

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS DE RUGOSIDADE E MECANISMOS DE
DESGASTE EM DOIS POLÍMEROS COMERCIAIS

por

Victor Provensi Mondin

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2021

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

Mondin, Victor Provensi
CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS DE RUGOSIDADE E
MECANISMOS DE DESGASTE EM DOIS POLÍMEROS COMERCIAIS /
Victor Provensi Mondin. -- 2021.
23 f.
Orientador: Patric Daniel Neis.

Coorientador: Jean Carlos Poletto.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Mecanismos de desgaste. 2. Parâmetros
superficiais. 3. Rugosidade. 4. Polímeros. I. Neis,
Patric Daniel, orient. II. Poletto, Jean Carlos,
coorient. III. Título.

Victor Provensi Mondin

CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS DE RUGOSIDADE E MECANISMOS DE
DESGASTE EM DOIS POLÍMEROS COMERCIAIS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Coorientador: Me. Jean Carlos Poletto

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Flávio José Lorini

Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, novembro de 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e por me permitir vivenciar tantos momentos felizes e/ou que me fizeram crescer, sempre Estando junto comigo.

Agradeço aos meus pais, Luiz e Sandra, por todo o amor e sacrifício pela minha educação e bem-estar.

Agradeço à minha namorada, Natália, por me acompanhar durante todos esses anos de faculdade.

Agradeço aos meus avós, Antônio e Lourdes, pelo amor e incentivo mesmo à distância.

Agradeço ao Laboratório de Tribologia (LATRIB), que tornou possível esse trabalho, e sobretudo, ao colega Me. Jean Poletto, pelo suporte, orientação e compreensão em sanar minhas várias dúvidas.

Agradeço ao prof. Dr. Patric Daniel Neis, por todos os ensinamentos transmitidos no decorrer de toda a graduação.

CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS DE RUGOSIDADE E MECANISMOS DE DESGASTE EM DOIS POLÍMEROS COMERCIAIS.

Mondin, Victor Provensi
victor.provensi@hotmail.com

Resumo. O desgaste de materiais é uma das principais vertentes de estudo da tribologia. Economicamente, os mecanismos de abrasão e adesão contribuem de forma significativa no custo de falhas mecânicas, sendo de interesse industrial seu estudo e prevenção. O presente estudo propõe-se a analisar superfícies desgastadas de materiais poliméricos a fim de correlacionar os parâmetros de rugosidade aos mecanismos de desgaste. São duas as categorias de polímeros analisados: poliacetal com adição de negro de fumo (polímero preto) e poliacetal natural (polímero branco). As superfícies dos polímeros desgastados foram avaliadas através da descrição dos mecanismos existentes, por meio de microscopia óptica, e análise topográfica, por meio de interferometria e quantificação dos parâmetros de rugosidade, tanto bidimensionais quanto tridimensionais. Também, foram quantificados o número de vales, profundidade e espaçamento médios. Para os polímeros pretos, constatou-se que, quanto maior a severidade de abrasão, mais a superfície se torna assimetricamente negativa, com vales mais largos e mais profundos. Para os polímeros brancos, verificou-se que, com o aumento da parcela adesiva, os vales ficaram mais estreitos e ligeiramente mais profundos, contudo sem apresentar uma tendência clara dos parâmetros superficiais.

Palavras-chave: *mecanismos de desgaste, parâmetros superficiais, rugosidade, polimeros.*

Correlation between roughness parameters and wear mechanisms in two commercial polymers.

Abstract. Material wear is one of the main aspects of the study of tribology. Economically, abrasion and adhesion mechanisms significantly contribute to the cost of mechanical failures, and their study and prevention is of industrial interest. The study proposes to analyze worn surfaces of polymeric materials in order to correlate the roughness parameters to the wear mechanisms. There are two categories of polymers analyzed: polyacetal with added carbon black (black polymer) and natural polyacetal (white polymer). The surfaces of the worn polymers were evaluated through the description of the existing mechanisms, by means of optical microscopy, and topographic analysis, by means of interferometry and quantification of the roughness parameters, both two-dimensional and three-dimensional. Also, the number of valleys, average depth and width were quantified. For black polymers, it is concluded that the greater the abrasion severity, the more the surface becomes asymmetrically negative, with wider and deeper valleys. For white polymers, it is concluded that, with the increase of adhesive portion, the valleys became narrower and slightly deeper, however without showing a clear trend of the surface parameters.

Keywords: *wear mechanisms, surface parameters, roughness, polymers.*

NOMENCLATURA

Símbolos

Ra / Sa

Rugosidade média

Rq / Sq

Rugosidade RMS (Root Mean Square)

Rsk / Ssk

Assimetria

Rku / Sku

Curtose

RMS

Root mean square

Z (x)

Altura das asperezas em função da distância

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. FUNDAMENTAÇÃO	2
3.1. Tribossistema e Mecanismos de desgaste	2
3.1.1. Adesão	2
3.1.2. Fadiga superficial	2
3.1.3. Triboquímico	2
3.1.4. Abrasão	3
3.2. Parâmetros de rugosidade	3
3.2.1 Rugosidade média quadrática (R_q / S_q)	4
3.2.2 Assimetria (R_{sk} / S_{sk})	4
3.2.3 Curtose (R_{ku} / S_{ku})	4
3.3. Relação entre parâmetros superficiais e abrasão	4
4. METODOLOGIA	5
4.1. Amostras	5
4.2. Ensaios de desgaste	5
4.3. Equipamentos utilizados	6
4.4. Descrição dos mecanismos de desgaste	6
4.5. Análise de topografia	7
5. RESULTADOS	8
5.1. Poliacetal (POM-C) com adição de negro de fumo	8
5.1.1 Mecanismos de desgaste	8
5.1.2 Parâmetros de rugosidade	9
5.1.3 Quantificação dos vales	10
5.2. Poliacetal (POM-C) natural	11
5.2.1 Mecanismos de desgaste	11
5.2.2 Parâmetros de rugosidade	12
5.2.3 Quantificação de vales	14
6. CONCLUSÕES	14
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15

1. INTRODUÇÃO

O desgaste é um dos principais focos de estudo da tribologia (KATO, 2001). Segundo Eyre (1976), dentre os principais mecanismos de desgaste, a abrasão é responsável por até 50% das falhas, seguida pela adesão com 15%. Segundo Oliveira e Silva (2015) entre 1% e 6% do produto interno bruto (PIB) brasileiro de 2004 foram gastos em função do desgaste, o que representa, em valores corrigidos, entre 40 e 300 bilhões de reais. Por conta disso, é de fundamental importância o estudo, identificação correta e a prevenção dos mecanismos de desgaste. No contexto do presente trabalho, estudar o mecanismo de desgaste traduz-se em obter formas quantitativas e objetivas de avaliá-lo.

Ainda é um desafio para a ciência prever a evolução da estrutura de uma superfície e sua rugosidade durante o desgaste abrasivo (KOVÁLEV et al., 2019). De acordo com Da Silva e Mello (2011), as interações entre partículas duras e a superfície são extremamente complexas devido ao formato irregular e ao tamanho das partículas. Em diversas aplicações industriais, a caracterização acurada da rugosidade tem grande importância devido à forte influência que ela exerce na funcionalidade de produtos manufaturados (WHITEHOUSE, 2011).

Diversos são os estudos (GEHLEN et al., JAIN e BAHADUR) que relacionam as superfícies com mecanismos de desgaste. Por exemplo, na categoria de transporte ferroviário, Wojciechowski et al (2020) caracterizaram o par tribológico roda-trilho de trem com enfoque na identificação dos mecanismos de desgaste e na caracterização superficial. Os autores concluíram que, ao correlacionar rugosidade e condições operacionais (força e distância), os parâmetros que melhor refletem a mudança na superfície da roda, com a variação das condições de operação, são aqueles que mensuram a amplitude da rugosidade da superfície. Outro exemplo, com enfoque em biomecânica, é o estudo de Niemcewska-Wójcik e Piekoszewski (2017) onde foi investigada a correlação entre as características da superfície de uma cabeça femoral metálica e sua influência nos mecanismos de desgaste do acetábulo polimérico. Os autores concluíram que o corpo de prova com menor rugosidade inicial, apresentou o maior nível de desgaste.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo estudar a correlação entre mecanismos de desgaste e parâmetros de superfície, tanto bidimensionais quanto tridimensionais. Para isso, serão examinadas superfícies de polímeros que apresentaram diferentes mecanismos e intensidade de desgaste. As superfícies desgastadas do polímero preto haviam sido geradas no estudo de Gehlen et al. (2021). Já as superfícies do polímero branco foram geradas em uma dissertação de mestrado, que ainda está em curso. Nesses polímeros, são mensuradas as topografias tridimensionais das superfícies por meio de interferometria e obtidas imagens da superfície por meio de microscopia óptica. A partir desses dados, parâmetros de superfície serão obtidos e correlacionados aos mecanismos de desgaste a fim de encontrar os parâmetros que melhor representem abrasão e adesão, bem como os diferentes níveis de severidade destes mecanismos.

2. OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é correlacionar parâmetros superficiais e mecanismos de desgaste em superfícies desgastadas de dois polímeros comerciais. Os objetivos específicos são:

- Identificação dos mecanismos de desgaste presentes nas superfícies dos polímeros;
- Análise topográfica para obtenção dos parâmetros de rugosidade;
- Correlação das medições bidimensionais e tridimensionais quanto aos parâmetros de rugosidade média (R_a / S_a), rugosidade RMS (R_q / S_q), assimetria (R_{sk} / S_{sk}) e curtose (R_{ku} / S_{ku}).

3. FUNDAMENTAÇÃO

3.1. Tribossistema e Mecanismos de desgaste

O sistema tribológico, ou tribossistema, é usualmente constituído por quatro elementos: corpo sólido, contrapeça, elemento de interface e ambiente (CZICHOS, 1977). Além disso, ele é influenciado pela combinação de diferentes fatores, tais como: geometria de contato, combinação de materiais, carga aplicada, velocidade de deslizamento, lubrificação, etc. (VERBEEK, 1979). Conforme Zum Gahr (1987), a resistência ao desgaste não é uma propriedade inerente ao material, mas sim uma consequência do sistema tribológico onde ele se encontra. De acordo com a norma DIN 50320 (1979), existem quatro principais mecanismos de desgaste, sendo eles: adesão, fadiga superficial, triboquímico e abrasão.

3.1.1. Adesão

De acordo com Batchelor (2006), a adesão é uma forte ligação atrativa entre superfícies que ocorre devido à necessidade de troca de elétrons entre elas. A alta pressão de contato entre as asperezas resulta em deformação plástica, adesão e, conseqüentemente, na formação de junções locais, uma espécie de solda localizada (ZUM GAHR, 1987). A tendência de adesão das asperezas está condicionada à limpeza das superfícies, inexistência local de óxidos, carga aplicada e características físicas e químicas dos materiais em contato. Quando há afinidade química entre superfícies, existe uma alta tendência de ocorrer adesão.

Por sua vez, o mecanismo de desgaste adesivo ocorre quando há movimento relativo entre as superfícies sob contato adesivo. Dependendo da magnitude da força adesiva, dois casos podem acontecer: adesão com deformação plástica, sem arrancamento de material, ou adesão com arrancamento de material. Conforme Zum Gahr (1987), o primeiro caso, com deformação plástica, ocorre quando os materiais tiverem uma resistência maior do que a força adesiva, fazendo com que as junções locais se separem sem transferir material. No segundo caso, a força necessária para romper a adesão será maior que a resistência do material. Desse modo, ao se moverem, as junções se rompem e material é arrancado de uma das superfícies e se transfere para outra. Esse segundo tipo de desgaste pode ser visualizado como uma cratera na superfície. Comumente, o mecanismo de adesão está associado com o aumento do coeficiente de atrito e desgaste (BATCHELOR, 2006).

3.1.2. Fadiga superficial

A fadiga superficial é causada por um carregamento cíclico decorrente de um contato rolante ou de um contato deslizante. O desgaste por fadiga superficial pode ser caracterizado pela formação de trincas e conseqüente descamação do material (ZUM GAHR, 1987), podendo ser originadas tanto na superfície quanto abaixo dela. Na superfície, por exemplo, ela pode ocorrer devido a inclusões superficiais, irregularidades devido ao processo de fabricação ou qualquer descontinuidade que aumente a tensão superficial.

3.1.3. Triboquímico

De acordo com Zum Gahr (1987), o desgaste triboquímico ocorre devido a reações químicas entre as superfícies em contato e o meio, que pode ser tanto um lubrificante ou até mesmo o ar. Quando há contato de metais com o oxigênio, forma-se um filme de óxido na superfície que atua de modo a evitar o contato entre o par tribológico, também contribuindo para a redução dos demais mecanismos de desgaste (ZUM GAHR, 1987).

O desgaste triboquímico é facilitado pelo aumento da temperatura da região de contato. Por

conta disso, o efeito combinado da carga normal aplicada e da velocidade de deslizamento é determinante para ocorrência desse mecanismo. (BATCHELOR, 2006).

3.1.4. Abrasão

A abrasão ocorre quando um material é atritado contra partículas de dureza igual ou superior. Segundo Ludema (1996), o desgaste abrasivo consiste na raspagem ou arrancamento de pequenos pedaços da superfície de um material por partículas, cantos, pontas ou qualquer sólido que seja duro o suficiente para produzir mais danos a esse material do que a si mesmo.

O mais comum é que, em conjunto com o desgaste abrasivo clássico, sejam encontrados outras subclassificações tais como microsulcamento (Figura 1-a) e microcorte (Figura 1-b). O primeiro (microsulcamento), ocorre em virtude de uma passagem única de um grão abrasivo que resulta em deformação plástica, sem desprendimento de material da superfície desgastada. O segundo (microcorte), resulta do corte entre um grão afiado e uma superfície macia, causando perda de material. Essas subclassificações, microsulcamento e microcorte, são as interações dominantes em materiais dúcteis (ZUM GAHR, 1987). Segundo o mesmo autor, a proporção do volume de desgaste ocorrida entre o microcorte e microsulcamento depende do ângulo de ataque da partícula abrasiva.

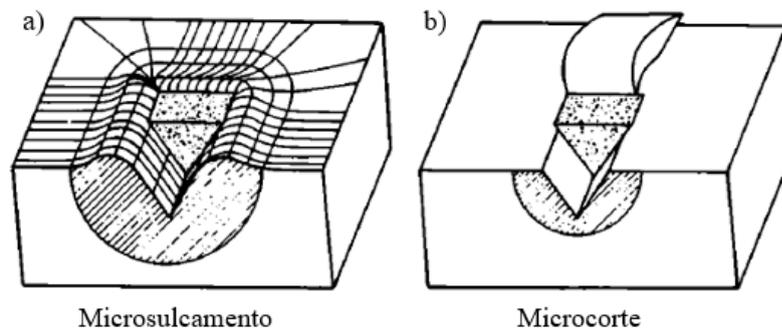


Figura 1: Mecanismos de desgaste abrasivo - Adaptado de Zum Gahr (1987).

A literatura tradicionalmente divide o desgaste abrasivo de dois modos: a dois corpos e a três corpos (BATCHELOR, 2006). Segundo Harsha (2003), define-se abrasão a dois corpos quando o desgaste é causado por protuberâncias duras em uma superfície que podem somente se mover sobre outra superfície. A abrasão a três corpos, por outro lado, ocorre quando há presença de particulados restritos entre as superfícies, mas com possibilidade para se moverem entre os corpos durante o movimento relativo.

3.2. Parâmetros de rugosidade

De acordo com Alves (2011), as superfícies podem ser classificadas em dois grupos de erros: os macrogeométricos e microgeométricos. Os erros macrogeométricos estão relacionados à forma, tais como ovalização, planicidade, circularidade, ondulação etc. Os erros microgeométricos só conseguem ser medidos com o auxílio de instrumentos especiais (rugosímetros e demais perfilômetros) e são conhecidos como rugosidade. Rugosidade é, por definição da norma DIN 4762 (1989), o conjunto de saliências e reentrâncias presentes em uma superfície, possível de ser observada em escala microscópica.

A geometria da superfície real é tão complexa que um número finito de parâmetros não é capaz descrevê-la completamente (GADELMAWLA, 2002). A ISO 25178 define 30 parâmetros superficiais (DELTOMBE, 2014) que podem ser divididos em quatro grupos: amplitude, espaciais, híbridos e diversos. Enquanto os parâmetros de perfil (2D) são

nomeados iniciando com a letra R, indicando serem provenientes de um perfil de rugosidade, os parâmetros de área (3D) começam, na grande maioria, com a letra S (BLATEYRON, 2013).

Os parâmetros de amplitude para superfícies (S_a , S_q ...) são análogos aos parâmetros de perfil (R_a , R_q ...), contudo expandidos para três direções. Por exemplo, enquanto para perfis existe o parâmetro de rugosidade R_a , média aritmética dos valores absolutos das ordenadas $Z(x)$ no comprimento de amostragem (ISO 4287), para superfícies existe a rugosidade S_a , calculada em três dimensões no interior da área definida. Os parâmetros aplicados no presente estudo são descritos a seguir.

3.2.1 Rugosidade média quadrática (R_q / S_q)

O parâmetro R_q representa a raiz quadrada média (RMS) das alturas $Z(x)$ em uma linha. De forma análoga, o parâmetro S_q representa o valor médio quadrático das alturas no interior de uma superfície. Conforme Stout (2002), esse parâmetro tem mais significado estatístico, sendo mais sensível a variações de altura, do que o parâmetro S_a . Segundo Blateyron (2013), o parâmetro S_q possui mais significado físico, pois está diretamente relacionado à energia da superfície e a maneira com que a luz é refletida. Contudo, o parâmetro S_q , quando analisado separadamente, é inapto a diferenciar superfícies com diferentes texturas, pois não diferencia picos de vales, nem os espaçamentos entre eles.

