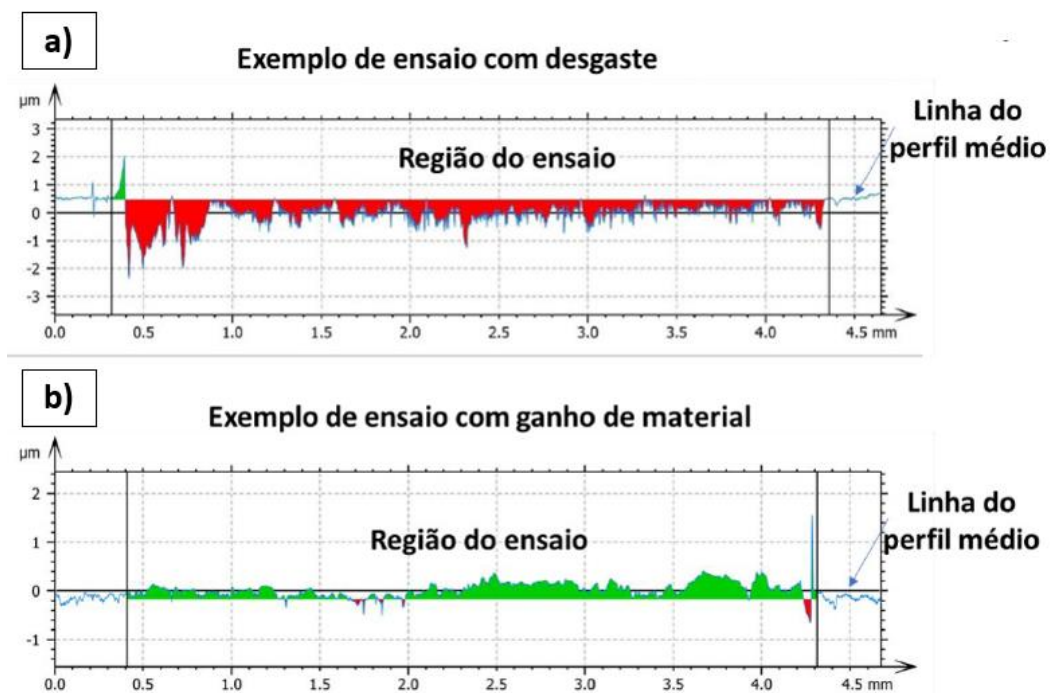
$$V_{\text{Corpo de prova}} = \frac{(A_1 + A_2)}{2} C \quad \text{Equação 6}$$

sendo A_1 e A_2 correspondente as áreas das duas fatias obtidas em cada faixa de desgaste (locais de medição indicado em Figura 33) e C (5 mm) o comprimento total da pista desgastada. Essa equação foi adaptada de Giacomelli (2020).

As fatias obtidas podem apresentar valores positivos ou negativos de acordo com a característica da pista. Para regiões em que ocorreram o desgaste com perda de material,

conforme Figura 34(a), o valor da área foi considerado positivo. Para regiões em que ocorreram um ganho de material, devido ao acúmulo de material na região, o valor da área foi considerado negativo, ver Figura 34(b). Vale salientar que a adição de material não implica que a amostra não tenha sofrido nenhum dano ou perda de material, apenas que material acumulado na região se sobressaiu em relação a perda de material (GIACOMELLI, 2020). Com base na metodologia apresentada foram realizados os ensaios tribológicos e análises que serão apresentadas em resultados e discussões a seguir.

Figura 34 – Exemplo do perfil médio 2D com desgaste (a) e com acúmulo de material (b).



Fonte: Adaptado de Giacomelli (2020).

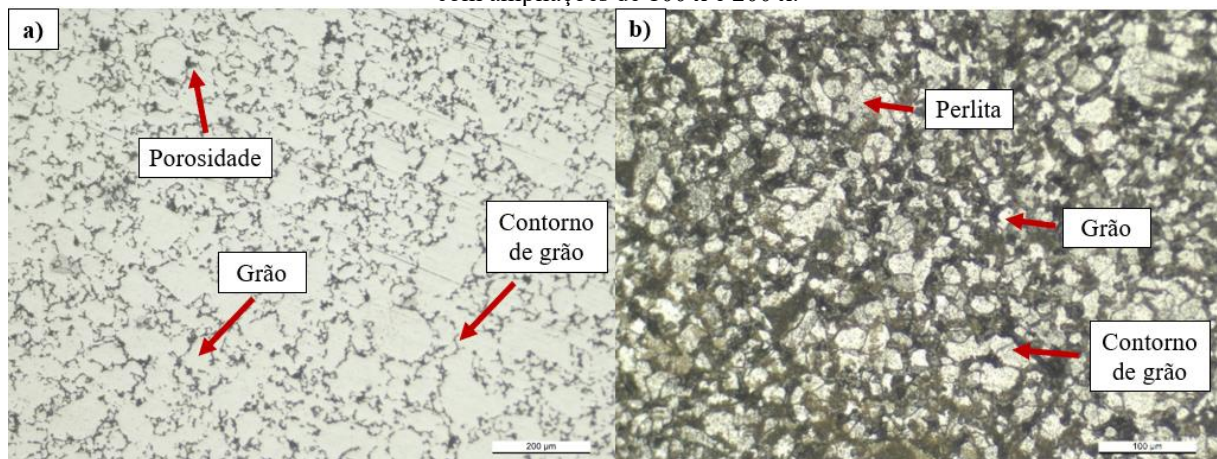
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção, são apresentados os resultados das caracterizações antes e após os ensaios tribológicos obtidos por meio de microscópio óptico (MO), microscópio eletrônico de varredura (MEV), perfilômetro e interferômetro óptico de luz branca.

4.1 PROPRIEDADE DAS PEÇAS

Na Figura 35, é apresentada a microestrutura do material do pistão, sendo que o material é de Fe + 0,5%C sinterizado. Em a), região antes do ataque químico, é possível observar a região de contorno de grão, grão e porosidade. Na região atacada quimicamente, em b), pode se observar os grãos, os contornos de grão e região com perlita na microestrutura. Esses resultados estão similares ao encontrado na literatura (WERMUTH *et al.*, 2021; ZHANG e Yuan, 2018; BENDO *et al.*, 2020).

Figura 35 – Superfície do pistão caracterizada por MO antes (a) e após ataque químico (b), respectivamente, com ampliações de 100 x e 200 x.

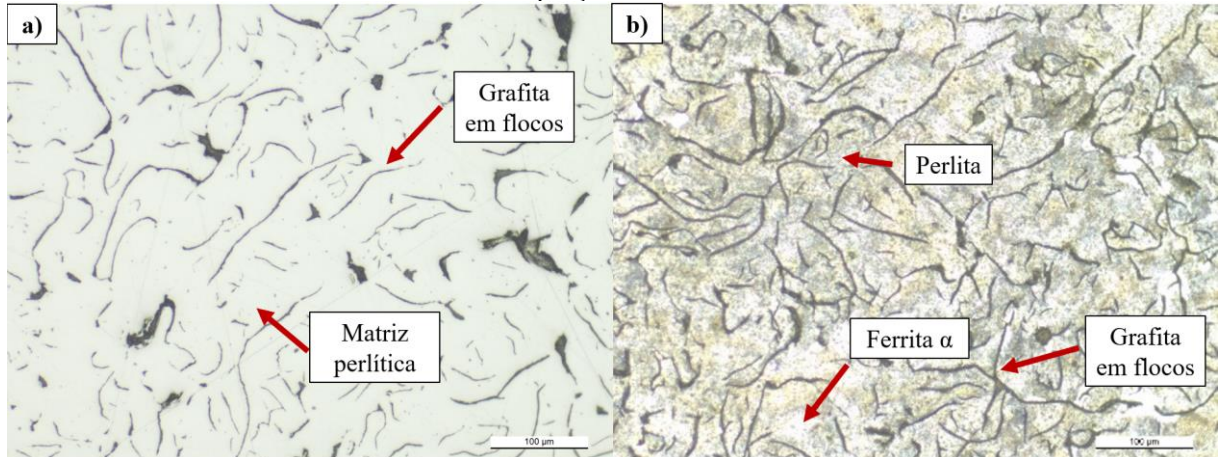


Fonte: Autora.

Na Figura 36, a microestrutura do mancal está apresentada, o material é o ferro fundido cinzento. Em a) está apresentada a superfície antes do ataque químico e em b) a superfície atacada quimicamente. Pode-se observar os flocos de grafita no material em matriz predominantemente perlítica, que é melhor visualizada em b). A análise seguindo a norma ISO-945 permitiu avaliar o material por meio da caracterização do tipo de grafita e da matriz do material, resultando em uma matriz perlítica IA, conforme apresentado na Tabela 5. Os

resultados visualizados aqui estão similares ao encontrado na literatura (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2016; WEITAO *et al.*, 2022; XAVIER, 2009).

Figura 36 - Superfície do mancal caracterizada por MO antes e após ataque químico, respectivamente, com ampliações de 200 x.



Fonte: Autora.

Tabela 5 – Caracterização da grafita e matriz do ferro fundido cinzento segundo norma ISO 945.

Material	Tipo
Ferro Fundido Cinzento	Matriz Perlítica ISO-945-IA

Fonte: * (DAWSON; SCHROEDER, 2000).

4.2 ANÁLISES DAS SUPERFÍCIES

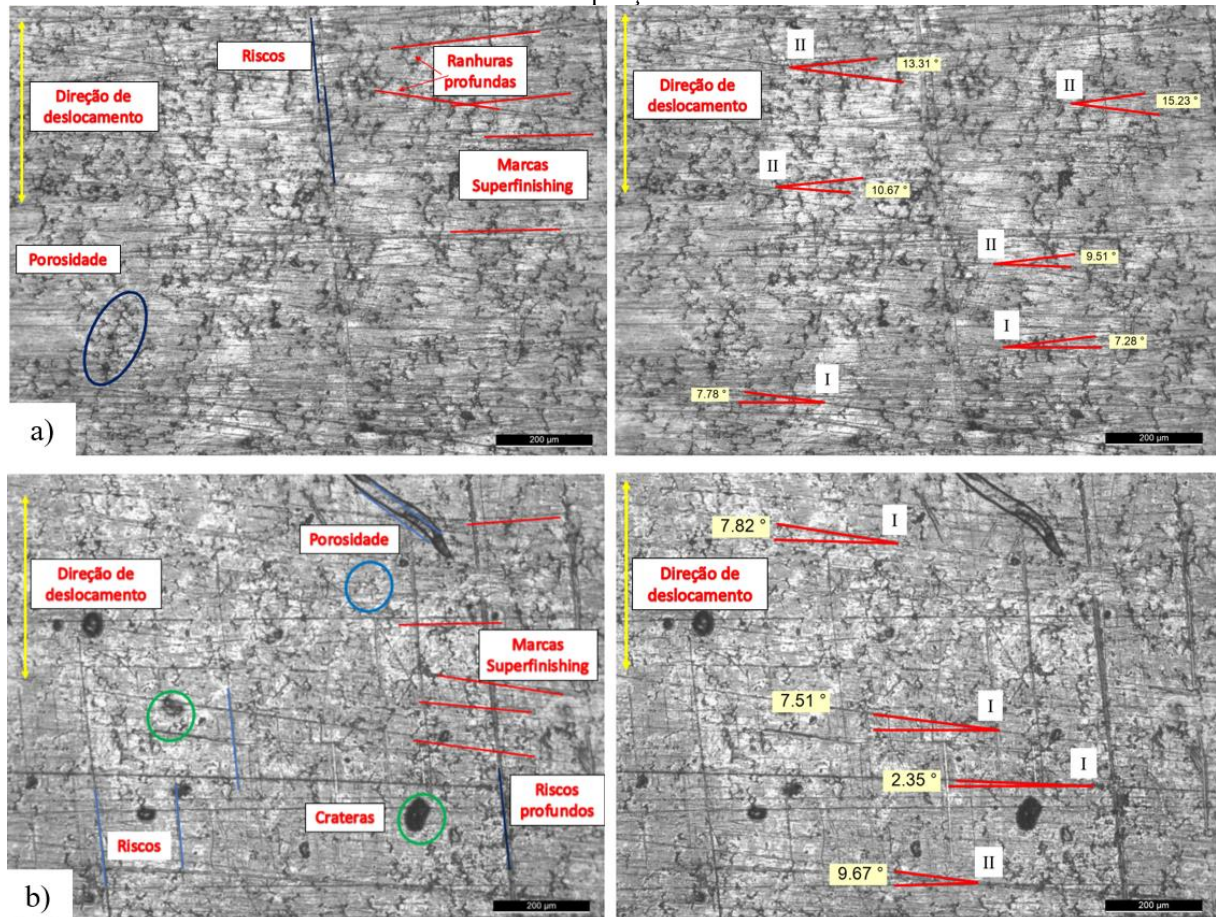
As análises das superfícies foram realizadas observando a integridade e a topografia. Para avaliação da integridade das superfícies, os resultados obtidos via MO e MEV foram analisados, enquanto que, para avaliação da topografia, os resultados obtidos via perfilômetro e interferômetro foram discutidos.

4.2.1 Integridade da superfície

As primeiras análises são referentes aos resultados com o pistão no MO, antes do processo de lixamento, para as regiões, PMS e PMI, conforme Figura 37. Observa-se que não existe uma textura uniforme ao longo de toda a peça, com ranhuras com diversas angulações, e devido a isso, é possível supor que ocorrerá uma distribuição não uniforme do lubrificante e uma instabilidade do filme lubrificante. Conseqüentemente, durante o deslizamento ao longo

da peça, o contra corpo encontrará diferentes condições topográficas e tribológicas no seu curso de movimentação devido a essa não uniformidade. Assim, tais condições podem resultar em instabilidades e regiões com maiores pressões de contato, alterando o resultado tribológico.

Figura 37 – Superfície de um pistão nas regiões PMS em a) e PMI em b), obtidas via MO com 100 x de ampliação.



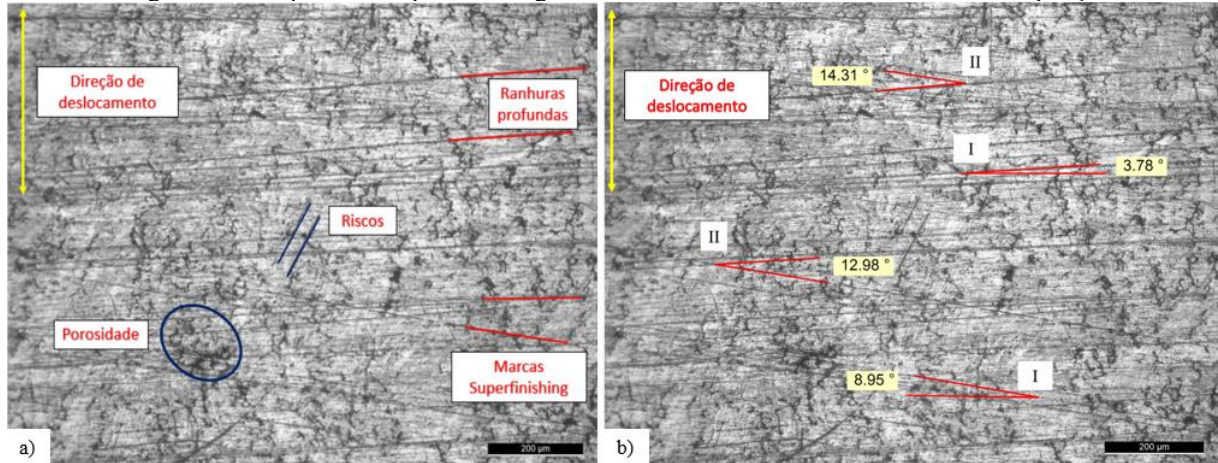
Fonte: Autora.

Ao realizar uma análise detalhada na região PMS, outras características podem ser observadas. Na Figura 38 (a), estão demarcadas as principais características das superfícies comuns aos pistões em análise. As linhas em vermelho correspondem ao processo de superacabamento no qual as superfícies foram submetidas anteriormente. Nesta mesma figura, pode-se observar que as ranhuras possuem inclinações e profundidades variadas, denotadas por “ranhuras profundas” as marcas com maior profundidade visual. Observa-se a existência de porosidade ao longo do pistão, oriundas do processo de sinterização do material.

A relação dos ângulos dos processos de usinagem é apresentada na Figura 38 (b), mesma região apresentada em (a). Os ângulos foram medidos de duas maneiras, a primeira (I)

em relação a uma linha perpendicular a direção de deslizamento e a segunda (II) considerando o ângulo entre duas ranhuras que se cruzam. Os ângulos medidos possuem valores baixos de inclinação e valores de inclinação entre ranhuras próximos a 13° .

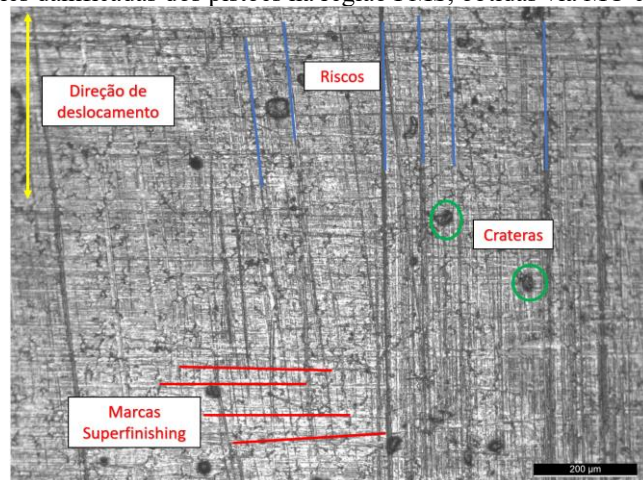
Figura 38 – Superfície do pistão na região de PMS obtidas via MO com 100 x de ampliação.



Fonte: Autora.

Na Figura 39, é apresentada uma superfície com maior número de defeitos, com um número elevado de riscos na superfície na direção de deslocamento (deslizamento da superfície de usinagem), bem como um alto número de crateras ao longo da superfície. Observa-se que a quantidade de riscos é tão elevada que as ranhuras do processo de acabamento estão cobertas. Dentre os pistões utilizados, um número considerado apresenta algum defeito relevante oriundo do processo de usinagem, como os riscos na direção de deslizamento ou crateras profundas, e que mostram a instabilidade do processo de usinagem.

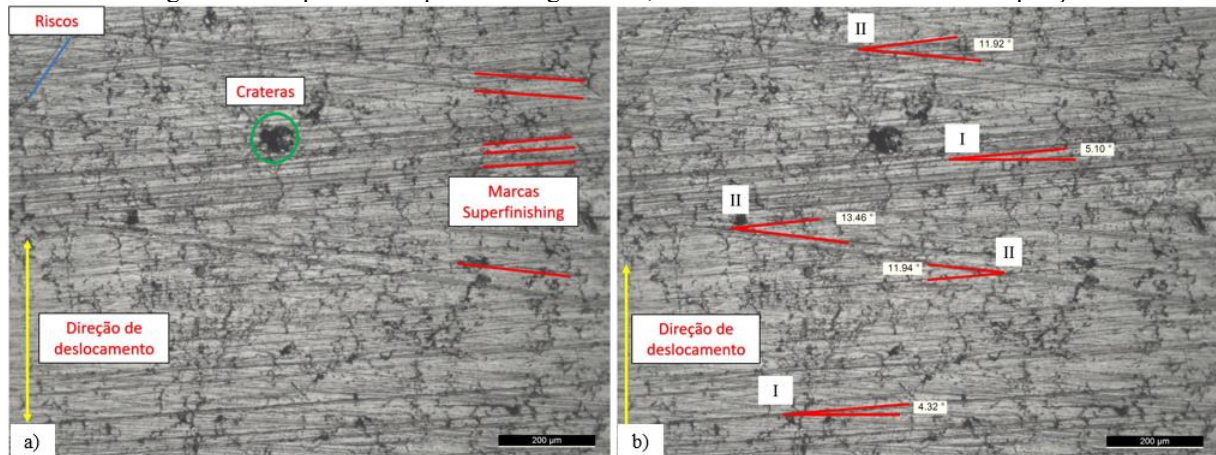
Figura 39 – Superfícies danificadas dos pistões na região PMS, obtidas via MO com 100 x de ampliação.



Fonte: Autora.

As superfícies dos pistões na região PMI apresentam características semelhantes ao que foi discutido para a região PMS, ver Figura 40. Outra característica que pode ser observada corresponde a concentração de ranhuras numa mesma região, com baixo espaçamento e baixa inclinação. Esse fenômeno pode ocorrer, por exemplo, no momento de reversão do movimento axial (a ferramenta de corte parou a movimentação vertical, mas continuou rotacionando ou foi utilizado uma redução da velocidade de avanço vertical) ou havia uma aglomeração de abrasivos em uma parte da ferramenta. Na Figura 40b, verifica-se que as regiões PMS e PMI possuem valores de inclinação semelhantes.

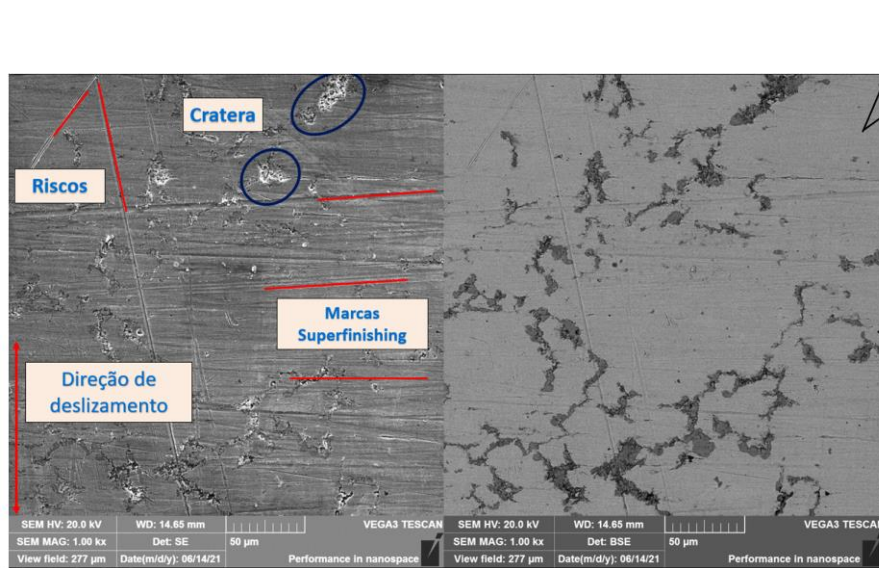
Figura 40 – Superfície do pistão na região PMI, obtidas via MO com 100 x de ampliação.



Fonte: Autora.

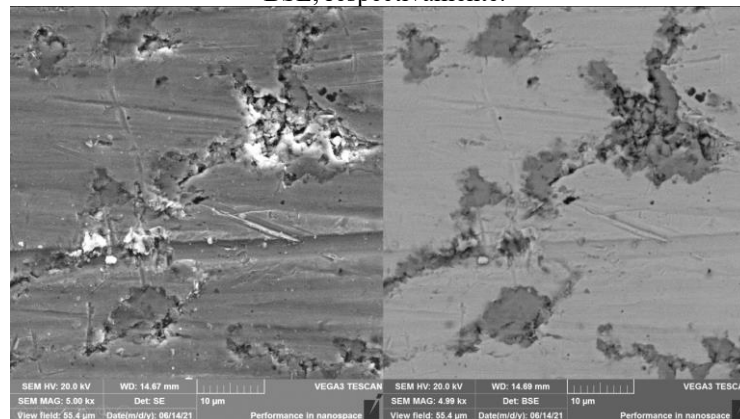
Após as análises no MO, os pistões foram caracterizados via MEV para obtenção de maiores ampliações e comparação dos resultados. Na Figura 41 verifica-se as mesmas características visualizadas no MO. Nessa região nota-se que os riscos apresentam profundidade maiores que algumas ranhuras do processo de usinagem, o que também pode ser confirmado analisando a imagem em BSE. Além disso, observa-se uma quantidade considerável de crateras nessa região. A ampliação de uma cratera é mostrada na Figura 42. Na figura em BSE, observa-se que a região de coloração clara corresponde à superfície plana do material, enquanto que as regiões em escuro, de tamanho menor, aparentam ser uma região “amassada”, correspondendo à cratera avaliada.

Figura 41 – Superfície do pistão na região PMS obtidas via MEV com ampliação de 1000 x nas condições SE e BSE, respectivamente.



Fonte: Autora.

Figura 42 – Cratera observada na região PMS obtidas via MEV com ampliação de 5000 x nas condições SE e BSE, respectivamente.

