

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**JEAN SIQUEIRA DE OLIVEIRA**

**ANÁLISE FATORIAL DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS TRIBOLÓGICOS NO  
COMPORTAMENTO DO DESGASTE DO AÇO DOMEX 700**

**GUARAPUAVA**

**2022**

**JEAN SIQUEIRA DE OLIVEIRA**

**ANÁLISE FATORIAL DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS TRIBOLÓGICOS NO  
COMPORTAMENTO DO DESGASTE DO AÇO DOMEX 700**

**Factor analysis of the influence of tribological parameters on the wear behavior  
of DOMEX 700 steel**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Tecnólogo em Manutenção Industrial da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Dra. Viviane Teleginski Mazur

Coorientador: Dr. Ricardo Vinicius Bubna Biscaia

**GUARAPUAVA**

**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.

**JEAN SIQUEIRA DE OLIVEIRA**

**ANÁLISE FATORIAL DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS TRIBOLÓGICOS NO  
COMPORTAMENTO DO DESGASTE DO AÇO DOMEX 700**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Tecnólogo em Manutenção Industrial da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 07/dezembro/2022

---

Viviane Teleginski Mazur  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Sílvia do Nascimento Rosa  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Franciele Bonatto  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

O termo de aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso.

**GUARAPUAVA  
2022**

Dedico este trabalho a quem sempre me apoiou, inspirou e me ajudou a chegar até aqui.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus, por me dar forças e discernimento em todos os momentos e me permitir conquistar meus sonhos e objetivos.

Dedico esse momento de minha história a quem de forma incondicional me deu a vida, amor e carinho, e que me ensinou os valores do respeito e da educação, e que de forma incansável se fez minha base e meu apoio para realizar meus sonhos. Dedico e agradeço profundamente à minha mãe, Professora Cátia Ignacio de Siqueira, por tudo que representa para mim.

Dedico também ao homem que tenho como referência a sua história e vida profissional, que foi meu primeiro professor sem ter nenhuma formação a não ser a da faculdade da vida, e que um dos seus sonhos era simplesmente o qual realizo neste momento. Dedico e agradeço ao meu avô, Mario Ribeiro de Siqueira, por ser meu defensor, incentivador e fonte de inspiração.

Gostaria de agradecer, ao meu pai, Edilson Vicente de Oliveira, que do seu jeito mais sem jeito, me ensinou o valor da força de trabalho e que me inspirou a saber me virar sozinho. À minha irmã, Mariany Siqueira de Oliveira, por ter sido forte em minha ausência e por aos poucos compreender os valores a quais sigo. À minha avó, Suely Ignacio de Siqueira, que sempre me deu amor, afeto e educação. Ao meu tio, Fernando José de Almeida in memoriam, que em sua trajetória de vida me adotou como seu afilhado, me contagiando com sua alegria, respeito, admiração e total apoio em minha jornada, agradeço profundamente seu zelo por mim. E a todos os familiares próximos que de alguma forma me deram apoio, força e acreditaram em mim.

Em especial à pessoa mais importante que conheci nessa trajetória, a minha namorada, companheira e melhor amiga, Andressa Boeno de Lima, que ao seu lado divido as alegrias, conquistas, angústias e desafios. Obrigado por ser minha incentivadora, instrutora, porto seguro, amor e carinho. Também, agradeço sua família por me receber de braços abertos e por todo apoio, afeto, carinho e confiança depositado a mim.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pelo ensino de qualidade, estrutura, suporte e os anos de aprendizado nessa instituição. Por fim, aos meus orientadores e a todos os professores que contribuíram de forma direta ou indireta para a minha formação acadêmica e profissional, meu muito obrigado!

*“Eu tenho uma alma que é feita de sonhos.”*  
— Alexandre Magno Abrão (Chorão)

## RESUMO

A busca da indústria moderna por materiais mais leves e resistentes, fomentam áreas de engenharia para criar novos materiais. Surge então, uma nova classe de materiais, denominados aços de elevada resistência e baixa liga. Um membro dessa nova classe é o aço DOMEX 700 que demonstra ser um grande potencial para suas aplicações, entretanto é suscetível a fenômenos que podem vir a desgastá-lo. Dessa forma, o objetivo do trabalho foi estudar o comportamento do aço através de uma análise tribológica e fatorial. Analisou-se a interação do aço através da variabilidade da carga, frequência e comprimento de deslizamento em dois níveis proporcionais entre si e distribuídas em uma ordem-padrão. O resultado na faixa analisada observou que para a taxa de desgaste, o aumento da frequência teve maior influência no desgaste do DOMEX 700. Entretanto, quando analisada a profundidade e a largura de desgaste, para obter maior área e volume de desgaste deve haver uma combinação entre a carga aplicada e a frequência. Também se notou que aumentando o comprimento de deslizamento ocorreu uma tendência à redução do volume de desgaste. As interações no tribossistema em relação a carga e frequência podem impactar no mecanismo e na temperatura de desgaste, podendo causar modificações no coeficiente de atrito. O estudo obteve resultados significativos e parâmetros de ensaios que possibilitam uma melhor caracterização do aço DOMEX 700.

**Palavras-chave:** DOMEX 700; Taxa de desgaste; Tribologia; Design Fatorial; Atrito.

## **ABSTRACT**

The modern industry's search for lighter and more resistant materials encourages engineering areas to create new materials. A new class of materials then emerges, called high-strength, low-alloy steels. A member of this new class is the DOMEX 700 steel, which shows great potential for its applications, however it is susceptible to phenomena such as the material wear. Thus, the objective of this work was to study the behavior of steel through a tribological and factorial analysis. The steel interaction was analyzed through load variability, frequency and length in two levels proportional to each other and in a standard order. The result in the analyzed range observed that for the wear rate, the increase in frequency had a greater influence on the wear of the DOMEX 700. However, when analyzing the depth and width of wear, to obtain a greater area and volume of wear, there must be a combination between applied load and frequency. It was also noted that by increasing the sliding length there was a tendency to reduce the wear volume. Interactions in the tribosystem in relation to load and frequency can impact the mechanism and wear temperature, which may cause changes in the coefficient of friction. The study obtained significant results and test parameters that allow a better characterization of the DOMEX 700 steel.

**Palavras-chave:** DOMEX 700; Wear Rate; Tribology; Factorial design; Friction.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mecanismos de desgaste .....	19
Figura 2 - Amostra não retificada .....	25
Figura 3 - Corpo de prova .....	26
Figura 4 - Representação de um sistema fatorial.....	26
Figura 5 - (a) Parte externa e (b) parte interna do tribômetro linear recíproco .....	29
Figura 6 - (a) Esfera e pino e (b) porta-amostras .....	29
Figura 7 - Cargas de 10 N e 5 N .....	30
Figura 8 - Perfil de desgaste da amostra MB 2 .....	31
Figura 9 – (a) Amostra ainda no suporte do tribômetro e (b) após ensaios tribológicos .....	33
Figura 10 - Coeficiente de atrito da amostra (a) MB7e (b) MB9.....	35
Figura 11 - Influência das variáveis de entrada (a) carga, (b) comprimento e (c) frequência em função da variável de saída de taxa de desgaste .....	37
Figura 12 - Influência das variáveis de saída na (a,b,c) profundidade e (d,e,f) largura de desgaste.....	38
Figura 13 - Proporcionalidade física entre a profundidade e a largura de desgaste .	39
Figura 14 - Influência das variáveis de entrada no coeficiente (a) estático e (b) dinâmico .....	40
Figura 15 - Representação da severidade de desgaste através das cores.....	42
Figura 16 - Superfície de contorno da taxa de desgaste em função da frequência e comprimento de desgaste, para uma carga de 7,5 N.....	43
Figura 17 - Superfície de contorno de (a) profundidade e (b) largura da trilha em função da carga e frequência, para comprimento de deslizamento de 3 mm .....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço DOMEX 700 .....	15
Tabela 2 - Ordem padrão .....	27
Tabela 3 - Planejamento Fatorial .....	27
Tabela 4 - Resultados dos ensaios de desgaste para o aço DOMEX 700.....	34
Tabela 5 - Coeficiente de atrito estático e dinâmico dos ensaios de desgaste para o aço DOMEX 700.....	36

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CoF	<i>Coefficient of Friction</i> - Coeficiente de atrito
HSLA	<i>High Strength Low Alloy</i> – Alta Resistência Baixa Liga
MB	Material base
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$F_{\max}$	Valor máximo do atrito estático
$\mu_e$	Coefficiente de atrito estático
$N$	Força normal
$F_e$	Força de equilíbrio estático
$F_d$	Valor máximo do atrito dinâmico
$\mu_d$	Coefficiente de atrito dinâmico
$p_m$	Pressão de contato nominal médio
$L_s$	Distância total de deslizamento
$d_{ade}$	Profundidade de desgaste médio
$k_{ade}$	Coefficiente de desgaste médio
$k_{abr}$	Coefficiente de desgaste abrasivo
$d_{abr}$	Profundidade de desgaste médio
$k$	Coefficiente de desgaste específico ( $\text{mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$ )
$V$	Volume de desgaste ( $\text{mm}^3$ )
$W$	Carga aplicada (N)
$X$	Comprimento de deslizamento (m)
$K$	Taxa de desgaste ( $\text{mm}^3\text{N}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
$T$	Tempo do ensaio (s)
$f$	Frequência (Hz)
$L$	Comprimento do curso (mm)
$X_A$	Média da área da seção transversal ( $\text{mm}^2$ )
$L_T$	Comprimento da trilha de desgaste (mm)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	Objetivo geral.....	14
1.2	Objetivos específicos.....	14
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>15</b>
2.1	Aço DOMEX 700.....	15
2.2	Atrito.....	16
2.2.1	Atrito estático.....	16
2.2.2	Atrito dinâmico.....	17
2.2.3	Influência do atrito em materiais metálicos.....	18
2.3	Desgaste .....	18
2.3.1	Desgaste adesivo.....	19
2.3.2	Desgaste abrasivo.....	20
2.3.3	Influência do desgaste no aço DOMEX 700.....	21
2.4	Tribologia .....	21
2.4.1	Carga aplicada .....	22
2.4.2	Frequência de deslizamento .....	22
2.4.3	Comprimento de deslizamento .....	23
<b>3</b>	<b>ASPECTOS METODOLÓGICOS.....</b>	<b>25</b>
3.1	Preparação dos corpos de prova.....	25
3.2	Planejamento fatorial .....	26
3.3	Análise com o tribômetro .....	28
3.4	Análise do perfil de desgaste.....	31
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>33</b>
4.1	Aspecto visual das amostras .....	33

<b>4.2</b>	<b>Taxa de desgaste, largura e profundidade</b> .....	<b>34</b>
<b>4.3</b>	<b>Coeficiente de atrito</b> .....	<b>35</b>
<b>4.4</b>	<b>Influência das variáveis de entrada no desgaste</b> .....	<b>36</b>
4.4.1	Relação com a taxa de desgaste .....	37
4.4.2	Relação com a profundidade e largura de desgaste .....	38
4.4.3	Relação do coeficiente de atrito estático e dinâmico no desgaste .....	40
<b>4.5</b>	<b>Perspectiva do desgaste pelo gráfico de contorno</b> .....	<b>42</b>
4.5.1	Relação com a taxa de desgaste .....	43
4.5.2	Relação com a profundidade e largura de desgaste .....	44
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>48</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>49</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A busca da indústria moderna por constante evolução, faz com que a procura de meios para aumentar a segurança e a eficiência de seus processos, causem uma pressão nas siderúrgicas para explorar novas tecnologias e a desenvolver aços especiais (TRŠKO et al., 2020). Surge então, uma nova classe de aços denominados de *High Strength, Low Alloy* (HSLA), ou seja, elevada resistência e baixa liga, uma evolução do aço carbono tradicional, que traz em sua composição um equilíbrio de propriedades mecânicas, com características de eficiente rendimento e resistência, e ainda viabilidade econômica, necessidades sociais e consolidação técnica científica (RASHID, 1980).

Um membro dessa nova classe de materiais, é o aço DOMEX 700, que vem demonstrando seu potencial principalmente em aplicações estruturais e de maquinários devido a seu baixo teor de carbono e elementos de liga, conforme vem sendo objeto de estudos acadêmicos (HANDRIK, 2017; MAZUR. et al., 2013; MUTHUKUMARAN et al., 2022; ULEWICZ, SZATANIAK; NOVY, 2014; VORKOV; GARCÍA; DUFLOU, 2020). Entretanto, por mais resistente que seja, está suscetível a fenômenos que podem vir a desgastá-lo. Em geral, o processo de atrito e desgaste está atrelado a diversos elementos que interagem com o metal no ambiente onde está localizado. De acordo com o estudo feito por Júnior et al. (2017) o aço DOMEX 700 comparado a outros materiais, mostrou ser resistente a perda de massa, porém quando em ambiente corrosivo potencializa o desgaste.