3.2.2 Assimetria (R_{sk} / S_{sk})

O parâmetro R_{sk} quantifica a simetria da distribuição de alturas com respeito a linha média do perfil. Kovalev (2019) apresenta definição análoga para o parâmetro tridimensional. Em uma distribuição Gaussiana, o R_{sk} é zero. Para distribuições assimétricas o parâmetro leva em conta tanto a combinação de número de pontos quanto o valor de amplitude das asperezas. Caso essa combinação seja maior para picos do que para vales, o R_{sk} será positivo. Caso contrário, o R_{sk} será negativo. Esse parâmetro, contudo, pode ser fortemente influenciado pela presença de picos ou vales isolados.

3.2.3 Curtose (R_{ku} / S_{ku})

O parâmetro R_{ku} , também denominado de curtose, é utilizado para avaliar quão acentuada é a distribuição de altura. Uma linha (ou superfície) com distribuição Gaussiana tem curtose igual a 3. Quando muitos pontos estiverem próximos à linha média, a curtose fica acima de 3 enquanto que, na ocorrência de muitos pontos afastados da linha média, a curtose fica abaixo de 3. Segundo Jeng e Gao (2000), os parâmetros S_{sk} e S_{ku} são mais sensíveis, quando comparados aos parâmetros S_a e S_q , a pequenas mudanças da superfície. Por conta disso, esses parâmetros são bastante utilizados na análise comparativa de superfícies desgastadas.

3.3. Relação entre parâmetros superficiais e mecanismos de desgaste

Nesta seção expõe-se alguns estudos que relacionam parâmetros de rugosidades com mecanismos de desgaste.

Gehlen et al (2021) avaliaram a superfície de polímeros que foram submetidas a ensaios de investigação do limite Pressão-Velocidade (PV). Desse trabalho foi retirado um dos polímeros investigado no presente estudo. Os autores observaram dois níveis distintos de desgaste: severo e moderado. As superfícies relacionadas ao regime de desgaste severo apresentaram um aspecto irregular, com a presença de crateras largas (desgaste adesivo). Por outro lado, as superfícies relacionadas ao regime de desgaste moderado apresentaram picos rasos e vales

profundos (desgaste abrasivo). Essa característica contribuiu para uma assimetria negativa do perfil, o que foi comprovado através da observação do parâmetro R_{sk} .

Jain e Bahadur (1980) investigaram a alteração superficial do contato polímero-metal com a variação do tempo de teste. Os autores avaliaram perfis bidimensionais nas direções paralela e perpendicular à direção de deslizamento. Na direção paralela ao deslizamento, inicialmente o R_a subiu, devido ao acúmulo isolado de material polimérico, e, após, desceu até um valor mínimo, devido à formação de um filme uniforme. Na direção perpendicular ao deslizamento a rugosidade inicialmente decresce, em virtude da deposição de fragmentos de polímero nos vales e, após deposição de filme na superfície metálica, se mantém constante no decorrer do deslizamento. Também, os autores observaram o comportamento de uma assimetria negativa ($R_{sk} < 0$) no desgaste abrasivo, embora sem fornecer maiores explicações.

No artigo desenvolvido por Wojciechowski (2020) sobre desgaste de rodas de trem, o mapeamento da superfície e a análise dos parâmetros de superfície mostraram alto potencial de identificação do desgaste. Esse ensaio foi realizado em escala real, onde analisou-se as rodas dos primeiros vagões por estas apresentarem maior desgaste. Segundo o mesmo autor, o monitoramento da aplicação de parâmetros de rugosidade deve incluir os componentes de pico e vale. Ao correlacionar condições de operação e rugosidade, os parâmetros S_z , S_p e S_a foram aqueles que melhor corresponderam às mudanças observadas na superfície da contrapeça.

4. METODOLOGIA

4.1. Amostras

Foram utilizados dois conjuntos de amostras de polímeros (Figura 2), cujas superfícies já foram desgastadas previamente em ensaios no tribômetro: (a) poliacetal (POM-C) com adição de negro de fumo (preto) e (b) poliacetal natural (branco). Ambos tem diâmetro de 15 mm e estão disponíveis comercialmente pelos nomes TECAFORM AH ELS black e TECAFORM AH natural (Ensinger), respectivamente.

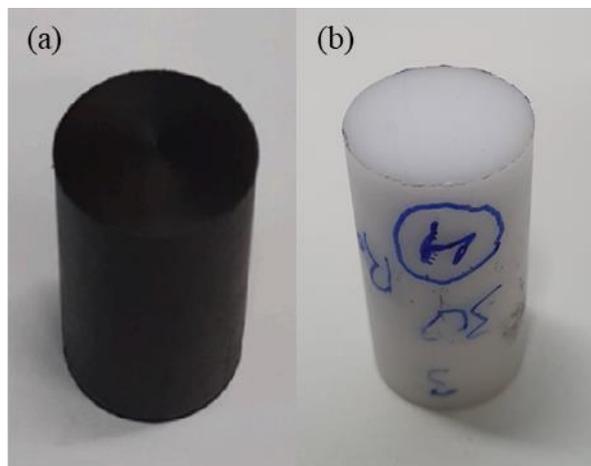


Figura 2: Representação das amostras dos polímeros POM-C estudados (a) com adição de negro de fumo e (b) natural.

4.2. Ensaio de desgaste

Os corpos de prova de polímeros foram atritados contra discos de ferro fundido cinzentos em ensaios prévios, realizados em teste pino-sobre-disco utilizando o tribômetro multifuncional do Laboratório de Tribologia (LATRIB) da UFRGS. Os dois conjuntos de

polímeros (preto e branco), previamente descritos, foram avaliados de maneiras distintas.

As superfícies desgastadas do polímero preto foram geradas no estudo de Gehlen et al. (2021). Neste estudo, as amostras foram submetidas a uma temperatura fixa (30°C), sob pressão constante (força de 200 N) e sob as seguintes velocidades: 1,2 m/s, 1,4 m/s e 1,6 m/s. O autor observou, para essas três velocidades, os respectivos valores de desgaste: 0,11 g, 0,14 g e 0,26 g. Como será discutido mais adiante, dessa forma foram geradas superfícies com diferentes graus de desgaste abrasivo.

Já as superfícies desgastadas do polímero branco foram geradas no trabalho de uma dissertação de mestrado, ainda em desenvolvimento. Neste trabalho, três conjuntos de discos de ferro fundido cinzento foram lixados por 10 min até diferentes granulometrias de lixa: 100 ($R_a = 0,4 \mu\text{m}$), 500 ($R_a = 0,2 \mu\text{m}$) e 1500 ($R_a = 0,1 \mu\text{m}$). Então, os pinos brancos foram, um a um, atritados por 1 min, sob força de 200 N, com velocidade de 1,3 m/s, no ensaio pino-sobre-disco contra os referidos discos de ferro fundido cinzento. Como será discutido mais para frente, dessa forma foram geradas superfícies com diferentes níveis de predominância dos mecanismos de desgaste abrasivo e adesivo.

4.3. Equipamentos utilizados

As superfícies dos polímeros desgastados foram avaliadas através de duas abordagens: análise dos mecanismos de desgaste através de microscopia óptica e análise topográfica para obtenção dos parâmetros de rugosidade.

Para analisar os mecanismos das superfícies desgastadas foi utilizado um microscópio Zeiss, modelo Axio Lab.A1. O microscópio possui uma câmera digital acoplada com resolução de 5 Megapixels, além do software AxioVision SE64, especializado para aquisição de imagem. Foram utilizados aumentos de 25 vezes, para caracterização da superfície, e 100 vezes, para observação de detalhes.

Para mapear tridimensionalmente a topografia do corpo de prova, foi utilizado o interferômetro do Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF), modelo ContourGT-K da marca Bruker. Utilizando lente objetiva de 2,5 vezes, foi mensurada uma área de 5 mm \times 5 mm de cada amostra de polímero com uma resolução lateral de 2 μm . A fim de remover os efeitos de forma e ondulação da superfície, os dados mensurados no interferômetro foram filtrados utilizando o *software* MATLAB, utilizando janelamento Gaussiano com comprimentos de onda entre 10 μm e 1000 μm . Assim, foram obtidas as superfícies com as quais foram realizadas as quantificações dos parâmetros de rugosidade.

4.4. Descrição dos mecanismos de desgaste

Ambos os polímeros (preto e branco) foram observados com o auxílio do microscópio. Para o polímero preto, que sabidamente possuía somente abrasão, limitou-se ao registro e descrição da superfície. Já para o polímero branco, foram identificados, com o auxílio do Software Photoshop, os diferentes mecanismos de desgastes presentes na sua superfície. Para tal, foram manualmente delimitadas regiões onde identificou-se os mecanismos de abrasão e adesão, os quais foram pintados de distintas cores: azul (abrasão), vermelho (adesão com arrancamento de material) e verde (adesão com deformação plástica). Ressalta-se ainda que nas regiões onde houve dúvidas na distinção do mecanismo de desgaste, a superfície não foi pintada. A seguir, na Figura 3, apresenta um exemplo de como foi realizado o procedimento de identificação dos mecanismos de desgaste. Na esquerda, a imagem original do polímero branco (disco com rugosidade inicial de 0,1 μm) e na direita, a imagem do mesmo polímero com os mecanismos de desgaste destacados.

