

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM PROJETO E PROCESSOS DE
FABRICAÇÃO

Área de concentração: Projeto e Processos de Fabricação

Dissertação de Mestrado

DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA ENSAIO
DE TRIBOCORROSÃO E ANÁLISE DE REVESTIMENTOS
SUPERFICIAIS EM AÇO INOXIDÁVEL SUPER DUPLEX
SAF 2507 DEPOSITADOS POR PROCESSO TIP/TIG EM
BASE DE AÇO ASTM A36

Roberto Junior Gaspar Lesniesky

Passo Fundo

2021



CIP – Catalogação na Publicação

L637d Lesniesky, Roberto Junior Gaspar
Desenvolvimento de equipamento para ensaio de tribocorrosão e análise de revestimentos superficiais em aço inoxidável super duplex SAF 2507 depositados por processo TIP/TIG em base de aço ASTM [recurso eletrônico] / Roberto Junior Gaspar Lesniesky. – 2021.
5,197 Kb ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. William Haupt.
Dissertação (Mestrado em Projeto e Processos de Fabricação) – Universidade de Passo Fundo, 2021.

1. Aço - Corrosão. 2. Aço inoxidável. 3. Desgaste mecânico. I. Haupt, William, orientador. II. Título.

CDU: 621.9

Catalogação: Bibliotecário Luís Diego Dias de S. da Silva – CRB 10/2241

Roberto Junior Gaspar Lesniesky

**DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA ENSAIO DE
TRIBOCORROSÃO E ANÁLISE DE REVESTIMENTOS
SUPERFICIAIS EM AÇO INOXIDÁVEL SUPER DUPLEX SAF 2507
DEPOSITADOS POR PROCESSO TIP/TIG EM BASE DE AÇO ASTM
A36**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: 10 de dezembro de 2021.

Os componentes da Banca examinadora abaixo aprovaram a Dissertação:

Professor Doutor William Haupt
Orientador

Universidade de Passo Fundo (UPF). Programa de Pós-Graduação em Projeto e Processos de Fabricação PPGPPF

Professor Doutor Tiago Falcade

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais PPGE3M

Professor Doutor Marcos Vinicius Bressan

Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) Programa Eletrônica de Potência Eng. Elétrica

Professor Doutor Charles Leonardo Israel

Universidade de Passo Fundo (UPF). Programa de Pós-Graduação em Projeto e Processos de Fabricação PPGPPF

Dedico este trabalho aos meus pais, em especial a minha mãe Dinha “in memoriam” que me ensinou a jamais desistir dos meus sonhos, aos meus filhos Arthur e Leticia minhas motivações diárias, a minha esposa Diana que me acompanhou em cada etapa dessa trajetória, a minha irmã que está sempre ao meu lado, e a todos familiares e amigos que de alguma maneira contribuíram para essa conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a instituição UPF por oportunizar bolsas auxiliares para o desenvolvimento do Mestrado em Projetos e Processos de Fabricação (PPGPPF).

A equipe de laboratoristas e colaboradores da UPF que auxiliaram na confecção mecânica e instrumentação sempre que necessário.

Meus agradecimentos a instituição FIESC SENAI na qual estive desenvolvendo projetos no início do mestrado, a empresa Valpasa LTDA onde pude desenvolver estudos de casos aplicados a artigos científicos na área papeleira.

Agradeço a todos os professores do mestrado profissional que nos repassaram conhecimentos e metodologias, em especial ao meu orientador Dr. Willian Haupt que sempre me auxiliou no processo de desenvolvimento deste trabalho de forma a alcançarmos os objetivos e resultados estimados.

Se você quiser descobrir os segredos do Universo, pense em termos de energia, frequência e vibração.

Nikola Tesla.

RESUMO

Este trabalho apresenta o projeto de um tribômetro linear para análises de revestimentos de ligas metálicas de alta resistência à corrosão, validado analisando o aço inoxidável superduplex SAF 2507. O ensaio baseia-se na corrosão da superfície do material imerso em meio NaCl na concentração de 1 mol/L submetido a um potencial de corrente elétrica controlada por um potenciostato de acordo com normativa ASTM G61. O estudo avaliou depósitos da liga superduplex SAF 2507 em chapas base de aço carbono ASTM A36 depositados pelo processo TIP/TIG com frequências de oscilação do eletrodo de adição de 5 Hz, 10 Hz e 15 Hz. O estudo desenvolveu uma máquina para geração de atrito com objetivo de avaliar os efeitos da tribocorrosão durante o ensaio de voltametria e comparar a ensaios de voltametria realizados em amostras do mesmo material com superfície polida. As aplicações destes revestimentos abrangem indústrias de óleo e gás, química e indústrias de papel e celulose. Os resultados e análises compararam a microestrutura e características pós processamento do material analisado, os efeitos de corrosão por pites e frestas na microestrutura foram analisados através de microscopia, destacando-se os efeitos do atrito na ruptura de camada, formando pites na região de atrito e conseqüentemente reduzindo a resistência a corrosão. É pertinente destacar o adequado funcionamento eletromecânico do equipamento, bem como a instrumentação acoplada, permitindo controle de parâmetros de processo, o equipamento foi submetido a patente de invenção.

Palavras chave: Tribocorrosão, Corrosão. Aço Inoxidável Superduplex. Potenciostato. Microestrutura.

ABSTRACT

This work presents the design of a linear tribometer for the analysis of high corrosion resistance metallic alloy coatings, validated by analyzing the SAF 2507 superduplex stainless steel. The test is based on the surface corrosion of the material immersed in NaCl medium at a concentration of 1 mol/L subjected to an electric current potential controlled by a potentiostat in accordance with ASTM G61. The study evaluated SAF 2507 superduplex alloy deposits on ASTM A36 carbon steel base plates deposited by the TIP/TIG process with addition electrode oscillation frequencies of 5Hz, 10Hz and 15Hz. The study developed a machine to generate friction in order to evaluate the effects of tribocorrosion during the voltammetry test and compare to voltammetry tests performed on samples of the same material with a polished surface. Applications for these coatings span the oil and gas, chemical and pulp and paper industries. The results and analyzes compared the microstructure and post-processing characteristics of the material analyzed, the effects of pitting and crevice corrosion on the microstructure were analyzed by microscopy, highlighting the effects of friction on layer rupture, forming pits in the friction region and consequently reducing corrosion resistance. It is pertinent to highlight the proper electromechanical functioning of the equipment, as well as the coupled instrumentation, allowing control of process parameters, the equipment was submitted to a patent of invention.

Keywords: Tribocorrosion, Corrosion. Superduplex Stainless Steel. Potentiostat.

Microstructure.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - (a) Alimentação contínua. (b) Alimentação dinâmica	22
Figura 02 - Estrutura da dupla camada elétrica (West, 1970)	26
Figura 03 - Modelo conceitual de tribômetro.....	29
Figura 04 - Potenciostato - Galvanostato	30
Figura 05 - Esquema de um metal passivo sob condição de tribocorrosão.....	31
Figura 06 - Modelo de tribômetro	32
Figura 07 - Vista superior tribômetro	33
Figura 08 - Protótipo tribômetro.....	34
Figura 09 - Vista explodida tribômetro	35
Figura 10 - Protótipo movimentador	36
Figura 11 - Protótipo detalhe frontal movimentador	36
Figura 12 - Detalhe mola controle de pressão	37
Figura 13 - Célula de carga.....	38
Figura 14 - Detalhe acoplamento célula de carga.....	38
Figura 15 - Esferas de alumina.	39
Figura 16 - Driver DM556.	40
Figura 17 - Data sheet placa micro controladora Arduino UNO.....	41
Figura 18 - Equipamento tribômetro em fase de testes	41
Figura 19 - Programa desenvolvido para controle do dispositivo tribômetro	42
Figura 20 - Cordão de solda 15Hz.....	46
Figura 21 - Corpos de prova para ensaio de corrosão; a) Vista transversal do corpo de prova; b) Revestimento rebaixado por fresamento; c) Corpo de prova embutido.....	47
Figura 22 - Preparação dos corpos de prova para metalografia e microdureza.....	47
Figura 23 - Representação da linha para análise de microdureza no corpo de prova.....	48
Figura 24 - Página teste OCP software NOVA.	49
Figura 25 - Página teste OCP e corrente de passivação software NOVA	50
Figura 26 - Macrografias com ampliação 1,0x; a) Frequência de vibração 0Hz; b) Frequência de vibração 5Hz; c) Frequência de vibração 10Hz; d) Frequência de vibração 15Hz.	52
Figura 27 - Macrografias com ampliação 0,65x; a) Frequência de Vibração 0Hz; b) Frequência de Vibração 5Hz; c) Frequência de Vibração 10Hz; d) Frequência de Vibração 15Hz.	53
Figura 28 - Micrografia frequência de vibração de 0Hz; a) Ampliação de 50x; b) Ampliação de 200x.	56
Figura 29 - Micrografia frequência de vibração de 5Hz; a) Ampliação de 50x; b) Ampliação de 200x.	56
Figura 30 - Micrografia frequência de vibração de 10Hz; a) Ampliação de 50x; b) Ampliação de 200x.	57
Figura 31 - Micrografia frequência de vibração de 15Hz; a) Ampliação de 50x; b) Ampliação de 200x.	57
Figura 32 - Trincas no revestimento com frequência de vibração de 15Hz, ampliação 50x..	588
Figura 33 - Microestrutura obtida através do ataque com Behara, ampliação de 100x; a) Frequência de vibração de 15Hz; b) Frequência de vibração de 10Hz.	59
Figura 34 - Amostras soldadas para ensaio de corrosão.....	60
Figura 35 - Ensaio de corrosão	60

Figura 36 - Micrografia amostra soldada com frequência de vibração de 5Hz com ampliação de 100x	66
Figura 37 - Micrografia amostra soldada com frequência de vibração de 5Hz com ampliação de 200x	67
Figura 38 - Micrografia amostra soldada com frequência de vibração de 5Hz com ampliação de 500x	67
Figura 39 - Micrografia amostra soldada com frequência de vibração de 5Hz com ampliação de 1000x	68
Figura 40 - Micrografia amostra soldada com frequência de vibração de 10Hz com ampliação de 100x	69
Figura 41- Micrografia amostra soldada com frequência de vibração de 10Hz com ampliação de 200x	69
Figura 42 - Micrografia amostra soldada com frequência de vibração de 10Hz com ampliação de 500x	70
Figura 43 - Micrografia amostra soldada com frequência de vibração de 10Hz com ampliação de 1000x	70
Figura 44 - Micrografia amostra soldada com frequência de vibração de 15Hz com ampliação de 100x	71
Figura 45 - Micrografia amostra soldada com frequência de vibração de 15Hz com ampliação de 200x	72
Figura 46 - Micrografia amostra soldada com frequência de vibração de 15Hz com ampliação de 500x	72
Figura 47 - Micrografia amostra soldada com frequência de vibração de 15Hz com ampliação de 1000x	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Composição química SAF 2507.....	19
Tabela 02 - Composição química Aço ASTM A36	20
Tabela 03 - Engrenagem módulo 01 com 25 dentes.	43
Tabela 04 - Propriedades de eletrodo de deposição.	44
Tabela 05 - Variações na frequência de alimentação	45
Tabela 06 - Dados obtidos através das macrografias realizadas.	52
Tabela 07 - Valores de corrosão e pite obtidos em ensaios.....	61
Tabela 08 - Potenciais médios e desvio padrão ensaio de corrosão	61
Tabela 09 - Potenciais médios para ensaio de tribocorrosão.....	64
Tabela 10 - Comprativo entre ensaios de corrosão e tribocorrosão	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
$M\phi+$	<i>Potencial num ponto remoto dentro da solução</i>
$M\phi_0$	<i>Potencial do metal</i>
OCP	Potencial de Circuito Aberto
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SAF 2570	<i>Sandvik Austenite Ferrite 2570</i>
SDSS	<i>Super duplex Stainless Steel</i>
TIP/TIG	<i>Tungsten Inert Pulsed / Tungsten Inert Gas</i>
ZF	Zona Fundida
ZTA	Zona Térmica Afetada
PREN	<i>Pitting Resistance Equivalent Number</i>

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 - Faixa crítica de temperatura de pite (CPT) para várias ligas em 1M NaCl e temperatura crítica de corrosão em frestas (CCT) para várias ligas em 10% FeCl ₃	20
Gráfico 02 - Representação da dinâmica do movimento do arame.....	23
Gráfico 03 - Exemplo de curva de polarização.....	25
Gráfico 04 - Curvas de polarização potenciodinâmica.....	28
Gráfico 05 - Diluição dos Revestimentos.....	54
Gráfico 06 - Gráfico das larguras dos revestimentos.....	54
Gráfico 07 - Gráfico altura do reforço do cordão.....	55
Gráfico 08 - Amostra soldada por TIP-TIG com frequência 5Hz.....	62
Gráfico 09 - Amostra soldada por TIP-TIG com frequência 10Hz.....	63
Gráfico 10 - Amostra soldada por TIP-TIG com frequência 15Hz.....	63
Gráfico 11 - Amostra soldada por TIP-TIG com frequência 5Hz, submetido a ensaio de tribocorrosão.	65
Gráfico 12 - Amostra soldada por TIP-TIG com frequência 10Hz, submetido a ensaio de tribocorrosão.	68
Gráfico 13 - Amostra soldada por TIP-TIG com frequência 15Hz, submetido a ensaio de tribocorrosão	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
	OBJETIVO GERAL.....	18
	Objetivos específicos.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	AÇO INOXIDÁVEL SUPER DUPLEX	19
2.2	AÇO ASTM A36.....	21
2.3	MICROESTRUTURA DOS DEPÓSITOS	21
2.4	TIG AUTOMÁTICO COM ALIMENTAÇÃO DINÂMICA (TIP-TIG).....	22
2.5	CORROSÃO ELETROQUÍMICA	24
2.5.1	Eletrodo	25
2.5.2	Potencial de eletrodo	26
2.6	CURVAS DE POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA.....	28
2.7	TRIBÔMETRO.....	29
2.8	POTENCIOSTATO – GALVANOSTATO	29
2.9	ENSAIO DE TRIBOCORROSÃO.....	30
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	32
3.1	PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO TRIBÔMETRO.....	32
3.1.1	Sistema de transmissão	35
3.1.2	Sistema de pressão	37
3.1.3	Projeto de automação	40
3.2	ANÁLISE DO MATERIAL	44
3.3	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO ELETRODO DE DEPOSIÇÃO AÇO SUPERDUPLEX 2507.....	44
3.4	SOLDAGEM TIP/TIG GTAW.....	45
3.5	CORPOS DE PROVA	45
3.6	ANÁLISE METALOGRÁFICA E DE MICRODUREZA	47
3.7	METODOLOGIA PARA ENSAIO DE RESISTÊNCIA A CORROSÃO	48
3.8	TESTE DE OCP - POTENCIAL DE CIRCUITO ABERTO	49
3.9	METODOLOGIA PARA ENSAIO DE RESISTÊNCIA A TRIBOCORROSÃO	50
4	RESULTADOS	51

4.2	ANÁLISES MICROGRÁFICAS	55
5	ENSAIO DE CORROSÃO.....	59
6	ENSAIO DE TRIBOCORROSÃO.....	64
6.1	COMPARATIVO CORROSÃO E TRIBOCORROSÃO.....	74
7	CONCLUSÕES	75
8	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	77
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

1 INTRODUÇÃO

A aplicação de tecnologia e engenharia em ligas metálicas de alta resistência a corrosão empregados nas indústrias de petróleo e gás, processos químicos, papelarias, plantas de dessalinização, e produção de energia é fator motivacional de estudos sobre corrosão e tribocorrosão gerando desenvolvimento tecnológico (HUTTUNEN-SAARIVIRTA, Elina, et al., 2020).

O desgaste corrosivo pode ocorrer quando a água colide ou flui sobre uma superfície, a gravidade do desgaste corrosivo aumenta com a suspensão de partículas sólidas e a degradação do material é causada por processos mecânicos e eletroquímicos ou por ambos (BROWNLIE, F., et al., 2018).

O dano mecânico puro é atribuído à erosão e abrasão das partículas, a corrosão pura é causada por reações eletroquímicas e a sinergia é causada pela interação entre a erosão eletroquímica e danos da corrosão (BROWNLIE, F., et al., 2018).

Os aços inoxidáveis duplex têm uma boa combinação de propriedades mecânicas e de resistência à corrosão devido à sua microestrutura de ferrita e austenita, onde a resistência à corrosão é obtida através da formação de uma camada passiva rica em cromo (SHOCKLEY, J. Michael et al., 2017)

A microestrutura de fase dupla é benéfica para a resistência à corrosão (resistência à corrosão em fendas da fase de ferrita) e propriedades mecânicas (ductilidade e tenacidade da fase de austenita). O aço Inoxidável SAF2507 (UNS S32750) é conhecido por sua corrosão por pite excepcionalmente alta possuindo número de equivalência (PREN) superior a 40, colocando-o entre os aços inoxidáveis de classe “superduplex” (SDSS) (SHOCKLEY, J. Michael et al., 2017)

O sinergismo entre desgaste e corrosão pode causar maiores perdas de material do que aquelas de qualquer um dos processos isoladamente. Enquanto as relações entre tensões tribológicas e corrosão são complexos e desafiadores de modelar e quantificar, as contribuições relativas aos fatores mecânicos e químicos foram modeladas com algum sucesso na previsão de observações experimentais (SHOCKLEY, J. Michael et al., 2017).

A construção de um tribômetro linear para realização de ensaios de tribocorrosão em ligas metálicas de alta resistência para uso em laboratório é necessário para validar as aplicações e análises de corrosão e tribocorrosão de materiais, de forma a gerar matrizes de

ensaios e dados, capazes de auxiliar na caracterização e quantificação do comportamento de materiais sujeitos a meios agressivos.

O equipamento será utilizado em pesquisas na área de corrosão junto ao laboratório de materiais do PPGPPF.

Um tribômetro linear foi construído sob medida usando uma plataforma de arquitetura potencialmente inovadora em conjunto com um potenciostato e instrumentos de medição disponíveis, tendo como objetivo execução de ensaios e análises de materiais e revestimentos de superduplex SAF2570 depositados por processo de soldagem TIP/TIG sobre chapas de aço ASTM A36 e procedimentos análogos.

Foram avaliados os potenciais de pite e corrosão somente por voltametria utilizando potenciostato na primeira etapa e em seguida voltametria aliada ao processo de atrito superficial com carga controlada, através de célula de carga já testando e validando o tribômetro.

Os resultados obtidos nos ensaios foram avaliados quanto a resistência a corrosão e tribocorrosão do material depositado observando a predominância de pites nas regiões atritadas e não atritadas, onde através de tabelas e análises gráficas aponta-se as melhores configurações de valores de frequência para soldagem dos depósitos de SAF 2570 utilizando processo TIP/TIG.

OBJETIVO GERAL

Desenvolver projeto do equipamento tribômetro e validar análises de tribocorrosão sobre aço inoxidável superduplex depositado sobre chapa de aço ASTM A36 pelo processo TIP/TIG.

Objetivos específicos

- Projetar um equipamento para uso em ensaios de tribocorrosão de ligas metálicas de alta resistência a corrosão;
- Mediar manufatura e construção do equipamento;
- Validar o equipamento com uso em conjunto com o potenciostato;
- Desenvolver análises e ensaios microestruturais;
- Avaliar o comportamento dos mecanismos de corrosão e pites de diferentes revestimentos superficiais depositados por soldagem GTAW com alimentação dinâmica de eletrodo (TIP/TIG), comparando corrosão e tribocorrosão;
- Analisar as superfícies pós-ensaio de tribocorrosão em microscópio.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda metodologicamente o estudo e pesquisa dos materiais e métodos aplicados no desenvolvimento da célula de tribocorrosão, projetada para o laboratório de análises da UPF, bem como a análise de material Inoxidável Superduplex através dos métodos de ensaios de corrosão por pite e corrosão por pite com atrito.

2.1 AÇO INOXIDÁVEL SUPER DUPLEX

O uso deste aço liga formada por Fe-Cr-Ni-Co-Mo, apresenta características como alta resistência mecânica e elevada resistência a corrosão por pites e frestas se comparados com os aços inoxidáveis convencionais, porém não é imune a esses efeitos (SHOCKLEY, et. al. 2017).

Possui microestrutura bifásica mesclada entre camadas por matriz ferrítica e pela fase austenita, essa mistura de fases agrega características dos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos, dando boa resistência à fadiga, à tração e boa tenacidade, além disso uma boa soldabilidade e alta resistência a corrosão sob tensão (MARTINS e CASTELETTI, 2007).

Tabela 1 - Composição química SAF 2507.

C	Cr	Ni	Mo	N	Others
0.020	25	7	4.0	0.27	S = 0.001
PREN = [Cr %] + 3.3 [Mo %] + 16 [N %] ≥ 40					

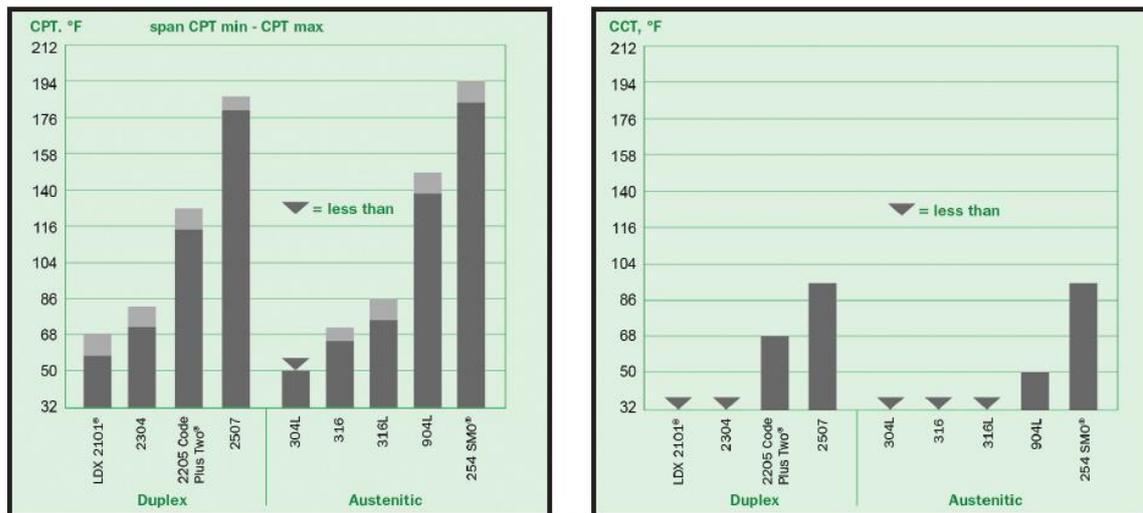
Fonte: Folha de especificação 2507

A diferença entre uma liga de aço duplex para um superduplex está na sua resistência a corrosão por pites, onde no aço superduplex essa resistência é maior. A resistência a corrosão por pites ou PREN pode ser quantificada, de acordo com a norma ASTM A890/A890M podendo ser calculada através da seguinte equação (1).

$$\text{PREN} = \%Cr + 3,3 \cdot (\%Mo + 0,5 \cdot \%W) + 16 \cdot \%N \quad (1)$$

No gráfico abaixo estão listados comparativos de resistência a pite por temperatura comparando o aço inoxidável superduplex SAF 2507 com outras ligas metálicas de alta resistência;

Gráfico 1 - Faixa crítica de temperatura de pite (CPT) para várias ligas em 1M NaCl e temperatura crítica de corrosão em fresta (CCT) para várias ligas em 10% FeCl₃.