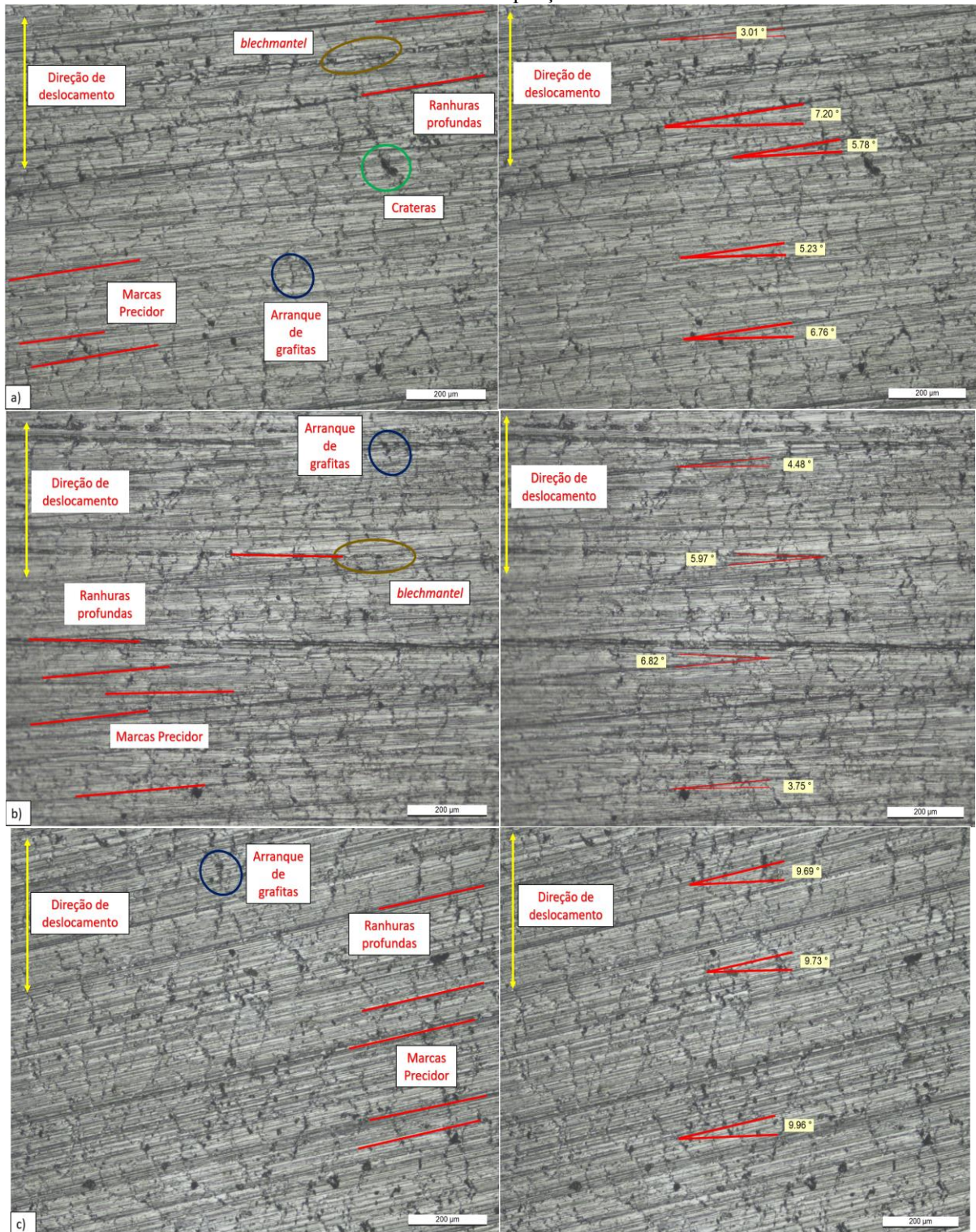


Fonte: Autora.

Com relação às superfícies dos mancais, a fim de verificar as variações ao longo da superfície, as três regiões (PMS - ponto morto superior, RC - região central e PMI - ponto morto inferior) para um mesmo mancal foram apresentadas sequencialmente na Figura 43. Pode-se observar uma variação das ranhuras ao longo do mancal, onde as regiões PMS e PMI apresentam angulações maiores, sendo esta última ligeiramente maior e mais definida, e a RC caracterizada por ranhuras perpendiculares a direção de deslizamento. Nesse sentido, durante o deslizamento o contra corpo encontrará diferentes condições topográficas e tribológicas, podendo gerar instabilidade nos filmes lubrificantes e uma distribuição não-uniforme, conforme

visto para as superfícies dos pistões. Uma análise detalhada dessas características em cada região foi discutida a seguir.

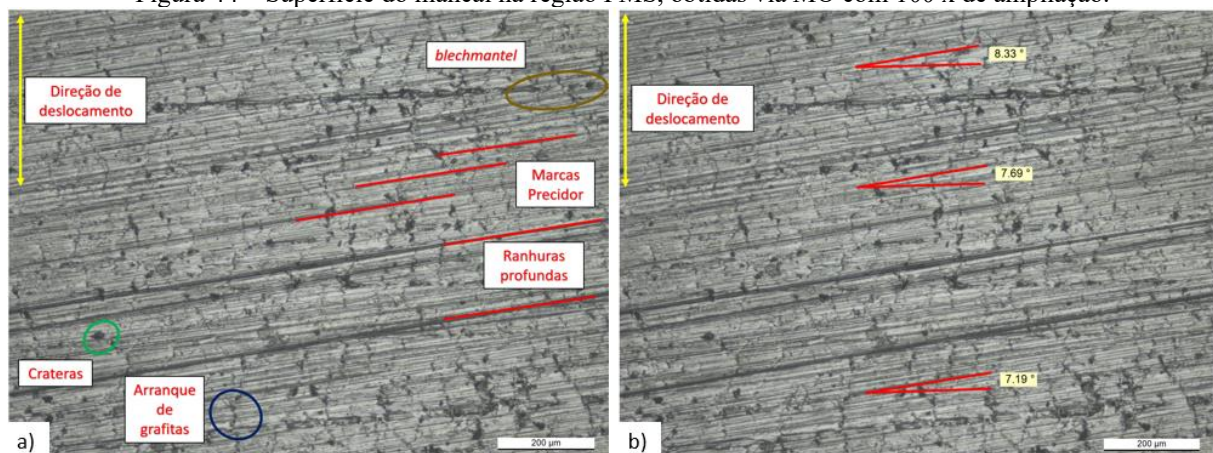
Figura 43 – Superfície de um mesmo mancal contendo as regiões a) PMS, b) RC e c) PMI, obtidas via MO com 100 x de ampliação.



Fonte: Autora.

A região PMS, em destaque na Figura 44, conforme comentado, possui ranhuras obtidas pelo processo de usinagem precidor, mais profundas e mais uniforme quando comparadas com as superfícies dos pistões. Essa característica é evidenciada pela análise dos ângulos, imagens à direita, em que os valores das inclinações das ranhuras são similares. Outra característica, divergente das superfícies dos pistões, é a presença em maior proporção do fenômeno *blechmantel*. Esse fenômeno, conforme apresentado, é caracterizado pelo fechamento das ranhuras e da grafita devido a existência de material sobressalente deformado plasticamente durante o processo de usinagem. Além disso, os mancais apresentam também arranque de grafita, caracterizado pela exposição e retirada das grafitas existentes no material e que resulta em uma cavidade favorável ao acúmulo de materiais (POLAK E GRZYBEK, 2005). As crateras existentes nesse material possuem quantidade e tamanho aparentemente menores quando comparados aos cilindros externos.

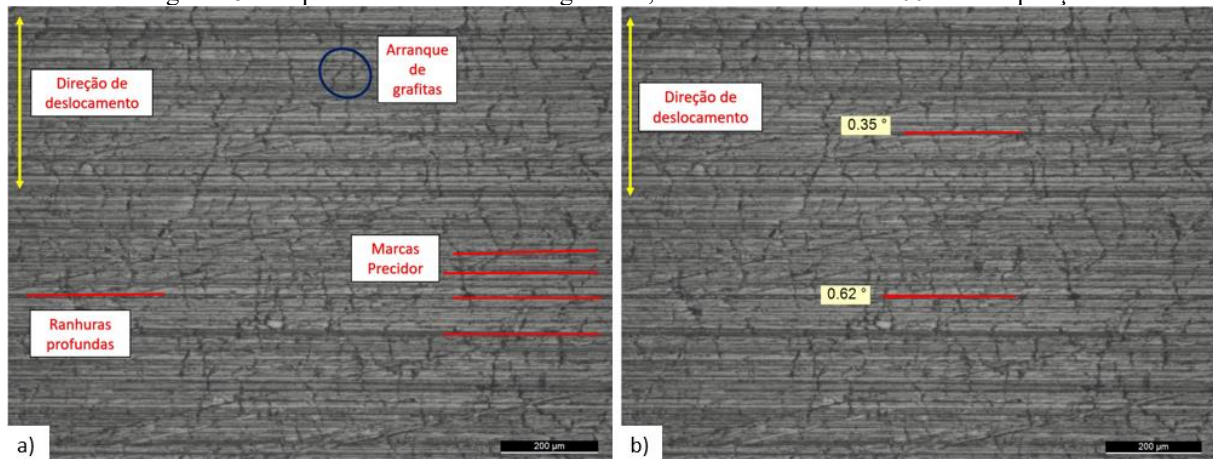
Figura 44 – Superfície do mancal na região PMS, obtidas via MO com 100 x de ampliação.



Fonte: Autora.

Na região central, apesar de manter uma certa padronização, as superfícies dos mancais possuem ranhuras quase perpendiculares a direção de deslizamento, com valores das inclinações das ranhuras próximos ao 0° , ver Figura 45. Outras regiões centrais analisadas entre os mancais possuem ainda a combinação dessas ranhuras horizontais juntamente com as ranhuras inclinadas, ver Figura 43. Conforme já discutido anteriormente, as ranhuras horizontais podem ser resultado de uma menor velocidade de avanço e manutenção da velocidade de rotação nessa região. As características de *blechmantel* e crateras também aparecem nesta região em algumas superfícies dos mancais, e o arranque de grafita mantém-se proporcional também para as outras regiões.

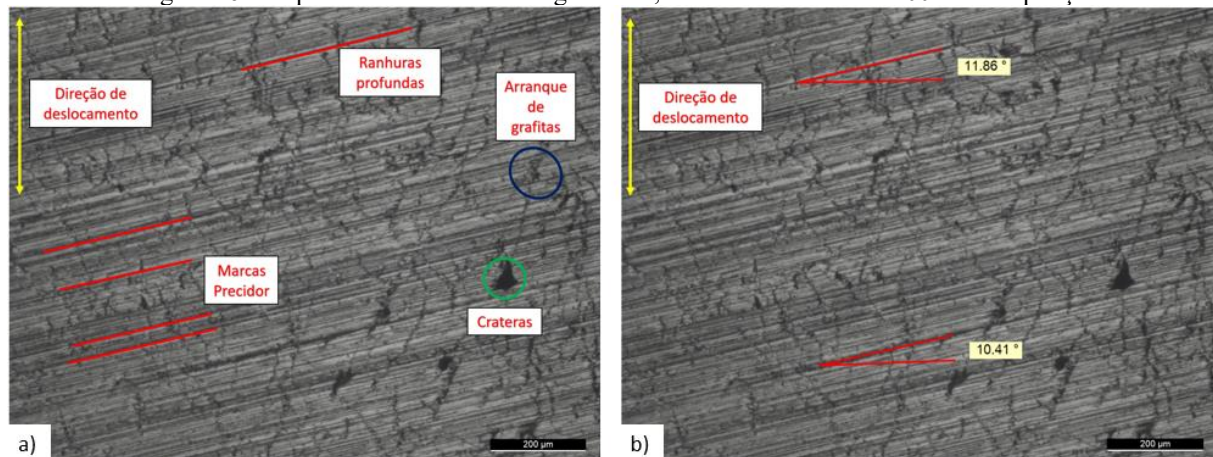
Figura 45 – Superfície do mancal na região RC, obtidas via MO com 100 x de ampliação.



Fonte: Autora.

As superfícies do mancal na região do PMI apresentam características semelhantes as analisadas na região PMS. Entretanto, as marcas do processo precidor, linhas vermelhas, possuem uma angulação ligeiramente maior, ver Figura 46. Na superfície em destaque também é possível visualizar um número maior de crateras ao longo da superfície, apesar desse defeito ainda ser muito inferior ao apresentado para as superfícies dos pistões. O fenômeno *blechmantel* e o arranque de grafitas também pode ser constatado em algumas destas regiões.

Figura 46 – Superfície do mancal na região PMI, obtidas via MO com 100 x de ampliação.



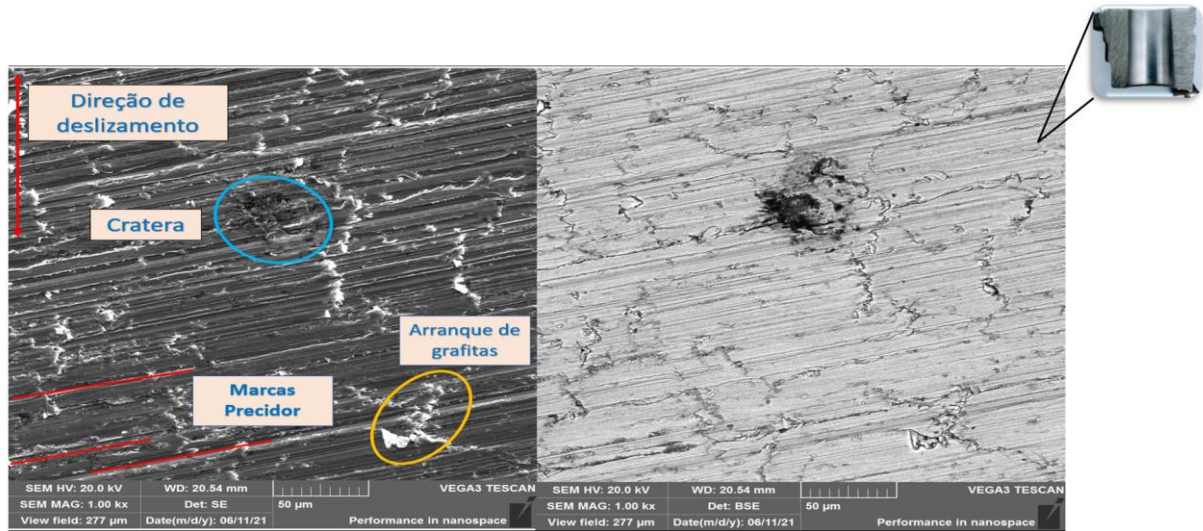
Fonte: Autora.

As análises via MEV realizadas para as superfícies dos mancais forneceram características similares às discutidas para o MO. Algumas regiões em destaque foram selecionadas para corroborar com a discursão prévia.

Como pode ser observado, na Figura 47 verifica-se a ocorrência em grande número de deformações plásticas no contorno das ranhuras, perceptível pelo carregamento de elétrons na

imagem SE e protusões. Esse fator pode ser resultante das características dos processos de usinagem realizados anteriormente, tais como velocidade de corte, avanço e lubrificação.

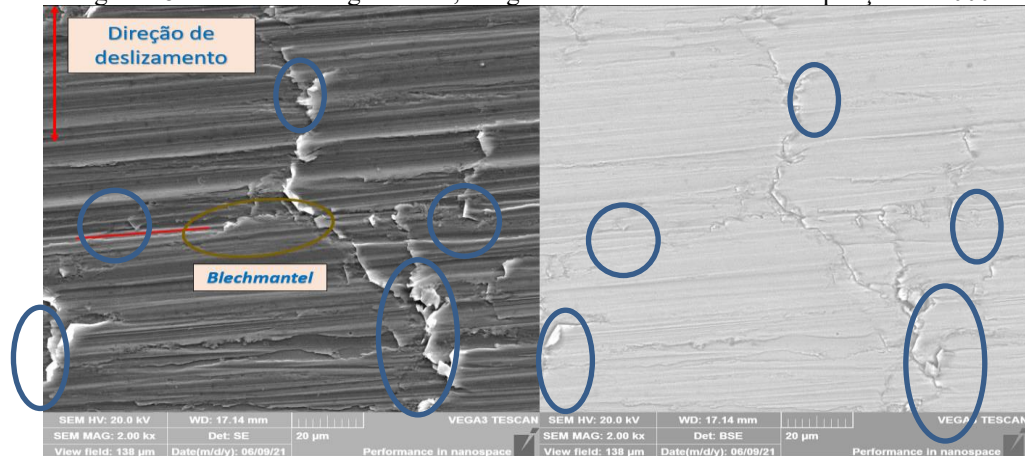
Figura 47 – Mancal região PMI, imagem obtida via MEV com ampliação de 1000 x.



Fonte: Autora.

Essas deformações indicam material delaminado na superfície, e que durante um deslizamento inicial entre pares, essas regiões serão removidas com maior facilidade, formando debris que acelerarão o desgaste da superfície. Além disso, pode favorecer a ocorrência do fenômeno *blechmantel* em maior quantidade. Um exemplo disso é apresentado na Figura 48, em que por meio de uma ampliação na região apresentada na figura anterior, pode-se observar que o fechamento da ranhura ocorre em sua maioria devido à deformação plástica das ranhuras subsequentes.

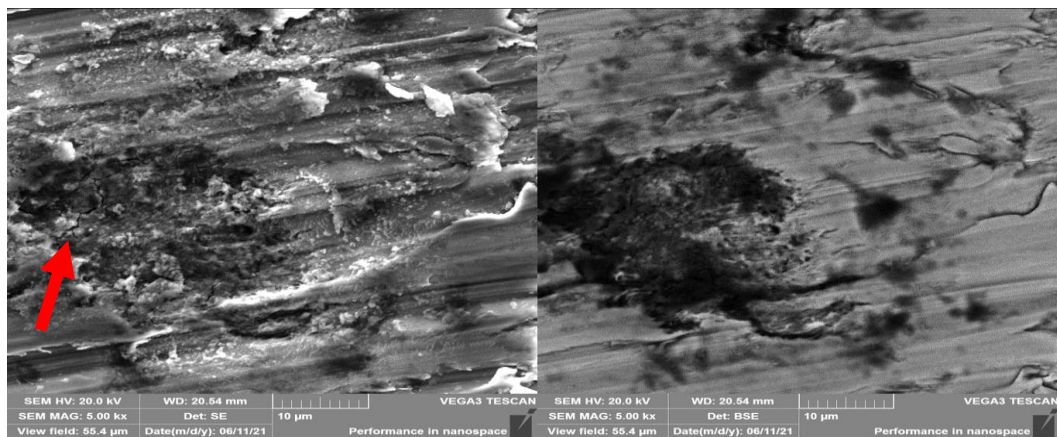
Figura 48 - Mancais na região PMS, imagem obtida via MEV com ampliação de 2000 x.



Fonte: Autora.

Outra característica avaliada nos mancais é a presença de crateras ao longo das superfícies. Como pode ser observado na Figura 49, a região é caracterizada por algumas deformações plásticas e microtrincas, indicada pela seta. Além disso, algumas regiões apresentam tonalidades mais escura, o que pode ser resultado do acúmulo de óleo que não foi totalmente removido durante a limpeza da peça ou grafita exposta do material.

Figura 49 – Cratera em uma região PMI, imagem obtida via MEV com ampliação de 5000 x.



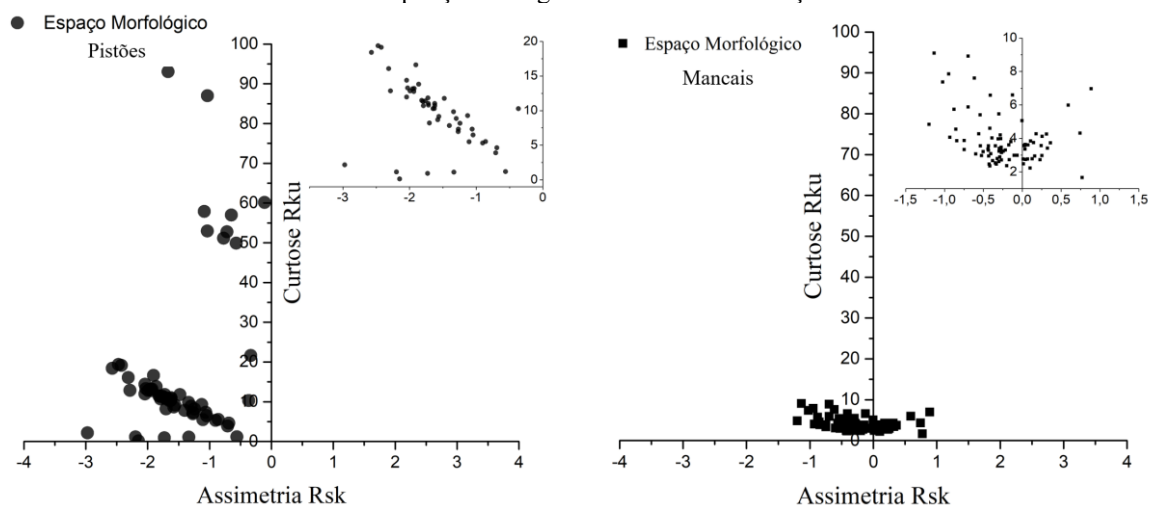
Fonte: Autora.

4.2.2 Topografia

A análise da topografia da superfície consistiu na realização de ensaios de perfilometria (2D) e na análise tridimensional dessas superfícies, que serão apresentadas e discutidas neste item.

Alguns dos principais parâmetros bidimensionais são apresentados nessa seção, sendo que os demais parâmetros avaliados são apresentados no Apêndice A. Inicialmente, a assimetria R_{sk} e a Curtose R_{ku} são apresentadas na Figura 50 para as superfícies do pistão e mancal. O parâmetro R_{sk} abrange a simetria do perfil em relação a linha média e é comumente utilizado para observar a tendência geral dos picos e vales ao longo da distribuição. Enquanto que R_{ku} compreende a tendência do perfil com relação a linha média e permite avaliar, por exemplo, se o perfil é caracterizado por vales e picos agudos e repentinos ou largos e ondulados (MAGSIPOC, ZHAO E GRASSELLI, 2020).

Figura 50 - Valores obtidos para os parâmetros de rugosidade R_{sk} e R_{ku} para as superfícies dos pistões e mancais, com ampliação na região de maior concentração.



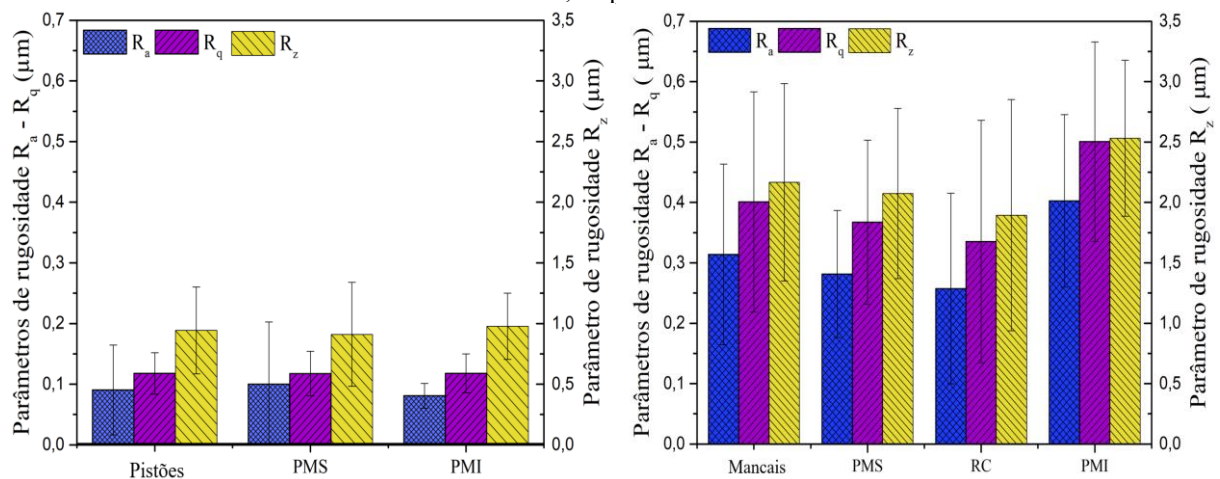
Fonte: Autora.

As superfícies dos pistões são caracterizadas por valores de assimetria negativos e valores de curtose altos (variando entre 0 e 100, com maior concentração entre 10 e 20), o que indica uma predominância dos vales e uma superfície caracterizada por vales e picos protrusos. Para os mancais, os valores de assimetria são tanto positivos quanto negativos, o que impossibilita descrever a tendência dessas superfícies e demonstra a instabilidade do processo.

Observa-se que os valores de curtose dos mancais são relativamente inferiores aos apresentados pelos pistões (valores inferiores a 10), indicando uma superfície com picos e vales menos protrusos. Além disso, pode-se observar que a maior concentração dos valores de curtose concentra-se entre 2 e 4, o que seria próximo a uma superfície gaussiana de referência que possui curtose igual a 3.

Na Figura 51, são apresentadas as médias dos valores de R_a , R_q e R_z obtidos das superfícies dos pistões e mancais, no qual corresponde à medição do desvio em relação a linha média do perfil. Os mancais apresentam, para os três parâmetros, valores até 3,5 vezes maiores do que os apresentados pelos pistões, indicando uma superfície com maior predominância de vales e picos.

Figura 51 – Valores obtidos para os parâmetros de rugosidade R_a , R_q e R_z para as superfícies dos pistões e mancais, respectivamente.



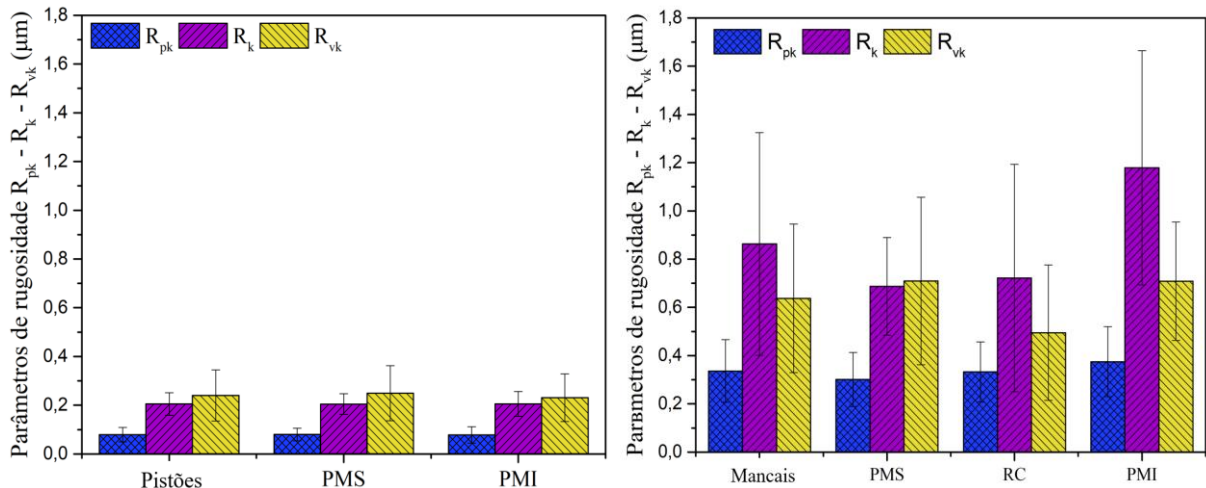
Fonte: Autora.

