

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DOUGLAS GROSSKO

RENATA GROSSKO

**RESISTÊNCIA AO DESGASTE DO AÇO DOMEX 700 ENRIQUECIDO COM
NIÓBIO**

GUARAPUAVA

2022

DOUGLAS GROSSKO

RENATA GROSSKO

**RESISTÊNCIA AO DESGASTE DO AÇO DOMEX 700 ENRIQUECIDO COM
NIÓBIO**

Wear resistance of DOMEX 700 steel enriched with niobium

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

Orientador: Prof^a. Dr^a. Viviane Teleginski Mazur

GUARAPUAVA

2022



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

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

DOUGLAS GROSSKO

RENATA GROSSKO

**RESISTÊNCIA AO DESGASTE DO AÇO DOMEX 700 ENRIQUECIDO COM
NIÓBIO**

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

Orientador: Prof^a. Dr^a. Viviane Teleginski Mazur

Data de aprovação: 01 de dezembro de 2022.

Viviane Teleginski Mazur

Doutorado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Sílvia do Nascimento Rosa

Doutorado em Engenharia Mecânica

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Marilei de Fátima Oliveira

Doutorado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

GUARAPUAVA

2022

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a nossa orientadora Prof^a. Dr^a. Viviane Teleginski Mazur, pela sabedoria, paciência e perseverança que nos guiou nesta trajetória.

A Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), pelo uso laboratório de Plasma.

Ao Prof. Dr. Mauricio Mazur, pela deposição à plasma do Nióbio.

Aos colegas de laboratório.

E à minha família, que possibilitou concluir esse desafio.

Enfim, a todos que de maneira direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

O aço DOMEX, possui alta resistência e baixa liga, por isso pode ser utilizado em substituição ao aço carbono em equipamentos e maquinários industriais, que apresentam grande perda de material ao serem expostos a força de atrito, gerando assim altos custos para a indústria. Este trabalho tem como objetivo analisar por meio da tribologia a resistência ao desgaste do aço DOMEX 700MC, após receber um revestimento a base de nióbio, que mostra maior resistência a corrosão e a altas temperaturas. Foram realizados ensaios em tribômetro linear recíproco em um grupo amostral, para estimar como o aço DOMEX reage ao desgaste de material em determinadas situações em que foi exposto ao Nb. Os ensaios demonstraram que os filmes finos de Nb no aço DOMEX com a técnica PMS reduziu em 10% o coeficiente de atrito dinâmico, com um aumento de apenas 2% na dureza. Os resultados indicam que a melhor condição analisada foi MB+Nb+CS, dado que, apresentou os menores valores de coeficiente de atrito, e por conseguinte, uma melhor resistência ao desgaste.

Palavras-chave: DOMEX; nióbio; tribologia; desgaste.

ABSTRACT

DOMEX steel has high strength and low alloy, so it can be used to replace carbon steel in industrial equipment and machinery, which have a great loss of material when exposed to frictional force, thus generating high costs for the industry. The objective of this work is to analyze the wear resistance of DOMEX 700MC steel by means of tribology, after receiving a niobium-based coating, which shows greater resistance to corrosion and high temperatures. Tests were carried out in a reciprocal linear tribometer in a sample group, to estimate how DOMEX steel reacts to material wear in certain situations in which it was exposed to Nb. The tests showed that the thin films of Nb on DOMEX steel with the PMS technique reduced the coefficient of dynamic friction by 10%, with an increase of only 2% in hardness. The results indicate that the best analyzed condition was MB+Nb+CS, given that it presented the lowest friction coefficient values, and therefore, better wear resistance.

Keywords: DOMEX; niobium; tribology; wear.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Micrografia do aço DOMEX 700.....	12
Figura 2. Representação de um tribossistema.....	14
Figura 3. Exemplo de tribômetros mais comuns.....	15
Figura 4. Desenho esquemático de um tribômetro linear típico, segundo a norma ASTM G133.	16
Figura 5. Desenho esquemático do mecanismo de desgaste adesivo.	18
Figura 6. Desenho esquemático do mecanismo de desgaste abrasivo.	19
Figura 7. Desenho esquemático do mecanismo de desgaste por fadiga.....	20
Figura 8. Desenho esquemático do mecanismo de desgaste corrosivo.	20
Figura 9. Diferentes situações de desgaste. (A) Apenas a esfera se desgasta. (B) Apenas a amostra plana se desgasta. (C) A esfera e a amostra se desgastam.	21
Figura 10. Organograma dos processos de posição por plasma.	25
Figura 11. (A) Representação esquemática do processo de <i>sputtering</i> . (B) Esquemático das etapas do processo de formação de um filme de revestimento contínuo.	26
Figura 12. Tribômetro utilizado nos ensaios de desgaste.....	30
Figura 13. Rugosímetro Mitutoyo SJ-410, utilizado nas análises de perfil.	31
Figura 14. Microdurômetro Digimess.	32
Figura 15. Curvas do coeficiente de atrito estático de um ensaio de cada amostra.	33
Figura 16: Curvas do coeficiente de atrito dinâmico de um ensaio de cada amostra.	34
Figura 17. Dureza Vickers em função do tipo de material analisado.....	36
Figura 18. Trilhas de desgaste, obtidas através dos ensaios de desgaste por deslizamento linear recíproco. (A) MB+CS. (B) MB. (C) MB+Nb.	37
Figura 19. Volume de desgaste obtido através do ensaio de deslizamento.	38
Figura 20. Valores da taxa de desgaste e coeficiente de desgaste.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição química do aço DOMEX 700 MC.....	11
Tabela 2. Propriedades mecânicas do aço S700MC à temperatura ambiente. ..	12
Tabela 3. Nomenclaturas e a descrição das amostras.	29
Tabela 4. Parâmetros dos ensaios de desgaste	30
Tabela 5: Coeficiente de atrito.	34
Tabela 6. Resultados de coeficiente de atrito, volume de desgaste, taxa de desgaste, coeficiente de desgaste e dureza para as amostras analiadas.	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CS	Cordão de Solda
PVD	Deposição Física de Vapores
CVD	Deposição Química de Vapores
HSLA	<i>High Strength Low Alloy</i>
MB	Material Base
PMS	<i>Plasma Magnetron Sputtering</i>
STLE	Sociedade de Tribologistas e Engenheiros de Lubrificação
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
IUPAC	União Internacional de Química Pura e Aplicada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS	10
1.1.1 Objetivo Geral	10
1.1.2 Objetivos Específicos.....	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 AÇO DOMEX 700MC	11
2.2 NIÓBIO	13
2.3 TRIBOLOGIA	13
2.3.1 Tribômetro de Deslizamento Linear Recíproco.....	15
2.4 DESGASTE	16
2.4.1 Volume de Desgaste	21
2.5 COEFICIENTE DE ATRITO.....	23
2.6 DUREZA VICKERS	24
2.7 REVESTIMENTOS DEPOSITADOS À PLAMA	24
2.7.1 Pulsed Magnetron Sputtering.....	25
2.7.2 Processo Duplo de Deposição de Revestimento	27
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1 MATERIAIS	29
3.2 MÉTODOS.....	30
3.2.1 Ensaio de desgaste por deslizamento	30
3.2.2 Cálculo do volume de desgaste	31
3.2.3 Dureza	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1 ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE ATRITO.....	33
4.2 DUREZA DA SUPERFÍCIE	36
4.3 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO DESGASTE	37
5 CONCLUSÕES	41
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	42
REFERÊNCIAS.....	43

1 INTRODUÇÃO

Os componentes e equipamentos industriais, podem perder sua utilidade mediante uma série de mecanismos, dentre os principais estão: obsolescência, quebra, corrosão e desgaste (MIELCZARSKI, 2015). A tribologia, é a ciência que estuda a interação entre superfícies em movimento relativo, bem como, o estudo do comportamento do desgaste, atrito e lubrificação dos materiais em um sistema (SINATORA, 2005).

O material perdido nos equipamentos mecânicos, decorrentes do atrito e desgaste, podem somar custos altíssimos, podendo custar bilhões de dólares à indústria e aos consumidores a cada ano (EMERIM; CURI, 2018; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013; STLE, 2022). Além disso, estima-se que nas últimas décadas o potencial de perdas econômicas devido ao desgaste tenha aumentado proporcionalmente ao crescimento da produção industrial (MIELCZARSKI, 2015). Segundo a Sociedade de Tribologistas e Engenheiros de Lubrificação (STLE), o impacto econômico e comercial da tribologia é extenso. Ademais, metodologias tribológicas adequadas podem gerar economias de 1,3 a 1,6 % do produto interno bruto produzido por um país, isto é, uma economia de centenas de bilhões de dólares (STLE, 2022). Não obstante, o movimento das superfícies de dois sólidos, uma sobre a outra, é uma ação que pode impactar o correto funcionamento de inúmeras atividades mecânicas (EMERIM; CURI, 2018).

Para mitigar os efeitos do desgaste nos mais diversos setores, estudos envolvendo tratamentos de superfície, como, o método de plasma pulsado *magnetron sputtering*, tem mostrado resultados significativos de proteção contra este fenômeno (KELLY; ARNELL, 2000).

Ligas de aço de alta resistência e baixa liga, como é o caso do aço DOMEX 700MC, foram desenvolvidas com o intuito de substituir os aços carbonos em aplicações estruturais (ANDRADE, 2018; JESUS et al., 2021). Entretanto, esses aços apresentam ainda, o potencial de terem o desempenho em desgaste ampliado ao serem combinados com tratamentos de superfície utilizando revestimentos com materiais protetivos.

O nióbio é um material com este potencial (LEITE; MARQUES, 2009; SANTANA, 2017), além de ser abundante no Brasil, o qual, produz mais de 95% do

metal consumido no mundo, e inclusive detém aproximadamente 98% da reserva mundial, é um elemento químico adicionado em diversos tipos de ligas e superligas, as quais são empregadas na indústria automobilística, naval, aeroespacial, etc. (BRUZIQUESI et al., 2019; SOUZA; FERNANDES; GUERRA, 2013).

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo, estudar a resistência ao desgaste do aço DOMEX 700MC, após receber um revestimento de nióbio depositado pelo método de *pulsed magnetron sputtering* e ser refundido com soldagem TIG para sua consolidação.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a resistência ao desgaste do aço DOMEX 700MC, após consolidação de revestimento de nióbio depositado por *pulsed magnetron sputtering* e refundido com soldagem TIG.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o comportamento tribológico do aço DOMEX sem e com revestimento, e após a etapa de consolidação do revestimento;
- Calcular a taxa de desgaste em função do volume removido de material;
- Estabelecer a correlação entre a dureza dos revestimentos e a taxa de desgaste.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção do trabalho, serão explanados os fundamentos teóricos referentes ao material, tribologia, tipos de desgaste e técnicas de revestimento.

2.1 AÇO DOMEX 700MC

Os aços de elevada resistência mecânica e baixa liga (*High Strength Low Alloy (HSLA)*), também conhecidos como aços de alta resistência microligados, possuem limites de escoamento de 420 a 800 MPa e são de 20 a 30% mais leves que o aço carbono nos respectivos níveis de resistência (SSAB, 2022).

O aço DOMEX 700MC, também chamado de Strenx 700MC é uma marca registrada da Siderúrgica SSAB, sendo sua nomenclatura e especificação descrita pela norma DIN EN 10149, designado como S700MC (JESUS et al., 2021; SSAB, 2017). A sigla MC, refere-se a uma gama de aços de alto limite elástico para conformação a frio, com boa soldabilidade e conformação (ANDRADE, 2018).