A área da ciência que investiga o comportamento físico do atrito e do desgaste e os fenômenos que estão correlatados, é a tribologia, e a análise dos processos que envolvem o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste de um material contribuem na busca de métodos para reduzi-los ou compreender suas reações. É preciso entender o que é atrito e seus estágios, e ao menos os tipos de desgastes fundamentais que existem em meio as superfícies em contato.

Porém, por mais que seja necessário conhecer todo esse mecanismo envolvido, deve se considerar os parâmetros que influenciam esse meio, tal como a remoção de material (que está atrelada ao deslizamento em função do tempo), a dureza, a carga, tipo de superfície, torque, velocidade relativa, etc. Diversos fatores

que influenciam o desgaste e qualquer tipo de variação podem alterar completamente a concepção ou a interação dos resultados (SIMONOVIC; DZUNI; MITROVIC, 2020; STACHOWIAK; BATCHELOR; STACHOWIAK, 2004).

Considerando as aplicações onde o aço DOMEX 700 vem sendo utilizado, e ainda por observar que na literatura encontram-se poucas referências sobre análise tribológica desta liga (JÚNIOR. et al., 2017; RAGURAMAN. et al., 2022; SIMONOVIC; DZUNIC; MITROVIC, 2020), o objetivo desse trabalho é compreender melhor o comportamento do material através de variáveis como carga, frequência e comprimento, que são estabelecidos em um tribômetro linear recíproco. Também, examinar sobre a perspectiva do coeficiente de atrito (CoF) e do desgaste, e ainda analisar de forma fatorial os resultados obtidos. Com isto, espera-se alcançar um entendimento mais apurado sobre o comportamento do material e também o coeficiente de atrito durante a realização de um ensaio de desgaste.

### **1.1 Objetivo geral**

Analisar a influência da carga, frequência e comprimento de deslizamento no comportamento das trilhas de desgaste do aço DOMEX 700.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Elaborar uma matriz de planejamento fatorial de experimentos;
- Avaliar o comportamento da taxa e das trilhas de desgaste (largura e profundidade) através da variação da carga aplicada, frequência e comprimento de deslizamento;
- Examinar o comportamento do coeficiente de atrito no material analisado.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão apresentados os principais conceitos e fundamentos pertinentes à abordagem do tema.

### 2.1 Aço DOMEX 700

O aço DOMEX 700, também conhecido como Strenx 700MC, é um aço laminado com características como considerada resistência mecânica, fácil conformação e ótima soldabilidade, devido aos seus baixos teores de carbono e elementos de liga, os quais garante o uso adequado para diversas aplicações, como em estruturas, guindastes, máquinas industriais, entre outros (TRŠKO et al., 2020).

Pertencente ao grupo de aços *High Strengh Low Alloy* (HSLA), ou seja, é um aço de elevada resistência e baixa liga. Segundo descrito pelo fabricante SSAB, tem maior potencial para aplicações estruturais, pois possui um limite de escoamento mínimo 700 MPa e resistência a tração entre 750 e 950 MPa, o que caracteriza uma alta resistência e baixo peso (SSAB, 2017). Seus benefícios ainda também estão relacionados a redução de custos e a questões ambientais, devido a diminuição de gastos com o consumo de matéria-prima, proporcionando assim mais eficiência e prolongando a vida útil (RADLIŃSKI, 2014).

Através da composição química do aço DOMEX 700, há um entendimento sobre a adição de determinados elementos químicos de liga responsáveis pelas suas propriedades mecânicas características, como pode-se ver na Tabela 1.

**Tabela 1 - Composição química do aço DOMEX 700**

COMPOSIÇÃO QUÍMICA									
Elementos	Mn	Si	V	Ti	C	Nb	P	Al	S
Máximo [%]	2,1	0,21	0,2	0,15	0,12	0,09	0,02	0,015	0,01

Fonte: Adaptado de SSAB (2017)

As características do aço como resistência, tenacidade e soldabilidade vem da combinação do baixo teor de carbono e manganês com a particularidade do refino de grão de cada elemento de liga. O nióbio, vanádio e titânio proporcionam o endurecimento por precipitação. O nióbio devido a sua afinidade ao reagir com o carbono e o nitrogênio, acrescenta ao aço resistência mecânica e resistência a abrasivos. O vanádio proporciona estabilidade durante aquecimento a temperaturas elevadas, como na austenitização, o que o agrega também ao aço resistência à corrosão, vibração e a choque. E o titânio, que por sua vez, alavanca as características citadas e proporciona a manutenção dos grãos durante o processo de laminação. Outro elemento que pode ser citado é o alumínio que apesar da baixa porcentagem de presença na composição do aço, ajuda a refinar os grãos através da sua característica de desoxidante. Essas características garantem ao Domex 700 amplas aplicações que necessitem uma boa relação entre a resistência e o seu peso mais leve (SOARES, 2015; MORAES, 2020; INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO, 2008).

## **2.2 Atrito**

O campo de estudo que trata sobre o atrito é a tribologia, e seu conceito fundamental diz que o atrito é constituído a partir da força resistiva ao movimento de deslize entre duas superfícies uma em relação a outra, a qual é denominado de força de atrito. Um conjunto de fatores podem influenciar diretamente no dimensionamento da força de atrito, porém pode se afirmar que esta será sempre tangencial a superfície de contato, de modo a contrapor o movimento, seja ele possível ou existente (PLESHA; GRAY; COSTANZO, 2014; HIBBELER, 2010).

### **2.2.1 Atrito estático**

O atrito estático ocorre quando as superfícies em contato tendem a estar em repouso ou está prestes a acontecer um movimento. O local onde ocorre essa observação é denomina de região de atrito estático, e é relacionada com a equação de equilíbrio. Este valor pode variar de zero até valores máximos significativos de força de atrito, obtida pela Equação 1.

$$F_{max} = \mu_e N \quad (1)$$

Onde  $F_{max}$  é o valor máximo do atrito estático que é proporcional ao  $\mu_e$  que é a constante conhecida como coeficiente de atrito estático multiplicada pela força normal  $N$ . Essa equação, retrata apenas a força máxima da força de atrito analisada.

Para situações em que o equilíbrio é inerte ou em repouso, e não ocorre o princípio de movimento, pode se dizer que a força de equilíbrio estático ( $F_e$ ) é definida pela sentença matemática 2 (MERIAM; KRAIGE; BOLTON, 2022).

$$F_e < \mu_e N \quad (2)$$

### 2.2.2 Atrito dinâmico

O atrito dinâmico ocorre quando as superfícies em contato estão em movimento contínuo. Essa força de atrito é geralmente menor que a força de atrito estático máximo. A representação equacional é similar à do atrito estático, que pode ser observada através da Equação 3.

$$F_d = \mu_d N \quad (3)$$

Onde  $F_d$  é o valor máximo do atrito dinâmico que é proporcional ao  $\mu_d$  que é a constante do coeficiente de atrito dinâmico multiplicada pela força normal  $N$ .

É observado que quando a velocidade da superfície em movimento tende a aumentar, o atrito dinâmico tende a diminuir, porém essa condição depende da situação de determinados fatores que estão sujeitos a medições incertas como o estado das superfícies e a velocidade relativa do movimento (MERIAM; KRAIGE; BOLTON, 2022).

### 2.2.3 Influência do atrito em materiais metálicos

O atrito está correlacionado ao desgaste e entendê-lo de forma mais aprofundada possibilita otimizar e melhorar diversas aplicações em materiais metálicos. Linhas de pesquisa vêm utilizando a área de estudos tribológicos para analisar o comportamento de determinados materiais e conseguir encontrar soluções para diminuir o atrito e conseqüentemente o desgaste e melhorar a conformação, tendo em vista que para determinadas aplicações o desgaste é um meio prejudicial, por deformar, consumir ou levar a quebra. A adição de partículas ou materiais mais resistentes implementada e analisada em materiais que tendem a sofrer mais com o atrito, afim de encontrar uma forma que diminua o desgaste é um exemplo deste caso (ROMAN; GASPARIN, 2021; JUNIOR, 2018).

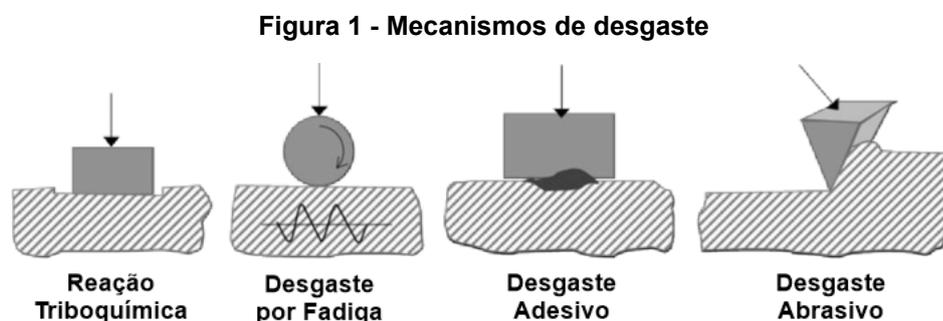
Também, estudos sobre o comportamento do atrito em materiais metálicos de alta resistência, analisado em função da variação da força e outras variáveis, com o interesse de encontrar uma forma para melhorar processos de conformação demonstra essa correlação (IVANISKI et al., 2018).

## 2.3 Desgaste

O desgaste é a remoção progressiva de partículas de um ou mais determinados materiais através do ambiente onde se encontram ou geralmente por ação mecânica. O desgaste não se caracteriza por ser o único e determinante fator pela perda de material, porém pelo sequenciamento de forma individual ou conjunta de processos complexos que envolvem variáveis como cisalhamento local, dureza, tensões, estado das superfícies, velocidade relativa, composição química dos materiais envolvidos, pressão, lubrificação, corrosão, coeficiente de atrito, entre outros (COLLINS, 2019).

A análise tribológica que descreve o comportamento de uma superfície pela interação mecânica, evidencia que podem ocorrer diversos mecanismos de desgaste pela interação dos corpos. Segundo a norma DIN-50320, há 4 tipos de desgastes básicos que melhor descrevem essa perda gradual de material, que são fadiga, reação triboquímica, o adesivo e o abrasivo (GAHR, 1987 *apud* PABLO, 2019, p.8). A

Figura 1 representa como cada forma de desgaste se comporta com a aplicação de uma carga em um corpo móvel sob superfície fixa.



Fonte: Adaptado de SERRANO et al. (2016)

O desgaste por reação triboquímica ocorre por interações e reações químicas que acontecem no mecanismo dos sistemas tribológicos, que são caracterizadas por exemplo na remoção de óxidos por atrito, formados na superfície do material em ambiente corrosivo (SUSKI, 2004).

O desgaste por fadiga ocorre quando se tem uma ação repetitiva e alternada de uma carga que varia no tempo sob uma superfície sólida, e é identificada no material quando há formação de fendas, trincas e lascas (SILVA, 2016; PABLO, 2019; TRAVI, 2016).

O desgaste adesivo e o desgaste abrasivo são os mais recorrentes e comuns, e na indústria representam aproximadamente dois terços dos problemas referentes a isso (TRAVI, 2016).

### 2.3.1 Desgaste adesivo

O desgaste adesivo que é o mais comum e fundamental, e que se relaciona com a explicação do atrito através do comportamento de movimento entre duas superfícies sólidas. Quando há uma pressão na região de contato, e ocasiona uma união de solda devido a superfícies irregulares ou ásperas, e consecutivamente ocorre uma deformação plástica, e essas combinações geram remoção ou transferência de material.

Este tipo de desgaste explora a relação de área, força, profundidade e distância, de modo a apresentar o coeficiente de atrito ou taxa de desgaste, a qual é usada para entender e melhorar a superfície de materiais em contato. A Equação 4 mostra essa relação.

$$d_{ade} = k_{ade} p_m L_s \quad (4)$$

Onde  $p_m$  é pressão de contato nominal médio,  $L_s$  a distância total de deslizamento e  $k_{ade}$  é o coeficiente de desgaste e a resultante é  $d_{ade}$  que é a profundidade de desgaste médio (COLLINS, 2019).