Por fim, os parâmetros de amplitude R_{pk} , R_k e R_{vk} foram analisados com a finalidade de avaliar a capacidade de suporte e capacidade de retenção de óleo das superfícies (Figura 52).

É possível observar que as superfícies dos pistões apresentam valores inferiores, 4 vezes menores para o R_{pk} e R_k e 2,5 menores para o R_{vk} , em relação ao apresentado pelos mancais. Além disso, para ambas as superfícies o parâmetro R_{vk} é superior ao parâmetro R_{pk} , o que implica em uma curva de amaciamento mais curta, uma vez que as asperezas são menores. Além disso, indica que estas superfícies podem proporcionar boa capacidade de retenção de óleo e possuem poucos picos salientes que seriam rapidamente desgastados em um contato metal-metal. O parâmetro R_k caracteriza a região central do perfil e a capacidade de

deslizamento a longo prazo, assim, por possuir valores superiores desse parâmetro, os mancais podem ser capazes de promoverem maior período de deslizamento (GRIFFITHS, 2001). Entretanto, vale salientar que o desvio padrão destes parâmetros para as superfícies dos mancais é relativamente alto, o que pode resultar em uma alta variabilidade dos resultados.

Figura 52 - Valores obtidos para os parâmetros de rugosidade R_{pk} , R_k e R_{vk} para as superfícies dos pistões e mancais, respectivamente.

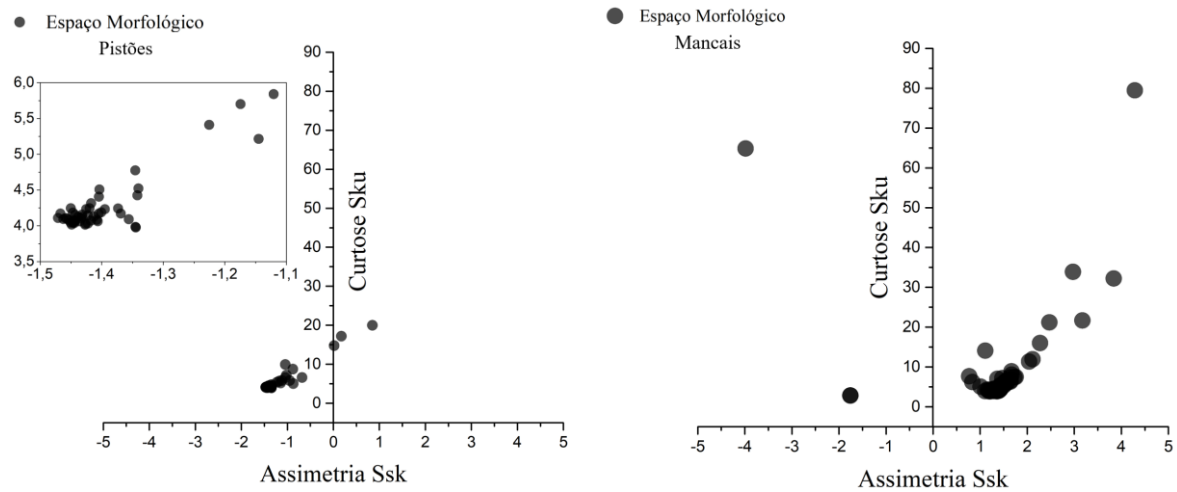


Fonte: Autora.

Os primeiros parâmetros averiguados para a análise tridimensional correspondem a assimetria S_{sk} e a curtose S_{ku} , gerando o espaço morfológico apresentado na Figura 53. Os pistões são caracterizados por valores negativos de assimetria, o que indica que essa superfície é caracterizada por platôs e vales, e valores de curtose maiores que 3, com uma média em torno de 5. Os mancais apresentam valores de curtose próximo ao pistão, com uma média em torno de 7, corroborando com os resultados avaliados dos parâmetros bidimensionais. Entretanto, os valores de assimetria são predominantemente positivos, caracterizando uma superfície com maior concentração de picos. Os valores de curtose superiores a 3 indicam que a superfície é caracterizada por uma maior quantidade de vales e picos protrusos (LEACH, 2013).

Os valores de assimetria negativos são favoráveis para maior retenção dos lubrificantes, todavia, conforme é apresentado mais adiante, os pistões não conseguiram reter suficientemente o lubrificante nas superfícies, o que indica que esses valores podem ter sido influenciados pela quantidade excessiva de crateras nessas superfícies, visualizados nas imagens via MO e MEV.

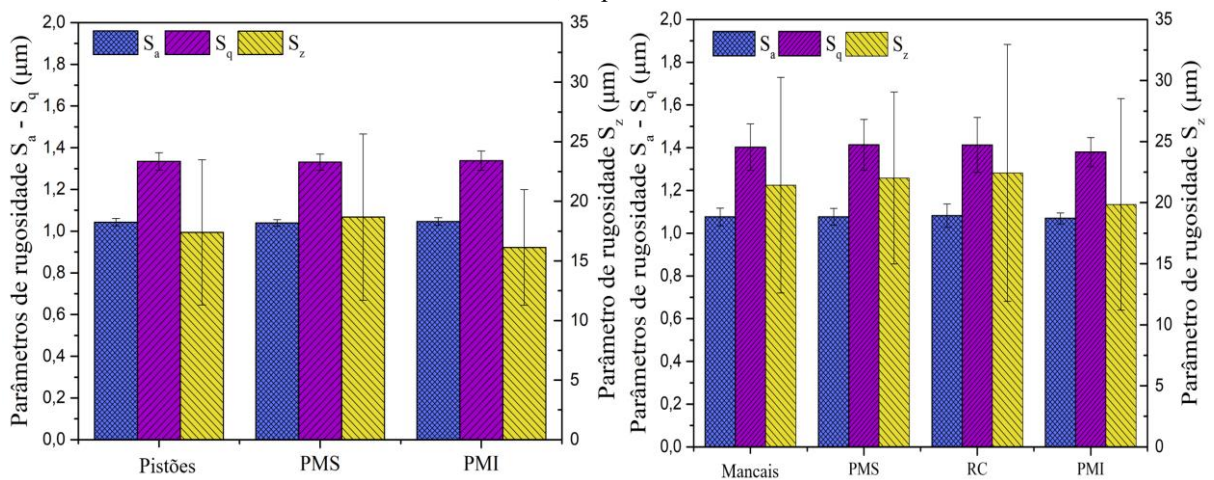
Figura 53 - Valores obtidos para os parâmetros de rugosidade S_{sk} e S_{ku} para as superfícies dos pistões e mancais.



Fonte: Autora.

Os parâmetros S_a , S_q , S_z são apresentados na Figura 54. S_a e S_q correspondem à altura média quadrática e raiz da altura média quadrática, respectivamente, com valores próximos para ambas as superfícies (0,05 vezes maior para os mancais). Para os valores de S_z , que correspondem à altura máxima, para os mancais são cerca de 1,2 vezes maiores que para os pistões. Entretanto, vale salientar que apenas estes parâmetros não expressam informações suficientes sobre as superfícies, e assim, não se pode concluir que estas superfícies são similares.

Figura 54 - Valores obtidos para os parâmetros de rugosidade S_a , S_q e S_z para as superfícies dos pistões e mancais, respectivamente.

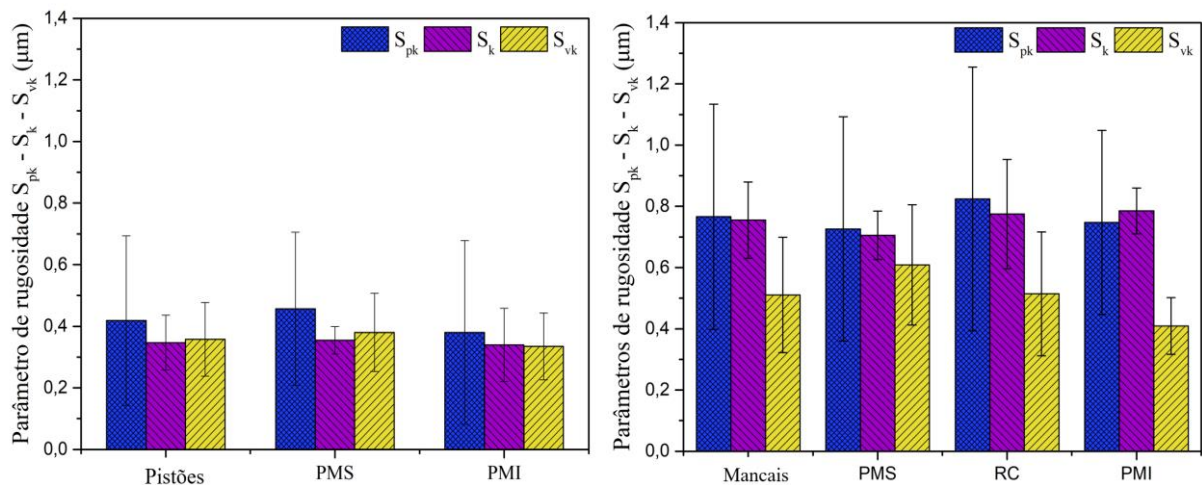


Fonte: Autora.

S_k , S_{pk} e S_{vk} constituem parâmetros importantes acerca das superfícies e estes parâmetros desconsideram os vales profundos e os picos salientes das superfícies analisadas. Os valores obtidos para as peças são apresentados na Figura 55.

Os mancais apresentam valores superiores em relação aos pistões, com valores 2,17 vezes maiores para o S_k , 1,8 para o S_{pk} e 1,4 para o S_{vk} . Além disso, os mancais possuem valores de S_{pk} superiores aos valores de S_{vk} (50% maior), indicando uma predominância dos picos em relação aos vales e corroborando com os valores de assimetria apresentados. Verifica-se que para os pistões os valores de S_{pk} se apresentam ligeiramente maiores que os valores de S_{pk} (17% maior), divergindo com os valores de assimetria apresentados. Esse fato corrobora com a discussão levantada de que o alto número de crateras pode ter influenciados os valores de assimetria. Quando comparado com os valores bidimensionais, a diferença de valores entre as superfícies se mantém, entretanto, ambas as superfícies apresentaram maior predominância dos picos com relação aos vales, divergindo dos resultados bidimensionais.

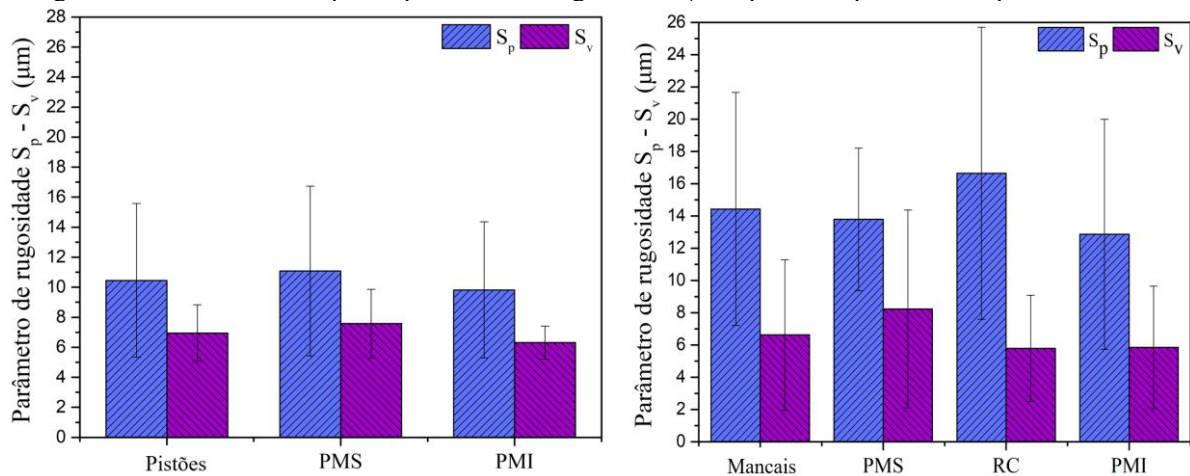
Figura 55 - Valores obtidos para os parâmetros de rugosidade S_{pk} , S_k e S_{vk} para as superfícies dos pistões e mancais.



Fonte: Autora.

Os parâmetros de altura S_p e S_v que correspondem a altura máxima dos picos e dos vales também foram avaliados, ver Figura 56. Ambas as superfícies possuem valores de S_p maiores que S_v , sendo cerca de 1,5 vezes maiores para os pistões e 2 vezes maiores para os mancais. Além disso, os mancais possuem valores de S_p 38% maiores em comparação com os pistões. Enquanto que a altura máxima dos vales de ambas as superfícies apresenta valores próximos, 5% menor no caso dos mancais.

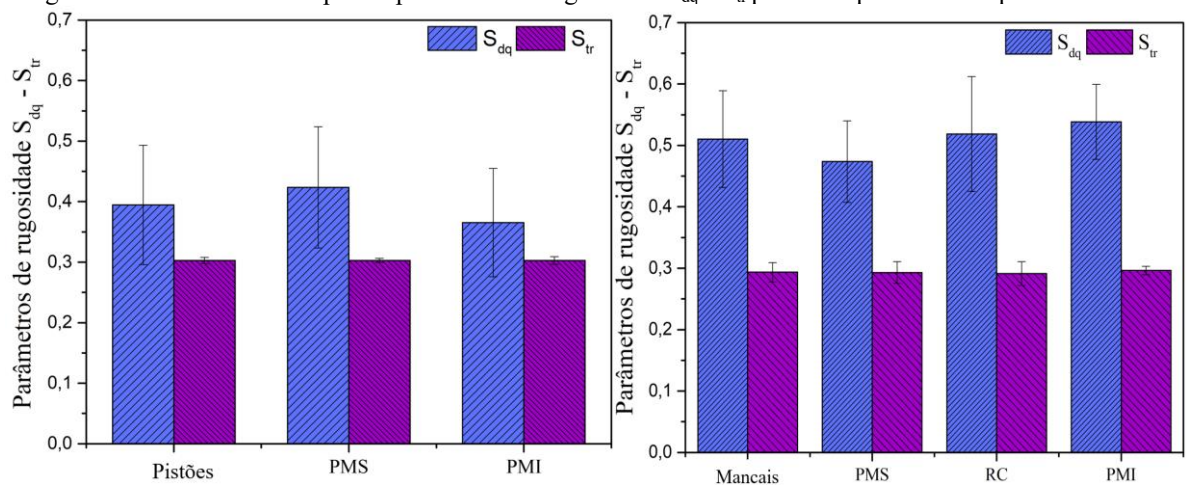
Figura 56 - Valores obtidos para o parâmetro de rugosidade S_p e S_v para as superfícies dos pistões e mancais.



Fonte: Autora.

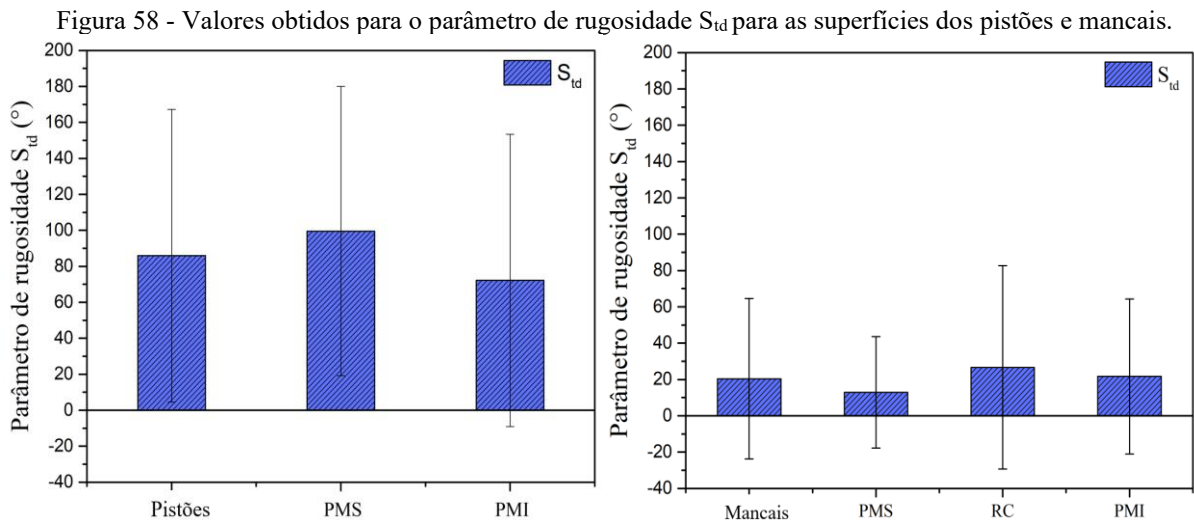
Na Figura 57 são apresentados os parâmetros S_{dq} e S_{tr} para as superfícies. Ambas as superfícies possuem valores próximos de S_{tr} e inferiores a 0,3, valor referência para superfícies retificadas, torneadas e brunidas, além disso, esse valor caracteriza uma superfície anisotrópica (direcional). Para os valores de S_{dq} , os mancais possuem valores 1,3 vezes superiores aos pistões. Esse parâmetro possibilita avaliar pureza e a estética da superfície, em que valores maiores indicam uma superfície com características finas, que é apresentado pelos mancais. Já para as superfícies dos pistões apresentam valores menores, um indicativo de que essas superfícies possuem características mais grosseiras que os mancais.

Figura 57 - Valores obtidos para o parâmetro de rugosidade S_{dq} e S_{tr} para as superfícies dos pistões e mancais.



Fonte: Autora.

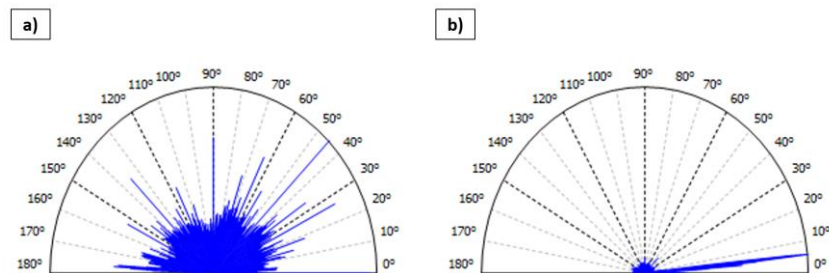
Para obter informações acerca da direcionalidade das texturas das superfícies, além das medições via MO, o parâmetro S_{td} foi avaliado, ver Figura 58. As superfícies dos pistões além de possuírem maiores inclinações das texturas, com valores próximos a 90° , apresentam também um alto desvio padrão desses valores. Valores iguais a 90° correspondem a uma textura paralela à direção de deslizamento das superfícies, o que não corresponde às inclinações das texturas vista via MO. Devido a isso, supõem-se que a grande quantidade de riscos nos pistões tenha influenciado no valor desse parâmetro.



Fonte: Autora.

Corroborando com esse resultado, na Figura 59 são apresentadas as distribuições em coordenada polar com a direção da textura para duas superfícies, pistões e mancais, na região PMS obtidos via *software MountainsMap*. Observa-se que esta superfície do pistão não possui uma direção preferencial, com ranhuras em quase todas as angulações. Por outro lado, a superfície do mancal possui uma direção preferencial em torno de 5° .

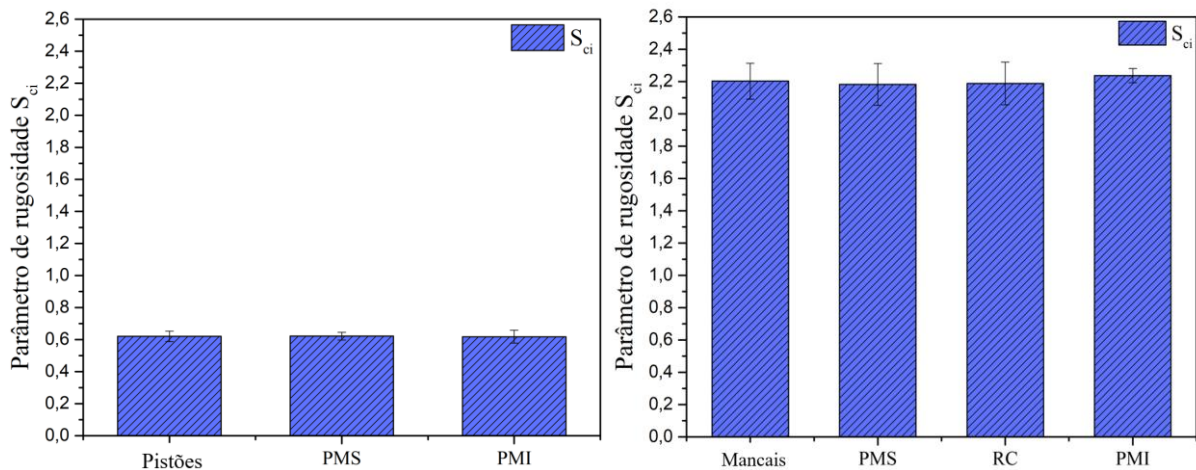
Figura 59 – Direções da textura para uma superfície de um pistão e mancal, respectivamente.



Fonte: Autora.

Por fim, o parâmetro S_{ci} foi avaliado e os resultados são apresentados na Figura 60. Esse parâmetro corresponde ao índice de retenção de fluido central, e caracterizam a capacidade de retenção de fluido e o desgaste de uma superfície. As superfícies dos pistões apresentam valores próximo a 0,6 e esse valor pode ser comparado com uma superfície gaussiana ($S_{ci} = 1,56$), no qual valores menores caracterizam uma superfície desgastada. As superfícies dos mancais apresentam valores próximos a 2,2 (3,5 vezes maiores), caracterizando uma superfície com maior capacidade de retenção de fluido. Os demais parâmetros tridimensionais obtidos estão dispostos no Apêndice A.

Figura 60 - Valores obtidos para o parâmetro de rugosidade S_{ci} para as superfícies dos pistões e mancais.



Fonte: Autora.

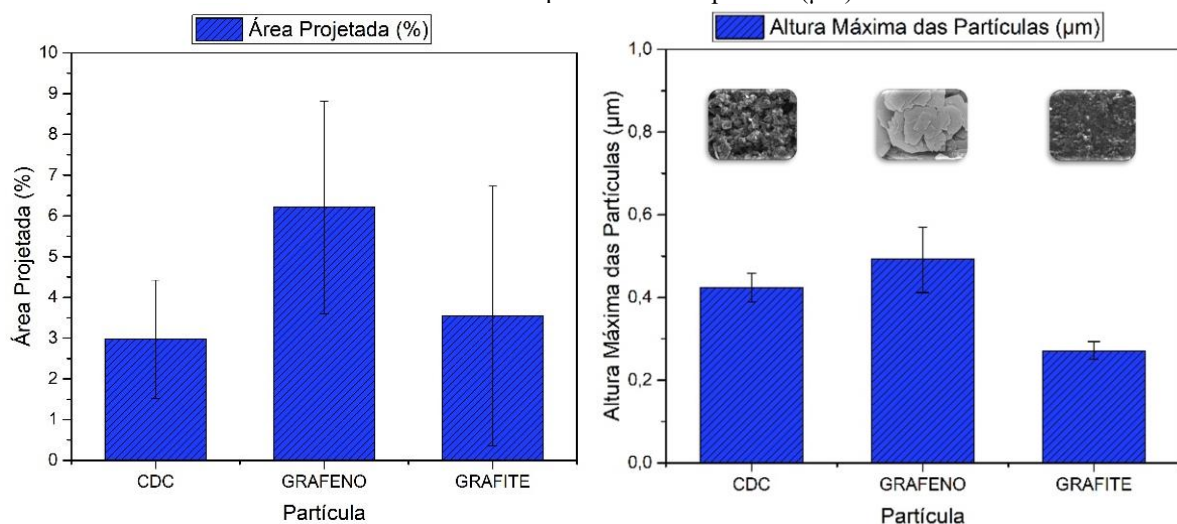
4.3 DEPOSIÇÃO DAS PARTÍCULAS

Nessa seção, serão apresentados os resultados das deposições das partículas nas superfícies. Conforme descrito na metodologia, as superfícies dos pistões foram submetidas a um processo de lixamento para alteração dos parâmetros S_q , S_{vk} e S_{dq} com o intuito de melhorar a adesão das partículas nas superfícies. Além disso, a concentração das partículas na solução aplicada nestas superfícies foi maior que a concentração das superfícies dos mancais. Esse procedimento foi necessário visto que com uma concentração inferior e sem o processo de lixamento a quantidade de partículas nas superfícies dos pistões era consideravelmente inferior quando comparado com as superfícies dos mancais, mesmo quando o número de aplicações foi 10 e 15. Um dos fatores que podem ter contribuído para a falta de aderência das partículas na superfície dos pistões é a geometria da peça, fazendo com que as partículas escoassem. O

problema foi atenuado com uso de barreiras nas laterais da peça, que reduziram o escoamento das partículas e a mantiveram na região de deslizamento.

Após esse processo, os resultados da quantificação das partículas foram obtidos. Para as superfícies dos pistões, os valores quanto à área projetada (%) e à altura máxima das partículas (μm), obtidos via processamento do *software MountainsMap*, estão descritos na Figura 61. Observa-se que para o mesmo número de aplicações, a área projetada para as partículas de grafeno é superior aos outros dois lubrificantes. Este comportamento pode ocorrer devido à aglomeração das partículas de grafeno, conforme apresentado na revisão bibliográfica. Além disso, a altura máxima das partículas também é superior quando o grafeno é comparado ao CDC e ao grafite.