O DOMEX 700MC, é um aço estrutural laminado a quente para conformação a frio, que possui um limite de escoamento mínimo de 700 MPa para proporcionar estruturas mais resistentes e leves (SSAB, 2017). Este aço, apresenta baixo teor de carbono e pequenas adições de elementos de liga (manganês, carbono, silício, enxofre, fósforo, alumínio, nióbio, vanádio e titânio), os quais conferem-lhe uma maior resistência mecânica, tenacidade e soldabilidade (SOARES, 2015).

A composição química do DOMEX 700MC é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do aço DOMEX 700MC.

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Al (%)	Nb (%)	V (%)	Ti (%)
0,12	0,21	2,10	0,020	0,010	0,015	0,09	0,20	0,15

Fonte: Adaptado de Afhami (2018); SSAB (2017).

A Tabela 2, apresenta as propriedades mecânicas do DOMEX 700MC à temperatura ambiente.

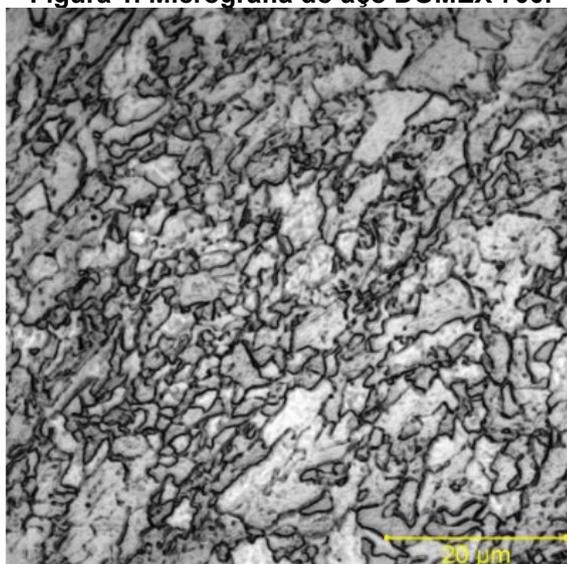
Tabela 2. Propriedades mecânicas do aço DOMEX 700MC à temperatura ambiente.

Espessura (mm)	Limite de escoamento (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento (min %)	Resistência ao impacto a -40 °C (J)
2-10	700	750-950	12	27

Fonte: Adaptado de Afhami (2018).

A microestrutura do aço DOMEX 700MC, é formada de uma matriz de grãos ferríticos finos, apresentando um diâmetro médio de grãos de 9 μm (ANDRADE, 2018). A Figura 1, demonstra a microestrutura do aço DOMEX 700, que basicamente é composta por uma matriz de grãos finos de ferrita (regiões de cinza claro) (BORKO; HADZIMA; JACKOVÁ, 2017).

Figura 1. Micrografia do aço DOMEX 700.



Fonte: Borko; Hadzima; Jacková (2017).

Os aços HSLA, são uma escolha econômica para aumentar as relações resistência-peso em comparação aos aços carbono convencionais. A substituição do aço carbono convencional pelo HSLA permite uma redução de peso ao serem utilizados em componentes estruturais, sem prejuízo a resistência mecânica necessária (AFKHAMI, 2018). Também, em função do fato de ser considerado um material leve e resistente, é imensamente utilizado na fabricação de guindastes, equipamentos de terraplanagem, e chassis de maquinários e automóveis (ANDRADE, 2018; JESUS et al., 2021).

2.2 NIÓBIO

O nióbio é um elemento químico de número atômico 41, com massa molar de $92,90638 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ (SOUZA; FERNANDES; GUERRA, 2013). Pertence à classe dos metais de transição do grupo 5 da tabela periódica, e foi descoberto por Charles Hatchett no ano de 1801, o qual, o nomeou como colúmbio. Contudo, foi somente em 1844, que este elemento foi realmente isolado pelo mineralogista e químico Heinrich Rose, que, o renomeou como colúmbio de nióbio. Esta duplicidade de denominação, durou até 1950, ano em que a União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC), definiu oficialmente o nome nióbio para o metal (BRUZIQUESI et al., 2019).

Ademais, o Nb é um sólido metálico, macio, dúctil, com coloração cinza (podendo adquirir coloração azulada quando exposto ao ar durante um longo período de tempo), e de elevado ponto de fusão ($2468 \text{ }^\circ\text{C}$), não obstante, é resistente à corrosão devido à formação de uma película superficial de óxido, chamada de camada de passivação (SOUZA; FERNANDES; GUERRA, 2013).

Mais de 80% do nióbio produzido é usado em ligas que vão desde aços estruturais até superligas, projetadas para suportar altas temperaturas em ambientes extremamente corrosivos e oxidantes, como nas aplicações da indústria automobilística, naval e aeroespacial, na construção civil e até em supercondutores (BRUZIQUESI et al., 2019; SOUZA; FERNANDES; GUERRA, 2013).

O uso de Nb no revestimento de superfícies de ligas metálicas objetiva a proteção contra o desgaste. Trabalhos da literatura tem demonstrado resultados positivos, ou seja, os revestimentos contendo Nb, tem demonstrado performance melhorada na resistência ao desgaste (LEITE; MARQUES, 2009; SANTANA, 2017).

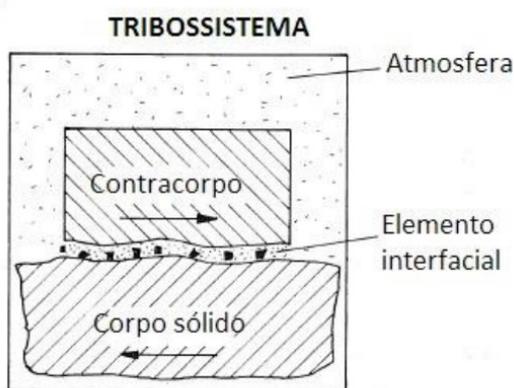
2.3 TRIBOLOGIA

A expressão tribologia foi idealizada por H. Peter Jost em um relatório para o Comitê do Departamento Britânico de Educação e Ciência, no ano de 1966, além do mais, Jost, defini o termo tribologia como: “A ciência e a tecnologia de superfícies interativas em movimento relativo e de assuntos e práticas relacionadas” (JOST, 1990). A tribologia reúne fundamentos das áreas da física, química, mecânica e

ciência dos materiais, com o objetivo de explicar e prever o comportamento de sistemas físicos que são utilizados em sistemas mecânicos (SINATORA, 2005).

Em suma, a tribologia não só é o estudo de superfícies que interagem em movimento relativo, mas inclui o estudo do comportamento do desgaste, atrito e lubrificação dos materiais em um sistema. Outrossim, pode-se definir um tribossistema como a associação de elementos que podem influenciar no comportamento tribológico, por exemplo: corpo sólido, contra corpo, elemento interfacial, e o meio (ALTERA, 2009; ATHAYDE, 2015; EMERIM; CURI, 2018; STLE, 2022). Conforme se pode observar pela Figura 2.

Figura 2. Representação de um tribossistema.



Fonte: Adaptado de Athayde (2015).

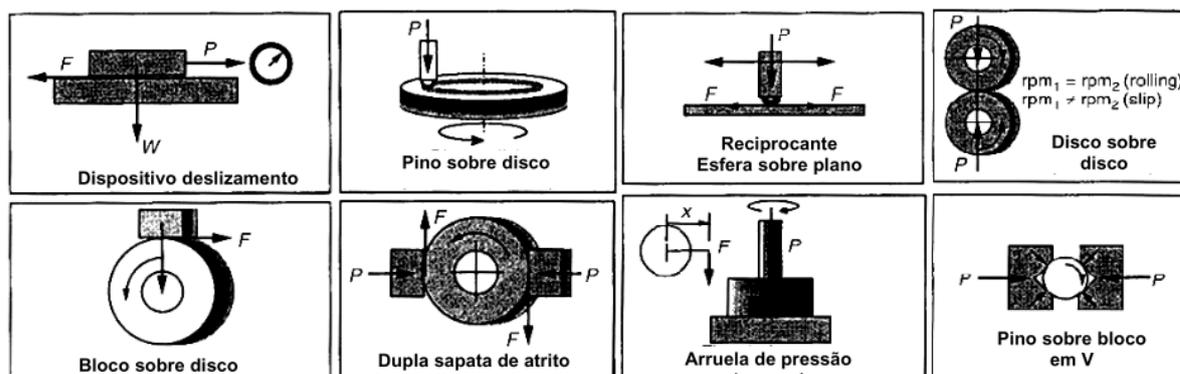
O movimento das superfícies de um sólido sobre a outra é uma operação imensamente importante para o correto funcionamento de inúmeras atividades mecânicas. O material perdido nos dispositivos mecânicos em operações, decorrentes do atrito e desgaste, podem somar bilhões de dólares. Por este motivo, o estudo da tribologia é fundamental para proporcionar qualquer redução no atrito ou no desgaste, e por sua vez, gerar uma economia (EMERIM; CURI, 2018; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013).

Uma das formas de testar o desempenho de um tribossistema é pela utilização de um tribômetro. O tribômetro é um equipamento versátil utilizado para medição de propriedades de atrito e desgaste de combinações de materiais e lubrificantes sob condições específicas, como velocidade, carga, temperatura e atmosfera (GREGÓRIO; SILVEIRA, 2018).

Segundo Chlum e colaboradores (2010), tribômetro é o equipamento que gera força e movimento relativo entre as amostras. Ademais, o instrumento deve conter interfaces para montagem de porta amostras e uma câmara ambiental, assim como, sensores para coleta de dados (CHLUM et al., 2010).

Os tribômetros que realizam ensaios de atrito e desgaste por deslizamento, podem ser classificados conforme a geometria de contato, logo, compõem uma ampla gama de modelos, dependendo da geometria de ensaio, tais como: dispositivo de deslizamento, pino sobre disco, esfera sobre plano, pino sobre bloco em V, entre outros (EMERIM; CURI, 2018). A Figura 3 ilustra os oito tipos mais comuns de tribômetros.

Figura 3. Exemplo de tribômetros mais comuns.



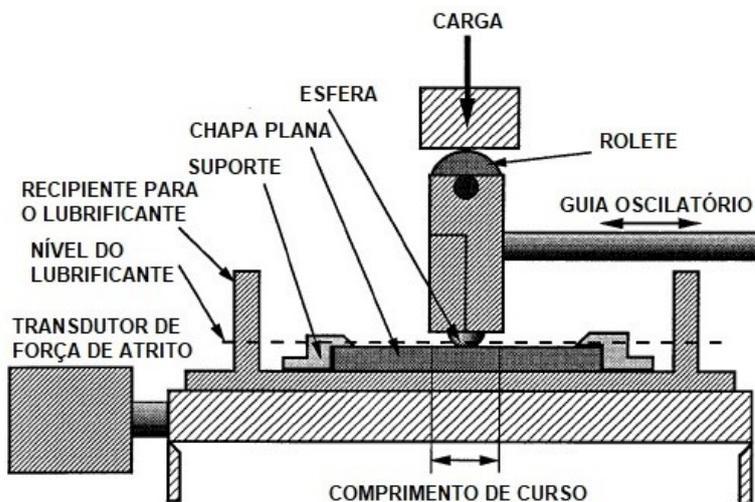
Fonte: Emerim; Curi (2018).

O presente trabalho, empregou o tribômetro de deslizamento linear recíproco na realização dos ensaios de desgaste, o qual, é descrito abaixo no item 2.3.1.

2.3.1 Tribômetro de Deslizamento Linear Recíproco

A Figura 4, demonstra o esquema e os principais componentes de um tribômetro linear típico, segundo a norma ASTM G133.

Figura 4. Desenho esquemático de um tribômetro linear típico, segundo a norma ASTM G133.



Fonte: Adaptado de Chlum *et al.* (2010).