Fonte: Folha de especificação 2507

2.2 AÇO ASTM A36

Dentre os aços estruturais existentes atualmente, um dos mais utilizados e conhecidos é o ASTM A-36, que é classificado como um aço carbono de média resistência mecânica e boa soldabilidade, devido ao seu baixo teor de carbono.

Estes aços apresentam uma excelente capacidade de unir-se a revestimentos aplicados sobre o mesmo e de acordo com Colpaert (2008), o aço ASTM A-36 é um exemplo clássico de aço estrutural de grãos finos, é um aço ferrítico de baixa liga e baixo teor de carbono.

Tabela 2 - Composição química Aço ASTM A36.

AÇO ASTM A 36 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)					
C	Mn	P	S	Si	Cu
0,26 (máx)	...	0,04 (máx)	0,05 (máx)	0,4 (máx)	0,20 (min)

Fonte: Próprio Autor (2020)

Um ponto negativo deste material é a sua baixa resistência à corrosão quando expostos a ambientes oxidantes, por isso, geralmente aparecem revestidos por materiais mais nobres, que diminuem drasticamente os efeitos do contato direto deste metal com os meios agressivos Colpaert (2008).

2.3 MICROESTRUTURA DOS DEPÓSITOS

Na soldagem de revestimentos ocorrem diversos ciclos térmicos, e com isso aliado a soldagem com metal de base e metal de revestimento de diferentes composições, pode ocasionar regiões com diferentes microestruturas, uma vez que o aquecimento faz com que ocorra a austenitização do material que se formam através dos limites de fusão e na zona termicamente afetada, gerando transformações por difusão ou cisalhamento de fases durante o resfriamento (SHAMANIAN et al. 2014).

O aquecimento e o resfriamento ocasionados na realização da soldagem de revestimento com o aço inox, podem fazer com que ocorram modificações na microestrutura original do material, podendo levar à precipitação da austenita secundária e de fases intermetálicas na Zona Fundida (ZF). As propriedades das soldas neste caso têm uma maior influência pelo tamanho da Zona Fundida (ZF) do que pelo equilíbrio de fases ferrita austenita (NUNES et al. 2012).

Na realização de revestimento com materiais de diferentes composições como o caso de um substrato de aço baixa liga e alta resistência com o revestimento de aço inox superduplex, as alterações na microestrutura devem ser cuidadosamente controladas, uma vez que ocorre a diluição e a união do cromo do revestimento com o carbono do substrato, gerando regiões com baixos teores de cromo (EGHLIMI *et al.* 2014).

As alterações no substrato são predominantes no aumento do tamanho dos grãos, na austenitização devido ao aquecimento e na transformação dessa austenita em ferrita, ferrita poligonal, martensita ou bainita granular.

Devido as diferenças nos valores de condução térmica entre o substrato e o material de revestimento, onde para o substrato esse valor é maior que no material de revestimento, grandes grãos de austenita se formam na zona termicamente afetada (ZTA), com o resfriamento essa austenita se transforma em ferrita grossa e perlita fina, podendo gerar ferritas proeutetóides nos contornos de grãos, isso ocorre devido ao revenimento não controlado da região soldada (EGHLIMI *et al.* 2014).

Como o metal de revestimento é mais rico em cromo, o qual tem uma maior afinidade ao carbono, átomos de carbono migram para a zona parcialmente fundida deixando uma região com baixo teor de carbono, denominada região sem carbono ou descarbonetada, essa região é resultado da decomposição da perlita devido a formação de grandes grãos de ferrita durante a soldagem (EGHLIMI *et al.* 2014).

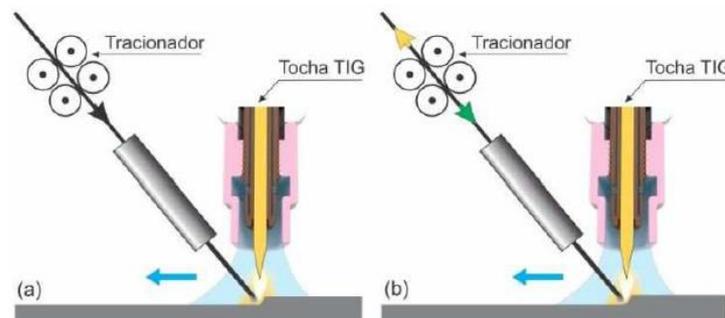
A proporção da diluição afeta diretamente o modo de solidificação do metal fundido, com isso pode ocorrer uma microestrutura composta de austenita, martensita e ferrita na zona de transição (EGHLIMI *et al.* 2014).

Ocorre então a difusão do carbono do substrato no metal revestido, no entorno da fusão o teor de cromo diminui, pois este se liga com o carbono formando carbonetos de cromo, isso ocorre mais facilmente devido as composições dos materiais de substrato e de revestimento serem diferentes (EGHLIMI *et al.* 2014).

2.4 TIG AUTOMÁTICO COM ALIMENTAÇÃO DINÂMICA (TIP-TIG)

O processo com alimentação dinâmica difere do contínuo por possuir um sistema micro controlado que faz com que o tracionador do arame aplique um movimento de avanço e recuo ao eletrodo, esse sistema é definido pelo usuário onde é determinada a velocidade e os tempos de avanço e recuo, resultando em uma velocidade média de avanço positiva. Um esquema comparativo do sentido de avanço e alimentação do processo de soldagem dinâmico ao processo contínuo, pode ser visto através da Figura 1 (PAES, 2016).

Figura 1 - (a) Alimentação contínua. (b) Alimentação dinâmica.



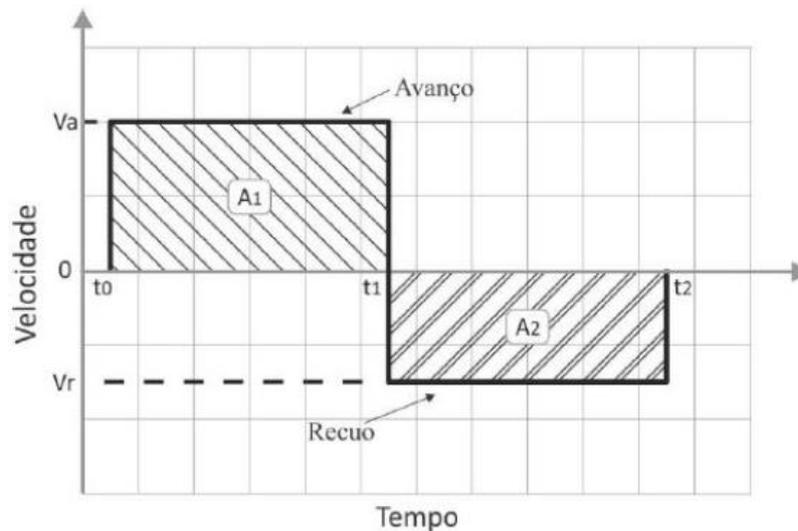
Fonte: Adaptado de PAES (2016)

Na soldagem manual o soldador realiza o movimento de avanço e recuo do metal de adição, proporcionando uma melhor absorção de energia do arco pela poça de soldagem, com isso é possível obter um melhor controle nas propriedades do cordão depositado (PAES, 2016).

De acordo com Paes, 2016 é possível imitar esse movimento através do aumento ou controle da frequência de alimentação do arame para valores em torno de 2, 5 e até 15Hz conseguindo simular uma soldagem manual. Quanto maior o valor de frequência, a alimentação do eletrodo se assemelha a uma vibração contribuindo para o aumento da velocidade de soldagem.

A partir do Gráfico 2 pode-se ter uma análise mais detalhada do movimento de avanço e recuo do eletrodo, conhecendo o conceito cinemático do movimento do eletrodo de adição (PAES, 2016).

Gráfico 2 - Representação da dinâmica do movimento do arame.



Fonte: Adaptado de PAES (2016)

Atualmente, a técnica de alimentação dinâmica é fornecida por algumas empresas, que anunciam vantagens como maior produtividade, redução da porosidade e o aumento do umedecimento do cordão de solda, principalmente em nobres materiais como ligas de níquel e aços inoxidáveis (PAES, 2016).

2.5 CORROSÃO ELETROQUÍMICA

De acordo com Wollinec, 2003 os fenômenos de corrosão de metais envolvem uma grande variedade de mecanismos que, no entanto, podem ser reunidos em quatro grupos, a saber:

- Corrosão em meios aquosos (90%).
- Oxidação e corrosão quente (8%).
- Corrosão em meios orgânicos (1,8%).
- Corrosão por metais líquidos (0,2%).

Entre os parêntesis está indicada, de forma estimada, a incidência de cada um dos tipos de corrosão. Nota-se que, de longe, a corrosão em meios aquosos é a mais comum, e isto é esperado, uma vez que a maioria dos fenômenos de corrosão ocorre no meio ambiente, no qual a água é o principal solvente (WOLYNEC, 2003).

Atualmente aceita-se que os dois primeiros grupos são caracterizados por processos essencialmente eletroquímicos. Na presente obra, a preocupação básica é com a corrosão em meios aquosos. Dessa forma, para a sua compreensão, é essencial o conhecimento dos fundamentos de eletroquímica em meio aquoso, a seguir apresentados (WOLYNEC, 2003).

Uma reação é considerada eletroquímica se ela estiver associada a uma passagem de corrente elétrica através de uma distância finita, maior do que a distância inter-atômica. Esta passagem de corrente envolve o movimento de partículas carregadas: íons, elétrons ou ambos (WOLYNEC, 2003).

Dessa forma, na maioria das reações, que se manifestam em presença de uma superfície metálica, ocorre esta passagem de corrente através do metal, e a reação é eletroquímica em sua natureza. Como na corrosão de um metal a superfície metálica está sempre presente, as reações básicas responsáveis pela corrosão são eletroquímicas (WOLYNEC, 2003).

Em materiais como os aços inoxidáveis que são denominados metais que se passivam, existe uma película de óxido em sua superfície, a qual tem uma grande resistência a corrosão (WOLYNEC, 2003).

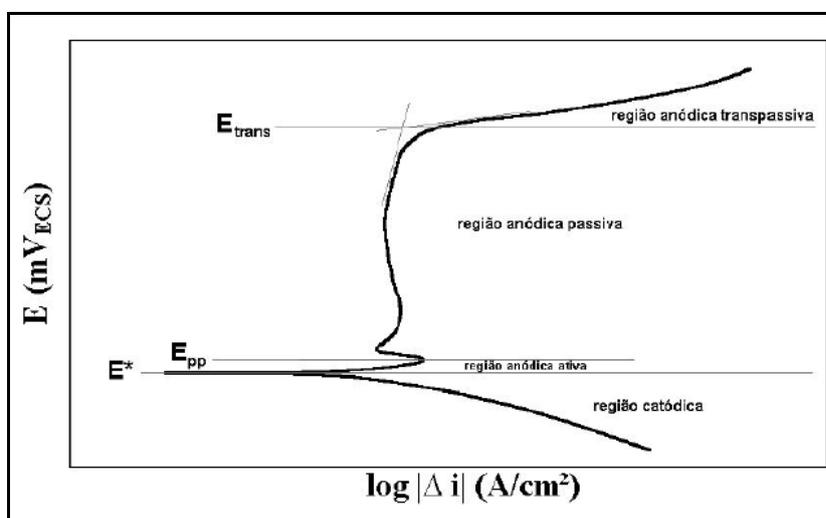
Um metal, que sofre corrosão numa dada solução de baixa resistividade elétrica, assume um potencial característico, designado como potencial de corrosão, esse potencial é dado pela

intersecção da curva de polarização anódica com a de polarização catódica (WOLYNEC, 2003).

Para um ensaio de corrosão eletroquímica nesse material, no início os valores de corrente são baixos, indicando uma pequena reação de dissolução, já quando a camada passiva é dissolvida a corrente aumenta rapidamente indicando o início do processo corrosivo (WOLYNEC, 2003).

Esse exemplo pode ser visualizado através da Gráfico 3, onde a região anódica transpassiva indica o potencial para a formação de pites (WOLYNEC, 2003).

Gráfico 3 - Exemplo de curva de polarização.



Fonte: Adaptado de MAGNABOSCO (2001)

O potencial de corrosão é um dos parâmetros eletroquímicos de mais fácil determinação experimental. De fato, como se trata de um potencial assumido pelo metal, é suficiente proceder a medida direta desse potencial com relação a um eletrodo de referência (WOLYNEC, 2003).

2.5.1 Eletrodo

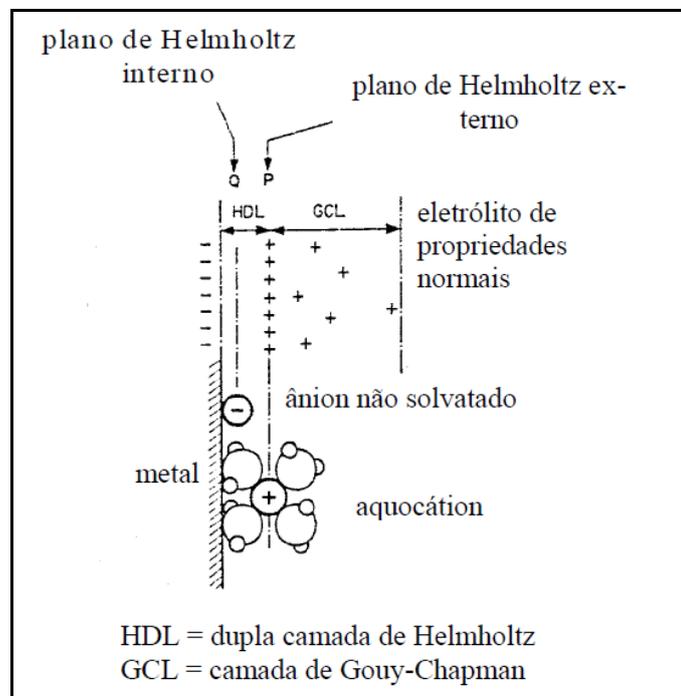
Quando um metal é mergulhado numa solução aquosa, imediatamente se inicia a reação, com formação dos íons dentro da solução e com a permanência dos elétrons dentro do metal.

Estes elétrons carregam eletricamente o metal e criam um campo elétrico dentro da solução, com que faz que os íons, que são carregados positivamente, tendam a ficar retidos na vizinhança da interface metal-solução (WOLYNEC, 2003).

Após um tempo relativamente curto (fração de segundo) estabelece-se uma situação de equilíbrio ou estado estacionário, caracterizada pela formação da chamada dupla camada (WOLYNEC, 2003).

A estrutura mais aceita de uma dupla camada elétrica (West, 1970) é a indicada na Figura 2.

Figura 2 - Estrutura da dupla camada elétrica (West, 1970).



Fonte: Wolyneec (2003)

Um metal que forma uma dupla camada elétrica é chamado de eletrodo.

2.5.2 Potencial de eletrodo

O exame de uma dupla camada elétrica mostra claramente que na interface metal-solução há uma distribuição de cargas elétricas tal que uma diferença de potencial se estabelece entre o metal e a solução (WOLYNEC, 2003).

A magnitude dessa diferença de potencial é dependente do sistema em consideração e a sua determinação apresenta interesse tanto de ordem científica como técnica. Seja o $M\phi^0$ o potencial do metal e $M\phi^+$ o potencial num ponto remoto dentro da solução. Assim, a diferença de potencial através da dupla camada elétrica será:

$${}^0\Delta^+\phi_M = \phi_{M^0} - \phi_{M^+} \quad ,$$

ou

$${}^+\Delta^0\phi_M = \phi_{M^+} - \phi_{M^0} \quad ,$$

donde

$${}^0\Delta^+\phi_M = -{}^+\Delta^0\phi_M \quad . \quad (2)$$

A medida do valor absoluto dessa diferença de potencial é inviável, pois qualquer que seja o sistema de medida adotado, o mesmo implicará a imersão dentro da solução de um terminal metálico que irá dar origem a um outro eletrodo (WOLYNEC, 2003).

Assim, o que se faz é medir uma diferença de potencial relativa com relação a um eletrodo de referência. Convencionou-se, assim, definir um eletrodo de referência padrão, de potencial “zero”, com relação ao qual todas as medidas de potencial seriam referidas, porém não necessariamente medidas (WOLYNEC, 2003).

O procedimento padrão primeiramente desenvolvido foi o eletrodo padrão de hidrogênio, porém por causa de sua complexidade que consiste em uma barra de platina platinizada imersa numa solução ácida padrão (1,2 M HCl, para a qual a atividade do íon H^+ é unitária, isto é, $1H^+ aH^+$), mantida a 25 °C e através da qual se borbulha hidrogênio purificado a 1 atm de pressão, são utilizados eletrodos de referência secundários como:

- Eletrodo de calomelano (o seu potencial com relação ao eletrodo padrão de hidrogênio é igual a +0,242 V a 25°C)
- Eletrodo de prata-cloreto de prata (O seu potencial com relação ao eletrodo padrão de hidrogênio é igual a +0,2225 V a 25 °C).
- Eletrodo de cobre-sulfato de cobre (O seu potencial com relação ao eletrodo padrão de hidrogênio é igual a +0,2225 V a 25 °C.)

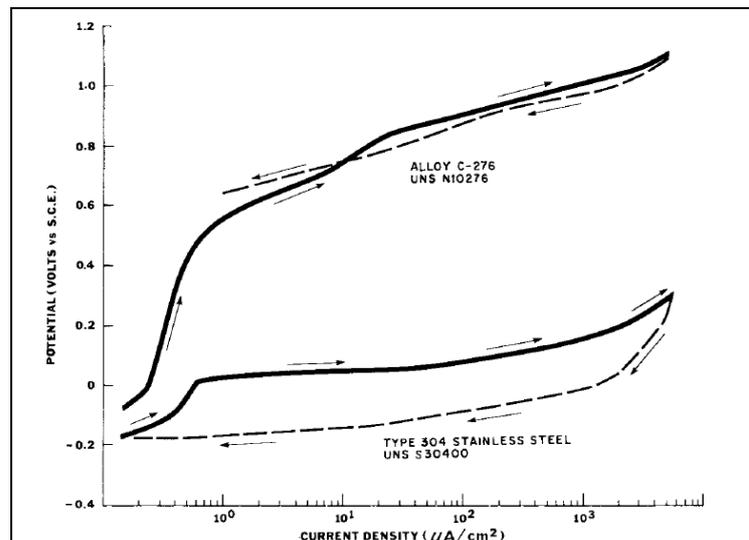
Qualquer potencial de um eletrodo cuja medida tenha sido feita em relação a um eletrodo de referência, tanto primário como secundário, é designado como potencial de eletrodo (WOLYNEC, 2003).

2.6 CURVAS DE POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA

De acordo com o item 6.9.1 da normativa G61 o início da corrosão localizada é geralmente marcado por rápido aumento da corrente anódica em potenciais abaixo do potencial de evolução de oxidação.

O item 7.1 da mesma normativa citada demonstra as curvas de polarização que indicam o início e a propagação da corrosão localizada comparadas em dois materiais, tendo a liga C-276 melhores características de resistência a corrosão por pite que o aço inoxidável 304. Conforme apresentado no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Curvas de polarização potenciodinâmica.



Fonte: Normativa G61

De acordo com a normativa G61 este método de teste fornece um procedimento para a realização de medidas de polarização potenciodinâmica para determinar suscetibilidade à corrosão localizada (pites e fendas corrosão) para ligas à base de ferro, níquel ou cobalto ambiente clorídricos.

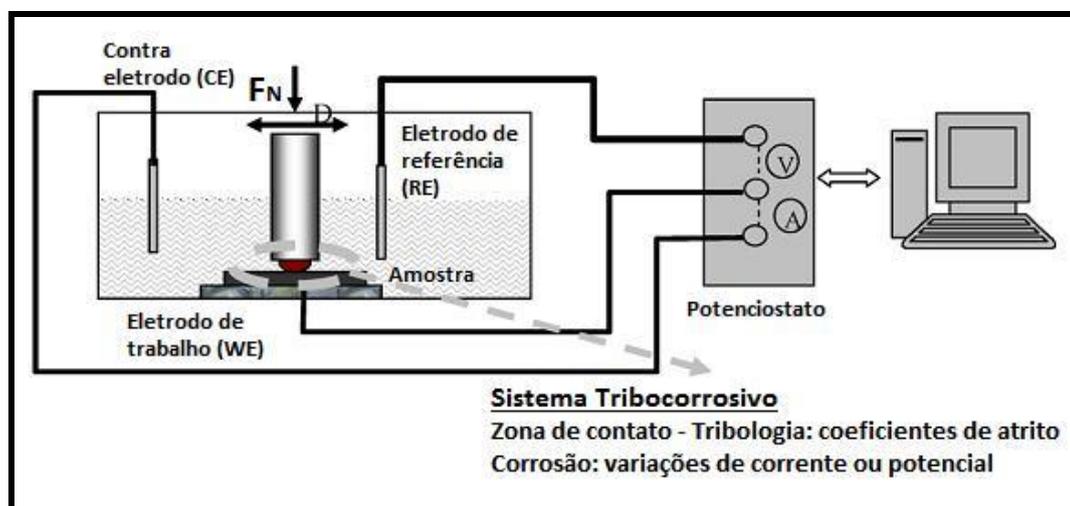
Este método de teste também descreve um procedimento experimental que pode ser usado para verificar técnica experimental e instrumentação.

De acordo com o item 4.1.1 da normativa G61 a célula deve ter uma capacidade de cerca de 1 L e deve ter entrada adequada para permitir a introdução de eletrodos, possuir saída para gases e um termômetro.

2.7 TRIBÔMETRO

Neste dispositivo, o contato tribológico é realizado a partir de uma esfera de óxido de silício (Al_2O_3) de 6mm de diâmetro, gerando uma trilha de desgaste com 10mm de comprimento. Na figura 3 estão representados detalhes da concepção do equipamento de tribocorrosão incluindo o potenciostato que é o equipamento responsável por gerar os níveis de tensão necessários para o ensaio, além de um computador acoplado a este para obtenção dos resultados via software.

Figura 3 - Modelo conceitual de tribômetro.



Fonte: UFRGS (2020)

2.8 POTENCIOSTATO – GALVANOSTATO

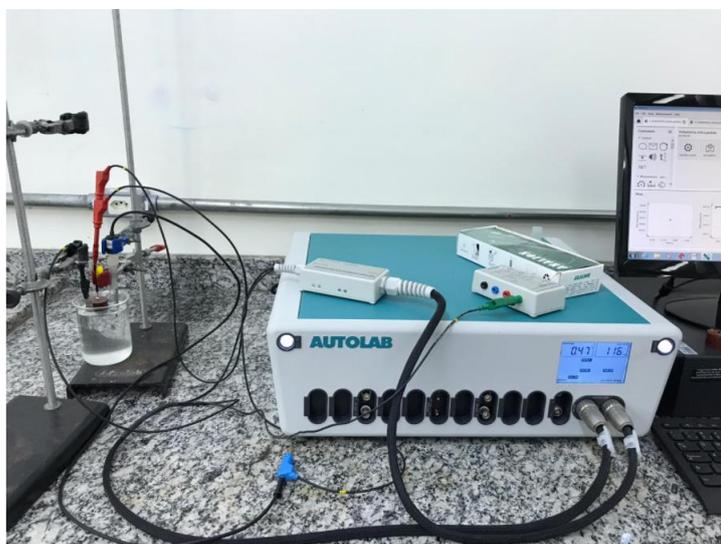
Nos ensaios de corrosão foram utilizados um potenciostato modelo METROHM Autolab PGSTAT128N. Estes instrumentos podem ser conectados a qualquer dispositivo

externo. E graças ao poderoso software NOVA, possui total controle de todas as características dos seus ensaios.

Projetado para uma ampla gama de aplicações eletroquímicas, desde medições de corrosão até a caracterização de dispositivos de armazenamento de energia, este instrumento é ideal para aplicações eletroquímicas onde o desempenho é importante.