### 2.3.2 Desgaste abrasivo

Quando se tem sobreposta a uma superfície grãos, fragmentos e partículas irregulares, e duras, e essa superfície é levada contra a outra sob ação de movimento, ocorre o desgaste abrasivo. O resultado desse tipo de desgaste é caracterizado por riscos e trincas superficiais no local a qual sofreu com o ponto de contato, deixando assim a região com aspecto áspero devido remoção de material.

Esse fenômeno também ocorre em meios aquosos, como por exemplo em minerais dissolvidos na água que causam abrasão em rotores de bombas e turbinas hidráulicas (COLLINS, 2019; SERRANO, 2017).

O desgaste abrasivo pode ser representando por uma equação similar ao do desgaste adesivo como demonstrado na Equação 5.

$$d_{abr} = k_{abr} p_m L_s \quad (5)$$

Onde  $p_m$  é pressão de contato nominal médio,  $L_s$  a distância total de deslizamento e  $k_{abr}$  é o coeficiente de desgaste abrasivo e a resultante é  $d_{abr}$  que é a profundidade de desgaste médio (COLLINS, 2019).

### 2.3.3 Influência do desgaste no aço DOMEX 700

Apesar do DOMEX 700 apresentar boas propriedades mecânicas, sua resistência ao desgaste tem sido objeto de estudos. Em processos que tem contato com meio potencialmente abrasivo, o aço DOMEX 700 demonstra ter boa resistência na perda de massa por abrasão, porém quando somado a âmbito corrosivo, o desgaste é intensificado e propício a sofrer em sua camada superficial ataques corrosivos. Dessa forma, meios para atenuar esse desgaste contribuem para melhorar a aplicabilidade do material (JÚNIOR et al., 2017). Um exemplo disso é o estudo do uso de lubrificantes adequados para controlar o desgaste adesivo no aço, por meio da diminuição do coeficiente de atrito (SIMONOVIC; DZUNIC; MITROVIC, 2020).

Também, o estudo do comportamento de desgaste no DOMEX 700 estudado por Raguraman et al. (2022), pode trazer resultados benéficos ao indicar melhores parâmetros para a remoção de material em processo de usinagem não convencional, melhorando processos de fabricação.

## 2.4 Tribologia

A tribologia é a área do conhecimento que permite estudar o processo do atrito e do desgaste, que analisados juntos a fenômenos específicos podem prover um modelo de compreensão de engenharia de atrito, desgaste e lubrificação (STACHOWIAK; BATCHELOR; STACHOWIAK, 2004). Em uma interpretação mais abrangente, tem como definição a ciência que busca compreender a interação entre superfícies em movimento relativo e materiais e métodos correlacionados a elas (ACCADROLI, 2020).

Para descrever um sistema tribológico não basta apenas saber os fenômenos que ocorrem entre duas superfícies em movimento relativo, como atrito e o desgaste. Deve-se tomar conhecimento também sobre as variáveis que levam a esses fenômenos (PABLO, 2019). Portanto, as variáveis influenciadoras que determinam a ocorrência do atrito e do desgaste deste estudo são:

- Carga aplicada;
- Frequência de deslizamento;

- Comprimento de deslizamento (tempo de ensaio).

#### 2.4.1 Carga aplicada

É coerente afirmar que quanto maior a carga em um ensaio tribológico, maior será o desgaste, e conseqüentemente maior a taxa de remoção de material, como pode ser observado nas equações 4 e 5 que descrevem o desgaste adesivo e abrasivo.

Ellwanger (2021) investigou o comportamento de três tipos de lubrificantes comerciais sobre a perspectiva do atrito e do desgaste no aço SAE 52100, utilizando um tribômetro que opera aplicando uma carga normal sobre um par pino-disco em rotação. Para efeito de comparação em seus ensaios, realizou um ensaio a seco que em sua trajetória houve variação do torque, um mais elevado e outro mais baixo. O autor concluiu que o CoF aumentou em aproximadamente 5 vezes em relação ao torque mais baixo, e que ambas as amostras tiveram uma relação linear crescente entre o CoF e a velocidade.

#### 2.4.2 Frequência de deslizamento

A relação da frequência com o desgaste em uma superfície com asperezas é proporcional, e quanto maior é o aumento de ambos, maior será a região da dissipação de energia em forma de calor, conseqüentemente o aumento da temperatura e reações físicas e químicas. Isso significa que no caso do aço, pode haver oxidação e as partículas de óxido podem se desprender do material e passar a causar abrasão, agindo como um terceiro corpo entre as superfícies em contato.

Barbosa (2018), estudou o comportamento tribológico do desgaste que ocorre entre o fio e a bráquete de aparelhos ortodônticos, ambos da família do aço inoxidável austenítico, e verificou através de ensaios realizados em um tipo de tribômetro linear recíproco, que o aumento da frequência ou da carga aplicada influenciam diretamente no comportamento do CoF e a taxa de desgaste. No caso das análises realizadas do comportamento da frequência de deslizamento, foram configurados dois tipos de ensaios com a mesma carga de 0,5 N e a frequência com valores distintos de 0,1 Hz

e 1 Hz. Observou-se que tanto na bráquete quanto no fio na frequência de 0,1 Hz apresentou maior área de contato de metal com metal e maior CoF. Entretanto, houve menor ocorrência de desgaste por tribo-química, por promover menor dissipação de energia ocasionando menor temperatura. Na frequência de 1 Hz ocorreu o oposto.

Concluiu-se que variando a frequência varia o desgaste, no caso quanto maior a frequência maior será o aumento da taxa de desgaste. O estudo observou também, que o aumento de carga em frequências menores, tem uma maior influência na taxa de desgaste, ou seja, o aumento da carga indica uma maior degradação por desgaste tribo-químico (BARBOSA, 2018).

#### 2.4.3 Comprimento de deslizamento

O comprimento de deslizamento é um parâmetro que mede a distância que um material percorre sobre o outro, sofrendo a ação da variável da frequência e carga em decorrência do tempo. Através dessa análise é possível definir o coeficiente de desgaste que é dado em função do volume retirado, pela distância de deslizamento e a carga aplicada, demonstrado na Equação 6.

$$k = \frac{V}{XW} \quad (6)$$

Onde k é o coeficiente específico de desgaste dado em unidade de  $\text{mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$ , V é o volume de desgaste em  $\text{mm}^3$ , W a carga aplicada em N e a X comprimento de deslizamento em unidade de metros (TEIXEIRA, 2011).

Já Batchelor e Stachowiak (2005), descreve K como o coeficiente de desgaste adimensional, o qual possui um valor menor que 1. Dessa forma, neste trabalho, o coeficiente de desgaste é encontrado a partir da Equação 7.

$$K = \frac{V}{t.W} \quad (7)$$

Onde  $K$  é o coeficiente desgaste, ou também chamado de taxa de desgaste, dado em unidade de  $\text{mm}^3\text{N}^{-1}\text{s}^{-1}$ ,  $V$  é o volume de desgaste em  $\text{mm}^3$ ,  $W$  a carga aplicada em  $\text{N}$  e  $t$  é o tempo do ensaio em segundos.

Como descrito anteriormente, o aumento da carga aplicada e da variação da frequência de deslizamento induzem o aumento da taxa de desgaste, já no comprimento de deslizamento pode ocorrer de forma diferente. De acordo com Mendanha e Câmara (2017), foi elaborado um experimento para identificar como a rugosidade e a distância de deslizamento influenciam no CoF, na orça de atrito e na taxa de desgaste. Esta análise foi feita através de um tribômetro de pino-disco, onde o pino utilizado foi um metal duro (WC-Co) contra três discos de aço ABNT 4340, que possuíam valores distintos de rugosidade superficial.

Observou-se na análise que a comprimento de deslizamento e a rugosidade superficial tem influência direta sobre o CoF e a taxa de desgaste, porém a partir de um determinado ponto a distância de deslizamento começa a exercer menor influência no CoF, pois os índices de rugosidade se mantinham os mesmos.

### 3 ASPECTOS METODOLÓGICOS

Nesta seção estão apresentados os materiais e os métodos utilizados para a preparação das amostras, os ensaios tribológicos e as técnicas de análise dos resultados.

#### 3.1 Preparação dos corpos de prova

As amostras do aço DOMEX 700, foram retiradas da substituição na manutenção de um moinho de martelos, com as dimensões de 300 x 40 x 5 mm, conforme demonstrado na Figura 2.

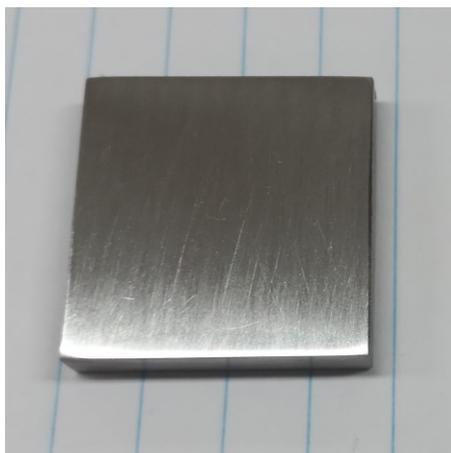
**Figura 2 - Amostra não retificada**



**Fonte: Autoria própria, 2022.**

Para retirar qualquer resquício de sujeira e pontos de corrosão sobre a camada superficial da peça, foi utilizada uma retificadora plana manual da marca e modelo EUROSTEC KGS150, com rebolo do tipo óxido de alumínio com granulometria 80.

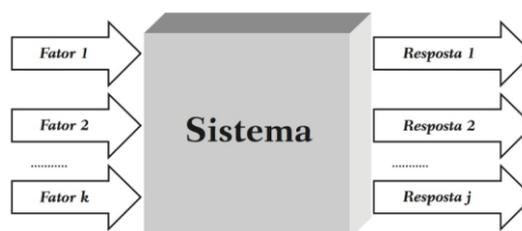
Para a peça chegar nas medidas necessárias de utilização como corpo de prova, foi utilizada uma cortadora metalográfica da marca e modelo TECLOGO CM60 acoplada com um disco de corte para metais ferrosos, liso, de dureza HRC 35 a 60. Foram cortados quatro corpos de prova do tamanho 30 x 29 mm e lixados com lixas d'água de SiC (220#, 360#, 600), como mostra a Figura 3.

**Figura 3 - Corpo de prova**

Fonte: Autoria própria, 2022.

### 3.2 Planejamento fatorial

O planejamento fatorial foi baseado na metodologia de Neto, Scarminio e Bruns (2010). Esta metodologia auxilia de forma estratégica e analítica a organizar variáveis influenciadoras (variáveis de saída) a fim de obter respostas de saída observáveis (variáveis influenciadas), como representado na Figura 4. Para este trabalho foram utilizados três fatores de entrada: carga, frequência de deslizamento e comprimento de deslizamento.

**Figura 4 - Representação de um sistema fatorial**

Fonte: Neto, Scarminio e Bruns (2010)

A Figura 4 mostra a representação de um sistema com variáveis de entrada conhecidas relacionadas a variáveis de saída a qual deseja-se conhecer. Variando em dois níveis, ou seja, dois valores com diferença proporcional sendo neste caso, o

planejamento fatorial igual a  $2^3$ , sendo um total de 8 ensaios que foram realizados em duplicata. Foi criada uma tabela chamada ordem-padrão, onde todas as lacunas começam com o menor nível (-), e depois se alternam entre si, até todas as lacunas terem o maior nível (+), podendo ser observada na Tabela 2.

**Tabela 2 - Ordem padrão**

FATOR	CARGA (N)	COMPRIMENTO (mm)	FREQUÊNCIA (Hz)
ENSAIO 1	-1	-1	-1
ENSAIO 2	1	-1	-1
ENSAIO 3	-1	1	-1
ENSAIO 4	1	1	-1
ENSAIO 5	-1	-1	1
ENSAIO 6	1	-1	1
ENSAIO 7	-1	1	1
ENSAIO 8	1	1	1

**Fonte: Autoria própria, 2022.**

Utilizando a metodologia demonstrada na Tabela 2, foi encontrada a correlação entre os fatores de entrada e seus níveis. Através da organização foi realizado o planejamento fatorial deste trabalho como mostrado na Tabela 3, conforme as variáveis proporcionais entre si disponíveis no equipamento tribômetro linear recíproco utilizado.

