

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

PAOLA FERNANDA SILVEIRA MONTEIRO

**ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO EM REVESTIMENTO INCONEL 625
SOLDADO**

GUARAPUAVA

2023

PAOLA FERNANDA SILVEIRA MONTEIRO

**ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO EM REVESTIMENTO INCONEL 625
SOLDADO**

Corrosion resistance analysis in Inconel 625 solder coating

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

Orientador: Prof. Dr. Henrique Holzmann.

GUARAPUAVA

2023



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

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

PAOLA FERNANDA SILVEIRA MONTEIRO

**ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO EM REVESTIMENTO INCONEL 625
SOLDADO**

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

Data de aprovação: 11/08/2023

Henrique Ajuz Holzmann

Doutor

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Guarapuava

Denner Traiano

Mestre

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Guarapuava

Ricardo Vinicius Bubna Biscaia

Doutor

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Guarapuava

GUARAPUAVA

2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos aqueles que estiveram ao meu lado durante a jornada da realização deste trabalho de conclusão de curso e graduação.

Agradeço em especial aos meus pais, Michele Lilian Silveira e Mauro Moraes Gonçalves, e a meus irmãos Sérgio Henrique Silveira Moraes Gonçalves e Mateus Silveira Moraes Gonçalves por todo o amor, suporte e sacrifícios que fizeram ao longo dos anos. A constante dedicação e confiança em mim depositadas por minha família foram essenciais para minha perseverança.

Ao meu companheiro, Ramon Alan Lustosa Soares, agradeço por acompanhar e apoiar minhas decisões. Sua presença foi meu refúgio em todos os momentos.

Não posso deixar de reconhecer o valioso papel desempenhado pelos meus orientadores acadêmicos, professor Dr. Henrique Ajuz Holzmann e professor Me. Denner Traiano.

Ao meu amigo Luan Henrique, agradeço pela amizade durante todos esses anos, sem você a graduação seria muito mais pesada, foram tantas conquistas e desafios feitos em conjunto.

A todos aqueles que, de uma forma ou de outra, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, o meu sincero obrigado.

Este trabalho não é apenas meu, mas também é um reflexo de todas as contribuições daqueles que me rodeiam. Aqui registro minha gratidão e espero que possamos continuar compartilhando conquistas e momentos especiais juntos.

RESUMO

A demanda por materiais que resistam a ambientes agressivos promove o desenvolvimento de estudos de materiais e técnicas para retardar o efeito corrosivo inerente aos materiais e suas aplicações. Inúmeras são alternativas possíveis aplicáveis para prorrogar a vida útil ou promover a recuperação de peças que não possuem integralmente propriedades desejáveis para uma aplicação específica. Tais estratégias abrangem desde uma nova seleção de materiais até a manutenção da integridade do revestimento protetor, seja por pintura ou, para o caso específico do presente estudo, pela deposição de revestimento com ligas resistentes à corrosão sobre substratos menos nobres. Na indústria química, de petróleo e gás e de processamento de alimentos é comumente empregada a soldagem de revestimento com a liga Inconel 625 em peças para restaurar as características mecânicas, melhorar as características de durabilidade e resistência à corrosão. Na indústria química, de petróleo e gás e de processamento de alimentos é comumente empregada a soldagem de revestimento com a liga Inconel 625 em peças para melhorar as características de durabilidade e resistência à corrosão. Neste cenário, o presente trabalho analisa a taxa de corrosão anual do revestimento de Inconel 625 depositado por soldagem MIG (Metal Inert Gás) na célula de corrosão eletroquímica, com a variação da rugosidade superficial com lixa de SiC 100 mesh e 1200 mesh, exposta a meio contendo NaCl 3,5% e H₂SO₄ 1 Mol. Os dados para cálculo da taxa de corrosão anual advêm do ensaio OCP, Micropolarização e Macropolarização e os valores da taxa de corrosão são discutidos junto às análises da caracterização das superfícies via Perfilometria Óptica e Microscopia Eletrônica de Varredura. As conclusões trazidas no presente estudo apresentam a rugosidade superficial mais elevada em NaCl 3,5% como a combinação de fatores mais crítica para a taxa de corrosão anual, com presença de corrosão localizada nos contornos de grão além da corrosão por pites. Ainda os valores mais elevados da Taxa de corrosão são associados a menores valores de resistência a polarização e maiores valores de corrosão.