É possível personalizar e aprimorar os recursos do PGSTAT128N adicionando um ou mais dos muitos módulos ou acessórios opcionais disponíveis.

Figura 4 - Potenciostato – Galvanostato.



Fonte: Laboratório de corrosão UPF (2020)

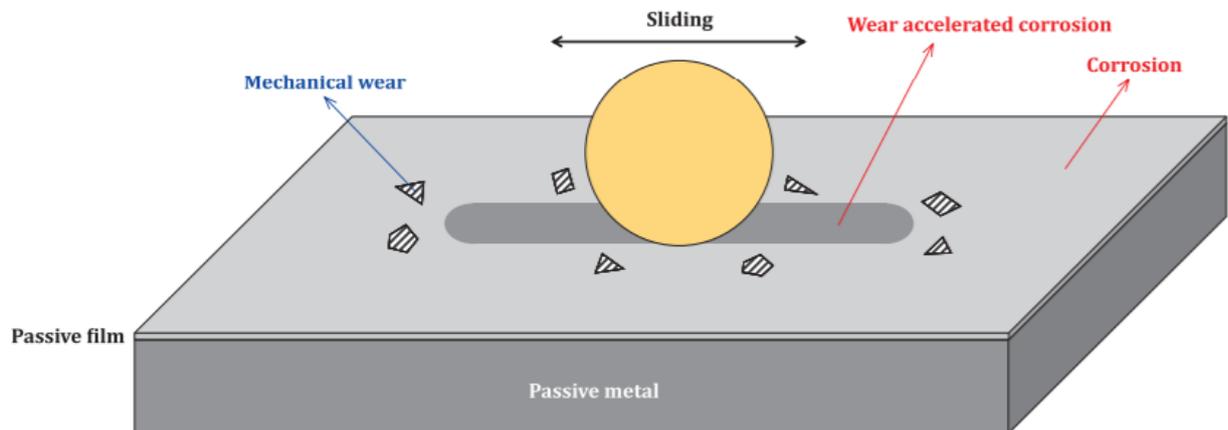
2.9 ENSAIO DE TRIBOCORROSÃO

A interação entre desgaste e corrosão, ou seja, a tribocorrosão estuda a perda geral de material que abrange não apenas o arrancamento de partículas metálicas como encontrado no desgaste por abrasão, mas também o desprendimento de filmes de óxido de metal através da interação acelerada de íons, conforme esquema apresentado na Figura 5 (CAO; MISCHLER, 2018).

O contínuo ciclo de remoção do filme passivo no ensaio, seguido pelo recrescimento (repassivação) espontâneo do filme geralmente acelera significativamente a corrosão, e devido à alta complexidade do sistema de tribocorrosão de metais repassivadores, a modelagem de

tribocorrosão levando em consideração todos os efeitos e fatores tem sido melhorada com as técnicas de medições eletroquímicas (CAO; MISCHLER, 2018).

Figura 5 - Esquema de um metal passivo sob condição de tribocorrosão.



Fonte: Cao; Mischler (2018, p. 129)

De acordo com Cao; Mischler et. al. (2018) uma justificativa teórica da lei de oxidação logarítmica, assume que o transporte de elétrons através do filme de óxido limita a taxa de crescimento do filme passivo.

De acordo com César *et. al.* (2011), ensaios de tribocorrosão em ligas superduplex SAF 2570 sob cargas de 2 N e 10 N não demonstraram mudanças bruscas quanto ao regime de aumento da deterioração superficial, porém em regimes de pressão acima de 7 N o comportamento muda de desgaste adesivo para abrasivo e corrosivo.

Segundo Shockley et. al. (2017) testes de desgaste em SAF 2570 foram realizados a 1 mm/s de velocidade de deslizamento com uma amplitude de 10 mm em regime de 100 ciclos ou 3 ciclos para determinar a iniciação de degradação induzida por tribocorrosão.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

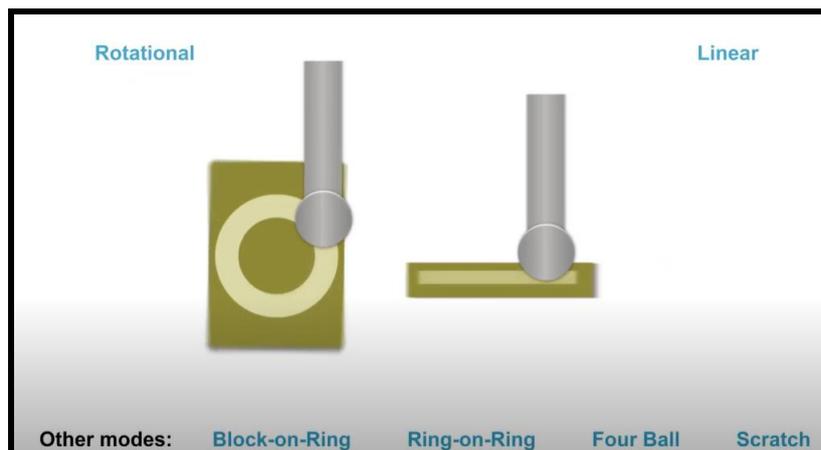
Neste capítulo serão abordados os procedimentos aplicados ao projeto e desenvolvimento do equipamento tribômetro e também como foram elaborados a preparação e os ensaios desde a análise microscópica e caracterização da deposição até os ensaios de corrosão e tribocorrosão utilizando o tribômetro.

3.1 PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO TRIBÔMETRO

Para desenvolver o projeto do equipamento a ser construído foram inicialmente estudados e analisados os tipos de equipamentos existentes e qual deveria ser sua concepção funcional para atender as demandas de análises de acordo com normativas específicas e validadas.

O modelo escolhido foi o tribômetro de movimentação linear conforme mostrado na figura a direita logo abaixo, e o motivo da escolha se deu baseada nos tipos de amostragem padrão do laboratório UPF.

Figura 6 - Modelo de Tribômetro.

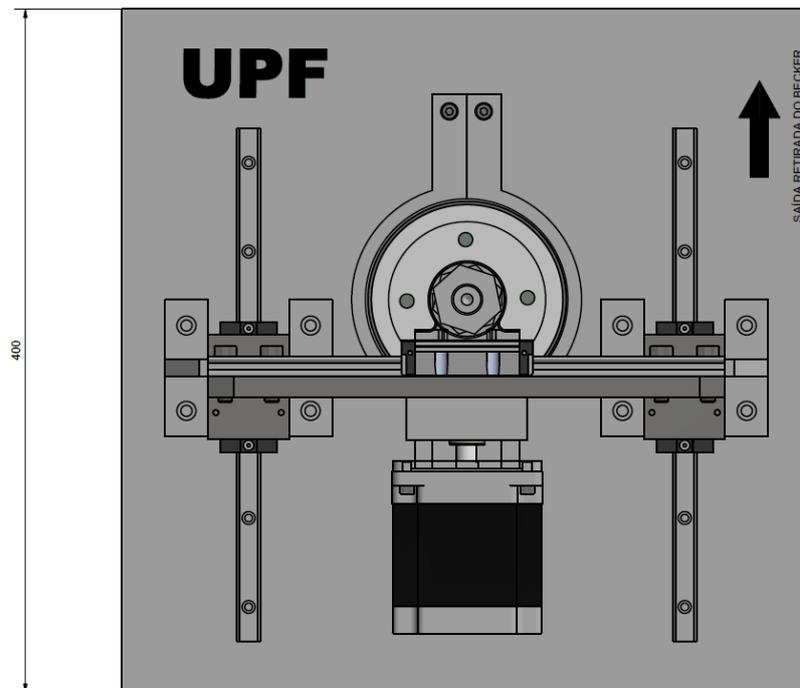


Fonte: Nanovea (2020)

O protótipo mostrado na Figura 7 foi modelado de forma a atender quesitos como, movimentação nos eixos x, y e z através de guias lineares que permitem o deslocamento suave

necessário para a ponta de desgaste efetuar o trabalho de atrito, além de possuir a possibilidade de desmontagem e retirada do Becker de ensaio pela extremidade conforme mostrado na vista superior da figura a seguir.

Figura 7 - Vista superior tribômetro.



Fonte: Próprio Autor (2020)

É importante salientar que o ensaio de corrosão é suscetível a formação de gases ou condensados de cloreto, por isso na seleção dos materiais foi levado em consideração que estes devem ser resistentes a corrosão, dando uma vida útil maior ao equipamento.

Dentre os materiais adotados temos aço inoxidável AISI 316L, alumínio e partes feitas de polímeros como o bastão porta esferas.

Partes de contato que são de aço carbono devem ser protegidas com graxa especial para movimentadores e mantas poliméricas.

Um dos pré-requisitos que também foi levado em consideração é que o equipamento deveria ser compacto dado o espaço destinado a ele, assim como a questão do investimento para sua construção.

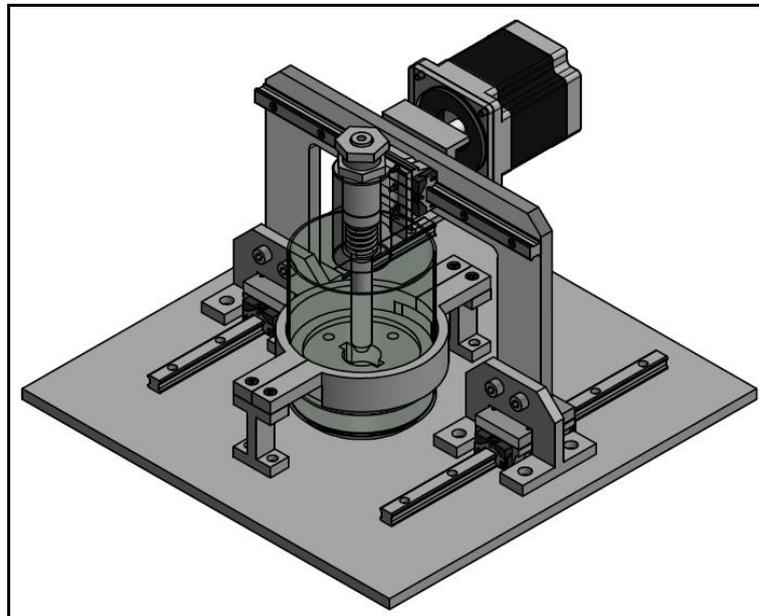
A concepção estrutural e funcional aplicada neste projeto possui características diferenciadas dos equipamentos pesquisados e encontrados no mercado nacional e nas bases do

INPI, um exemplo disso é o sistema de pressão com mola que se diferencia dos demais sistemas existentes, assim como a aplicação de motor de passo no sistema de movimentação o qual depende de um drive de acionamento e controle.

A figura 8 mostra a montagem do conjunto contendo todos os dispositivos já citados e a figura 9 demonstra uma vista explodida identificando cada peça do conjunto bem como seu esquema na montagem.

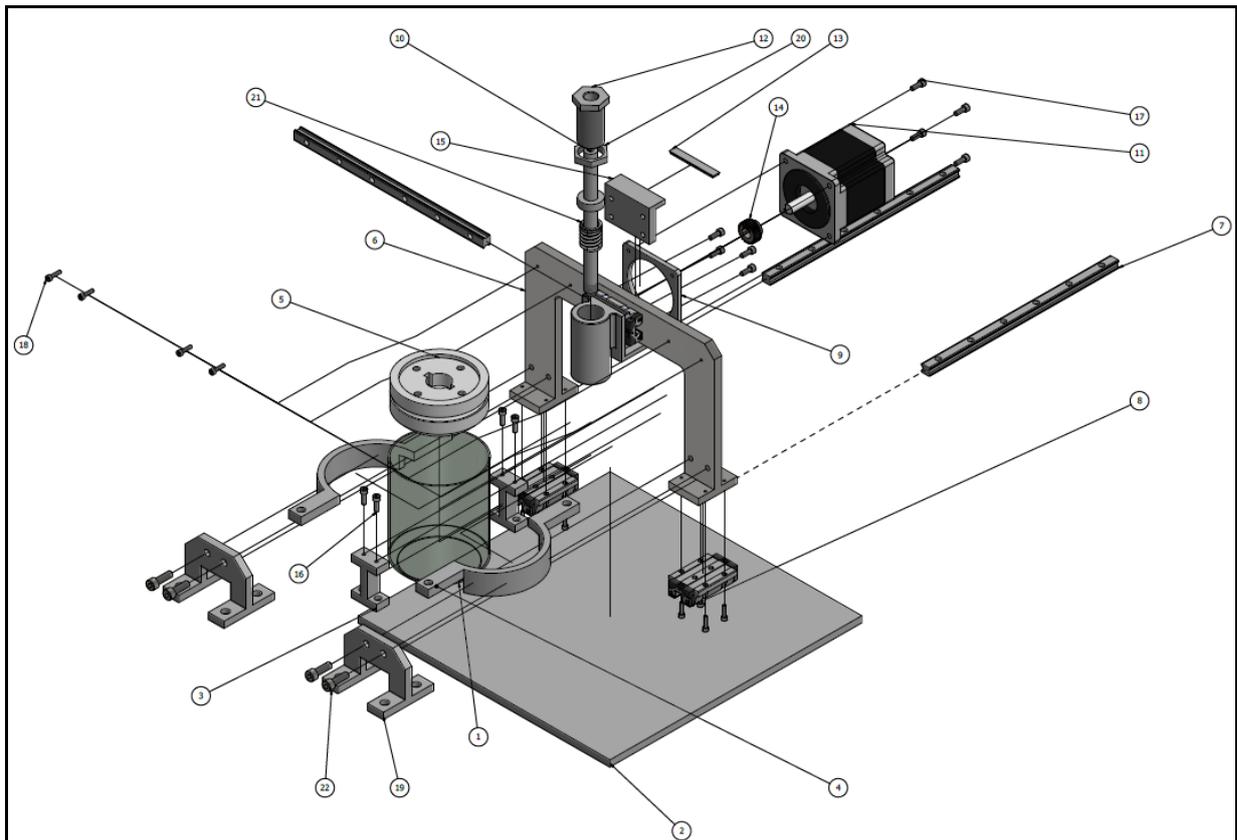
As interferências mecânicas entre componentes funcionais foram projetadas utilizando software de desenho Autodesk Inventor, que permite analisar por simulação os ajustes mecânicos.

Figura 8 - Protótipo tribômetro.



Fonte: Próprio Autor (2020)

Figura 9 - Vista explodida tribômetro



Fonte: Próprio Autor (2020)

Após validação da primeira fase do projeto o próximo passo foi o dimensionamento dos elementos mecânicos de forma a desenvolver um sistema com capacidade de movimentação controlada de acordo com velocidades usuais em ensaios.

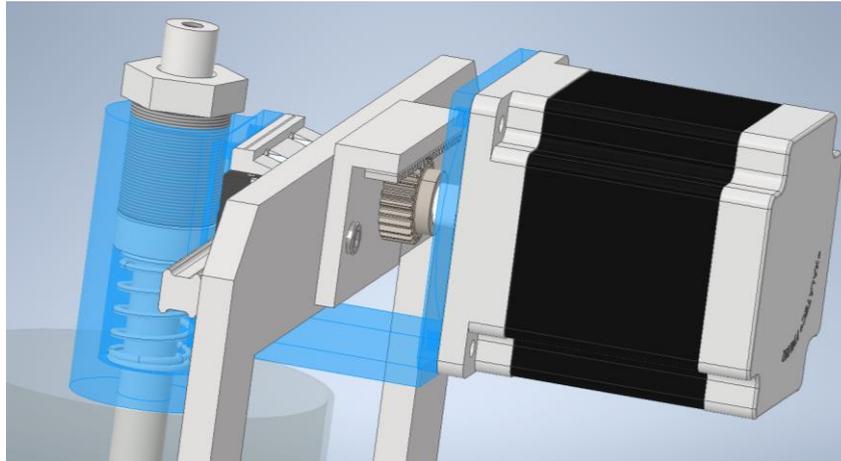
3.1.1 Sistema de transmissão

Para a construção de um sistema de movimentação rígido e controlado foi dimensionado um motor de passo capaz de ser controlado eletronicamente via software, movimentando-se no eixo y onde acontecerá o desgaste na superfície da amostra.

O motor foi dimensionado para atender cargas superiores ao que será aplicada na análise em questão, com intuito de possibilitar ensaios com pressões superiores que podem chegar até 6kg.

Na figura a seguir são mostrados detalhes do acionamento como o motor a engrenagem e a cremalheira.

Figura 10 - Protótipo movimentador.

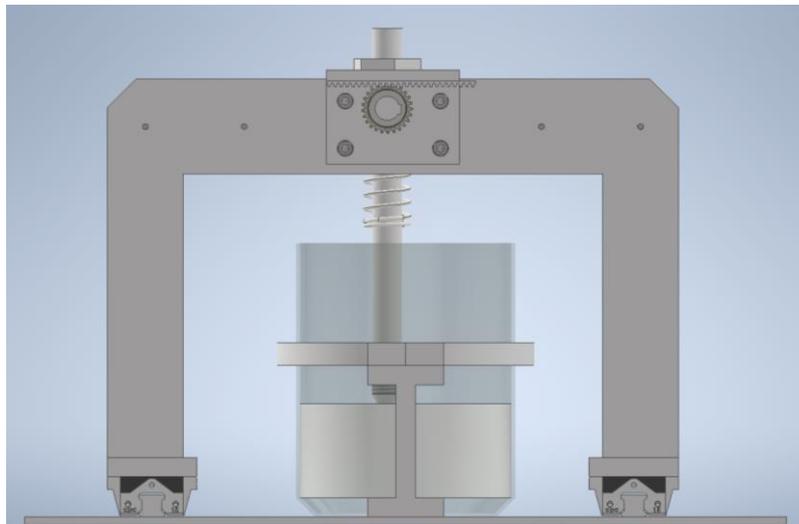


Fonte: Próprio Autor (2020)

Na figura a seguir são mostrados detalhes de fixação do flange porta cremalheira e da engrenagem onde o motor de passo foi suprimido para melhor visualização da disposição dos elementos.

O deslocamento do conjunto movimentador deve possuir engrenamento suave evitando vibrações, por isso o material selecionado para a cremalheira foi o polímero de alta resistência.

Figura 11 - Protótipo detalhe frontal movimentador.



Fonte: Próprio Autor (2020)

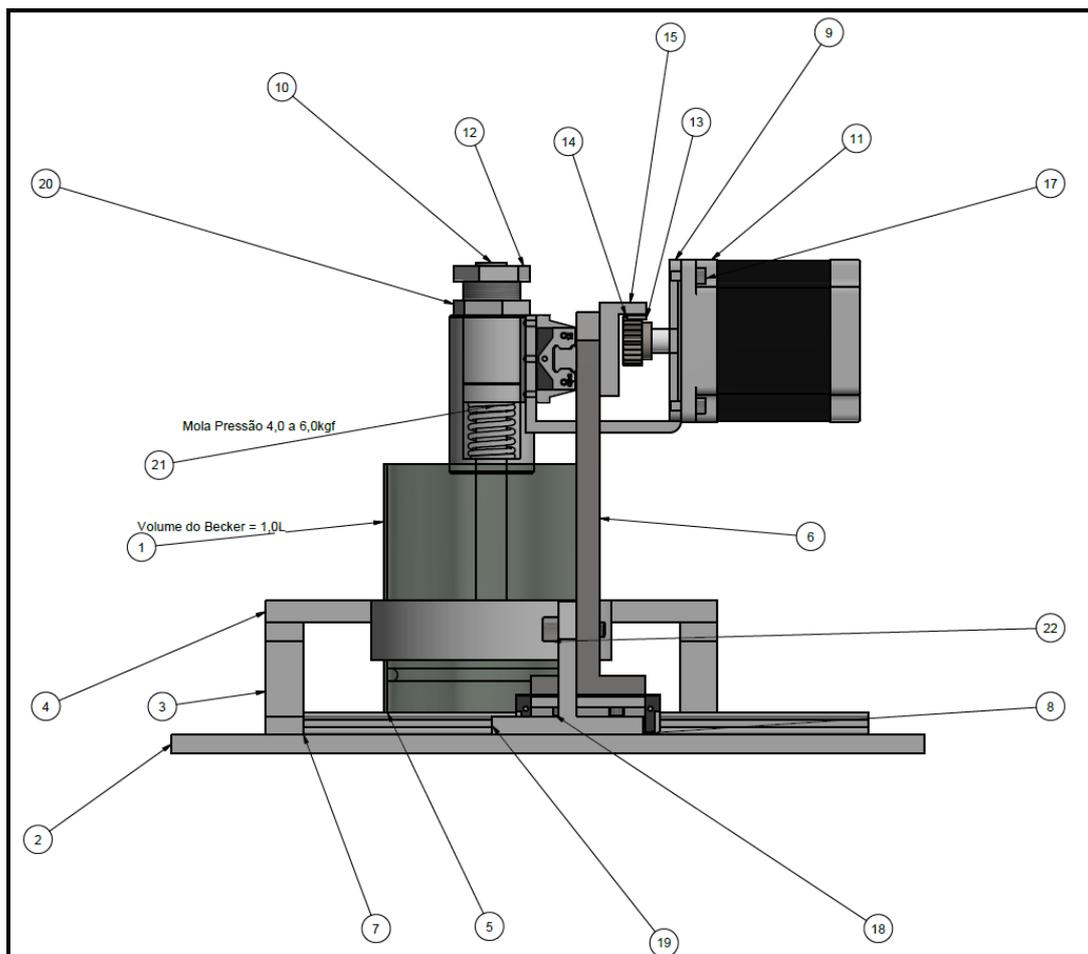
3.1.2 Sistema de pressão

O projeto do sistema de pressão e atrito foi desenvolvido de modo a possuir um suporte para o elemento de desgaste (bola de silício/alumina), suporte e estrutura para o recipiente para o meio fluido onde acontecerão os efeitos eletroquímicos capazes de acelerar o processo de erosão, e ainda a estrutura base do carro movimentador.

Na figura a seguir são mostrados com balões de identificação todas as peças detalhadas no sistema, onde no balão número 21 é possível visualizar a mola de pressão de atrito que deverá ser monitorada através de uma célula de carga modelo U9B da marca HBM apresentada na figura 16.

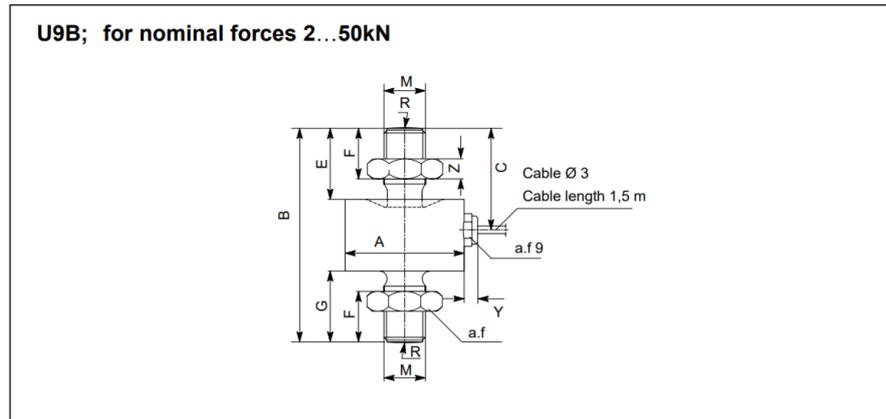
A pressão aplicada a mola é ajustada por uma porca de regulagem com rosca fina conforme apresentada no balão de número 12.

Figura 12 - Detalhe mola controle de pressão.



Fonte: Próprio Autor (2020)

Figura 13 - Célula de carga..