**Tabela 3 - Planejamento Fatorial**

AMOSTRA	CARGA (N)	COMPRIMENTO (mm)	FREQUÊNCIA (Hz)	TEMPO (s)
MB 1	5	2	1	12500
MB 2	5	2	1	12500
MB 3	10	2	1	12500
MB 4	10	2	1	12500
MB 5	5	4	1	6250
MB 6	5	4	1	6250
MB 7	10	4	1	6250
MB 8	10	4	1	6250
MB 9	5	2	2	6250
MB 10	5	2	2	6250
MB 11	10	2	2	6250
MB 12	10	2	2	6250
MB 13	5	4	2	3125
MB 14	5	4	2	3125
MB 15	10	4	2	3125
MB 16	10	4	2	3125

**Fonte: Autoria própria, 2022.**

Na Tabela 3 são nomeclados os 16 ensaios utilizando o material base (MB), onde foram considerados os diferentes valores de carga, comprimento e frequência. O tempo de cada ensaio foi calculado a partir da Equação 8 conforme norma (ASTM G133-05, 2016).

$$X = 0,002.t.f.L \quad (8)$$

Onde X é a distância total de deslizamento da esfera igual a 50 metros (adaptado conforme norma), t o tempo do teste em segundos, f a frequência oscilante em Hz (ciclos/s) e L o comprimento do curso em mm.

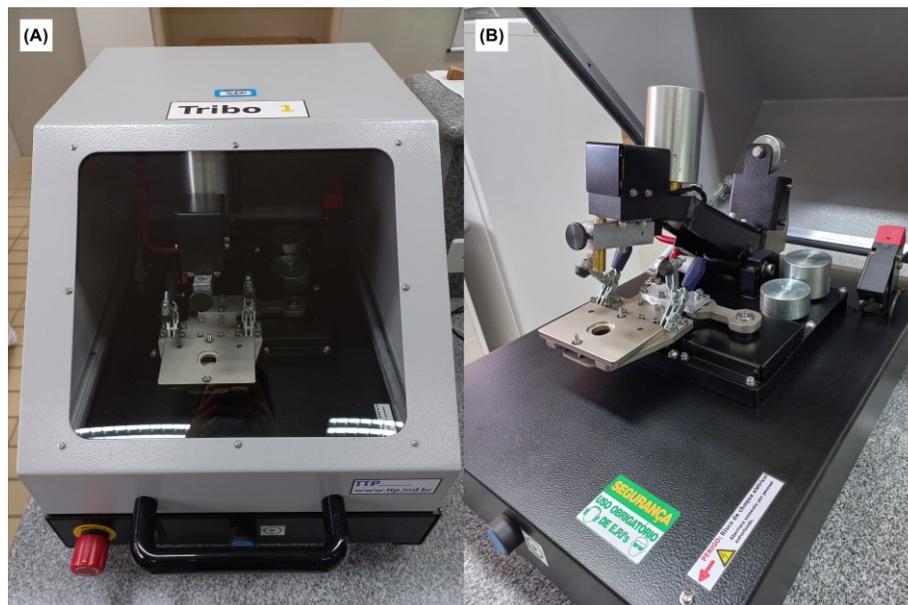
Para realizar a correlação de todos os dados obtidos e observar o comportamento através de análises fatoriais foi utilizado o software Design-Expert versão 13. Para a caracterização do comportamento das variáveis de entrada com cada uma de saída, foi realizada a análise através dos gráficos box-plot e gráficos de contorno.

### **3.3 Análise com o tribômetro**

Quando se tem a necessidade de analisar um determinado material em relação ao seu desgaste e atrito, geralmente é usado o instrumento de ensaio tribômetro, ao qual sob condições controladas, visa gerar um pequeno ponto de atrito entre a ponteira do instrumento e um determinado corpo de prova, assim gerando um gráfico de força de atrito e do desgaste, que poderá ser analisado consecutivamente (GERMANO POSTAL, 2020; SILVA; CURI, 2018).

Para os ensaios de desgaste foi utilizado um tribômetro linear recíproco, modelo TRIBO 1, fabricado no Brasil pela empresa TTP Industria mecânica LTDA, conforme podemos observar na Figura 5.

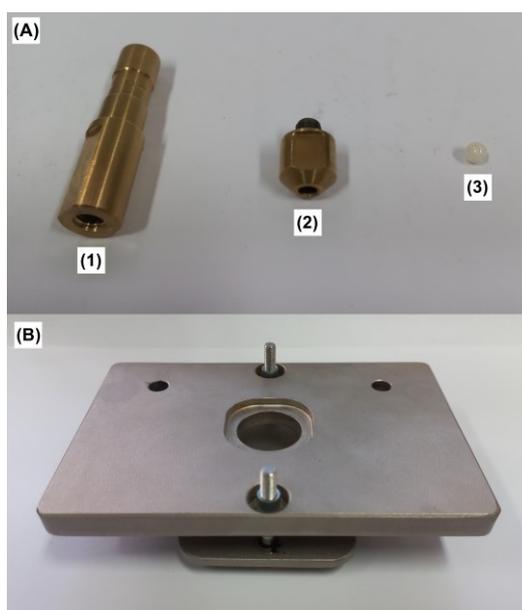
Figura 5 - (a) Parte externa e (b) parte interna do tribômetro linear recíproco



Fonte: Autoria própria, 2022.

O contra corpo, apresentado na Figura 6, utilizado foi (3) uma esfera de alumina com 4,76 mm de diâmetro, presa a (1) e (2) um suporte denominado de pino, onde este foi posicionado na superfície da amostra, na região central, sendo fixado por um porta-amostras, como mostra a Figura 6.

Figura 6 - (a) Esfera e pino e (b) porta-amostras

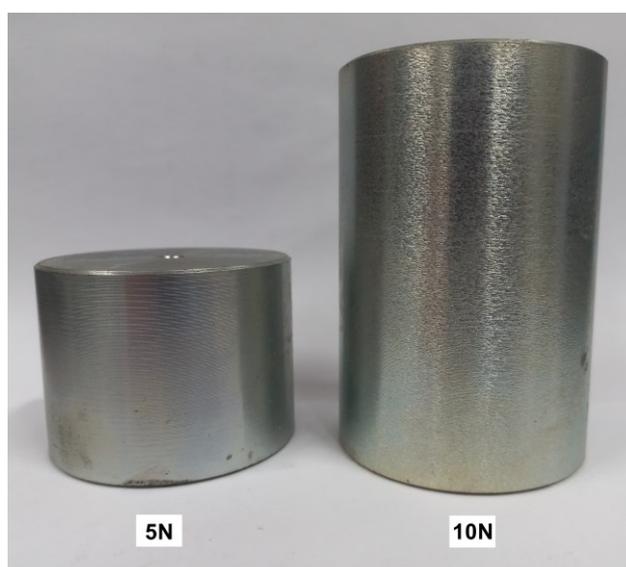


Fonte: Autoria própria, 2022.

Os ensaios foram realizados em deslizamento sem fluido de corte, em temperatura ambiente ( $18\pm 5$ ) °C e ( $25\pm 5$ ) °C, em atmosfera ambiente (umidade relativa entre 38 a 70%), e todas as amostras foram limpas com álcool isopropílico e banhadas no equipamento ultrassom de marca e modelo SOLAB SL-155 por 5 minutos antes de cada ensaio.

Foi avaliada a influência dos parâmetros de carga aplicada, frequência e comprimento de deslizamento (tempo de ensaio) no desgaste do material. A carga foi variada conforme se alteram as massas que são posicionadas em cima do pino, sendo utilizadas apenas duas diferentes cargas, como mostra a Figura 7.

**Figura 7 - Cargas de 10 N e 5 N**



**Fonte: Autoria própria, 2022.**

No próprio software do tribômetro, TTP Tribo-Studio, os parâmetros de carga, comprimento, frequência e tempo de ensaio são definidos conforme o planejamento fatorial. Após o término do ensaio o software gerou uma planilha contendo o coeficiente de atrito (CoF) estático e dinâmico em relação ao tempo de ensaio.

Para extrair uma média de cada CoF foi considerado um período amostral onde havia uma maior uniformidade dos dados, ou seja, foi analisado graficamente a partir de que período os valores do coeficiente de atrito estático e dinâmico apresentaram maior estabilidade.

### 3.4 Análise do perfil de desgaste

Para medir a área de desgaste depois dos ensaios tribológicos, foi utilizado o rugosímetro da marca e modelo MITUTOYO SJ-410.

A área de seção transversal removida de material durante o ensaio tribológico de cada amostra em duplicata foi determinada a partir de 3 pontos distintos ao longo da trilha de desgaste, utilizando o rugosímetro no modo perfil. O volume de material removido foi calculado conforme a Equação 9:

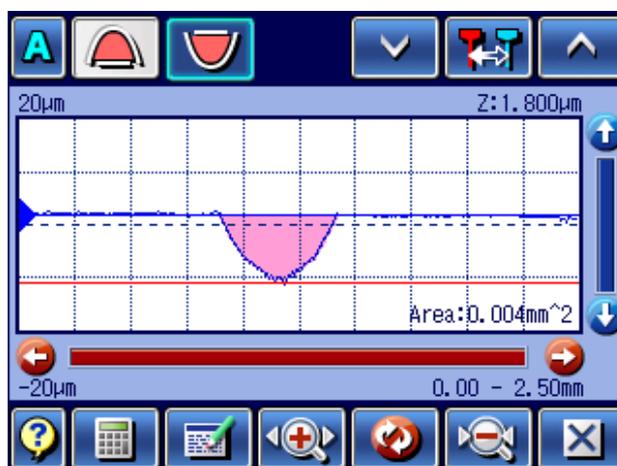
$$V = \overline{X}_A * L_T \quad (9)$$

onde  $\overline{X}_A$  é a média da área da seção transversal das duplicatas de cada amostra nos 3 pontos da trilha e  $L_T$  é o comprimento da trilha de desgaste.

A taxa de desgaste, em  $\mu\text{m}^3\text{N}^{-1}\text{s}^{-1}$ , foi calculada com o volume da trilha dividido pela carga aplicada vezes o tempo de ensaio, conforme equação 7.

A fim de analisar a correlação como variáveis de saída do planejamento fatorial, também foram medidos os valores de largura e profundidade do desgaste a partir do perfil gerado pelo rugosímetro, como exemplifica a Figura 8, em 3 pontos distintos da trilha de desgaste de cada amostra.

Figura 8 - Perfil de desgaste da amostra MB 2



Fonte: Autoria própria, 2022.

Para realizar as medidas de largura e profundidade, foi usado o software ImageJ, o qual usa na imagem uma medida de referência conhecida, adotando o valor equivalente da medida em pixels, possibilitando assim medir com precisão a profundidade e a largura do desgaste.

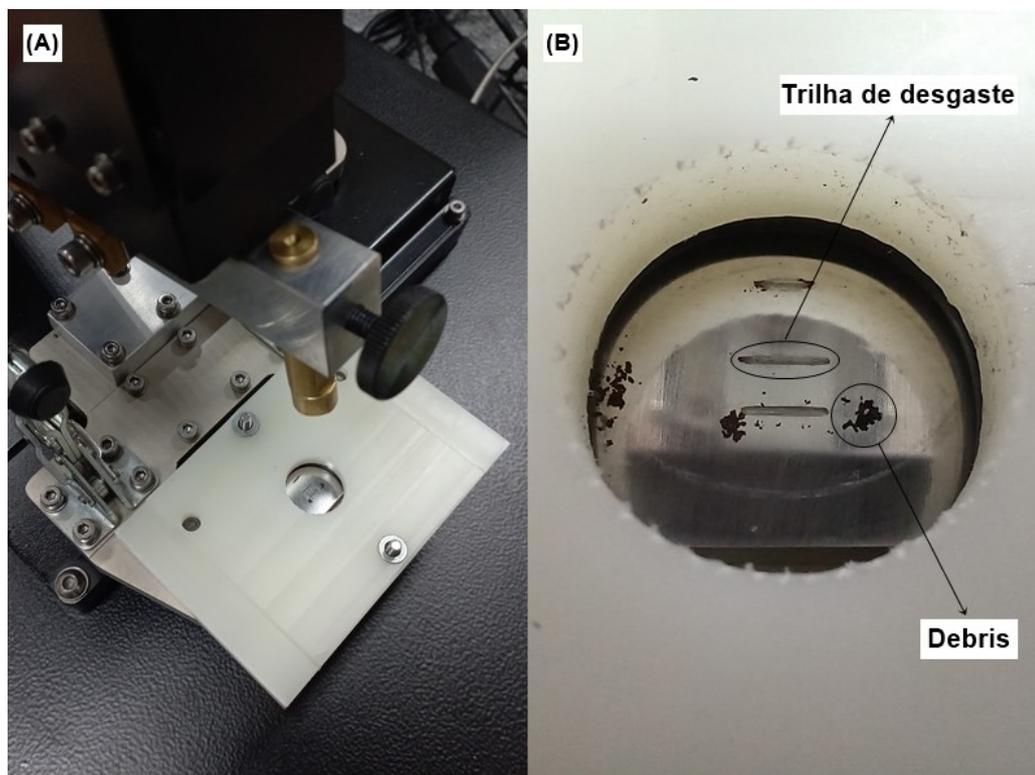
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos experimentalmente, que incluem o aspecto visual das amostras após os ensaios, as respectivas medições que possibilitaram obter os resultados de saída do planejamento fatorial e as análises fatoriais que demonstram o comportamento do aço DOMEX 700 através de seu desgaste e seu coeficiente de atrito.