A norma ASTM G133, define o tribômetro de deslizamento recíproco, o qual, consiste em um pino ou esfera que desliza para frente e para trás ao longo de um caminho linear sobre uma amostra de placa plana que está fixa na estrutura. Uma força deve ser aplicada para empurrá-la para dentro do corpo de prova plano. O aparelho é monitorado com instrumentos e/ou sensores que medem as forças, velocidade, temperatura, fim do curso e contabilizam as idas e voltas da esfera, e a partir do qual, o coeficiente de atrito é calculado (CHLUM *et al.*, 2010; EMERIM; CURI, 2018).

2.4 DESGASTE

O desgaste é um dano que cinge a perda progressiva de material, devido às interações dinâmicas de duas superfícies em contato, e é resultado do movimento relativo em relação às partes adjacentes de trabalho (JÚNIOR *et al.*, 2017; YAMASHITA, 2019). Muitos mecanismos podem estar envolvidos neste fenômeno, seja, separadamente ou concomitantemente, principalmente para os metais (YAMASHITA, 2019).

Por conseguinte, pode-se determinar que a resistência ao desgaste não é uma propriedade dos materiais, e sim, um comportamento complexo que depende da qualidade dos materiais em contato, e também de vários outros fatores, tais como, geometria de contato, pressão de contato, rugosidade da superfície, temperatura do

meio, velocidade de deslizamento e da presença, ou não, de um lubrificante (JÚNIOR et al., 2017).

Para Bayer (2002), o desgaste não se limita apenas à perda de materiais de uma superfície. Segundo o autor, o desgaste também pode ser definido pelo movimento do material sem alterações na geometria ou dimensão como resultado de uma deformação plástica. Igualmente, também considera-se como outra forma de desgaste, os danos que não resultam em perda de massa ou em alterações dimensionais, como, por exemplo, o desenvolvimento de fissuras em uma superfície (BAYER, 2002).

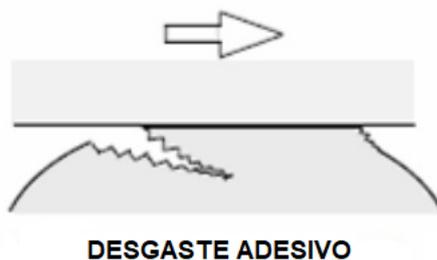
O processo de desgaste é a principal causa da perda de materiais e/ou propriedades mecânicas, portanto, qualquer atenuação que possa ser realizada com relação a esse fenômeno, pode produzir significativa economia (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013).

Todavia, um dos grandes desafios na solução dos problemas em relação ao desgaste é antecipar a forma e a intensidade com a qual eles ocorrem em um determinado componente. Assim, conhecer a intensidade do fenômeno, e a forma que ocorre o desgaste, permite eleger adequadamente o material para cada aplicação, uma vez que o desgaste depende não apenas do material mas sim do tribossistema no qual ele ocorre (LEITE et al., 2013).

O desgaste pode ocorrer por diversos modos. Os mecanismos de desgaste são descritos pelas mudanças complexas na superfície durante o movimento (YAMASHITA, 2019). Dessa forma, dentre os mecanismos de desgaste, pode-se apontar quatro formas principais, que são: desgaste adesivo, desgaste abrasivo, desgaste por fadiga, e desgaste corrosivo (RADI et al., 2007).

O desgaste adesivo ocorre quando a ligação adesiva entre as superfícies é suficientemente forte para resistir ao deslizamento, ilustrado na Figura 5 (RADI et al., 2007; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013).

Figura 5. Desenho esquemático do mecanismo de desgaste adesivo.



Fonte: Adaptado de Radi *et al.* (2007).

De acordo com Stolarski (1990), para que uma junção adesiva seja formada, as superfícies de interação devem estar em contato íntimo. Além disso, a força dessas junções depende em grande parte da natureza físico-química das superfícies de contato. Com isso, a formação de partículas de desgaste adesivo, é consequência de uma série de etapas bem definidas, quais sejam: (i) deformação das asperezas de contato; (ii) remoção dos filmes superficiais; (iii) formação da junção adesiva; (iv) falha das junções e transferência de material; (v) modificação de fragmentos transferidos; e (vi) remoção de fragmentos transferidos e criação de partículas soltas de desgaste (STOLARSKI, 1990).

Como resultado dessa adesão, uma deformação plástica é causada na região de contato gerando uma trinca que pode se propagar levando à geração de um terceiro corpo e a uma transferência completa de material (RADI *et al.*, 2007).

O desgaste abrasivo, conforme observado na Figura 6, ocorre quando há contato físico direto de uma superfície mais dura à outra superfície mais mole. Isto é, sob a ação de uma carga normal, as asperezas da superfície mais dura penetram à mais mole, produzindo deformações plásticas, e com cisalhamento o material mais mole é removido da superfície (ALVES, 2014).

Figura 6. Desenho esquemático do mecanismo de desgaste abrasivo.



Fonte: Adaptado de Radi et al. (2007).

Existe uma estreita relação entre as propriedades do material e a resistência ao desgaste abrasivo. Por exemplo, pode existir uma proporcionalidade direta entre a resistência relativa ao desgaste e a dureza Vickers, no caso de metais tecnicamente puros em estado recozido. Também, não só o tratamento térmico dos aços geralmente melhora sua resistência ao desgaste abrasivo, como também, existe uma relação linear entre resistência ao desgaste e dureza para materiais duros não metálicos. A capacidade do material resistir ao desgaste abrasivo é influenciada pela extensão do encruamento que pode sofrer, sua ductilidade, distribuição de tensão, anisotropia, e estabilidade mecânica (STOLARSKI, 1990).

Este tipo de desgaste é bastante comum nos aços e é considerado a forma mais grave. Na prática é o principal tipo de desgaste, sendo um dos mais intensos e responsável por 50% das causas de falhas das máquinas ou componentes. É encontrado com facilidade na indústria em peças com movimentos rotativos, possuindo especial importância nas atividades agrícolas, de transporte e de mineração (YAMASHITA, 2019).

O desgaste por fadiga, é caracterizado pela formação de trincas e lascamento de material, o qual é causado através de carregamentos cíclicos na superfície do sólido (Figura 7).

Figura 7. Desenho esquemático do mecanismo de desgaste por fadiga.



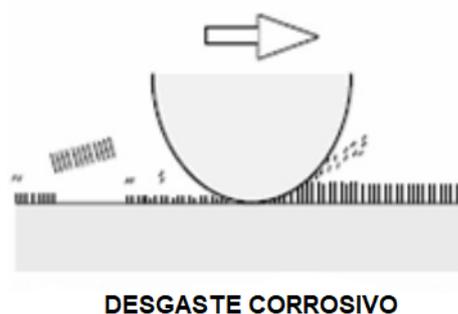
DESGASTE POR FADIGA

Fonte: Adaptado de Radi *et al.* (2007).

Esta forma de desgaste é ocasionada por ciclos de contato, ou seja, pelo alto número de repetições do mesmo movimento. As causas de desgaste por fadiga superficial não são progressivas, e acontecem de forma abrupta, de maneira que dificilmente pode ser previsto (ALTERA, 2009; YAMASHITA, 2019).

O desgaste corrosivo destrói o metal por meio da remoção mecânica da superfície (YAMASHITA, 2019). A Figura 8, ilustra este tipo de desgaste em meios corrosivos (líquidos ou gasosos). Neste mecanismo, são formados produtos de reação devido às interações químicas e eletroquímicas, conhecidas como reações triboquímicas, e com efeito, produzem uma intercamada na superfície que depois é removida (RADI *et al.*, 2007).

Figura 8. Desenho esquemático do mecanismo de desgaste corrosivo.



DESGASTE CORROSIVO

Fonte: Adaptado de Radi *et al.* (2007).

Stolarski (1990), descreve o desgaste corrosivo como o resultado de reações químicas induzidas pelo atrito, que por sua vez, é influenciado principalmente pelo ambiente e sua interação ativa com os materiais em contato. Uma sequência de dois eventos que levam à criação de partículas de desgaste. Primeiro, as superfícies em

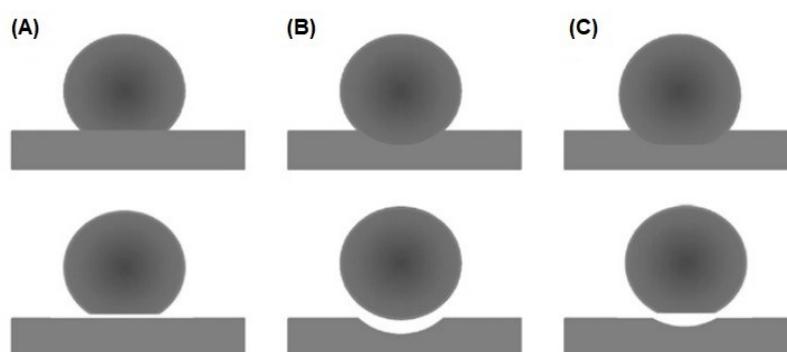
contato reagem com o meio, criando produtos de reação que se depositam nas superfícies. Em um segundo momento, ocorre a remoção dos produtos da reação, devido à formação de trincas e abrasão (STOLARSKI, 1990).

2.4.1 Volume de Desgaste

O desgaste deslizante linear recíproco, é um dos testes de laboratório mais comuns para determinar o comportamento de desgaste de materiais de engenharia (SHARMA; SANGAL; MONDAL, 2013).

Segundo Sharm e colaboradores (2013), a norma ASTM G133-05 menciona três diferentes variações geométricas possíveis de serem produzidas pelo desgaste relativo da esfera e do corpo de prova plano. Essas três diferentes condições podem ser observadas por meio da Figura 9.

Figura 9. Diferentes situações de desgaste. (A) Apenas a esfera se desgasta. (B) Apenas a amostra plana se desgasta. (C) A esfera e a amostra se desgastam.



Fonte: Sharma; Sangal; Mondal (2013).

A Figura 9A, mostra a condição onde somente a esfera desgasta-se. Isso ocorre caso o corpo de prova plano seja mais resistente ao desgaste do que a esfera. Na segunda imagem (Figura 9B), apenas o corpo de prova plano se desgasta, devido a esfera ter maior dureza do que o corpo de prova. Por fim, a Figura 9C, ilustra a condição em que tanto a esfera quanto o corpo de prova plano se desgastam (SHARMA; SANGAL; MONDAL, 2013).

O volume do material removido é um dos principais parâmetros de quantificação da propriedade de desgaste, existindo vários métodos para medir o volume de desgaste. A relação da perda de massa mensurada e da densidade

específica do material é uma das formas de se obter o volume removido (JÚNIOR et al., 2017). Outra metodologia utiliza a microscopia óptica, como proposto por Sharma e colaboradores (2013).

No presente trabalho, para o cálculo do volume de desgaste, será utilizado o caso representado pela Figura 9B, no qual, a esfera é dura o suficiente para resistir ao seu próprio desgaste, mantendo sua geometria. Neste caso, o volume da região desgastada pode ser calculado usando a equação (1).

$$V = A_s \cdot L \quad (1)$$

Onde:

V = volume de desgaste (mm³)

A_s = área da seção transversal do segmento cilíndrico da região de desgaste (mm²)

L = comprimento do curso (mm)

A resistência ao desgaste é um tópico relevante na seleção de materiais e, por conseguinte, ensaios de laboratório foram desenvolvidos com o objetivo de se medir e quantificar este parâmetro sob condições controladas semelhantes às condições de serviço. O coeficiente de desgaste (K) é uma ferramenta imensamente importante e provê um valioso meio de comparação do rigor dos processos de desgaste em diferentes tribossistemas (BRESSAN; COMELI, 2007).