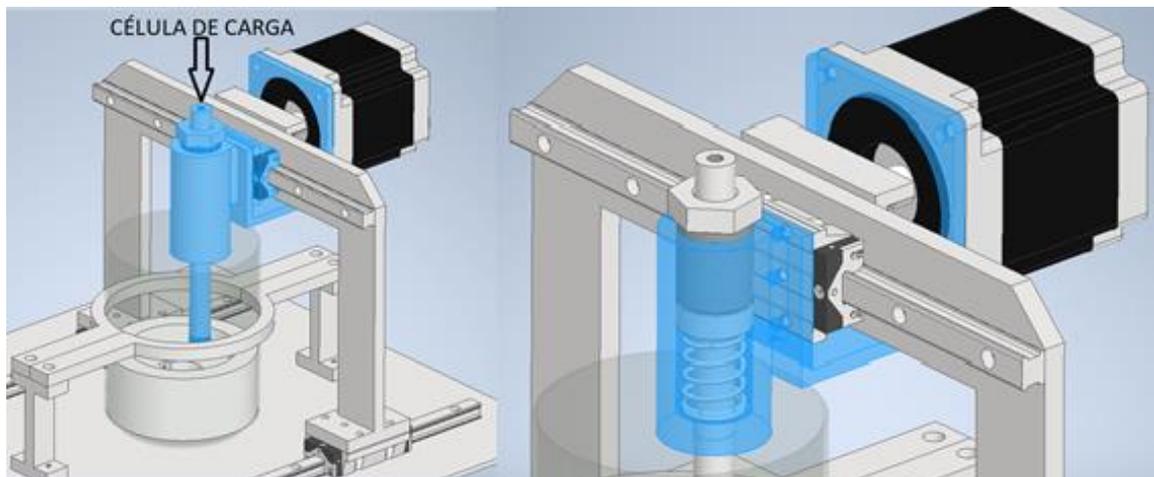


Fonte: HBM (2020)

A carga aplicada é conectada a um sistema de aquisição de dados onde é possível verificar via software os valores de pressão exercida na mola.

Com a leitura de carga podemos comparar o efeito observado quanto ao desgaste e corrosão do material analisado com cargas menores e maiores, tendo como possibilidade valores de 0 a 6kg de pressão.

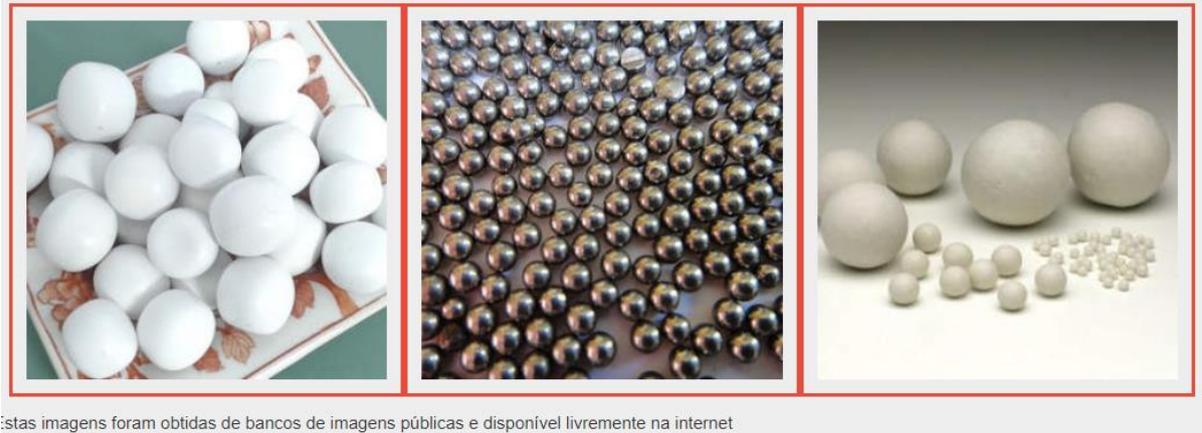
Figura 14 - Detalhe acoplamento célula de carga.



Fonte: Próprio Autor (2020)

Na ponta da haste de ensaios será acoplada uma esfera de alumina para realizar o atrito em deslizamento na superfície do material com intuito de verificar o efeito da interação de corrosão em sua camada passiva.

Figura 15 - Esferas de Alumina.



Estas imagens foram obtidas de bancos de imagens públicas e disponível livremente na internet

Fonte: Banco de Imagens públicas (2019)

3.1.3 Projeto de automação

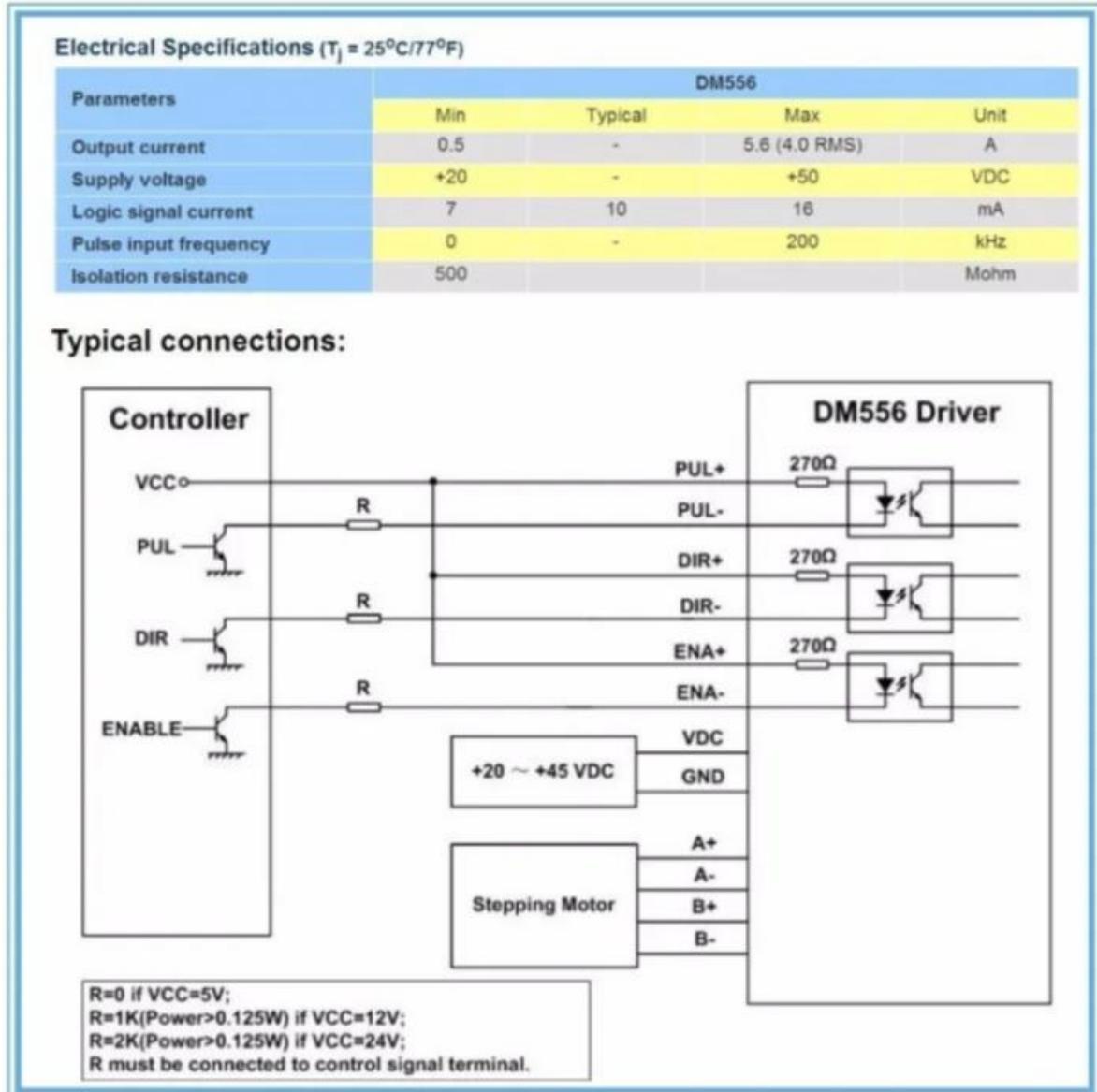
O desenvolvimento do projeto de automação foi elaborado de forma a possibilitar o controle de velocidade, frequência de movimento bidirecional, e também o monitoramento da pressão exercida pela esfera sobre a superfície da amostra.

Para atender esses requisitos de funcionamento foi selecionado um motor de passo para movimentação por suas características de posicionamento angular com precisão de $1,8^\circ$ /passo.

Para o acionamento do motor foi dimensionado um Drive DM556 com capacidade de 5,6 ampère e controle de frequência configurado por *deep switch*. O driver possui capacidade de frequência de 0 a 200 kHz.

A figura a seguir apresenta o esquema de ligação entre controlador, drive de potência e Fonte de alimentação.

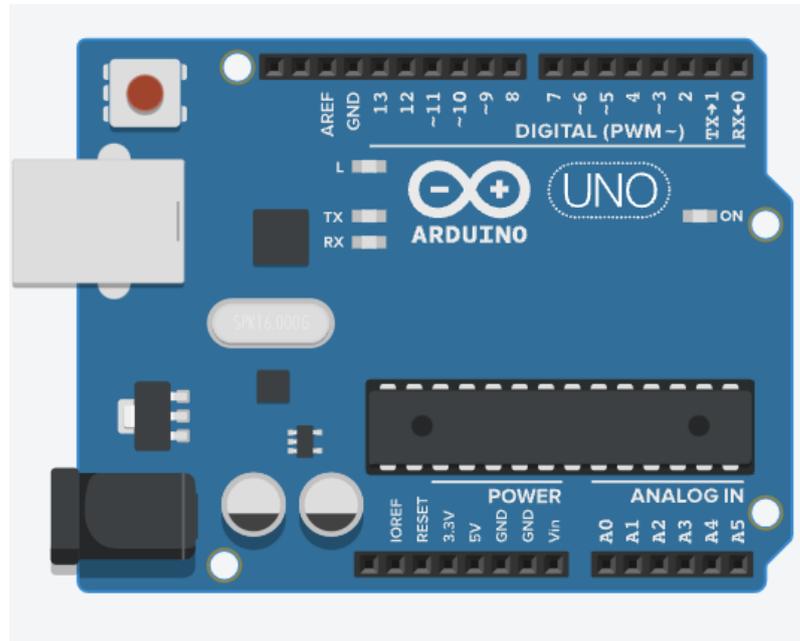
Figura 16 - Driver DM556.



Fonte: Manual DM556 (2021)

Para controlar o sistema e enviar pulsos PWM para o drive foi utilizado um microcontrolador Arduino UNO que é uma plataforma *open source* (plataforma aberta) de forma a reduzir o valor de investimento de um controlador robusto e industrial, mas com características de controle capaz de garantir controle e precisão na aplicação.

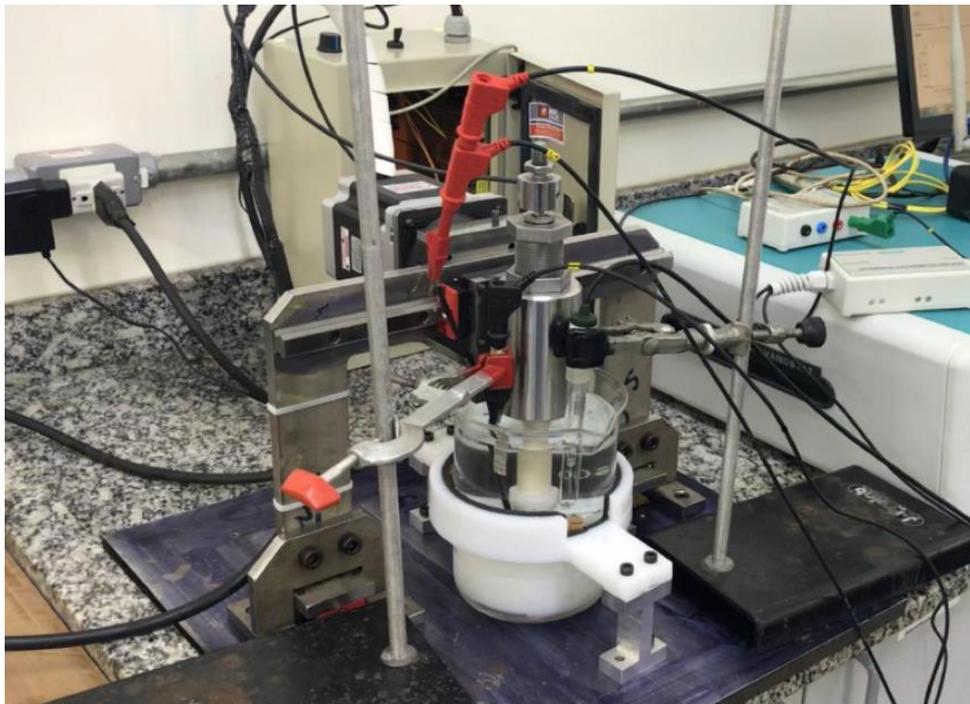
Figura 17 - Data Sheet Placa Micro controladora Arduino UNO.



Fonte: Thinkercad (2021)

Os parâmetros de programa podem ser modificados via computador e cabo de comunicação conforme pode ser observado na figura abaixo o sistema já em funcionamento.

Figura 18 - Equipamento tribômetro em fase de testes.



Fonte: Próprio Autor (2021)

A programação utilizada na plataforma Arduino é baseada em linguagem C uma das mais conhecidas no mundo da programação e integração de software e hardware, onde é possível controlar os parâmetros, pulsos *pwm*, direção e *enable* (*habilitar sistema*), conforme página de programa mostrado na figura abaixo.

Figura 19 - Programa desenvolvido para controle do dispositivo tribômetro.

```

Inversor_Temporizado_-_Stepp_Motor | Arduino 1.8.12
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda

Inversor_Temporizado_-_Stepp_Motor

// defines pins numbers
//Velocidades setadas Conforme ajustes
const int stepPin = 5;
const int dirPin = 2;
const int enPin = 8;
void setup() {

  // Sets the two pins as Outputs
  pinMode(stepPin,OUTPUT);
  pinMode(dirPin,OUTPUT);

  pinMode(enPin,OUTPUT);
  digitalWrite(enPin,HIGH);
}

void loop() {

  digitalWrite(dirPin,HIGH); // Enables the motor to move in a particular direction
  // Makes 200 pulses for making one full cycle rotation (1600=200PULSOS 1 VOLTAS)
  delayMicroseconds(500); //Não Mecher (Delay de Programa)
  for(int x = 0; x < 100; x++) { //3200 Uma Volta de 360 completa
    digitalWrite(stepPin,HIGH);
    delayMicroseconds(200);
    digitalWrite(stepPin,LOW);
    delayMicroseconds(200);
  }
  delay(1000); // One second delay

  digitalWrite(dirPin,LOW); //Changes the rotations direction
  //Makes 400 pulses for making two full cycle rotation (1600=400PULSOS 2 VOLTAS)
  delayMicroseconds(500); //Não Mecher (Delay de Programa)
  for(int x = 0; x < 100; x++) {
    digitalWrite(stepPin,HIGH);
    delayMicroseconds(200);
    digitalWrite(stepPin,LOW);
    delayMicroseconds(200);
  }
}

```

Fonte: Próprio Autor (2021)

Na integração entre *hardware* e *software* é necessário selecionar as entradas e saídas (Inputs e Outputs) para cada componente, desta forma conhecendo a arquitetura do microcontrolador foram selecionadas as portas 05 para gerar os pulsos *pwm*, a porta 02 para setar a direção e a porta 08 para *enable*.

Foi necessário calcular o deslocamento linear da engrenagem para sabermos quantos pulsos aplicar para obter-se uma conversão de pulsos para milímetros.

Sabendo que a engrenagem possui as seguintes características conforme tabela a seguir:

Tabela 3 - Engrenagem módulo 01 com 25 dentes.

Z	De	Dp	Dm	D1
25	27	25	20	10

Fonte: Traceparts (2020)

Temos então que o Deslocamento Linear = $(2 \cdot \pi \cdot r)$.

Substituindo temos $DL = 2 \cdot \pi \cdot 12,5$

Logo: $DL = 78,53$

Ou seja, um ciclo completo da engrenagem é capaz de deslocar 78,53mm.

Sabendo que a engrenagem possui 25 dentes temos que $78,53 / 25 = 3,14\text{mm}$ por passo de dente.

O deslocamento do qual precisamos ficará em torno de 10mm (área da amostra padrão), sendo assim podemos convencionar que aproximadamente ocorrerá o deslocamento de 3 dentes.

Como o driver de acionamento DM556 possui resolução de $1,8^\circ/\text{passo}$, dividimos $360^\circ/1,8^\circ$ e temos 200 pulsos por volta como referência de controle, conforme é possível verificar no programa mostrado na Figura 19.

Para ajustar a frequência de pulsos do motor para o range desejado, proporcionando torque sem vibração selecionamos as chaves *deep switch* 5, 6, 8 em modo ON e 7 em modo OFF regulando para 3600 pulsos a volta total conforme catálogo.

Com este ajuste temos que considerar que se antes 200 pulsos eram uma volta equivalente a 78,53mm lineares deslocados, agora com a nova configuração 200 pulsos equivalem a 4,36mm deslocados, dessa forma melhorando a qualidade de movimentação.

3.2 ANÁLISE DO MATERIAL

A corrente, frequência, combinação de materiais de base e de deposição são fatores que tendem a desencadear efeitos diversos nas microestruturas dos materiais metálicos, desta forma neste capítulo serão apresentadas as características de processo e procedimentos aplicados para a análise.

3.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO ELETRODO DE DEPOSIÇÃO AÇO SUPERDUPLEX 2507

O eletrodo de solda utilizado para deposição no processo Tip/Tig foi o Sandvik 25.10.4.L que é um material especialmente desenvolvido para soldagem Sandvik SAF 2507 e outros aços superduplex.

Esse material é caracterizado por excelente resistência a desgaste por corrosão em ambientes contendo cloreto e excelente resistência à corrosão por pite e fendas. As características químicas e físicas do material são mostradas na tabela a seguir:

Tabela 4 – Propriedades do eletrodo de deposição.

Chemical composition, wt%								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
max			max	max				
0.020	0.3	0.4	0.020	0.015	25	9.5	4	0.24
SAW								
Temperature				°C	20		-40	
Yield strength, $R_{p0.2}$				MPa	690		-	
Tensile strength, R_m				MPa	880		-	
Elongation, A				%	25		-	
Impact strength, Charpy V				J	90		60	

Fonte: Sandvik (2020)

3.4 SOLDAGEM TIP/TIG GTAW

As soldas foram realizadas pelo laboratório de soldagem da UFSC (LABSOLDA), para a realização da soldagem de revestimento foram utilizadas para o substrato chapas em aço carbono ASTM A36 com 1/4" (6,35mm) de espessura, para serem realizados posteriormente os ensaios de microestrutura, microdureza e resistência a corrosão dos revestimentos obtidos.

Para a realização da solda por deposição de SAF2507 Tip/Tig foi utilizada uma corrente de soldagem de 200 A com velocidade de alimentação (V_a) de 1,5 m/min, velocidade de soldagem (V_s) de 7,5 cm/min, como gás de proteção foi utilizado Ar puro (99,99% de pureza) com vazão de 12 l/min.

Foram realizados depósitos de solda com frequências de alimentação distintas conforme valores mostrados na Tabela 05.

Tabela 5 - Variações na frequência de alimentação.

Ensaio	Frequências	Transferência
1	0 Hz	Ponte
2	5 Hz	Intermitente
3	10 Hz	
4	15 Hz	

Fonte: Próprio Autor (2020)

A diluição será analisada já que é fator que interfere diretamente na composição do revestimento e, conseqüentemente, nas suas características e propriedades, tendo ação direta na resistência a corrosão do revestimento, onde para um maior valor de frequência de alimentação, menor é a taxa de diluição e conseqüentemente maior a resistência a corrosão obtida no revestimento.

3.5 CORPOS DE PROVA

Através de cada cordão de revestimento correspondente a uma frequência de vibração do eletrodo, foram realizados cortes transversais ao sentido da solda, para a confecção dos corpos de prova.

A partir dessa etapa foram realizados ensaios de macrografia, microestrutura, microdureza, corrosão, tribocorrosão, para posterior avaliação dos efeitos gerados através da variação da frequência de alimentação do eletrodo consumível no revestimento.

O cordão de solda com os corpos de prova cortados na sessão transversal pode ser visto a partir da Figura 20.

Figura 20 - Cordão de solda 15Hz.



Fonte: Próprio Autor (2020)

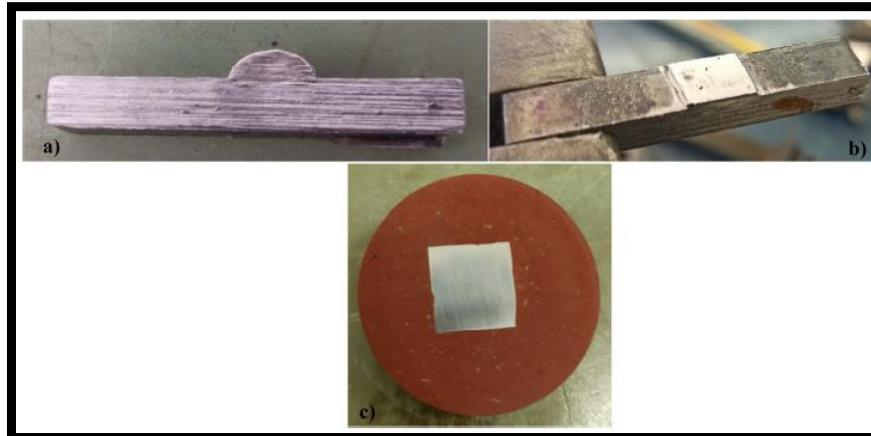
Para a realização da análise da resistência a corrosão, os corpos de prova foram rebaixados na superfície da face do cordão de revestimento, por fresamento mecânico, deixando uma camada de 1mm de espessura do cordão de revestimento.

Após o fresamento foram embutidas as amostras para melhor manuseio no procedimento de lixamento e polimento da superfície a ser analisada e ensaiada.

Na etapa subsequente foram realizados os ensaios de corrosão por polarização cíclica.

A preparação dos corpos de prova para os ensaios eletroquímicos pode ser observada nas Figura 21.

Figura 21 - Corpos de prova para ensaio de corrosão; a) Vista transversal do corpo de prova; b) Revestimento rebaixado por fresamento; c) Corpo de prova embutido.

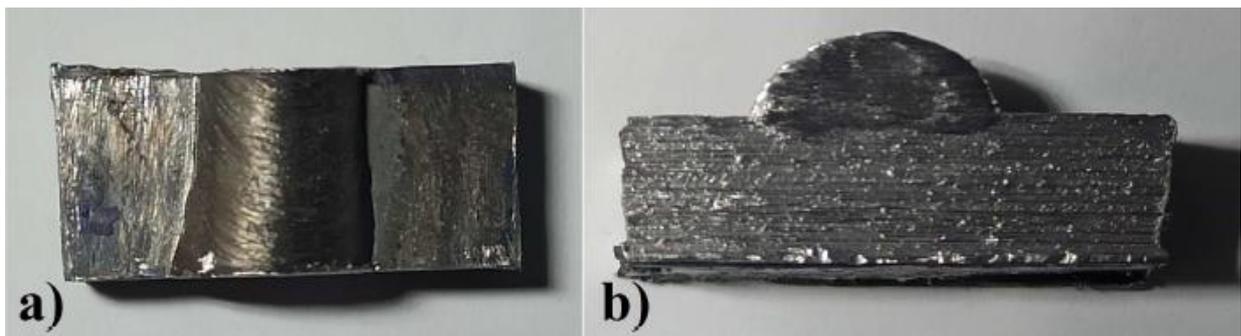


Fonte: Próprio Autor (2020)

Para os corpos de provas utilizados na análise metalúrgica e de microdureza, a preparação é semelhante à dos corpos utilizados para ensaio de corrosão, porém esses não são rebaixados no cordão de revestimento, e seu embutimento revela a sessão transversal do cordão, podendo assim realizar ataques químicos e eletroquímicos, a fim de revelar a microestrutura do revestimento, união e metal de base.