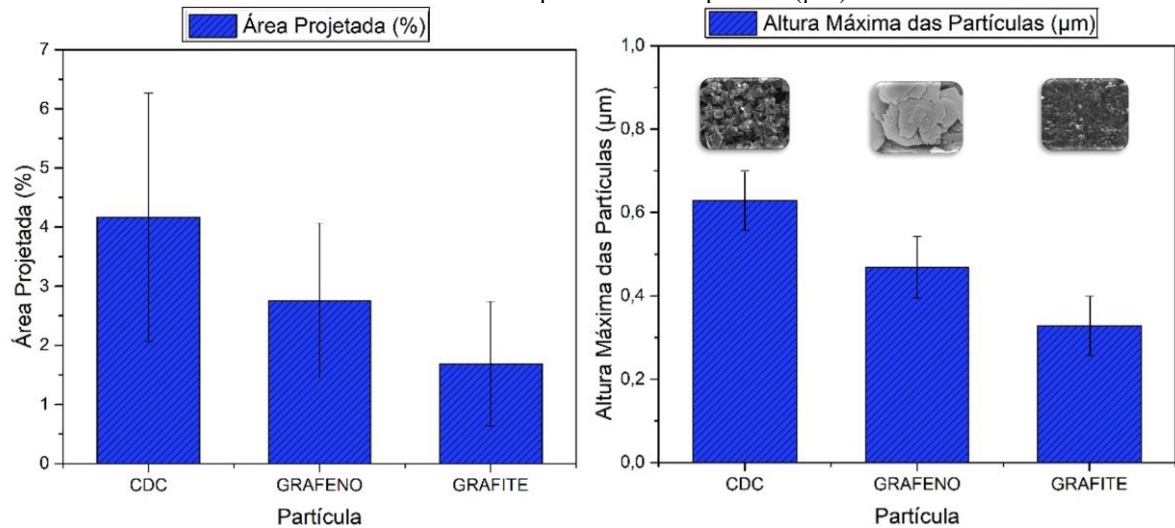
Figura 61 - Resultado da quantificação das partículas nas superfícies dos pistões quanto a área projetada (%) e altura máxima das partículas na superfície (μm).



Fonte: Autora.

Em relação às superfícies dos mancais, conforme Figura 62, a área projetada das partículas apresentou menor média quando comparado aos pistões, provavelmente por possuir menor concentração de partículas na solução aplicada. Verifica-se que, assim como nos pistões, os valores da área projetada variaram conforme a partícula utilizada. Isso também pode ter ocorrido devido à combinação partícula/textura. A altura máxima das partículas nas superfícies dos mancais foi maior em relação à altura medida nos cilindros externos, e o CDC apresentou maior altura das partículas.

Figura 62 – Resultado da quantificação das partículas nas superfícies dos mancais quanto a área projetada (%) e altura máxima das partículas na superfície (μm).



Fonte: Autora.

4.4 ANÁLISE TRIBOLÓGICA DA SUPERFÍCIE

Nessa seção será apresentado os resultados dos ensaios de carga constante e variável.

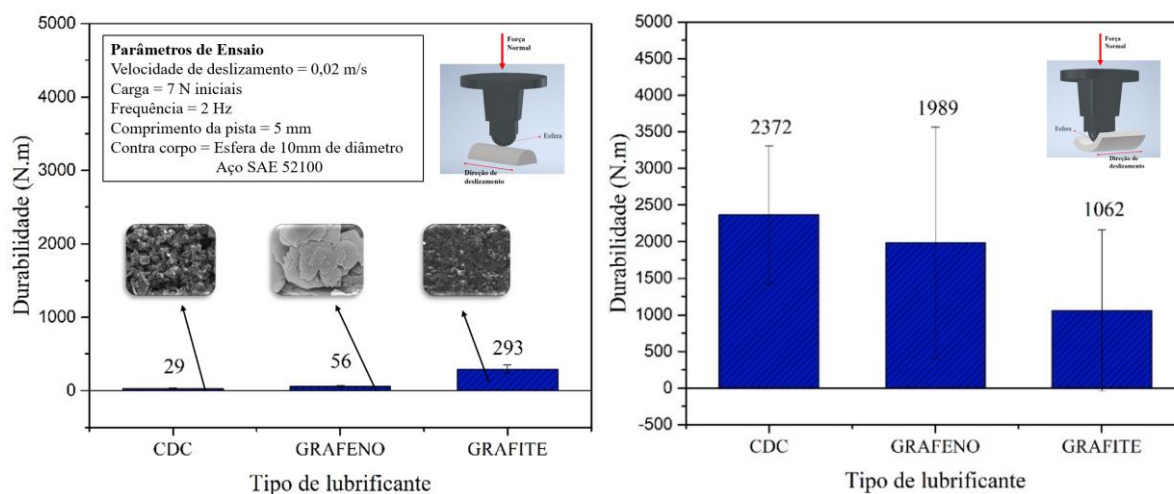
4.4.1 Ensaios Carga Variada – Durabilidade

Na Figura 63 são apresentados os resultados da durabilidade dos pares tribológicos nos ensaios de carga variada. Nos três tipos de lubrificante os mancais apresentaram valores de durabilidade superiores ao apresentado pelos pistões.

A menor média de durabilidade para os mancais ocorreu com o uso do grafite com valor igual à 1062 Nm, enquanto que, para os pistões, o melhor caso ocorreu com o uso do grafite, com valor médio de durabilidade igual a 293 Nm.

Tanto para os pistões quanto para os mancais, os resultados de durabilidade foram avaliados pelo método estatístico de rejeição de dados, critério de Chauvenet, para avaliação da existência de *outliers* e, em caso positivo, esses foram removidos do cálculo das médias. Observa-se que a combinação partícula/superfície variou em cada um dos casos e uma análise detalhada destes resultados é apresentada a seguir.

Figura 63 – Resultado da durabilidade dos pistões e mancais, respectivamente, nos ensaios tribológicos com as partículas de CDC, grafeno e grafite.



Fonte: Autora.

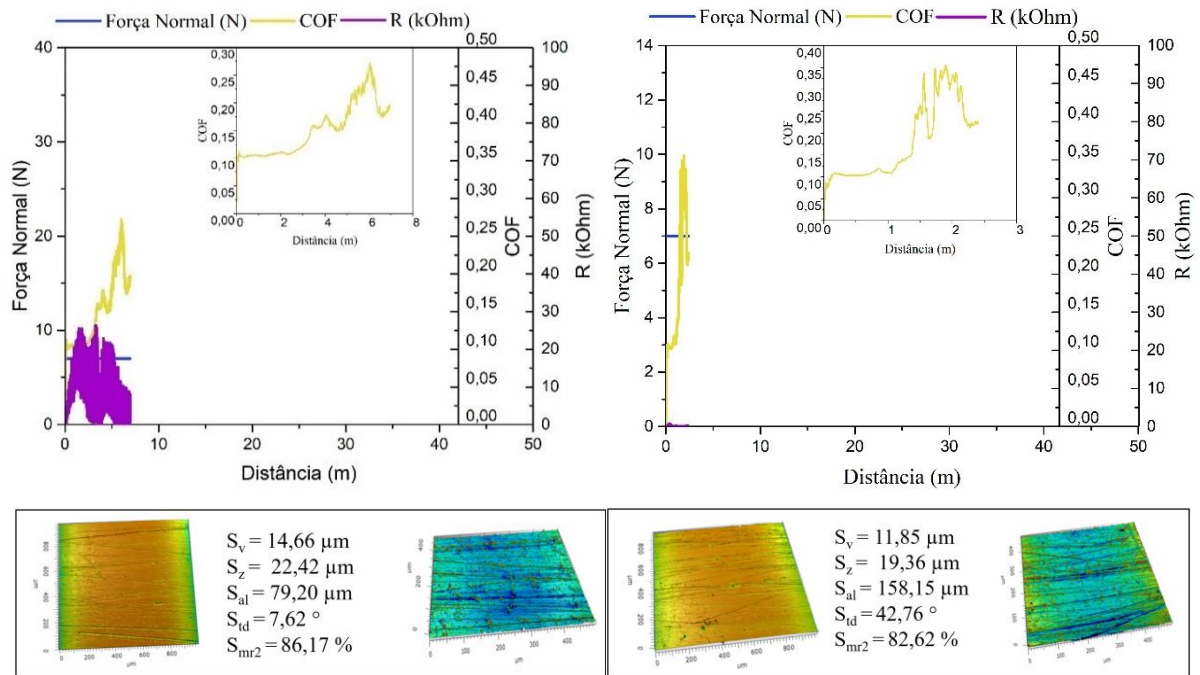
Inicialmente, uma análise dos resultados das superfícies dos pistões para cada partícula lubrificante é discutida. Na Figura 64, são apresentados dois gráficos referentes à maior e à menor durabilidade, respectivamente, dos pistões utilizando partículas de CDC. Associado a isso, na parte inferior da figura, é apresentada uma ilustração 3D da superfície antes e após a aplicação das partículas, bem como alguns parâmetros das superfícies antes dos ensaios. Os parâmetros que são apresentados consistem naqueles que apresentaram maior variação entre ambas as superfícies.

Ao longo das análises, percebe-se que os parâmetros apresentados variam entre as superfícies e as partículas utilizadas. Nesse caso, por exemplo, os parâmetros descritos na figura 64 podem ter influenciado na variação da durabilidade do processo de deslizamento. Dentre estes parâmetros, uma grande variação é observada para o S_{al} e o S_{td} , o que indica que uma superfície com textura de baixa frequência e maior inclinação contribuíram para a menor durabilidade. Além disso, nota-se que as partículas se encontram bem dispersas pelas superfícies, mas em pouca quantidade, o que pode ter influenciado os resultados já que ambas as regiões obtiveram durabilidades consideravelmente baixas, com valores iguais a 49 Nm e 17 Nm.

No que tange à resistência de contato, esta foi praticamente nula no caso de menor durabilidade, o que indica a existência do contato metal-metal durante o deslizamento e uma tribocamada insuficiente. Para o primeiro caso a resistência de contato manteve-se um pouco superior até o fim do deslizamento, mas a tribocamada também não foi suficiente para retardar

o aumento do COF. A pior interação superfície/partícula foi observada com o uso de partículas de CDC nos pistões.

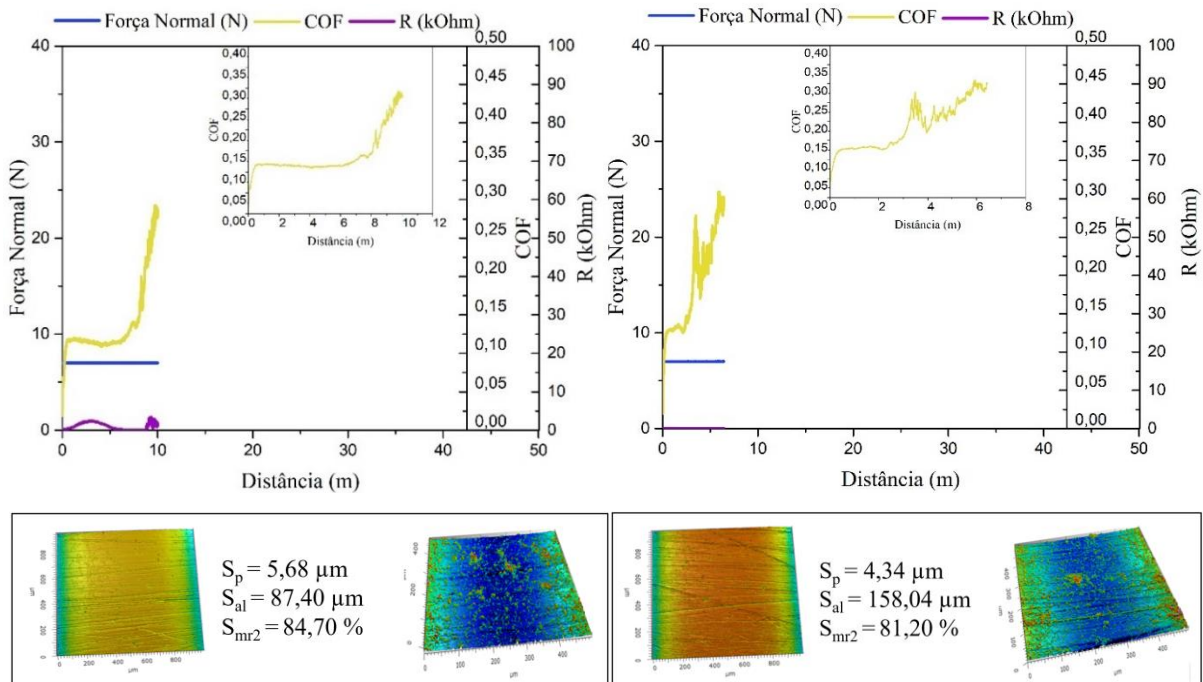
Figura 64 – Resultados dos ensaios tribológicos de durabilidade para os pistões utilizando as partículas de CDC.



Fonte: Autora.

Para o caso em que partículas de grafeno foram utilizadas, o resultado de durabilidade se manteve similar quando utilizado o CDC, conforme Figura 65. Para estas superfícies, os parâmetros em destaque correspondem a S_p , S_{al} e S_{mr2} , com ênfase ao S_{al} que apresentou a maior variação e resultado similar ao caso anterior. Apesar disso, nesse caso, as partículas de grafeno encontram-se mais aglomeradas em algumas regiões, com maior concentração nas extremidades da superfície e em quantidade superior ao caso anterior. No entanto, a resistência de contato manteve-se praticamente nula em ambos os casos, com baixos valores de durabilidades, 70 Nm e 45 Nm.

Figura 65 - Resultados dos ensaios tribológicos de durabilidade para os pistões utilizando as partículas de grafeno.



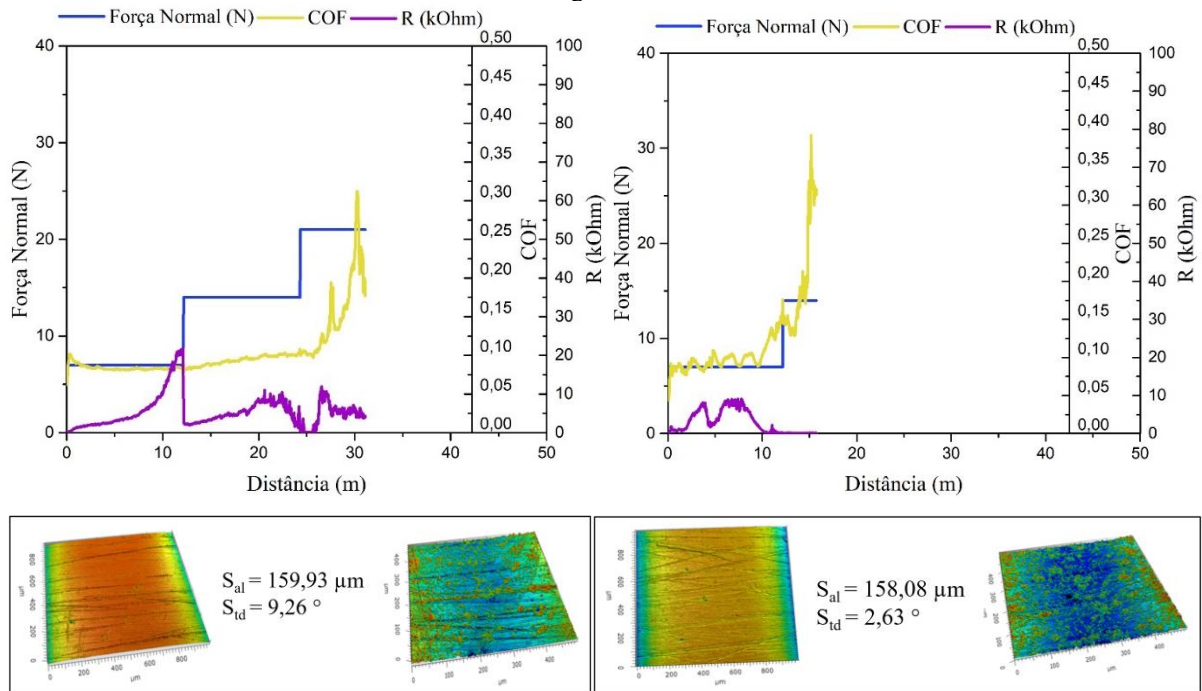
Fonte: Autora.

Conforme apresentado, o uso do grafite gerou melhores valores de durabilidade para as superfícies dos pistões. Na Figura 66 são expostos os resultados referentes a maior e menor durabilidade com o uso destas partículas. Observa-se que neste caso todos os deslizamentos suportaram pelo menos a primeira carga completa, diferente do que foi apresentado para o CDC e grafeno. Quanto à variação dos parâmetros de rugosidade, observa-se apenas dois parâmetros em destaque, S_{al} e S_{td} , com maior variação para o S_{td} . Nota-se que o parâmetro S_{al} esteve em evidência nos três casos, entretanto, neste caso, o maior valor influenciou na maior durabilidade, diferentemente do que foi observado nos casos anteriores. Já em relação as partículas aplicadas nas superfícies, observa-se uma quantidade similar ao caso do grafeno, mas aqui elas estão menos aglomeradas e um pouco mais distribuídas ao longo da superfície. Os valores de durabilidade para os dois casos apresentados foram de 340 Nm e 220 Nm, valores estes superiores a todos os casos anteriores.

Além disso, no caso de maior durabilidade pode-se observar um padrão na resistência de contato, que é vista também nos casos dos mancais, similar ao encontrado na literatura. Mas nesse caso, o valor do COF superou 0,20 sem que a resistência de contato zerasse. Esse padrão, diminuição da resistência durante o aumento da carga, pode ser relacionado a um aumento da

área de contato e a necessidade da formação de tribocamadas nestas novas áreas para promover o nível de isolamento entre corpo e contra-corpo, esse comportamento também foi observado nos trabalhos do Giacomelli (2020) e Riveira (2020).

Figura 66 - Resultados dos ensaios tribológicos de durabilidade para os pistões utilizando as partículas de grafite.



Fonte: Autora.

Desconsiderando a influência das partículas lubrificantes e analisando a variação para os dois casos dos parâmetros discutidos anteriormente, maior e menor durabilidade entres os pistões, obtém-se a Tabela 6. Na análise destes parâmetros pode-se observar algumas informações. Por exemplo, a superfície com menor durabilidade apresentou maior altura dos picos e vales mais profundos em relação a superfície com maior durabilidade, essa característica pode ter influenciado no fornecimento de lubrificante na superfície durante o ensaio, fazendo com que o coeficiente de atrito aumentasse rapidamente. Outra variação significativa é em relação a direção da textura, em que a menor inclinação em relação a direção perpendicular de deslizamento pode ter influenciado na atuação das partículas. Os parâmetros S_{ku} , S_{dr} e S_{mr1} , que não possuem variações significativas, foram acrescentados na tabela para futura comparação com os mancais.

Tabela 6 – Variação dos parâmetros para o caso de maior e menor durabilidade entre os pistões.

Parâmetros	Melhor durabilidade	Pior durabilidade
S_{ku} (μm)	3,99	4,09
S_p (μm)	5,85	7,51
S_v (μm)	6,23	11,85
S_z (μm)	12,08	19,36
S_{al} (μm)	159,93	158,15
S_{td} ($^\circ$)	9,26	42,76
S_{dr} (%)	3,76	4,89
S_{mr1} (%)	10,30	10,51
S_{mr2} (%)	83,94	82,62

Fonte: Autora.

Para as superfícies dos mancais os resultados dos ensaios de carga variada foram consideravelmente melhores que para as superfícies dos pistões. A melhor média das durabilidades foi observada utilizando as partículas de CDC, mas o maior valor de durabilidade foi visto em uma superfície utilizando partículas de grafeno.

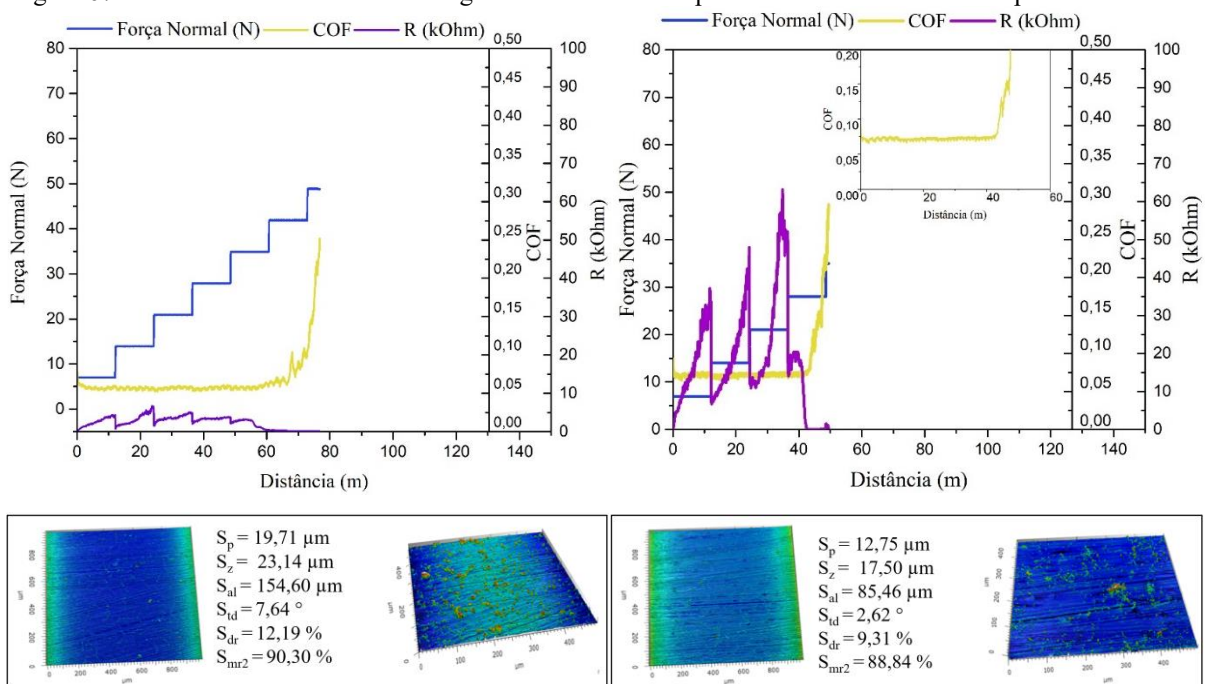
Para as partículas de CDC o maior e menor caso de durabilidade é apresentado na Figura 67, com valores de 3764 Nm e 1729 Nm. A maior durabilidade foi obtida com 7 incrementos de carga, resultando em uma força normal igual a 48 N, mas a resistência de contato se manteve relativamente baixa quando comparado com o caso à direita, que suportou 5 incrementos de carga, 35 N. Em ambos os casos o valor de 0,20 do COF foi alcançado quando os valores de resistência chegaram a zero.

Para as superfícies dos mancais, a variação de uma maior quantidade de parâmetros foi observada e isso pode ter ocorrido devido ao processo de lixamento que as superfícies dos pistões foram submetidas. Apesar disso, nota-se que alguns parâmetros em destaque para os pistões também aparecem em destaque para os mancais, tais com S_p , S_z e S_{al} . Como discutido previamente, as superfícies dos mancais apresentam maiores alturas dos picos, entretanto, diferentemente do apresentado para os pistões, esse fator pode ter favorecido a maior durabilidade destas superfícies. Além disso, no geral, observa-se que as superfícies com

menores frequência das texturas, maior valor de S_{al} , e menores inclinações das texturas, S_{td} , apresentaram melhores durabilidades.

Observando as ilustrações 3D, nota-se que o primeiro caso apresenta partículas de CDC bem distribuídas ao longo da superfície, enquanto que, no segundo caso estas partículas encontram-se aglomeradas em algumas regiões. Devido a isso, a tribocamada formada na primeira superfície provavelmente se distribuiu por toda a superfície, enquanto que, apesar dos valores altos a segunda tribocamada se manteve em algumas regiões, o que pode ter favorecido o contato metal-metal em uma distância menor. Métodos de aplicação de partículas que realize uma distribuição uniforme ao longo da superfície podem ser utilizados para minimizar tais efeitos.

Figura 67 - Resultados dos ensaios tribológicos de durabilidade para os mancais utilizando as partículas de CDC.

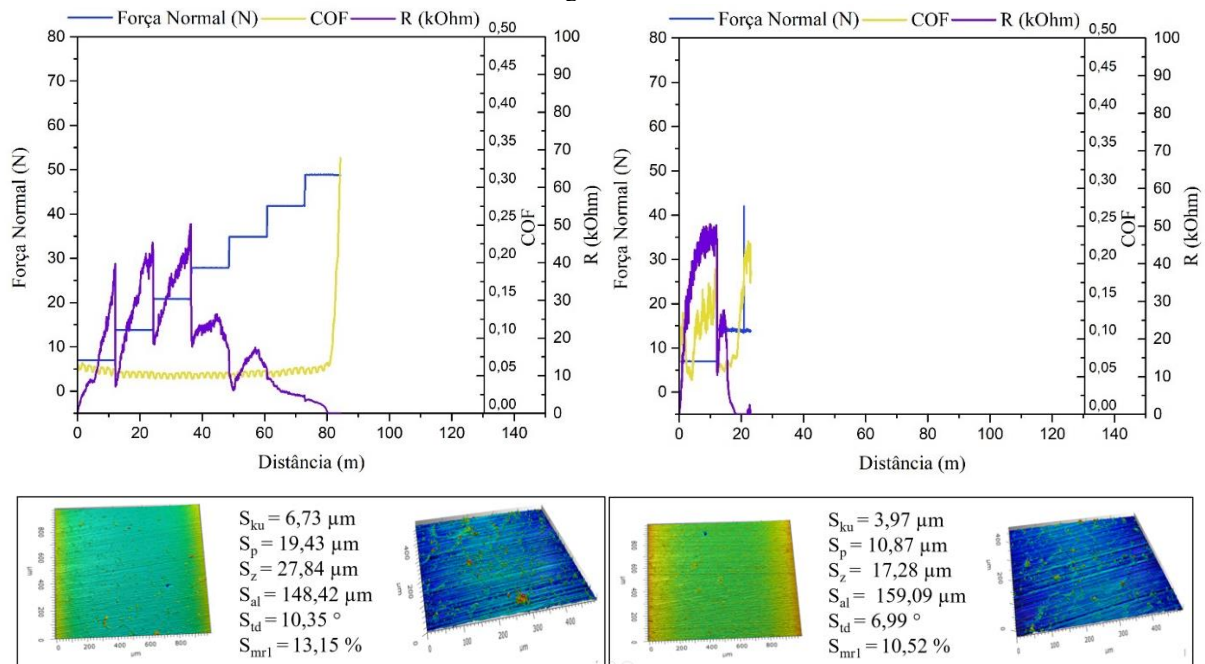


Fonte: Autora.