Palavras-chave: Corrosão; Revestimento; Liga Inconel 625; Rugosidade.

ABSTRACT

The demand for materials that resist aggressive environments promotes the development of material studies and techniques to delay the corrosive effect inherent to materials and their applications. There are many possible alternatives applicable to extend the useful life or promote the recovery of parts that do not fully possess desirable properties for a specific application. Such strategies range from a new selection of materials to maintaining the integrity of the protective coating, either by painting or, for the specific case of the present study, by depositing a coating with corrosion-resistant alloys on less noble substrates. In the chemical, oil and gas and food processing industries, welding of Inconel 625 alloy coatings on parts is commonly employed to restore mechanical characteristics, improve durability and corrosion resistance characteristics. In the chemical, oil and gas and food processing industry, it is commonly employed to clad weld Inconel 625 alloy on parts to improve durability and corrosion resistance characteristics. In this scenario, the present work analyzes the annual corrosion rate of Inconel 625 coating deposited by MIG (Metal Inert Gas) welding in the electrochemical corrosion cell, with the variation of surface roughness with SiC 100 mesh and 1200 mesh sandpaper, exposed to medium containing NaCl 3,5% and H₂SO₄ 1 Mol. The data for calculating the annual corrosion rate come from the OCP, Micropolarization and Macropolarization test and the corrosion rate values are discussed together with the surface characterization analyses via Optical Profilometry and Scanning Electron Microscopy. The conclusions drawn in the present study present the highest surface roughness in 3,5% NaCl as the most critical combination of factors for the annual corrosion rate, with the presence of localized corrosion at the grain boundaries in addition to pitting corrosion. Also higher values of corrosion rate are associated with lower values of polarization resistance and higher values of corrosion.

Keywords: Corrosion; Coating; Inconel 625 alloy; Roughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquemática de uma pilha eletroquímica.	19
Figura 2 - Representação das principais formas de corrosão.	20
Figura 3 - Formas de pites segundo a norma ASTM G 46-76.	21
Figura 4 - Variação do potencial em função da corrente.	23
Figura 5 - Diagrama de Tafel.	24
Figura 6 - Gráfico para análise de resultados da micropolarização.	25
Figura 7 - Comportamento genérico do potencial pela corrente elétrica na macropolarização.	26
Figura 8 - Curvas de polarização encontrados em sistemas práticos de corrosão.	28
Figura 9 - Curva de polarização potenciodinâmica para um material com comportamento passivo.	28
Figura 10 - Esquema de célula eletroquímica.	30
Figura 11 - Fluxograma das etapas do estudo.	39
Figura 12 - Sistema utilizado para soldagem dos revestimentos no substrato.	41
Figura 14 - Parâmetros de rugosidade Ra e Rz.	43
Figura 15 - Parâmetros de rugosidade Ssk e Sku.	43
Figura 16 - Esquema da célula de corrosão.	44
Figura 17 - Configuração da célula de corrosão.	45
Figura 18 - Curvas potenciodinâmicas de macropolarização para o revestimento a 100 mesh em NaCl 3,5%, (a) e (b) e em H ₂ SO ₄ 1 Mol, (c) e (d).	49
Figura 19 - Curvas potenciodinâmicas de macropolarização para o revestimento a 1200 mesh em NaCl 3,5%, (a) e (b) e em H ₂ SO ₄ 1 Mol, (c) e (d).	50
Figura 20 - Curvas potenciodinâmicas de macropolarização para o revestimento com rugosidade superficial de todas as amostras em ambiente contendo NaCl 3,5%.	51
Figura 21 - Curvas potenciodinâmicas de macropolarização para o revestimento com rugosidade de todas as amostras em ambiente contendo H ₂ SO ₄ 1 Mol.	53
Figura 22 - Superfície de resposta obtida do planejamento experimental.	57
Figura 23 - Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície preparada com lixa 1200 (a) anterior ao ataque corrosivo e (b) posterior ao ataque corrosivo em H ₂ SO ₄ 1 Mol.	58