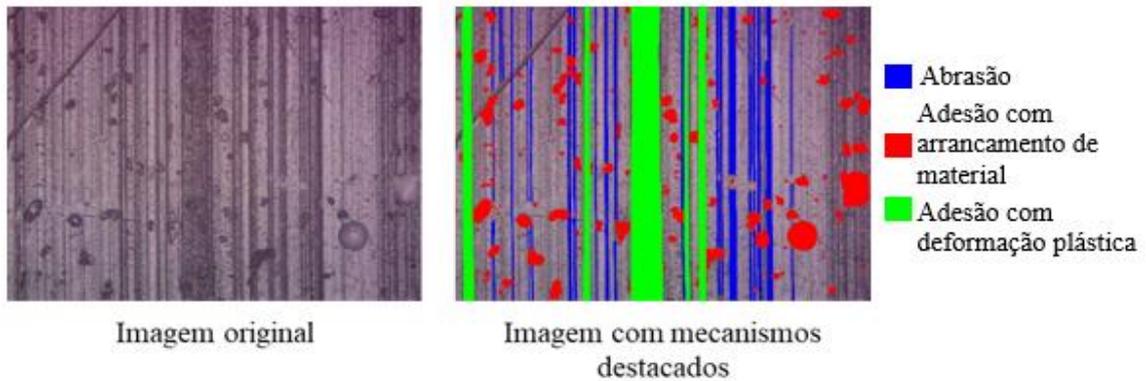


Figura 3: Representação de seleção dos mecanismos de desgaste no polímero branco (Polímero atritado contra o disco de rugosidade inicial 0,1 μm).

4.5. Análise de topografia

A obtenção dos parâmetros de rugosidade das superfícies desgastadas foi realizada com duas abordagens: a partir de perfis bidimensionais e a partir da superfície tridimensional das superfícies desgastadas. No caso das análises das imagens tridimensionais foram obtidos os valores de cada parâmetro de rugosidade em área utilizando diretamente o *software* Vision64. Para o caso da análise bidimensional, foram feitas linhas transversais ao sentido do movimento nas superfícies através do *software* Vision64. Foram feitas cinco linhas igualmente espaçadas (0,8 mm), conforme demonstrado na Figura 4 a fim de capturar grande parte da informação das superfícies. Esse procedimento foi repetido para cada polímero estudado. Os dados foram exportados em formato .csv e analisados no *software* Excel para o cálculo dos parâmetros de rugosidade. Com esses resultados, foi feita uma comparação de parâmetros de linha versus parâmetros de área.

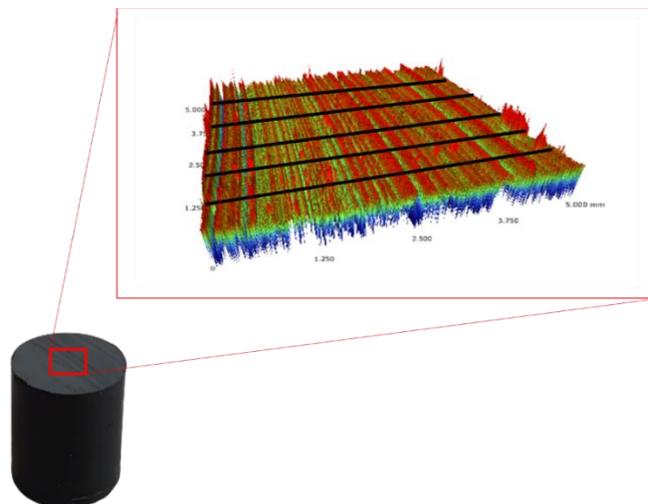


Figura 4: Representação topográfica via interferometria do pino polimérico desgastado (Na imagem, polímero preto desgastado a uma velocidade de 1,4 m/s).

Por meio de outra planilha do Excel, foram obtidas informações de quantidade de vales, profundidade média, e largura média entre as marcas de desgaste. O critério para consideração de um vale foi espaçamento maior que 4 μm , desde que esteja abaixo da linha média. A Figura 5 apresenta uma amostra de quantificação de um dos perfis avaliados. Para o perfil exemplificado, foram identificados 23 vales, com profundidade média de 1,18 μm e largura média de 33,67 μm .

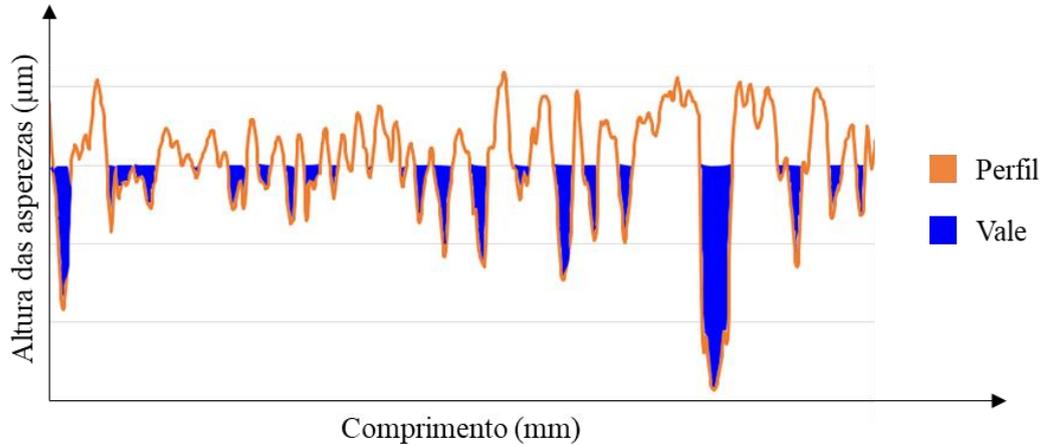


Figura 5: Retrato de uma parte da quantificação feita no polímero preto desgastado a uma velocidade de 1,4 m/s.

5. RESULTADOS

5.1. Poliacetal (POM-C) com adição de negro de fumo

5.1.1 Mecanismos de desgaste

O desgaste do tipo abrasivo foi observado em todos os polímeros pretos, seguindo o sentido do movimento. A Figura 6 mostra a superfície dos polímeros nas velocidades 1,2 m/s, 1,4 m/s e 1,6 m/s, onde é possível observar a presença de diversas marcas características de desgaste abrasivo, com a formação de sulcos. Com a observação das mesmas superfícies, com maior ampliação, confirma-se a presença predominante do mecanismo de desgaste abrasivo.

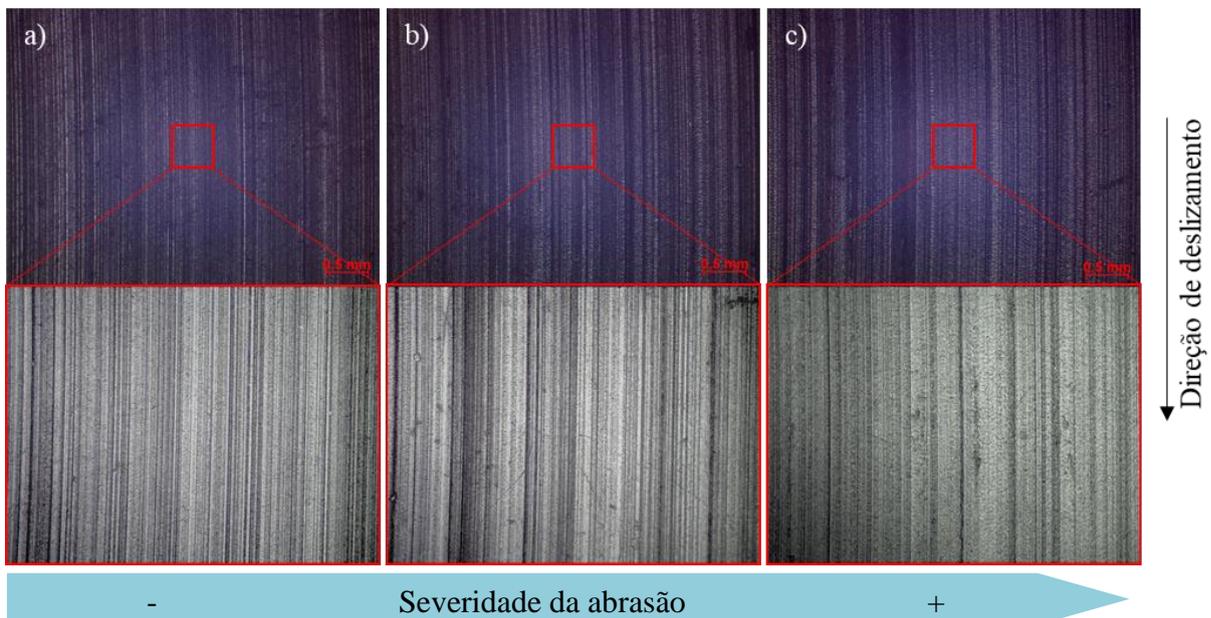


Figura 6: Microscopias dos polímeros pretos após serem atritados contra os discos de ferro fundido cinzento velocidades de (a) 1,2 m/s, (b) 1,4 m/s e (c) 1,6 m/s.