A preparação desses corpos de prova pode ser vista através da Figura 22.

Figura 22 - Preparação dos corpos de prova para metalografia e microdureza.



Fonte: Próprio Autor (2020)

3.6 ANÁLISE METALOGRAFICA E DE MICRODUREZA

Para a análise de macrografia e da microestrutura das amostras, as mesmas foram preparadas de acordo com a norma ASTM E3, sendo realizado o lixamento sequencial, e posterior a isso o polimento utilizando óxido de alumínio de 1 μm .

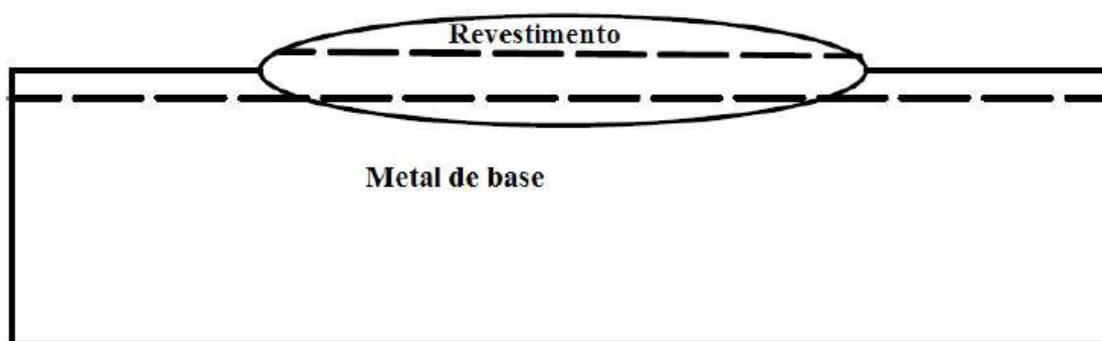
Para o ataque de revelação da macrografia em aço ASTM A36 será utilizado Nital a 10%, as imagens serão obtidas pelo estereoscópico ZEISS Stemi 2000-C, um ataque eletrolítico com 12 volts por um tempo de 15 segundos com ácido oxálico 10% será realizado para revelar a microestrutura do aço superduplex.

Os perfis de microdureza serão obtidos segundo a norma ASTM E 384, sendo utilizada uma carga de 0,3 kgf a uma distância de 0,2 mm entre cada indentação, o equipamento utilizado será o microdurômetro Shimadzu modelo HMV-G20ST.

Será traçado duas linhas no corpo de prova que sejam feitas as medidas das microdurezas ao longo dessas linhas, e com isso poder avaliar tanto as microdurezas do metal de base, da ZTA, revestimento e do reforço.

A Figura 23 representa um esboço de um corpo de prova com as linhas tracejadas onde serão realizadas as medidas das microdurezas.

Figura 23 - Representação da linha para análise de microdureza no corpo de prova..



Fonte: Próprio Autor (2020)

3.7 METODOLOGIA PARA ENSAIO DE RESISTÊNCIA A CORROSÃO

O ensaio de resistência a corrosão será desenvolvido através de polarização cíclica conforme a norma ASTM G61-86, onde as amostras serão preparadas na face do cordão da solda de revestimento como já visto em capítulos anteriores, para isto, as mesmas serão polidas segundo a norma ASTM E 3.

Será necessário realizar o isolamento dos limites da amostra com a utilização de resina plástica (material isolante), evitando a corrosão aplicada nas fendas de limite da amostra metálica, as amostras serão imersas em solução de NaCl 1 mol.L-1 de acordo com normativa,

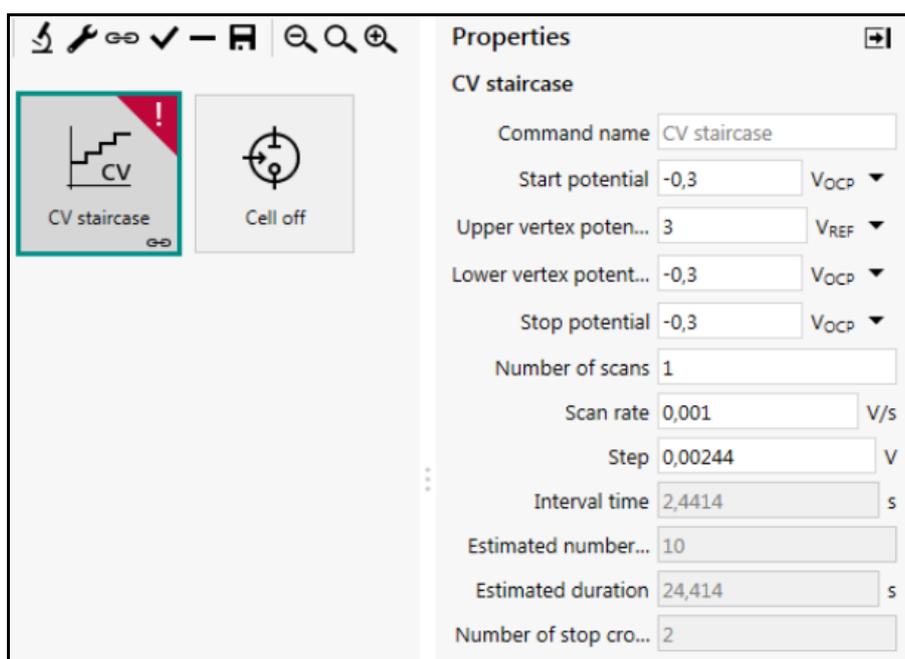
uma placa de platina deve ser utilizada como contra eletrodo na região de potencial anódica e o eletrodo de referência utilizado será de cloreto de prata (R682A Ag/AgCl - Analion).

O equipamento a ser utilizado será o potenciostato METROHM AUTOLAB, modelo PGSTAT128N, com varredura de -400 mV e taxa 1 mV/s.

3.8 TESTE DE OCP - POTENCIAL DE CIRCUITO ABERTO

O teste de OCP (Open current Potencial) é a primeira etapa para o ensaio de corrosão em meio aquoso com eletrólito e é etapa fundamental onde a máquina (potenciostato) estabelece uma tensão de equilíbrio para o sistema conforme podemos verificar na Figura 24 o software NOVA fornece parâmetros que podem ser ajustados de acordo com o tipo de eletrodo utilizado, o período de tempo utilizado foi de 1 hora para todas as condições de OCP.

Figura 24 - Página teste OCP software NOVA.

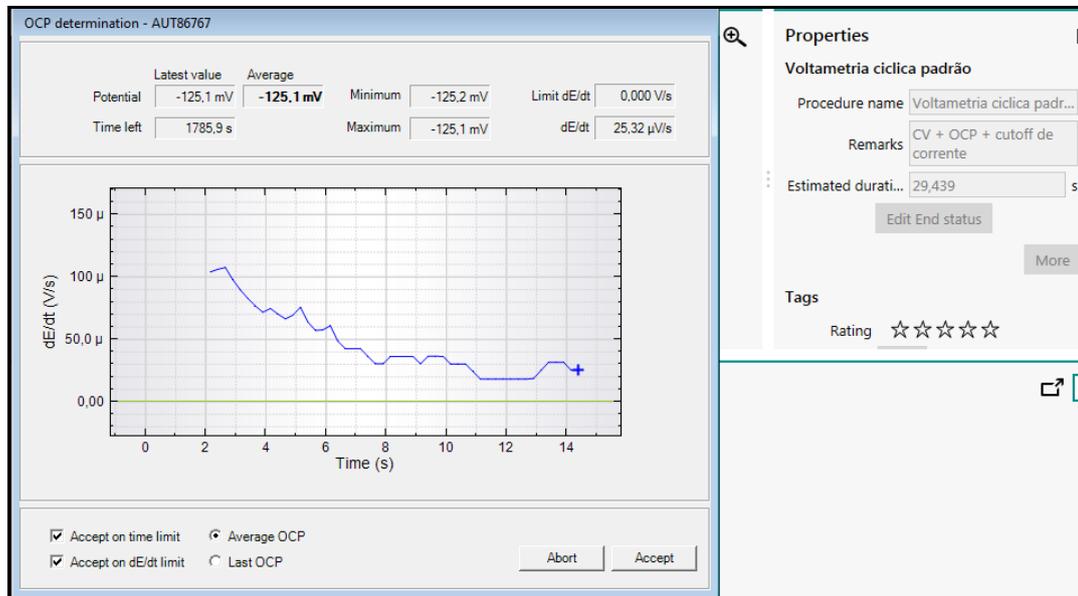


Fonte: Próprio Autor (2020)

Na imagem a seguir é mostrado um gráfico onde temos a variável de tensão aplicada na vertical em função de um tempo em segundos na horizontal, representando nesse gráfico as curvas responsáveis pela obtenção da corrente de passivação, onde o software NOVA analisa a

relação da resistência elétrica do material analisado em função de aplicações de tensão unitárias em microvolts até estabelecer um padrão para o sistema analisado.

Figura 25 - Página teste OCP e corrente de passivação software NOVA.



Fonte: Próprio Autor (2020)

3.9 METODOLOGIA PARA ENSAIO DE RESISTÊNCIA A TRIBOCORROSÃO

Para realizar os ensaios de tribocorrosão serão utilizados além dos métodos já citados no capítulo 3.8 para corrosão eletroquímica, metodologia para aplicar atrito com pressão controlado com o equipamento tribômetro e monitorado pelo módulo de aquisição.

Conforme já citado no descritivo do protótipo deve ser utilizada uma célula de carga HBM modelo U9B, e módulo de aquisição de dados de pressão que utiliza o software Catman Easy da HBM.

Além do preparo da amostra para o ensaio eletroquímico cíclico deve-se ajustar a posição do bastão de contato da esfera de alumina, tangenciar a superfície da amostra, e então parametrizar as velocidades e pressão a serem aplicadas.

A velocidade é parametrizada via software Arduino bem como amplitude de movimentação do carro movimentador.

A pressão utilizada nos ensaios de tribocorrosão foi de 1,5kg. Esse valor foi baseado em artigos onde podemos encontrar pressões usuais entre 0,6 N até 70 N.

Durante o período de OCP não houve atrito na amostra sendo o atrito iniciado após o início da polarização, com o início do ensaio de polarização o atrito foi aplicado e mantido até atingir o potencial de pite para cada condição.

4 RESULTADOS

A primeira etapa de projeto e modelagem do tribômetro baseou-se na funcionalidade do equipamento desenvolvido, visando atender normativas de ensaio de tribocorrosão e obtenção de resultados para análise comparativa da resistência à corrosão e tribocorrosão.

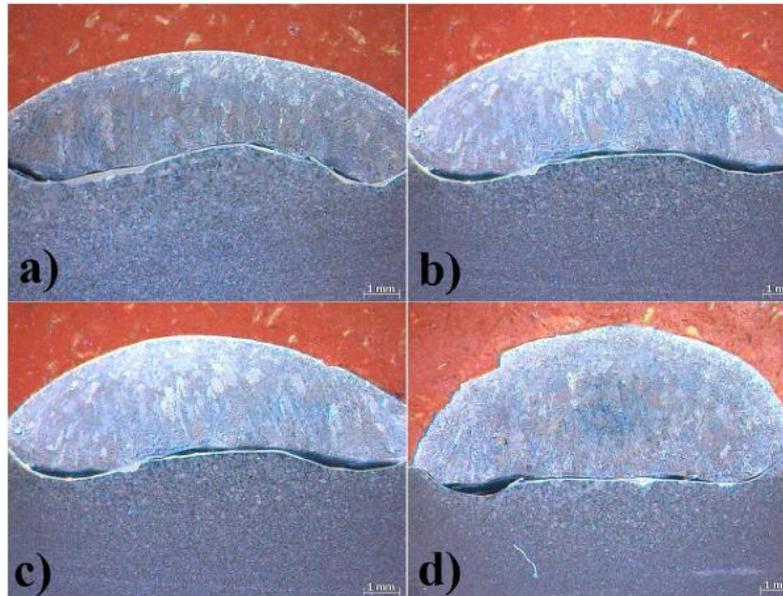
Na segunda etapa do trabalho o objetivo é a análise e caracterização do material a ser avaliado e posteriormente na terceira etapa realizar ensaios e comparar os resultados obtido de forma a validar o equipamento.

4.1 CARACTERIZAÇÃO

Através da análise macrográficas foi possível verificar que para menores valores de frequência de vibração, temos uma maior penetração do metal de revestimento no metal de base, conseqüentemente uma menor espessura de reforço do cordão, e uma maior largura.

Entretanto para um menor valor na frequência de vibração do eletrodo, ocorreu uma maior diluição do metal de revestimento no metal de base, tendendo a interferir negativamente na resistência a corrosão do revestimento, como o previsto em literatura da revisão bibliográfica. Esse efeito da penetração do revestimento é mostrado na Figura 26.

Figura 26 - Macrografias com ampliação 1,0x; a) Frequência de vibração 0 Hz; b) Frequência de vibração 5 Hz; c) Frequência de vibração 10 Hz; d) Frequência de vibração 15 Hz.



Fonte: O Autor (2020)

Com a avaliação das soldagens a partir do software Imagem, foi possível analisar a diluição, largura e reforço do cordão de revestimento, podendo então quantificar, que para uma menor frequência de vibração têm se uma maior largura, um menor reforço, e uma maior diluição.

A medida que é aumentada a frequência de vibração esses valores invertem, tendo então, uma diminuição na largura, um aumento no reforço e uma diminuição na diluição.

Na maior frequência a diluição apresentou um decréscimo maior se comparado com as demais, o que pode ter sido ocasionado pelo aumento do calor na poça de fusão, os dados obtidos podem ser vistos através da tabela a seguir:

Tabela 6 - Dados obtidos através das macrografias realizadas.

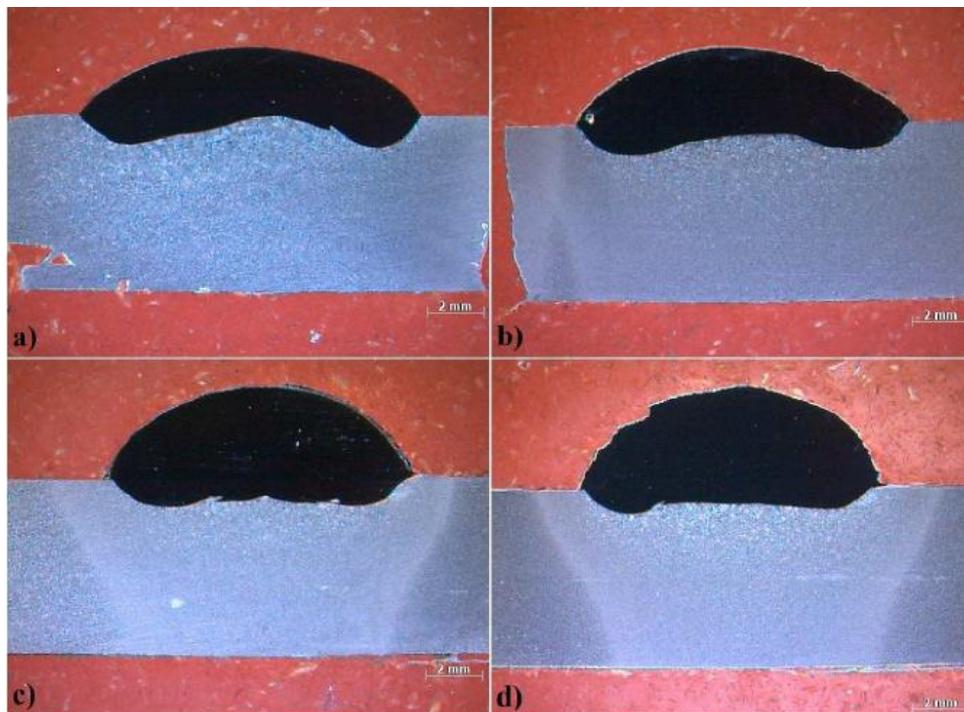
Frequências	Largura (mm)	Reforço (mm)	Diluição %
0 Hz	12,289	2,449	28
5 Hz	12,061	2,826	27
10 Hz	11,196	3,302	26
15 Hz	10,784	3,680	20

Fonte: Próprio Autor (2020)

As variações na diluição, altura e reforço do cordão, ocasionadas devido a variação na frequência de vibração do eletrodo podem ser observadas através das macrografias realizadas nas seções transversais.

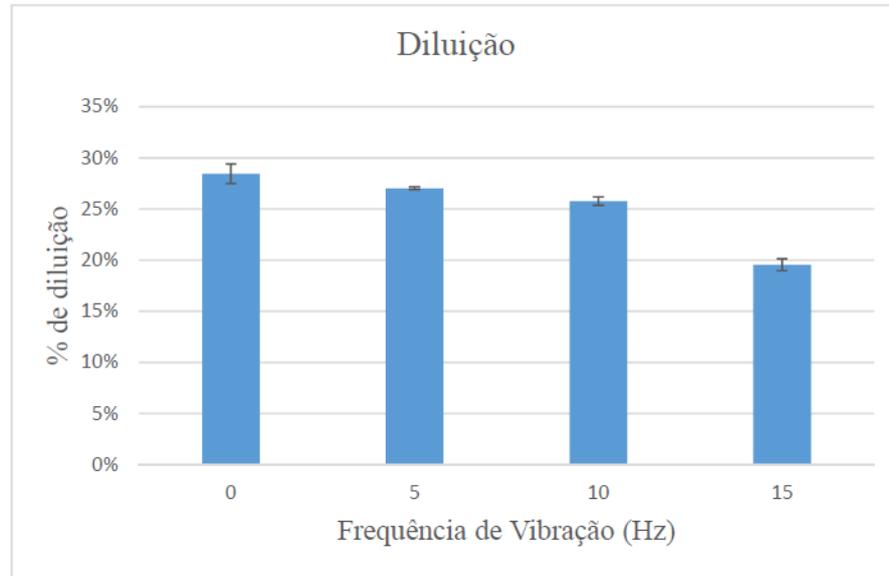
A Figura 27 representa as macrografias realizadas após ataque com Nital 10%, a parte escura é o cordão de revestimento do superduplex, pode também ser observado uma maior zona termicamente afetada para as menores frequências, ocasionada devido a um maior aporte térmico.

Figura 27 - Macrografias com ampliação 0,65x; a) Frequência de Vibração 0 Hz; b) Frequência de Vibração 5 Hz; c) Frequência de Vibração 10 Hz; d) Frequência de Vibração 15 Hz.



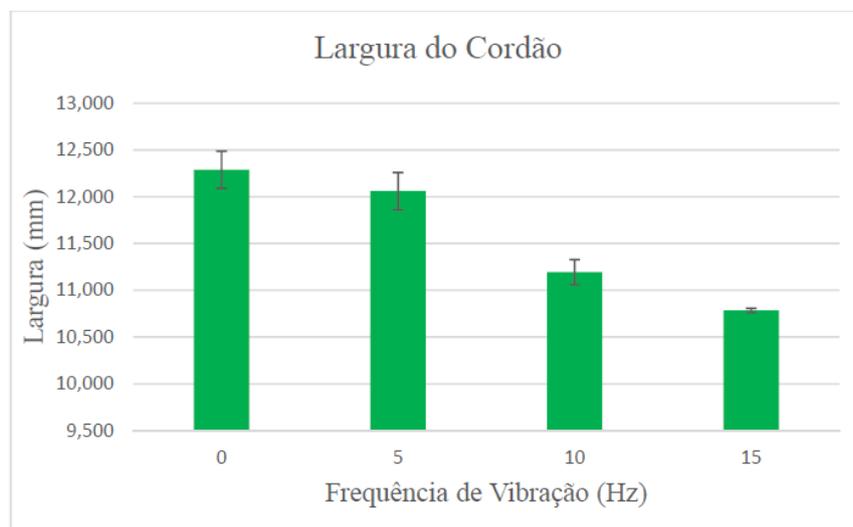
Fonte: Próprio Autor (2020)

O Gráfico 5 quantifica e demonstra a influência da frequência de vibração sobre a diluição do revestimento no metal de base.

Gráfico 5 - Diluição dos revestimentos

Fonte: Próprio Autor (2020)

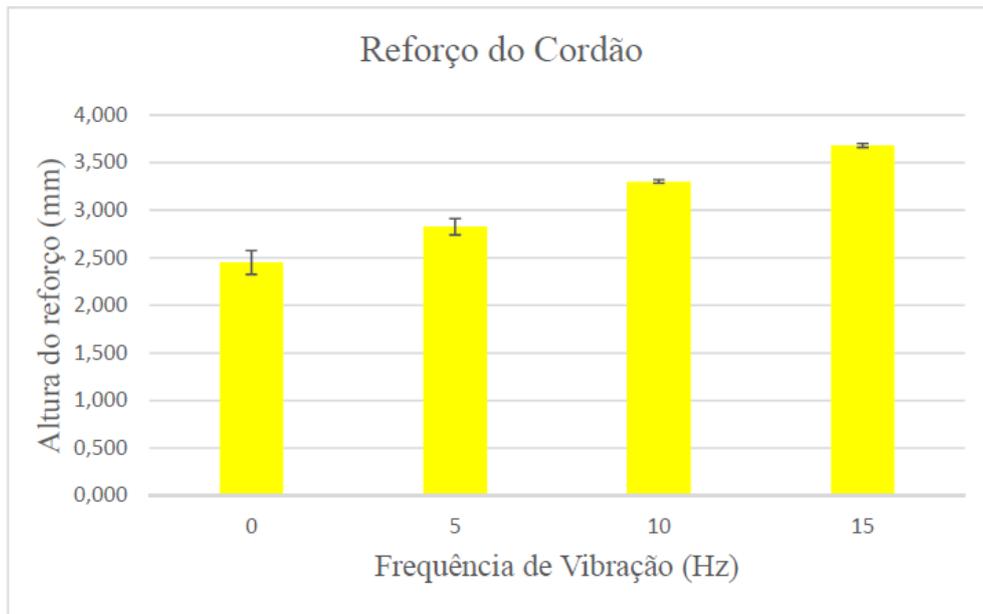
Para o Gráfico 6 temos quantificado a influência da frequência de vibração na diminuição da largura do cordão, à medida que a frequência aumenta.

Gráfico 6 - Gráfico das larguras dos revestimentos.

Fonte: Próprio Autor (2020)

O Gráfico 7 demonstra a o aumento da altura do reforço do cordão de revestimento, à medida que a frequência de vibração aumenta.

Gráfico 7 - Gráfico altura do reforço do cordão.



Fonte: Próprio Autor (2020)

4.2 ANÁLISES MICROGRÁFICAS

Após realizar processamento da amostra e ataque químico para revelar a microestrutura do revestimento de superduplex é possível verificar que nas amostras soldadas com maiores valores de frequência de vibração do eletrodo apresentam microestrutura do revestimento mais refinada e uniforme.