Desta forma, após mensuração do volume de material removido, pode-se calcular o coeficiente de desgaste através do modelo analítico proposto por Archard, e determinado, por meio da equação (2) (BRESSAN; COMELI, 2007; JÚNIOR et al., 2017; STACHOWIAK, 2006).

$$V = K \cdot \frac{W \cdot L}{H} \quad (2)$$

Onde:

V = volume de material removido (mm³)

K = coeficiente de desgaste adimensional

W = força normal aplicada ao material

L = distância de deslizamento (mm)

H = dureza da superfície (N/mm²)

Nesta equação, K é adimensional e pode ser utilizado como um indicativo da severidade do desgaste. Em aplicações de engenharia, o coeficiente de desgaste adimensional K e a dureza H , são agrupados, substituindo-se K/H , pela constante k , denominada taxa de desgaste ou coeficiente de desgaste dimensional, cuja unidade usual é $\text{mm}^3/\text{N.m}$, e representa o volume de material desgastado por unidade de distância deslizada e por unidade de força normal (FARIAS, 2016; SILVA, 2006). Caracterizado, segundo a equação (3).

$$k = \frac{V}{W \cdot L} \quad (3)$$

Onde:

k = taxa de desgaste ou coeficiente de desgaste dimensional ($\text{mm}^3/\text{N.m}$)

V = volume de material removido (mm^3)

W = força normal aplicada ao material

L = distância de deslizamento (mm)

De acordo, com modelo de Archard para desgaste por deslizamento, a área de material desgastado é diretamente proporcional à força normal aplicada e a distância de deslizamento, e que o volume de desgaste é inversamente proporcional a dureza do material desgastado. Contudo, igualmente, o volume depende da forma e da microestrutura de contato, da contaminação da superfície, de propriedades do ambiente, ente outros, os quais, estão implicados indiretamente no coeficiente de desgaste (FARIAS, 2016).

Assim, através da teoria de Archard, pode-se analisar a correlação linear do volume desgastado com a distância deslizada, a força normal aplicada e a dureza do material.

2.5 COEFICIENTE DE ATRITO

O coeficiente de atrito determina a força necessária para colocar em movimento a esfera de alumina com a carga aplicada a partir do repouso. O atrito acontece quando há uma resistência durante qualquer tipo de movimento relativo entre dois corpos, exercendo uma determinada força. Esta relação entre a força

exercida e a força normal dos corpos é nomeada coeficiente de atrito (μ). Trata-se de um valor adimensional, ou seja, não é uma propriedade do material e sim um dado do tribossistema, que se classifica em dinâmico e o estático, prevalecendo a relação que o estático será sempre maior ou igual ao dinâmico (JUNIOR, 2011).

2.6 DUREZA VICKERS

A dureza é uma propriedade mecânica usada na caracterização de materiais. O ensaio de dureza Vickers, baseia-se na aplicação de força em um indentador de diamante com formato piramidal de base quadrada e ângulo entre faces opostas de 136° sob a superfície do material. Utilizando-se um microscópio acoplado ao equipamento, mede-se as diagonais da impressão gerada. O valor da dureza é calculado, a partir da magnitude da força e da média das diagonais de impressão (GONTARSKI; CASALI; MIKOWSKI, 2021).

2.7 REVESTIMENTOS DEPOSITADOS À PLAMA

Processos de modificação superficial são aplicados tanto em escala industrial, como laboratorial, e nas mais variadas espécimes de superfícies de materiais (MAZUR, 2018). Os componentes modificados superficialmente são empregados em uma diversidade de setores, incluindo dispositivos opto-eletrônicos, isolantes térmicos, revestimentos, deposição tribológicas e revestimentos decorativos (ALVES JUNIOR, 2001).

Existe uma grande quantidade de técnicas associadas à modificação de superfícies, ou melhor, métodos que modificam as propriedades da superfície sem alterar as propriedades do seu volume. Dentre as técnicas mais recentes, encontram-se as que fazem uso de plasmas, lasers, feixes de íons e feixes de elétrons como fontes energéticas, para alteração estrutural e/ou composicional da superfície, ou ainda para a deposição de filmes (ALVES JUNIOR, 2001).

As técnicas à plasma podem ser divididas sumariamente em dois grandes grupos: processos de implantação e processos de deposição (ASSMANN, 2011).

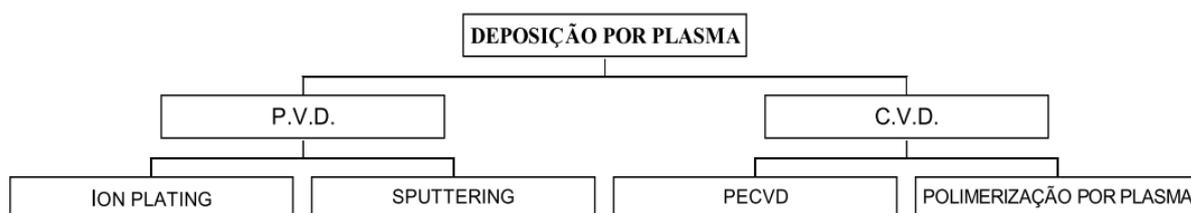
O primeiro deles, refere-se a implantação iônica, a qual, consiste na sua essência, a processos que utilizam feixes de íons com energias de 2 a 500 keV, ainda

mais, permite não só um controle sobre a profundidade de implantação, como a distribuição/concentração de íons, através da escolha da energia do feixe e das taxas de fluência aplicadas (SOUZA, 2010). O segundo, é a deposição por plasma que, baseia-se em um grande fluxo iônico com energia média por íon, suficiente para causar pulverização catódica (*sputtering*) (ALVES JUNIOR, 2001).

O segundo grupo é comumente dividido em duas famílias denominadas como, deposição química de vapores (CVD) ou “*chemical vapor deposition*” e deposição física de vapores (PVD) ou “*physical vapour deposition*”. O método CVD, resume-se na deposição de material a partir de uma reação química, graças a um efeito térmico entre a fase de vapor e o substrato. Ainda, esse processo pode ser ou não assistido por um plasma. Já, o PVD, consiste na produção de espécies atômicas, moleculares e iônicas por reações de evaporação (*sputtering*) do alvo sólido. Assim, os espécimes gerados são depositados a superfície do substrato onde ocorre um agrupamento atômico, e a formação de uma película, ou filme fino (ASSMANN, 2011; LIMA, 2022; MAZUR, 2018).

Um organograma desta classificação pode ser observada na Figura 10.

Figura 10. Organograma dos processos de deposição por plasma.



Fonte: Alves Junior (2001).

O método de deposição com a técnica *Pulsed Magnetron Sputtering* (PMS), ou, plasma pulsado *magnetron sputtering*, foco deste estudo, é um exemplo deste último processo, ora reportado no item abaixo.

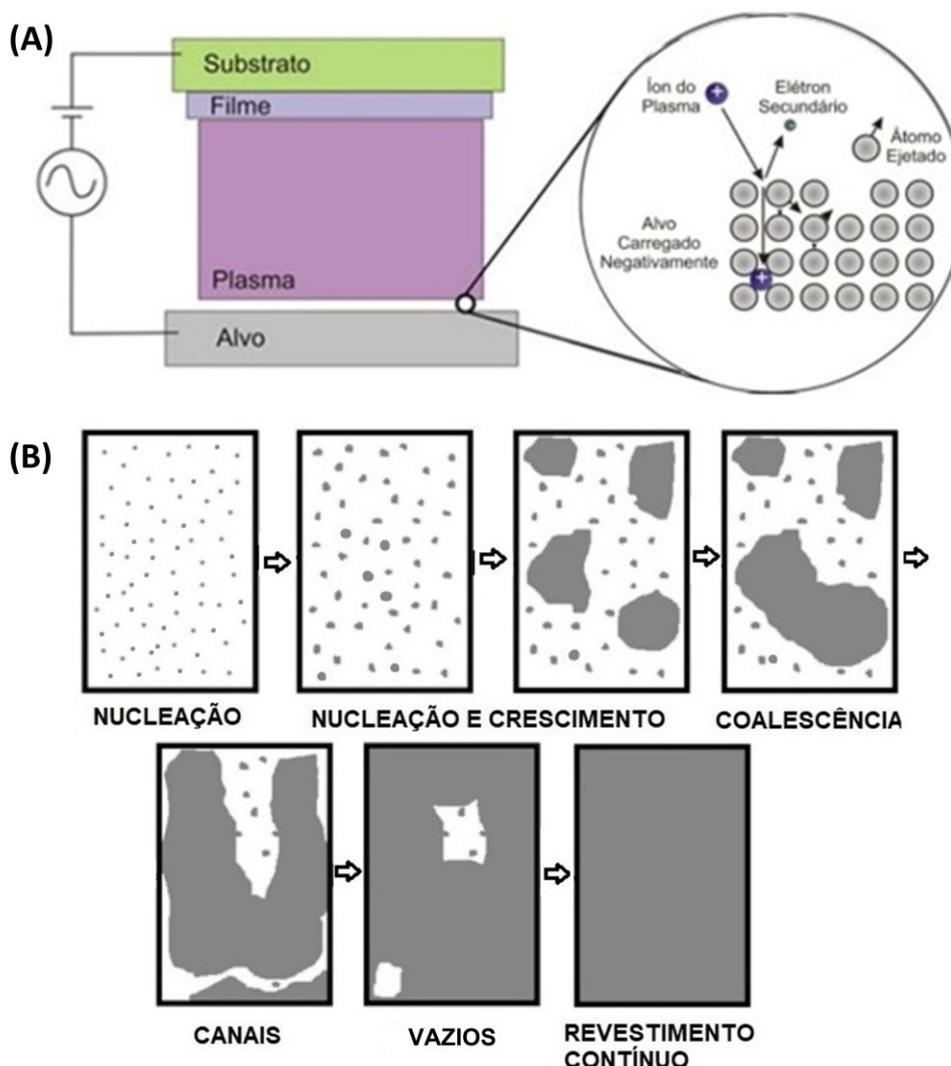
2.7.1 Pulsed Magnetron Sputtering

O procedimento básico de *sputtering*, consiste de uma placa alvo sólida (ou cátodo), que é bombardeada por íons energéticos gerados em um plasma de

descarga incandescente, situada na frente do alvo. O presente processo promove o desarranjo e a remoção, ou seja, “*sputtering*”, de átomos da superfície do alvo, que podem então condensar-se em um substrato como um filme fino (Figura 11). Também, como resultado do bombardeio de íons, elétrons secundários são emitidos da superfície do alvo, e esses elétrons desempenham um papel importante na manutenção do plasma (ANDERS, 2005; KELLY; ARNELL, 2000).

Vale destacar, que muitos fatores podem influenciar na microestrutura dos filmes finos, tais como, temperatura do substrato, as espécies gasosas, a pressão de trabalho, o ângulo de incidência (orientação da superfície em relação a direção do fluxo de revestimento), a geometria do “*magnetron*” (cilíndrico, planar, retangular), a distância entre a fonte de íons e o substrato (MAZUR, 2018).

Figura 11. (A) Representação esquemática do processo de *sputtering*. (B) Esquemático das etapas do processo de formação de um filme de revestimento contínuo.



Fonte: Adaptado de Tatsch (2000); WIKIPEDIA (2021).

A técnica de *magnetron sputtering* faz uso de um campo magnético de configuração paralela localizado na superfície do substrato, o qual, promove um aumento na capacidade de ionização devido ao movimento dos elétrons. Dessa forma, obtém-se um maior *sputtering* e conseqüentemente, um aumento expressivo na taxa de deposição iônica em comparação com outros sistemas (KELLY; ARNELL, 2000).

Salienta-se ainda, que as fontes de plasma embasadas no “*magnetron*”, não só garantem uma boa reprodutibilidade do fluxo de íons, mas ainda oferecem a possibilidade de dimensionamento, isto é, o controle da fonte emissora de íons que possibilita definir a área em que os íons mais energéticos irão colidir com o alvo, e permite o emprego de alvos com mais de um metro de comprimento (ANDERS, 2005).

