

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

GUSTAVO LOMBARDE

**ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE DESGASTE EM MATERIAS PARA FACAS DE
MOINHO PARA POLÍMEROS**

LONDRINA

2022

GUSTAVO LOMBARDE

**ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE DESGASTE EM MATERIAS PARA FACAS DE
MOINHO PARA POLÍMEROS**

Analysis and comparation of wear in materials for knives of polymers mill

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Janaína Fracaro de Souza Gonçalves.

LONDRINA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

GUSTAVO LOMBARDE

**ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE DESGASTE EM MATERIAS PARA FACAS DE
MOINHO PARA POLÍMEROS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 29/Novembro/2022

Janaina Fracaro de Souza Gonçalves
Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Amadeu Lombardi Neto
Doutorado em Engenharia Metalúrgica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Roger Nabeyama Michels
Doutorado em Agronomia
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LONDRINA

2022

RESUMO

Sabendo das dificuldades da reciclagem de plásticos, sendo a principal delas o excesso de manutenção necessário nos moinhos, devido a existência do processo de moagem de plásticos junto a água suja, gerando um desgaste severo nas arestas de corte das facas compostas por ligas de Ferro-Carbono, aço 5160 mais especificamente. O presente trabalho tem como objetivo, encontrar uma possível solução ou melhoria para o tempo entre manutenções do equipamento, realizando ensaios com tribômetro recíproco do tipo esfera sobre disco com um material resistente a oxidação, aço inoxidável 440C, como proposta de um possível material substituto ao material atualmente utilizado como material das facas de corte nos moinhos, se mostrando com valores de coeficiente de atrito menores que a liga utilizada, porém, com algumas ressalvas em relação a qualidade original dos corpos de prova e ao método utilizado nos ensaios.

Palavras-chave: desgaste de arestas. sustentabilidade. análise tribológica. reciclagem.

ABSTRACT

Knowing the difficulties of recycling plastics, the main one being the excessive maintenance required in the mills, due to the existence of the plastics grinding process together with dirty water, generating severe wear on the cutting edges of the knives composed of Iron-Carbon, steel 5160 more specifically. The objective of this work is to find a possible solution or improvement for the time between maintenance of the equipment, carrying out tests with a sphere-on-disc reciprocal tribometer with an oxidation-resistant material, stainless steel 440C, as a proposal for a possible substitute material for the material currently used as material for cutting knives in mills. The stainless steel showed lower values of friction coefficient than the alloy used, however, with some reservations in relation to the quality of the specimens and the method used in the tests.

Key-words: edge wear. sustainability. tribological analysis. recycling.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVO	17
2.1	OBJETIVO GERAL	17
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	17
3	JUSTIFICATIVA	18
4	REFERENCIAL TEÓRICO	19
4.1	Tribologia	19
4.1.1	Atrito	19
4.1.2	Modos de Desgaste	20
<u>4.1.2.1</u>	<u>Desgaste corrosivo</u>	<u>21</u>
<u>4.1.2.2</u>	<u>Desgaste abrasivo</u>	<u>21</u>
4.1.3	Afiação de Ferramentas	22
4.2	Materiais para facas	23
4.2.1	Aço Carbono	23
<u>4.2.1.1</u>	<u>Aço cromo</u>	<u>26</u>
4.2.1.1.1	<i>Aço cromo AISI 5160</i>	26
4.2.1.1.2	<i>Aço cromo AISI 52100</i>	26
<u>4.2.1.2</u>	<u>Aço inoxidável</u>	<u>27</u>
4.2.1.2.1	<i>Aço inoxidável tipo 440C</i>	27
4.3	Materiais processados	28
4.3.1	Polietileno	29
4.3.2	Polipropileno	30
5	METODOLOGIA	31
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
6.1	Perda de Massa	35
6.2	Coeficiente de Atrito	35
6.2.1	Coeficiente de Atrito nas Esferas de Cromo	36
6.2.2	Coeficiente de Atrito nas Esferas de Inox	38
6.3	Desgaste da Superfície	40
6.3.1	Desgaste nas Esferas de Cromo	40
<u>6.3.1.1</u>	<u>Amostra 1 – Cromo 1</u>	<u>40</u>
<u>6.3.1.2</u>	<u>Amostra 2 – Cromo 2</u>	<u>43</u>
<u>6.3.1.3</u>	<u>Amostra 3 – Cromo 3</u>	<u>45</u>

6.3.2	Desgaste nas Esferas de Inox.....	47
<u>6.3.2.1</u>	<u>Amostra 4 – Inox 1</u>	<u>48</u>
<u>6.3.2.2</u>	<u>Amostra 5 – Inox 2</u>	<u>49</u>
<u>6.3.2.3</u>	<u>Amostra 6 – Inox 3</u>	<u>51</u>
7	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

Atualmente muitos países e diversas organizações lutam para que ocorra uma melhor conscientização ecológica, muitas vezes dando atenção para poluição do ar, terra e de rios, mares e lençóis freáticos, um material acaba sendo ligado a tudo isso, o plástico. Plásticos são encontrados como contaminantes nas águas e nos solos, já no ar, o plástico acaba contribuindo com a poluição pelos gases emitidos durante sua produção, por ser derivado do petróleo, com isso é necessária se dar grande atenção ao processo de reciclagem deste tipo de material.

A reciclagem de materiais é de grande importância para a sustentabilidade no ciclo de qualquer produto, principalmente nos que são descartados diariamente. No país, cerca de 30% de todo o lixo produzido pode ser reciclado de alguma maneira, sendo apenas 3% destinado ao processo de reciclagem. Os materiais plásticos, cerca de 13,5% de todo o lixo reciclado produzido anualmente no Brasil, equivalente a 10,5 milhões de toneladas, apresenta um percentual de reciclagem de 24%, onde, os outros 76% ainda são indevidamente descartados (ABIPLAST, 2021, PORTAL FMU CENTRO UNIVERSITARIO, 2021).

O processo de reciclagem de plásticos, é a transformação da sucata, lixo coletado das residências, em matéria prima. A matéria prima, comumente, consumida de duas diferentes formas, uma para fabricação de peças extrusadas, utilizando o material moído (Figura 1), e outro para fabricação de peças injetadas, utilizando o material granulado (Figura 2).

Figura 1 – Plástico moído.



Fonte: Próprio autor, 2022.

Figura 2 – Plástico granulado.



Fonte: Próprio autor, 2022.

Para a obtenção do material moído, são necessários três processos, sendo eles: separação/classificação, moagem e lavagem, já para o material granulado são necessários outros dois processos adicionais, a secagem e a extrusão/granulação. Todo o processo de reciclagem apresenta algumas particularidades, como a presença de bastante impureza na sucata de plástico, desde material orgânico, terra até pedras e metais, com isso, é de grande importância uma boa realização do processo de separação/classificação (NEUPLAST, RECICLA SAMPA).

O objetivo da separação/classificação é identificar e separar os materiais de acordo com sua composição, podendo ser poli tereftalato de etileno (PET), polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD), poli cloreto de polivinila (PVC), polipropileno (PP) e entre outros tipos de plásticos. O processo também tem a função de eliminar parte das impurezas do material, como grandes e médios pedaços de metais ou peças plásticas que apresentam algum metal, um exemplo, baldes com alça metálica e brinquedos aparafusados. A eficiência deste processo acaba sendo relativamente baixa, devido a presença de pequenos objetos metálicos, como parafusos e porcas que tornam difícil a visualização durante o processo de separação.

Sabendo da presença destas impurezas um processo eficiente na reciclagem de materiais como o PEAD, PEBD e o PP, que possuem densidade abaixo de 1000 Kg/m³, é a lavagem, onde o material é colocado em uma “piscina de lavagem” e as pedras e metais que não foram removidos durante o processo de separação/classificação afundam, desde que não estejam fixos ao material plástico,

enquanto o material plástico boia sobre a água, o processo de lavagem também removeria outras impurezas encrustadas no material como matéria orgânica.

Um dos problemas encontrados neste processo de lavagem, é o formato dos objetos plásticos, que impede a devida lavagem dos objetos para remoção das impurezas que se fixam no plástico, como o material orgânico mencionado anteriormente, o tipo de lavagem necessária para esta parte do processo é uma lavagem forçada. A solução ideal é realizar a lavagem forçada do material moído, para isso, é necessário a realização de dois processos de lavagem, um antes da moagem, removendo as impurezas mais pesadas, como metais, e outra após a moagem removendo as impurezas impregnadas no material.

Por falta de estrutura física ou outros motivos, muitas empresas de reciclagem operam com um único sistema de lavagem propriamente dito e outro paralelo a outro processo, sendo utilizada a moagem molhada da sucata classificada e, posteriormente, despejada na “piscina de lavagem”. A operação de moagem possui uma adição contínua de água, com o intuito de não só realizar a moagem do material, mas também de realizar a lavagem forçada do material, ao sair do moinho o material cai em uma “piscina de lavagem” onde os materiais mais pesados afundam, o problema deste tipo de sistema é o processamento de pedras e pequenos metais não removidos na classificação do material.

Para o processo onde a moagem e lavagem são realizadas simultaneamente, o maior problema encontrado é a necessidade de constante afiamento das facas de corte do moinho, onde a afiação pode ser realizada de uma a duas vezes ao dia, de acordo com a quantidade de material processado no período. A alta necessidade de afiação se deve principalmente a qualidade de água utilizada (Figura 3), tendo em vista que em casos de utilização de água limpa é percebido uma melhora na durabilidade do fio de corte. Por questões ambientais, a água não pode ser descartada à vontade, devendo ser reutilizada o máximo possível, normalmente as empresas realizam apenas um processo de decantação na água suja, mas ainda assim, a água apresenta uma quantidade considerável de particulados ao retornar ao processo de moagem.

Figura 3 – Qualidade da água bombeada para o processo de moagem.



Fonte: Próprio autor, 2022.

As facas dos moinhos utilizadas para processamento de materiais plásticos, são comumente de ligas “comuns” de Ferro-Carbono, mais especificamente aço mola, no caso avaliado para o desenvolvimento do presente trabalho, foi consultado com um fornecedor de facas o tipo de material utilizado, sendo indicado pelo fornecedor que as facas são fabricadas com o material AISI 5160. Como uma possível alternativa para a solução do problema de desgaste excessivo do fio de corte, pode ser sugerido a alteração do material das facas para um material inoxidável, cujas resistências e durezas sejam no mínimo, próximas ao do material Ferro-Carbono já utilizado pela empresa em questão.

2 OBJETIVO

Os objetivos deste trabalho serão pontuados em dois grupos, objetivos gerais e específicos.

2.1 OBJETIVO GERAL

Como objetivo geral do trabalho, se almeja constatar se o material proposto como alternativa terá um resultado melhor ou pior que o já utilizado.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Como objetivo específico, é destacado:

- Determinar a quantidade material perdida durante os ensaios;
- Determinar o coeficiente de atrito (μ) durante os ensaios realizados;
- Avaliar a superfície dos materiais após os ensaios, como ponto decisivo na avaliação;
- Realizar ensaios de maneira consistente para os diferentes materiais;
- Realizar uma avaliação entre os materiais para determinar qual obteve o melhor resultado.

3 JUSTIFICATIVA

Nos dias de hoje, é imprescindível a busca por melhorar a sustentabilidade e eficiência de todos os processos de dentro de uma empresa, amenizar o desgaste das facas, não só diminuirá a necessidade de afiamento, aumentando o tempo entre afiadas, como também aumentara a vida útil de um mesmo conjunto de facas do moinho, o que diminui a necessidade de compra de novas chapas metálicas para confecção de novas facas.

A troca das facas para um material inoxidável, muito utilizado no setor alimentício como material das facas dos moinhos, pode trazer a solução ao maior problema encontrado no sistema de moagem de plásticos com água, o desgaste por oxidação junto a abrasão.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção serão mostrados conteúdos técnicos e informações imprescindíveis sobre os assuntos necessários para o desenvolvimento do respectivo trabalho.

4.1 Tribologia

A tribologia centraliza o conhecimento da física, química, mecânica e, principalmente, da ciência dos materiais em uma única ciência, com o intuito de entender, explicar e prever o comportamento de sistemas físicos que são utilizados em diferentes situações do dia a dia. Não só os campos que formam a tribologia existiam antes dela, os estudos sobre atrito, desgaste e lubrificação, já existiam antes mesmo de 1966 (SINATORA, 2015), data esta que se tem como a primeira vez em que se utilizou o termo tribologia em um documento, na ocasião, um artigo de H. P. Jost (JOST, 1990).

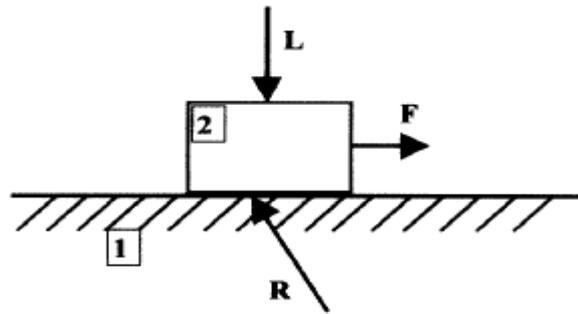
4.1.1 Atrito

O atrito é nada mais nada menos que o fenômeno que impede ou dificulta qualquer movimento com escorregamento entre superfícies. Caso os objetos estejam em repouso entre si, sem a ocorrência de escorregamento entre superfícies, o fenômeno é denominado especificamente de atrito estático, caso um corpo apresenta escorregamento sobre uma superfície é recebida a denominação de atrito dinâmico (HALLIDAY, 2012).

Atrito, ou mais especificamente, força de atrito, também pode ser definido como a força de reação, onde, para que ocorra ou tente ocasionar o deslizamento entre duas superfícies é necessária a presença de uma força, a reação dela, será a força de atrito.

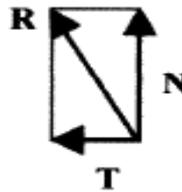
No esquema a seguir, Figura 4, é representado uma superfície (1) e um corpo (2), onde a força F é a responsável pela realização do movimento e a força L , a representação da força peso do objeto. Na Figura 5 é apresentado a decomposição da força de reação, representada como força R na Figura 4, que é dividida em duas, a força N e força T , respectivamente, força normal e força de atrito.

Figura 4 – Forças atuantes sobre um corpo.



Fonte: Seabra, 2000.

Figura 5 – decomposição da força de reação.



Fonte: Seabra, 2000.

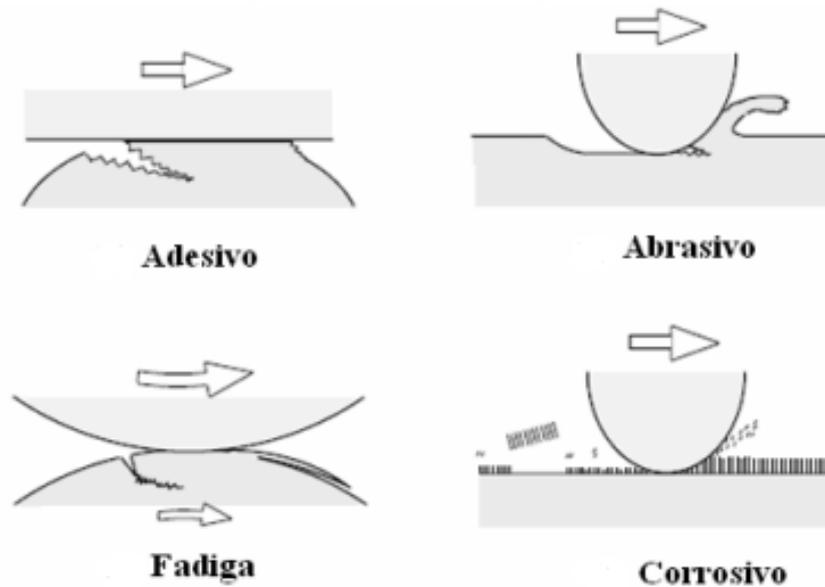
Com a força normal e força de atrito, é possível realizar a determinação do coeficiente de atrito (μ) entre as duas superfícies em questão, onde este valor pode ser calculado por meio da seguinte fórmula (HALLIDAY, 2012):

$$\mu = \frac{T}{N} \quad (1)$$

4.1.2 Modos de Desgaste

Desgaste é o principal foco de estudo da tribologia, onde se considera que existem quatro tipos de modos de desgaste, sendo o desgaste por adesão, abrasão, corrosão e fadiga (RADI et al., 2007). A Figura 6 apresenta uma ilustração dos 4 modos de desgastes mencionados anteriormente.

Figura 6 – Modos de desgaste.