Figura 24 - Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície preparada com lixa 100 mesh (a) anterior ao ataque corrosivo e (b) posterior ao ataque em NaCl 3,5%.	59
Figura 25 - Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície preparada com lixa (a) 1200 mesh em H₂SO₄ 1 Mol e (b) 100 mesh em NaCl 3,5%.	59
Figura 26 - Rugosidade superficial (a) 1200 mesh em H₂SO₄ 1 Mol e (b) 100 mesh em NaCl 3,5%......	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Potenciais de Eletrodos Padrão a 25°C.	20
Tabela 2 - Composição da Liga Inconel 625.	34
Tabela 3 - Composição química do substrato analisada por espectrometria de absorção atômica dos metais de adição (% em peso).....	40
Tabela 4 - Composição química do revestimento analisada por espectrometria de absorção atômica dos metais de adição (% em peso).	40
Tabela 5 - Parâmetros de soldagem utilizados na deposição dos revestimentos de Inconel.....	41
Tabela 6 - Modelo de dados para cálculo da Superfície de Resposta.	47
Tabela 7 - Identificação dos ensaios.	48
Tabela 8 - Resultados da caracterização eletroquímica de revestimento de liga Inconel 625 com 100 mesh e 1200 mesh em NaCl 3,5% e H ₂ SO ₄ 1 Mol.	54
Tabela 9 - Média da taxa de corrosão para cada combinação.	55
Tabela 10 - Resultados médios obtidos para cada parâmetro na perfilometria óptica.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRACO	Associação Brasileira de Corrosão
ASTM	American Society for Testing and Materials
CE	Contra Eletrodo
CMT	Cold Metal Transfer
ECS	Eletrodo de Referência
EPP	Endurecido Por Precipitação
ET	Eletrodo de Trabalho
GTAW	Gas Tungsten Arc Weld
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MAG	Metal Active Gás
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MIG	Metal Inert Gás
PIB	Produto Interno Bruto

LISTA DE SIMBOLOS

E_{corr}	Potencial de Corrosão (V)
η_{ativ}	Polarização por Ativação (A/cm ²)
R_p	Resistência de Polarização (Ω)
i_{corr}	Corrente de Corrosão (A)
T_{corr}	Taxa de Corrosão (mm/ano)
ΔE	Varição de Tensão do Potencial de Corrosão (V)
Δi	Varição da Densidade de Corrente (A/m)
β_a	Inclinação de Tafel Anódica (V/década)
β_c	Inclinação de Tafel Catódica (V/década)
F	Constante de Faraday (C/mol)
PA	Peso Atômico (u)
ρ	Densidade (g/cm ³)
t	Tempo (s)
γ	Fase Gama
α	Fase Alfa
ε	Erro aleatório
η	Verdadeira resposta média
β_n	Coeficientes da superfície de resposta

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Justificativa	16
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Objetivo Geral	17
1.2.2 Objetivos Específicos	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Corrosão	18
2.1.1 Formas de corrosão	20
2.2 Curva de Polarização	22
2.2.1 Polarização por ativação	23
2.2.1.1 Micropolarização	<u>24</u>
2.2.1.2 Macropolarização	<u>26</u>
2.2.2 Passivação	27
2.3 Fatores que influenciam na cinética de corrosão	29
2.4 Ensaios eletroquímicos	30
2.4.1 Análise de corrosão em célula eletroquímica	30
2.5 Aços inoxidáveis	31
2.5.1 Influência dos elementos de liga	32
2.6 Superliga de Níquel - Inconel 625	32
2.6.1 Composição química da liga Inconel 625	33
2.7 Revestimento por Soldagem	34
2.8 Influência da rugosidade no processo corrosivo	36
2.9 Metodologia de Superfície de Resposta	37
3 ASPECTOS METODOLÓGICOS	39
3.1 Materiais	39
3.2 Acabamento Superficial	42
3.3 Perfilometria óptica	42
3.4 Ensaios de corrosão	43
3.5 Planejamento Experimental e Superfície de Resposta	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	48