As superfícies utilizando partículas de grafeno obtiveram valores máximos e mínimos de durabilidade iguais a 4131 Nm e 323 Nm, conforme Figura 68, o que demonstra a alta variabilidade deste caso. Na análise destas superfícies, dois parâmetros merecem destaque, S_{ku} e S_{mr1} . A maior curtose indica picos e vales mais protuberantes, resultado esse também indicado pelos parâmetros S_p , S_z e S_{mr1} . Esse resultado diverge do caso apresentado na Tabela 6 para as superfícies dos pistões. Além disso, quando comparado com as superfícies com CDC, as

superfícies com grafeno possuem partículas em menores quantidades e em poucas regiões, principalmente na superfície a direita. Mesmo assim, os valores de resistência ao contato foram superiores, e a maior durabilidade foi alcançada no primeiro caso.

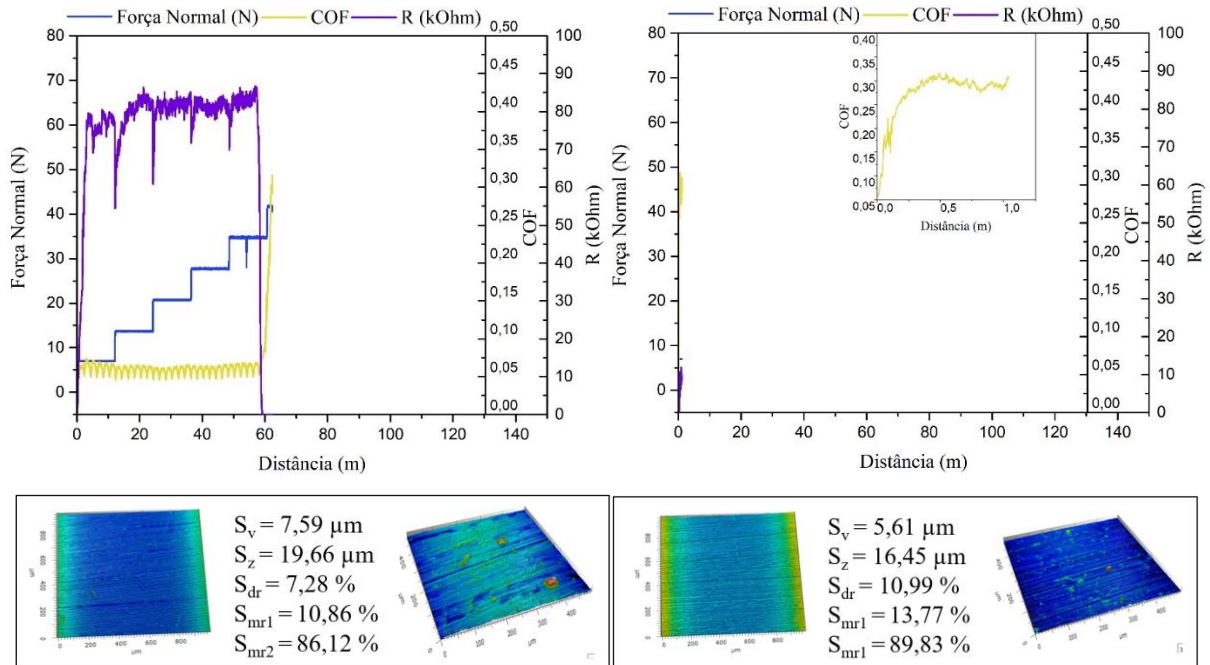
Figura 68 - Resultados dos ensaios tribológicos de durabilidade para os mancais utilizando as partículas de grafeno.



Fonte: Autora.

As superfícies testadas com partículas de grafite também apresentaram uma alta variabilidade, alcançando valores máximos e mínimos iguais a 2619 Nm e 7 Nm, conforme Figura 69. Diferentemente do que foi observado para os outros casos, o parâmetro S_v variou entre as superfícies, enquanto que o parâmetro S_{al} não aparece em destaque. Esse resultado favorece a ideia que existe influência em relação a combinação partícula e textura da superfície. Observa-se também que a superfície com maior predominância dos picos salientes, S_{mr1} maior, apresentou menor durabilidade, semelhante as superfícies dos pistões. Além disso, pode-se observar que essas superfícies foram as que apresentaram menor cobertura das partículas dentre os dois últimos casos. Na superfície com maior durabilidade, as poucas partículas de grafite que podem ser observadas apresentam-se aglomeradas em algumas regiões, enquanto que, no segundo caso, poucas partículas podem ser observadas em algumas regiões. No entanto, a resistência ao contato para o caso à esquerda apresentou valores relativamente altos quanto comparados aos outros ensaios.

Figura 69 - Resultados dos ensaios tribológicos de durabilidade para os mancais utilizando as partículas de grafite.



Fonte: Autora.

Semelhante ao discutido na Tabela 6 para os pistões, a Tabela 7 foi obtida desconsiderando a influência das partículas lubrificantes e analisando a variação dos parâmetros de superfície discutidos anteriormente. Os parâmetros variaram significativamente, com parâmetros superiores aos observados nas superfícies dos pistões. A superfície com maior durabilidade apresentou picos mais altos e vales mais profundos em relação à superfície com menor durabilidade, diferentemente do observado na Tabela 6. Neste caso, considerando os bons resultados durante o deslizamento, o fornecimento do lubrificante na região de contato aparentemente não foi prejudicado pela textura da superfície (picos elevados e vales profundos). Em relação a direção da textura das superfícies, estas características das superfícies apresentaram melhores durabilidades com inclinações em cerca de 10° , valores estes próximos ao caso de melhor durabilidade discutido nas superfícies dos pistões.

Tabela 7 - Variação dos parâmetros para o caso de maior e menor durabilidade entre os mancais.

Parâmetros	Melhor durabilidade	Pior durabilidade
S_{ku} (μm)	6,73	3,98
S_p (μm)	19,43	10,83
S_v (μm)	8,42	5,61
S_z (μm)	27,85	16,45
S_{al} (μm)	148,42	156,46
S_{td} ($^\circ$)	10,35	7,36
S_{dr} (%)	10,15	10,99
S_{mr1} (%)	13,15	13,77
S_{mr2} (%)	89,00	89,83

Fonte: Autora.

A Tabela 8 apresenta um agrupamento dos parâmetros observados nas Tabelas Tabela 6 e Tabela 7, com intuito de observar as variações entre as peças. Não é possível observar uma tendência dos resultados com a variação da textura da superfície, entretanto, maiores valores dos parâmetros analisados são observados para a superfície do mancal com melhor durabilidade, o que indicaria que uma superfície com textura mais pronunciada se comportou melhor em relação ao processo de deslizamento.

Tabela 8 – Análise dos parâmetros para o caso de melhor e pior durabilidade nas superfícies dos mancais e pistões.

Parâmetros	Mancais	Pistões	Mancais	Pistões
	Melhor durabilidade	Melhor durabilidade	Pior durabilidade	Pior durabilidade
S_{ku} (μm)	6,73	3,99	3,98	4,09
S_p (μm)	19,43	5,85	10,83	7,51
S_v (μm)	8,42	6,23	5,61	11,85
S_z (μm)	27,85	12,08	16,45	19,36
S_{al} (μm)	148,42	159,93	156,46	158,15
S_{td} ($^\circ$)	10,35	9,26	7,36	42,76
S_{dr} (%)	10,15	3,76	10,99	4,89
S_{mr1} (%)	13,15	10,30	13,77	10,51
S_{mr2} (%)	89,00	83,94	89,83	82,62

Fonte: Autora.

Para avaliar o comportamento tribológico das peças com relação com as partículas, avaliou-se os resultados referentes a melhor durabilidade para cada peça, mancal e pistão, em relação as partículas utilizadas, conforme Tabela 9. A tabela apresenta os valores dos diâmetros médios das partículas a critério de comparação. De acordo com os resultados discutidos previamente, a maior média em relação a durabilidade do deslizamento corresponde às partículas de CDC com o uso do mancal. O CDC possui um diâmetro médio intermediário em relação as demais partículas. O maior valor de durabilidade foi alcançado com a partícula de grafeno, maior diâmetro médio, utilizando as superfícies dos mancais. De modo geral, os piores resultados foram obtidos ao se utilizar as superfícies dos pistões com as três partículas.

Para as superfícies dos mancais, valores similares dos parâmetros foram obtidos para as partículas de CDC e grafeno, entretanto, observou-se que a superfície com grafeno apresentou maior valor de S_v , S_z e S_{td} , indicando uma superfície com maior profundidade dos vales e maior inclinação das texturas. Em relação a superfície do mancal com grafite, menores valores de S_p , S_{dr} , S_{mr1} e S_{mr2} foram obtidos em relação às superfícies do mancal com CDC e grafeno, indicando uma superfície com menores picos.

Com relação aos pistões, resultados divergentes foram obtidos, uma vez que as melhores durabilidades foram alcançadas com as partículas de grafite. As superfícies dos pistões apresentam, de modo geral, menores valores dos parâmetros discutidos, indicando uma superfície com texturas mais suaves, menores valores de curtose e maior predominância dos vales em relação aos picos. Dentre as superfícies dos pistões, a maior média das durabilidades foi alcançada utilizando as partículas de grafite, que possuem menor diâmetro médio.

De modo geral, observa-se que as maiores partículas, CDC e grafeno, apresentaram melhores resultados em superfícies com maior definição das texturas, enquanto que, a partícula de grafite, se comportou melhor ao se utilizar superfícies com texturas menos definidas, tanto para o pistão quanto para o mancal testado.

Tabela 9 - Análise dos parâmetros para o caso de melhor durabilidade nas superfícies dos mancais e pistões em relação as partículas utilizadas.

Parâmetros	CDC ($D_m = 1,66 \mu\text{m}$)		Grafeno ($D_m = 1,99 \mu\text{m}$)		Grafite ($D_m = 1 \mu\text{m}$)	
	Melhor Durabilidade (Mancais)	Melhor Durabilidade (Pistões)	Melhor Durabilidade (Mancais)	Melhor Durabilidade (Pistões)	Melhor Durabilidade (Mancais)	Melhor Durabilidade (Pistões)
S_{ku} (μm)	5,59	5,03	6,73	4,07	5,02	3,99
S_p (μm)	19,74	7,77	19,43	5,68	12,07	5,85
S_v (μm)	3,42	14,66	8,42	7,51	7,59	6,23
S_z (μm)	23,14	22,42	27,85	13,19	19,66	12,08
S_{al} (μm)	154,60	79,20	148,42	87,40	156,07	159,93
S_{td} ($^\circ$)	7,64	7,62	10,35	5,25	7,62	9,26
S_{dr} (%)	12,19	4,55	10,15	4,48	7,28	3,76
S_{mr1} (%)	13,48	8,92	13,15	10,54	10,86	10,30
S_{mr2} (%)	90,30	86,17	89,00	84,70	86,12	83,94

Fonte: Autora.

Para avaliar a variação dos resultados quanto ao desempenho tribológicos no geral, considerou-se as superfícies, dentre as 15 avaliadas para cada material, que obtiveram resultados favoráveis. Para isso, considerou-se as superfícies que apresentaram valores de durabilidade acima de 60% da média. Os resultados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Quantitativo de resultados dos ensaios de durabilidade que se mantiveram acima de 60% da média.

Pistões			
	CDC	GRAFENO	GRAFITE
Alta durabilidade	4	4	4
Mancais			
	CDC	GRAFENO	GRAFITE
Alta durabilidade	4	3	3

Fonte: Autora.

Realizando uma comparação com trabalhos existentes na área, observou-se que os resultados alcançados pelos mancais se assemelham aos resultados obtidos pela superfície com topografia #600 ($S_q = 0,10$, $S_{vk} = 0,22 \mu\text{m}$ e $S_{dq} = 0,11 \mu\text{m}$), avaliada pelo Giacomelli (2020). No qual, com o uso do CDC obteve-se durabilidade igual a 3285 Nm e 2107 Nm, para 5 e 10 aplicações, e com o uso do grafeno obteve-se 2893 Nm e 1995 Nm, com 5 e 10 aplicações. Para as superfícies dos pistões, tais valores de durabilidade foram observados em dois casos: (i) o

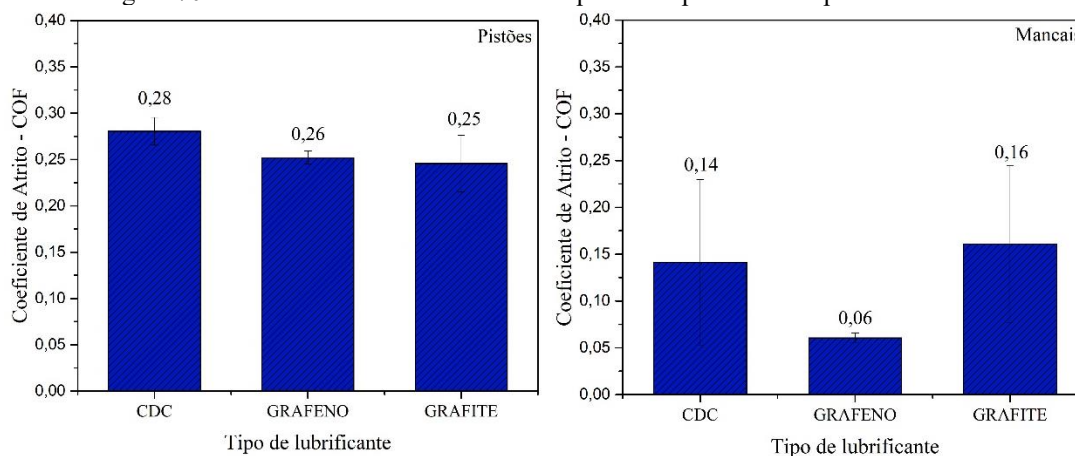
primeiro referente a topografia de #600 com 1 aplicação de CDC (404 Nm) e grafeno (502 Nm), e (ii) para as superfícies de topografia #220 ($S_q = 0,43$, $S_{vk} = 0,74 \mu\text{m}$ e $S_{dq} = 0,33 \mu\text{m}$), que obtiveram valores médios iguais a 364 Nm para 10 aplicações. Entretanto, nenhuma das superfícies alcançaram os resultados referentes a topografia de #320 ($S_q = 0,36$, $S_{vk} = 0,59 \mu\text{m}$ e $S_{dq} = 0,33 \mu\text{m}$), que alcançou durabilidades médias iguais a 30734 Nm para 10 aplicações.

Rivera (2020) avaliou partículas de grafite com 1,10 μm , 6,07 μm e 21,54 μm impregnadas em um material sinterizado. As partículas desempenharam uma alta performance tribológica, com destaque a partícula de grafite 1,10 μm , que atingiu uma durabilidade média igual a 11000 Nm. Utilizando um método similar de impregnação em material sinterizado Neves (2020) obteve durabilidade de até 12940 Nm utilizando partículas de CDC. Diferente do compreendido nestes casos, no presente trabalho as partículas foram depositadas na superfície do material, o que limita o estoque de lubrificante ao longo do deslizamento.

4.4.2 Ensaios de Carga Constante

Os ensaios de carga constante para as superfícies dos pistões apresentaram resultados de coeficientes de atritos similares para as três partículas utilizadas, com valores médios de 0,25, 0,26 e 0,28 para o grafite, grafeno e CDC, seguindo a mesma tendência que os resultados de durabilidade, conforme apresentado na Figura 70. Os mancais apresentaram COF inferiores aos dos pistões em todos os casos, com valores médios iguais a 0,14, 0,06 e 0,16 para as partículas de CDC, grafeno e grafite, respectivamente. Divergindo dos valores de durabilidade, os melhores resultados foram apresentados com o uso de grafeno. Apesar do grafeno apresentar valores de COF baixos em algumas superfícies, a alta variação desse caso resultaram em uma média alta dos valores, se assemelhando a média com o uso do grafite.

Figura 70 – Média dos coeficientes de atrito para as superfícies dos pistões e mancais.



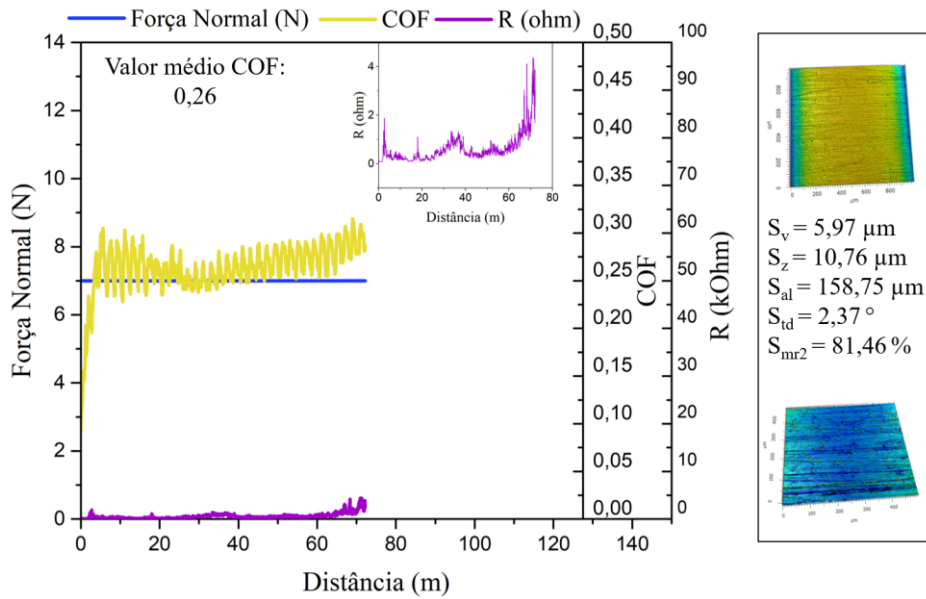
Fonte: Autora.

Na Figura 71, Figura 72 e Figura 73 são apresentados os resultados dos ensaios de carga constante com menor COF para as superfícies dos pistões com aplicações de CDC, grafeno e grafite. Na lateral da figura são apresentadas as visualizações 3D da superfície antes do ensaio, com e sem partícula, e alguns principais parâmetros de rugosidade são expostos.

Observa-se que a superfície com maior COF foi a que apresentou uma variação maior dos parâmetros de rugosidade. Para a superfície com menor COF, os parâmetros que podem ter influenciado na atuação das partículas foram o S_{al} e S_{td} .

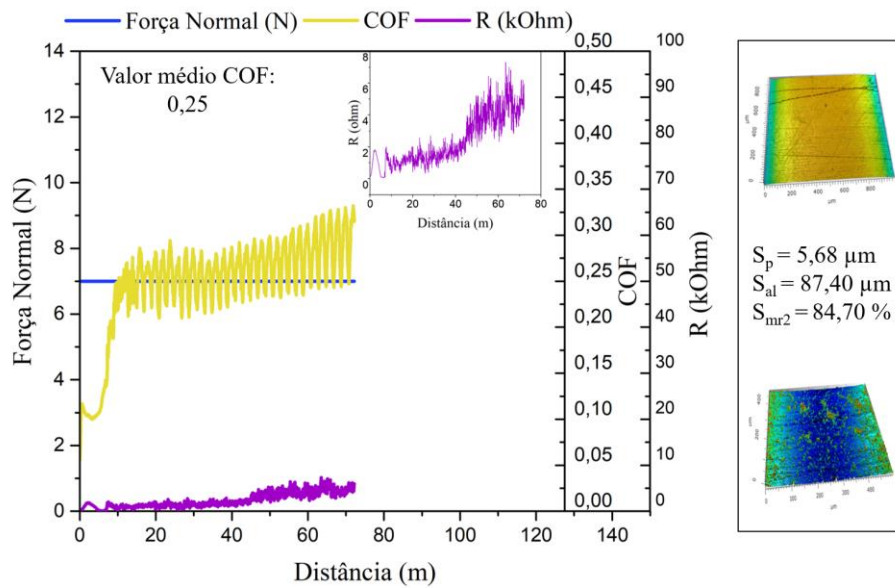
Para as superfícies com aplicações de grafeno e grafite, similar ao ensaio de durabilidade, as partículas estão em maior quantidade que o caso com CDC, e com uma aglomeração do grafeno nas superfícies. Além disso, pode-se observar que com o uso destas duas partículas, grafeno e grafite, o COF manteve-se em valores baixos por maior distância, sendo essa maior com o uso do grafite. Essa característica deve-se a maior durabilidade das tribocamadas formadas e a degradação ocorre na região de transição da curva do COF, local onde inicia o aumento coeficiente. Observa-se que na Figura 73, a resistência elétrica ao contato se mantém em valores superiores quando o COF apresenta baixos valores, comportamento similar ao apresentado pelas superfícies dos mancais.

Figura 71 - Resultados dos ensaios tribológicos de carga constante para os pistões utilizando as partículas de CDC.



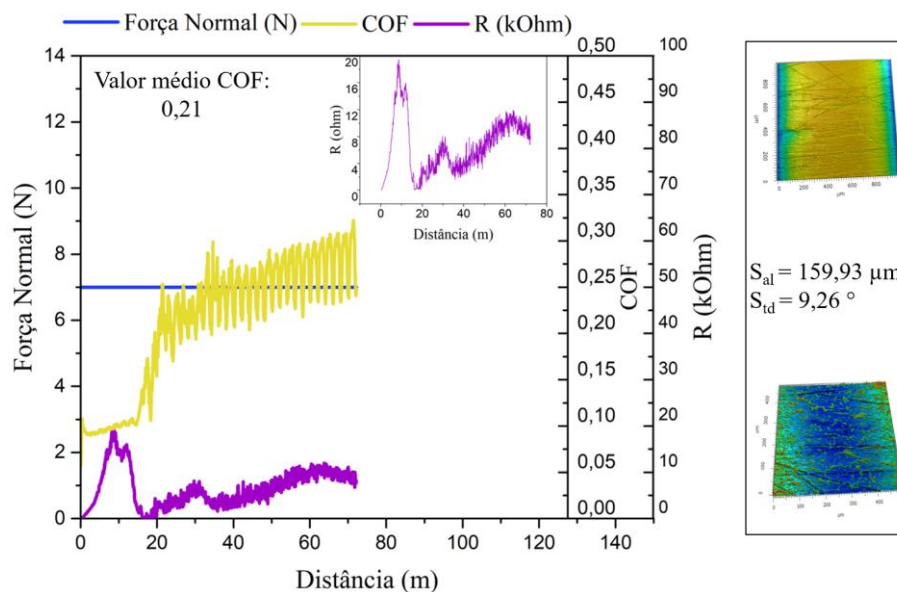
Fonte: Autora.

Figura 72 - Resultados dos ensaios tribológicos de carga constante para os pistões utilizando as partículas de grafeno.



Fonte: Autora.

Figura 73 - Resultados dos ensaios tribológicos de carga constante para os pistões utilizando as partículas de grafite.



Fonte: Autora.

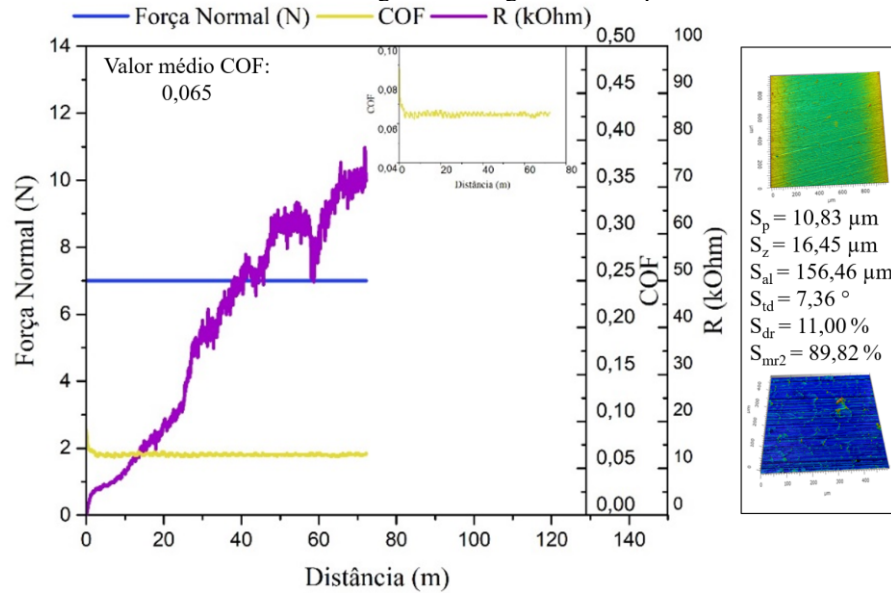
Nas figuras Figura 74, Figura 75 e Figura 76 são apresentados os casos em que os menores COF foram obtidos para as superfícies dos mancais com CDC, grafeno e grafite, bem como as superfícies 3D e os parâmetros de rugosidade.