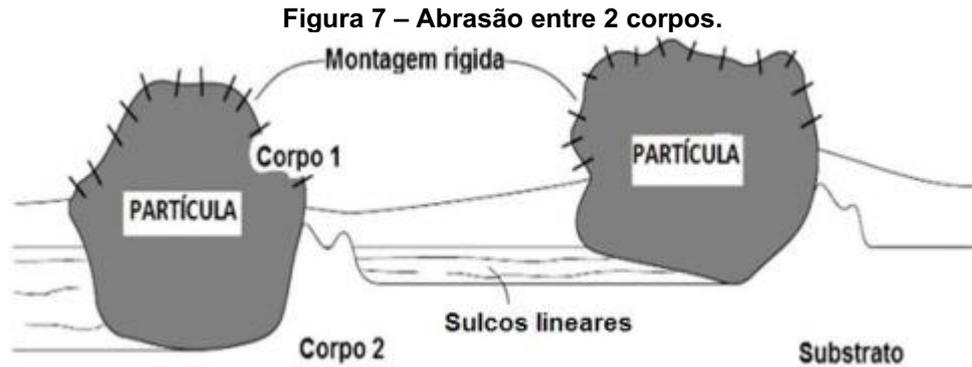
Fonte: RADI et al., 2007.

4.1.2.1 Desgaste corrosivo

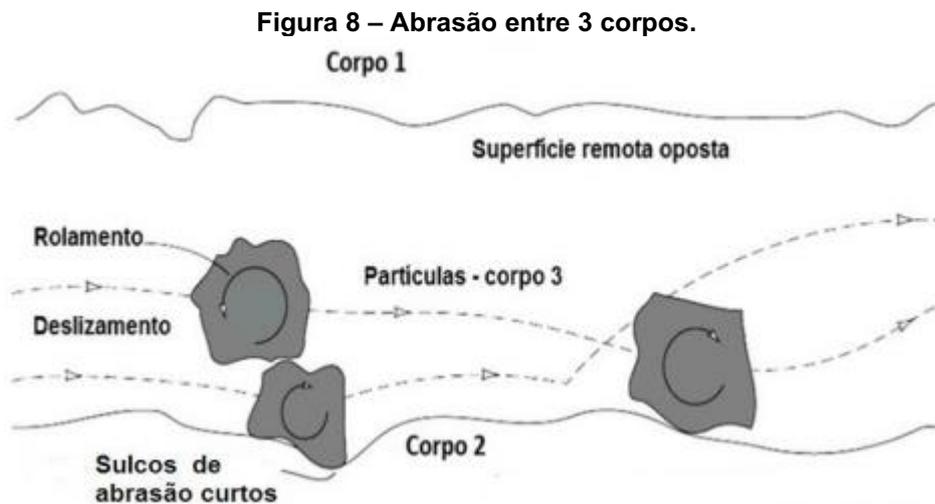
O desgaste por corrosão ocorre devido a combinação de uma ação química e outra mecânica, na ação química ocorre a iteração entre o material e o oxigênio do ar e/ou da umidade presente no ambiente, ocorrendo a formação de uma camada superficial de óxido derivado do material em questão (STRAFFELINI, 2015), sendo os mais comuns são o óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido de cromo (Cr_2O_3) e o óxido de alumínio (Al_2O_3). Já a ação mecânica, ela é responsável por provocar a remoção da camada de oxido gerada (STRAFFELINI, 2015), deixando exposta uma nova porção de material que ainda não passou pelo ataque químico do oxigênio ou da água.

4.1.2.2 Desgaste abrasivo

Para o desgaste por abrasão, caracterizado pelo contato e deslizamento entre dois ou mais corpos, apresenta duas possibilidades, a iteração entre dois corpos e a iteração entre três corpos. Na iteração com apenas dois corpos, ocorre a deformação plástica de uma de uma face devido o contato com partículas duras, gerando sulcos ou poros na superfície do material, como apresentados na Figura 7 (RADI et al., 2007, STRAFFELINI, 2015).



Já para o caso com iteração entre três corpos, ocorre a iteração entre duas faces com partículas dura entre elas, normalmente sendo grãos de areia ou terra que contaminam o sistema tribológico, estas partículas rígidas provocam pequenos sulcos em ambos os materiais, porém, sendo mais agressivo a superfície menos resistente (Figura 8) (STRAFFELINI, 2015).



4.1.3 Afição de Ferramentas

A ferramenta, conseqüentemente, apresentara perda de eficiência em seu corte, este fato se deve a ocorrência do desgaste do fio de corte, juntamente com a ocorrência de pequenas quebras do fio de corte, como solução para este ocorrido, pode ser utilizado o processo de afiação, processo este que deve ser muito bem executado para se garantir a mais alta qualidade do processo futuro de corte e a resistência da aresta cortante da ferramenta.

O desgaste das arestas, em situação de operação, pode ser caracterizado pelo desgaste por deslizamento ou abrasão, enquanto no processo de afiação e amolação, o desgaste é caracterizado apenas pelo desgaste abrasivo (MELLO, 2006).

O processo de afiamento de uma ferramenta, quando devidamente realizado, é feito por um rebolo abrasivo, sendo mais comum os rebolos formados por carbeto de silício (SiC) ou óxido de alumínio (Al_2O_3), que realizam o desgaste por abrasão na ferramenta de maneira a obter um desgaste uniforme, sem que ocorra variação da geometria por todo o comprimento de corte da ferramenta, o desgaste realizado na ferramenta é feito com o objetivo de se obter uma aresta pontiaguda no lugar de uma aresta arredondada, gerada pelo desgaste operacional.

Um importante cuidado que se deve ter ao realizar o processo de afiamento de uma ferramenta, é não promover o aquecimento excessivo da região trabalhada, onde este aquecimento do material pode provocar perda de tratamento térmico na região da peça e, conseqüentemente, perdendo dureza na aresta (PAIVA et al., 2017).

4.2 Materiais para facas

Na indústria a utilização de facas para o processo de corte é de suma importância para diversos setores, sendo necessário a utilização de determinados materiais por diversos motivos para processos específicos, sendo disponibilizado no mercado uma infinidade de opções de materiais para a produção de facas de cortante.

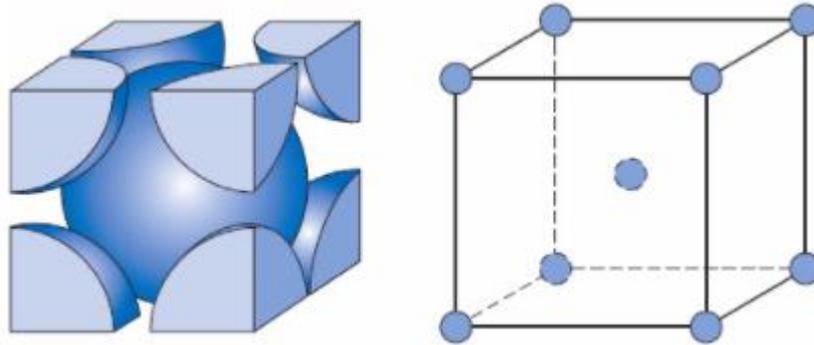
4.2.1 Aço Carbono

O ferro, devido ao seu grande volume na superfície da Terra e por possuir certa facilidade de processamento, em relação a outros metais, se tornou o metal mais processado pelas indústrias, junto ao carbono, seu principal elemento de ligação, forma a liga Ferro-Carbono, sendo a liga metálica mais utilizada, devido a isso, a liga formada pelo ferro e pelo carbono se tornou a mais estuda e aprimorada.

Os metais possuem três possíveis estruturas cristalinas, cúbica de corpo centrado (CCC) (Figura 9), cúbica de faces centradas (CFC) (Figura 10) e a hexagonal compacta (HC) (Figura 11), onde a ferrita, a forma estável do ferro puro na temperatura ambiente, ou ferrita α , apresenta o tipo de estrutura cristalina igual a primeira citada, cubo de corpo centrado (CCC), ao ser aquecida até uma temperatura de 912°C, a ferrita se transforma em austenita, ou ferro γ , possuindo uma estrutura

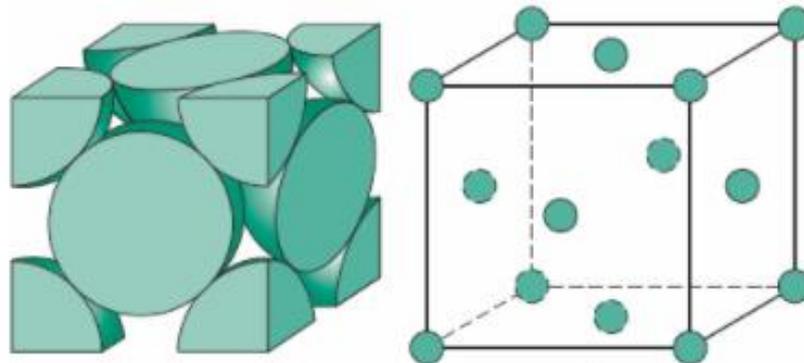
cristalina do tipo cúbica de faces centradas (CFC), antes do material chegar ao ponto de fundição, a uma temperatura de 1538°C, o material volta a se torna uma ferrita, agora sendo chamada de ferrita δ , a mudança ocorre a uma temperatura de 1394°C, voltando a possuir estrutura do tipo CCC (CALLISTER, 2008).

Figura 9 – Estrutura cristalina do tipo cúbica de corpo centrada.



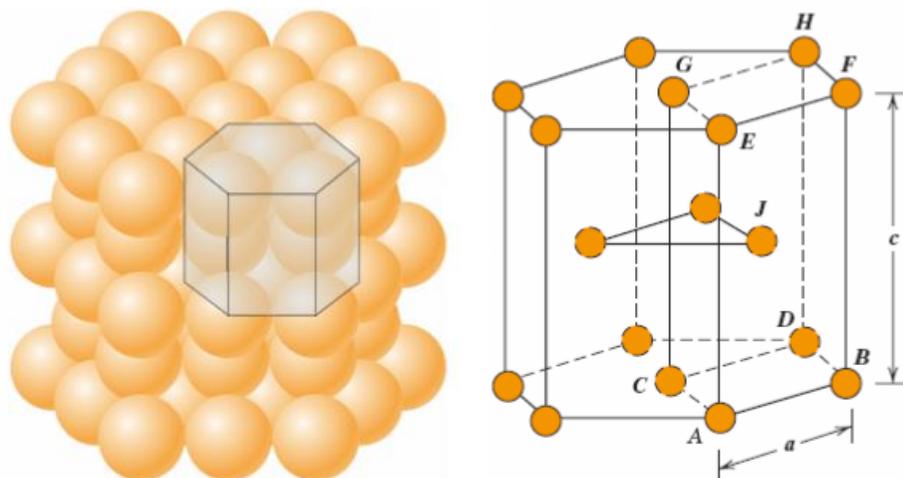
Fonte: adaptada de CALLISTER, 2008.

Figura 10 – Estrutura cristalina do tipo cúbica de faces centradas.



Fonte: adaptada de CALLISTER, 2008.

Figura 11 – Estrutura cristalina hexagonal compacta.

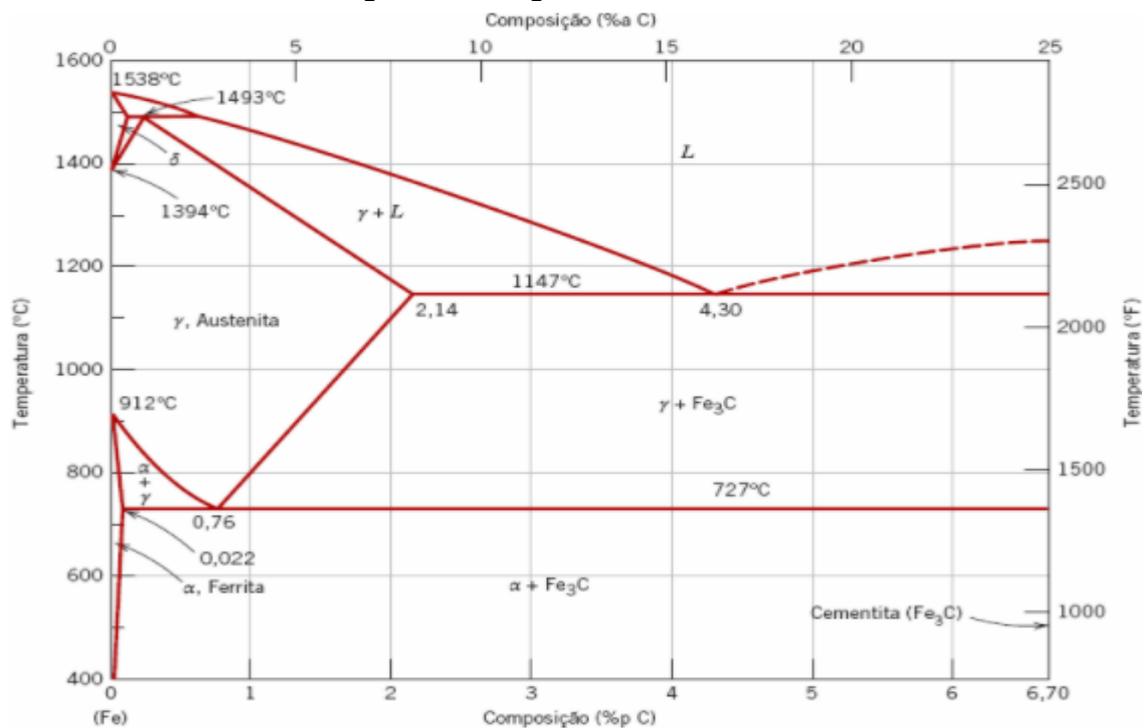


Fonte: adaptada de CALLISTER, 2008.

A mistura entre o ferro e o carbono, apresenta três denominações, sendo aço, ferro fundido e cementita, os materiais de interesse para utilização, são apenas os aços e os ferros, a cementita, mais conhecida como carbeto de ferro (Fe_3C), possui alta dureza e fragilidade, não sendo de grande interesse comercial, diferente da mistura Ferro-Carbeto de ferro que apresenta alto interesse tecnológico e comercial.

A obtenção da cementita se dá a partir de uma presença de 6,7% de carbono em meio ao ferro, com isso, os diagramas de fase apresentam uma composição máxima de 6,7%p C. A Figura 12 mostra o diagrama de composição Ferro-Carbono.

Figura 12 – Diagrama Ferro-Carbono.



Fonte: adaptada de CALLISTER, 2008.

No sistema Ferro-Carbeto de ferro apresentado acima, pode ser observado a diluição do carbono em cada fase do ferro, na fase ferrita α (CCC), ou somente ferrita, a solubilidade máxima do carbono é de 0,022%p devido à dificuldade de acomodar o átomo de carbono em meio a cadeia cristalina da ferrita, já que o carbono se comporta como uma impureza intersticial para o ferro. Em temperatura mais baixas, inferiores a 727°C, uma concentração de carbono superior a 0,022%p já se encontra a presença de carbeto de ferro. Acima de uma temperatura de 727°C o ferro se torna austenita (CFC), que possui uma solubilidade maior para o carbono, chegando a um máximo de 2,14%p em uma temperatura de 1147°C (CALLISTER, 2008, BEZERRA, 2019).

4.2.1.1 Aço cromo

Os aços que possuem o cromo como elemento adicional na composição, em até 5%p do elemento de liga, apresentam a nomenclatura 5xxx, onde, a concentração do elemento indicado, neste caso o cromo (Cr), é indicado pelo segundo dígito da série.

O elemento cromo, na liga Ferro-Carbono, é adicionado com o intuito de se melhorar a temperabilidade do material e aumentar a resistência a corrosão e a abrasão, a adição deste elemento é muito comum na composição de aços-ferramentas, com o objetivo de justamente se melhorar a resistência ao desgaste e a oxidação (COMPR AÇO, 2020, PÓVOA, 2017).

4.2.1.1.1 *Aço cromo AISI 5160*

Este aço, pela nomenclatura, apresenta uma composição aproximada de 1%p de cromo e 0,60%p de carbono, sendo classificado como aço médio carbono, além destes elementos, os principais da liga, o material também apresenta outros elementos em sua composição, como o manganês (Mn), fósforo (P), silício (Si) e o enxofre (S), que apresentam respectivamente, 0,75%-1,0%p de manganês, máximo de 0,035%p de fósforo, 0,15%-0,30%p de silício e máximo de 0,04%p de enxofre (MAT WEB, TELLES, 2003).

O material recozido apresenta um limite de escoamento de 550 MPa, uma resistência última a tração de 958 MPa, um alongamento total, em ensaio de duas polegadas, de 17,2%, uma dureza Brinell de 197 HB e uma dureza Rockwell C de 13 HRC, convertido da dureza Brinell (AÇOS NOBRES). Quando temperado, o material atinge uma dureza Rockwell C na faixa de 58 a 63 HRC.

4.2.1.1.2 *Aço cromo AISI 52100*

O AISI 52100 apresenta uma composição na faixa de 1,3%-1,6%p de cromo e 1%p de carbono, sendo classificado como aço médio carbono, além destes, as concentrações dos elementos de liga, são: 0,25%-0,45%p de manganês (Mn), máximo de 0,025%p de fósforo (P), 0,15%-0,30%p de silício (Si) e máximo de 0,025%p de enxofre (S) (MAT WEB).