### 4.1 Aspecto visual das amostras

A Figura 9 indica a amostra ainda no suporte do equipamento (Figura 9 a) e o destaque para a trilha de desgaste dos ensaios (Figura 9 b).

Figura 9 – (a) Amostra ainda no suporte do tribômetro e (b) após ensaios tribológicos



Fonte: Autoria própria, 2022.

Observa-se na Figura 9 o desgaste oriundo da ação da fricção e do atrito da esfera com o material base. Também foi possível notar a presença de partículas (debris) que são geradas durante o processo de desgaste. Para uma análise adequada dos resultados do ensaio, é importante que a trilha de desgaste apresente bordas bem definidas, pois a mensuração da área de desgaste permitirá o cálculo do volume e taxa de desgaste. Dessa forma, foram avaliadas as variáveis de entrada no ensaio tribológico e seu efeito nas variáveis de saída.

#### 4.2 Taxa de desgaste, largura e profundidade

Através das equações 7, 8 e 9 foi possível obter os resultados para cada ensaio tribológico no material base, o aço DOMEX 700. Esses resultados são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4 - Resultados dos ensaios de desgaste para o aço DOMEX 700**

AMOSTRA	TAXA DE DESGASTE [ $\mu\text{m}^3/\text{s.m}$ ]	PROFUNDIDADE [ $\mu\text{m}$ ]	LARGURA [ $\mu\text{m}$ ]
MB 1	3,200	7,013	402,389
MB 2	6,400	6,301	375,898
MB 3	12,800	12,280	525,239
MB 4	13,867	12,376	520,744
MB 5	12,800	5,422	356,232
MB 6	12,800	5,697	347,881
MB 7	38,400	9,192	475,394
MB 8	38,400	11,022	475,395
MB 9	21,333	11,415	470,636
MB 10	29,867	14,404	537,236
MB 11	32,000	14,873	554,598
MB 12	32,000	14,867	562,261
MB 13	76,800	9,734	466,955
MB 14	68,267	8,721	447,793
MB 15	102,400	12,588	502,784
MB 16	85,333	14,915	556,274

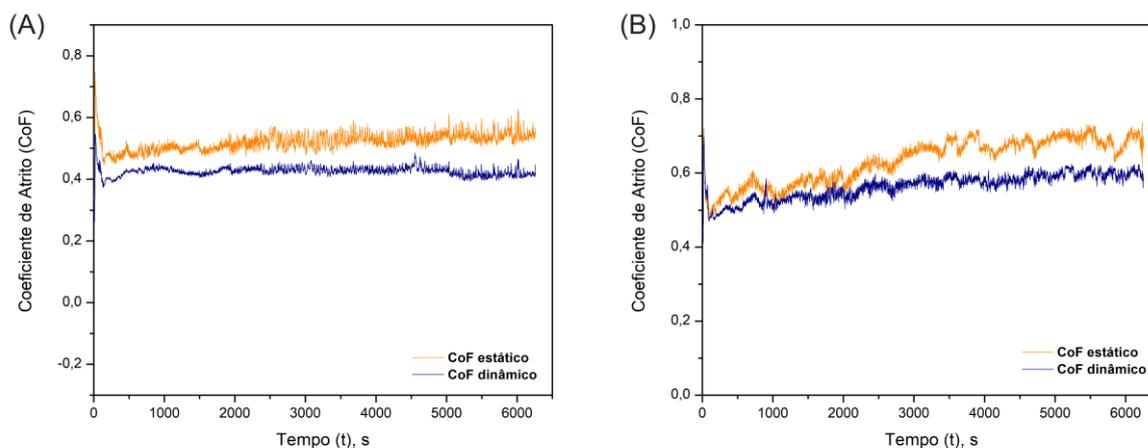
Fonte: Autoria própria, 2022.

Os valores apresentados na Tabela 4 de taxa de desgaste, profundidade e largura foram utilizados para as análises de planejamento fatorial.

### 4.3 Coeficiente de atrito

A partir dos dados consolidados do software TTP Tribo-Studio, foi possível obter os valores para o coeficiente de atrito (CoF) estático e dinâmico em função do tempo, como mostra a Figura 10. Foram analisados utilizando valores intermediários (MB7 e MB9) da ordem-padrão.

**Figura 10 - Coeficiente de atrito da amostra (a) MB7e (b) MB9**



**Fonte: Autoria própria, 2022.**

Na Figura 10 (a) e Figura 10 (b), referente as amostras MB 7 e MB 9, observou-se que a estabilidade dos coeficientes começa em aproximadamente 2000 segundos de ensaio. Então a partir deste tempo foi calculada a média aritmética de cada ensaio, e os valores são mostrados na Tabela 5.

**Tabela 5 - Coeficiente de atrito estático e dinâmico dos ensaios de desgaste para o aço DOMEX 700**

<b>AMOSTRA</b>	<b>CoF Estático</b>	<b>CoF Dinâmico</b>
MB 1	0,558 ± 0,022	0,479 ± 0,018
MB 2	0,525 ± 0,033	0,436 ± 0,035
MB 3	0,557 ± 0,018	0,446 ± 0,013
MB 4	0,543 ± 0,020	0,440 ± 0,015
MB 5	0,508 ± 0,032	0,409 ± 0,028
MB 6	0,505 ± 0,041	0,403 ± 0,034
MB 7	0,531 ± 0,020	0,427 ± 0,012
MB 8	0,521 ± 0,031	0,422 ± 0,042
MB 9	0,667 ± 0,034	0,581 ± 0,020
MB 10	0,711 ± 0,027	0,695 ± 0,024
MB 11	0,541 ± 0,032	0,458 ± 0,028
MB 12	0,572 ± 0,020	0,516 ± 0,020
MB 13	0,686 ± 0,025	0,617 ± 0,027
MB 14	0,833 ± 0,022	0,755 ± 0,020
MB 15	0,548 ± 0,014	0,559 ± 0,011
MB 16	0,519 ± 0,019	0,508 ± 0,018

**Fonte: Autoria própria, 2022.**

A Tabela 5 apresenta a média do CoF estático e dinâmico para as 16 amostras com o seu desvio padrão. Foi possível notar que o CoF estático é maior que o CoF dinâmico conforme indicado na literatura (MERIAM; KRAIGE; BOLTON, 2022).

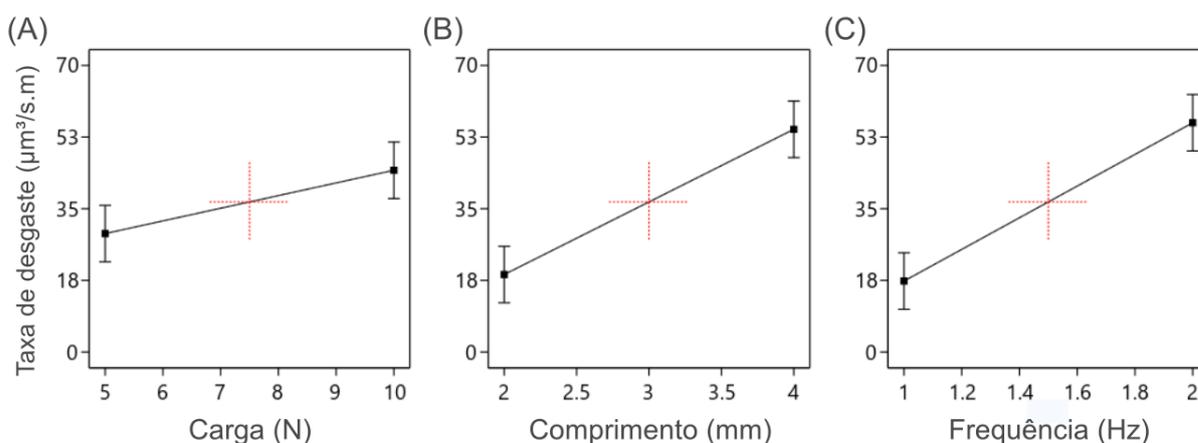
#### **4.4 Influência das variáveis de entrada no desgaste**

Neste tópico são apresentadas as discussões do comportamento das variáveis de entrada através do gráfico box-plot, levando em consideração a relação da carga, comprimento e frequência com valores intermediários e observando a relação do comportamento com cada variável de saída (taxa de desgaste, profundidade e largura de desgaste, e os coeficientes de atrito).

#### 4.4.1 Relação com a taxa de desgaste

Levando em consideração aspectos das interações mecânicas atuantes na interface da amostra com o contra corpo, observa-se na Figura 11 a influência das variáveis de entrada carga, comprimento e frequência na variável de saída de taxa de desgaste.

**Figura 11 - Influência das variáveis de entrada (a) carga, (b) comprimento e (c) frequência em função da variável de saída de taxa de desgaste**



**Fonte: Autoria própria, 2022.**

Observa-se que conforme as variáveis de entrada aumentam (Figura 11 a, b, c), maior é a taxa de desgaste do material. Entretanto, o aumento de carga (Figura 11 a) demonstrou uma menor tendência a aumentar a taxa, sendo que para uma carga de 5 N a taxa correspondente é de  $29 \mu\text{m}^3/\text{s.m}$  e para uma carga de 10 N a taxa observada foi de  $44 \mu\text{m}^3/\text{s.m}$ . Neste caso o aumento foi de 34%. Para cargas maiores do que 10 N é provável que a influência da carga na taxa de desgaste fique mais evidente, o que já foi observado por Durango (2016). No estudo, o autor avaliou a influência tribológica da carga, frequência e temperatura no desgaste em quatro tipos variados de aço e também em seis tipos de ligas intermetálicas de nióbio sinterizadas, materiais com aplicações próximas ao aço DOMEX 700. Seus ensaios apesar de similares ao deste estudo foram realizados em uma escala maior, com um incremento progressivo de carga (15 N até 600 N), onde a taxa de desgaste aumentou da mesma proporção.

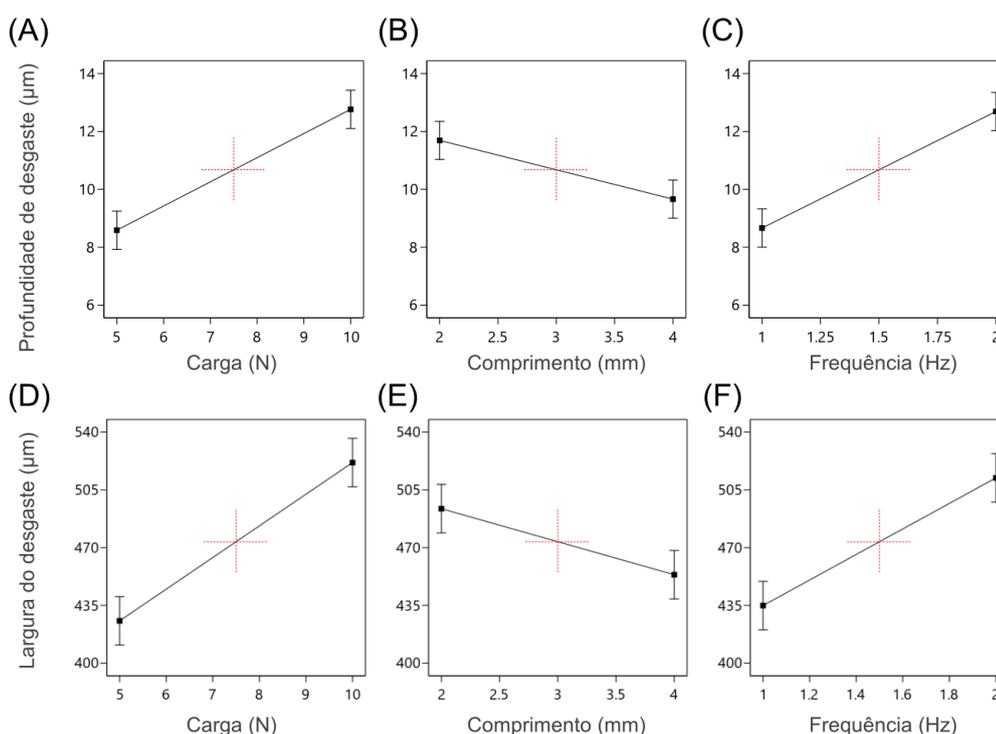
Já o comprimento (Figura 11 b) e a frequência de deslizamento (Figura 11 c) têm proporcionalidades mais similares na influência ao aumento da taxa de desgaste, Para o comprimento de 2 mm a taxa correspondente é de  $20 \mu\text{m}^3/\text{s.m}$  e para um comprimento de 4 mm a taxa observada foi de  $54 \mu\text{m}^3/\text{s.m}$ , um aumento de 63%. Já para frequência de 1 Hz a taxa correspondente é de  $17 \mu\text{m}^3/\text{s.m}$  e para a frequência de 2 Hz a taxa observada foi de  $56 \mu\text{m}^3/\text{s.m}$ , um aumento de 70%.