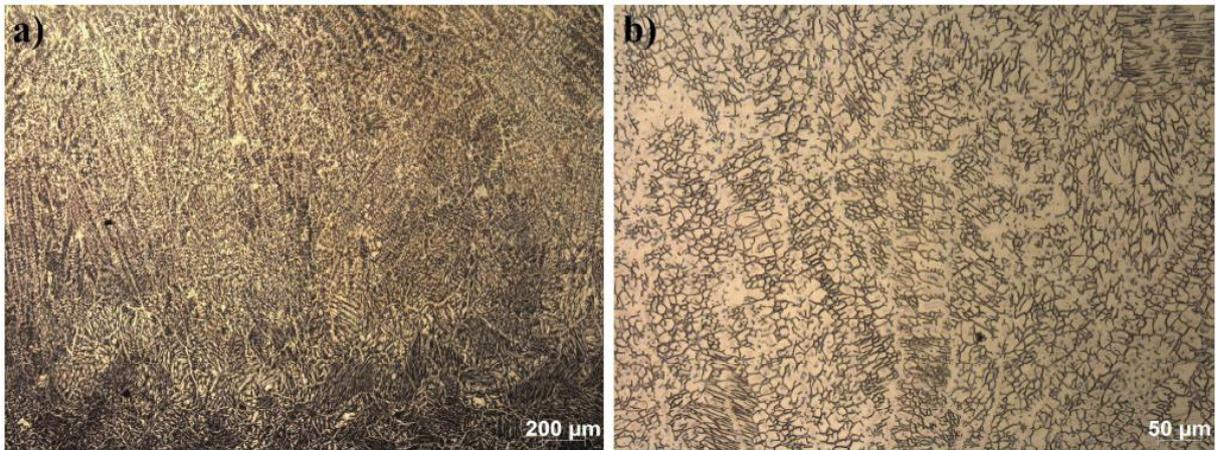
As amostras soldadas com menor valor de frequência apresentaram uma microestrutura mais grosseira e não uniforme validando comportamento descrito por Jorge et. al. onde a pulsação da alimentação tem potencial para modificar o cordão e tornar mais regular a transferência de material para a poça

Esta tendência está relacionada ao baixo aporte térmico causado pela maior frequência de vibração do eletrodo, que proporciona um melhor controle sobre a poça de fusão.

Foi possível verificar a predominância da fase Austenita, em todas as faixas da frequência de vibração, demonstrando microestrutura de grãos de Austenita rodeados por veios de Ferrita, com alguma formação de fases precipitadas.

Através das microestruturas obtidas, pode ser visto que para a soldagem com frequência de vibração igual a 0 Hz (Figura 28) apresenta uma boa microestrutura, com grãos pequenos e uniformes.

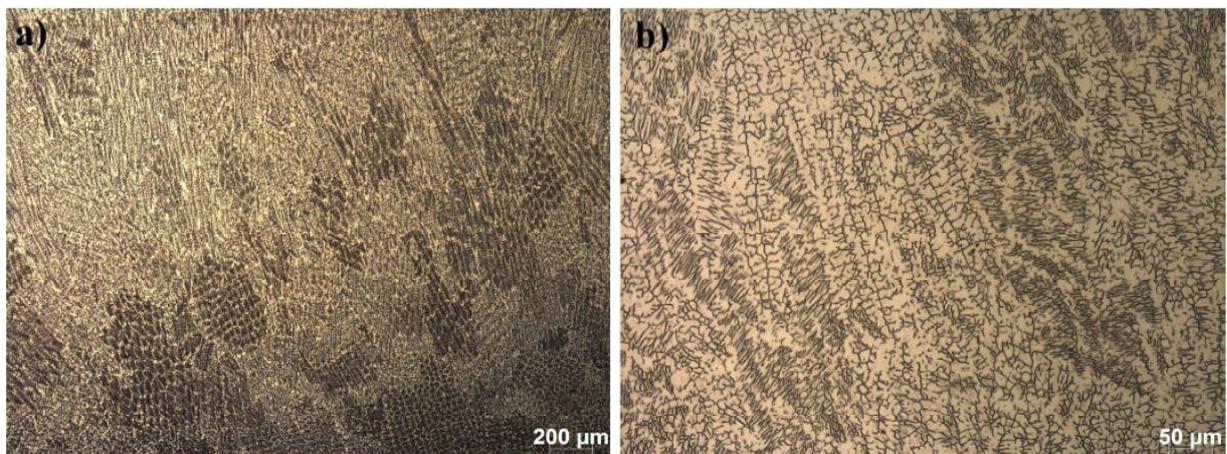
Figura 28 - Micrografia frequência de vibração de 0 Hz; a) Ampliação de 50x; b) Ampliação de 200x.



Fonte: Próprio Autor (2020)

A Figura 29 apresenta características semelhantes que as obtidas com a frequência de vibração de 0 Hz (Figura 28), porém com uma pequena redução no tamanho dos grãos e uma melhor uniformidade da microestrutura obtida.

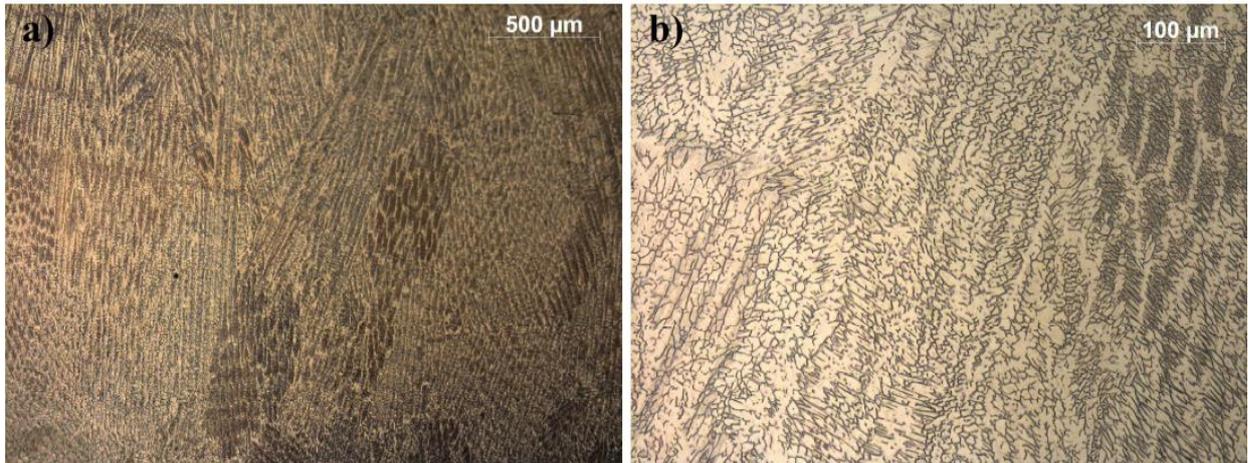
Figura 29 - Micrografia frequência de vibração de 5 Hz; a) Ampliação de 50x; b) Ampliação de 200x.



Fonte: Próprio Autor (2020)

Para o valor de 10 Hz na frequência de vibração, temos uma diminuição no tamanho dos grãos e uma melhora na uniformidade, se comparando as micrografias de 10 Hz (Figura 30) com as micrografias de 5 Hz (Figura 29) e 0 Hz (Figura 28).

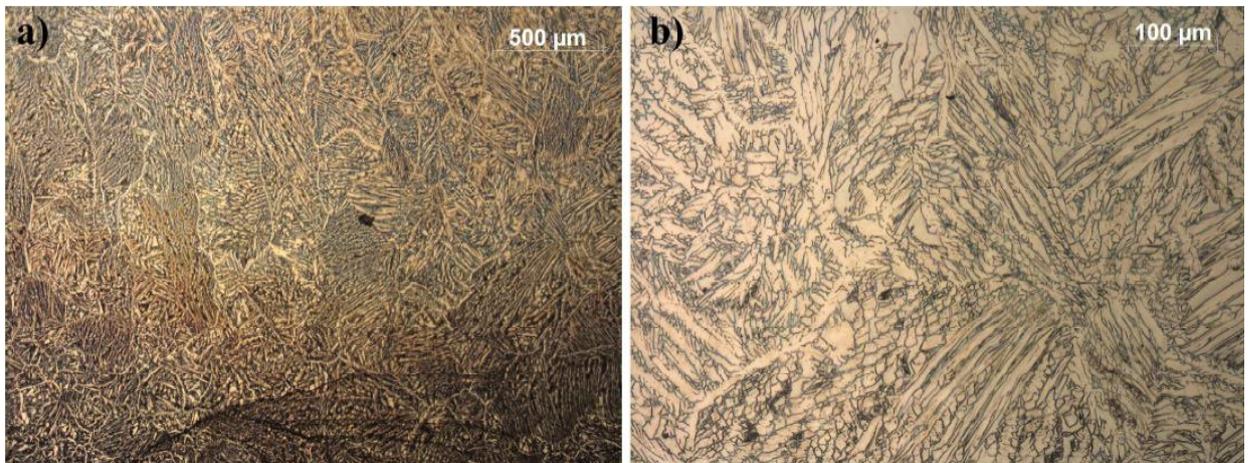
Figura 30 - Micrografia frequência de vibração de 10 Hz; a) Ampliação de 50x; b) Ampliação de 200x.



Fonte: Próprio Autor (2020)

As microestruturas obtidas pela frequência de vibração de 15 Hz, demonstraram um crescimento no tamanho de grão, e uma disposição não uniforme dos grãos, como pode ser visto através da Figura 31.

Figura 31 - Micrografia frequência de vibração de 15 Hz; a) Ampliação de 50x; b) Ampliação de 200x.



Fonte: Próprio Autor (2020)

O maior valor na frequência de vibração também ocasionou outras imperfeições no revestimento, como é o caso de micro trincas, as quais estão indicadas e podem ser observadas a partir da Figura 32.

As trincas podem ter sido ocasionadas devido ao baixo aporte térmico na soldagem revestimento, onde ocorreu uma pequena diluição e um acúmulo excessivo de calor no cordão

de solda, podendo interferir diretamente na resistência a corrosão do revestimento nesta condição.

Figura 32 - Trincas no revestimento com frequência de vibração de 15 Hz, ampliação 50x.

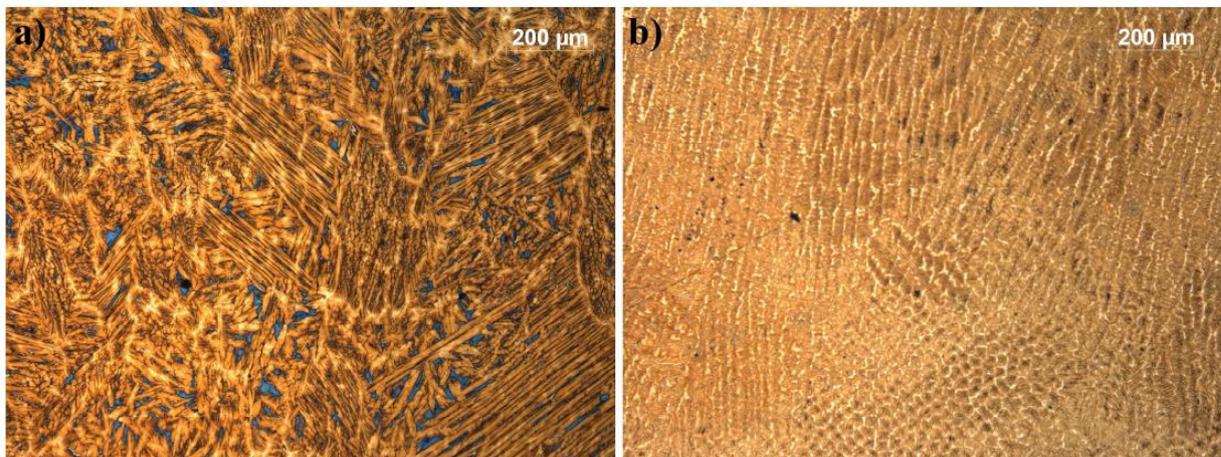


Fonte: Próprio Autor (2020)

O ensaio realizado a partir do ataque com Behara Modificado, facilitou a visualização da microestrutura devido a coloração característica deste ataque, demonstrando a grande diferença entre a microestrutura obtida a partir da frequência de vibração de 15 Hz.

A Figura 33 (a) representa a microestrutura obtida para 15 Hz, através dela é possível verificar o grande tamanho de grão obtido, e a não uniformidade, tendo os grãos dispostos em vários sentidos, se comparado com a microestrutura para 10 Hz (Figura 30(b)).

Figura 33 - Microestrutura obtida através do ataque com Behara, ampliação de 100x; a) Frequência de vibração de 15 Hz; b) Frequência de vibração de 10 Hz.



Fonte: Próprio Autor (2020)

Através das análises realizadas nos corpos de provas a partir das soldas realizadas pelo LABSOLDA, e a realização das análises macrográficas e micrográficas dos revestimentos obtidos, foi possível constatar que, o aumento da frequência de vibração do eletrodo de revestimento, proporciona formas mais refinadas e uniformes de microestrutura.

Para o valor de 15 Hz da frequência de vibração isso não se manteve, apresentando microestrutura mais grosseira e não uniforme. Possivelmente devido ao elevado aporte térmico concentrado na poça de fusão. A amostra soldada com frequência de 10 Hz a microestrutura está mais refinada e mais uniforme.

5 ENSAIO DE CORROSÃO

Para os ensaios de corrosão foram efetuados furos na parte debaixo das amostras embutidas e foram soldados cabos de contato elétrico utilizando solda com estanho conforme mostrado na Figura 34.

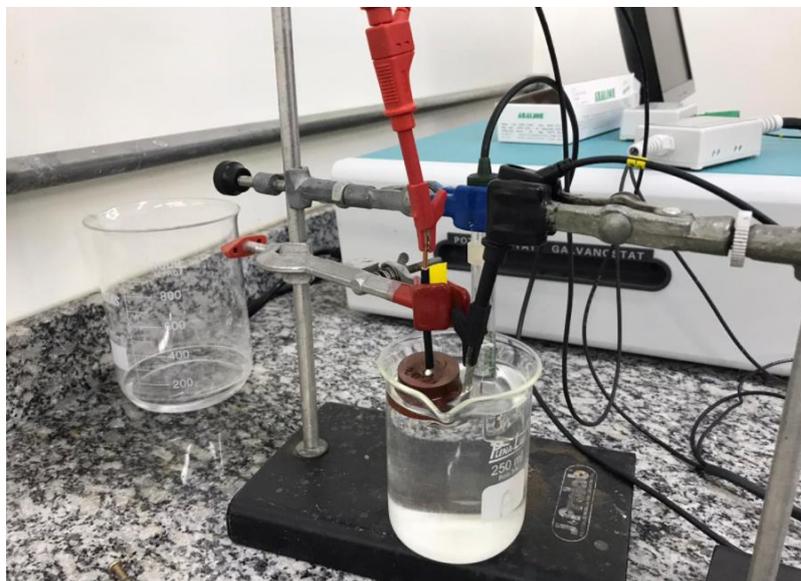
Figura 34 - Amostras soldadas para ensaio de corrosão



Fonte: Próprio Autor (2020)

Após a preparação das amostras foram efetuados ciclos de ensaios para as frequências solicitadas (5, 10 e 15 Hz) de acordo com procedimento orientado pela normativa G61 aplicando potencial de OCP inicialmente considerando o eletrodo de Ag/AgCl na solução, os ensaios foram conduzidos em ambiente aerado.

Figura 35 - Ensaio de corrosão



Fonte: Próprio Autor (2020)

Para os valores obtidos nos ensaios foram feitos ajustes retirando os dois maiores e menores valores para geração de médias e obtenção de um menor desvio padrão, portanto

foram realizados cinco ensaios onde foram considerados os três valores centrais conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Valores de corrosão e pite obtidos em ensaios

Frequência	Potencial de Corrosão (mV)	Potencial de Pite (mV)
5 Hz A	-116	554
5 Hz B	-95	679
5 Hz C	-187	554
10 Hz A	-338	577
10 Hz B	-126	505
10 Hz C	-321	517
15 Hz A	-110	1017
15 Hz B	-114	995
15 Hz C	-122	1050

Fonte: Próprio Autor (2020)

Os resultados de potencial de corrosão e potencial de pite obtidos nos ensaios para as amostras soldadas com frequência de 15 Hz, 10 Hz e 5 Hz foram tabelados para obter-se as médias dos potenciais e o desvio padrão para cada situação.

Tabela 8 - Potenciais médios e desvio padrão ensaio de corrosão

Tabela Potenciais Médios e Desvios Padrão Ensaio de Corrosão		
Frequência (Hz)	Potencial de Corrosão (mV)	Potencial de Pite (mV)
5	-132,67±48,21	595,67±72,16
10	-261,67±117,79	533±38,57
15	-115,33±6,11	1020,67±27,68

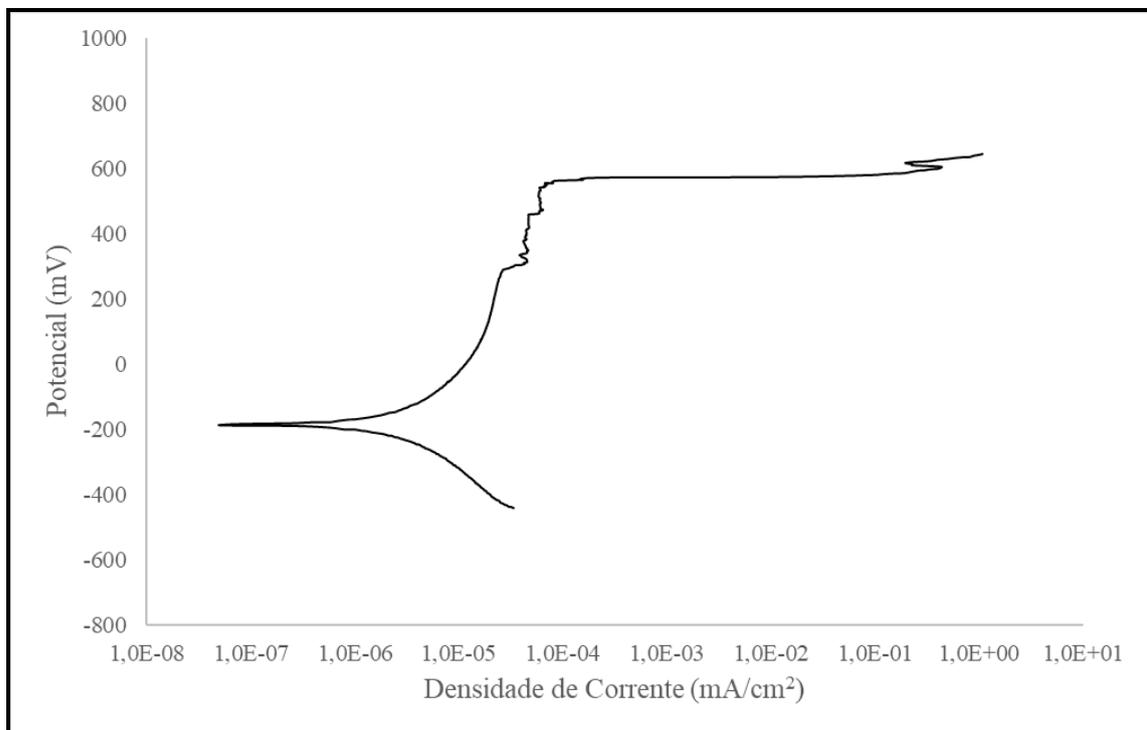
Fonte: Próprio Autor (2020)

Avaliando os resultados médios de potencial de pite e corrosão obtidos nos ensaios e análises gráficas podemos afirmar que as amostras soldadas com frequência de 15 Hz apresentaram potenciais de pites superiores as amostras de 5 e 10 Hz e potencial de corrosão também superior as demais condições com valores de -115,33mV com desvio padrão de ±6,11.

A amostra de 0 Hz foi eliminada devido aos seus resultados serem somente para comparativo inicial quanto a melhoria da soldagem com processo pulsado, em seguida temos os gráficos gerados via software onde é possível analisar cada amostra obtida com as frequências de solda pulsada.

As amostras soldadas com frequência de 5 Hz apresentaram potenciais de pite e corrosão pouco superiores as de 10 Hz o que se mostra contrário a tendência de diluição e resistência a corrosão estimada de acordo com literatura.

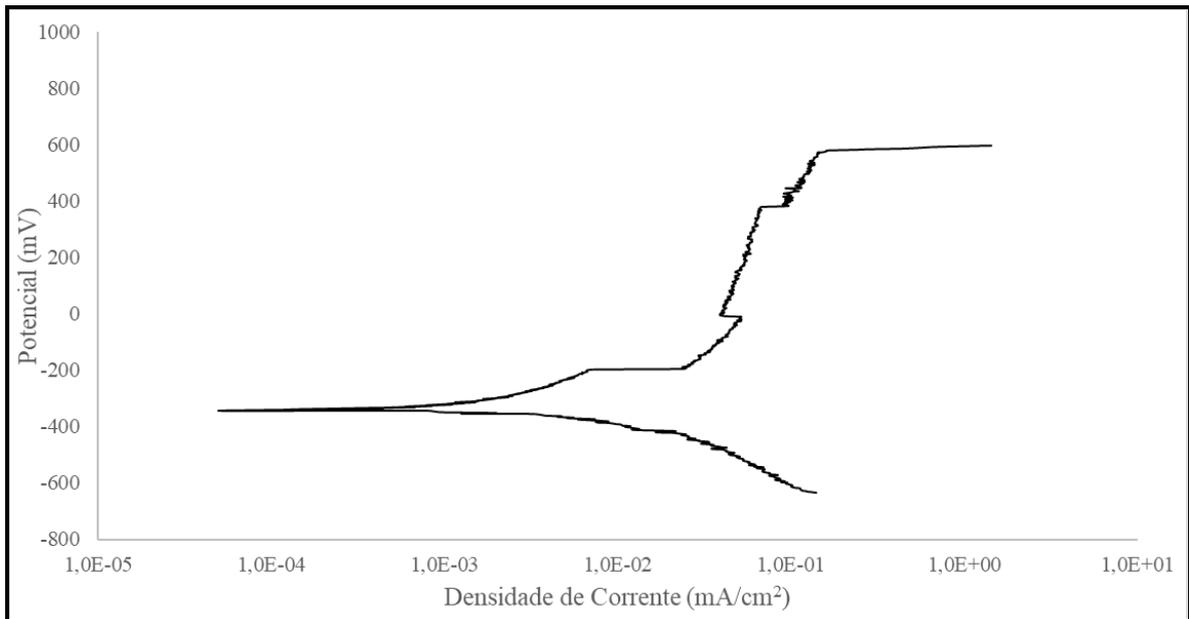
Gráfico 8 - Amostra soldada por TIP-TIG com frequência de 5 Hz.