A tecnologia de PMS, pode ser utilizada em inúmeras áreas de aplicação, incluindo revestimentos duros e resistentes ao desgaste, revestimentos de baixo atrito, revestimentos resistentes à corrosão, e etc. (KELLY; ARNELL, 2000).

2.7.2 Processo Duplo de Deposição de Revestimento

De fato, em muitas aplicações, os revestimentos produzidos pela técnica PMS exibem alto desempenho, e superam os revestimentos produzidos por outras técnicas. Entretanto, os filmes finos depositados podem não apresentar a aderência necessária para melhorar o desempenho de componentes mecânicos em tribossistemas. Em vista disso, processos duplos de deposição de revestimento podem ser utilizados (KELLY; ARNELL, 2000).

Segundo Bell e colaboradores, a aplicação sequencial de duas (ou mais) tecnologias de superfície, são estabelecidas para produzir superfícies com propriedades combinadas que não podem ser obtidas através de qualquer tecnologia de superfície individual (BELL; DONG; SUN, 1998).

Várias metodologias combinando a técnica PMS são descritas na literatura. WEI *et al.* (2021), empregou o método PMS, combinado com a técnica de plasma de oxidação eletrolítica, melhorando a resistência à corrosão da liga de magnésio AZ31 Mg (WEI *et al.*, 2021). Matthews e Leyland (1995), faz referência a outros processos duplos de deposição de revestimento, tais como, tratamento de difusão de plasma

combinado com PVD e o método de PVD reativo e não reativo combinados (MATTHEWS; LEYLAND, 1995). Já Lima (2022), utiliza a deposição do revestimento por PMS e um tratamento térmico para difusão ou refusão com tochas de plasma a quente, como a *Tungsten Inert Gas* (TIG) autógena. O processo de soldagem TIG realizado pela autora, provocou a refusão do metal base (Aço DOMEX 700MC) incorporando o material protetivo do revestimento (Nióbio). A consolidação foi efetiva e promoveu uma redução 98% na taxa de corrosão em comparação ao metal base (LIMA, 2022).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, serão apresentados os materiais e os métodos utilizados para a execução do presente estudo.

3.1 MATERIAIS

O material utilizado para o desenvolvimento do presente trabalho foi o aço S700MC, conhecido comercialmente como DOMEX 700MC.

A deposição do revestimento de Nb, via PMS, no aço DOMEX 700MC, foi realizada por Lima (2022), segundo a metodologia descrita em seu trabalho. Isto é, o gás de trabalho utilizado para a obtenção do filme, foi o oxigênio com pureza 99,999%. A pressão de vácuo foi de $3 \cdot 10^{-3}$ mbar, com pico de tensão de 489 V, corrente de 1,45 A, e potência de 0,71 kW. A deposição foi realizada em ciclos de trabalho de 50%, e o tempo de deposição foi de 5 minutos.

O processo de duplo revestimento foi realizado por Lima (2022), promovendo a refusão da superfície com soldagem TIG, autógena manual, sem metal de adição, com o objetivo de incorporar o Nb ao material base (MB). Para isso foi realizado um cordão de solda (CS) com corrente contínua de 130 A, tensão de 220 V, eletrodo de tungstênio, com gás argônio industrial de pureza 99%, com uma vazão de 25 L/min.

A nomenclatura e a descrição das amostras usadas no presente trabalho são listadas na Tabela 3.

Tabela 3. Nomenclaturas e a descrição das amostras.

Amostra	Descrição
MB	Aço DOMEX 700MC, sem revestimento
MB+CS	Aço DOMEX 700MC, sem revestimento, com cordão de solda TIG autógena manual, sem metal de adição
MB+Nb	Aço DOMEX 700MC, com deposição de nióbio via PMS
MB+Nb+CS	Aço DOMEX 700MC, com deposição de nióbio via PMS, com cordão de solda TIG autógena manual, sem metal de adição

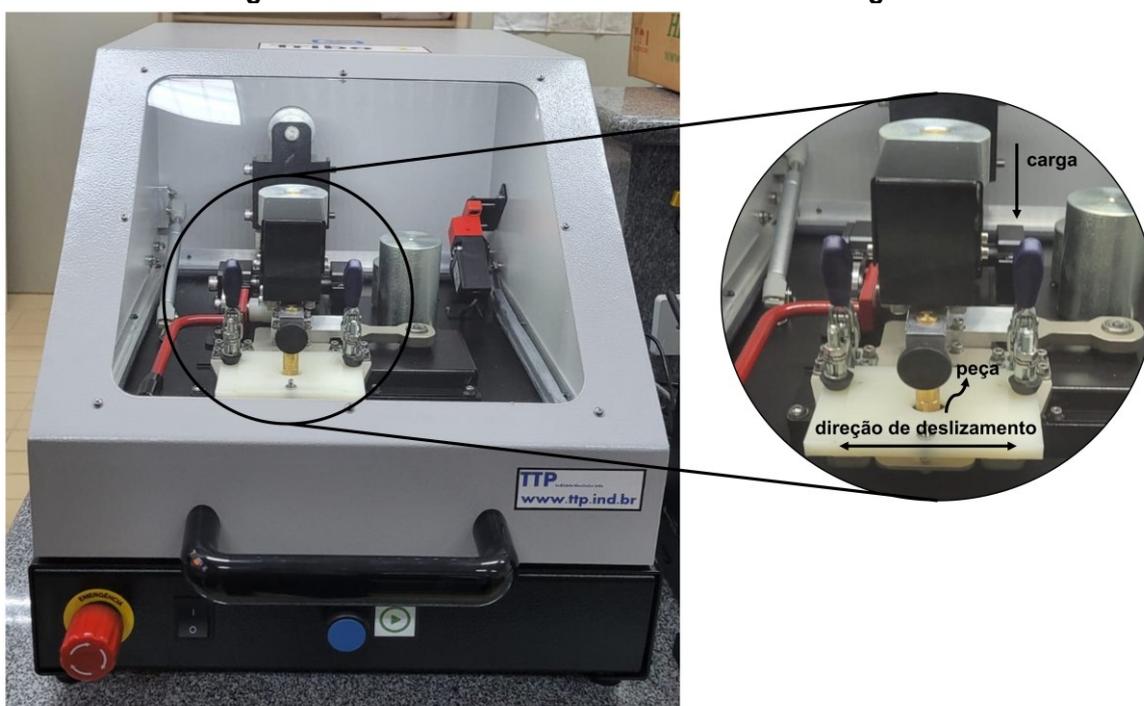
Fonte: Autoria própria, 2022.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Ensaio de desgaste por deslizamento

Os ensaios de desgaste por deslizamento linear recíproco foram realizados utilizando um tribômetro marca TTP, modelo Tribo 1, ilustrado na Figura 12.

Figura 12. Tribômetro utilizado nos ensaios de desgaste.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Os resultados foram obtidos com a realização dos ensaios de desgaste sem lubrificante, com um valor de carga e velocidade de deslizamento constante. Na Tabela 4, são mostrados os parâmetros operacionais empregados durante a execução dos ensaios.

Tabela 4. Parâmetros dos ensaios de desgaste.

Parâmetro	Valor
Força normal	10 N
Frequência	5 Hz
Tempo de ensaio	60 min
Comprimento da trilha	2 mm

Material da esfera	Alumina (Al_2O_3)
Diâmetro da esfera	4,762 mm

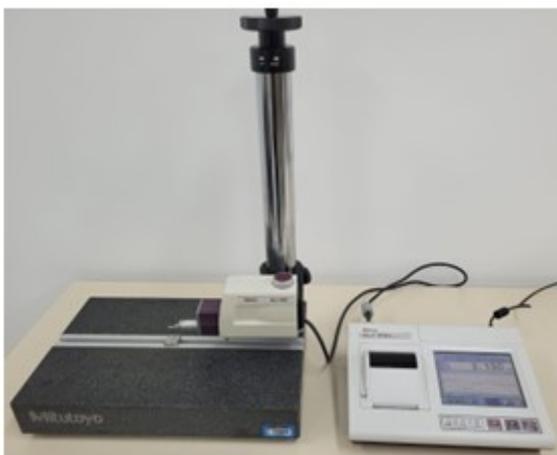
Fonte: Aatoria própria, 2022.

Todos os ensaios foram realizados em triplicata. Antes de cada ensaio, a esfera e as amostras foram limpas em álcool isopropílico, utilizando um banho ultrassônico conjugado modelo SSBuc da SolidSteel, por um período de 5 minutos.

3.2.2 Cálculo do volume de desgaste

O volume de desgaste foi mensurado usando a equação (1). A área da seção transversal do segmento cilíndrico da região de desgaste foi determinada utilizando um rugosímetro Mitutoyo SJ-410 (Figura 13).

Figura 13. Rugosímetro Mitutoyo SJ-410, utilizado nas análises de perfil.



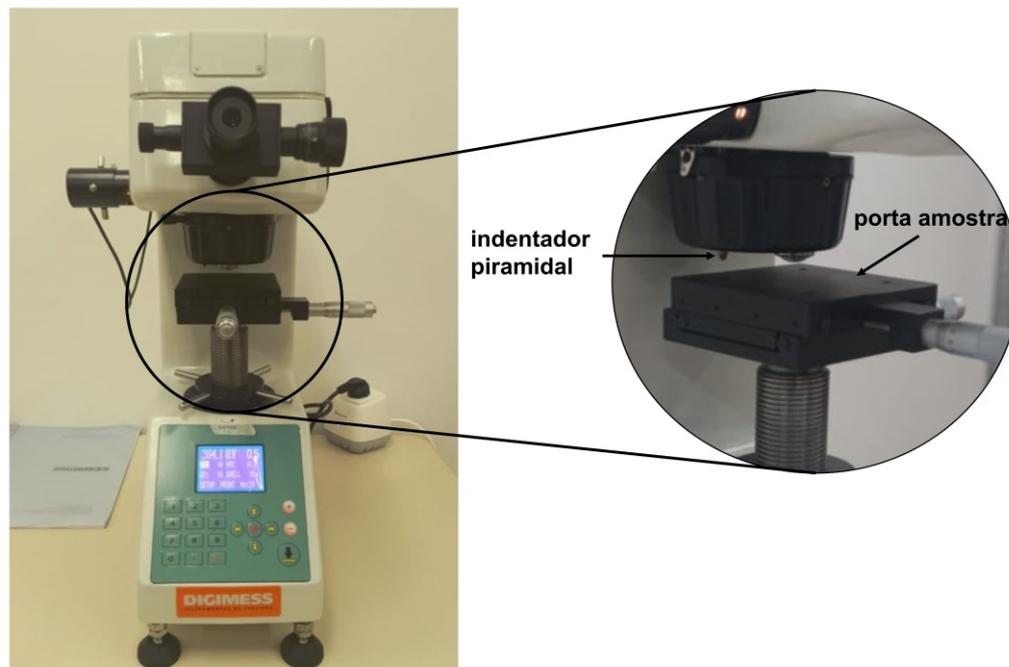
Fonte: Aatoria própria, 2022.

Os perfis de rugosidade da região de desgaste foram coletados em triplicata para cada uma das amostras estudadas. Em todas as amostragens, os dados foram coletados em três pontos diferentes da região de desgaste. A partir dos valores obtidos, calculou-se as médias e o desvio padrão.

3.2.3 Dureza

As medidas de dureza Vickers foram realizadas empregando-se um microdurômetro marca Digimess, modelo HV-1000 400.310, como se mostra na Figura 14.

Figura 14. Microdurômetro Digimess.



Fonte: Autoria própria, 2022.