Levando-se em consideração os maiores valores observados na taxa de desgaste, a frequência possui uma influência mais acentuada em cerca de 3,57%, e assim, conclui-se que em relação aos demais fatores tem maior influência na taxa de desgaste do aço DOMEX 700.

#### 4.4.2 Relação com a profundidade e largura de desgaste

Já no aspecto das interações mecânicas atuantes na perspectiva da remoção de volume de material, ou seja, da profundidade e da largura da trilha de desgaste, o comportamento das variáveis é mostrado na Figura 12.

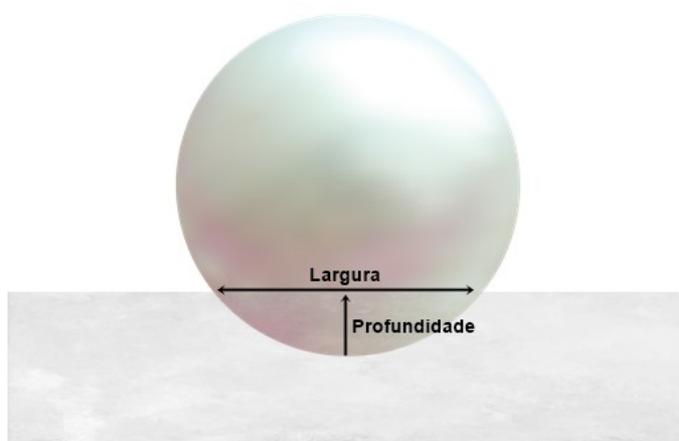
**Figura 12 - Influência das variáveis de saída na (a,b,c) profundidade e (d,e,f) largura de desgaste**



Fonte: Autoria própria, 2022.

Foi notado na comparação dos gráficos de profundidade (Figura 12 a, b, c) e de largura de desgaste (Figura 12 d, e, f) uma singularidade, pois como os ensaios tratam-se de uma esfera deslizando sobre uma superfície até o valor da largura alcançar o valor do diâmetro da esfera, ambas as medidas são proporcionais, como mostra a Figura 13.

**Figura 13 - Proporcionalidade física entre a profundidade e a largura de desgaste**



**Fonte: Autoria própria, 2022.**

A carga (Figura 12 a, d) e a frequência (Figura 12 c, f) têm um comportamento diretamente proporcional a taxa de desgaste, pois quanto maior a carga e a frequência maior a remoção do volume de material e maior a taxa de desgaste.

No caso da profundidade de desgaste, a variação da carga de 5 N para 10 N apresentou um aumento de 33%. Já a variação da frequência de 1 Hz para 2 Hz apresentou um aumento de 31%. Levando-se em consideração os maiores valores observados, a carga possui uma influência levemente mais acentuada em cerca de 1,34% na profundidade de desgaste.

No caso da largura de desgaste, a variação da carga de 5 N para 10 N apresentou um aumento de 18%. Já a variação da frequência de 1 Hz para 2 Hz apresentou um aumento de 16%. Levando-se em consideração os maiores valores observados, a carga possui uma influência levemente mais acentuada em cerca de 1% na largura de desgaste.

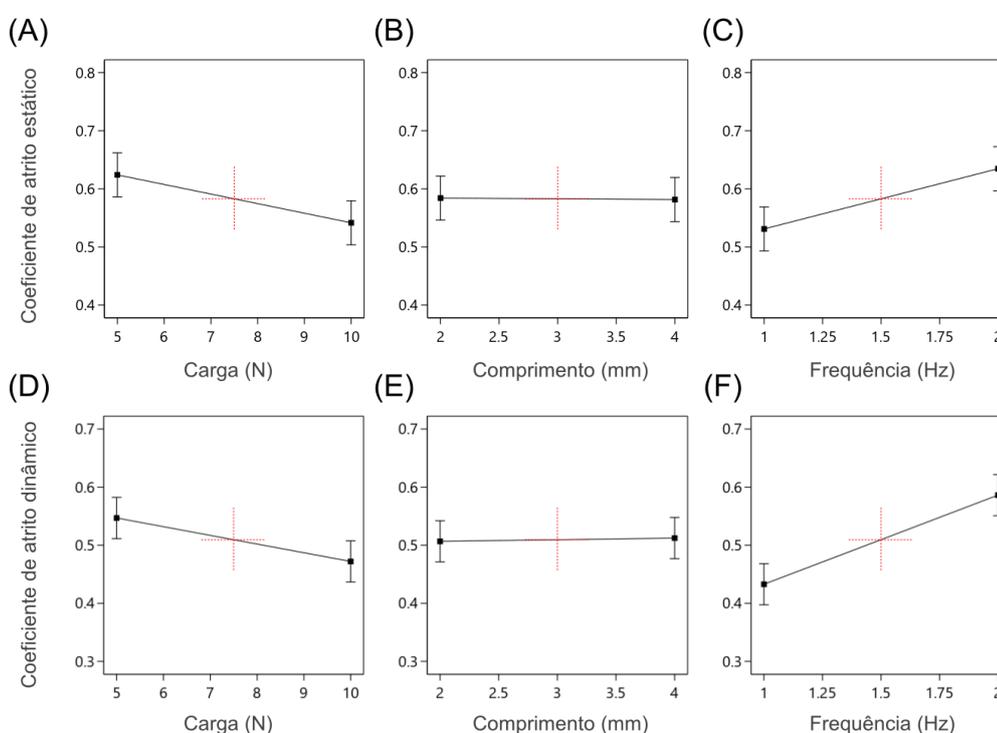
Aumentando-se o comprimento de deslizamento (Figura 12 b, e) ocorre uma tendência no retardamento do aumento da profundidade e a largura de desgaste, uma vez que o número de ciclos que a esfera realiza é menor para gerar o mesmo comprimento total.

Assim, quando o ensaio é realizado em materiais resistentes ao desgaste, é necessário um balanço entre carga, frequência e comprimento da trilha para que seja gerada uma trilha de desgaste com bordas bem definidas, permitindo uma avaliação correta da área de desgaste. Cargas reduzidas requerem maior frequência para um mesmo comprimento de desgaste, por exemplo.

#### 4.4.3 Relação do coeficiente de atrito estático e dinâmico no desgaste

No aspecto das interações das variáveis de entrada com os coeficientes de atrito estático e dinâmico, observa-se na Figura 14 seus respectivos comportamentos.

**Figura 14 - Influência das variáveis de entrada no coeficiente (a) estático e (b) dinâmico**



Fonte: Autoria própria, 2022.

O CoF de atrito estático e o dinâmico são correlacionados, pois os ensaios tratam-se de uma esfera que percorre uma trilha de forma recíproca, onde há presença de ambos os coeficientes. Como ocorre essa transição de movimento iminente e movimento corrente, expressados pelo coeficiente estático e dinâmico, frequentemente é difícil distinguir um do outro, desta forma são avaliados de forma conjunta (MERIAM; KRAIGE; BOLTON, 2022).

Observa-se nos gráficos (Figura 14 a, d) que com o aumento da carga de 5 N para 10 N ocorreu um decaimento de ambos os coeficientes de atrito. Essa relação pode estar atrelada às mudanças na superfície do material, pois com o aumento da carga há uma tendência ao desgaste mais severo, e com isto pode haver maior ocorrência do desgaste abrasivo além de desgaste adesivo. Um exemplo disso pode ser a degradação da camada de óxido na superfície de um material mais rapidamente, agindo assim como um lubrificante e diminuindo o coeficiente de atrito.

O comportamento da frequência nos gráficos (Figura 14 c, f) difere do visto na carga (Figura 14 a, d), pois com o seu aumento de 1 Hz para 2 Hz a relação com os coeficientes de atrito também aumenta. Isto pode estar atrelado ao aumento da temperatura, podendo gerar óxidos e ocasionando mudanças físicas e químicas na trilha de desgaste, e assim, mudar sua rugosidade e aumentar os coeficientes de atrito.

Já os gráficos (Figura 14 b, e) mostram que o comprimento de deslizamento não tem correlação com o CoF, ou seja, independente do comprimento de desgaste os valores do CoF se mantêm.

Entende-se que os coeficientes de atrito não possuem uma divergência significativa dentro da faixa analisada, logo independente da variação de entrada que houver, não terá relação significativa entre os coeficientes de atrito. Dessa forma, se o objetivo de um ensaio tribológico é apenas definir os CoF estático ou dinâmico, as variáveis de entrada e sua correlação não apresentarão influência.

O estudo realizado por Antonietto e Piana (2019), observou que em ensaios de riscamento único em duas ligas de aço inoxidável, 316L e Inconel 718, o efeito combinado de variáveis entrada na perspectiva de aumento e redução das variáveis de saída, pouco influenciaram nas forças tangenciais e no coeficiente de atrito. Também nos experimentos de mesmo material, porém com aumento linear da carga, o comprimento de deslizamento não influenciou no coeficiente de atrito. Isto significa

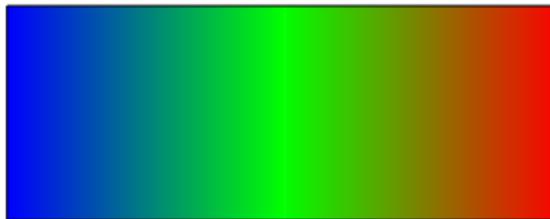
que a depender da natureza dos materiais do tribossistema, a carga pode ou não influenciar os modos de desgaste ou condições da superfície e desta forma, alterar os valores de CoF.

#### 4.5 Perspectiva do desgaste pelo gráfico de contorno

Levando em consideração o comportamento relatado nas seções 4.4.1 e 4.4.2, observou-se através do gráfico de contorno as interações das duas maiores variáveis de entrada na taxa de desgaste, profundidade e largura de desgaste. Ressaltando que a variável de entrada com menor influência tem representação intermediária no gráfico.

As linhas que cortam o gráfico indicam os valores dos resultados obtidos nos ensaios. A sua inclinação indica que o quanto mais próximo de 45° maior é a proporcionalidade da influência das variáveis de entrada no resultado. As cores representam de forma visual a intensidade da severidade de desgaste, conforme indicado na escala da Figura 15.