O material recozido tem um limite de escoamento de 550 MPa, uma resistência última a tração de 880 MPa, um alongamento total, em ensaio de duas polegadas, de 8% a 25% e uma dureza Rockwell C de 62 a 66 HRC (GERSON LUZ).

4.2.1.2 Aço inoxidável

Já os aços inoxidáveis, diferente do aço cromo (Cr), é um aço do tipo alta liga, com composição a partir de 10% de peso do elemento de liga, no caso do aço em questão, o inoxidável, a composição de cromo na liga fica na faixa de 11% a 26%, trazendo alta resistência a corrosão, junto com a adição de molibdênio (Mo), manganês (Mn) e até 22% de níquel (Ni) (TELLES, 2003, PÓVOA, 2017).

Suas três variações são, aço inoxidável ferrítico, austenítico e martensítico, onde o material ferrítico, apresenta uma concentração máxima de carbono (C) de 0,15%p, de cromo, um valor entre 10,5% e 18%p e sem a presença de níquel (Ni), já o material austenítico, apresenta uma concentração de 16% a 20%p de cromo e de níquel, 6% a 14%p, com uma concentração máxima de 0,15%p de carbono.

Para o material martensítico, o único que pode receber algum tipo de tratamento térmico, apresenta uma faixa de concentração de cromo de 12% a 14%p e de carbono um valor mínimo de 0,15%p, sendo que este material é caracterizado como liga alto carbono (KLOECKNER METALS, 2011).

4.2.1.2.1 *Aço inoxidável tipo 440C*

O aço inox tipo 440C, apresenta uma composição máxima de até 1%p de manganês (Mn), 1%p silício (Si), 1,1%p de carbono (C), enquanto o cromo (Cr) e molibdênio (Mo) apresentam respectivamente, uma concentração de 17%p e 0,75%p (MAT WEB).

O material apresenta um limite de escoamento de 448 MPa, quando recozido, uma resistência última a tração de 758 MPa, um alongamento total, em ensaio de duas polegadas, de 14% e uma dureza Brinell de 230 HB (NORTON, 2013), que seria o equivalente a 20 HRC, quando passado por tempera, este valor pode chegar a valores acima de 60 HRC.

4.3 Materiais processados

Os materiais processados, são do tipo poliméricos, descobertos a mais de um século, tiveram sua produção em nível industrial, iniciada a menos de 90 anos (CANEVAROLO, 2006), materiais estes que vão de algumas borrachas até plásticos e fibras, muito utilizados pelas indústrias no dia de hoje, sua utilização vai da construção civil até pequenos componentes elétricos/eletrônicos, suas estruturas moleculares apresentam ligações covalentes, que proporcionam excelente estabilidade físico-química (SILVA, 2003).

As fontes de produção dos polímeros são produtos naturais, hulha (carvão natural) e, a que apresenta maior participação, o petróleo, onde do petróleo é removido a nafta que após processada gera moléculas de etileno, propileno, butadieno, buteno e isobutileno, que por sua vez, são utilizados para a produção de diversos polímeros (CANEVAROLO, 2006), sendo apresentados um pequeno esquema na Figura 13.

Figura 13 – Rotas simplificadas de produção de alguns polímeros.

Etileno	→		→	PE e copolímeros
+ Cloro	→	Cloro de vinila	→	PVC
+ Benzeno	→	Estireno	→	PS
+ Oxigênio	→	Óxido de etileno	→	Poliéteres e Poliésteres
Propileno	→		→	PP
+ Amônio	→	Acrilonitrila	→	Resinas acrílicas
+ Benzeno	→	Fenol	→	Resinas fenólicas
+ HCN	→		→	PMMA
+ Oxigênio	→	Óxido de propileno	→	PU
Butadieno	→		→	PB
+ Amônio	→	Hexametileno diamina	→	PA6,6
+ Cloro	→	Cloropreno	→	Neopreno
+ Estireno	→		→	SBR

Fonte: adaptado de CANEVAROLO, 2006.

Sobre seus comportamentos mecânicos, semelhante aos metais, em algumas temperaturas, os polímeros apresentam fraturas sob carga de impacto, podendo apresentar uma fratura do tipo dúctil ou frágil (CALLISTER, 2008), já relacionado com sua viscoelasticidade, os polímeros apresenta um curioso fenômeno de se comportar como um fluido e como um sólido elástico ao mesmo tempo, apresentando uma fração

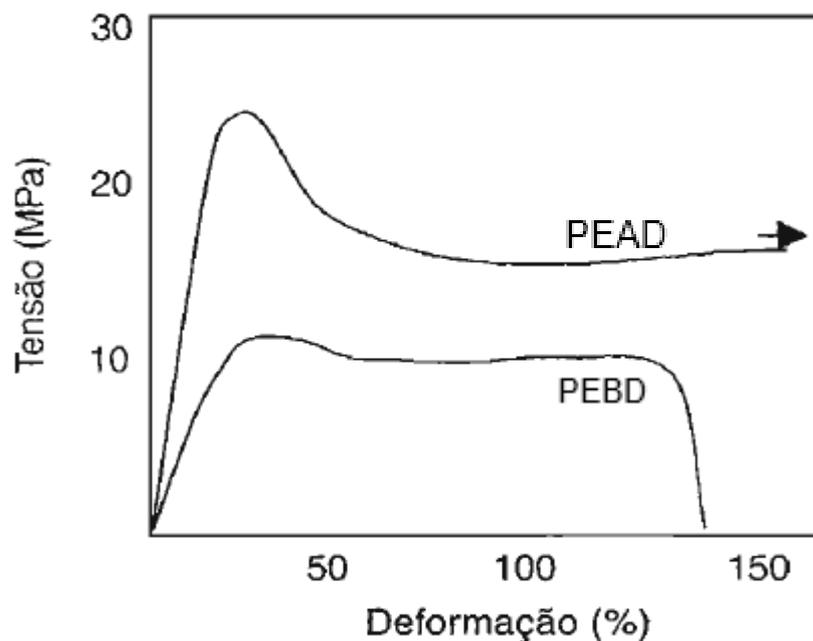
de deformação elástica devido a mudança de ângulo e distância entre as moléculas da cadeia, já a fração de deformação plástica é ocasionada devido ao cisalhamento entre diferentes cadeias poliméricas no material (CANEVAROLO, 2006).

4.3.1 Polietileno

O polietileno possui duas principais variações comerciais, a de alta densidade (PEAD) e a de baixa densidade (PEBD), ambos apresentando uma densidade menor que a da água, para o material de alta densidade o valor de densidade é de 950 a 960 $[\text{Kg}/\text{m}^3]$ (quilogramas por metro cubico), enquanto para o material de baixa densidade, sua densidade é de 912 a 925 $[\text{Kg}/\text{m}^3]$ (COUTINHO et al., 2003).

Em relação a tensão de escoamento, os materiais apresentam poucas semelhanças, sendo que o material de alta densidade apresenta um modulo de elasticidade duas vezes maior, enquanto na fase plástica, o nível de tensão suportado é apenas de 50% a 60% maior que o de baixa densidade, além de resistir a uma porcentagem de deformação maior antes do rompimento, podendo ser avaliado na Figura 14.

Figura 14 – Curva tensão-deformação para o polietileno (PE) de alta e baixa densidade.



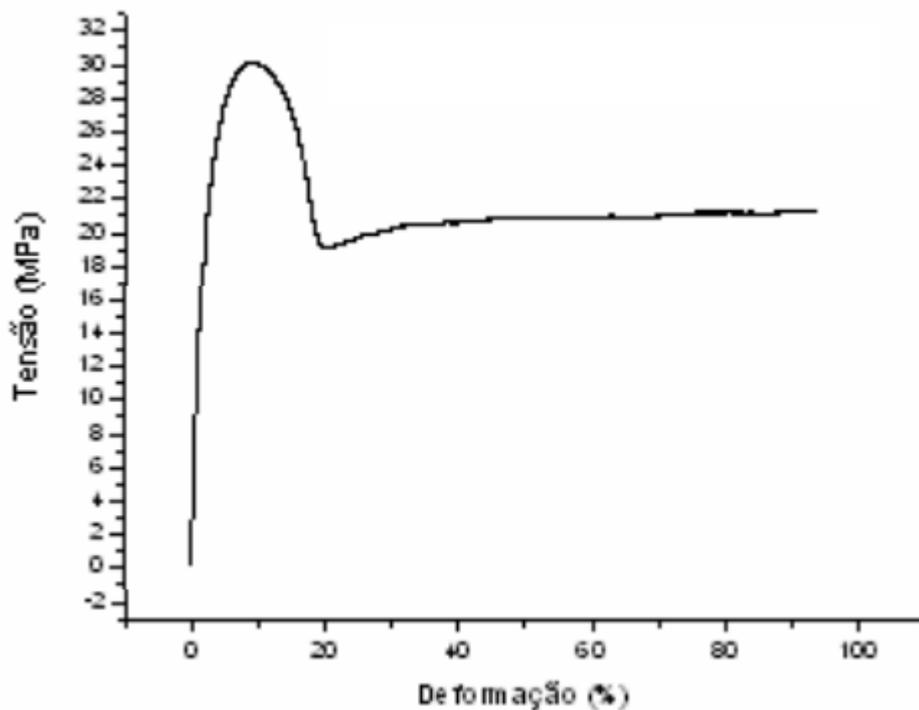
Fonte: adaptado de CANEVAROLO, 2006.

Outro ponto a se observar, é que o material de alta densidade apresentante uma queda de resistência após o ponto de transição de deformação elástica para plástica, enquanto o material de baixa densidade, apresenta uma queda na resistência bem sutil (CANEVAROLO, 2006).

4.3.2 Polipropileno

O polipropileno, com densidade próxima de $920 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$ apresenta um modulo de elasticidade que se modifica com a alteração da densidade do material, tendo um aumento do modulo quando se tem um aumento da densidade, apresentando um gráfico de tensão por deformação (Figura 15) com um pico no valor de modulo de elasticidade, seguido de uma queda abrupta com estabilização em 65% da tensão de escoamento, apresentando uma deformação de duas vezes de seu comprimento (CANEVAROLO, 2006, BRUNETTO et al., 2009).

Figura 15 – Curva tensão-deformação para o polipropileno (PP).

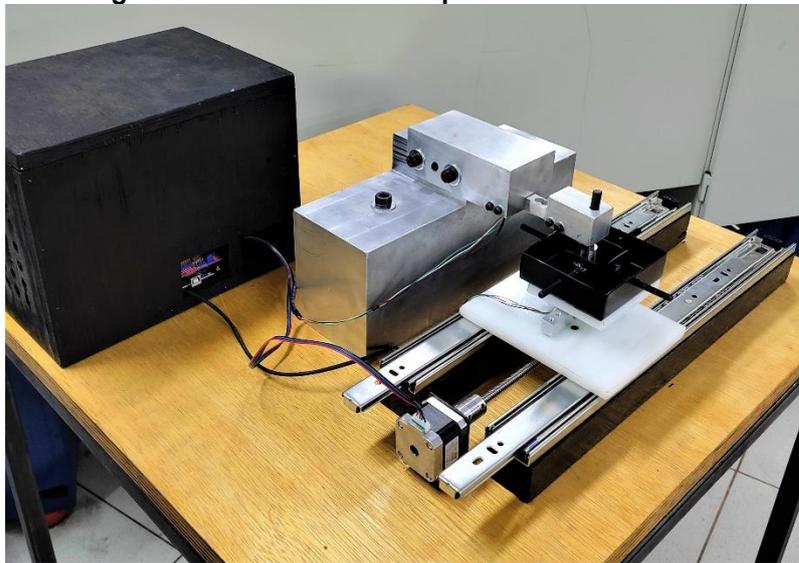


Fonte: adaptado de BRUNETTO et al., 2009.

5 METODOLOGIA

Para avaliação e comparação entre os materiais propostos, foi necessário a realização de um ensaio que gerasse o desgaste para avaliação, os ensaios foram realizados em um tribômetro recíproco linear do tipo esfera sobre disco (Figura 16). O tribômetro tem seu funcionamento caracterizado pelo seu movimento, onde ele se move horizontalmente em um único eixo, realizando um movimento de para frente e para trás repetidamente.

Figura 16 – Tribômetro do tipo esfera sobre disco.



Fonte: Viegura, 2022.

Os ensaios seguiram parcialmente a norma ASTM G133 (2016), redigida especificamente para ensaios em tribômetros recíprocos de esfera sobre disco, as condições utilizadas nos ensaios, como distância total percorrida e carga normal, será de 50% do proposto pela norma, onde a distância percorrida será de 200 metros e a carga normal de 100 Newtons.

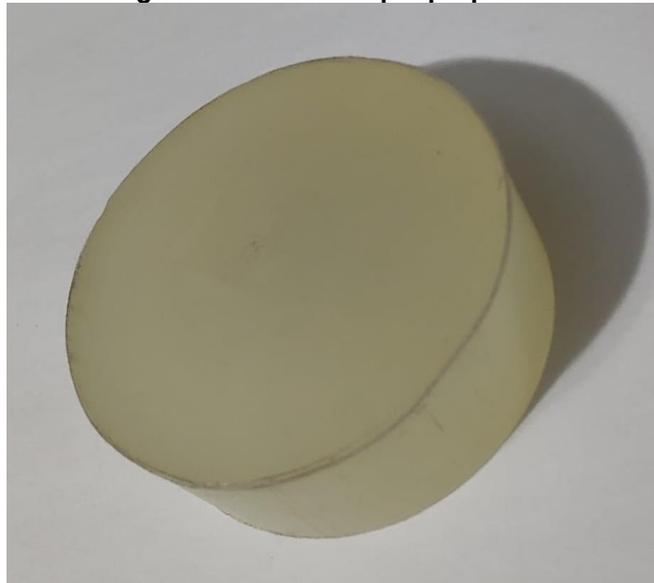
Os ensaios foram realizados com esferas de diâmetro de 3/8 de polegadas (Figura 17), ou 9,525 milímetros, medidas seguindo o projeto da máquina utilizada e da norma ASTM G133 (2016), sendo elas referente aos dois materiais propostos para as facas, aço AISI 5160 e AISI 440C. A placa sendo um disco de material polimérico (Figura 18), com dimensões de 40 milímetros de diâmetro e 15 milímetros de altura, sendo escolhido o polipropileno (PP) como material do disco, por apresentar uma maior resistência.

Figura 17 – 3 esferas de cada material.



Fonte: Próprio autor, 2022.

Figura 18 – Disco de polipropileno.



Fonte: Próprio autor, 2022.

Condições fixas para todos os ensaios foram, temperatura ambiente de 25°C e a presença de água suja, coletada de um sistema de moagem de uma empresa de reciclagem, para replicar as condições de operação na indústria em questão.

Comercialmente, não se encontram esferas de aço cromo AISI 5160, encontram-se apenas esferas em aço cromo AISI 52100. Apesar da grande diferença de dureza em condições semelhantes de tratamento térmico, as esferas comerciais não apresentam tratamento algum, enquanto as facas utilizadas nos moinhos passam por tratamento térmico.

Quando comparados, os valores de dureza do material utilizado nas facas, com tratamento térmico, com o das esferas comerciais, que não possuem tratamento

térmico, possuem um valor de resistência bem próximo, tornando possível a substituição do material AISI 5160 pelo AISI 52100 para a realização dos ensaios.

Para diminuir a variabilidade operacional dos ensaios e ter um controle maior, foi realizado um planejamento experimental, onde foi constatado a necessidade de se realizar três repetições para cada material das esferas, realizando ao todo um total de seis testes. No Quadro 1 é apresentado a ordem a serem realizados os ensaios.

Quadro 1 – Ordem de realização dos ensaios.

Ordem de realização	Material
1	Ferro-Carbono
2	Aço inoxidável
3	Aço inoxidável
4	Ferro-Carbono
5	Ferro-Carbono
6	Aço inoxidável

Fonte: Próprio autor, 2022.

As avaliações e comparações finais entre os materiais foram realizadas em função da quantidade de massa perdida, da região afetada pelo ensaio e do coeficiente de atrito (μ) entre a esfera e o disco. A quantidade de material perdida das amostras foi avaliada em pesagens com balança analítica SHIMADZU ATY 224 (Figura 19), já a avaliação do desgaste das amostras, foi realizada via inspeção por microscopia em um microscópio eletrônica por varredura (MEV), TESCAN VEGA 4 (Figura 20), onde se avaliou e comparou a região da superfície afetada nas amostras. O coeficiente de atrito (μ) foi adquirido por meio da fórmula (1), onde uma célula de carga do tribômetro realizou a aquisição da força de atrito durante todos os ensaios.

Figura 19 – Balança analítica SHIMADZU ATY 224.



Fonte: SHIMADZU, 2021.

Figura 20 – Microscópio eletrônico de varredura TESCAN VEGA 4.