Para as superfícies em que foram utilizadas partículas de CDC, pode-se observar que a quantidade de partículas na superfície é inferior em relação aos outros tipos de partículas. Entretanto, vale salientar que essa região não representa toda a faixa de deslizamento, e conforme já discutido aqui, a quantidade das partículas de CDC ao longo dos cilindros é superior, o que justificaria o valor do COF baixo.

Parâmetros similares aparecem em destaque para as figuras em análises. Com destaque aos parâmetros S_z , S_{al} e S_{td} que possuem valores próximos para os dois casos com menores COF, o CDC e grafeno.

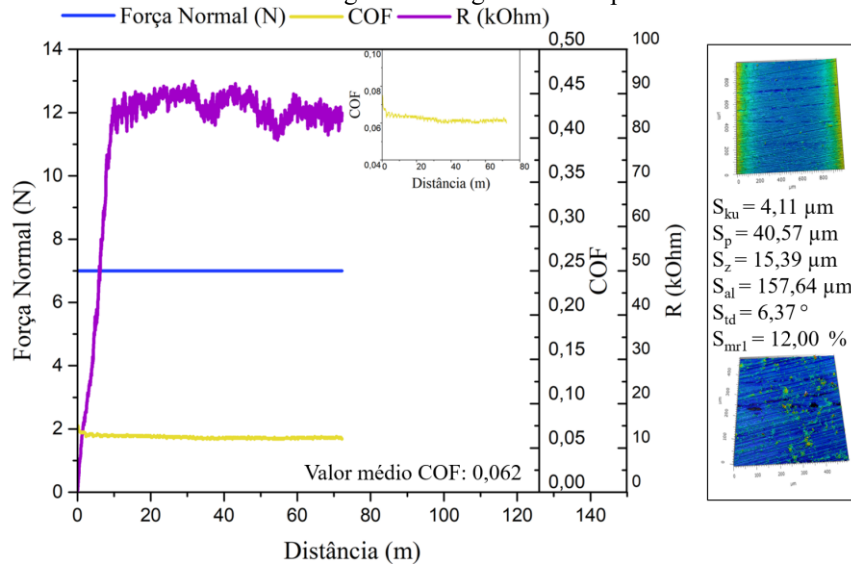
Os valores de resistência ao contato mantiveram-se em níveis altos com o uso do CDC e grafeno até o fim do deslizamento, o que indica uma alta durabilidade da tribocamada que contribuiu para manter o COF em valores baixos. Para a superfície do grafite, a tribocamada resistiu até metade do deslizamento e, logo após a redução da resistência ao contato, os valores do COF de atrito aumentaram consideravelmente.

Figura 74 - Resultados dos ensaios tribológicos de carga constante para os mancais utilizando CDC.



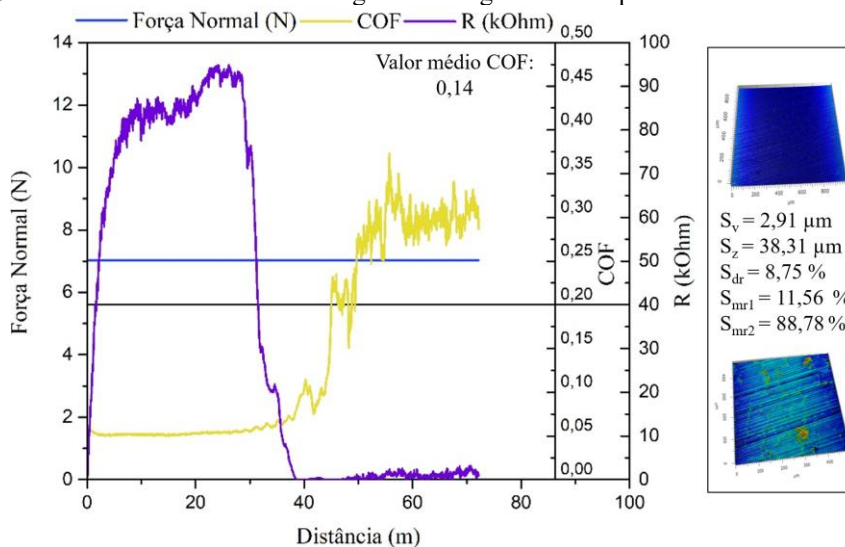
Fonte: Autora.

Figura 75 - Resultados dos ensaios tribológicos de carga constante para os mancais utilizando grafeno.



Fonte: Autora.

Figura 76 - Resultados dos ensaios tribológicos de carga constante para os mancais utilizando grafite.



Fonte: Autora.

Os valores referentes aos COF possuem resultados próximos aos obtidos por trabalhos semelhantes, já descritos anteriormente. No trabalho do Giacomelli (2020), o menor valor médio do COF foi de 0,08 para 5 e 10 aplicações de grafeno nas superfícies com topografia #320 ($S_q = 0,36$, $S_{vk} = 0,59 \mu\text{m}$ e $S_{dq} = 0,33 \mu\text{m}$). Nas aplicações de CDC, em 5 e 10 vezes, o COF médio obtido foi igual a 0,11, com a mesma superfície. Os maiores valores dos COF foram alcançados nos casos em que ocorreram 1 aplicação, resultando em 0,26 para o grafeno e 0,363 para o CDC.

Para os trabalhos com partículas impregnadas em um material sinterizado, os valores alcançados pelos autores foram semelhantes. Rivera (2020) obteve um COF igual a 0,06 para partículas de grafite de $1,10 \mu\text{m}$. Neves (2020) obteve para os ensaios de carga constante com CDC o menor COF próximo a 0,09 e o maior próximo a 0,17, com a variação da temperatura de sinterização.

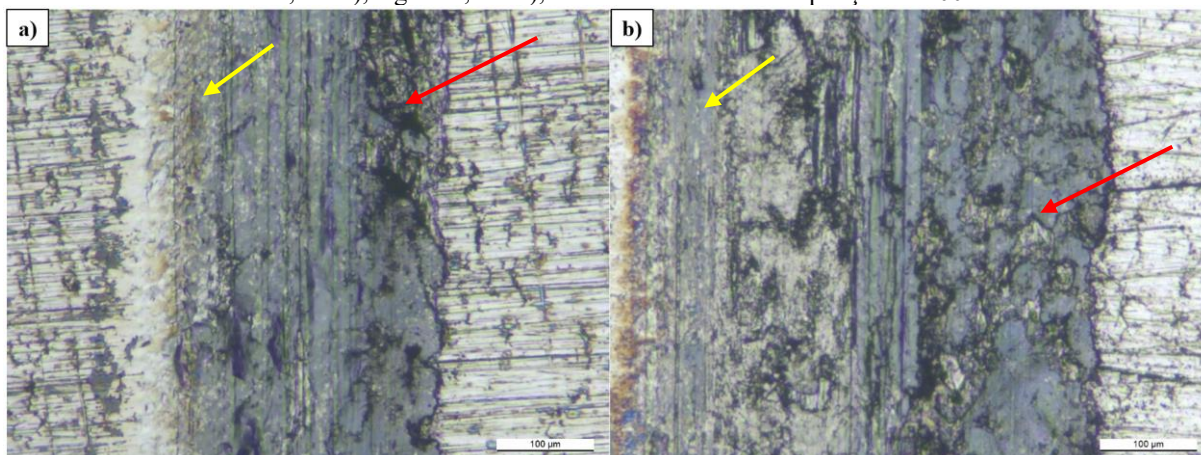
Em Arena (2018), o autor realizou uma texturização a laser para obtenção de ranhuras cruzadas e combinou com aplicações de grafeno (250 nm) e dissulfeto de molibdênio ($\text{MoS}_2 - 2 \mu\text{m}$). Ensaios tribológicos foram realizados para atestar a eficiência dos lubrificantes sólidos e resultaram em um COF médio de 0,2 para as partículas de grafeno com ranhuras cruzadas com 45° de inclinação. Segundo Bhushan (2000), os valores dos coeficientes de atrito, medidos em aplicações de materiais sólidos como lubrificante, tem valores típicos de 0,07 a 0,5 para o grafite e 0,05 a 0,3 para materiais sólidos derivados do carbono, indicando valores similares ao alcançados no presente trabalho.

4.5 CARACTERIZAÇÕES DAS SUPERFÍCIES DE DESGASTE

Nesta seção serão apresentados os resultados das caracterizações após ensaios tribológicos. As regiões desgastadas pelos ensaios de carga variada e constante para ambas as superfícies foram caracterizadas por MO, MEV e interferometria óptica de luz branca para avaliar os níveis de desgaste, deformações, tribocamadas e outras características.

Na Figura 77 são apresentadas duas regiões desgastadas pelos processos de carga variada das superfícies dos pistões. Em a), referente ao uso do CDC, em uma região com baixa durabilidade, enquanto que, em b), a região é referente ao uso do grafite, que obteve maior durabilidade. Pode-se observar que a região em b) é maior que a região em a), a consequência disso deve-se ao fato que b) suportou maior distância de deslizamento e maiores incrementos de carga. Apesar disso, ambas as regiões possuem aparência similar, com regiões deformadas plasticamente (seta em vermelho) e abrasões (seta em amarelo). Em nenhuma das regiões desgastadas é possível observar as texturas das superfícies devido ao alto desgaste apresentado.

Figura 77 – Superfícies dos pistões nas regiões de desgaste para os ensaios de carga variada com aplicações de CDC, em a), e grafite, em b), obtidas via MO com ampliação de 100 x.

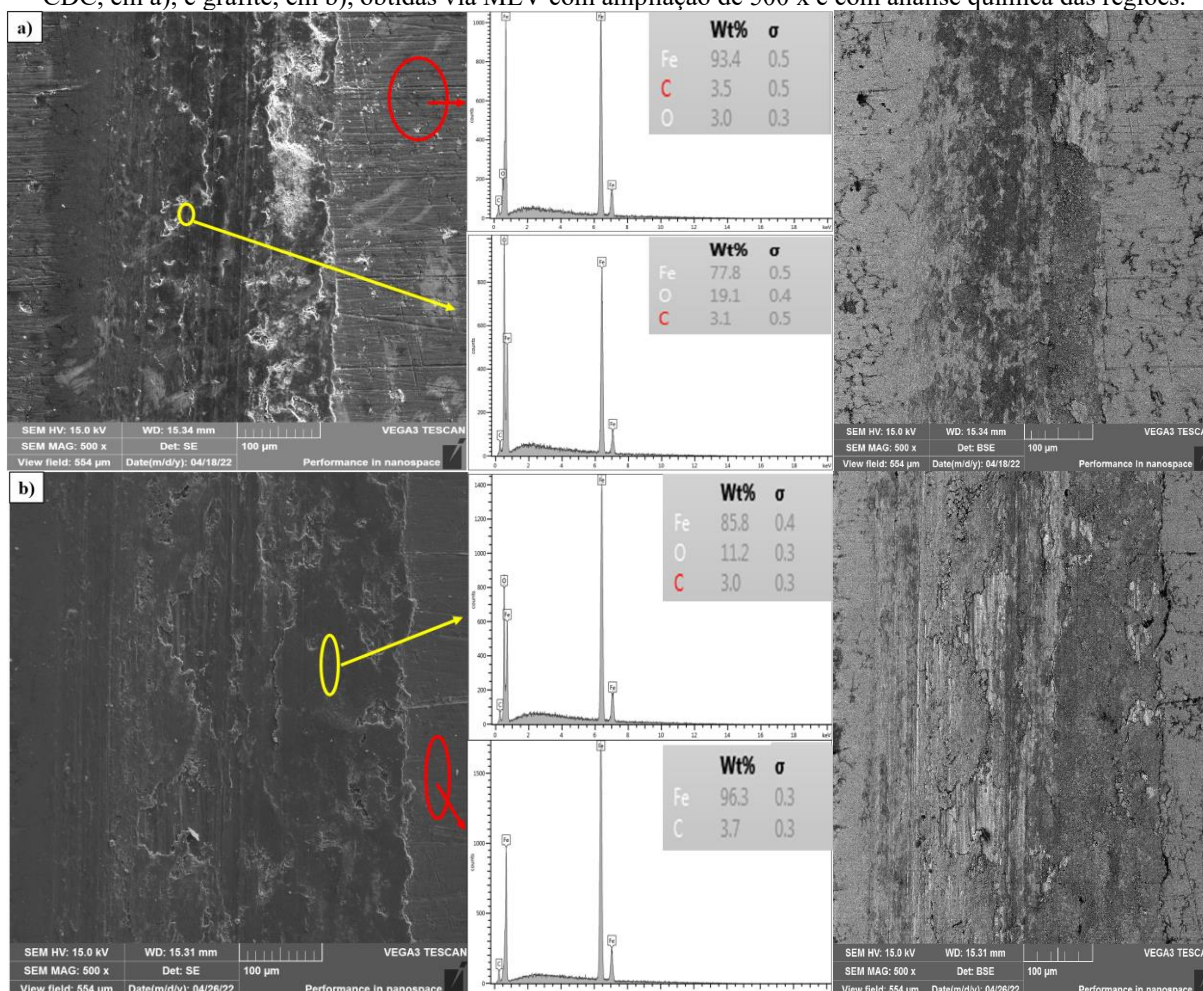


Fonte: Autora.

Para visualizar a formação de camadas de óxidos nas superfícies, análises por MEV foram obtidas e análises químicas foram realizadas em algumas regiões. As mesmas superfícies analisadas em Figura 77 são apresentadas na Figura 78. Duas análises químicas foram realizadas, na região fora do desgaste e na região desgastada, para observar as variações destas

regiões. Em ambas é possível observar a formação de óxidos nas regiões desgastadas, com camadas mais desgastada em a) e camadas mais uniformes ao longo de b).

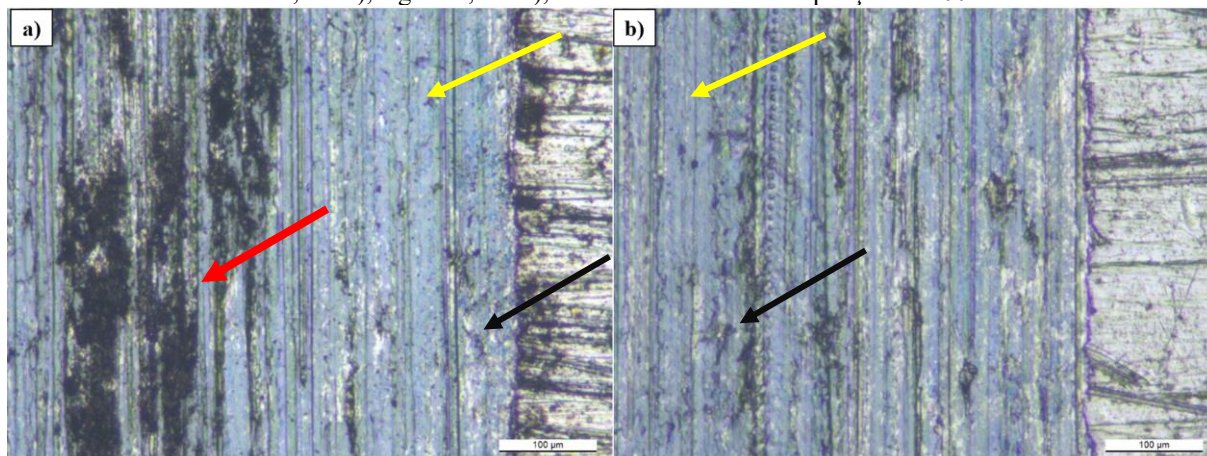
Figura 78 - Superfícies dos pistões nas regiões de desgaste para os ensaios de carga variada com aplicações de CDC, em a), e grafite, em b), obtidas via MEV com ampliação de 500 x e com análise química das regiões.



Fonte: Autora.

Para os ensaios de carga constante, duas superfícies desgastadas com CDC e grafite são apresentadas na Figura 79. Nota-se que o desgaste em ambas as regiões possui características similares, corroborando com os valores similares do COF que foram observados anteriormente. A principal diferença observada deve-se a região mais escura (seta vermelha) que aparenta ser partículas de desgaste que não foram totalmente removidas durante a lavagem. Ambas regiões apresentam sinais de desgaste abrasivo (seta amarela) ao longo da pista de desgaste e algumas deformações plásticas (seta preta).

Figura 79 - Superfícies dos pistões nas regiões de desgaste para os ensaios de carga constante com aplicações de CDC, em a), e grafite, em b), obtidas via MO com ampliação de 100 x.

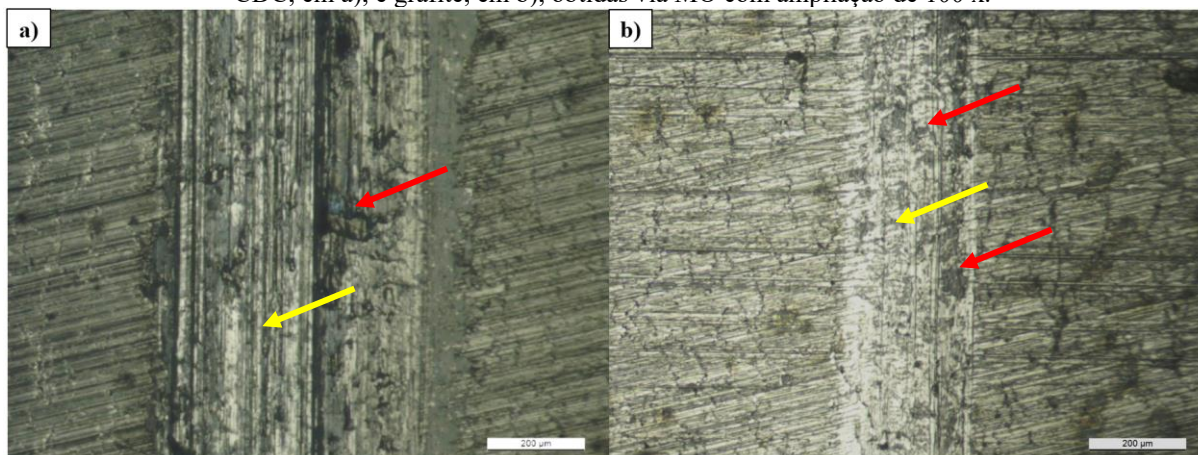


Fonte: Autora.

As superfícies dos mancais apresentaram valores de durabilidade maiores e menores valores de COF durante os ensaios de carga variada e constante, conforme já discutido. Devido a isso, é possível observar algumas variações significativas nas pistas de desgaste para diferentes regiões em relação às superfícies dos pistões.

Na Figura 80 são apresentadas duas regiões dos mancais referentes aos ensaios com CDC, em a), com maior durabilidade, e grafite, em b), com menor durabilidade. Na região de maior durabilidade, e que conseqüentemente suportou maior incremento de carga, observa-se uma faixa de desgaste com largura consideravelmente maior que o caso em b). Um maior desgaste também pode ser observado na região a), com algumas deformações plásticas (seta vermelha) e abrasões (seta amarela) em algumas regiões, enquanto que em b), a marca de desgaste aparenta estar mais suave, mas também com algumas deformações e marcas de abrasões.

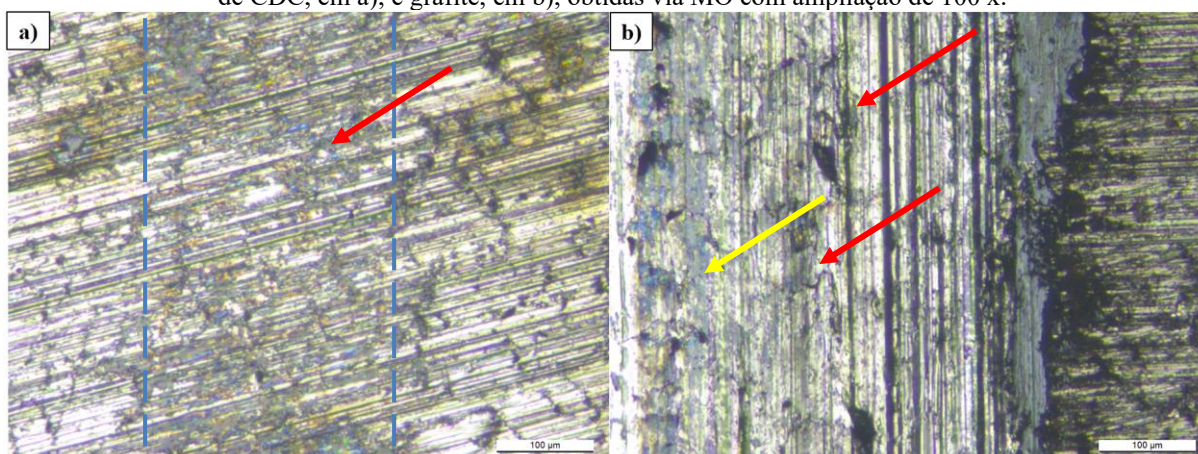
Figura 80 - Superfícies dos mancais nas regiões de desgaste para os ensaios de carga variada com aplicações de CDC, em a), e grafite, em b), obtidas via MO com ampliação de 100 x.



Fonte: Autora.

Para os ensaios de carga constante, algumas regiões apresentaram um desgaste tão baixo que a faixa de desgaste se torna imperceptível em relação a uma região com alto desgaste, conforme pode ser observado na Figura 81. Em a), é representada a região com baixo desgaste, em que as ranhuras das superfícies permanecem inalteradas, apesar de possuir algumas deformações (seta vermelha) na região. Enquanto que, na região b), o desgaste é notavelmente maior, com maiores regiões com deformações e algumas marcas de abrasões (seta amarela). Na região b) não é mais possível observar as ranhuras da superfície.

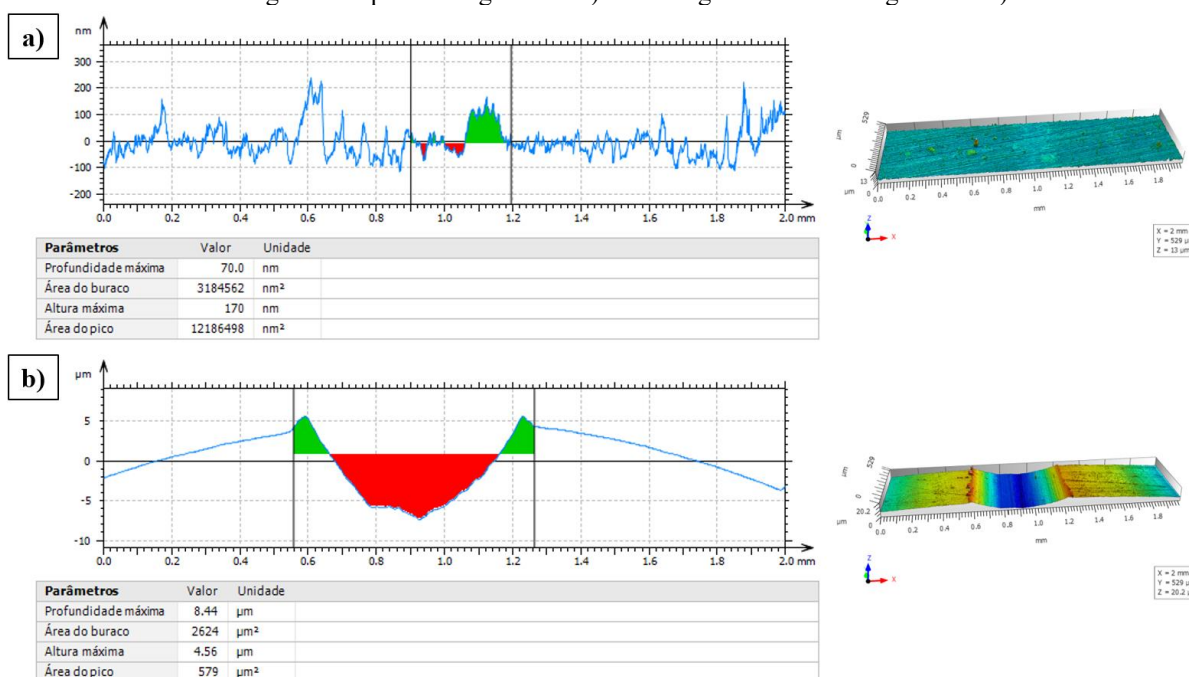
Figura 81 - Superfícies dos mancais nas regiões de desgaste para os ensaios de carga constante com aplicações de CDC, em a), e grafite, em b), obtidas via MO com ampliação de 100 x.



Fonte: Autora.

Para a análise do volume desgastado, as superfícies foram avaliadas por interferometria óptica de luz branca. Os resultados de perfilometria não puderam ser computados pois, devido algumas superfícies apresentarem um baixo desgaste, não era possível determinar no perfil a região desgastada e, desta forma, computar os valores de área desgastada. Já com a interferometria, a projeção 3D da região desgastada permitiu obter a posição da região desgastada, conforme fica evidenciado na Figura 82. Nesta figura é possível observar que a região desgastada em a) possui maior acúmulo de material, o que não é facilmente detectado em comparação com a representação 3D à direita. Enquanto que, para um alto desgaste, como em b), a região é facilmente detectada apenas com o uso do perfil da superfície, a região 3D serviu apenas para confirmar os resultados.

Figura 82 – Ferramenta utilizada para obtenção dos valores de área desgastada no software *MountainsMap*, com uma região com pouco desgaste em a) e uma região com alto desgaste em b).