**Figura 15 - Representação da severidade de desgaste através das cores**



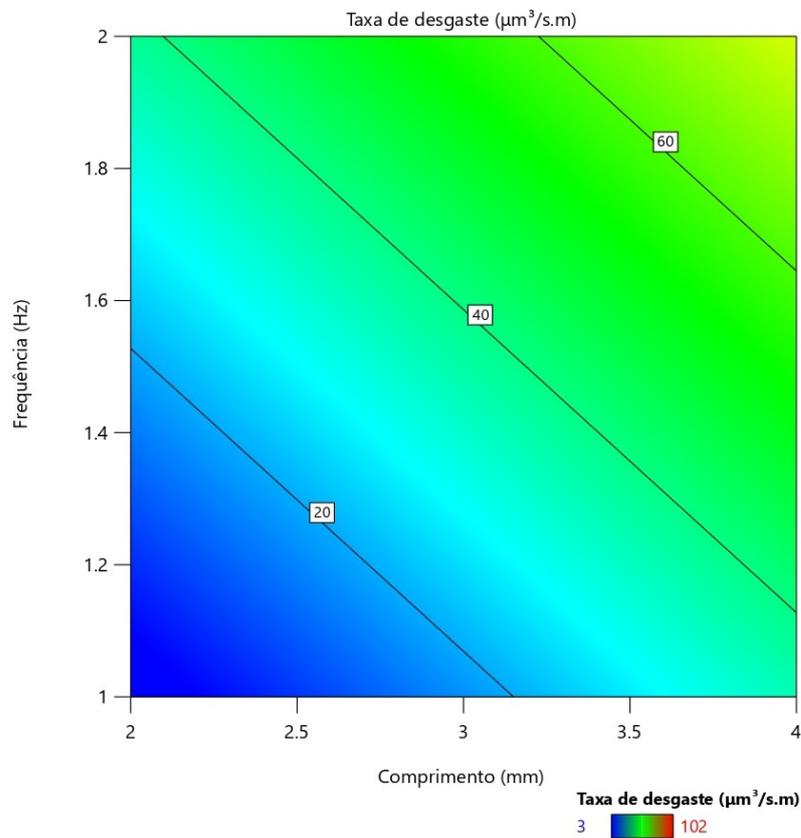
**Fonte: Autoria própria, 2022.**

Portanto, os tons de cores mais frias (azul) indicam um desgaste com severidade mais amena, cores em tons de verde representam uma severidade intermediária e, cores em tons mais quentes (vermelho) indicam uma maior severidade do desgaste.

#### 4.5.1 Relação com a taxa de desgaste

O gráfico de contorno apresentado na Figura 16, descreve a taxa de desgaste influenciada pela interação da frequência e do comprimento de desgaste. A carga tem uma representação intermediária de 7,5 N. A taxa de desgaste tem um valor máximo ( $3 \mu\text{m}^3/\text{s.m}$ ) e mínimo ( $102 \mu\text{m}^3/\text{s.m}$ ) na remoção de material do aço DOMEX 700.

**Figura 16 - Superfície de contorno da taxa de desgaste em função da frequência e comprimento de desgaste, para uma carga de 7,5 N**



**Fonte: Autoria própria, 2022.**

Verificou-se detalhadamente que no decorrer do aumento da frequência e do comprimento de deslizamento há uma tendência significativa no aumento da taxa de desgaste.

Observou-se entre a linha 20  $\mu\text{m}^3/\text{s.m}$  e 40  $\mu\text{m}^3/\text{s.m}$  da taxa de desgaste, uma faixa onde a intensidade da severidade de desgaste passa do estado ameno para

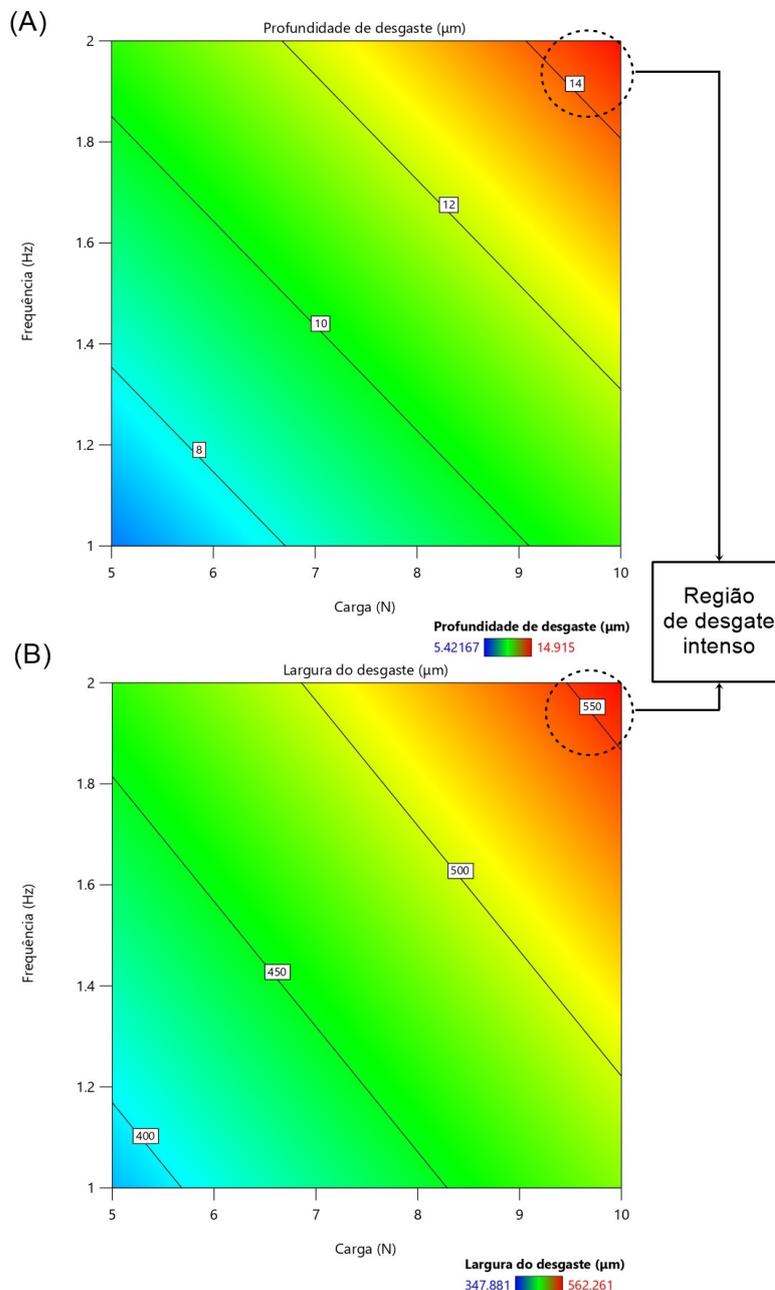
uma severidade intermediária, dessa forma ocorre uma tendência de em menos tempo desgastar mais aceleradamente o aço DOMEX 700.

Aumentando a frequência de 1 Hz para 2 Hz para um valor de comprimento de 2 mm, ou aumento do comprimento 2 mm para 4 mm e a frequência em 1 Hz, o regime da taxa de desgaste tem tons de verdes claros demonstrando uma precipitação ao desgaste com severidade intermediária. Porém, elevando-se o comprimento e a frequência aos seus maiores valores, efetivamente passa para uma severidade de desgaste intermediária demonstrado pela cor verde mais intensa.

#### 4.5.2 Relação com a profundidade e largura de desgaste

Conforme já foi observado nas análises apresentadas no item 4.4.2, a largura e a profundidade da trilha de desgaste apresentam uma singularidade devido ao formato do contra corpo. Assim, os gráficos de contorno são bastante similares. A Figura 17 descreve a relação entre a profundidade e a largura de desgaste influenciada pela interação carga e da frequência, o comprimento de deslizamento tem uma representação intermediária de 3 mm. Os valores máximos e mínimos das variáveis de saída podem ser observados na legenda ao lado do gráfico.

**Figura 17 - Superfície de contorno de (a) profundidade e (b) largura da trilha em função da carga e frequência, para comprimento de deslizamento de 3 mm**



**Fonte: Autoria própria, 2022.**

Pode-se observar que para menores valores de carga e frequência respectivamente 5 N e 1 Hz, a severidade no aumento das bordas e a penetração da esfera no corpo de prova é amena. Aumentando gradativamente somente o valor da frequência ou somente da carga, até atingir seus valores máximos, a severidade no aumento da largura e da profundidade não passa de uma intensidade intermediária.

Considerando que se deseja a obtenção de profundidade ou largura de trilha na faixa vermelha, por exemplo, onde as bordas da trilha são bem definidas e facilitam a medição de área de desgaste. Torna-se necessário que ocorra a combinação entre carga e frequência nos valores máximos dos ensaios realizados, 10 N e 2 Hz, respectivamente. Nesse caso, a profundidade e largura de desgaste atingem valores destacados na faixa em tons de vermelho da Figura 17 (a, b), indicando maior severidade na remoção de material por influência da carga e frequência de deslizamento.

Bernardes e Cozza (2020), analisaram o comportamento tribológico do aço inoxidável austenítico ASTM F138 com tratamento superficial, e observaram que com o aumento da frequência (88 Hz a 350 Hz) ocorreu um aumento na resistência ao desgaste, influenciando assim diretamente na largura e profundidade da trilha. Neste caso, com o aumento gradativo da frequência pode haver também o aumento da temperatura, a qual tem influência direta em vários aspectos do desgaste da trilha, com por exemplo, na rugosidade do material assim aumentando o desgaste por abrasão, perdas ou ganho de massa, formação de óxidos na superfície, entre outros. Essas análises vão além do escopo deste trabalho, entretanto, que devem ser considerados para seleção de parâmetros adequados de ensaio.

A faixa de frequência analisada nesse estudo ocasionou alterações na resistência ao desgaste, do aço DOMEX 700. Possivelmente, óxidos que podem ter sido gerados na superfície do aço DOMEX promovam aumento no CoF dinâmico, passando de 0,442 para 0,508 (com carga 10 N e comprimento 4 mm) quando a frequência passou de 1 para 2 Hz, respectivamente. Isso gerou um impacto na taxa de desgaste, que passou de 38,4 para 85,33  $\mu\text{m}^3/\text{s.m}$ .

A variação da taxa de desgaste na trilha foi de forma crescente quando variada a frequência e o comprimento de deslizamento aos seus maiores valores de forma alternada ou conjunta. Entretanto, não ocorreu variação significativa do regime de severidade, assim, gerando resultados dentro de um regime de severidade intermediária. Porém, para melhor caracterização do desgaste no aço DOMEX 700, deve se obter uma severidade intensa, indicado pelos maiores valores de carga e frequência, 10 N e 2 Hz respectivamente, como na análise da profundidade e largura de desgaste.

## 5 CONCLUSÃO

A matriz fatorial elaborada pelo estudo permitiu compreender o comportamento do desgaste no aço DOMEX 700, sendo possível analisar as interações das variáveis entrada com as variáveis saída, assim podendo obter resultados observáveis.

Os ensaios tribológicos indicaram que variações da carga, frequência e comprimento de deslizamento tem influência na taxa de desgaste no aço DOMEX 700. A frequência de deslizamento, dentro da faixa analisada, apresentou-se como parâmetro que mais influencia a taxa de desgaste do aço DOMEX 700.

Em relação a profundidade e a largura da trilha de desgaste, observou-se que há uma correlação direta entre essas duas variáveis de saída, devido ao formato esférico do contra corpo. Para gerar trilhas com contorno bem definido, o que facilita a análise da área de desgaste nos ensaios tribológicos, deve-se combinar a carga e a frequência, 10 N e 2 Hz respectivamente, para se obter maior área e volume de desgaste. Notou-se também que ocorreu uma tendência de redução do volume de desgaste em relação a profundidade e largura devido ao aumento do comprimento de deslizamento.

A respeito dos coeficientes de atrito, verificou-se que alterações na carga e frequência levam a modificações no coeficiente de atrito, como foi o caso do aço DOMEX 700. A respeito do comprimento de deslizamento ocorreu uma neutralidade, ou seja, não ocorreu influência considerável no comportamento do coeficiente de atrito.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar os ensaios utilizando composto central para uma melhor análise fatorial;
- Utilização de lubrificante nos ensaios para efeito comparativo;
- Utilizar uma liga de aço de menor resistência que o aço DOMEX 700 para efeitos comparativos;
- Realizar análises microscópicas para a caracterização dos mecanismos de desgastes presentes para uma melhor compreensão dos resultados obtidos;
- Caracterizar os óxidos formados na trilha para melhor compreender as mudanças no coeficiente de atrito.

## REFERÊNCIAS

ACCADROLLI, A. **Análise de desgaste de materiais aplicados em ferramentas de forjamento a frio**. 2020. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2020. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/218610/001122846.pdf?sequence=1>. Acesso em: 12 jun. 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G133-05**: standard test method for linearly reciprocating ball-on-flat sliding wear. ASTM G133-05, 2016.

ANTONIETTO, D. G; PIANA, B. **Efeito combinado de variáveis operacionais no ensaio de riscamento nas ligas de aço inoxidável 316L e Inconel 718**. Trabalho de Conclusão De Curso – Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Curitiba, 2019. Disponível em: [https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10604/1/CT\\_DAMEC\\_2019\\_1\\_17.pdf](https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10604/1/CT_DAMEC_2019_1_17.pdf). Acesso em: 20 nov. 2022.

BARBOSA, L. M. **Ortomicrotribômetro**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/22500>. Acesso em: 22 nov. 2022.