Fonte: TESCAN, 2022.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tendo como objetivo deste trabalho a análise da proposta de substituição do aço cromo AISI 5160 como material das facas dos moinhos, para o aço inoxidável 440C, serão apresentados os dados obtidos como a variação da massa após os ensaios e o coeficiente de atrito durante o ensaio, juntamente com imagens da região ensaiada de cada amostra. Abordando inicialmente em cada tópico o aço AISI 52100, utilizado no lugar do aço AISI 5160, em seguida seu candidato a substituto, aço 440C.

6.1 Perda de Massa

Foram realizadas medições de massa antes e depois dos ensaios, porém, não foi possível mensurar nenhuma diferença no peso das esferas (Tabela 1), tanto com as esferas de cromo, como nas inoxidáveis. Sendo apenas possível observar uma variação de massa em diferentes unidades de um mesmo lote de fabricação, onde o desvio padrão da massa das esferas de cromo foi de 0,000568, enquanto as esferas de inox apresentaram um desvio bem maior de 0,004636.

Tabela 1 – Pesos das amostras antes e depois dos ensaios.

Código da Amostra	Pesos		Desvio padrão
	Pré-teste	Pós-teste	
Cromo 1	3,5300	3,5300	
Cromo 2	3,5311	3,5311	0,000568624
Cromo 3	3,5308	3,5308	
Inox 1	3,5336	3,5336	
Inox 2	3,5372	3,5372	0,00463609
Inox 3	3,5280	3,5280	

Fonte: Próprio autor, 2022.

6.2 Coeficiente de Atrito

Os valores de coeficiente de atritos foram plotados em decorrer da distância percorrida durante o ensaio, sendo finalizados ao atingir 200 metros percorridos, para a carga normal foi utilizado um peso de 10 quilos, gerando aproximadamente os 100 Newtons.

6.2.1 Coeficiente de Atrito nas Esferas de Cromo

Com os dados obtidos de coeficiente de atrito, foi possível identificar que nos três casos das esferas de cromo, é apresentada uma tendência de diminuição do valor do coeficiente ao decorrer de quase todo o deslocamento. No primeiro ensaio, Cromo 1 (Gráfico 1) é observado uma tendência horizontal após os 150 metros, enquanto no Ensaio 4, Cromo 2 (Gráfico 2), e no Ensaio 5, Cromo 3 (Gráfico 3), se observa uma tendência de crescimento do valor do coeficiente, sendo que na amostra Cromo 2 a tendência começa aos 150 metros percorridos e na amostra de Cromo 3 ocorre antes dos 150 metros percorridos. As Amostras 1 e 3 apresentaram uma tendência semelhante entre si, bem horizontalizada e com queda de 0,01 do valor inicial até o final, enquanto a Amostra 2 apresentou uma tendência maior de queda do coeficiente, com diferença de 0,02 entre o inicial e final.

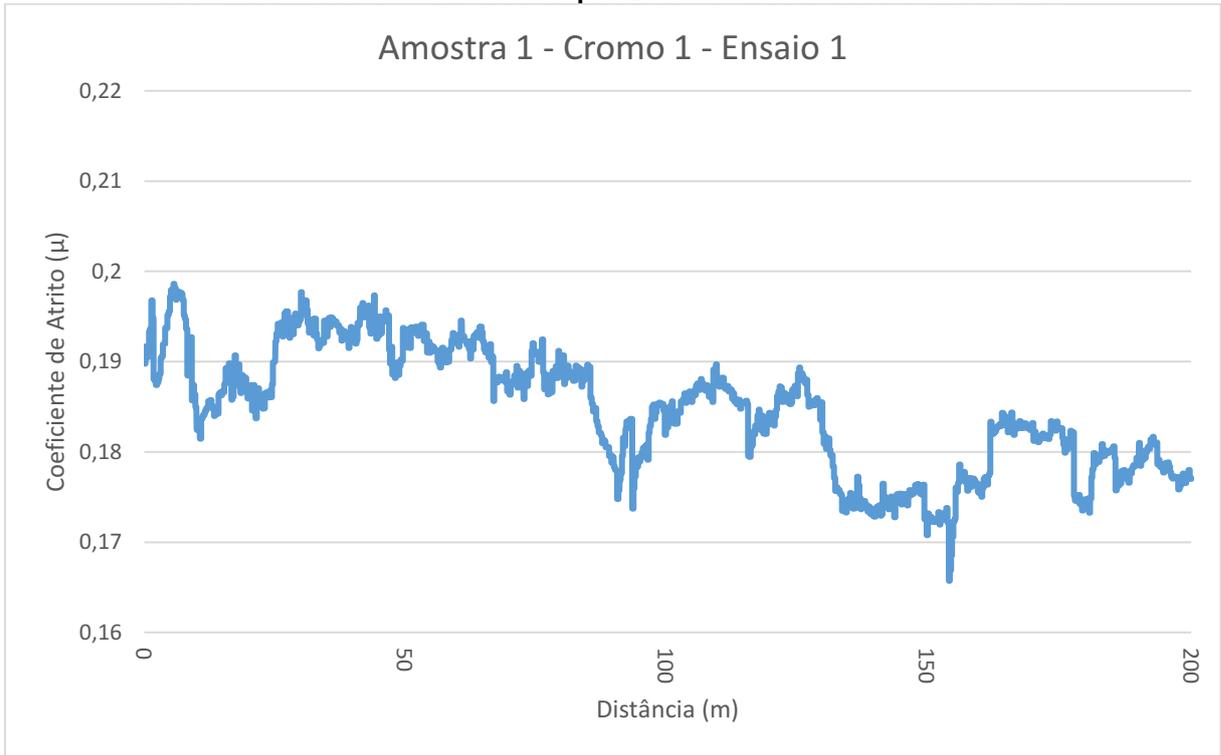
No primeiro ensaio é observado uma grande quantidade de oscilações do coeficiente com relativamente longos períodos de tempo, enquanto nos outros ensaios apresentados, as variações são menos frequentes, em especial no terceiro ensaio apresentado, Amostra 5, que apresenta duas grandes variações, uma aos 50 metros e outra entre os 100 e 150 metros. No segundo ensaio apresentado, Amostra 2, se observa uma repentina inversão de sentido ao passar da marca dos 150 metros, com ainda 4 grandes picos de variação no valor do coeficiente entre os 50 e 100 metros.

Foi realizado uma comparação numérica entre os três ensaios, onde foi calculado o valor médio do coeficiente de atrito de cada teste, o desvio de cada teste para a média global e o cálculo do desvio padrão individual e das médias (Tabela 2). Fazendo o valor do desvio padrão das médias pelo valor da média global é obtido o valor do coeficiente de variação dos ensaios, onde que, para o caso das esferas de cromo, foi encontrado um valor igual a 0,02172, que equivale dizer que os ensaios tiveram uma variação de resultado igual a 2,17%.

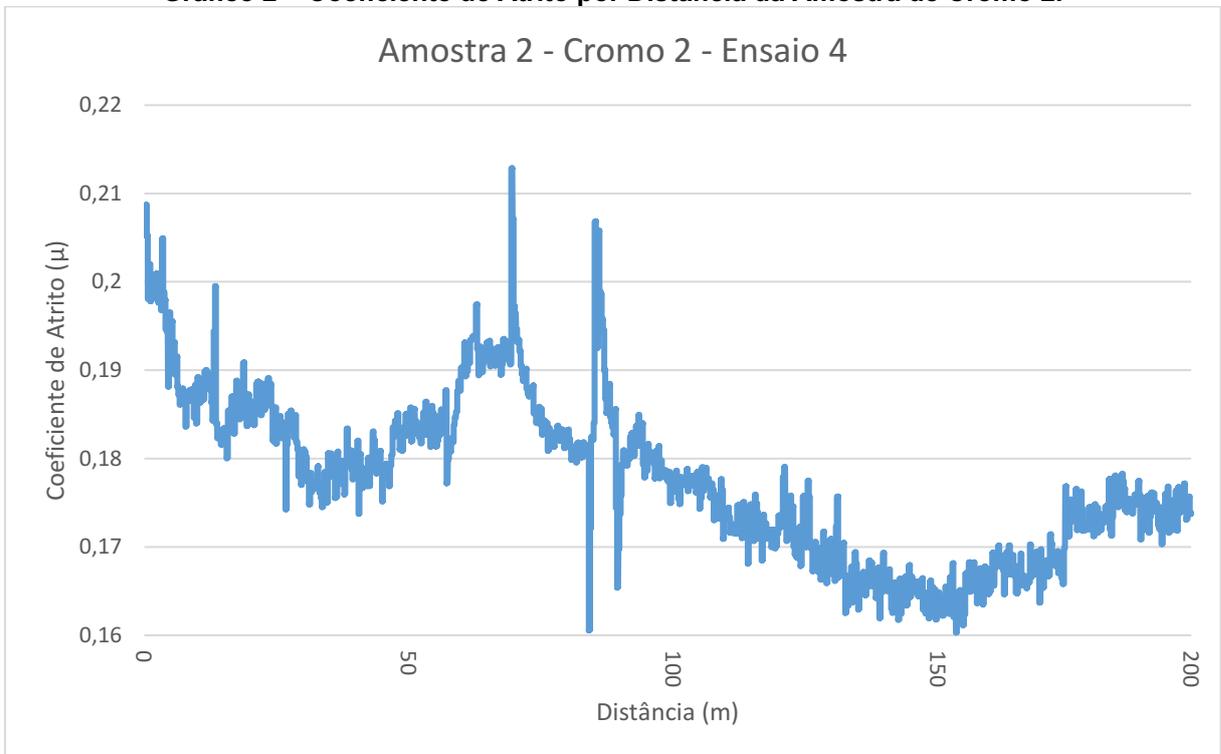
Tabela 2 – Coeficiente de atrito para os ensaios com aço cromo.

Amostra	Média do coeficiente de atrito	Desvio padrão individual	Média global	Desvio da média	Desvio padrão das médias
Cromo 1	0,184706	0,006727		0,002469	
Cromo 2	0,177671	0,009247	0,182237	-0,004565	0,003957
Cromo 3	0,184332	0,004441		0,002095	

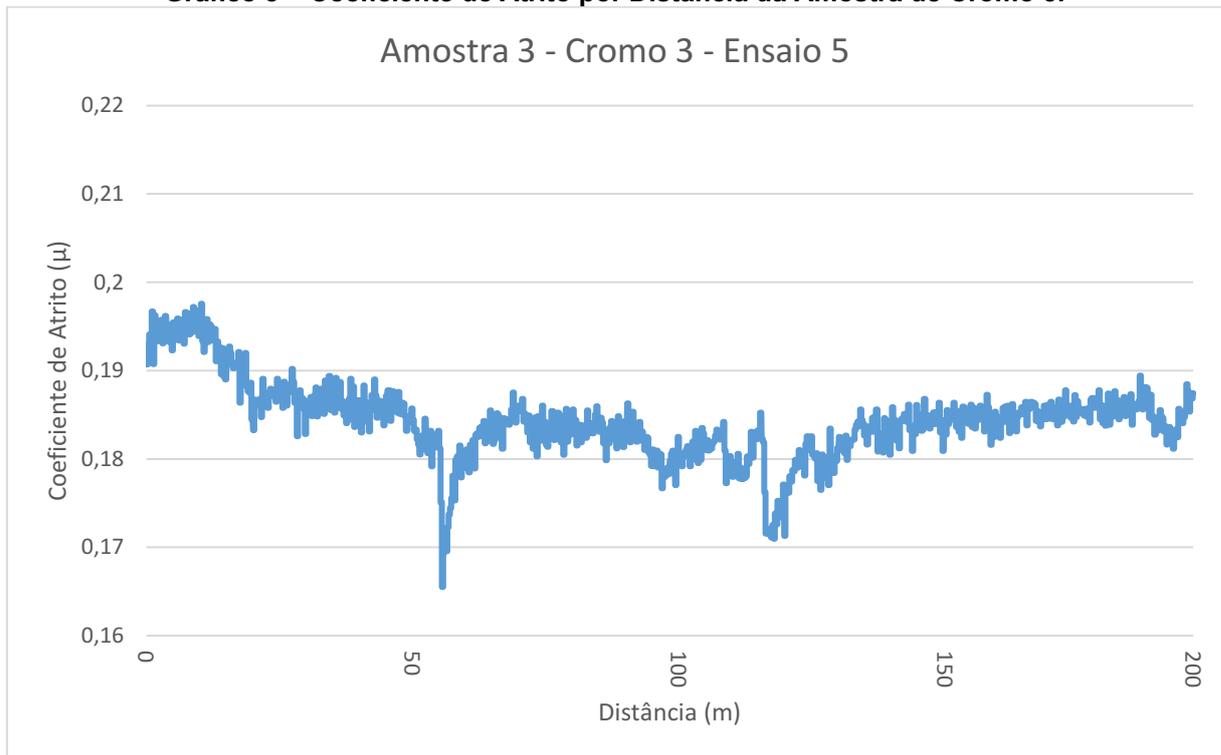
Fonte: Próprio autor, 2022.

Gráfico 1 – Coeficiente de Atrito por Distância da Amostra de Cromo 1.

Fonte: Próprio Autor, 2022.

Gráfico 2 – Coeficiente de Atrito por Distância da Amostra de Cromo 2.

Fonte: Próprio Autor, 2022.

Gráfico 3 – Coeficiente de Atrito por Distância da Amostra de Cromo 3.

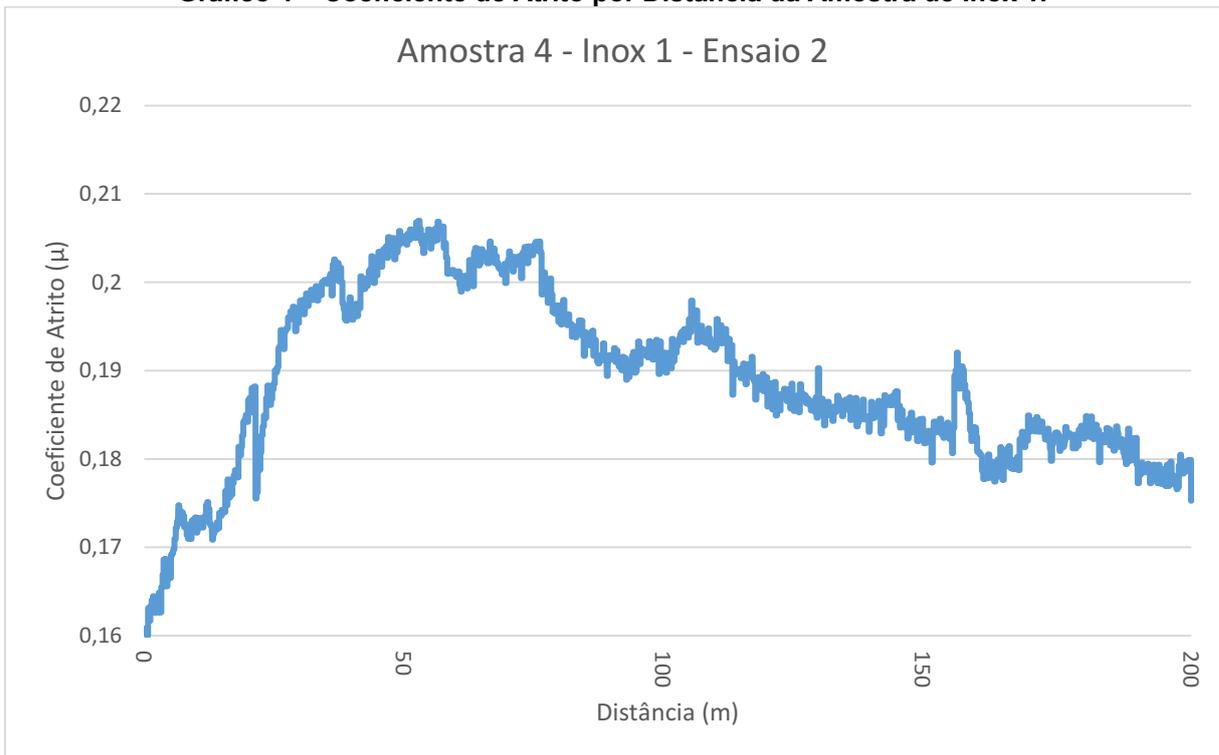
Fonte: Próprio Autor, 2022.