Fonte: Próprio Autor (2020)

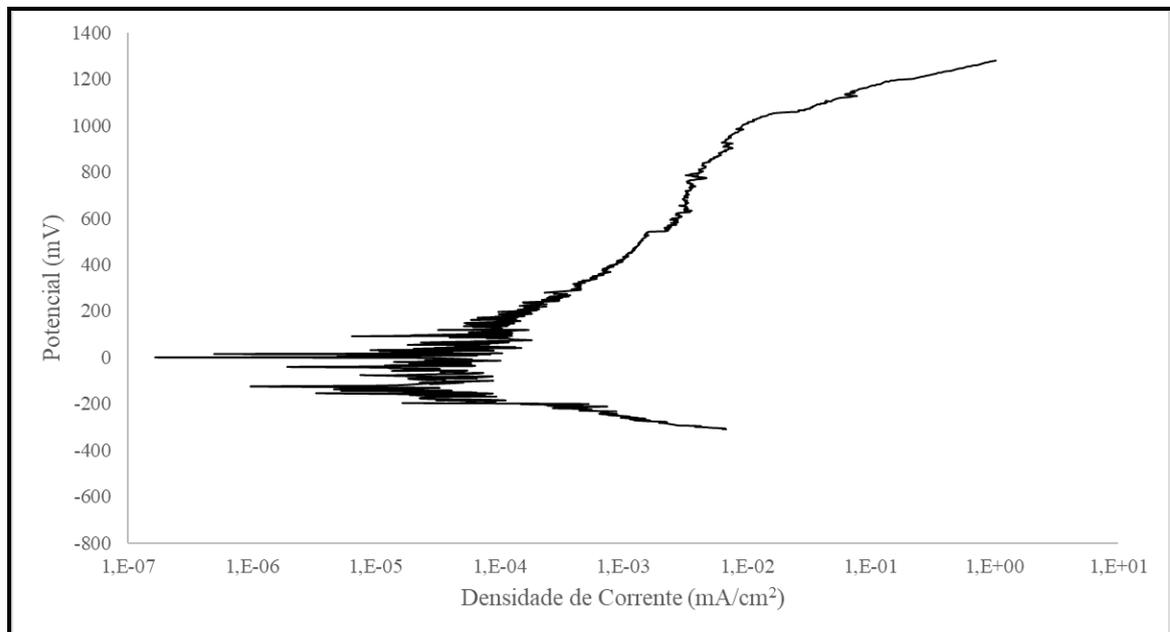
Caso consideremos o desvio padrão máximo para a amostra de 5 Hz esse valor de potencial de pite se aproximaria ao da amostra de 10 Hz, porém se considerarmos o desvio máximo para 10 Hz logo os valores se distanciam numericamente.

No ensaio efetuado para a amostra soldada com frequência de 10 Hz podemos verificar um comportamento diferenciado das outras duas amostras onde o início de potencial de corrosão é inferior as outras condições analisadas, porém a corrente de pite se mostra próxima a condição da amostra de 5 Hz.

Gráfico 9 - Amostra soldada por TIP-TIG com frequência de 10 Hz.

Fonte: Próprio Autor (2020)

A amostra de 15 Hz apresenta uma maior resistência ao potencial de corrosão e de pite sendo esta considerada a melhor condição para o processo de soldagem analisado.

Gráfico 10 - Amostra soldada por TIP-TIG com frequência de 15 Hz.

Fonte: Próprio Autor (2020)

6 ENSAIO DE TRIBOCORROSÃO

Os resultados de potenciais de corrosão e potencial de pite obtidos nos ensaios de tribocorrosão com atrito para as amostras soldadas com frequência de 5 Hz, 10 Hz e 15 Hz foram tabelados para poder-se comparar os valores, porém não há desvio padrão para este ensaio pois o número de ensaios ficou limitado a análise qualitativa para validação do equipamento, sendo os resultados apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Potenciais para ensaio de tribocorrosão.

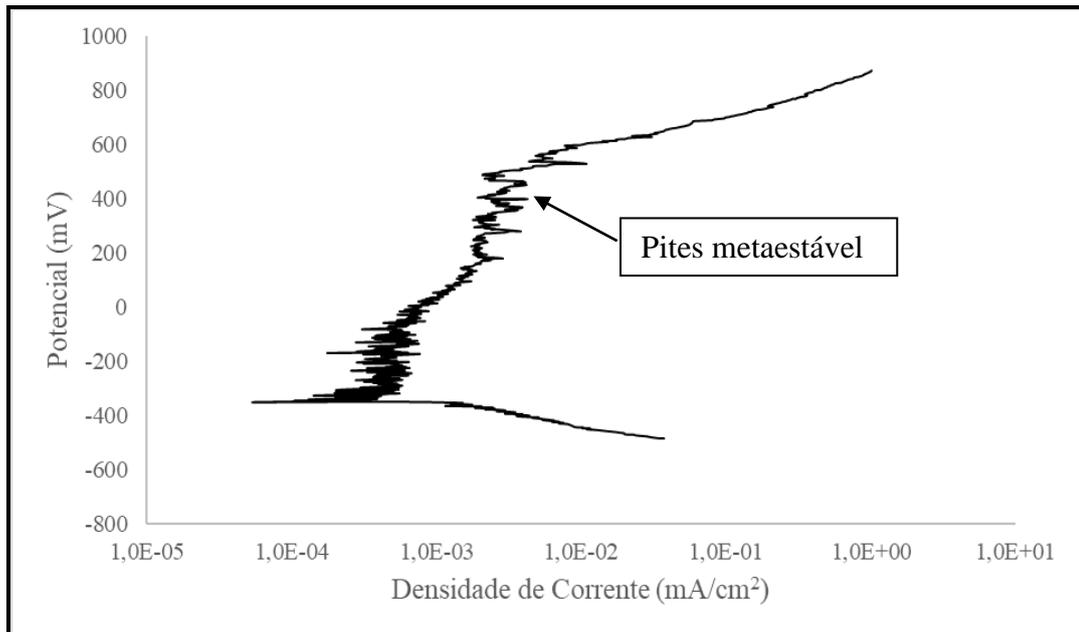
Tabela Potenciais médios para Ensaios de Tribocorrosão		
Frequência (Hz)	Potencial de Corrosão (mV)	Potencial de Pite (mV)
5 Hz	-351,37	586,09
10 Hz	-443,02	336,79
15 Hz	-466,94	815,73

Fonte: Próprio Autor (2020)

Para montar os gráficos de tribocorrosão de forma a melhorar a compreensão foram utilizadas escalas de potencial de -800 até 1000 mV.

No gráfico da amostra soldada com frequência de 5 Hz é possível observar um comportamento linear na fase catódica do ensaio, e em seguida o aumento de tensão aplicada com potencial de corrosão, na região anódica passiva é possível observar na sua parte superior a formação de pites metaestáveis sendo esta tendência possivelmente gerada pelo atrito e quebra de camada passiva.

Gráfico 11 - Amostra soldada por TIP-TIG com frequência de 5 Hz, submetido a ensaio de tribocorrosão.



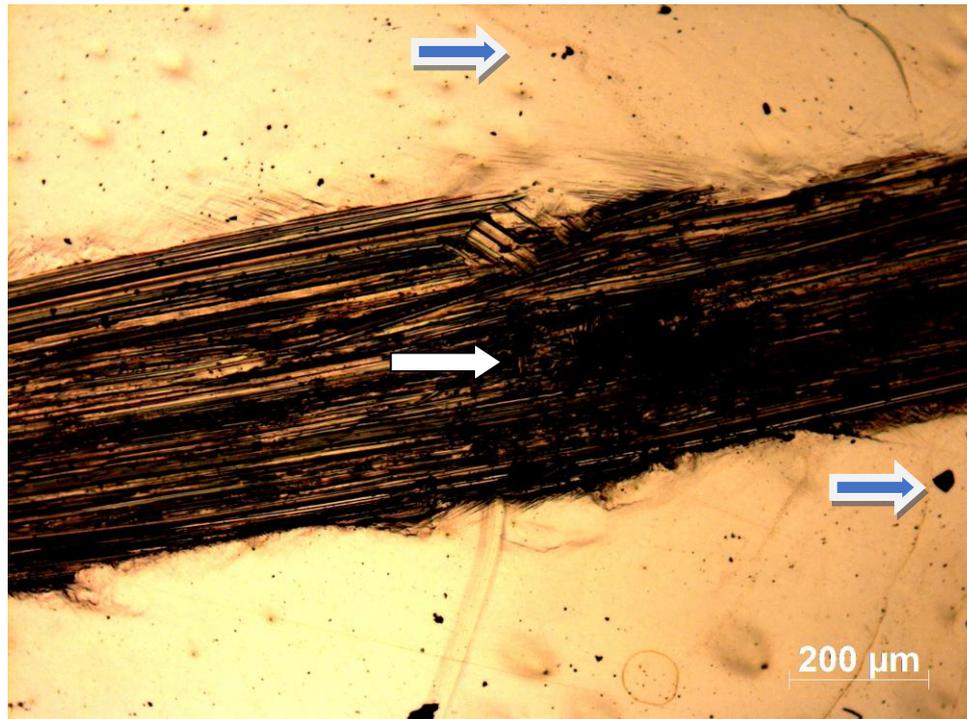
Fonte: Próprio Autor (2021)

Esse comportamento funcional demonstra que não houveram interferências externas quanto aos dispositivos envolvidos nos ensaios, obtendo-se bons resultados analíticos através do método de voltametria cíclica.

Podemos afirmar que o objetivo do dispositivo tribômetro de ter características isolantes não interferindo no potencial medido no meio aquoso foram atendidos.

As imagens a seguir apresentam as micrografias para amostra soldada com 5 Hz de frequência após ensaio de tribocorrosão, onde é possível observar os pites nas regiões não afetadas pelo atrito apontadas por setas azuis e os pites na região atritada nas setas brancas.

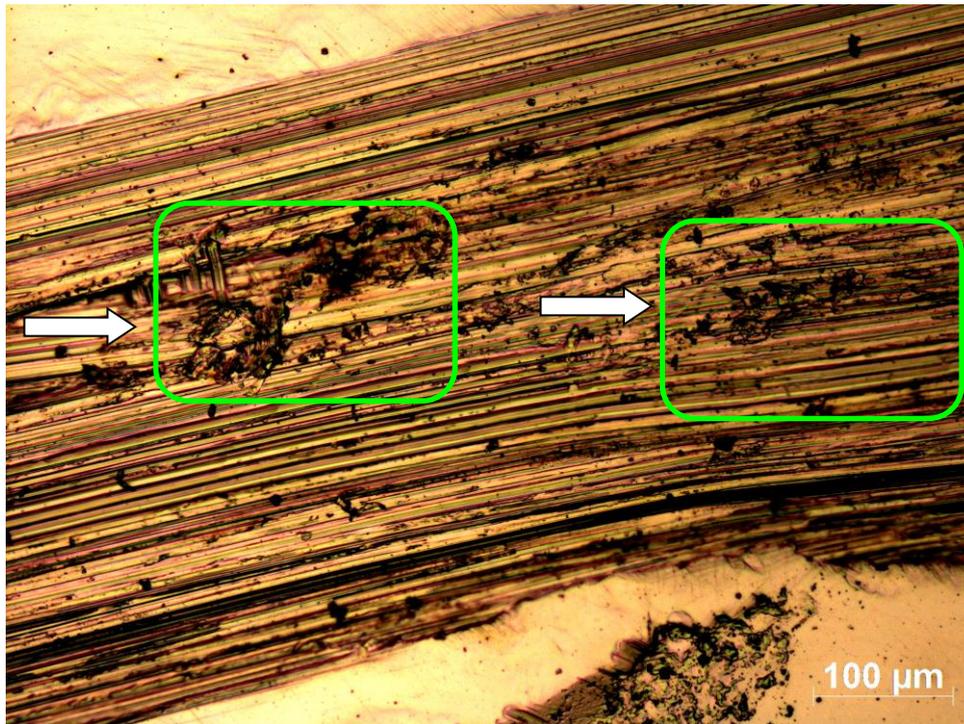
Figura 36 - Micrografia amostra soldada com frequência de vibração de 5 Hz com ampliação de 100x.



Fonte: Próprio Autor (2021)

Nas micrografias ampliadas em 100, 200, 500 e 1000 vezes a predominância de pites na região atritada pode ser melhor observada. É possível verificar pites mais profundos nestas regiões.

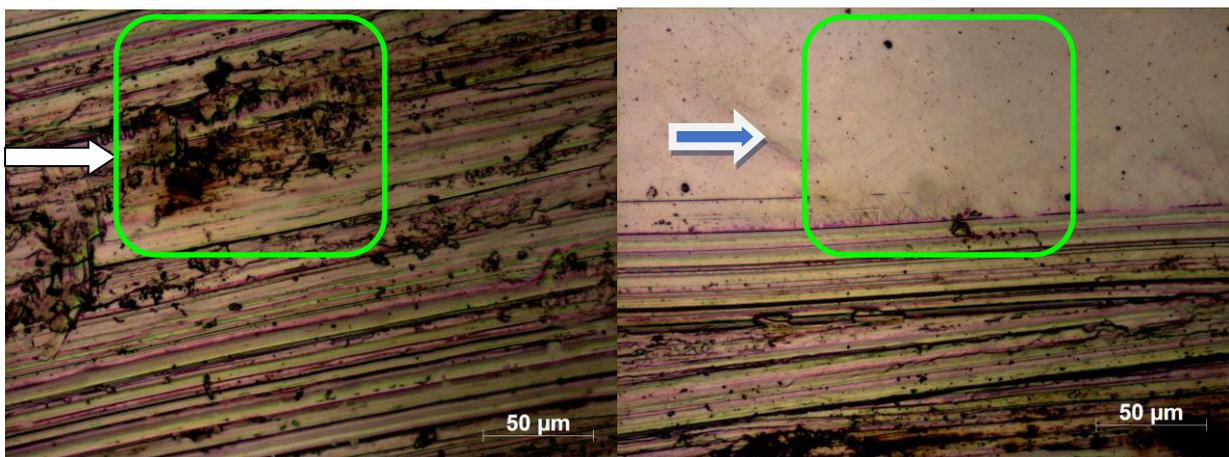
Figura 37 - Micrografia amostra soldada com frequência de vibração de 5 Hz com ampliação de 200x.



Fonte: Próprio Autor (2021)

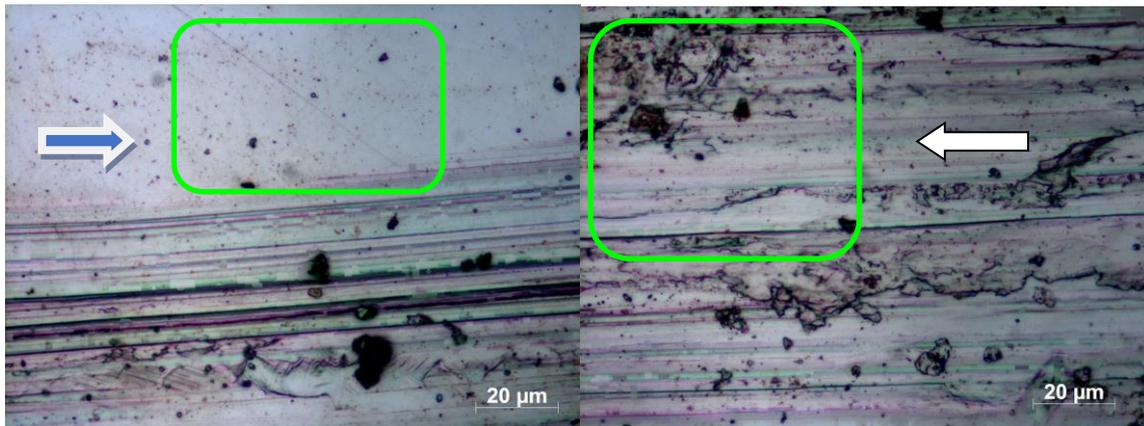
A esquerda regiões atritadas e a direita regiões que não foram submetidas ao atrito controlado, mas submetidas ao ensaio potenciodinâmica cíclico.

Figura 38 - Micrografia amostra soldada com frequência de vibração de 5 Hz com ampliação de 500x.



Fonte: Próprio Autor (2021)

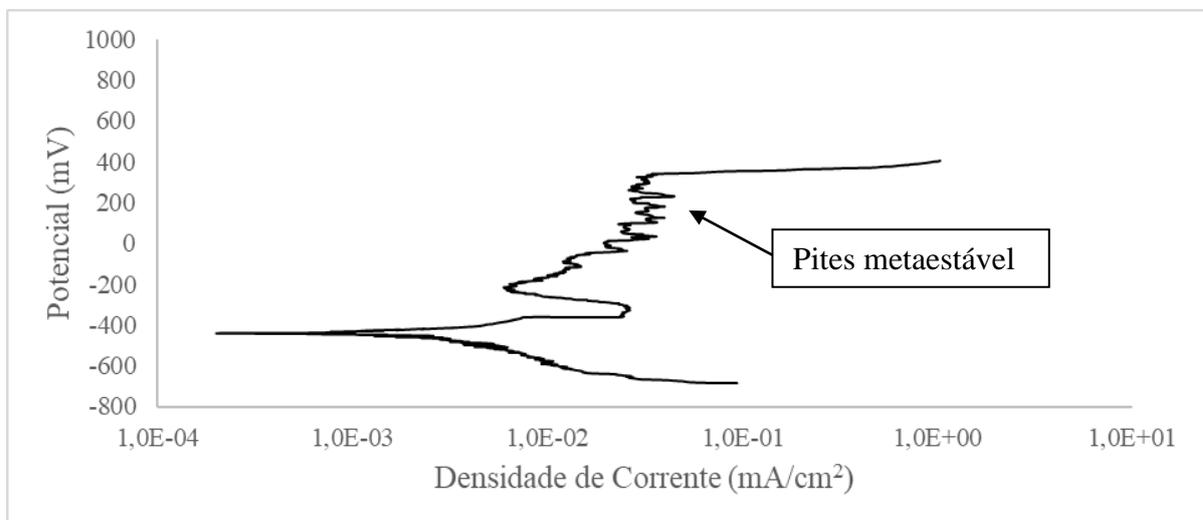
Figura 39 - Micrografia amostra soldada com frequência de vibração de 5 Hz com ampliação de 1000x.



Fonte: Próprio Autor (2021)

O Gráfico 12 apresenta a formação de pites meta estáveis para a amostra soldada com frequência de 10 Hz, as oscilações na corrente próximas ao potencial de pites é consequência da formação de pites metaestáveis que nucleiam e repassivam.

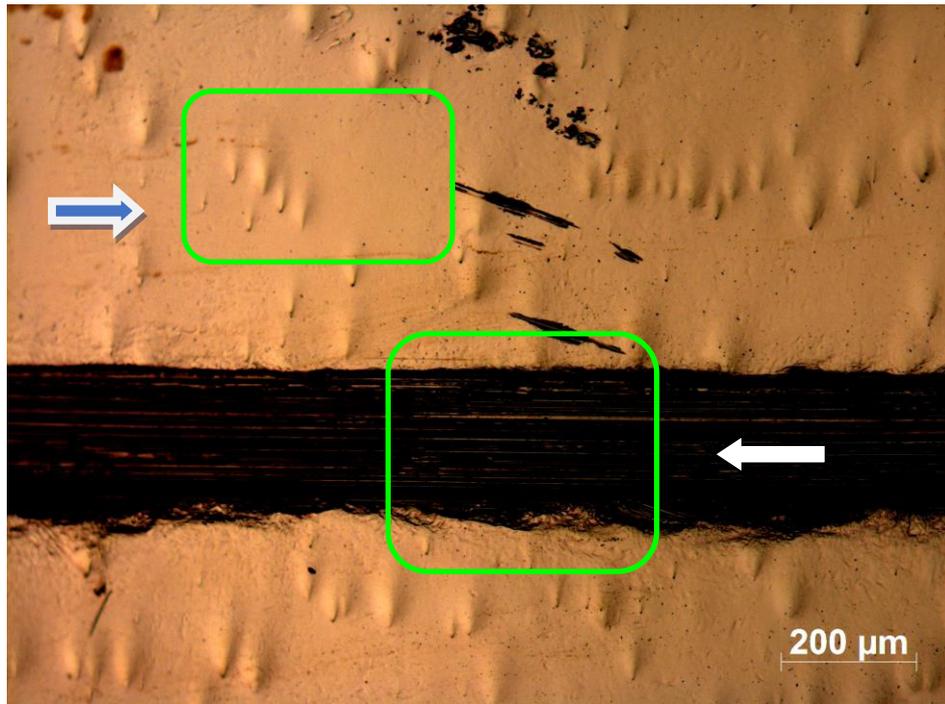
Gráfico 12 - Amostra soldada por TIP-TIG com frequência de 10 Hz, submetido a ensaio de tribocorrosão.



Fonte: Próprio Autor (2021)

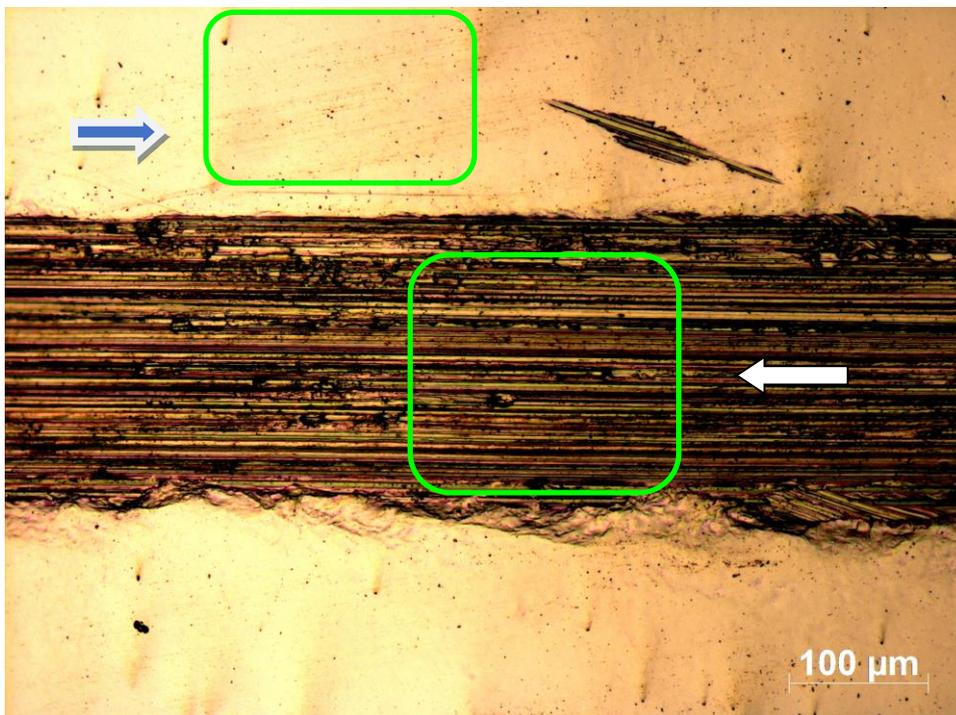
As figuras a seguir apresentam a imagens das micrografias para as amostras soldadas com frequência de 10 Hz e submetidas aos ensaios de tribocorrosão com atrito.

Figura 40 - Micrografia amostra soldada com frequência de vibração de 10 Hz com ampliação de 100x.



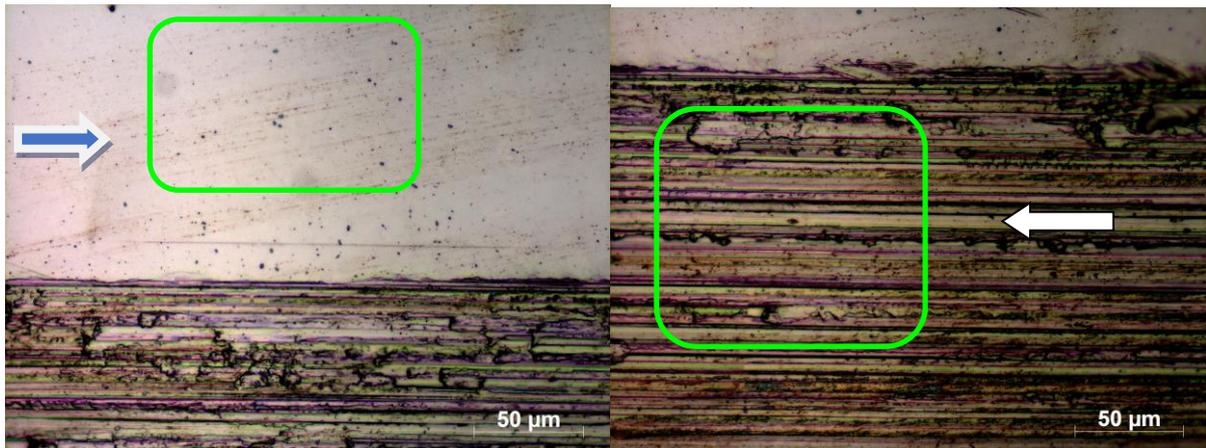
Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 41- Micrografia amostra soldada com frequência de vibração de 10 Hz com ampliação de 200x.