As medidas de dureza Vickers foram realizadas em triplicata em cada amostra, ou seja, foram realizadas três medições em regiões aleatórias para cada uma das amostras (Tabela 3), em seguida, calculou-se as médias e o desvio padrão. Utilizou-se, carga de 500 g, e duração de 15 s.

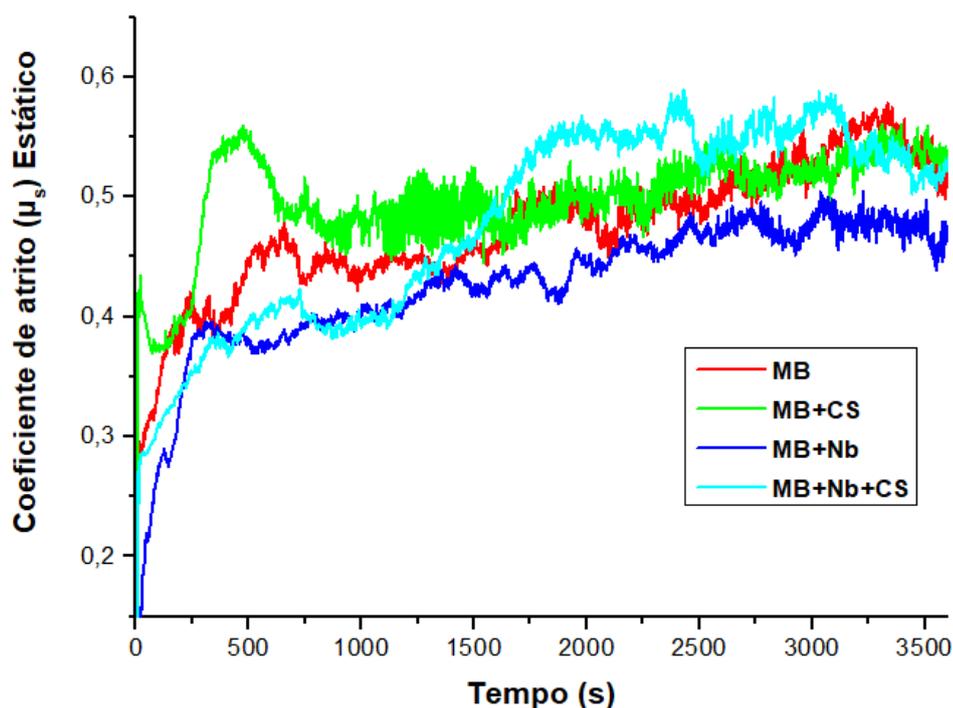
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item estão apresentados e discutidos os resultados obtidos experimentalmente.

4.1 ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE ATRITO

O coeficiente de atrito estático determina a força necessária para colocar em movimento a esfera de alumina com a carga aplicada a partir do repouso. Na Figura 15, estão representadas, por meio de uma amostragem, as curvas do coeficiente de atrito (μ_s) estático obtidas com a aplicação de uma carga normal de 10 N e demais parâmetros indicados na Tabela 4.

Figura 15. Curvas do coeficiente de atrito estático de um ensaio de cada amostra.

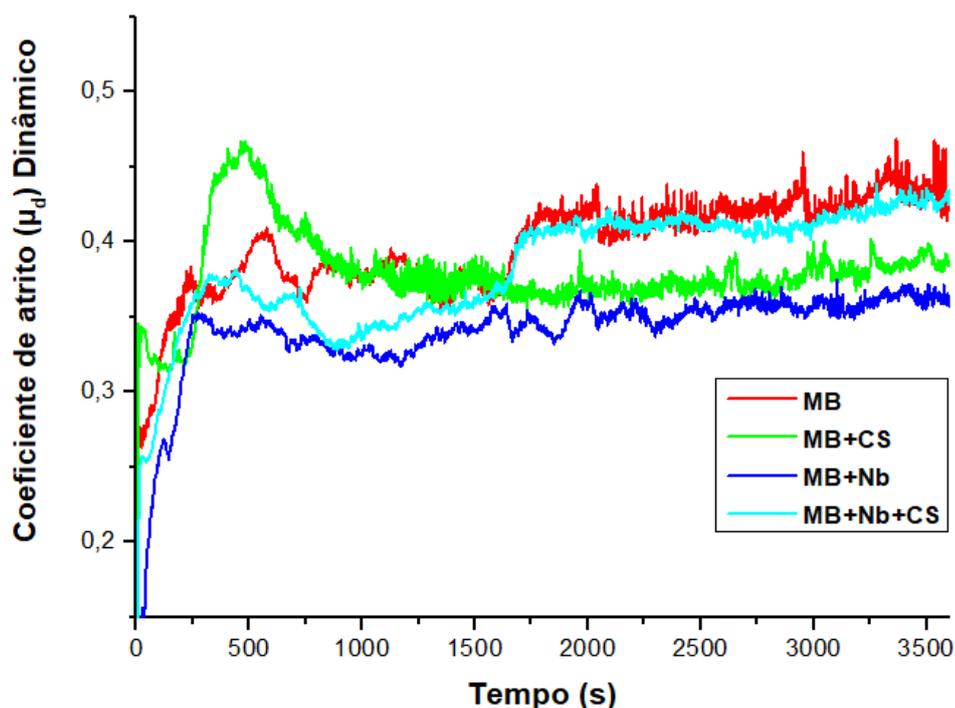


Fonte: Autoria própria, 2022.

O coeficiente de atrito dinâmico (μ_d) foi obtido com a mesma carga aplicada e uma amostragem das curvas para as amostras ensaiadas podem ser observados na Figura 16. Nota-se que houve um período inicial, onde os coeficientes de atrito (μ_s) estático e (μ_d) dinâmico, foram menores e após este período os mesmos entram em

regime permanente. Para a análise de estudo será desconsiderado este período inicial em que houve variações e irregularidades extrema nos valores resultantes dos ensaios.

Figura 16: Curvas do coeficiente de atrito dinâmico de um ensaio de cada amostra.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Os valores do coeficiente de atrito foram determinados segundo os dados do coeficiente de fricção encontrados em cada teste. Ao calcular os valores médios do coeficiente de atrito, utilizou-se como parâmetro o desvio padrão para verificar a dispersão do conjunto de dados durante o regime permanente de tempo do ensaio, para cada amostra, obtendo-se os dados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Coeficiente de atrito estático e dinâmico.

Material	Coeficiente de atrito estático (μ_s)	Coeficiente de atrito dinâmico (μ_d)	Média (μ_s)	Média (μ_d)
MB	$0,525 \pm 0,022$	$0,438 \pm 0,010$	$0,501 \pm 0,023$	$0,412 \pm 0,013$
	$0,471 \pm 0,017$	$0,382 \pm 0,011$		
	$0,506 \pm 0,031$	$0,416 \pm 0,019$		
MB + CS	$0,639 \pm 0,024$	$0,409 \pm 0,009$	$0,573 \pm 0,031$	$0,421 \pm 0,011$
	$0,511 \pm 0,022$	$0,375 \pm 0,009$		
	$0,570 \pm 0,046$	$0,479 \pm 0,014$		

	0,391 ± 0,019	0,391 ± 0,006		
MB + Nb	0,459 ± 0,021	0,354 ± 0,008	0,446 ± 0,023	0,372 ± 0,009
	0,486 ± 0,029	0,371 ± 0,013		
	0,468 ± 0,034	0,371 ± 0,021		
MB + CS + Nb	0,415 ± 0,005	0,335 ± 0,005	0,474 ± 0,022	0,371 ± 0,014
	0,539 ± 0,027	0,408 ± 0,017		

Fonte: Autoria própria, 2022.

O MB+CS em relação ao MB não ocorreu mudança no coeficiente de atrito dinâmico μ_d , o processo de refusão com TIG não ofereceu mudanças para a resistência ao atrito (2%). As modificações microestruturais promovidas devido ao processo de soldagem causaram alterações no tribossistema em análise. O aço DOMEX 700MC apresenta uma microestrutura dendrita, o aporte térmico que ocorre durante o processamento por soldagem causa crescimento de tamanho de grãos (LIMA, 2022).

A presença do filme fino de Nb na amostra MB+Nb causou uma redução de cerca de 10% no coeficiente de atrito dinâmico, quando comparado ao MB, registrando-se um valor médio para μ_d de $0,372 \pm 0,009$. É interessante notar que essa redução foi consistente durante todo o ensaio, apresentando uma curva estável na Figura 16. Segundo Alexopoulos e O'Sullivan (1990), os metais de transição como o nióbio e seus óxidos são materiais que a depender da interação com o material do substrato, podem apresentar propriedades de resistência ao desgaste. O mecanismo indicado pelos autores consiste na redução do arrasto friccional e dissipação de energia entre os materiais deslizantes, que resulta em menores tensões de contato deslizante na superfície (ALEXOPOULOS; O'SULLIVAN, 1990). Neste caso, fragmentos de óxido de nióbio poderiam estar atuando como um lubrificante sólido, mesmo após a remoção mecânica da superfície da amostra.

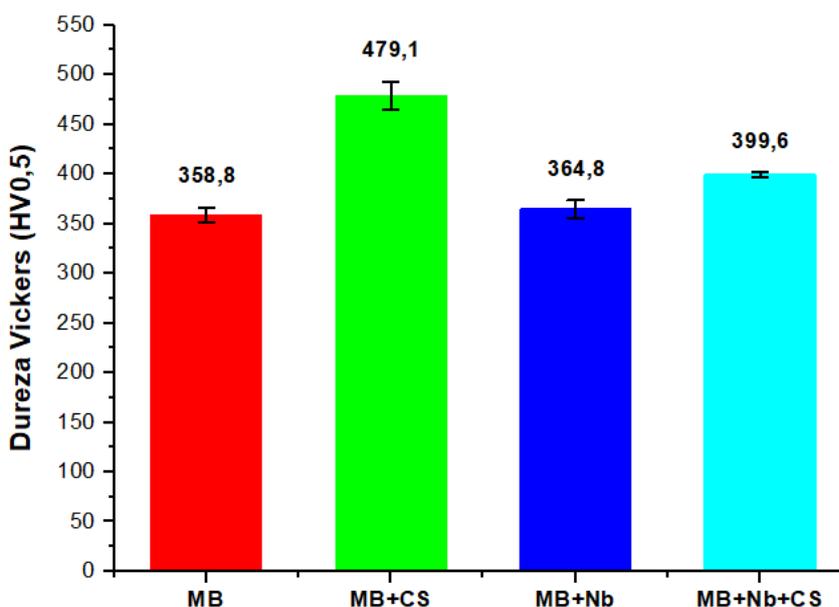
A consolidação do revestimento de nióbio promoveu um efeito de redução no coeficiente de atrito dinâmico ficando próximo a amostra MB+Nb nos primeiros 1500 segundos de ensaio, conforme pode ser no ensaio da Figura 16. Entretanto, esse efeito permaneceu até 1600 segundos de ensaio, quando de forma abrupta, o μ_d retornou a valores próximos do MB. A média calculada das amostras de MB+CS+Nb para a região estável de $0,371 \pm 0,014$. Isso indica que o revestimento consolidado acabou sendo removido do tribossistema após um período do ensaio, o que causou uma redução de 10% no coeficiente de atrito dinâmico em relação ao MB ($\mu_d 0,412 \pm$

0,013). Quando se compara a amostra MB+Nb+CS ao material que foi apenas refundido com TIG sem a presença do filme fino de nióbio (MB+CS), houve uma redução no coeficiente de atrito dinâmico de mais de 11%, ou seja, os resultados apontam que o Nb claramente interfere mais no coeficiente de atrito do que apenas o material com acréscimo de CS.