6.2.2 Coeficiente de Atrito nas Esferas de Inox

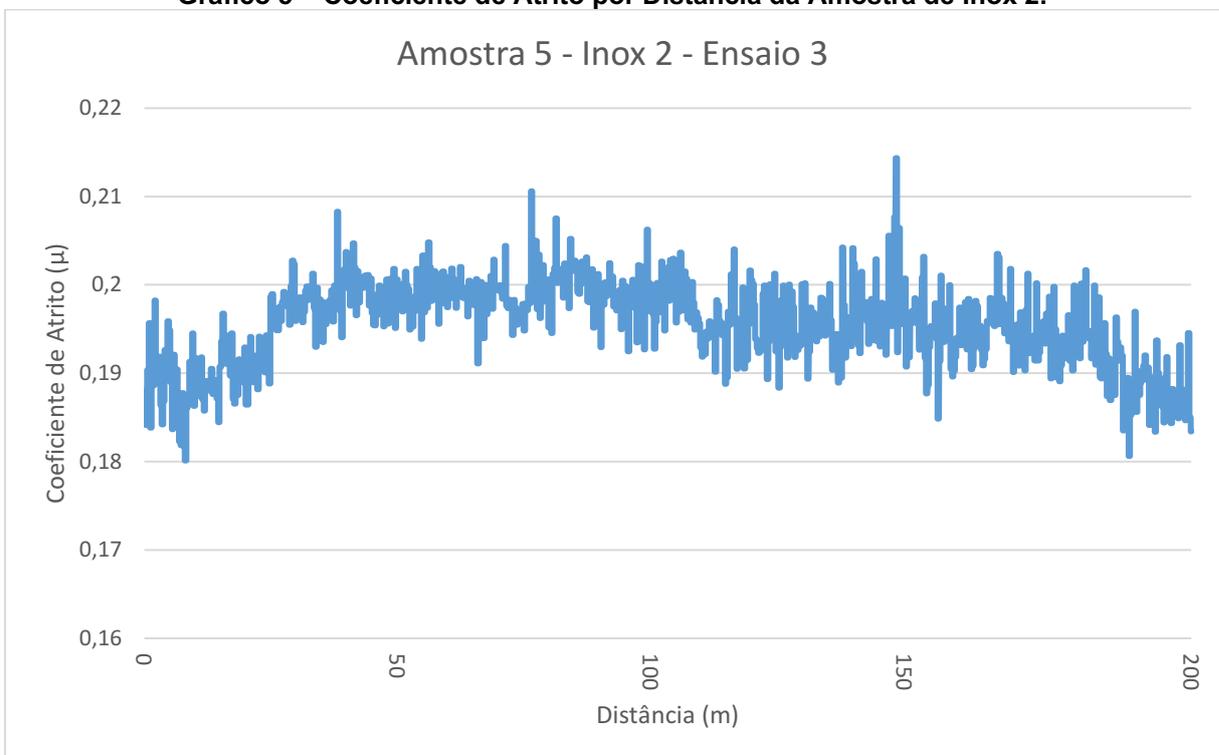
Pelo coeficiente de atrito das esferas de inox é encontrado uma tendência de aumento do coeficiente até que se percorra 50 metros, após este ponto, o coeficiente apresenta uma tendência de queda. Na amostra 4 (Gráfico 4), Ensaio 2, é observado o menor valor de coeficiente inicial de todas as amostras, 0,16, ao decorrer deste ensaio, é observado poucos picos de variação.

As amostras 5 e 6, Gráfico 5 e Gráfico 6, respectivamente, apresentam curvas do gráfico bem semelhantes, bem horizontalizadas, sendo a primeira com a presença de grandes picos de variações por curtos períodos de tempo, deixando a linha do gráfico com um aspecto mais grosso, enquanto a segunda apresenta apenas um ponto de oscilação, entre os 50 e 100 metros, variando o valor do coeficiente para um valor maior e logo em seguida para um valor inferior, mas voltando a tendência anterior logo depois.

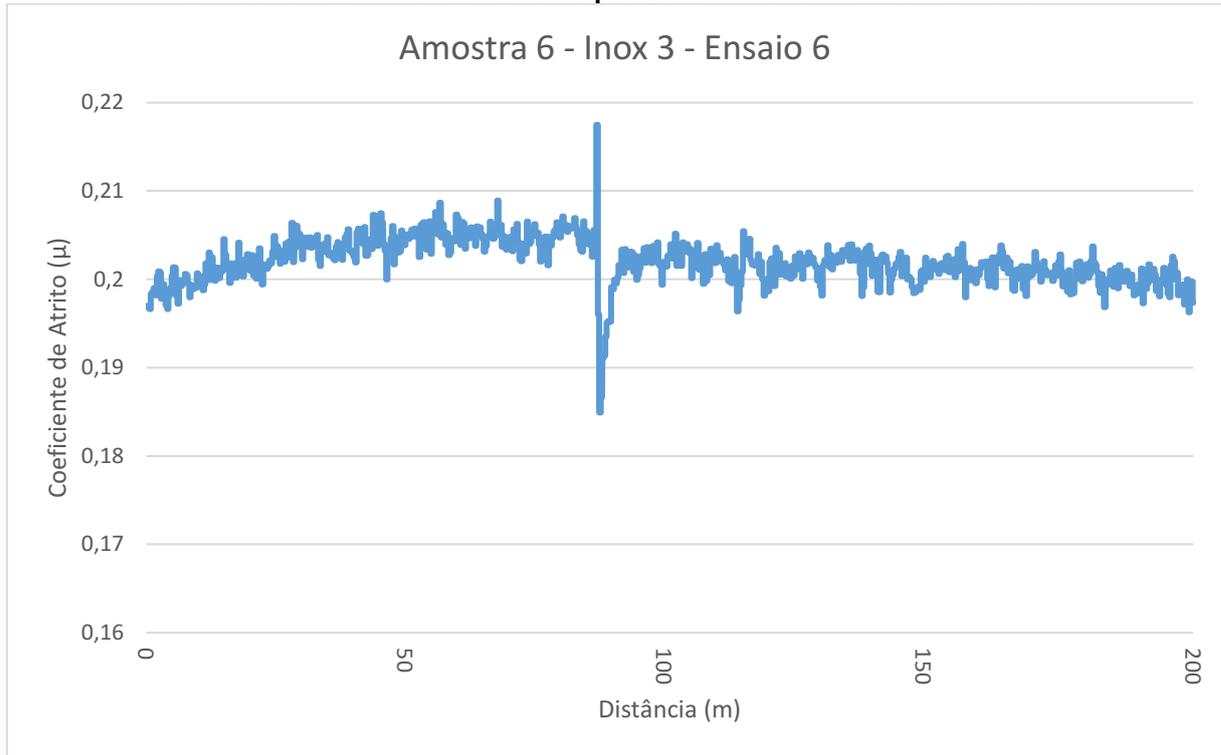
Assim como realizado com as amostras de aço cromo, será apresentada uma comparação entre os valores de coeficiente de atrito para cada uma das esferas de aço inoxidável ensaiadas (Tabela 3). Onde o coeficiente de variação encontrado é de 0,03386, equivalente a uma variação de 3,39%.

Gráfico 4 – Coeficiente de Atrito por Distância da Amostra de Inox 1.

Fonte: Próprio Autor, 2022.

Gráfico 5 – Coeficiente de Atrito por Distância da Amostra de Inox 2.

Fonte: Próprio Autor, 2022.

Gráfico 6 – Coeficiente de Atrito por Distância da Amostra de Inox 3.

Fonte: Próprio Autor, 2022.

Tabela 3 – Coeficiente de atrito para os ensaios com aço inox.

Amostra	Média do coeficiente de atrito	Desvio padrão individual	Média global	Desvio da média	Desvio padrão das médias
Inox 1	0,188751	0,009819	0,1953977	-0,006645	0,006616
Inox 2	0,195456	0,004900		0,000059	
Inox 3	0,201984	0,002630		0,006586	

Fonte: Próprio autor, 2022.

6.3 Desgaste da Superfície

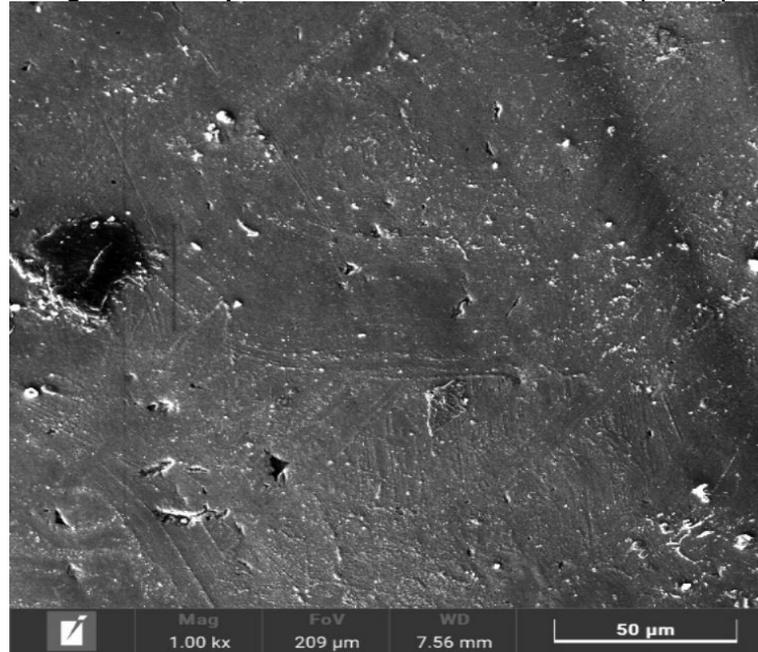
Com auxílio de uma microscópio eletrônico por varredura (MEV) foi extraído imagens da superfície das esferas ensaiadas. As principais ampliações foram padronizadas em 1000 e 3000 vezes para melhor comparação das superfícies.

6.3.1 Desgaste nas Esferas de Cromo

6.3.1.1 Amostra 1 – Cromo 1

Para a primeira amostra, Cromo 1, foi observado que a superfície fora da zona de teste (Figura 21) possui bom acabamento superficial, tornando mais fácil de identificar padrões de riscos gerados pelo atrito.

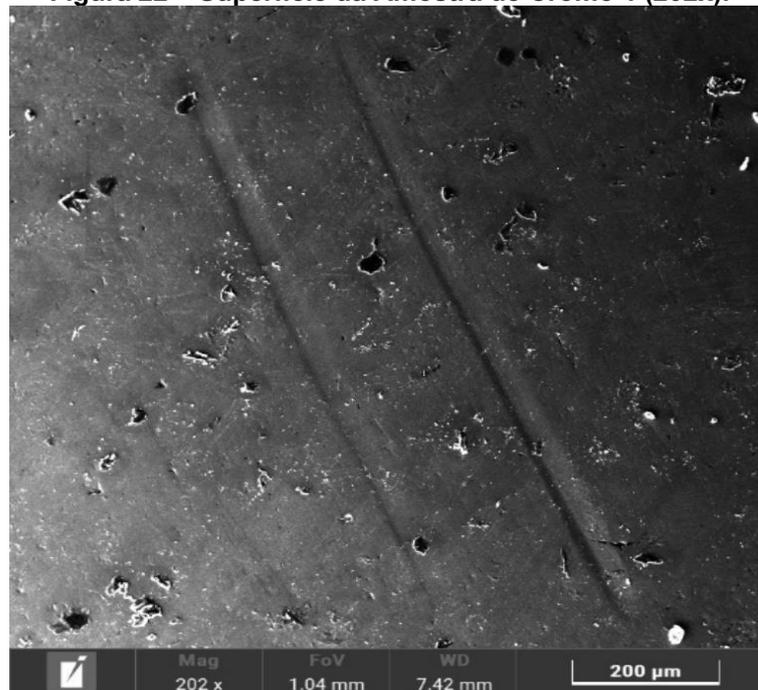
Figura 21 – Superfície da Amostra de Cromo 1 (1000x).



Fonte: MEV da UTFPR - LD, 2022.

Tomando a imagem anterior como parametro de avaliação, foram identificados dois desgastes paralelos na direção diagonal com inclinação para a esquerda (Figura 22), apresentando uma dimensão de 1000 microns (Figura 23), ou 1 milímetro.

Figura 22 – Superfície da Amostra de Cromo 1 (202x).



Fonte: MEV da UTFPR - LD, 2022.

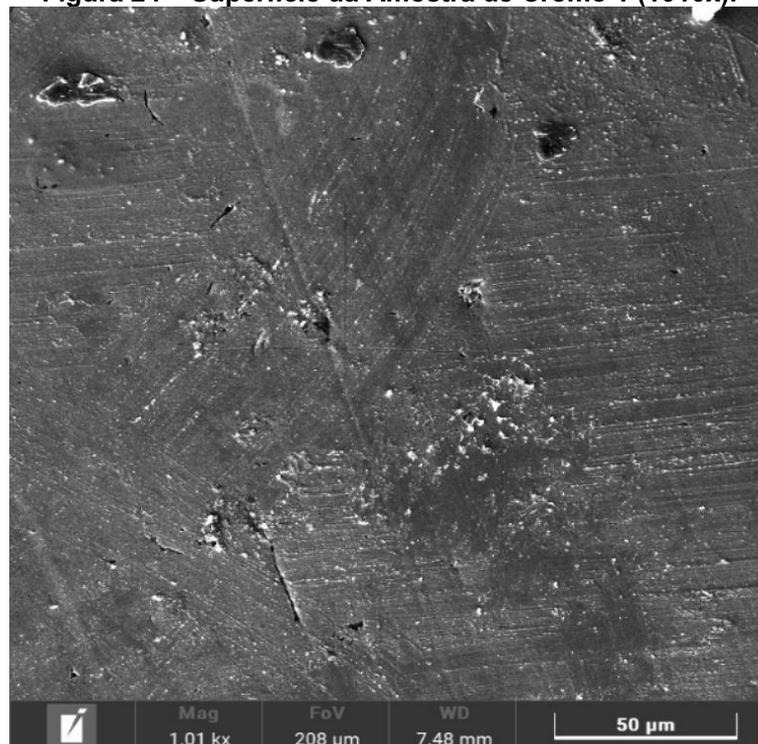
Figura 23 – Superfície da Amostra de Cromo 1 (202x).



Fonte: MEV da UTFPR - LD, 2022.

Em outra região da área de contato entre as superfícies, foi observado dois padrões de desgaste, um na mesma orientação que os desgastes mostrados nas imagens anteriores e outros quase perfeitamente perpendicular, porém, com padrões mais suave de desgaste (Figura 24).

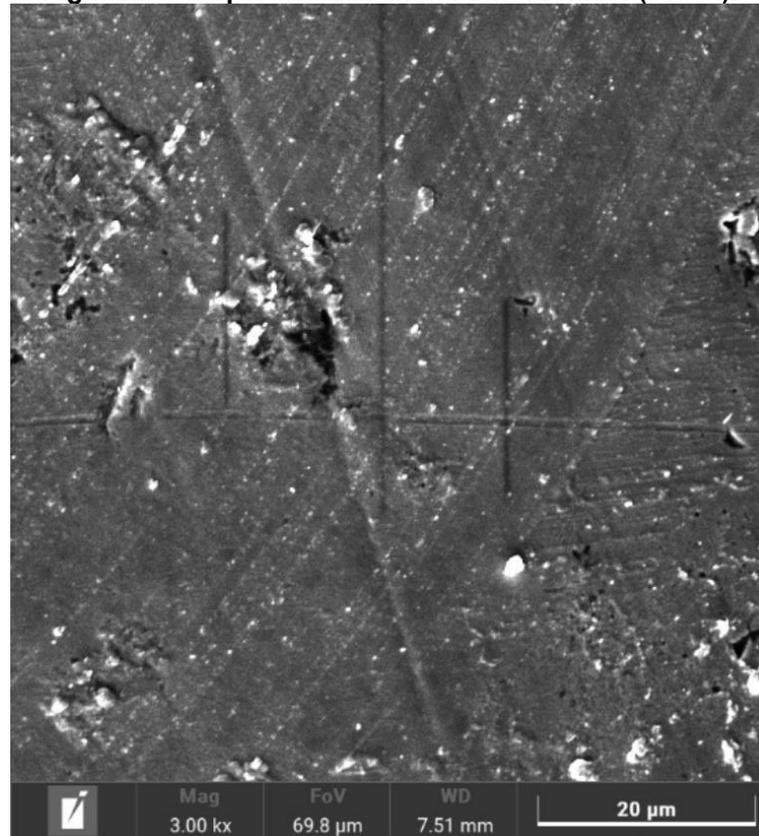
Figura 24 – Superfície da Amostra de Cromo 1 (1010x).



Fonte: MEV da UTFPR - LD, 2022.

Nesta região, em um dos desgastes orientado igual aos dois primeiros apresentados, é possível observar um grão posicionado no decorrer da marca feita (Figura 25).

Figura 25 – Superfície da Amostra de Cromo 1 (3000x).