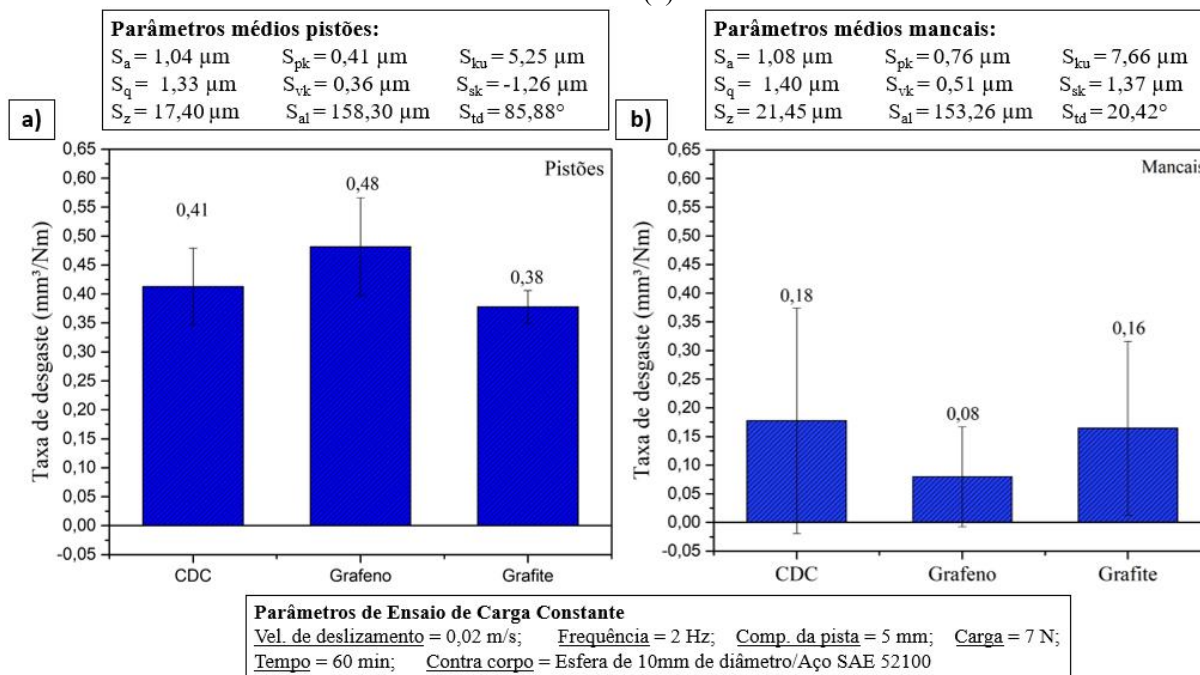


Fonte: Autora.

O volume das superfícies desgastadas foi medido, e a partir dos dados obteve-se a taxa de desgaste das superfícies para cada partícula utilizada, conforme apresentado na Figura 83. Nota-se que os valores para as superfícies dos pistões possuem valores altos em relação à superfície dos mancais. Os resultados dos mancais possuem um desvio padrão relativamente alto e, em alguns casos, os valores medidos da taxa de desgaste apresentaram um desvio negativo. Uma possível causa que pode ser elencada para este comportamento, é que estas

superfícies podem ter apresentado baixo desgaste, além de ter apresentado algum acúmulo de material nas superfícies, como debris ou partículas de lubrificantes.

Figura 83 – Taxa de desgaste, mm^3/Nm , para os ensaios de carga constante nas superfícies dos pistões (a) e mancais (b).



Fonte: Autora.

5 CONCLUSÃO

Na realização da pesquisa com a metodologia proposta e os resultados obtidos, as seguintes conclusões foram obtidas:

As superfícies dos pistões não possuíam textura homogênea ao longo do corpo do cilindro, com alta predominância de riscos/sulcos em todas as direções e crateras na superfície. Além disso, a superfície é caracterizada por vales e picos mais protrusos, com maior predominância de vales. Observou-se que o processo de usinagem prejudicou a integridade da superfície e, por conseguinte, o seu desempenho tribológico.

As superfícies dos mancais, por outro lado, são caracterizadas por vales e picos menos protrusos, mas com maior predominância dos picos. Por outro lado, há nestas superfícies a presença de indicação que sofreram elevadas deformações plásticas durante os processos de usinagem, que resultaram em arranque de grafita e o fenômeno *blechmantel*.

Para os ensaios tribológicos de durabilidade, observou-se a influência da combinação superfície/partícula utilizada. Para as superfícies dos pistões, a menor média das durabilidades foi obtida com o uso das partículas de CDC, que resultou em 29 Nm de deslizamento. O melhor resultado de durabilidade, valor médio, foi obtido com o uso de partículas de grafite, que resultaram em 293 Nm. Os maiores valores de durabilidade resultaram das superfícies que possuíam maiores valores de S_{al} e S_{td} .

Na análise geral, a superfície com menor durabilidade apresentou maior altura dos picos e vales mais profundos em relação a superfície com maior durabilidade. Além de que, uma menor inclinação das texturas, em relação a direção perpendicular de deslizamento, pode ter influenciado positivamente na atuação das partículas.

Para as superfícies dos mancais, o menor valor médio de durabilidade foi obtido utilizando as partículas de grafite, com média igual a 1062 Nm. Enquanto que, o maior valor médio de durabilidades foi obtido com o uso do CDC, que gerou o valor igual 2372 Nm. Além disso, com o uso do CDC, observou-se que

menores frequência das texturas, maior valor de S_{al} , e menores inclinações das texturas, S_{td} , apresentaram melhores resultado de durabilidade.

Com uma análise geral acerca das superfícies dos mancais, observou-se que maior altura dos picos e vales mais profundos favorecem a obtenção de maior durabilidade. Com isso, conclui-se que altura dos picos não prejudicou o fornecimento do lubrificante na região de contato.

Uma análise comparando a atuação dos pistões e mancais, indicou que maiores valores dos parâmetros analisados (S_{ku} , S_p , S_v , S_z , S_{dr} , S_{mr1} e S_{mr2}) são observados para a superfície do mancal com melhor durabilidade, o que indicaria que uma superfície com textura mais pronunciada se comportou melhor em relação ao processo de deslizamento.

Os ensaios de carga constante seguiram uma tendência similar ao discutido para os ensaios de durabilidade. Para as superfícies dos pistões, as médias dos COF para as partículas de grafite, grafeno e CDC foram 0,25; 0,26 e 0,28. Para a superfície com menor COF (uso do grafite), os parâmetros que podem ter influenciado na atuação das partículas foram o S_{al} e S_{td} .

Para as superfícies dos mancais, as médias dos COF foram 0,14; 0,07 e 0,16 para as partículas de CDC, grafeno e grafite. Os parâmetros S_z , S_{al} e S_{td} apresentaram valores próximos para os dois casos com menores COF, o CDC e grafeno, e com isso conclui-se que estes podem ter influenciado na atuação das partículas.

As caracterizações pós ensaios tribológicos revelaram que para as superfícies dos pistões, as regiões com maior e menor durabilidade possuem características similares, com regiões deformadas plasticamente e marcas de desgaste abrasivo, com variação apenas em relação à largura das regiões desgastadas, que era maior para o caso de maior durabilidade.

Em relação aos ensaios de carga constante, devido às superfícies dos pistões apresentarem valores similares de COF, isso refletiu nas caracterizações das regiões desgastadas dos casos de maior e menor COF. Ambas as superfícies apresentaram características similares, com algumas abrasões e deformações plásticas ao longo da faixa de desgaste. Em nenhuma das regiões desgastadas é

possível observar as texturas das superfícies devido ao alto desgaste apresentado.

Para os casos de maior e menor durabilidade nas superfícies dos mancais, observou-se que a região de maior durabilidade possui uma faixa de desgaste com largura maior que o caso com menor durabilidade. Um maior desgaste também pode ser observado neste caso, com algumas deformações plásticas e abrasões, enquanto que o caso de menor durabilidade apresentaram uma marca de desgaste mais suave, mas também com algumas deformações e abrasões.

Para os ensaios de carga constante, nos casos em que se obteve COF baixos a marca de desgaste é imperceptível, devido ao baixo desgaste na região. Além disso, observou-se que a região com baixo desgaste, as ranhuras permaneceram inalteradas. Enquanto que, com o alto COF, o desgaste é notavelmente maior, com maiores regiões com deformações e algumas abrasões.

A partícula de CDC possui um diâmetro médio intermediário em relação as demais partículas. O maior valor de durabilidade foi alcançado com a partícula de grafeno, maior diâmetro médio, utilizando as superfícies dos mancais.

De modo geral, os piores resultados foram obtidos ao se utilizar as superfícies dos pistões com as três partículas. Observou-se que as maiores partículas, CDC e grafeno, apresentaram melhores resultados em superfícies com maior definição das texturas, enquanto que, a partícula de grafite, se comportou melhor ao se utilizar superfícies com texturas menos definidas, tanto para o pistão quanto para o mancal testado.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros podem ser elencadas:

Encontrar um método de deposição de partículas em superfícies não planas que permita uma distribuição uniforme e semelhante para ambas as superfícies.

Realizar análises variando apenas um dos parâmetros para corroborar com os resultados obtidos.

Realizar um modelo que permita avaliar a variação isolada dos parâmetros (S_{ku} , S_p , S_v , S_z , S_{dr} , S_{mr1} e S_{mr2}).

Realizar ensaio de corpo e contra corpo em um protótipo pistão e mancal;

Caracterizar a molhabilidade da superfície com o lubrificante com as partículas.

Avaliar texturas determinísticas e o seu efeito no COF e durabilidade.

REFERÊNCIAS

ANDERSSON, P.; KOSKINEN, J.; VARJUS, S.; GERBIG, Y.; HAEFKE, H.; GEORGIU, S.; ZHMUD, B.; BUSS, W. Microlubrication effect by laser-textured steel surfaces. **Wear**, v. 262, n. 3-4, p. 369-379, fev. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002. 18 p.

ARENAS, M. A.; AHUIR-TORRES, J.L.; GARCÍA, L.; CARVAJAL, H.; DE DAMBORENEA, J. Tribological behaviour of laser textured Ti6Al4V alloy coated with MoS₂ and graphene. **Tribology International**, v. 128, p. 240-247, dez. 2018.

BENDO, T.; HERMANN, M. L.; SALVARO, D. B.; BINDER, C.; HAMMES, G.; DE MELLO, J. D. B.; KLEIN, A. N. Surface Mo-Enrichment and Plasma Carburizing on Sintered Iron: microstructure and tribological properties. **Journal Of Materials Engineering And Performance**, v. 29, n. 6, p. 3723-3735, jun. 2020.

BERMAN, D.; ERDEMIR, A.; SUMANT, A. V. Graphene: a new emerging lubricant. **Materials Today**, v. 17, n. 1, p. 31-42, jan. 2014.

BORDIGNON, R.; SALVARO, D. B.; BINDER, C.; KLEIN, A. N.; DRAGO, V.; DE MELLO, J. D. B. Tribological Behaviour of Plasma-Functionalized Graphene as Low-Viscosity Oil Additive. **Tribology Letters**, v. 66, n. 3, p. 1-14, 2 ago. 2018.

BHUSHAN, Bharat (ed.). **Modern Tribology Handbook**: principles of tribology. Ohio: Crc Press Llc, 2000. 1728 p. (ISBN 0-8493-8403-6).

CALLISTER Jr., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2016. 910 p. Tradução de: Sergio Murilo Stamile Soares.

CHANG, S-H.; FARRIS, T. N.; CHANDRASEKAR, S. Experimental analysis on evolution of superfinished surface texture. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 203, n. 1-3, p. 365-371, jul. 2008.

CHEN, B.; BI, Q.; YANG, J.; XIA, Y.; HAO, J. Tribological properties of solid lubricants (graphite, h-BN) for Cu-based P/M friction composites. **Tribology International**, v. 41, n. 12, p. 1145-1152, dez. 2008.

CHEN, F. X.; MAI, Y.; XIAO, Q.; CAI, G.; ZHANG, L.; LIU, C.; JIE, X. Three-dimensional graphene nanosheet films towards high performance solid lubricants. **Applied Surface Science**, v. 467-468, p. 30-36, fev. 2019.

CHUN, Y. S.; LIM, D. S. Carbide derived carbon: from growth to tribological application. **Journal of The Ceramic Society of Japan**, v. 122, n. 1428, p. 577-585, 2014..

DAVIM, J. P. **Tribology for Engineers: a practical guide**. Elsevier: Woodhead Publishing, 2011. 320 p.

DAWSON, Steve; SCHROEDER, Tom. **Compacted Graphite Iron: a viable alternative**. **Sintercast Technical Publication**, Stockholm, v. 1, n. 1, p. 1-10, jan. 2000.

DIGITAL SURF. **Surface analysis software trusted by the professionals**. Disponível em: <<https://www.digitalsurf.com/software-solutions/profilometry/>>. Acesso em: 28 de março de 2022.

DIMKOVSKI, Z.; ANDERBERG, C.; ROSÉN, B., OHLSSON, R.; THOMAS, T. Quantification of the cold worked material inside the deep honing grooves on cylinder liner surfaces and its effect on wear. **Wear**, v. 267, n. 12, p. 2235-2242, dez. 2009.

EFE, G. Ç.; YENILMEZ, E.; ALTINSOY, I.; TURK, S., BINDAL, C. Characterization of UHMWPE- HAp coating produced by dip coating method on Ti6Al4V alloy. **Surface And Coatings Technology**, v. 418, p. 127091, jul. 2021.

ERDEMIR, A.; KOVALCHENKO, A.; MCNALLAN, M.; WELT, S.; LEE, A.; GOGOTSI, Y.; CARROLL, B. Effects of high-temperature hydrogenation treatment on sliding friction and wear behavior of carbide-derived carbon films. **Surface And Coatings Technology**, v. 188-189, p. 588-593, nov. 2004.

EUROPEAN COMMISSION. Disponível em: <https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-oil_en>. Acesso em: <20 de Julho de 2022>.

FREITAS, M. T. T. **AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA EXERCIDA PELO ESTÁGIO DE VIDA DE UMA FERRAMENTA PRECISOR SOBRE OS ES-FORÇOS DE USINAGEM E QUALIDADE DE FURROS EM FERRO FUNDIDO**. 2018. 161 f. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

FURLAN, K. P.; GONÇALVES, P. DA C.; CONSONI, D. R.; DIAS, M. V. G.; LIMA, G. A.; DE MELLO, J. D. B.; KLEIN, A. N. Metallurgical Aspects of Self-lubricating Composites Containing Graphite and MoS₂. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 26, n. 3, p. 1135-1145, 23 fev. 2017.

GIACOMELLI, R. O. **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TRIBOLÓGICO DE NANOPARTÍCULAS DE GRAFENO E CARBONO DERIVADO DE CARBETOS COMO LUBRIFICANTES SÓLIDOS NA MACROESCALA EM SUPERFÍCIES METÁLICAS**. 2020. 152 f. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

GOLDSTEIN, J. I.; NEWBURRY, D. E.; ECHLIN, P.; JOY, D. C.; LYMAN, C. E.; LIFSHIN, E.; SAWYER, L.; MICHAEL, J. R. **Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis**. 3. ed. Nova York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2003.

GRIFFITHS, Brian. **Manufacturing Surface Technology**: surface integrity e functional performance. London: Penton Press, 2001. 253 p.

GUESSER, W. L.; PEREIRA, F. S.; BOEHS, L. Surface changes during turning of grey cast iron. **Int. J. Machining and Machinability of Materials**, v. 18, n. 3, p. 313-324, jan. 2016.

GUESSER, W. L. **Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2019. 336 p.

HASHIMOTO, F.; YAMAGUCHI, H.; KRANJNIK, P.; WEGENER, K.; CHAUDHARI, R.; HOFFMEISTER, H.; KUSTER, F. Abrasive fine-finishing technology. **Cirp Annals**, v. 65, n. 2, p. 597-620, 2016.

HUTCHINGS, Ian; SHIPWAY, Philip. **Tribology**: friction and wear of engineering materials. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. 386 p.

HOLMBERG, K; ERDERMIR, A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. **Friction**, v. 5, n. 3, p. 263-284, set. 2017.

HOLMBERG, K.; ANDERSSON, P.; ERDERMIR, A. Global energy consumption due to friction in passenger cars. **Tribology International**, v. 47, p. 221-234, mar. 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **BS EN ISO 13565-2:1998**: Geometric Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Surfaces having stratified functional properties - Part 2: Height characterization using linear material ratio curve. 1 ed. UK: British Standards Institution, 1998. 16 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **BS EN ISO 25178-2:2012**: Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters. 1 ed. Uk: British Standards Institution, 2012. 58 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 25178:3**: Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal Part 3: Specification Operators. 1 ed. Switzerland: ISO, 2012. 11 p.

ISMAIL, N. A.; ZULKIFLI, N. W. M.; CHOWDHURY, Z. Z.; JOHAN, M. R. Functionalization of graphene-based materials: effective approach for enhancement of tribological performance as lubricant additives. **Diamond And Related Materials**, v. 115, p. 108357, mai. 2021.

KANDAVEL, T.K.; CHANDRAMOULI, R.; MANOJ, M.; MANOJ, B.; GUPTA, D. K. Influence of copper and molybdenum on dry sliding wear behaviour of sintered plain carbon steel. **Materials & Design**, v. 50, p. 728-736, set. 2013.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 2**: Grinding, Honing, Lapping. RWTH edition. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2009. v. 2, 452 p. Translated by Aaron Kuchle. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-92259-9>>.

KRAHMER, D. M.; EGEEA, A. J. S.; CELENTANO, D.; MARTYNENKO, V.; CRUCHAGA, M. Friction characterization when combining laser surface texturing and graphite-based lubricants. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 2, p. 1759-1767, mar. 2020.

LEACH, Richard (ed.). **Characterisation of Areal Surface Texture**. Teddington: Springer, 2013. 355 p. *E-book*.

MAGSIPOC, Earl; ZHAO, Qi; GRASSELLI, Giovanni. 2D and 3D Roughness Characterization. **Rock Mechanics And Rock Engineering**, v. 53, n. 3, p. 1495-1519, 10 out. 2019.

MALDONADO-CORTÉS, D.; PARÁS, L. P.; SALDANA, V. B.; BANUELOS, J. S. C.; ADAMIAK, M. Synergistic effect on the tribological properties of tool steel through the use of laser surface texturing channels and nanoparticles. **Wear**, v. 426-427, p. 1354-1361, abr. 2019.

MARVIN, R. **Understanding superabrasive bore finishing**. Society of Manufacturing Engineers, Detroit, Apr. 1993. 19 p.

MELENTIEV, R.; KANG, C.; SHEN, G.; FANG, F. Study on surface roughness generated by micro-blasting on Co-Cr-Mo bio-implant. **Wear**, v. 428-429, p. 111-126, jun. 2019.

MELLO, J. D. B. de; BINDER, R. A methodology to determine surface durability in multifunctional coatings applied to soft substrates. **Tribology International**, v. 39, n. 8, p. 769-773, ago. 2006.

NAGEL. **Precidor Tools**. Disponível em: <www.nagel.com>. Acesso em: <27 de outubro de 2021>.

NASSAR, E. J.; CIUFFI, K. J. FILMES DE TITÂNIO-SILÍCIO PREPARADOS POR “SPIN” E “DIP-COATING”. **Quim. Nova**, v. 26, n. 5, p. 674-667, fev. 2003.

NEVES, Guilherme Oliveira. **Síntese de Partículas de Carbono Nanoestruturado Através da Reação entre Carbetos Precursores Distintos**. 2020. 138 f. Programa de pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

OSSILA. **Spin Coating: Complete Guide to Theory and Techniques**. Disponível em: <<https://www.ossila.com/>>. Acesso em: <17 de março de 2022>.

POLAK, A.; GRZYBEK, J. The Mechanism of Changes in the Surface Layer of Grey Cast Iron Automotive Brake Disc. **Materials Research**, v. 8, n. 4, p. 475-479, jul. 2005.

RIVERA, N. I. A. **Effect of the characteristics of pores and solid lubricant on the tribological behaviour of sintered steel impregnated with graphite**. 2020. 218 f. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

ROSENKRANZ, A.; COSTA, H.; BAYKARA, M.; MARTINI, A. Synergetic effects of surface texturing and solid lubricants to tailor friction and wear – A review. **Tribology International**, v. 155, p. 106792, mar. 2021.

SABRI, L.; MANSORI, M. E. Process variability in honing of cylinder liner with vitrified bonded diamond tools. **Surface And Coatings Technology**, v. 204, n. 6-7, p. 1046-1050, dez. 2009.

ŠALAK, A.; SELECKÁ, M.; DANNINGER, H. **Machinability of powder metallurgy steels**. Cambridge: Cambridge International Science Publishing, 2005. 551 p.

SALVARO, Diego Berti. **Desempenho tribológico de compósitos autolubrificantes em regime de lubrificação mista**. 2020. 100 f. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

SCHMIDT, M. A. **Brunimento em ferro fundido cinzento utilizando ferramentas tipo bucha com grãos de diamante**. 1999. 258 f. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

SHANKMAN, R. S. **Facile synthesis of graphene, graphene derivatives and abrasive nanoparticles and their various uses, including as tribologically-bene**. Titular: Peerless Worldwide Llc. US n. US20140227211A1. Depósito: 15 mar. 2011. Concessão: 15 mar. 2012. p. 1-75, 2014.

SOUZA, Thales Sardinha Garcia. **Efeito da rugosidade no desgaste de punções de conformação a frio**. 103 f. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

SPENCER, A.; ALMQVIST, A.; LARSSON, R. A semi-deterministic texture-roughness model of the piston ring–cylinder liner contact. **Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, v. 225, n. 6, p. 325-333, jun. 2011.

THUMMLER, F.; OBERACKER, R. **Introduction to Powder Metallurgy**. London: The Institute of Materials, 1993. 347 p.

STACHOWIAK, Gwidon; BATCHELOR, Andrew W. **Engineering Tribology**. 2. ed. Crawley: Butterworth-Heinemann, 2000. 769 p.

STOUT, K J (ed.). **Development of Methods for the Characterisation of Roughness in Three Dimensions**. University Of Huddersfield: Penton Press, 2000. 393 p.

TOMANIK, E. Liner Honing Quality Main Characteristics. **Sae Technical Paper Series**, p. 1-10, 1 nov. 1992.

UHLMANN, E.; SPUR, G.; KLEINSCHNITKER, M. Honing and Superfinishing. **Handbook of Ceramics Grinding and Polishing**, p. 234-262, 2015.

WEITAO, S.; BIN, W.; XIAOLIANG, L.; YUQIAN, W.; JIAN, Z. Controlling the tribology performance of gray cast iron by tailoring the microstructure. **Tribology International**, v. 167, n. 1, p. 107343-107353, mar. 2022.

WERMUTH, D. P.; PAIM, T. C.; BERTACO, I.; ZANATELLI, C.; NAASANI, L. I. S.; SLAVIERO, M.; DRIEMEIER, D.; TAVARES, A. C.; MARTINS, V.; ESCOBAR, C. F.; DOS SANTOS, L. A. L., SCHAEFFER, L.; WINK, M. R. Mechanical properties, in vitro and in vivo biocompatibility analysis of pure iron porous implant produced by metal injection molding: a new eco-friendly feedstock from natural rubber. **Materials Science And Engineering: C**, v. 131, n. 1, p. 112532-112543, dez. 2021.

XAVIER, Fabio Antonio. **Estudo dos mecanismos de desgaste em ferramentas de nitreto de silício aplicadas no torneamento dos ferros fundidos vermicular e cinzento**. 2009. 267 f. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

ZHANG, L.; YUAN, H. A quantitative description of machining effects to mechanical behavior of sintered powder metals. **Journal Of Materials Processing Technology**, v. 258, p. 310-318, ago. 2018.

ZHAO, J.; MAO, J.; LI, Y.; HE, Y.; LUO, J. Friction-induced nano-structural evolution of graphene as a lubrication additive. **Applied Surface Science**, v. 434, p. 21-27, mar. 2018.

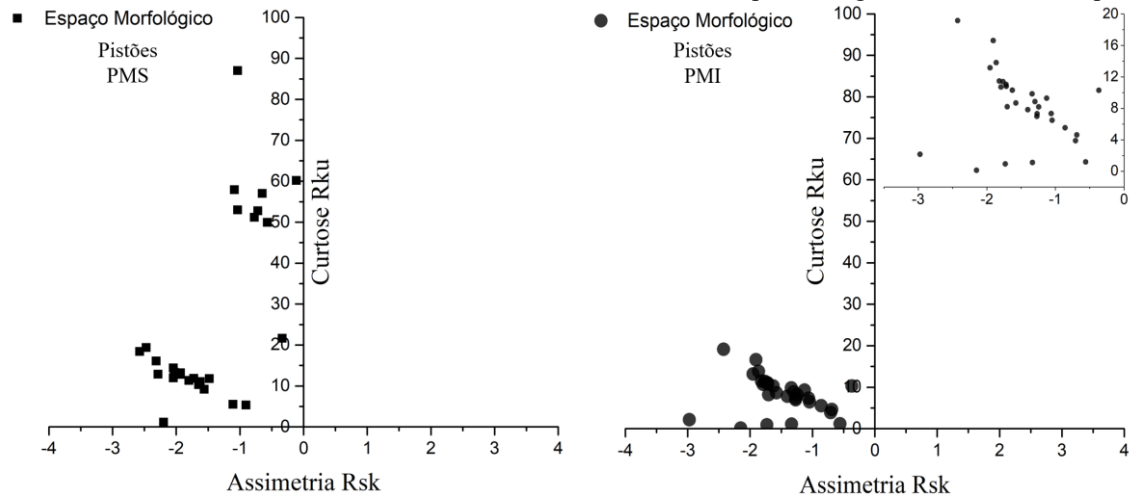
ZHAO, J.; GAO, T.; LI, Y.; HE, Y.; SHI, Y. Two-dimensional (2D) graphene nanosheets as advanced lubricant additives: a critical review and prospect. **Materials Today Communications**, v. 29, p. 102755, dez. 2021.

ZHENG, D.; CAI, Z. B.; SHEN, M. X., LI, Z. Y.; ZHU, M. H. Investigation of the tribology behaviour of the graphene nanosheets as oil additives on textured alloy cast iron surface. **Applied Surface Science**, v. 387, p. 66-75, nov. 2016.

APÊNDICE A – Parâmetros de Rugosidade

Conforme apresentado no tópico 4.2.2, os gráficos contendo os demais parâmetros de rugosidade, tanto 2D quanto 3D, que foram avaliados no desenvolvimento da dissertação estão apresentados nesse apêndice.