4.1 Corrosão do revestimento de liga Inconel 625 depositado através do processo MIG.....	48
4.2 Superfície de resposta	56
4.3 Caracterização da superfície.....	57
5 CONCLUSÃO	63
6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	65
7 REFERÊNCIAS.....	66

1 INTRODUÇÃO

A corrosão é um processo eletroquímico natural que pode afetar a maioria dos materiais, surge da exposição do material a um ambiente corrosivo, como água salgada, ácido ou ar úmido, desencadeando reações químicas que causam danos à sua estrutura. Esse processo é um problema grave em muitas indústrias, incluindo petróleo e gás, construção naval, aeroespacial e automotiva pois pode ocasionar falhas prematuras e perda de produção.

O mecanismo de corrosão dos metais em meio aquoso ocorre de forma eletroquímica de modo que os elementos componentes do metal, ou da liga, com a sua forma metálica menos estáveis, retornam ao seu estado de menor energia. A oxidação do ferro do aço é o exemplo mais conhecido de conversão de um metal (Ferro) num produto de corrosão não metálico (LABIAPARI, 2015)

O processo eletroquímico da corrosão caracteriza-se pela ocorrência de duas reações eletroquímicas, simultâneas, na mesma superfície. O potencial de corrosão depende da relação entre as taxas das reações anódicas e catódicas e o estado de oxidação do cátion de metal dissolvido. Essa combinação material-solução corrosiva pode ser considerada uma célula galvânica em curto-circuito na qual a energia é dissipada pelo consumo de reagente catódico (oxidante) (ASM INTERNATIONAL, 2010).

A corrosão dos metais é um processo espontâneo, irreversível e indesejável por ocasionar grandes prejuízos econômicos. Gentil (2006), pontua que o processo corrosivo é o principal responsável por potenciais catástrofes cotidianas, por exemplo, nas instalações de refino de petróleo e petroquímicas, cerca de 50% das falhas de materiais são creditadas à corrosão.

Segundo estudos técnicos desenvolvidos pela ABRACO (Associação Brasileira de Corrosão), o custo da corrosão representa entre 3% e 4% do PIB (Produto Interno Bruto) de um país e 30% desse custo poderia ser minimizado se métodos de mitigação já existentes fossem empregados de forma correta.

Aplicando ao Brasil a estimativa de 3,5% do PIB usado por alguns países para estimar os custos da corrosão e, considerando o valor do PIB brasileiro, estimado pelo

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) para 2021, obter-se-ia aproximadamente 304,5 bilhões de reais, para o custo da corrosão no país.

O aspecto econômico é relevante uma vez que associa perdas diretas e indiretas. As perdas diretas abrangem custos com a substituição de peças, mão de obra e energia e a manutenção de processo de proteção e as perdas indiretas abrangem a paralisação das unidades produtivas, perda de produto, projetos superdimensionados e perda de eficiência. Em um mundo ideal, quanto maior a consciência sobre os custos associados à corrosão proporcionalmente maiores devem ser os investimentos em estudos atrelados à novas tecnologias para atenuação dos efeitos da mesma.

O fato de a corrosão ser, normalmente, uma reação de superfície leva à proposição do controle através das propriedades do produto de corrosão, por exemplo, um composto metálico formado pode agir como uma barreira entre o metal e o meio, diminuindo a velocidade dessa deterioração. Alguns elementos químicos são adicionados às ligas metálicas, a fim de conferir propriedades físicas e químicas específicas e características para resistir a nocividade do meio em que será inserido. Dos elementos de liga empregados, destacam-se o Níquel e o Cromo com um papel fundamental na resistência à corrosão (LABIAPARI, 2015).

Dessa forma, ligas à base de Níquel endurecida por solução sólida pela adição de Cromo, Molibdênio e Nióbio, conhecida como Inconel 625, é altamente resistente à corrosão e empregada em ambientes agressivos, que incluem aplicações em petróleo e gás, indústrias químicas e de processamento de alimentos (ASTM, 2018).