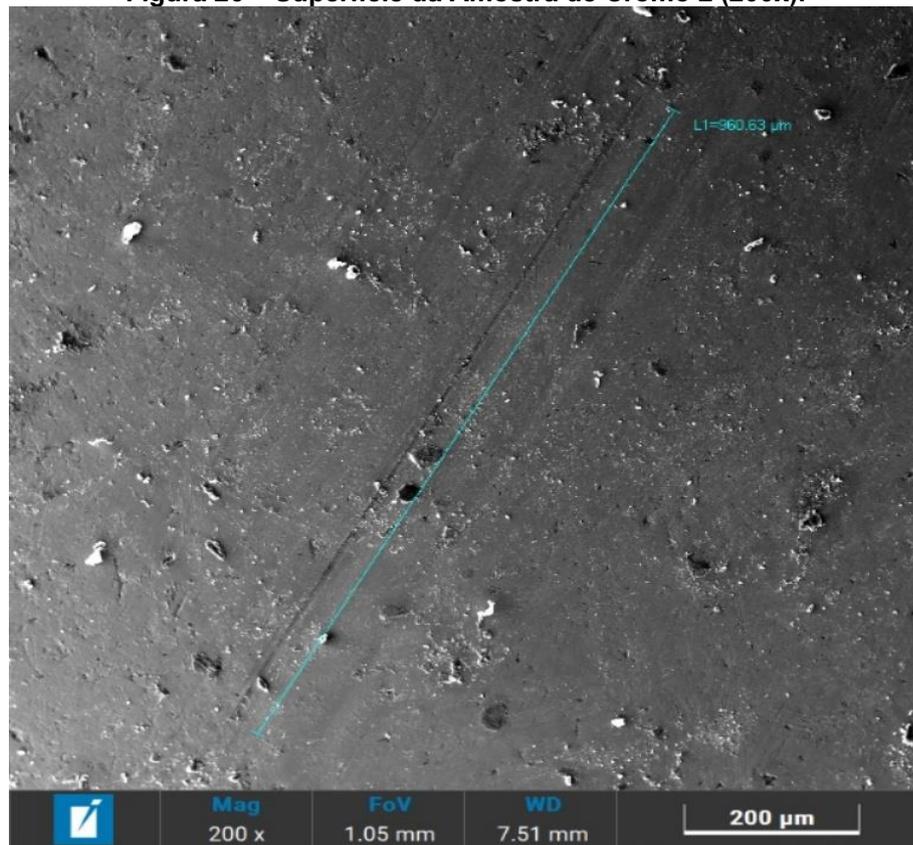


Fonte: MEV da UTFPR - LD, 2022.

6.3.1.2 Amostra 2 – Cromo 2

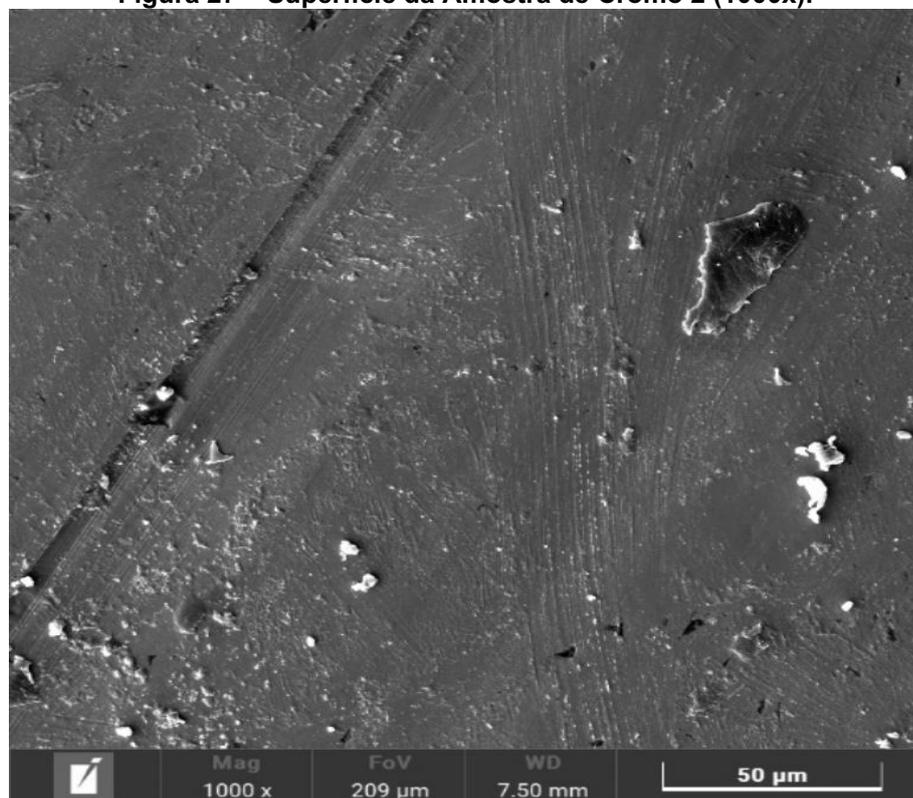
Realizando a mesma análise para a segunda amostra, Cromo 2, foi analisado uma região com menor ampliação para avaliar o acabamento da superfície, mas diferente da amostra anterior, nesta já possível identificar um sutil desgaste na direção diagonal com inclinação para a direita (Figura 26). Sendo possível realizar a medição da dimensão do dano na superfície, 960 microns ou 0,96 milímetros, já na Figura 27 e Figura 28, é realizado uma aproximação melhor na região para visualização do padrão do desgaste e um possível ponto de formação de sulco na Figura 28.

Figura 26 – Superfície da Amostra de Cromo 2 (200x).



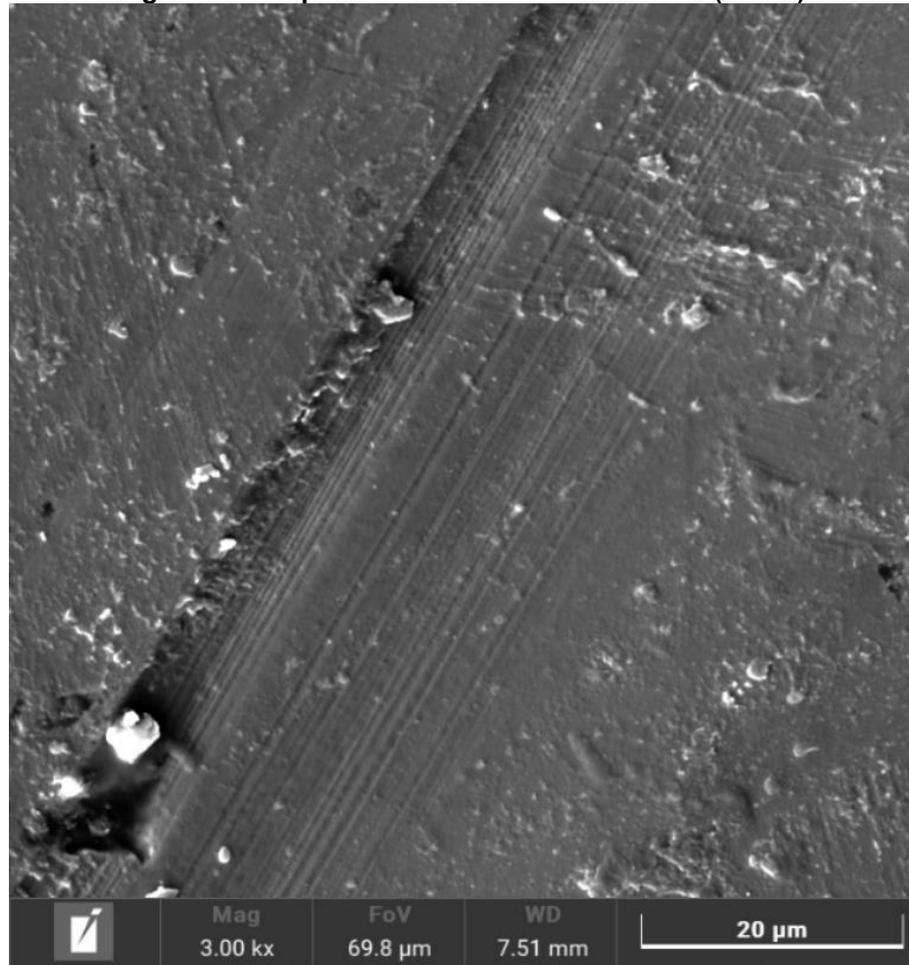
Fonte: MEV da UTFPR - LD, 2022.

Figura 27 – Superfície da Amostra de Cromo 2 (1000x).



Fonte: MEV da UTFPR - LD, 2022.

Figura 28 – Superfície da Amostra de Cromo 2 (3000x).

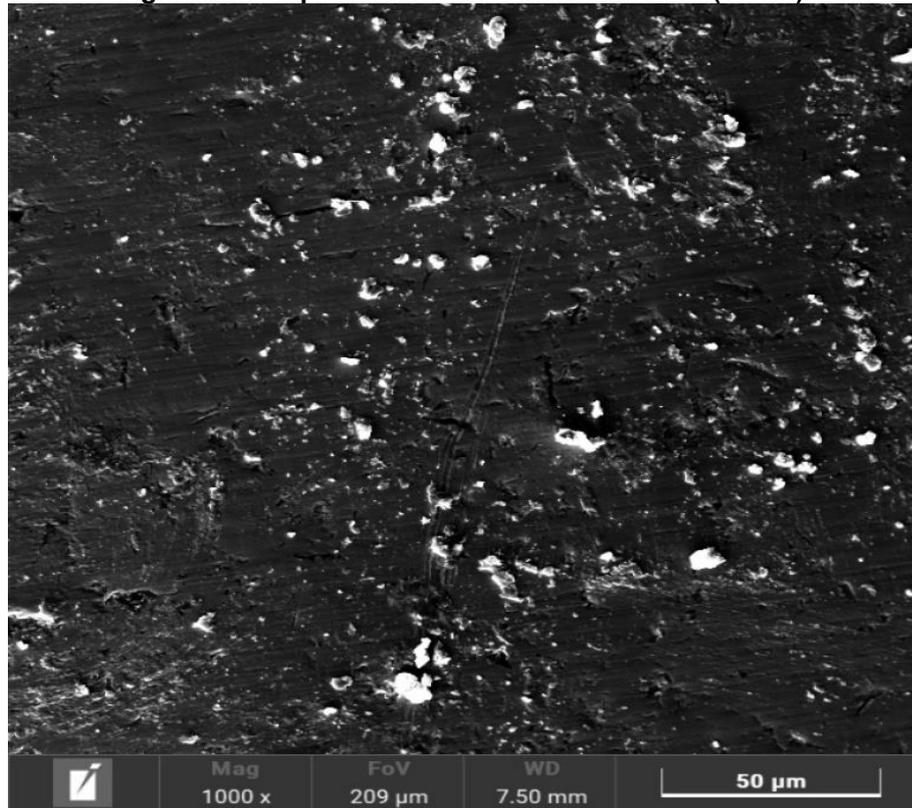


Fonte: MEV da UTFPR - LD, 2022.

6.3.1.3 Amostra 3 – Cromo 3

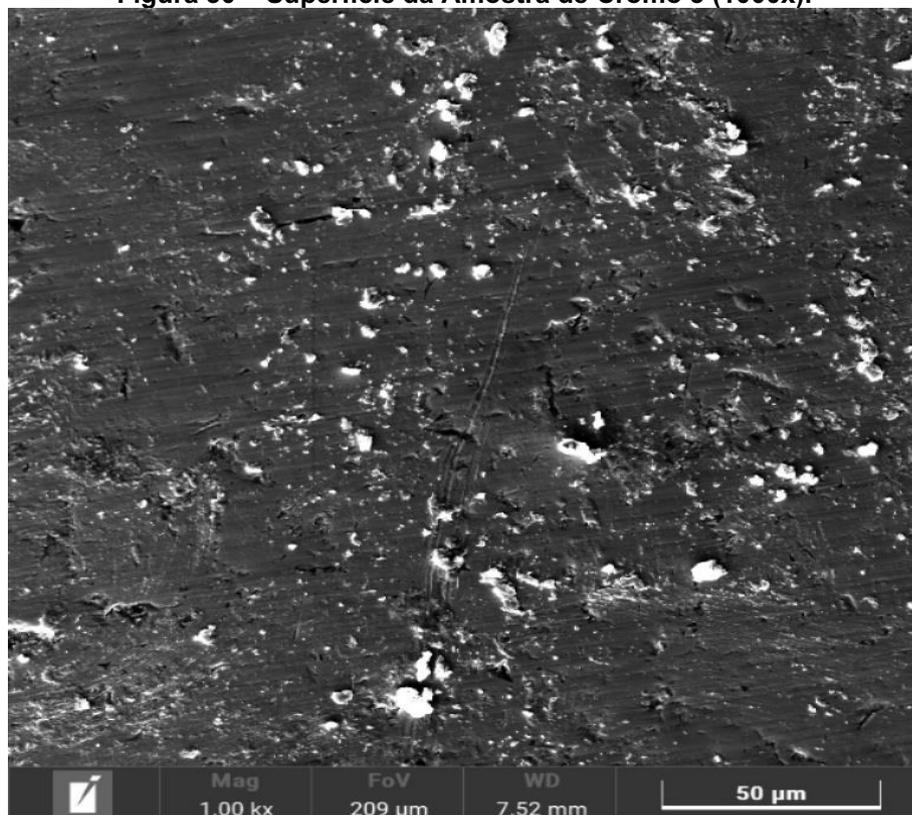
Para a terceira amostra, Cromo 3, se observou uma maior dificuldade em se encontrar os padrões de imperfeição na superfície para caracterizar a direção dos desgastes, sendo possível a visualização apenas com 1000 vezes de ampliação, podendo ser observado nas Figuras 29, 30 e 31, com o desgaste estando orientado na horizontal da imagem. A grande maioria dos desgastes desta amostra, se mostraram com a mesma dimensão, 50 microns de comprimento aproximadamente, sendo apresentado na Figura 32 um dos desgastes, possuindo 53 microns de comprimento.

Figura 29 – Superfície da Amostra de Cromo 3 (1000x).



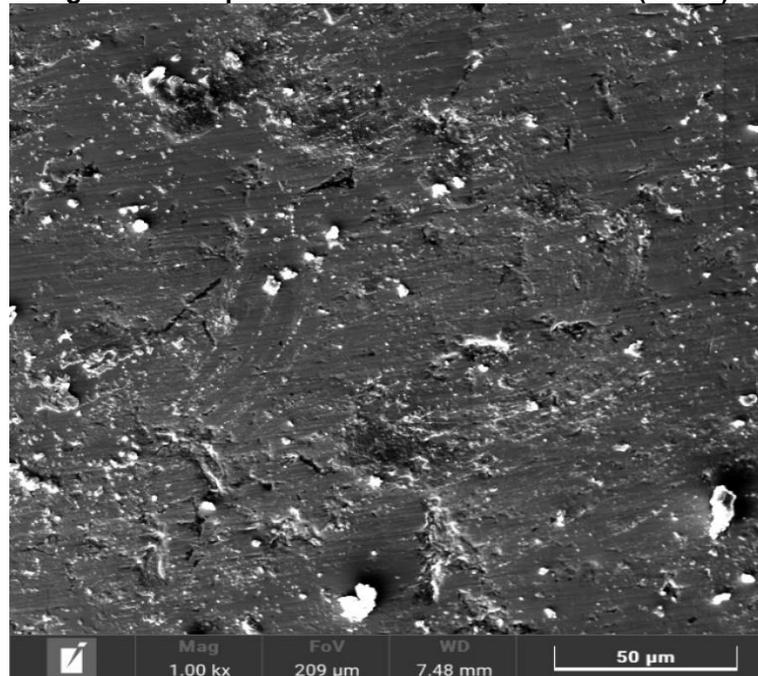
Fonte: MEV da UTFPR - LD, 2022.

Figura 30 – Superfície da Amostra de Cromo 3 (1000x).



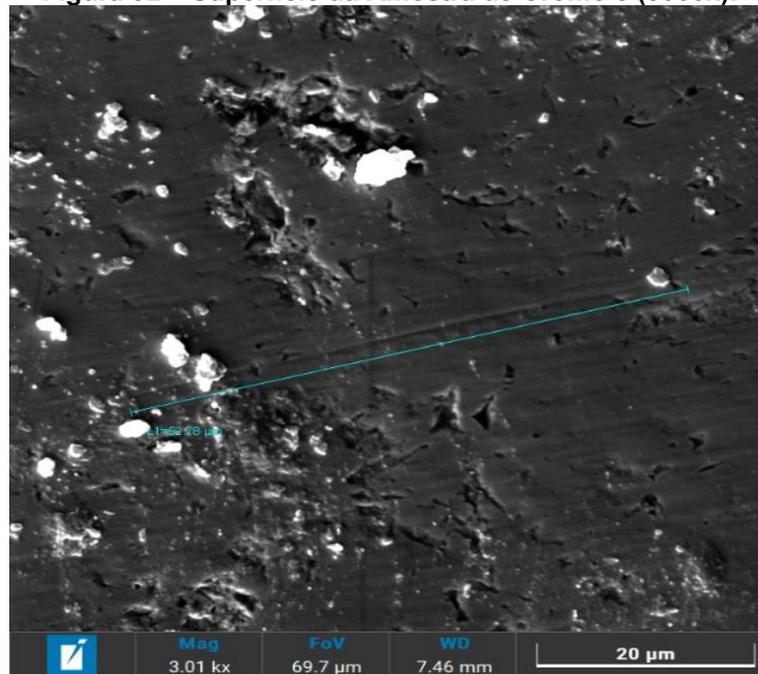
Fonte: MEV da UTFPR - LD, 2022.

Figura 31 – Superfície da Amostra de Cromo 3 (1000x).



Fonte: MEV da UTFPR - LD, 2022.