Figura 84 - Valores obtidos para os parâmetros de rugosidade R_{sk} e R_{ku} para as regiões PMS e PMI dos pistões.



Fonte: Autora.

Figura 85 - Valores obtidos para os parâmetros de rugosidade R_{sk} e R_{ku} para as regiões PMS, RC e PMI dos mancais.

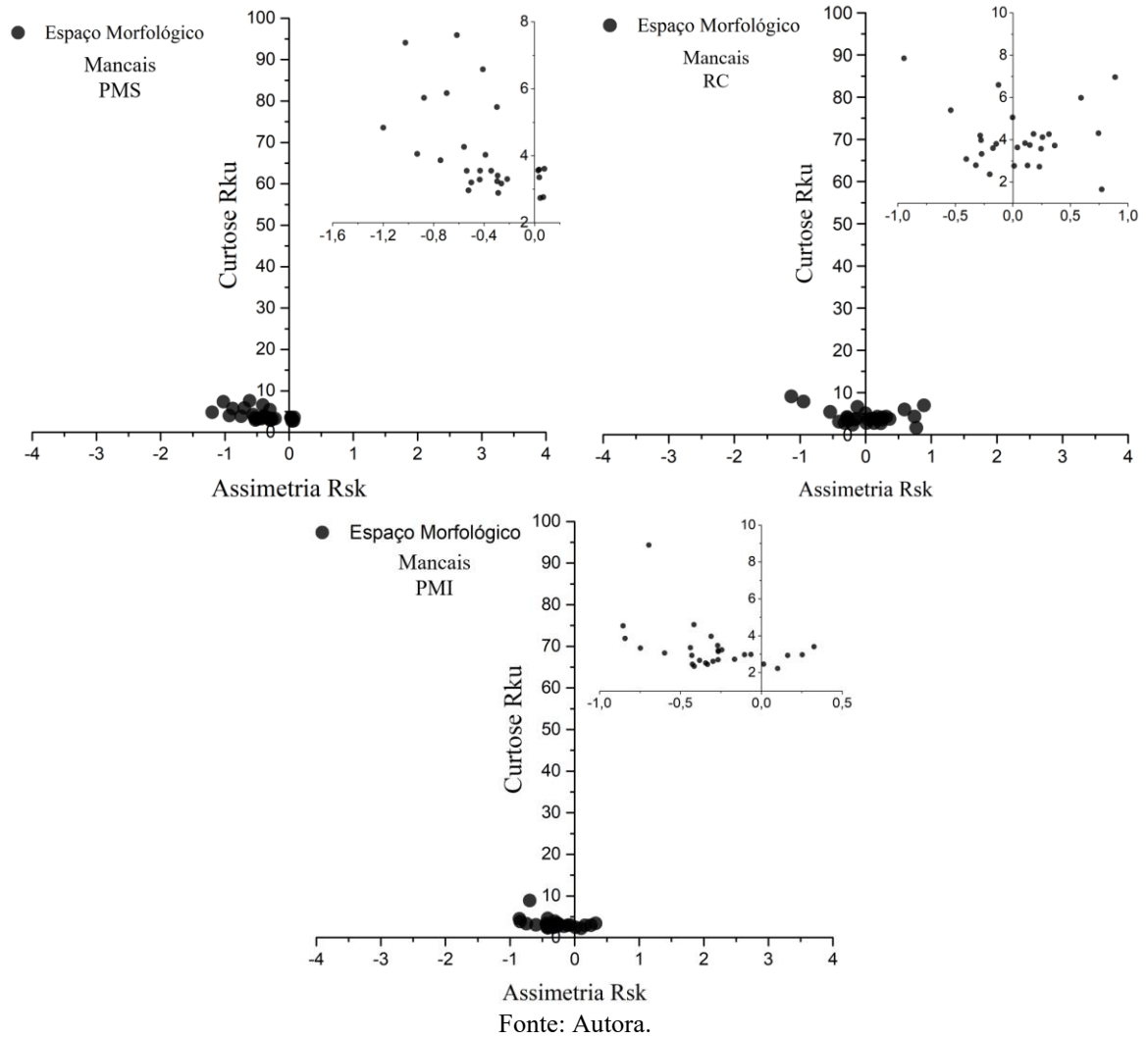


Figura 86- Valores obtidos para os parâmetros de rugosidade S_{sk} e S_{ku} para as regiões PMS e PMI dos pistões.

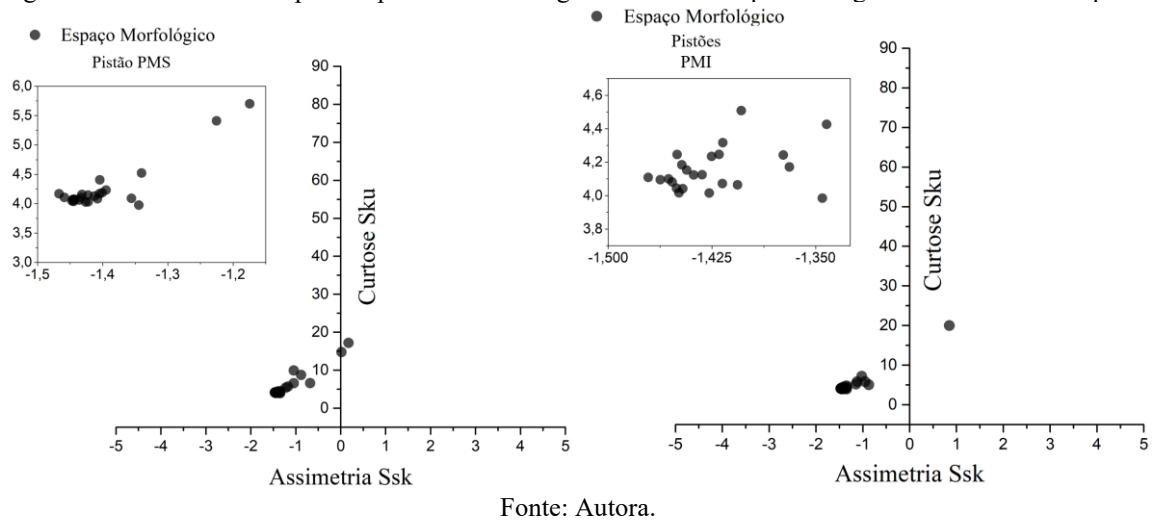
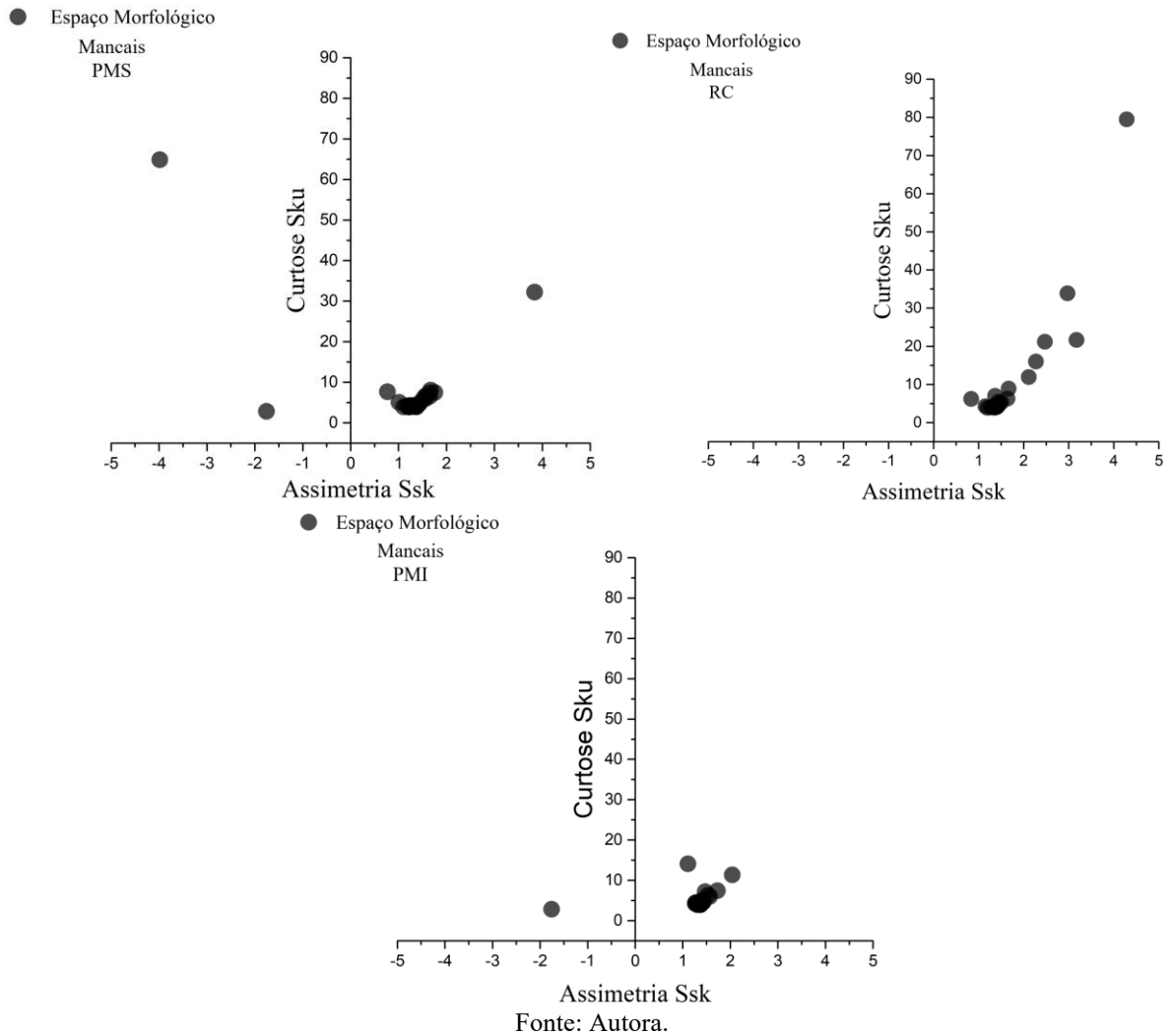
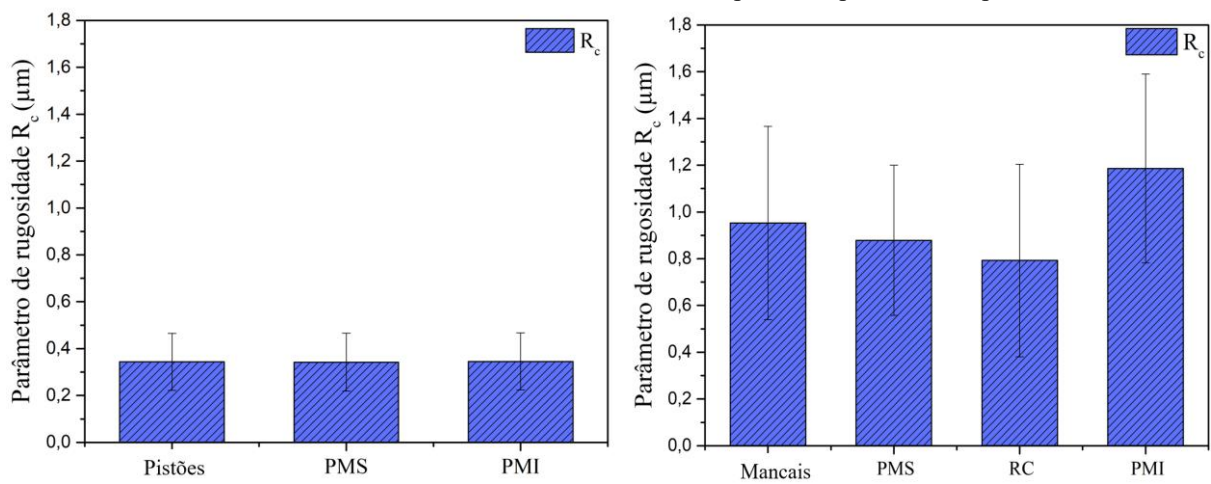


Figura 87- Valores obtidos para os parâmetros de rugosidade S_{sk} e S_{ku} para as regiões PMS, RC e PMI dos mancais.



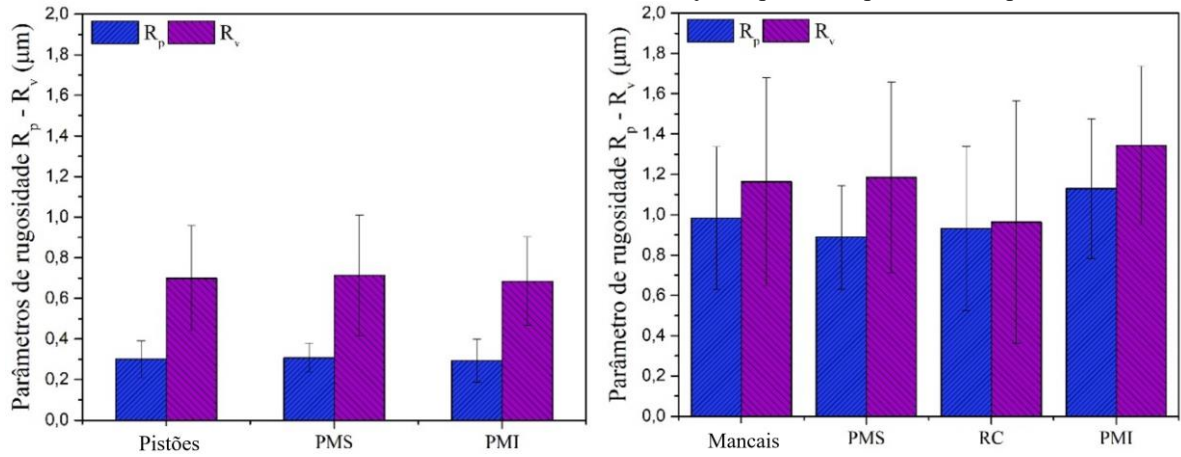
Fonte: Autora.

Figura 88 - Valores obtidos para o parâmetro de rugosidade R_c para as superfícies dos pistões e mancais.



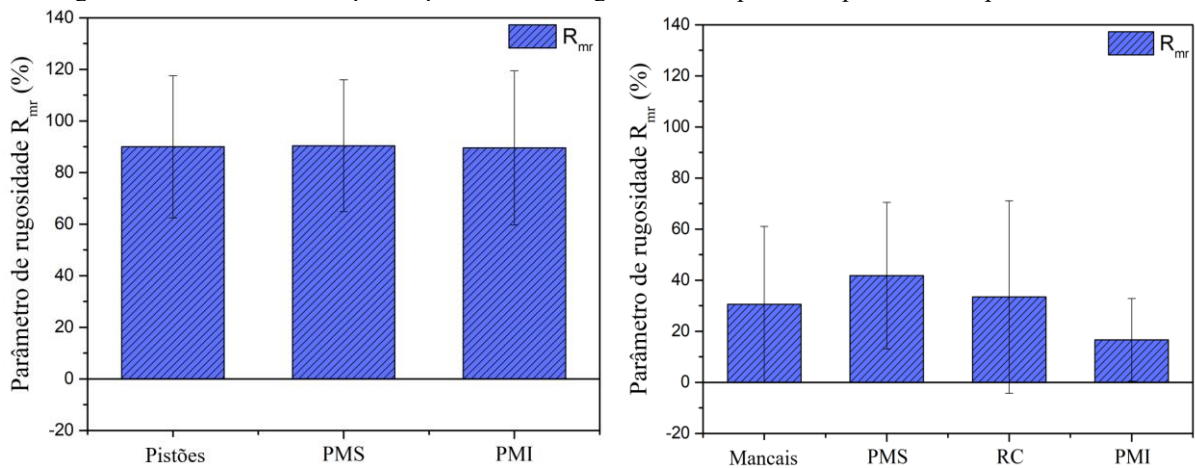
Fonte: Autora.

Figura 89 - Valores obtidos para os parâmetros de rugosidade R_p e R_v para as superfícies dos pistões e mancais.



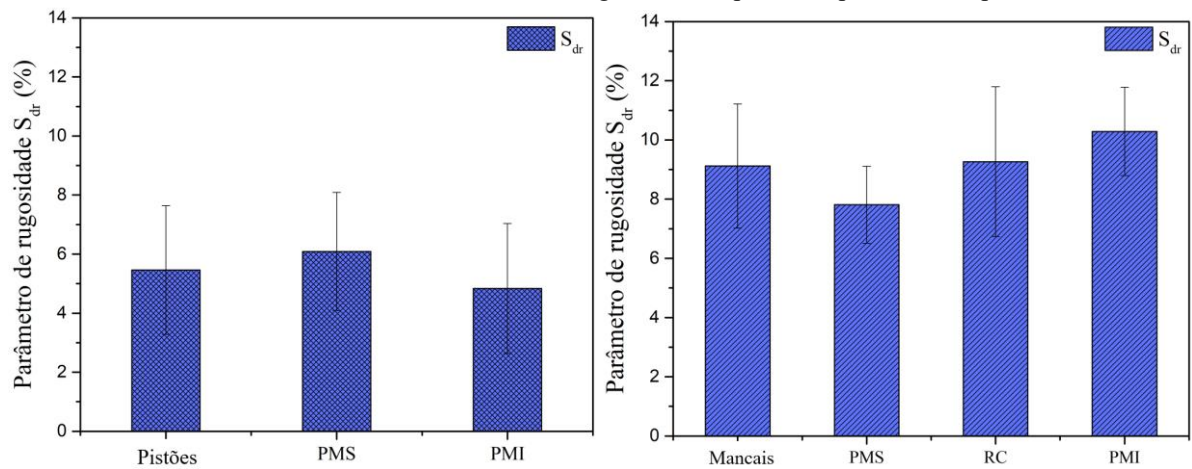
Fonte: Autora.

Figura 90 - Valores obtidos para o parâmetro de rugosidade R_{mr} para as superfícies dos pistões e mancais.



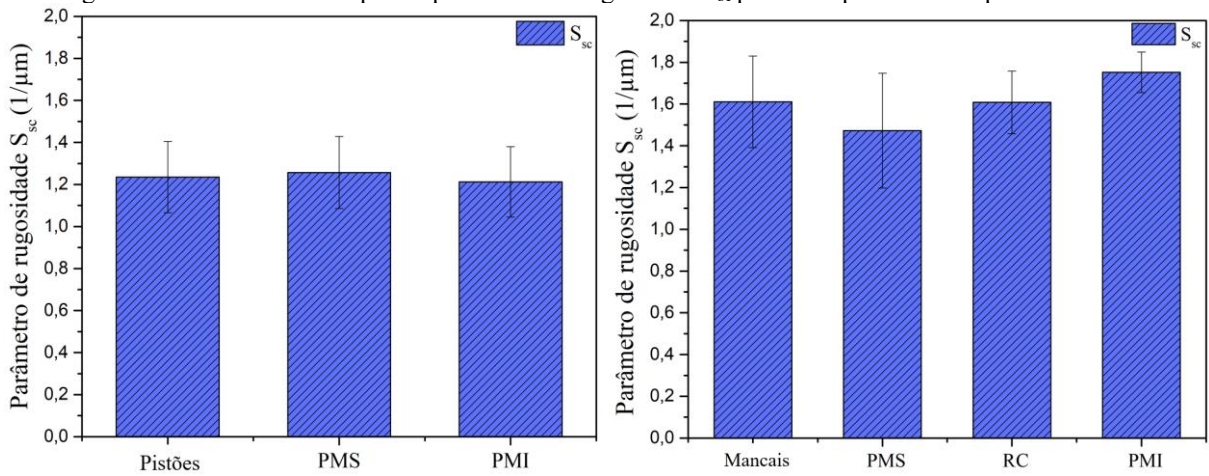
Fonte: Autora.

Figura 91 - Valores obtidos para o parâmetro de rugosidade S_{dr} para as superfícies dos pistões e mancais.



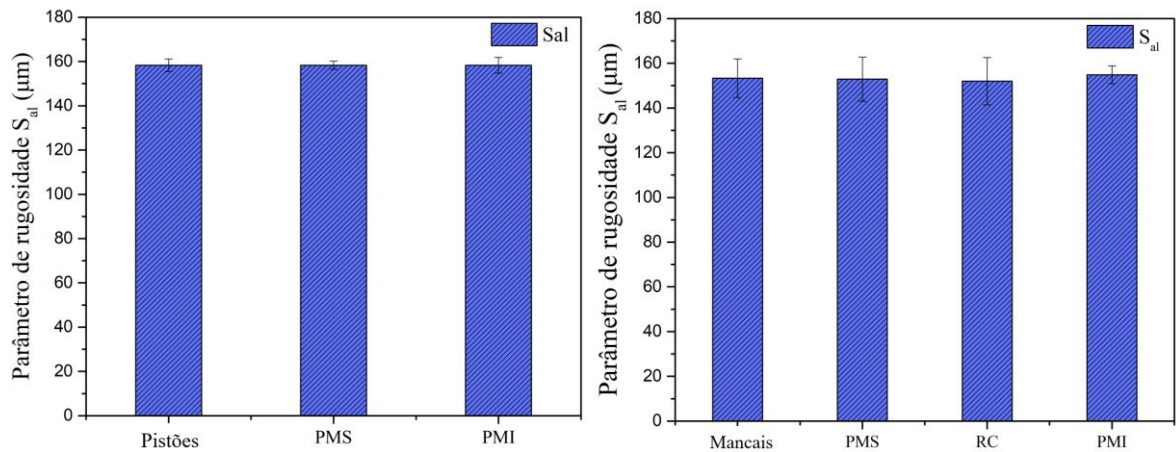
Fonte: Autora.

Figura 92 - Valores obtidos para o parâmetro de rugosidade S_{sc} para as superfícies dos pistões e mancais.



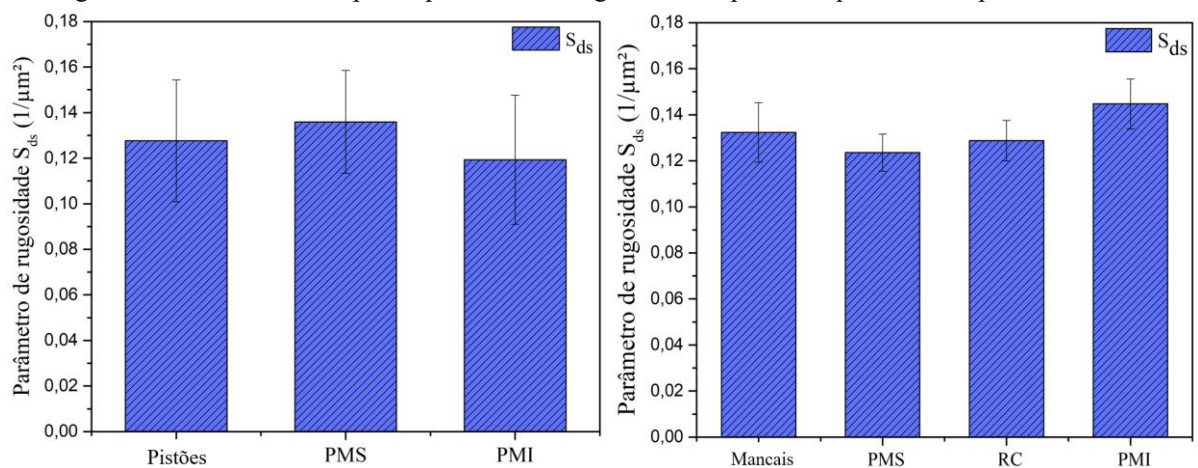
Fonte: Autora.

Figura 93 - Valores obtidos para o parâmetro de rugosidade S_{al} para as superfícies dos pistões e mancais.



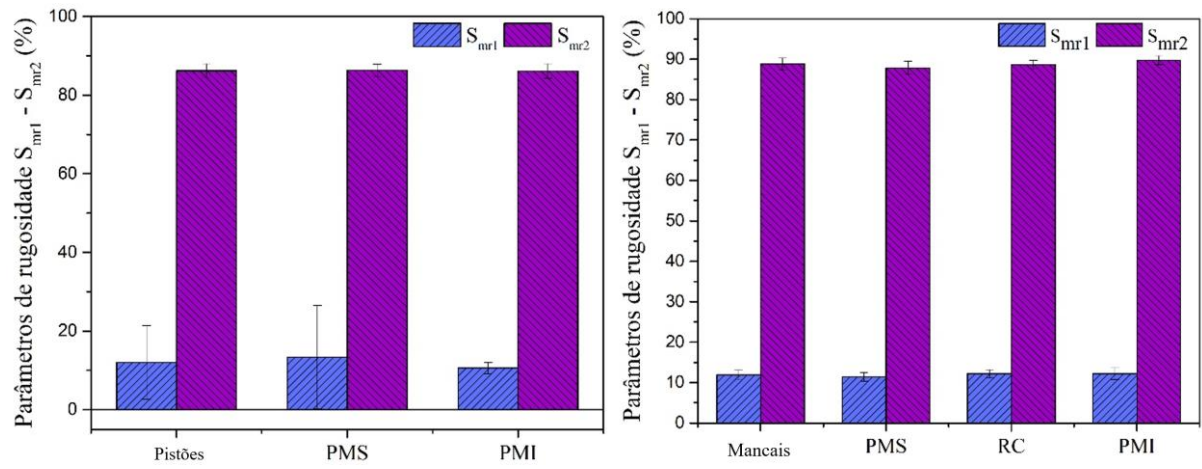
Fonte: Autora.

Figura 94 - Valores obtidos para o parâmetro de rugosidade S_{ds} para as superfícies dos pistões e mancais.



Fonte: Autora.

Figura 95 - Valores obtidos para os parâmetros de rugosidade S_{mr1} e S_{mr2} para as superfícies dos pistões e mancais.



Fonte: Autora.