Ao realizar o mapeamento tridimensional das superfícies, notou-se que as marcas de abrasão apareciam na forma de sulcos mais profundos com o aumento da severidade de

abrasão, conforme observa-se na Figura 7. Além disso, nota-se ainda uma superfície orientada e regular, com ranhuras distribuídas de maneira uniforme na superfície dos três polímeros.

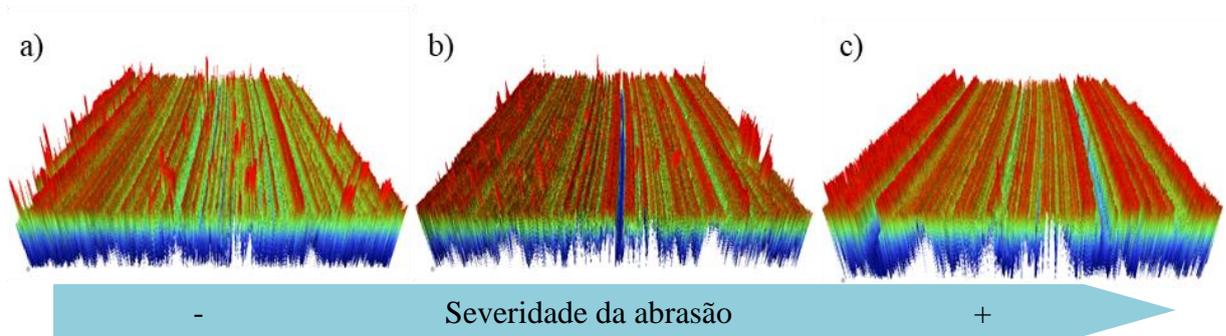


Figura 7: Interferometrias das superfícies desgastadas dos polímeros pretos nas velocidades de (a) 1,2 m/s, (b) 1,4 m/s e (c) 1,6 m/s.

5.1.2 Parâmetros de rugosidade

A Figura 8 apresenta os parâmetros de rugosidade média e rugosidade RMS em cada velocidade registrada. É possível observar que um aumento da severidade de abrasão (da esquerda para direita) corresponde a um aumento da rugosidade. Indo ao encontro da literatura (Hutchings, 2017), o R_q segue a mesma tendência do R_a , sendo ligeiramente maior.

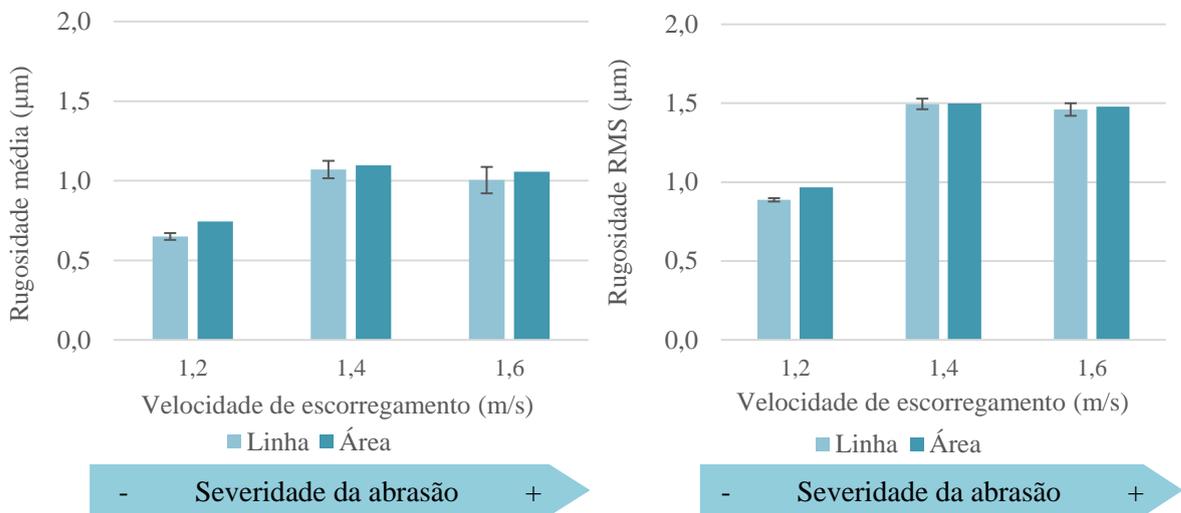


Figura 8: Rugosidade média (R_a/S_a) e RMS (R_q/S_q) dos polímeros pretos.

Na Figura 9 é possível observar que há uma tendência de decréscimo na assimetria em função do aumento da severidade de abrasão nos polímeros pretos. Isso indica que, ao aumentar a severidade da abrasão, mais material é removido da superfície do polímero, causando um aumento da profundidade dos vales e/ou alargamento dos mesmos. Este resultado está de acordo com o resultado verificado por Gehlen (2021), onde foi observado que superfícies com elevado grau de abrasão apresentam também elevada assimetria. Ressalta-se que ambos os trabalhos utilizaram os mesmos corpos de prova nas mesmas condições.

Comparando-se os resultados encontrados para os parâmetros de rugosidade em linha e em área e notou-se uma diferença média em torno de 6,7%. Para os polímeros em questão, a menor diferença entre linha e área foi encontrada no polímero com maior severidade de abrasão. Porém, de forma geral, ambos parâmetros (linha e área) mostram tendências e

comportamentos gráficos aproximados para os parâmetros estudados. Portanto, para casos em que a superfície possui riscos regulares, uma análise em linha já é suficiente para caracterizar a superfície de maneira satisfatória.

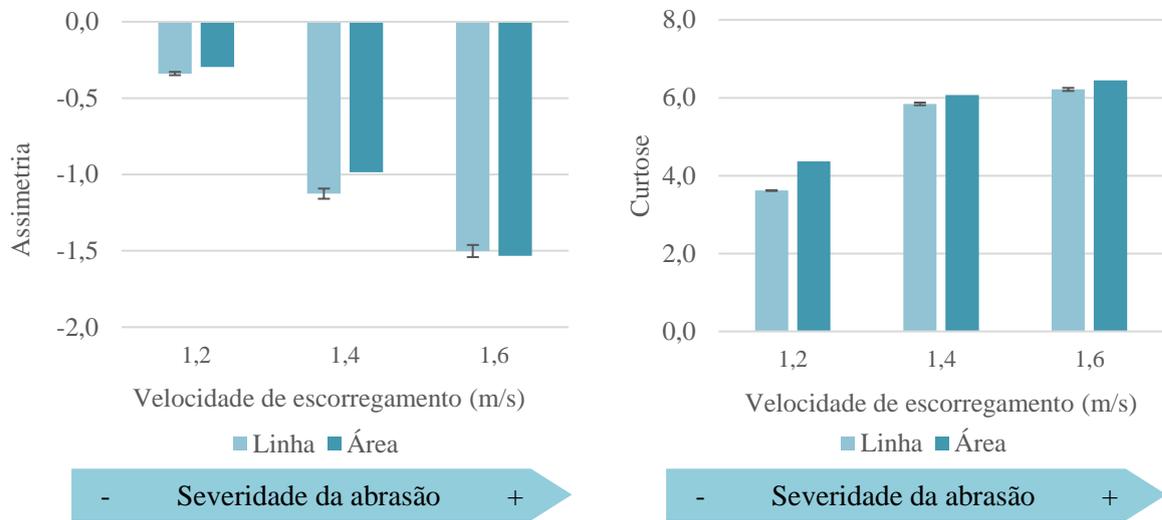


Figura 9: Assimetria (Rsk/Ssk) e Curtose (Rku/Sku) dos polímeros pretos.

5.1.3 Quantificação dos vales

A Figura 10 apresenta os valores de quantidade de vales normalizada pelo comprimento do perfil avaliado (densidade de vales), profundidade e largura média dos vales para os polímeros pretos em função da severidade de abrasão. Ao observar na figura os perfis dos polímeros pretos nas três velocidades, identificou-se um declínio no número de vales (ou densidade de vales) conforme aumentou-se a severidade de abrasão. Observou-se também um aumento na profundidade dos vales ao mesmo tempo em que ocorre um alargamento nos mesmos em função do aumento da severidade de abrasão. Relacionando isso à Figura 9, percebe-se que, com o aumento da severidade da abrasão, a superfície modifica a característica de seus vales. Os sulcos marcados pelo desgaste passam de vários vales estreitos e pouco profundos, na condição de menor abrasividade, para poucos vales, mas estes mais profundos e mais largos, na situação de elevado grau de abrasividade.