BERNARDES, G. V. R; COZZA, R. C. Comportamento tribológico do aço inoxidável austenítico ASTM F138. **X Simpósio de Iniciação Científica, Didática e de Ações Sociais da FEI**. São Bernardo do Campo, 2020. Disponível em: [https://fei.edu.br/sites/artigos\\_sicfei\\_2020/004\\_SICFEI2020\\_ARTIGO.pdf](https://fei.edu.br/sites/artigos_sicfei_2020/004_SICFEI2020_ARTIGO.pdf). Acesso em: 22 jun. 2022.

COLLINS, J. A. **Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas**. Grupo GEN, 2ª edição. 2019. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521636243/>. Acesso em: 12 jun. 2022.

DURANGO, D. A. Z. **Influência da temperatura, velocidade e força no desgaste e no coeficiente de atrito de materiais para válvulas e sedes de válvulas de motores flex-fuel**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3151/tde-18012017-141613/publico/DeissonAlexanderZuletaDurangoCorr16.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2022.

ELLWANGER, D. **Análise de desempenho tribológico de lubrificantes automotivos em ensaio de escorregamento metal-metal**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2021. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/223579/001126999.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 12 jun. 2022.

GAHR, K. H. Z. **Microstructure and Wear of Materials**. Elsevier, 1 ed, p. 80 -107. Amsterdam, 1987.

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO. Vanádio. **Grupo de Produção de Conteúdos de Química**. 2008. Disponível em: <http://e-escola.tecnico.ulisboa.pt/topico.asp?id=547&ordem=6#:~:text=A%20maior%20parte%20do%20van%C3%A1dio,vibra%C3%A7%C3%A3o%20e%20a%20temperaturas%20elevadas>. Acesso em: 12 jun. 2022.

IVANISKI, T. H. et al. Influência do atrito em ensaio de estiramento biaxial Erichsen do aço DP600 analisado pelo método de elementos finitos. **Tecnologia em metalurgia, materiais e mineração**, vol.15, n4, p.449-457, 2018. Disponível em: <https://www.tecnologiammm.com.br/doi/10.4322/2176-1523.20181471>. Acesso em: 12 jun. 2022.

HIBBELER, R. C. **Estática - Mecânica para Engenharia**. Pearson Education do Brasil, 12ª ed. São Paulo, 2010.

HANDRIK, M. et al. Analysis of stress and strain of fatigue specimens localised in the cross-sectional area of the gauge section testing on bi-axial fatigue machine loaded in the high-cycle fatigue region. **Procedia Engineering**, v.177, p. 516-519, 2017. ISSN 1877-7058. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.254>. Acesso em: 12 jun. 2022.

JUNIOR, M. M.O. **Efeito de partículas de desgaste no comportamento tribológico de metais**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/20941/3/EfeitoParticulasDesgaste.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2022.

JÚNIOR, R. S. et al. Estudo comparativo do desgaste abrasivo por rejeito do carvão mineral na calha de direcionamento utilizando aço inoxidável, aço domex e o polímero UHWM. **V Congresso Brasileiro De Carvão Mineral**. Criciúma, 2017. Disponível em: <http://www.swge.inf.br/ANAIS/CBCM2017/PDF/CBCM2017-0136.PDF>. Acesso em: 12 jun. 2022.

MAZUR, M. et al. The structure and mechanical properties of Domex 700 MC steel. **Communications-Scientific letters of the University of Zilina**, v. 15, n. 4, p. 54-57, 2013. Disponível em: <http://komunikacie.uniza.sk/index.php/communications/article/view/710>. Acesso em: 12 jun. 2022.

MENDANHA, B; CÂMARA, M. Análise da influência da rugosidade superficial (Ra) sobre aspectos tribológicos: deslizamento de pino de metal duro (WC-Co) sobre aço ABNT 4340 segundo a norma ASTM G99-05. **Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. Joinville, 2017. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/319994910\\_ANALISE\\_DA\\_INFLUENCIA\\_DA\\_RUGOSIDADE\\_SUPERFICIAL\\_Ra\\_SOBRE\\_ASPECTOS\\_TRIBOLOGICOS\\_DE\\_SLIZAMENTO\\_DE\\_PINO\\_DE\\_METAL\\_DURO\\_WC-Co\\_SOBRE\\_ACO\\_ABNT\\_4340\\_SEGUNDO\\_A\\_NORMA\\_ASTM\\_G99-05](https://www.researchgate.net/publication/319994910_ANALISE_DA_INFLUENCIA_DA_RUGOSIDADE_SUPERFICIAL_Ra_SOBRE_ASPECTOS_TRIBOLOGICOS_DE_SLIZAMENTO_DE_PINO_DE_METAL_DURO_WC-Co_SOBRE_ACO_ABNT_4340_SEGUNDO_A_NORMA_ASTM_G99-05). Acesso em: 12 jun. 2022.

MERIAM, J. L.; KRAIGE, L. G.; BOLTON, J. N. **Mecânica para Engenharia: Estática**. Grupo GEN, 9 ed. 2022. Disponível em:

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521638070/>. Acesso em: 12 jun. 2022.

MORAES, A. G. **Estudo da eficácia da vibração ressonante no alívio das tensões residuais e nas propriedades das juntas soldadas do aço domex 700mc**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2020. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/215318/001119570.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 12 jun. 2022.

MUTHUKUMARAN, S. et al. Parametric effect and taguchi optimization of cryogenic treatment of strenx steel, **Materials Today: Proceedings**, 2022. ISSN 2214-7853. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.017>. Acesso em: 12 jun. 2022.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Grupo A, 2010. 9788577807130. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788577807130/>. Acesso em: 12 jun. 2022.

PABLO, J. P. **Avaliação da resistência ao desgaste a seco e em meio salino de um revestimento de WC-12CO obtido por HVOF**. Dissertação (Mestrado) – Instituto Politécnico de Setúbal, 2019. Disponível em: [https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/31386/1/Joao\\_Pablo\\_120266022.pdf](https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/31386/1/Joao_Pablo_120266022.pdf). Acesso em: 12 jun. 2022.

PLESHA, M; GRAY, G. L; COSTANZO, F. **Mecânica para Engenharia**. Grupo A, 2014. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788565837309/>. Acesso em: 12 jun. 2022.

RADLIŃSKI, W. Comparison of properties of welded joint of steel domex 700 Mc and alform 700 M. **Welding Technology Review**, v. 86, n. 9. 2014. Disponível em: <http://pspaw.pl/index.php/pspaw/article/view/84/83/>. Acesso em: 12 jun. 2022.

RAGURAMAN, D. et al. Analyze the effect of abrasives in water jet Machining on strenx steel. **Materials Today: Proceedings**, 2022. ISSN 2214-7853. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.894>. Acesso em: 12 jun. 2022.

RASHID, M. S. High-strength, low-alloy steels. **SCIENCE**, v. 208, 1980.

ROMAN, A; GASPARIN, A. L. Comportamento de Desgaste de um Material de Atrito com a Adição de Fibra de Aço. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v.6, n. 3, p. 19-24, 2021. Disponível em: <http://www.revistas.poli.br/index.php/repa/article/view/1451/748>. Acesso em: 12 jun. 2022.

SERRANO, R. O. P. et al. Desgaste do rotor por abrasão: o efeito do bombeamento de água bruta com diferentes cargas de sedimento. **XXVII Congresso Latinoamericano de Hidráulica**. 2016. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/327680496\\_DESGASTE\\_DO\\_ROTOR\\_PO\\_R\\_ABRASAO\\_O\\_EFEITO\\_DO\\_BOMBEAMENTO\\_DE\\_AGUA\\_BRUTA\\_COM\\_DIFERENTES\\_CARGAS\\_DE\\_SEDIMENTO?enrichId=rgreq-4c21c86dd8504801d0d5488df8b8f9cd-](https://www.researchgate.net/publication/327680496_DESGASTE_DO_ROTOR_PO_R_ABRASAO_O_EFEITO_DO_BOMBEAMENTO_DE_AGUA_BRUTA_COM_DIFERENTES_CARGAS_DE_SEDIMENTO?enrichId=rgreq-4c21c86dd8504801d0d5488df8b8f9cd-)

XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdiOzMyNzY4MDQ5NjtBUzo2NzE1Mjc5MzQ2MzE5NDIAMTUzNzExNjE0NDMwNg%3D%3D&el=1\_x\_2&\_esc=publicationCoverPdf. Acesso em: 12 jun. 2022.

SERRANO, R. O. P. **Metodologia para avaliação de desgaste abrasivo em pás de rotor de bombas centrífugas de estação elevatória**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017. Disponível em: [https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-AVSKS6/1/d160\\_mecanica\\_serrano\\_r\\_o\\_p.docx.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-AVSKS6/1/d160_mecanica_serrano_r_o_p.docx.pdf). Acesso em: 12 jun. 2022.

SILVA, B. G. G. **Análise de desgaste empregando um tribômetro roda de borracha desenvolvido na UTFPR-CP**. Trabalho de Conclusão De Curso – Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Cornélio Procópio, 2016. Disponível em: [http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/7266/2/CP\\_COEME\\_2016\\_2\\_06.pdf](http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/7266/2/CP_COEME_2016_2_06.pdf). Acesso em: 12 jun. 2022.

SILVA, E. M; CURI, E. I. M Projeto de um tribômetro linear recíproco utilizando conceito de análise de falha e simulação pelo método de elementos finitos. **SATC – Educação e Tecnologia**. 2018. Disponível em: <http://repositorio.satc.edu.br/bitstream/satc/350/2/TCC II - Oficial rev5.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2022.

SIMONOVIC, M. DZUNIC, D. MITROVIC, S. Testing of wear in contact with Strenx 700 and autofretted steel. **Journal of Production Engineering**, v. 23, p. 11-14. 2020.

SOARES, G. G. **Caracterização da junta dissimilar em solda de materiais do tipo estrutural e ARBL**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2015. Disponível em: <http://tede.upf.br/jspui/bitstream/tede/378/1/2015GiacomoGaiSoares.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2022.

SSAB. **Strenx 700MC D/E**. 2017. Disponível em: <https://www.ssab.com/api/sitecore/Datasheet/GetDocument?productId=961589BF607D44A6869FCC20CDC8D0D2&language=pt-BR>. Acesso em: 12 jun. 2022.

SUSKI, C. A. **Estudo do efeito de tratamentos e revestimentos superficiais na vida de ferramentas de conformação mecânica à frio**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/87073/212040.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 12 jun. 2022.

STACHOWIAK, G. W. BATCHELOR, A. W. STACHOWIAK, G. B. **Experimental methods in tribology**. Editora Academic Press, Elsevier. 2004.

STACHOWIAK, G. W. BATCHELOR, A. W. **Engineering tribology**. Editora Academic Press, Elsevier. 2005.

TEIXEIRA, K. D. **Influência da velocidade de deslizamento no desgaste do par tribológico ferro fundido cinzento (MC 12 E MC 13) – ferro fundido cinzento centrifugado**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2011. Disponível em:

[https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/94464/teixeira\\_kd\\_me\\_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/94464/teixeira_kd_me_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em: 12 jun. 2022.

TRAVI, L. **Análise do desgaste na interface do aço rápido AISI M2 nitretado a plasma formando pares tribológicos com materiais metálicos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/153260/001014070.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 12 jun. 2022.

TRŠKO, L. et al. Microstructure and residual stress analysis of Strenx 700 MC welded joint. **Production Engineering Archives**, v. 26, n.2, p.41-44, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.30657/pea.2020.26.09>. Acesso em: 12 jun. 2022.

TTP INDÚSTRIA MECÂNICA LTDA. **Tribo 1 tutorial**. 2020. Disponível em: <https://ttp.ind.br/tribo/manual/intro.html>. Acesso em: 12 jun. 2022.

ULEWICZ, R. SZATANIAK, P. NOVY, F. Possibilities of application of modern fine-grained steels for the production of car semitrailers. **Scientific Papers Of the University of Pardubice**. 2014. Disponível em: [https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/64791/UlewiczR\\_PossibilitiesOfApplication\\_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/64791/UlewiczR_PossibilitiesOfApplication_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em: 12 jun. 2022.

VORKOV, V. GARCÍA, A. T. DUFLOU, J. R. Bending Parameters in Heat Assisted Air Bending of High Strength Steels. **Procedia Manufacturing**, v. 47, p. 1314-1318, 2020. ISSN 2351-9789. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.250>. Acesso em: 12 jun. 2022.