Figura 32 – Superfície da Amostra de Cromo 3 (3000x).

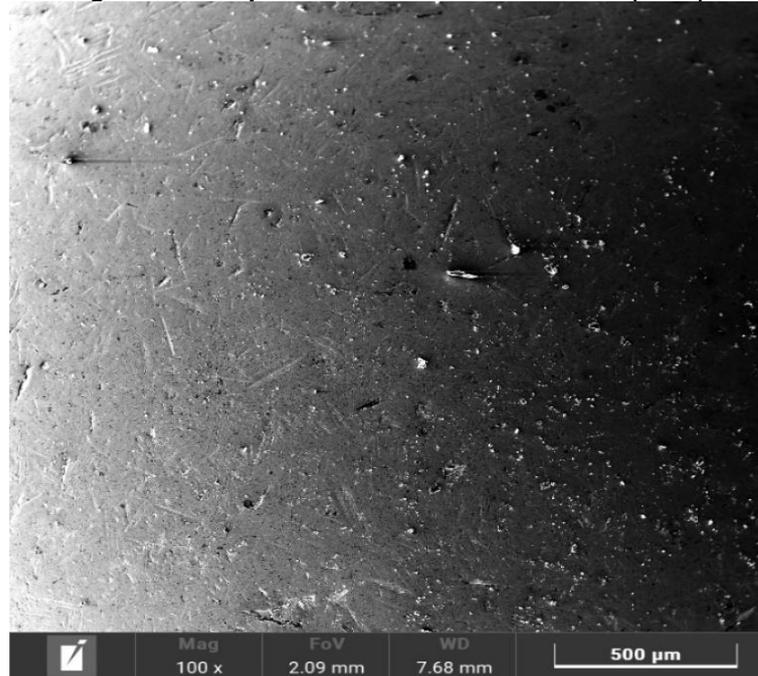


Fonte: MEV da UTFPR - LD, 2022.

6.3.2 Desgaste nas Esferas de Inox

As esferas de Inox, de modo geral, apresentaram um acabamento superficial ruim, o que prejudicou a identificação das regiões desgastadas para avaliação, como pode ser observado na Figura 33 da amostra de Inox 1.

Figura 33 – Superfície da Amostra de Inox 1 (100x).

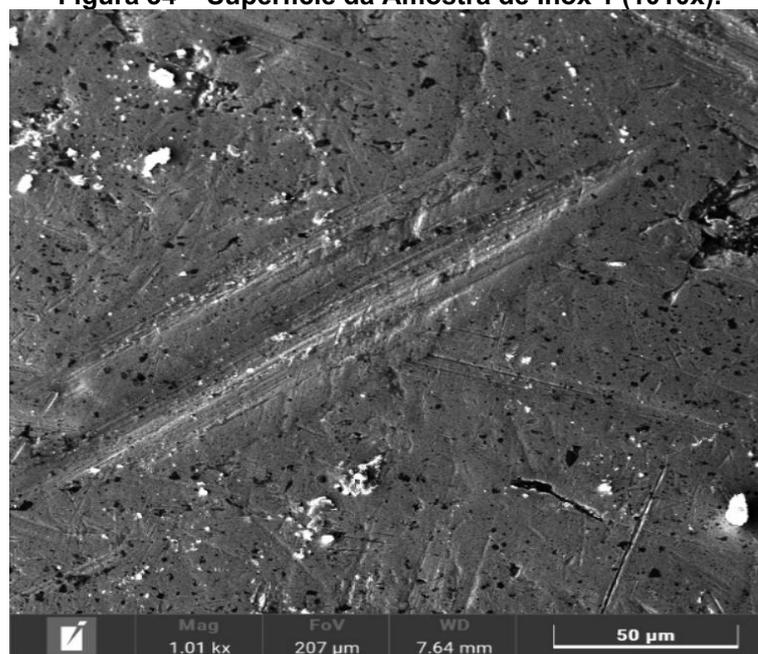


Fonte: MEV da UTFPR - LD, 2022.

6.3.2.1 Amostra 4 – Inox 1

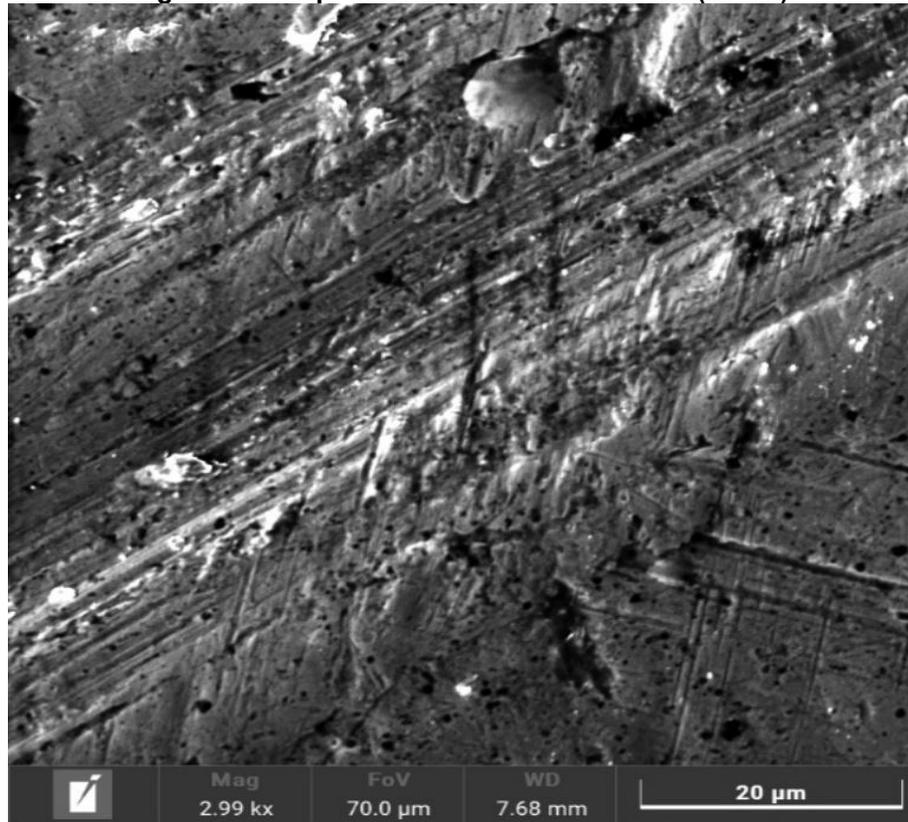
Na primeira amostra, Inox 1, não foi possível identificar qual era a orientação do desgaste em que a peça sofreu, sendo assim, foi escolhido um desgaste ao centro da área ensaiada e coletada as imagens da Figura 34 e Figura 35, onde é possível ver um desgaste não tão longo, porem com uma largura considerável.

Figura 34 – Superfície da Amostra de Inox 1 (1010x).



Fonte: MEV da UTFPR - LD, 2022.

Figura 35 – Superfície da Amostra de Inox 1 (2990x).

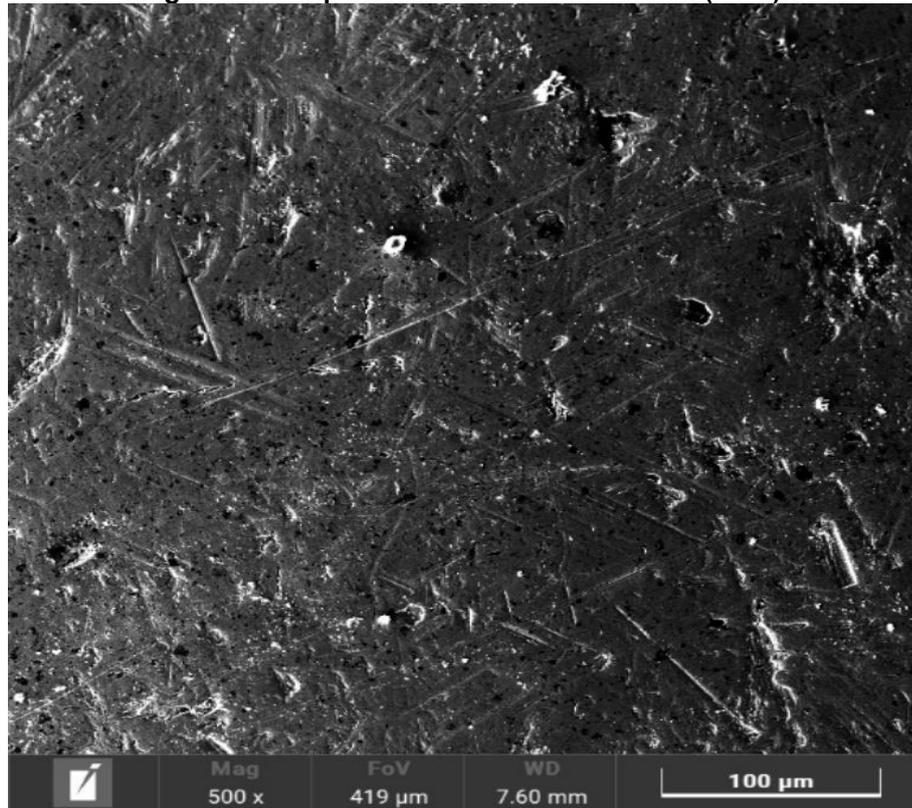


Fonte: MEV da UTFPR - LD, 2022.

6.3.2.2 Amostra 5 – Inox 2

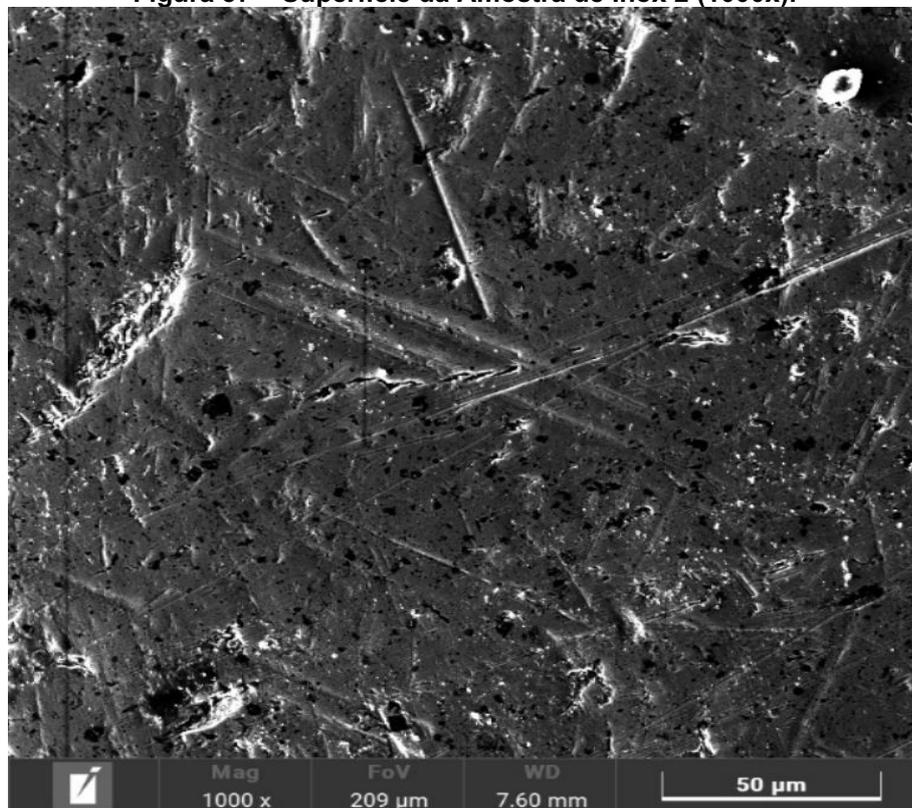
Para a segunda amostra, Inox 2, a visualização é de maior facilidade, onde se observa dois padrões de orientação, ambos na diagonal, uma com inclinação para a direita e outra para a esquerda, sendo que as duas chegam próxima a uma orientação horizontal (Figura 36). Analisando a imagem anterior com cuidado, procurando uma região para se ampliar, foi encontrada uma com o encontro de dois desgastes (Figura 37) com uma ampliação maior, de 3000 vezes (Figura 38), foi possível determinar que o desgaste com inclinação a direita esta sobrepondo o desgaste inclinado para a esquerda, o que leva a entender que o segundo citado faz parte do acabamento superficial, enquanto a primeira citada indica a orientação do desgaste desta amostra.

Figura 36 – Superfície da Amostra de Inox 2 (500x).



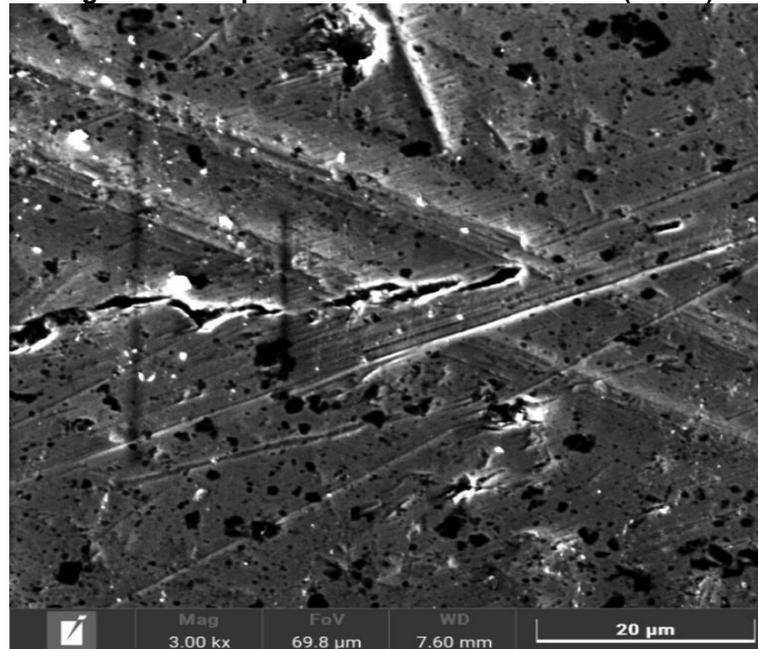
Fonte: MEV da UTFPR - LD, 2022.

Figura 37 – Superfície da Amostra de Inox 2 (1000x).



Fonte: MEV da UTFPR - LD, 2022.

Figura 38 – Superfície da Amostra de Inox 2 (3000x).

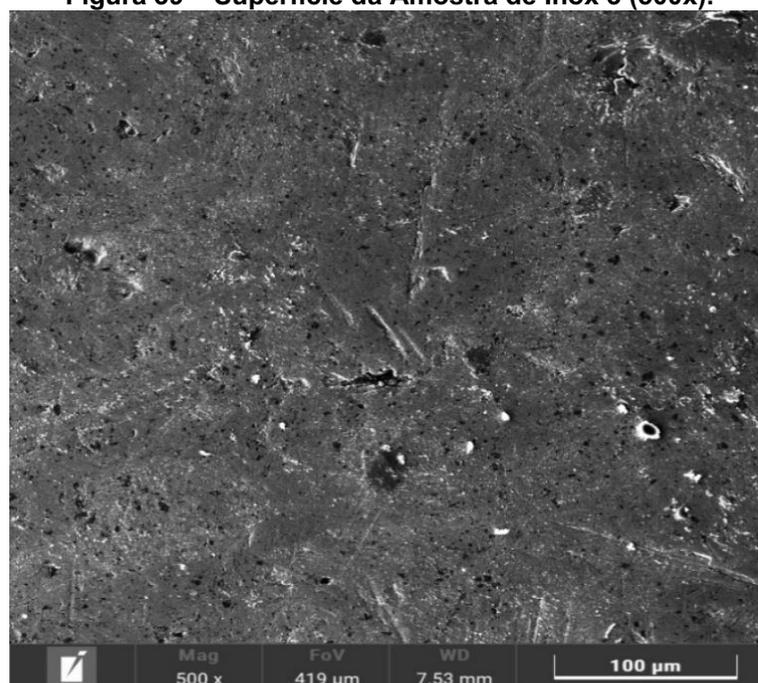


Fonte: MEV da UTFPR - LD, 2022.

6.3.2.3 Amostra 6 – Inox 3

Nesta última amostra, Inox 3, foi observado uma superfície com acabamento superficial melhor que as duas anteriores apresentadas no trabalho, porém, com a mesma dificuldade de se identificar qualquer desgaste, como pode ser visto na Figura 39 com uma ampliação de 500 vezes no centro da região de estudo.