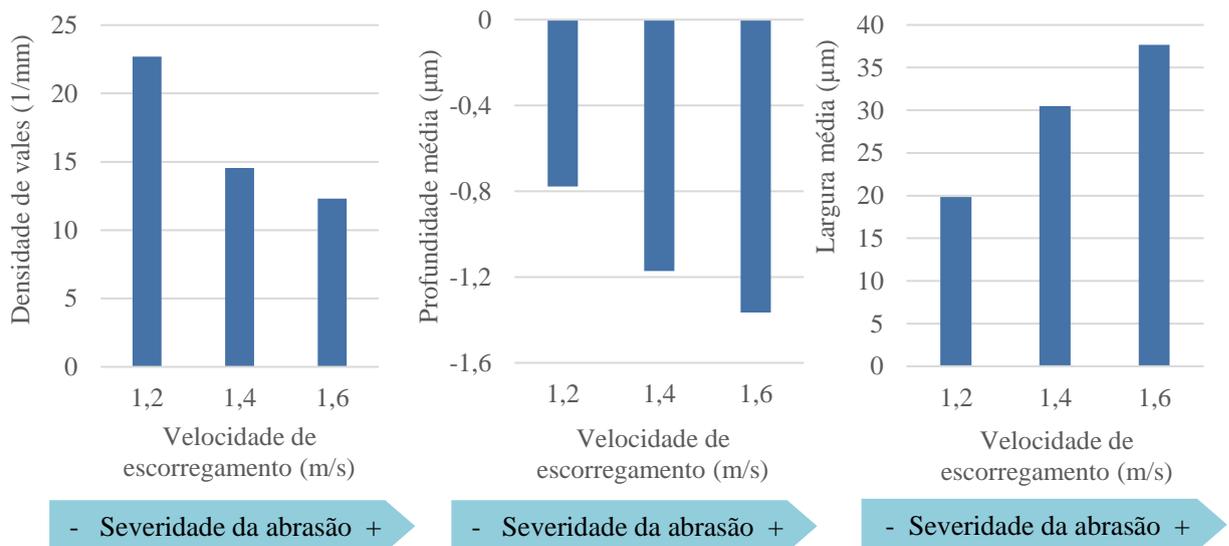


Figura 10: Densidade, profundidade e largura média dos vales nos polímeros pretos em função do aumento da severidade de abrasão.

Essa constatação do aumento na profundidade e largura dos vales em função da intensidade (grau) de abrasão é corroborada pelos valores encontrados nos parâmetros de assimetria. Com o aumento dos sulcos, tanto em profundidade quanto em largura, têm-se que a superfície se torna mais assimétrica, o que é refletido no parâmetro R_{sk}/S_{sk} . Por se tratar de vales, consequentemente a assimetria se torna mais negativa. Uma possível explicação para o aumento largura está relacionada ao aumento do tamanho dos fragmentos de desgaste por abrasão a 3 corpos durante o teste de deslizamento pino-sobre-disco. Logo, os resultados sugerem que esse pode ser um bom parâmetro para quantificação da severidade de abrasão. A curtose, por outro lado, não apresentou uma correlação clara com os efeitos do mecanismo de desgaste abrasivo.

5.2. Poliacetal (POM-C) natural

5.2.1 Mecanismos de desgaste

Ao observar as superfícies dos polímeros brancos notou-se que estavam presentes diferentes mecanismos. No polímero que foi atritado contra o disco inicialmente mais rugoso, observou-se uma predominância quase total da abrasão na superfície (Figura 11-a). Com a diminuição da rugosidade inicial da contra-parte (disco), começou a surgir o mecanismo de adesão, conforme observa-se na Figura 11-b. Ao atritar o polímero contra o disco de menor rugosidade, notou-se que o mecanismo adesivo se tornou bem mais pronunciado na superfície do polímero frente ao mecanismo de abrasão, como é possível observar na Figura 11-c.

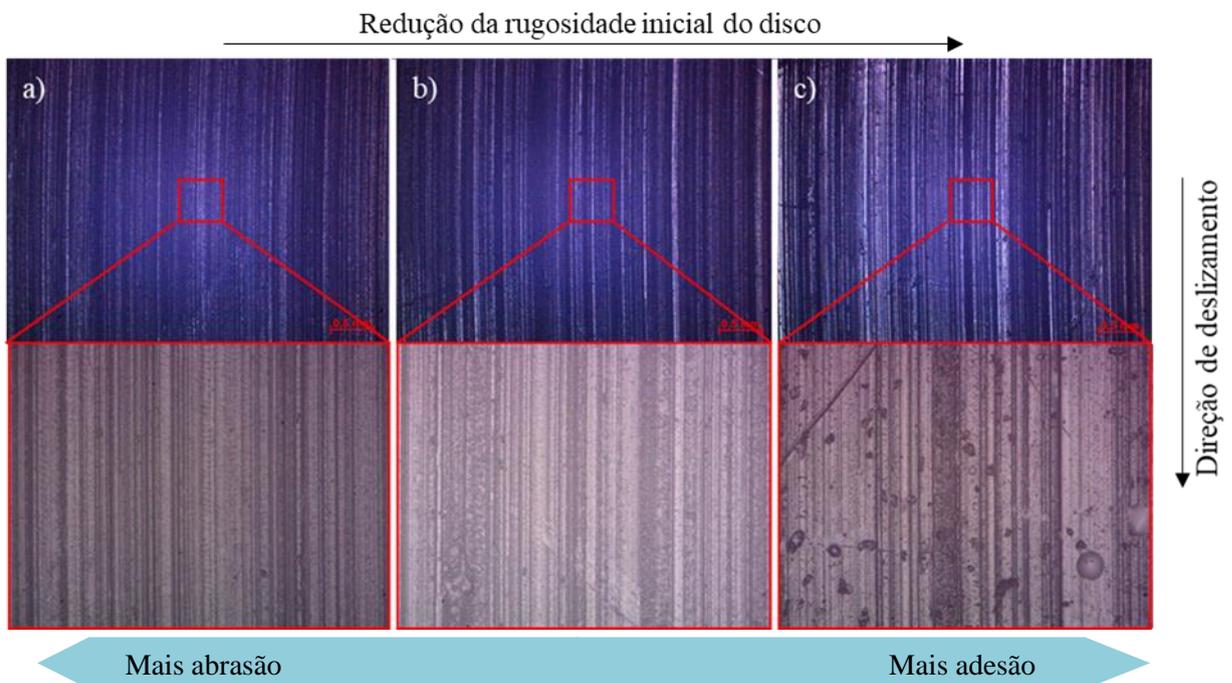


Figura 11: Micrografias dos polímeros brancos com aumento de 25 vezes (acima) e 100 vezes (abaixo).

A fim de qualificar as superfícies e diferenciar os mecanismos de desgaste existentes, os mesmos foram pintados e apresentados na Figura 12. Em azul foi identificado o mecanismo de desgaste abrasivo, em vermelho o mecanismo de desgaste adesivo com arrancamento de material (crateras) e, em verde, desgaste adesivo com deformação plástica. Com o esquema de cores, se torna mais fácil observar o aparecimento do mecanismo de desgaste adesivo nos polímeros brancos, não observado previamente no caso dos polímeros pretos.

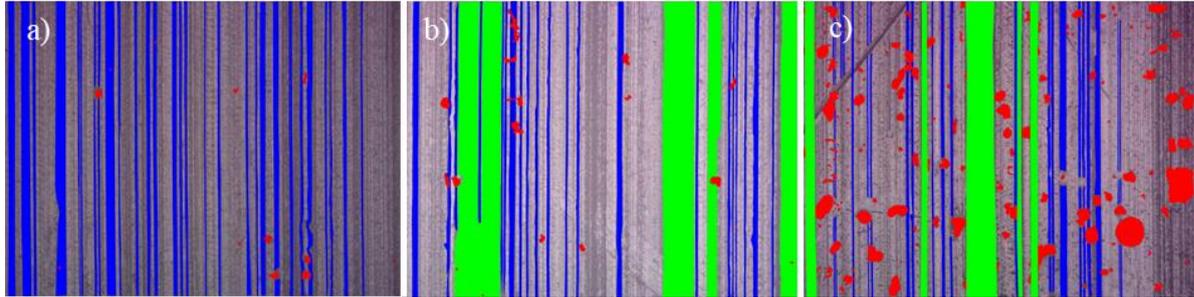


Figura 12: Diferenciação dos mecanismos de desgaste encontrados nos polímeros brancos atritados contra discos de rugosidade (a) 0,4 μm , (b) 0,2 μm e (c) 0,1 μm .

Na Figura 13 são apresentadas as interferometrias das superfícies dos polímeros brancos atritados contra os discos nas diferentes rugosidades iniciais. Ao mapear as superfícies dos polímeros brancos, notou-se que as marcas de adesão com arrancamento de material vistas nas microscopias não apareceram nas interferometrias. Esse resultado é explicado pela resolução lateral utilizada em cada técnica. Na interferometria, a resolução no mapeamento foi de 2 μm . Por sua vez, na microscopia com aumento de 100 \times , onde foi possível observar as crateras, a resolução lateral foi de 0,86 μm .