4.2 DUREZA DA SUPERFÍCIE

As medidas de dureza Vickers ($HV_{0,5}$), foram realizadas a fim de se observar a variação de dureza entre os diferentes aspectos dos materiais analisados. A média dos valores de dureza e o erro associado são mostrados na Figura 17.

Figura 17. Dureza Vickers em função do tipo de material analisado.



Fonte: Autoria própria, 2022.

O valor médio de dureza obtido para o MB foi $358,8 \text{ HV} \pm 0,006$, o qual está muito próximo ao apresentado pela literatura. Júnior e colaboradores (2017), exibe um valor de dureza para o aço S700MC de $361,94 \text{ HV}$. A refusão com TIG da superfície do aço DOMEX 700MC promoveu um aumento de 25 % nos valores de dureza, devido as modificações microestruturais que ocorrem no processo de soldagem.

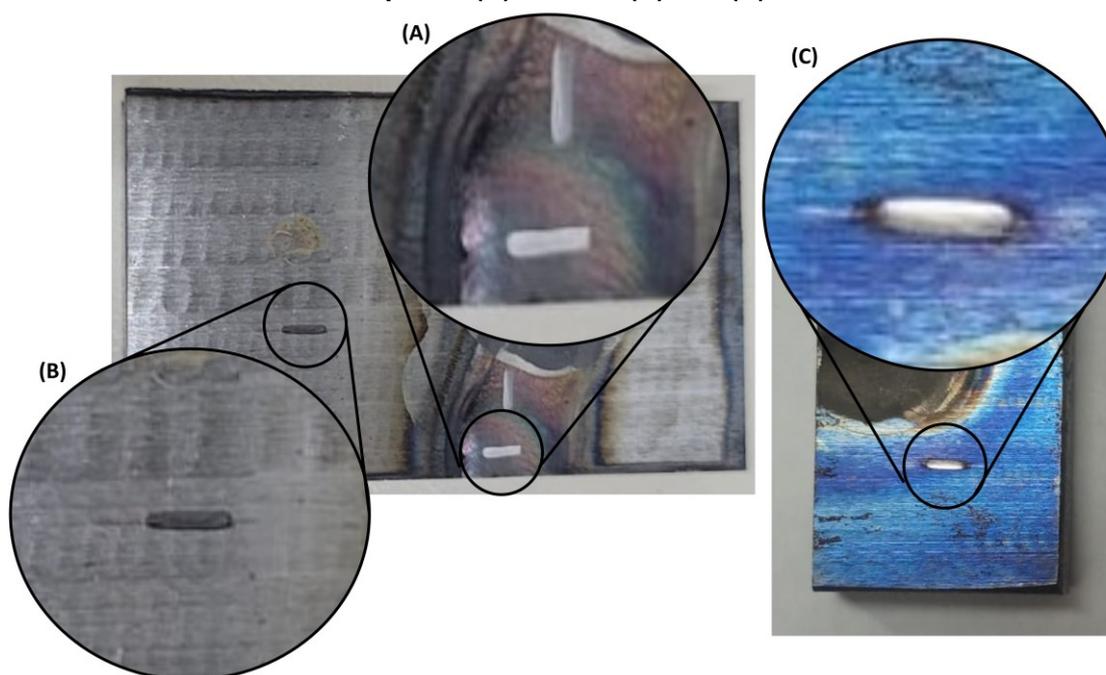
Os valores de dureza demonstraram que somente a deposição de Nb na superfície do metal não teve influência significativa na dureza do material, devido à

natureza do revestimento (filme fino). Por outro lado, verificou-se um aumento de aproximadamente 10 % na dureza média da amostra contendo nióbio e refundida em comparação ao MB. Isso indica que houve o enriquecimento da região próxima a superfície com o nióbio, corroborando com os resultados do coeficiente de atrito dinâmico, que indicam que sua remoção após 1600 s de ensaio está relacionada a uma pequena espessura enriquecida que contribui para aumento de dureza e redução do coeficiente de atrito.

4.3 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO DESGASTE

A Figura 18, ilustra as trilhas de desgaste, obtidas pelos ensaios de desgaste por deslizamento linear recíproco.

Figura 18. Trilhas de desgaste, obtidas através dos ensaios de desgaste por deslizamento linear recíproco. (A) MB+CS. (B) MB. (C) MB+Nb.

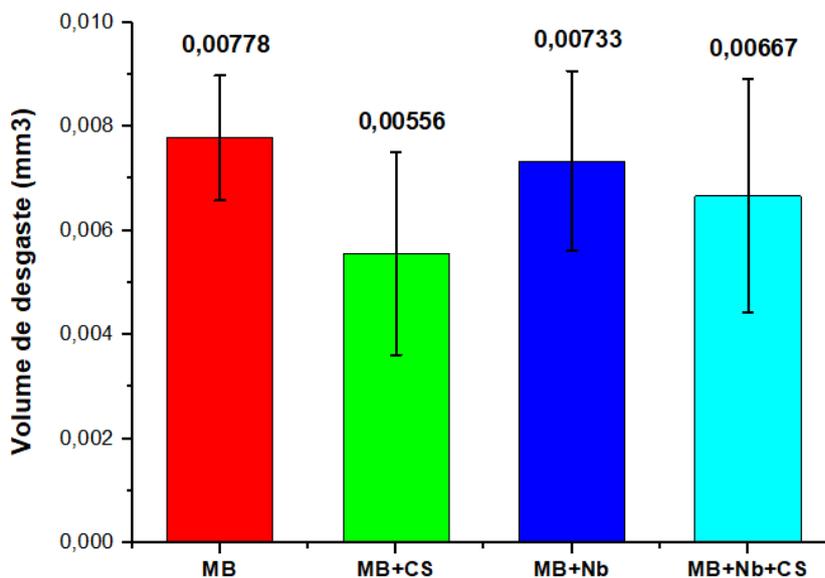


Fonte: Autoria própria, 2022.

Uma das metodologias para quantificação das propriedades de desgaste é a avaliação da perda de volume na trilha formada pelo ensaio de deslizamento. Para tanto, após mensuração da área da seção transversal do segmento cilíndrico da região de desgaste, calculou-se o volume de desgaste utilizando a equação (1).

A Figura 19, representa perda de volume por desgaste das diferentes amostras analisadas.

Figura 19. Volume de desgaste obtido através do ensaio de deslizamento.

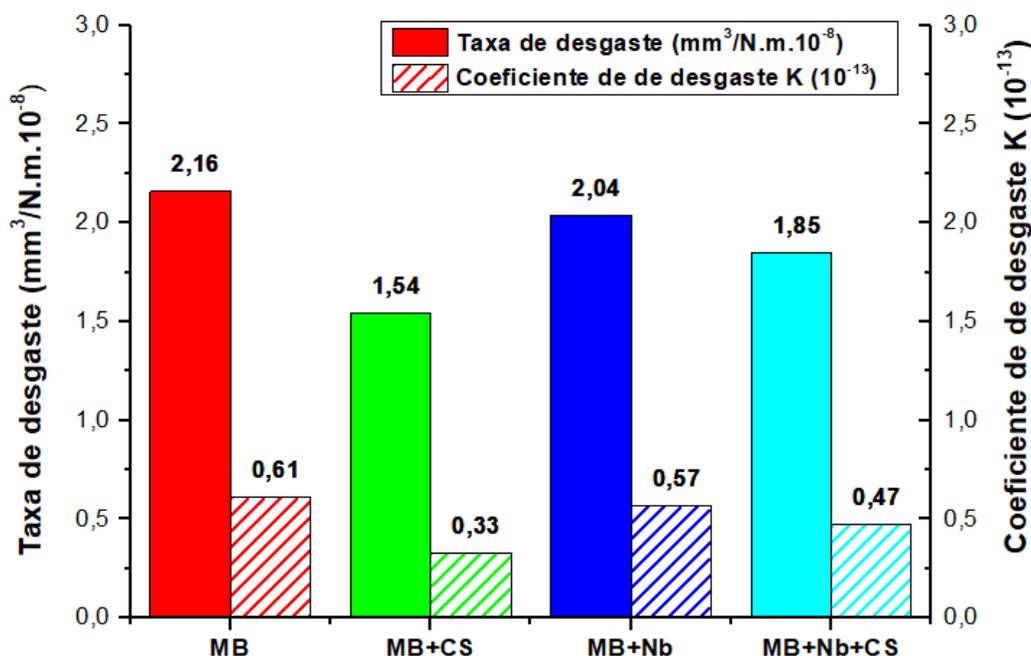


Fonte: Autoria própria, 2022.

O MB+CS apresentou o menor volume de desgaste, o qual foi de 0,00556 mm³, 28,5% menor que a do MB. A perda de volume entre o MB e o MB+Nb não teve diferença significativa. Denotando, que a deposição de Nb no aço DOMEX pelo processo PMS, não demonstrou influencia neste parâmetro estudado. Comparando o MB+Nb+CS e o MB+Nb, a perda de volume da MB+Nb+CS foi 9% menor que o MB+Nb. Portanto, os resultados demonstram, que o CS realizado pelo processo TIG, diminuiu a perda de volume nas regiões observadas.

A Figura 20, demonstra a taxa média de desgaste ou coeficiente de desgaste dimensional, juntamente com o coeficiente de desgaste adimensional, ambos obtidos por meio do modelo analítico proposto por Archard, equação (2) e equação (3).

Figura 20. Valores da taxa de desgaste e coeficiente de desgaste.



Fonte: Autoria própria, 2022.

O MB apresentou taxa de desgaste de 2,16 $\text{mm}^3/\text{N.m}$ e coeficiente de desgaste de 0,61. O processo de refusão causou uma redução de 28% na taxa de desgaste e quase 46% no coeficiente de desgaste. Isso era esperado pelos mesmos mecanismos que promoveram aumento de dureza (Figura 17) e menor volume removido, resultando em menor desgaste em ambas as análises.

Comparando-se o MB com MB+Nb, a barra de erros para o volume removido torna os valores muito próximos, verificando-se pouca variação na taxa e coeficiente de desgaste. Já a consolidação do revestimento de Nb promoveu redução de aproximadamente 15% na taxa e 6,5% no coeficiente de desgaste, devido a maior dureza e menor taxa média de remoção de material.

Portanto, observa-se que os materiais que obtiveram menores coeficientes de desgaste, também foram os que revelaram menores perdas de volume nos ensaios de desgaste por deslizamento (Tabela 6). O presente dado, é corroborado por Júnior e colaboradores (2017), que segundos os autores, quanto maior é o coeficiente de desgaste, maior é o volume perdido.

Além disso, segundo Stachowiak e Batchelor (2013), o baixo valor do coeficiente de desgaste K, indica que o desgaste é provocado por uma proporção muito pequena de contatos de aspereza, isto é, as asperezas deslizam umas sobre

as outras com pouca dificuldade e apenas uma fração muito pequena dos contatos resulta na formação de partículas de desgaste.

Outrossim, a Tabela 6, relaciona o coeficiente de atrito, o volume de desgaste, bem como, os valores calculados da taxa de desgaste, juntamente com os valores de dureza Vickers.

Tabela 6. Resultados de coeficiente de atrito, volume de desgaste, taxa de desgaste, coeficiente de desgaste e dureza para as amostras analisadas.

Amostra	Coeficiente de atrito estático (μ_s)	Coeficiente de atrito dinâmico (μ_d)	Volume de desgaste (mm^3)	Taxa de desgaste ($\text{mm}^3/\text{N.m}$)	Coeficiente de desgaste (K)	Dureza Vickers ($\text{HV}_{0,5}$)
MB	0,501 ± 0,023	0,412 ± 0,013	0,00778	2,16.10 ⁻⁸	0,61.10 ⁻¹³	358,8
MB+CS	0,573 ± 0,031	0,421 ± 0,011	0,00556	1,54.10 ⁻⁸	0,33.10 ⁻¹³	479,1
MB+Nb	0,446 ± 0,023	0,372 ± 0,009	0,00733	2,04.10 ⁻⁸	0,57.10 ⁻¹³	364,8
MB+Nb+CS	0,474 ± 0,022	0,371 ± 0,014	0,00667	1,85.10 ⁻⁸	0,47.10 ⁻¹³	399,6

Fonte: Autoria própria, 2022.