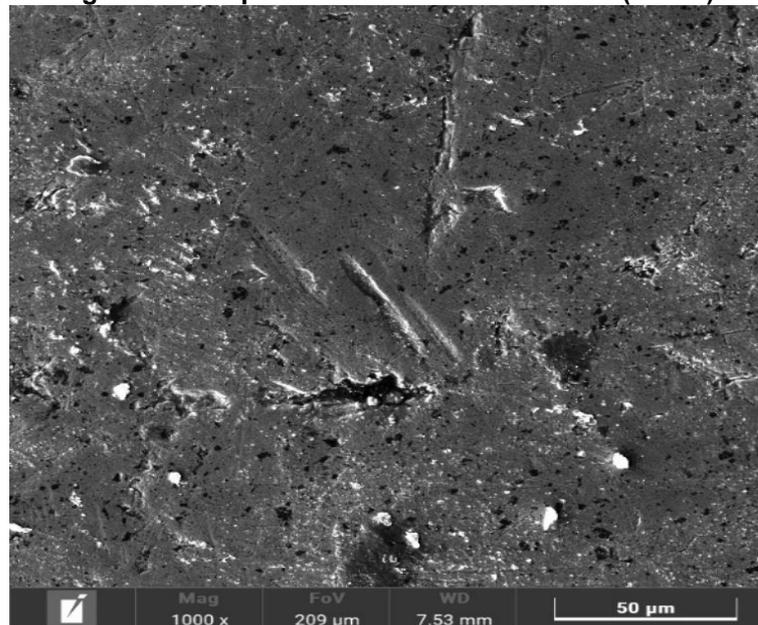
Figura 39 – Superfície da Amostra de Inox 3 (500x).



Fonte: MEV da UTFPR - LD, 2022.

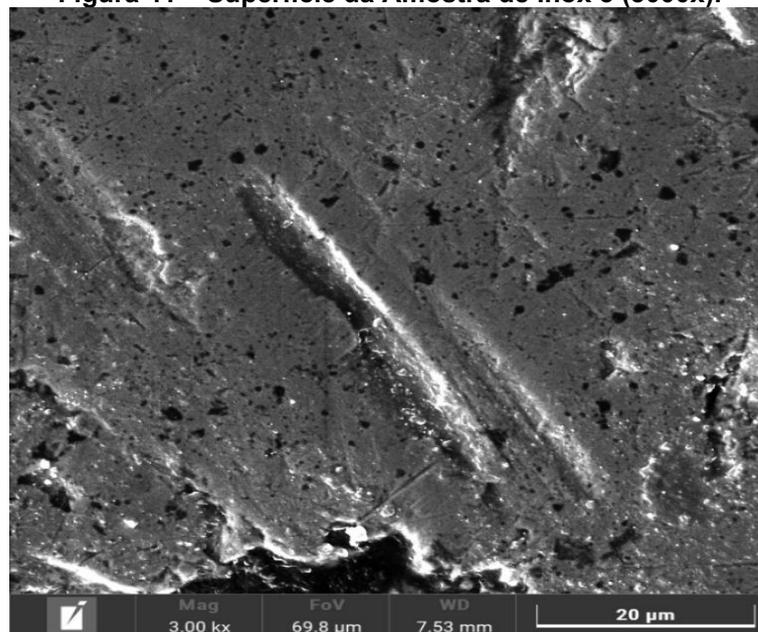
Com a observação de um possível ponto de desgaste, foi realizado a ampliação de 1000 vezes (Figura 40) e 3000 vezes (Figura 41), onde pode se constatar que se trata de um detalhe do acabamento superficial, devido a seu pequeno comprimento e alta profundidade. Com a tentativa de se identificar uma orientação de desgaste, foi realizado uma ampliação em um novo local (Figura 42), porém, mesmo com uma ampliação de 3000 vezes (Figura 43) não foi possível identificar qualquer presença de desgaste na região.

Figura 40 – Superfície da Amostra de Inox 3 (1000x).



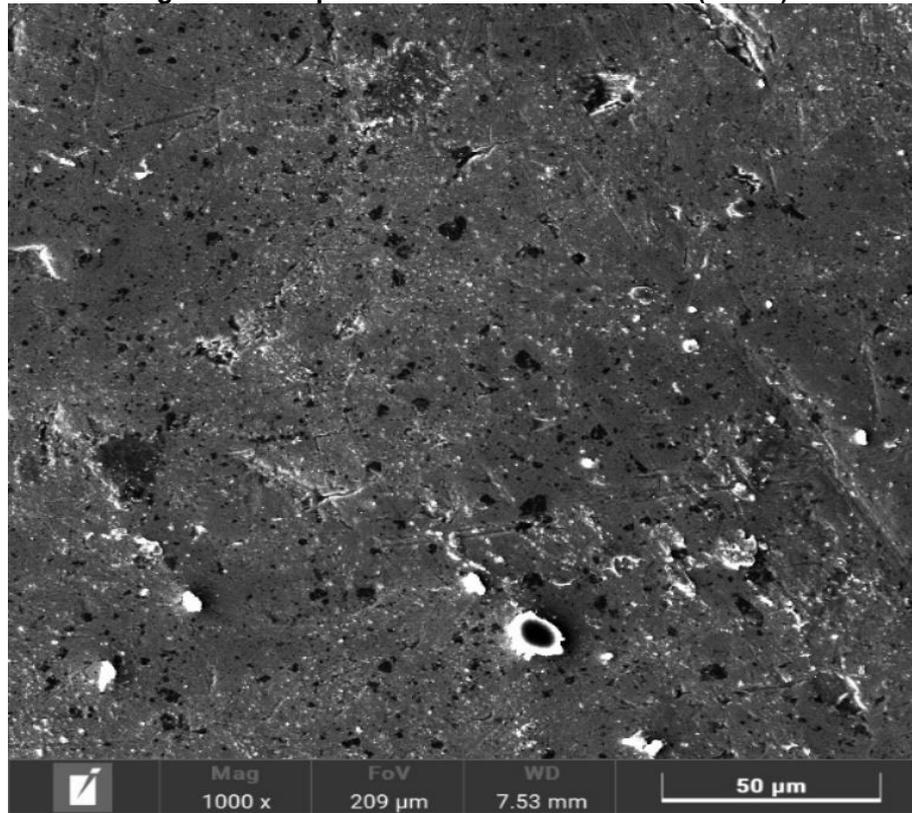
Fonte: MEV da UTFPR - LD, 2022.

Figura 41 – Superfície da Amostra de Inox 3 (3000x).



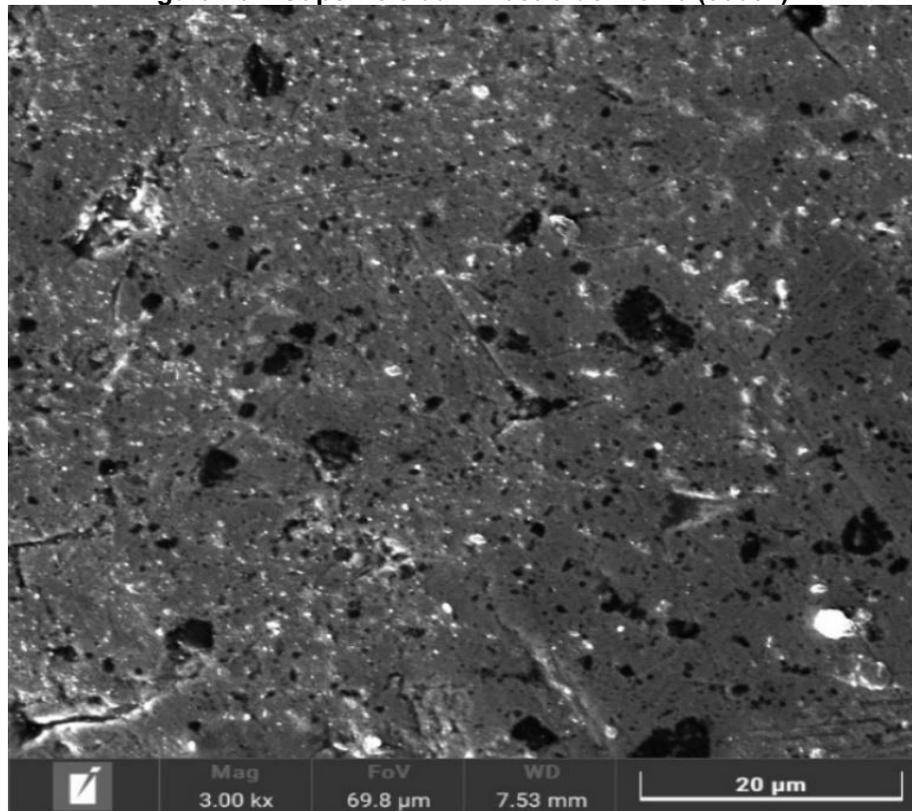
Fonte: MEV da UTFPR - LD, 2022.

Figura 42 – Superfície da Amostra de Inox 3 (1000x).



Fonte: MEV da UTFPR - LD, 2022.

Figura 43 – Superfície da Amostra de Inox 3 (3000x).



Fonte: MEV da UTFPR - LD, 2022.

7 CONCLUSÃO

Considerando o quesito de variação da massa das esferas, não é possível tomar qualquer conclusão devido a impossibilidade de mensurar qualquer alteração no valor, sendo necessário talvez, a utilização de uma balança com maior precisão, 5 casas após a virgula, no mínimo.

A respeito dos coeficientes de atrito, 4 dos 6 ensaios realizados atingiram a marca de 200 metros com uma tendencia de queda do coeficiente, sendo 3 amostras de inox e apenas 1 de cromo, o que dá um indicio que o coeficiente terá sempre uma tendencia de queda para avaliações iguais ou semelhantes a realizada para o aço inox.

Ainda sobre o coeficiente de atrito, é seguro dizer que, para o aço cromo, até o ponto avaliado, e um pouco além, o coeficiente apresentará uma tendencia de aumento de seu valor, já que o ensaio que se mostrou com uma tendencia final de queda, foi o mesmo que apresentou longos picos de variação do valor do coeficiente de atrito (Figura 21).

Comentando agora a respeito das imagens captadas com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV), é possível identificar que o material que apresentou maiores sinais de desgaste foi o aço cromo, sendo possível a visualização nas três amostras do material, já para as esferas de aço inox uma das amostras foi a que se mostrou mais fácil de visualizar o desgaste, onde outra teve uma visualização bem difícil e a última não sendo possível identificar qualquer padrão que caracterizasse o desgaste sofrido no ensaio.

Com esses pontos levantados, vale dizer que a proposta de alteração de material para as facas do moinho de plásticos é válida, porém, ressalto que as condições de operação real não foram perfeitamente replicadas nos ensaios realizados para o trabalho em questão. Em outras palavras, com o resultado obtido por esse trabalho, é valido o investimento maior de recursos, como dinheiro e tempo, para o estudo real e definitivo da proposta de troca do material das facas para os moinhos.

REFERÊNCIAS

ABIPLAST. **Índice de plástico reciclado pós-consumo cresceu em 2019, segundo estudo encomendado pelo PICPlast**, 2021. Disponível em: <<http://www.abiplast.org.br/noticias/indice-de-plastico-reciclado-pos-consumo-cresceu-em-2019-segundo-estudo-encomendado-pelo-picplast/>>. Acesso em: 14 out. 2021.

AÇOS NOBRES. **Aço 5160: propriedades, usos e preços**. Disponível em: <<https://acosnobre.com.br/blog/aco-5160-caracteristicas-propriedades-mola-cutelaria-barra-chata-preco/>>. Acesso em: 30 de out. de 2021.

ASTM G133-05(2016). **Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

ATHAYDE, J. N., **Dispositivo oscilatório para avaliação tribológica em biomateriais, utilizando tribômetro linear**. Brasil, Curitiba, 2015.

BEZERRA, D, M. L., **Estudo e diagnóstico da recuperação das facas de um moinho de objetos de base polimérica**. 67 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2019.

BRUNETTO, L. G., MORETTI, F., FAVARO, M. M., BRETAS, R. E. S., **Caracterização das propriedades mecânicas de nanocompósitos de PP/PP-e-AM/MMT**. Brasil, 2009.

CALLISTER JR., W. D., **Ciência e Engenharia dos Materiais: uma Introdução**, 7ª Edição, 2008.

CANEVAROLO, S. V., **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. Brasil, São Paulo, 2006.

COMPR AÇO. **Aço na indústria brasileira**. Disponível em: <<https://compraco.com.br/blogs/aco-na-industria-brasileira/tipos-de-aco/>>. Acesso em: 22 de out. 2021.

COUTINHO, F. M. B., MELLO, I. L., SANTA MARIA, L. C., **Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações**. Brasil, 2003.

EVOLUTION PLASTICOS. **Quais são os principais tipos de plásticos reciclados**, 2018. Disponível em: <<https://www.evolutionplasticos.com.br/blog/reciclagem-de-plasticos/quais-sao-os-principais-tipos-de-plasticos-reciclaveis/>>. Acesso em: 10 out. 2021.

GERSON LUZ. **Aço SAE 52100 Propriedades Mecânicas** . Disponível em: <<https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-52100-propriedades-mecanicas.html>>. Acesso em: 13 de out. 2022.

HALLIDAY, DAVID, **Fundamentos de Física, Volume I: Mecânica**. 9ª ed. Rio de Janeiro, 2012.

JOST, H. P., **Tribology - origin and future**, Inglaterra, Londres, 1990, v.136, p.1-17.

KLOECKNER METALS. **Manual técnico de aço inoxidável**. Disponível em: <<https://www.kloecknermetals.com.br/pdf/3.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2021.

MAT WEB. **Search: AISI 5160 Steel, normalized 855°C (1570°F)**. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=972ec49b746d47c2a31db406e9213247&ckck=1>>. Acesso em: 22 out. 2021.

MAT WEB. **Search: AISI E 52100 Steel (100Cr6, SUJ2, UNS G52986)**. Disponível em: <<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=d0b0a51bff894778a97f5b72e7317d85&ckck=1>>. Acesso em: 14 set. 2022.

MAT WEB. **Search: Type 440C Martensitic Stainless Steel (UNS S44004)**. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=850c5024f8d844af95afab1a08792&ckck=1>>. Acesso em: 14 set. 2022.

MELLO, J. D. B., BÁLSAMO, P. S. S., **Caracterização tribológica de aços para cutelaria: uma nova metodologia para determinar a resistência a perda de corte**. São Paulo, 2006.

NEUPLAST. **Reciclagem de plásticos: conheça o processo**. Disponível em: <<https://www.neuplast.com.br/blog/reciclagem-de-plastico-conheca-o-processo/>>. Acesso em: 12 out. 2021.

NORTON, R. L., **Projeto de máquinas: Uma abordagem integrada**. 4ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PAIVA, R. L., SILVA, R. B., ARENCIBIA, R. V., RUZZI, R. S., BIANCHI, E. C., AGUIAR, P. R., **Contribuição ao processo de afiação de ferramentas monocortantes de aço rápido**. Revista Matéria, v.22, n.3, 2017.

PORTAL FMU CENTRO UNIVERSITARIO. **Reciclagem no brasil: panorama atual e desafios para o futuro**, 2021. Disponível em: <<https://portal.fmu.br/noticias/reciclagem-no-brasil-panorama-atual-e-desafios-para-o-futuro/>>. Acesso em: 12 out. 2021.

PÓVOA, P. V. N., **Aço inoxidável como material para equipamentos da indústria de alimentos**. Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

RADI, P. A. **Tribologia: Conceitos e aplicações**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil, 2007.

RECICLA SAMPA. **Tudo o você precisa saber sobre reciclagem de plásticos.** Disponível em: <<https://www.reciclasampa.com.br/artigo/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-reciclagem-de-plastico>>. Acesso em: 12 out. 2021.

RIBEIRO JUNIOR. E. H.; PENTEADO, R. F. S., **Modelo para formatação de trabalhos acadêmicos da UTFPR.** Ponta Grossa, 2011. (Apostila).

SEABRA, LUÍS M. S. C., **Comportamento tribológico de polímeros alimentares contra aço inoxidável em escorregamento não lubrificado.** Brasil, 2000.

SENADO NOTÍCIAS. **Aumento da produção de lixo no Brasil requer ação coordenada entre governos e cooperativas de catadores,** 2021. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/noticias/infomaterias/2021/06/aumento-da-producao-de-lixo-no-brasil-requer-acao-coordenada-entre-governos-e-cooperativas-de-catadores>>. Acesso em: 23 ago. 2021.

SETOR RECICLAGEM. **Identificando os plásticos.** Disponível em: <<https://www.setorreciclagem.com.br/reciclagem-de-plastico/identificando-os-plasticos/>>. Acesso em: 11 out. 2021.

SINATORA, A. **Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte,** Prova de Erudição, São Paulo, 2015.

SILVA, A. B. B., SILVA, E., **Conhecendo materiais poliméricos.** Brasil, 2003.

STACHOWIACK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology,** 3ª ed, Austrália, 2006.

STRAFFELINI, G. **Friction and wear: methodologies for design and control.** Springer, 2015.

TELLES, P. S., **Materiais e equipamentos de processo.** 6ª ed, Rio de Janeiro, 2003.

TESCAN. **TESCAN VEGA 4.** Disponível em: <<https://www.tescan.com/pt-br/product/sem-for-materials-science-tescan-vega>>. Acesso em: 23 nov. de 2022.

VALEGURA, Rodolfo Sandoli. **Manufatura e Validação de um Tribômetro Linear Recíproco.** 2022. 65f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2022.