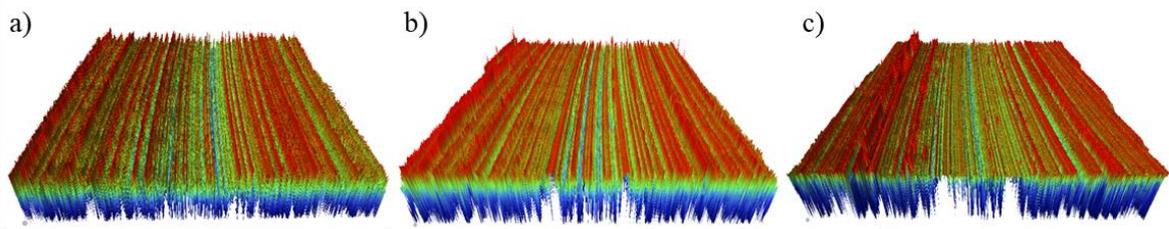


Figura 13: Interferometrias das superfícies desgastadas dos polímeros brancos atritados contra discos de rugosidade (a) 0,4 μm , (b) 0,2 μm e (c) 0,1 μm .

5.2.2 Parâmetros de rugosidade

A Figura 14 apresenta os valores de rugosidade média e rugosidade RMS encontrados para os três polímeros que haviam sido atritados contra discos de rugosidade 0,4 μm , 0,2 μm e 0,1 μm . Conforme observa-se na Figura 14, há uma tendência de alta para rugosidade RMS (R_q / S_q) em função da predominância do tipo de mecanismo de desgaste, sendo que essa mesma tendência não é seguida pela rugosidade média (R_a / S_a). Nota-se esse fenômeno de forma clara quando se compara os valores das rugosidades para os polímeros atritados contra os discos de rugosidade 0,2 μm e 0,1 μm .

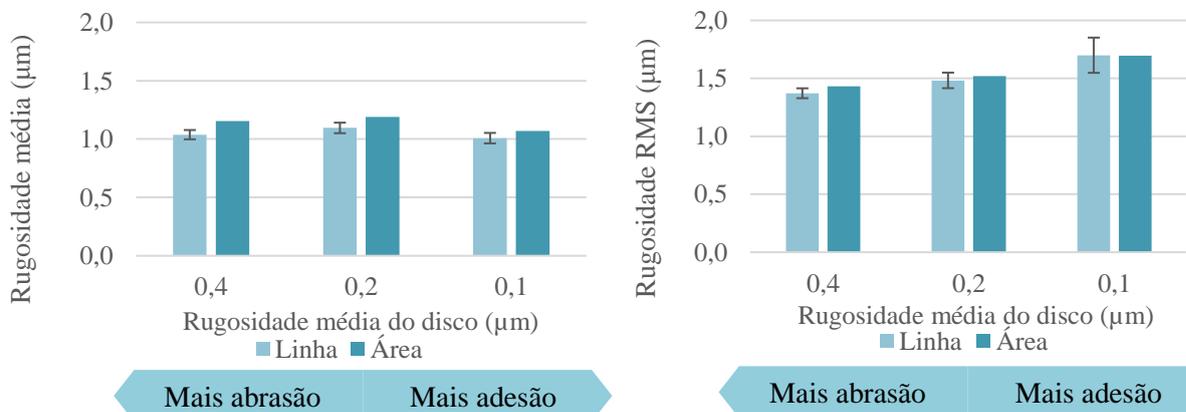


Figura 14: Rugosidade média (R_a/S_a) e RMS (R_q/S_q) dos polímeros brancos.

Na Figura 15 são apresentados os parâmetros de assimetria e curtose para os polímeros brancos. Observa-se que, conforme aumenta a adesão, a superfície vai se tornando mais assimétrica. Como a assimetria é negativa, ocorre que os vales ficam mais profundos. Uma possível explicação para esse resultado está conectada ao aparecimento do mecanismo de adesão com deformação plástica. Ocorre que esse mecanismo de desgaste se manifesta na forma de sulcos (vales), de modo que assemelha aos riscos decorrentes do mecanismo de desgaste abrasivo. Conforme foi visto na Figura 12, os riscos de abrasão diminuíram em quantidade. Contudo, em virtude da adesão com deformação plástica deixar um vale na superfície, ela pode ser confundida com a abrasão. Desse modo, esses dois fenômenos são somados no parâmetro de assimetria.

Já a curtose, por sua vez, se manteve praticamente constante nos dois primeiros casos e aumentou significativamente no polímero com maior nível de adesão. Também, para os polímeros brancos, os valores de linha e de área ficaram muito próximos, com uma diferença na ordem de 5%, seguindo a mesma tendência encontrada nos polímeros pretos discutidos anteriormente.

A barra de erros representa o desvio padrão para os respectivos parâmetros (rugosidade média, rugosidade RMS, assimetria e curtose) calculados entre as 5 linhas. Ao observá-lo, percebe-se há um aumento do mesmo conforme aumenta a parcela adesiva. Essa constatação pode ser explicada pelo comportamento dos mecanismos de abrasão e adesão na superfície. Na abrasão, a superfície se comporta de maneira orientada e regular, de modo que há baixa dispersão nos dados captados nas diferentes linhas. Por outro lado, a adesão pode surgir na superfície sob diferentes aspectos (ex.: crateras, deformação plástica) causando alta dispersão entre os dados captados nas diferentes linhas. O fato em questão pode ser corroborado pelos baixos desvios padrão apresentados para o polímero preto, onde há somente abrasão.

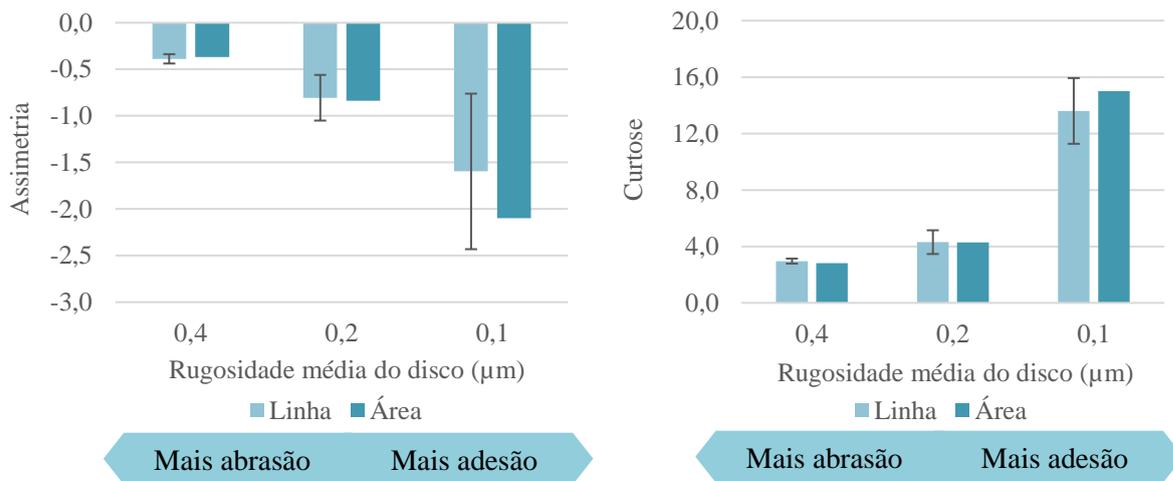


Figura 15: Assimetria (R_{sk}/S_{sk}) e Curtose (R_{ku}/S_{ku}) dos polímeros brancos.

Na Figura 16 são apresentados os histogramas das superfícies dos polímeros brancos. Pode-se observar na Figura 16-a que a superfície possui vales e picos bem distribuídos, fato apresentado também pelos parâmetros de assimetria e curtose. Por outro lado, na Figura 16-c, as asperezas se encontram distribuídas muito próximas da linha neutra, de modo que o parâmetro de curtose se torna elevado. Ainda na Figura 16-c, é possível observar vales com até 15 μm de profundidade, de forma que o parâmetro de assimetria se torna mais negativo.

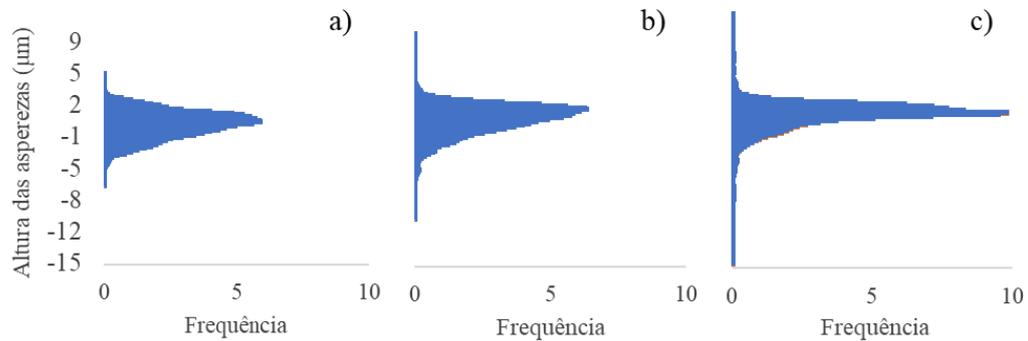


Figura 16: Distribuição de asperezas das superfícies dos polímeros brancos atritados contra discos de rugosidade (a) 0,4 μm , (b) 0,2 μm e (c) 0,1 μm .