Observa-se que a taxa de desgaste é inversamente proporcional a dureza do material, o que corrobora com a teoria de Archard. Logo, quanto maior a dureza do material, menor foi o volume perdido no ensaio de desgaste. O mesmo pode ser afirmado em relação ao coeficiente de atrito, que quanto maior for o coeficiente menor será o volume de desgaste. Por conseguinte, pode-se afirmar a relação inversamente proporcional entre o coeficiente de atrito e a dureza do material para os tribossistemas analisados neste trabalho.

5 CONCLUSÕES

Alterações microestruturais no aço DOMEX causadas apenas pela refusão com TIG promoveram uma redução no coeficiente de atrito dinâmico em 11%, e um aumento de 25% na dureza, o que levou a redução de 28% na taxa de desgaste e 46% no coeficiente de desgaste.

A deposição de filmes finos de Nb no aço DOMEX com a técnica PMS reduziu em 10% o coeficiente de atrito dinâmico, com um aumento de apenas 2% na dureza

A taxa e o coeficiente de desgaste não foram alterados de forma significativa, em relação ao aço sem deposição.

Verificou-se que a camada modificada pela refusão foi removida após 1600 segundo de ensaio de desgaste, retornando a valores de coeficiente de atrito próximos aos do aço DOMEX 700MC.

Houve aumento de 10% na dureza o que levou a uma redução na taxa e no coeficiente de desgaste em 15 e 6,5%, respectivamente.

Em todas as condições das amostras analisadas no presente trabalho, verificou-se a correlação inversamente proporcional entre a dureza e a taxa de desgaste medida, conforme a lei de Archad preconiza.

Dentre as amostras analisadas, apurou-se que a melhor condição foi MB+Nb+CS, dado que, apresentou os menores valores de coeficiente de atrito, e por conseguinte, uma melhor resistência ao desgaste. Ademais, a consolidação do revestimento aumentou a dureza do material, diminuindo a taxa de desgaste.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Analisar as trilhas de desgaste para verificar os mecanismos de desgaste atuantes em cada um dos casos.

REFERÊNCIAS

AFKHAMI, S. **Investigation on the Weldability of Cold-Formed Ultra-High Strength Steels S700MC and S1100**. [s.l.] Dissertação de Mestrado - Lappeenranta University of Technology, 2018.

ALEXOPOULOS, P. S.; O'SULLIVAN, T. C. Mechanical Properties of Thin Films. **Annual Review of Materials Science**, v. 20, p. 391–420, 1990.

ALTERA, F. DE A. **Desgaste abrasivo de níquel e de liga binária níquel-cobalto eletrodepositados em substrato de cobre**. 2009. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. REDEMAT. Ouro Preto, 2009.

ALVES, F. R. **Desenvolvimento de um tribômetro, tipo cilindro sob disco, para ensaios tribológicos em formulações com óleos vegetais**. 2014. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia – UNESP. Ilha Solteira, 2014.

ALVES JUNIOR, C. **Nitretação a Plasma: Fundamentos e Aplicações**. Natal. EDUFRN. 2001. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/handle/1/11807>>. Acesso em: 1 set. 2022.

ANDERS, A. Plasma and ion sources in large area coating: A review. **Surface and Coatings Technology**, v. 200, n. 5–6, p. 1893–1906, 2005.

ANDRADE, L. A. S. **Estudo da alteração em taxa de corrosão da liga DOMEX 700 MC devido a soldagem a laser estudo da alteração em taxa de corrosão da liga DOMEX 700 MC devido a soldagem a laser**. 2018: Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2018.

ASSMANN, A. **Aço Duplex LDX 2101 Submetido à Nitretação por Implantação Iônica, Implantação Iônica por Imersão em Plasma e Descarga Luminosa: Propriedades Mecânicas e Tribológicas**. 2011: Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa, 2011.

ATHAYDE, J. N. **Dispositivo oscilatório para avaliação tribológica em biomateriais, utilizando tribômetro linear**. 2015: Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal Do Paraná. Curitiba, 2015.

BAYER, R. G. **Wear analysis for engineers**. New York: HNB Publication, 2002.

BELL, T.; DONG, H.; SUN, Y. Realising the potential of duplex surface engineering. **Tribology International**, v. 31, n. 1–3, p. 127–137, 1998.

BORKO, K.; HADZIMA, B.; JACKOVÁ, M. N. Corrosion resistance of Domex 700 steel after combined surface treatment in chloride environment. **Procedia Engineering**, v. 192, p. 58–63, 2017.

BRESSAN, J. D.; COMELI, F. W. Estudo da resistência ao desgaste de aço AISI 422 tratado termicamente, nitretado e com revestimentos aspergidos de carboneto de cromo-níquel. **Anais do 4 Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, 2007.

BRUZIQUESI, C. G. O. et al. Nióbio: Um elemento químico estratégico para o Brasil. **Química Nova**, v. 42, n. 10, p. 1184–1188, 2019.

CHLUM, B. et al. **Multi-Function Tribometer Design**, 2010. Disponível em: <<https://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/109387>>. Acesso em: 1 set. 2022.

EMERIM, M. DA S.; CURI, E. I. M. Projeto de um tribômetro linear recíproco utilizando conceito de análise de falha e simulação pelo método de elementos finitos. **SATC Institutional Repository**, p. 26, 2018.

FARIAS, J. G. **Análise de desgaste de um pistão de bomba de injeção a diesel combinando ensaio experimental e simulação por elementos finitos**. [s.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

GONTARSKI, T. DE L.; CASALI, R. M.; MIKOWSKI, A. Dureza vickers – definição, normatização e perspectivas de pesquisa: uma revisão. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, p. 15736–15754, 2021.

GREGÓRIO, G. F. P.; SILVEIRA, A. M. **Manutenção industrial**. E-book. 97 ed. [s.l.] Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595026971/>. Acesso em: 29 ago. 2022., 2018.

JESUS, S. S. DE et al. Influência do meio de resfriamento no tratamento térmico de têmpera, nas propriedades do aço DOMEX 700MC. **III Simpósio de Tecnologias da**

Fatec de Sertãozinho (SITEFA/Stz), v. 3, p. 96–105, 2021.

JOST, H. P. Tribology—origin and future. **Wear**, v. 136, n. 1, p. 1–17, 1990.

JUNIOR, R. B. **Estudo do ultrabaixo coeficiente de atrito no par cerâmico Si₃N₄–Al₂O₃ em água**. 2011: Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2011.

JÚNIOR, R. S. et al. Estudo comparativo do desgaste abrasivo por rejeito do carvão mineral na calha de direcionamento utilizando aço inoxidável aço DOMEX 700 e o polímero UHWM. **Anais do V Congresso Brasileiro de Carvão Mineral**, 2017.

KELLY, P. J.; ARNELL, R. D. Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. **Vacuum**, v. 56, n. 3, p. 159–172, 2000.

LEITE, M. V. et al. Desgaste e atrito da camada nitretada do aço ABNT H13 nitretado por plasma pulsado. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 6, n. 2, p. 67–72, 2013.

LEITE, R. V. D. M.; MARQUES, P. V. Estudo comparativo da resistência ao desgaste abrasivo do revestimento de três ligas metálicas utilizadas na indústria, aplicadas por soldagem com arames tubulares. **Soldagem & Inspeção**, v. 14, n. 4, p. 329–335, 2009.

LIMA, A. B. DE. **Efeitos da deposição de revestimentos de nióbio na taxa de corrosão do aço DOMEX 700**. 2022: Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2022.

MATTHEWS, A.; LEYLAND, A. Hybrid techniques in surface engineering. **Surface and Coatings Technology**, v. 71, n. 2, p. 88–92, 1995.

MAZUR, M. M. **Desenvolvimento de superfícies funcionais com filmes de titânio, para isoladores elétricos cerâmicos “outdoor”, utilizando a técnica de plasma pulsado “Magnetron Sputtering” (PMS)**. 2018: Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

MIELCZARSKI, R. G. **Estudo do comportamento tribológico e em tribocorrosão**

do aço inoxidável martensítico DIN 1.4110. 2015: Trabalho de Diplomação (Departamento de Metalurgia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.

RADI, P. A. et al. Tribologia, conceitos e aplicações. **Anais do 13º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XIII ENCITA**, v. Outubro, n. 01–04, p. 1–13, 2007.

SANTANA, B. C. **Influência do cromo e nióbio no desempenho quanto ao desgaste abrasivo em revestimentos duros.** 2017: Dissertação de Mestrado (Programa de Pós- Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo. Vitória, 2017.

SHARMA, S.; SANGAL, S.; MONDAL, K. On the optical microscopic method for the determination of ball-on-flat surface linearly reciprocating sliding wear volume. **Wear**, v. 300, n. 1–2, p. 82–89, 2013.

SILVA, R. C. L. DA. **Mecanismos de desgaste de poliuretano em ensaios de microabrasão.** 2006: Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2006.

SINATORA, A. **Tribologia: Um resgate histórico e o estado da arte.** São Paulo: Universidade de São Paulo, 2005.

SOARES, G. G. **Caracterização da junta dissimilar em solda de materiais do tipo estrutural e ARBL.** 2015. Dissertação de mestrado (Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação). Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, 2015.

SOUZA, G. B. DE. **Caracterizações Físicas, Químicas e de Bioatividade de Superfícies de Titânio Modificadas Para Aplicação Biomédica.** 2010: Tese (Programa de Pós- Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

SOUZA, R. M. F. DE; FERNANDES, L. E.; GUERRA, W. Nióbio. **Química Nova na Escola**, v. 35, n. 1, p. 68–69, 2013.

SSAB. **Data sheet 2008br Strenx® 700MC D/E 2017-04-20 Strenx®**, 2017. Disponível em: <<https://www.ssab.com/de-de/api/sitecore/Datasheet/GetDocument?productId=961589BF607D44A6869FCC20>

CDC8D0D2&language=pt-BR >. Acesso em: 1 set. 2022.

SSAB. **Aços de alta resistência microligados (HSLA) para redução de peso a um baixo custo**. Disponível em: <Aços de alta resistência microligados (HSLA) para redução de peso a um baixo custo>. Acesso em: 1 set. 2022.

STACHOWIAK, G. W. **Wear - materials, mechanisms and practice**. [s.l: s.n.].

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering tribology**. [s.l.] Butterworth-heinemann, 2013.

STLE. **Society of Tribologists and Lubrication Engineers (STLE)**. Disponível em: <<https://www.stle.org/>>. Acesso em: 29 ago. 2022.

STOLARSKI, T. A. **Tribology in Machine Design**. Oxford–UK: [s.n.].

TATSCH, P. J. Deposição de filmes finos. **V Oficina de Microeletrônica**, p. 22, 2000.

WEI, B. JIAN et al. Corrosion and wear resistance of AZ31 Mg alloy treated by duplex process of magnetron sputtering and plasma electrolytic oxidation. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)**, v. 31, n. 8, p. 2287–2306, 2021.

WIKIPEDIA. **Pulverização catódica**. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Pulveriza%C3%A7%C3%A3o_cat%C3%B3dica#cite_note-:0-3>. Acesso em: 7 set. 2022.

YAMASHITA, R. C. **Estudo Comparativo do Desgaste de Corpos de Prova em um Tribômetro Reichert Test**. 2019: Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2019.