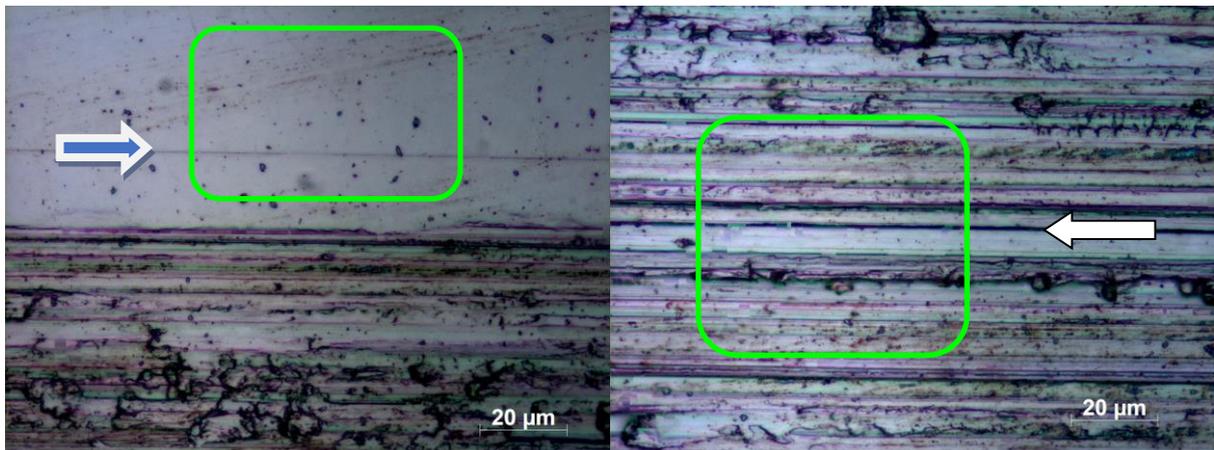
Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 42 - Micrografia amostra soldada com frequência de vibração de 10 Hz com ampliação de 500x.



Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 43 - Micrografia amostra soldada com frequência de vibração de 10 Hz com ampliação de 1000x.

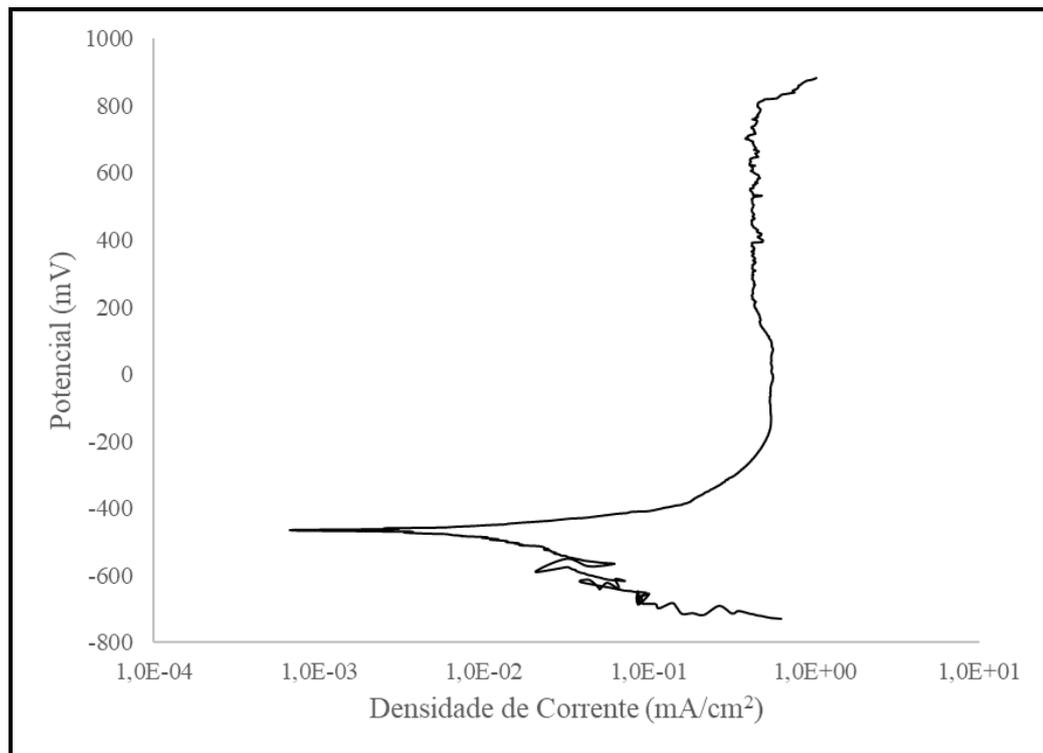


Fonte: Próprio Autor (2021)

O Gráfico 13 a seguir apresenta a análise do ensaio de tribocorrosão para a amostra soldada com frequência de 15 Hz, a qual apresentou um valor de resistência a corrosão por pite inferior ao analisado no ensaio potenciodinâmico sem atrito.

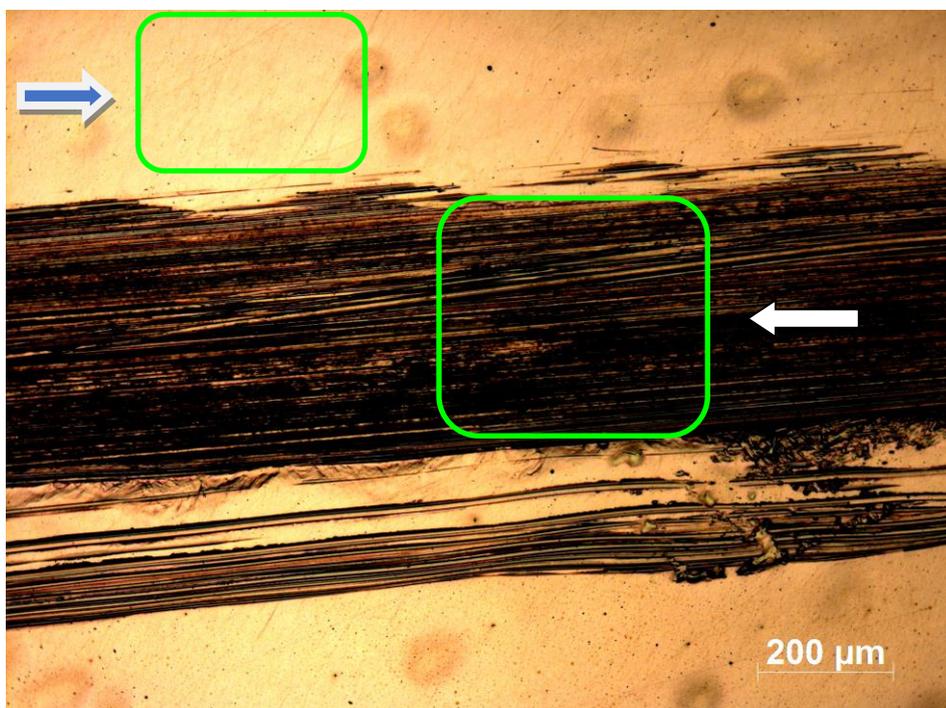
O valor para a amostra soldada com 15 Hz caiu de 1020,67 mV para 815,73 mV o que significa uma redução de 204,94 mV de potencial de pite.

Gráfico 13 - Amostra soldada por TIP-TIG com frequência de 15 Hz, submetido a ensaio de tribocorrosão.



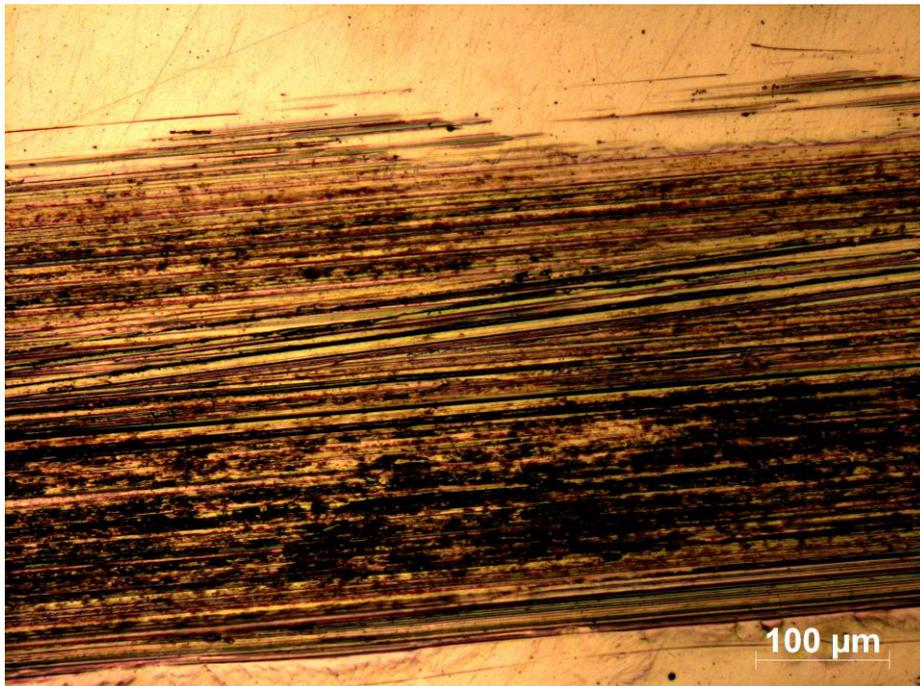
Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 44 - Micrografia amostra soldada com frequência de vibração de 15 Hz com ampliação de 100x.



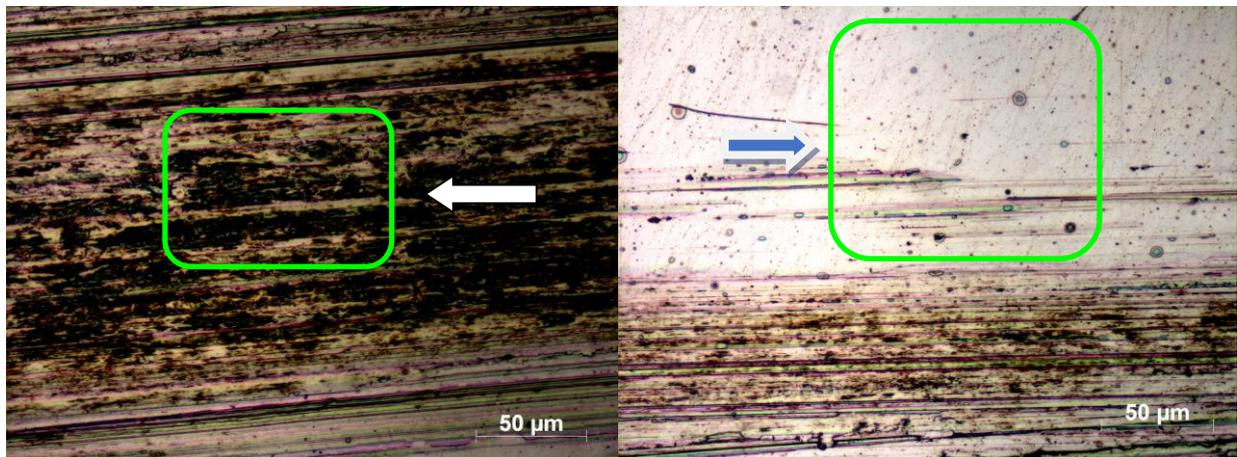
Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 45 - Micrografia amostra soldada com frequência de vibração de 15 Hz com ampliação de 200x.



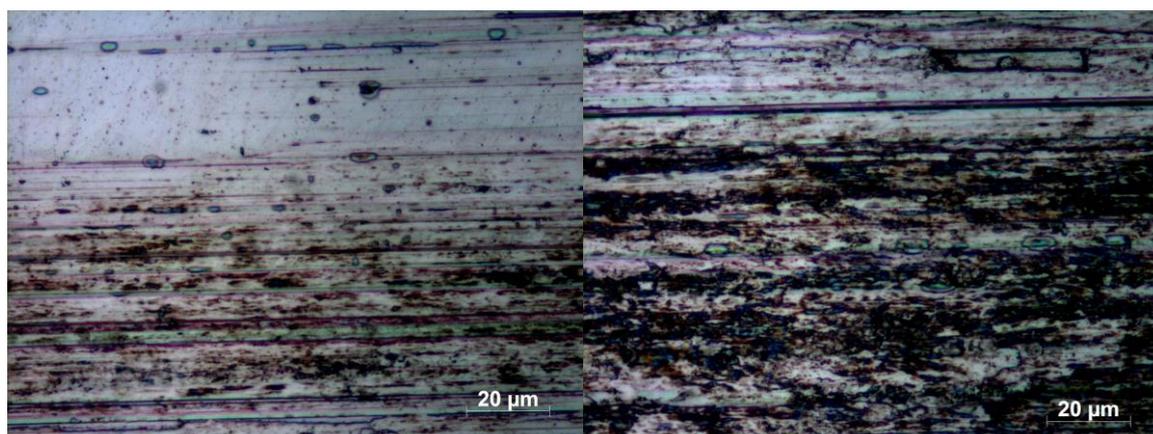
Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 46 - Micrografia amostra soldada com frequência de vibração de 15 Hz com ampliação de 500x.



Fonte: Próprio Autor (2021)

Figura 47 - Micrografia amostra soldada com frequência de vibração de 15 Hz com ampliação de 1000x.



Fonte: Próprio Autor (2021)

6.1 COMPARATIVO CORROSÃO E TRIBOCORROSÃO

Utilizando os valores de corrosão e tribocorrosão com atrito tabelados é possível fazer uma análise comparativa e qualitativa para as duas condições de ensaios.

Os valores obtidos no ensaio de tribocorrosão apresentam-se significativamente inferiores para potencial de corrosão e potencial de pite quando comparados aos ensaios de corrosão.

Tabela 10 - Comparativo entre ensaios de corrosão e tribocorrosão

Ensaio de Corrosão			Ensaio de Tribocorrosão		
Amostra	Potencial Corrosão (mV)	Potencial Pite (mV)	Amostra	Potencial Corrosão (mV)	Potencial Pite (mV)
5 Hz	-132,67±48,21	595,67±72,16	5 Hz	-351,37	586,09
10 Hz	-261,67±117,79	533±38,57	10 Hz	-443,02	336,79
15 Hz	-115,33±6,11	1020,67±27,68	15 Hz	-466,94	815,73

Fonte: Próprio Autor (2021)

Para a melhor condição de resistência a corrosão observada a amostra soldada com 15 Hz constatou-se que o valor de potencial de corrosão foi muito menor comparado ao ensaio de corrosão onde reduziu de -115,33 mV para -466,94 mV passando a não ser a amostra com maior potencial de corrosão.

A pior condição antes no ensaio de corrosão para amostra soldada com frequência de 10 Hz continuou apresentando potencial de pite inferior, porém para potencial inicial de corrosão este valor foi superior ao da amostra de 15 Hz.

Notou-se também que a amostra de 5 Hz apresenta o potencial mais alto para corrosão, porém inferior ao potencial de pite quando comparada com a amostra soldada com 15 Hz.

7 CONCLUSÕES

É possível concluir que o equipamento de tribocorrosão funcionou de maneira adequada, atendendo a todas as condições de ensaios sem interferência no potenciostato durante os ensaios.

A diluição para as amostras com maiores frequências de vibração na soldagem TIP-TIG de eletrodo se mostrou menor apresentando uma microestrutura diferenciada e maiores potenciais de pites.

O aço inoxidável deve ser balanceado em sua estrutura ferrítica e austenítica, proporcionando boas características de resistência a corrosão, porém com o aporte de calor podem surgir fases de austenita secundária, fase chi e sigma que são prejudiciais ao material quanto a resistência a corrosão, sendo suscetíveis a formação de pites.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de corrosão e tribocorrosão podemos afirmar que o material soldado com frequência de 15 Hz apresenta a melhor resistência a corrosão por pite seguido do material soldado com frequência de 5 Hz, sendo a condição de 10 Hz a pior dentre as ensaiadas.

A menor diluição gerada por maiores frequências de vibração na soldagem tip-tig apresentaram melhores resultados de resistência a corrosão e tribocorrosão, indicando que menores teores de Ferro são benéficos para resistência a corrosão dos revestimentos.

Através das imagens obtidas por microscopia foi possível observar grandes zonas de pites nas regiões afetadas pelo atrito, o que valida a tendência da quebra de filme passivo com atrito e pressão controlados.

Os resultados obtidos comparando corrosão e tribocorrosão apresentam-se dentro de faixas e valores compreensíveis e aceitáveis para o ensaio proposto, validando desta forma o funcionamento do equipamento tribômetro desenvolvido.

A pressão aplicada sobre a superfície do material analisado foi baseada em artigos científicos que respaldam os limites entre 0,6 N e 70 N garantindo efeitos coerentes dentro desta faixa de aplicação.

A complexidade para obter-se bons resultados nas análises utilizando o tribômetro mostram que o processo de validação do ensaio depende também da instrumentação acoplada a este, e é importante salientar que os procedimentos de medição do coeficiente de atrito e incertezas atreladas esta medição podem ser fatores de melhoria.

A concepção do equipamento apresenta conceitos inovadores quando comparados aos inventos existentes patenteados no Brasil, desta forma foi efetuado o peticionamento através do INPI para obter-se a patente do equipamento desenvolvido.

8 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como proposta de melhoria e continuidade deste trabalho podemos citar, a continuidade das demais análises a serem efetuadas como a análise no MEV para verificação e quantificação do desgaste na superfície.

O isolamento da região onde acontece o ensaio dos demais componentes externos evitando assim interferências de ruídos bem como ataque corrosivo.

Maior número de ensaio e amostragem para garantir numericamente médias melhores.

Testar diferentes condições de cargas e meios corrosivos podendo comparar os resultados.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SHOCKLEY, J. Michael; HORTON, Derek J.; WAHL, Kathryn J. Effect of aging of 2507 super duplex stainless steel on sliding tribocorrosion in chloride solution. **Wear**, v. 380, p. 251-259, 2017.

MARQUES, F. et al. Influência de tratamentos térmicos na resistência ao desgaste por micro abrasão de um aço inoxidável superduplex. **Wear**, v. 271, n. 9-10, p. 1288-1294, 2011.

POTGIETER, J. H. et al. Influence of nickel additions on the corrosion behaviour of low nitrogen 22% Cr series duplex stainless steels. **Corrosion Science**, v. 50, n. 9, p. 2572-2579, 2008.

WOLYNEC, Stephan. Técnicas Eletroquímicas em Corrosão Vol. 49. Edusp, 2003.

Traceparts, 2020. Disponível em: <<https://www.traceparts.com/br/product/rollon-unidade-linear->> Acesso em: 2 de junho. de 2020.

Esferas de alumina, 2020. Disponível em: <<https://www.aasabrasivos.com.br/esferas-de-alumina>> Acesso em: 7 de Abril. de 2020.

SILVA, Priscila Pereira Barbosa da. Parametrização e caracterização de revestimentos de INCONEL 625 depositados por plasma/pó com arco transferido sobre substrato de aço ASTM A-36. 2019. Master's Thesis. Universidade Federal de Pernambuco.

COLPAERT, Hubertus, et al. *Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns*. Editora Blucher, 2008.

HAN, Gaofeng et al. Effects of NaCl concentration on wear–corrosion behavior of SAF 2507 super duplex stainless steel. **RSC advances**, v. 6, n. 112, p. 111261-111268, 2016.

PETTERSSON, Claes-Ove; FAGER, Sven-Åke; STEEL, AB Sandvik. Welding practice for the Sandvik duplex stainless steels SAF 2304, SAF 2205 and SAF 2507. **AB Sandvik Steel, Sweden**, 1995.

Folha de especificação Sandvik 25.10.4.L

RIFFEL, Kauê Correa et al. Effect of Dynamic Wire in the GTAW Process: Microstructure and Corrosion Resistance. **Journal of Materials Processing Technology**, p. 116758, 2020.v

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais uma introdução**. 8ª. ed. Rio de Janeiro - RJ: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, v. 1, 2013.

DAVIS, J. R. Stainless Steel Cladding and Weld Overlays. **ASM Specialty Handbook: Stainless Steel**, 1994.

- EGHLIMI, A. et. al. Evaluation of microstructure and texture across the welded interface of super duplex stainless steel and high strength low alloy steel. **Surface & Coatings Technology**, Isfahan - Iran, v. 264, p. 150-162, Dezembro 2014.
- ELIAS, M. D. S. **Avaliação Metalúrgica da Soldagem de Revestimento Inox Austenítico sobre aço SAE 4130**. UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE. CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ, p. 142. 2013.
- GENTIL, V. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC, 2017.
- INFOSOLDA. **Infosolda**, 2013. Disponível em: <https://infosolda.com.br/bibliotecadigital/livros_senai/processos/180-revestimento-por-soldagem-processos-de-soldagem-pararevestimento>. Acesso em: 07 Setembro 2019.
- KANNAN, T.; MURUGAN, N. Effect of Flux Cored Arc Welding Process Parameters on Duplex Stainless Steel Clad Quality. **Journal of Materials Processing Technology**, 2006. 230-239.
- MAIA, L. C. et. al. Estudo da Influência da Frequência de Oscilação do Arame nas Características dos Cordões em Soldagem TIG com Alimentação. **XLII CONSOLDA – CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM**, Belo Horizonte – MG, 28-30 Novembro 2016. 10.
- MARQUES, A. L. D. A. **Aço Inoxidável AISI 904L como Revestimento por Soldagem a Arco Elétrico Pulsado em Atmosfera Controlada**. CEFET/RJ. Rio de Janeiro - RJ, p. 101. 2018.
- MARTINS, M.; CASTELETTI, L. C. Obtenção e caracterização dos aços inoxidáveis dúplex e superdúplex. **Fundição e Serviços**, São Paulo - SP, Janeiro 2007. 108-119.
- NUNES, E. B. et. al. Influência da Energia de Soldagem na Microestrutura e na Microdureza de Revestimentos de Aço Inoxidável. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 17, p. 114-122, Abr/Jun 2012.
- JORGE, Vinícius Lemes, et al. Desenvolvimento e Avaliação de Técnicas para Pulsação da Alimentação de Arame em Soldagem a Arco. **Soldagem & Inspeção**, 2018, 23: 326-339.
- PAES, L. E. D. S. **Soldagem TIG Orbital – Técnica de Alimentação Dinâmica do Arame Visando Aumento na Produtividade**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 206. 2016.

PAIVA, T. C. C. Análise da Influência do Gás de Purga na Raiz de Juntas Soldadas pelo Processo GTAW em Aço Inoxidável Superduplex UNS S32750. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 19, p. 125-133, Abr/Jun 2014.

CAO, Shoufan; MISCHLER, Stefano. **Modeling tribocorrosion of passive metals—A review**. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2018, 22.4: 127-141.

HUTTUNEN-SAARIVIRTA, Elina, et al. Tribocorrosion behaviour of thermally sprayed cermet coatings in paper machine environment. *Tribology International*, 2020, 142: 106006.

SILVA, Rodrigo César C.; NOGUEIRA, Ricardo P.; BASTOS, Ivan N. Tribocorrosion of UNS S32750 in chloride medium: Effect of the load level. *Electrochimica acta*, 2011, 56.24: 8839-8845.



UPF
UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900
(54) 3316 7000 - www.upf.br