5.2.3 Quantificação de vales

A Figura 17 apresenta os resultados de densidade de vales, profundidade e largura média para os três polímeros brancos analisados. Ao observar a referida figura, nota-se que a densidade de vales varia entre 17 e 18 vales por milímetro, sendo esse valor praticamente constante nos três casos. Os vales, por sua vez, tendem a ficar mais profundos e a largura dos mesmos tende a diminuir. No polímero atritado contra o disco de rugosidade 0,1 μm , os vales ficaram mais profundos devido aos dois efeitos previamente discutidos: abrasão e adesão com deformação plástica. Contudo, as variações nas características dos vales são relativamente pequenas entre os diferentes casos para o polímero branco, quando comparados aos perfis dos polímeros pretos.

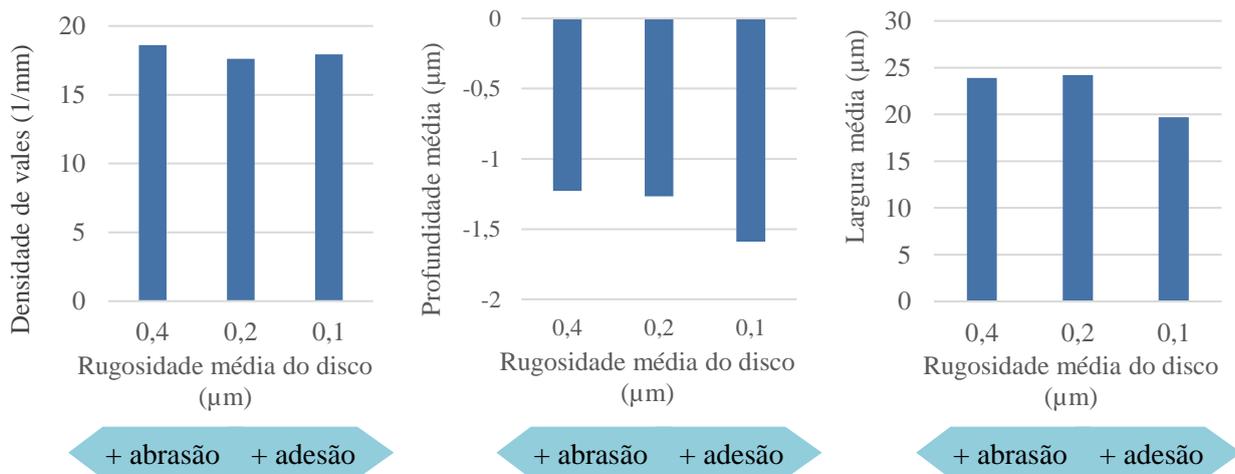


Figura 17: Densidade de vales, profundidade média e espaçamento médio do polímero preto.

Para os polímeros brancos, essa pequena variação nos resultados de densidade, profundidade média e largura média surge em razão da não captura de todos os pontos de adesão da superfície, principalmente as crateras de adesão. Uma hipótese levantada para explicar isso é a resolução utilizada no mapeamento das superfícies pelo interferômetro.

6. CONCLUSÕES

Neste estudo, foram analisadas as superfícies de dois polímeros comerciais (preto e branco). Em ambos os casos, os mecanismos de desgaste foram identificados através de

microscopia óptica. Além disso, dados de interferometria foram utilizados para avaliar os parâmetros de rugosidade (S_a , S_q , S_{sk} , S_{ku}), além da quantidade, profundidade e largura média dos vales.

Para o caso com o polímero preto, verificou-se que, com o aumento da velocidade aumentou a severidade da abrasão. Através do parâmetro R_{sk} / S_{sk} , mostrou-se que quanto maior a severidade de abrasão, mais a superfície se tornou assimetricamente negativa. Além disso, ao aumentar a severidade de abrasão, diminuiu-se o número de vales, estes se tornando mais profundos e mais largos.

Para o caso com o polímero branco, observou-se nas microscopias um aumento do mecanismo adesivo na superfície dos polímeros ao diminuir a rugosidade inicial da contraparte (disco). Entretanto, nas interferometrias não foram observadas as crateras vistas no microscópio. Um ponto levantado para explicar isso é a resolução utilizada na interferometria dos polímeros. Portanto, sugere-se que num trabalho posterior as superfícies sejam mapeadas com maior resolução. Ao aumentar a parcela adesiva, a assimetria também ficou mais negativa. Uma possível explicação ao fenômeno se deve ao aparecimento da adesão com deformação plástica, que se soma aos riscos de abrasão. Além disso, manteve-se a mesma densidade de vales, mas estes ficaram ligeiramente mais profundos e menos largos.

Constatou-se também que, em ambos os casos (polímero preto e branco), os valores dos parâmetros de rugosidade medidos estiveram muito próximos ao comparar os resultados bidimensionais e tridimensionais. Portanto, conforme observado nesse trabalho, para superfícies regulares, 5 linhas transversais ao sentido do deslizamento podem ser representativas da área.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, Marcelo Lima. **“Reconhecimento da rugosidade em imagens monocromáticas por meio de análise de textura”**. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, 2019.
- Batchelor, G.W.S. e A.W. **“Abrasive, Erosive and Cavitation Wear”**, Engineering Tribology. p. 501–551. 2006a
- Blateyron, François. **“The Areal Field Parameters”**. In: Blateyron, François. Characterisation of areal surface texture. [S. l.: s. n.]. cap. 2, p. 15-43, 2013.
- Czichos, H. and Molgaard, J.: **“Towards a general theory of tribology systems”**. Wear, v.44, 247-264, 1977.
- Da Silva, W. M., Costa, H. L., & de Mello, J. D. B. **“Transitions in abrasive wear mechanisms: Effect of the superimposition of interactions”**. Wear, 271(5-6), 977–986, 2011.
- Deltombe, R., Kubiak, K. J. and Bigerelle, M.. **“How to Select the Most Relevant 3D Roughness Parameters of a Surface”**. Wiley Periodical, Valenciennes, v.36, 150–160, 2014.
- DIN 4762. **Surface roughness, terminology**, 1989.
- DIN 50320; **“Wear; terms, systematic analysis of wear processes, classification of wear phenomena”**, 1979.
- Eyre, T. S., **“Wear characteristics of metals”**, Tribology International, p. 203–212, 1976
- Gadelmawla, E.S., Koura, M.M., Maksoud, T.M.A., Elewa, I.M., Soliman, H.H., **“Roughness parameters. Journal Of Materials Processing Technology”**, [S.L.], v. 123, n. 1, p. 133-145, abr. 2002.
- Gehlen, G.S., Neis, P.D., Poletto, J.C., Barros L.Y., Buneder, D., Ferreira, N.F., **“Pressure-velocity limit evaluation on POM-C + carbon black at different temperatures”**, Wear, Volumes 464–465, 203530, 2021.
- Harsha, A. P., Tewari, U. S., **“Two-body and three-body abrasive wear behaviour of**

- polyaryletherketone composites**". Polymer Testing, 22(4), p. 403–418, 2003
- Hutchings, I., Shipway, P. **Surface topography and surfaces in contact**. Tribology, 7–35, cap. 2, 2017
- Jain, V. K., & Bahadur, S. "**Surface Topography Changes in Polymer-Metal Sliding**" - I. Journal of Lubrication Technology, 102(4), 520, 1980.
- Jeng, Y.-R., and Gao, C.-C. "**Changes of surface topography during wear for surfaces with different height distributions**". Tribol. Trans. 43, p. 749–757, 2000
- Kato, K. Adachi, K. "**Wear Mechanisms**", Modern Tribology Handbook, Ed. CRC Press LLC Vol.2 Cap 22, 2001
- Kovalev, A., Yazhao, Z., Hui, C., & Meng, Y. "**A Concept of the Effective Surface Profile to Predict the Roughness Parameters of Worn Surface**". Frontiers in Mechanical Engineering, 5, 2019.
- Ludema, K. C.; "**Friction, Wear, Lubrication: A Textbook in Tribology**", CRC Press, ed. 1, 1996.
- Niemczewska-Wójcik, M., Piekoszewski, W. "**The surface topography of a metallic femoral head and its influence on the wear mechanism of a polymeric acetabulum**". Archives of Civil and Mechanical Engineering 17, p. 307–317, 2017.
- Oliveira, C. G., Silva, I. P. P., "**Os Estudos Tribológicos no Ensino de Engenharia Mecânica**". Revista de Ensino de Engenharia 34, n.º 2, 2015
- Stout, K J. et al. "**Development of Methods for Characterisation of Roughness in Three Dimensions**". 2. ed. Londres: Penton Press, 2002. p. 384
- Verbeek, H.J., "**Tribological systems and wear factors**", Wear, vol. 56, ed. 1, p. 81–92, 1979.
- Whitehouse DJ. "**Handbook of surface and nanometrology**". New York: CRC Press, Taylor & Francis, 2011
- Wojciechowski, L., Gapiński, B., Firlik, B. e Mathia, T., "**Characteristics of tram wheel wear: Focus on mechanism identification and surface topography**". Tribology International. 150, 2020.
- Zum Gahr, K.; "**Microstructure and wear of materials**", ed. 1, Amsterdam: Elsevier, 1987.