A deposição de revestimentos metálicos com um metal mais nobre, com maior resistência ao desgaste, sobre substratos de metais menos nobres pode ser empregado em indústrias como uma alternativa para redução de custos com a corrosão. O processo de deposição do revestimento selecionado para o presente estudo, a soldagem MIG, possui uma elevada taxa de deposição, características próprias dos processos de soldagem por arco submerso (“Submerged Arc Welding – SAW”) e dos processos MIG/MAG (“Gas Metal Arc Welding – GMAW”), associada ao baixo custo da soldagem e facilidade de uso e de trabalhar com diferentes materiais (MARQUES *et al.*, 2011; ALVARÃES *et al.* 2020; SILVA *et al.*,2020).

Assim, a análise da influência do acabamento superficial e da variação do meio na resistência a corrosão de revestimento com a liga Inconel 625 soldado através do processo MIG é apresentado no desenvolvimento do estudo.

1.1 Justificativa

A corrosão é um processo espontâneo de degradação e a esse processo deve ser dada a devida atenção, pois afeta os metais de modo a reduzir a sua durabilidade e desempenho, além de envolver dois critérios críticos, são eles:

a) custos - os processos corrosivos têm sido responsáveis por elevados custos para reposição de estruturas e equipamentos degradados pela ação do meio;

b) perigos/riscos aos seres vivos - as falhas estruturais intrínsecas a esse processo, podem acontecer em maior ou menor grau de gravidade.

A exposição a ambientes agressivos desafia a integridade dos materiais utilizados em equipamentos e estruturas. A Liga Inconel 625, conhecida por sua resistência à corrosão é empregada como revestimento protetor em peças e componentes, visando a manutenção das características mecânicas, durabilidade e resistência à corrosão.

Visto o potencial de aplicação da liga Inconel 625, investigar o seu comportamento corrosivo permite compreender como esse material interage com agentes corrosivos específicos, como o cloreto de sódio e o ácido sulfúrico, fornecendo informações que contribuirão para aprofundar o entendimento sobre a durabilidade e a viabilidade da utilização da liga Inconel 625 auxiliando na tomada de decisões em processos industriais

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar o comportamento do processo de corrosão superficial do revestimento de liga Inconel 625 depositado através do processo MIG em substrato de aço inoxidável martensítico macio ASTM A-743 da classe CA6NM.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar topograficamente a superfície revestimento de liga Inconel 625 depositado através do processo MIG através da perfilometria óptica;
- Analisar a influência da rugosidade superficial do revestimento de liga Inconel 625 depositado através do processo MIG na taxa de corrosão anual;
- Analisar o comportamento corrosivo do revestimento de liga Inconel 625 depositado através do processo MIG exposto a meio contendo H_2SO_4 1 Mol;
- Analisar o comportamento corrosivo do revestimento de liga Inconel 625 depositado através do processo MIG exposto a meio contendo NaCl 3,5%;
- Modelar a superfície de resposta do processo corrosivo a partir dos resultados de taxa de corrosão calculadas;
- Determinar a combinação mais crítica dos dois fatores sobre a taxa de corrosão anual do revestimento de liga Inconel 625 depositado através do processo MIG;
- Caracterizar a superfície revestimento de liga Inconel 625 depositado através do processo MIG através da Microscopia Eletrônica de Varredura, antes e após o ataque corrosivo;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Há uma crescente demanda por materiais que resistam a ambientes agressivos e suas avarias e às mais diversas aplicações, dessa maneira, a necessidade de realizar estudos voltados ao desempenho destes materiais e desenvolvimento e aprimoramento de técnicas de proteção se torna indispensável. No caso deste estudo, o intuito é realizar a análise do comportamento do revestimento da liga Inconel 625 depositado pelo processo MIG submetido à corrosão em sua superfície, com a variação da rugosidade superficial e do meio corrosivo a que é exposta.

Para tanto, a revisão bibliográfica elaborada apresenta aspectos relacionados aos mecanismos de corrosão em metais, suas especificidades, pontos de atenção e fatores que promovem um retardo e/ou aceleração do processo corrosivo. É necessário realizar a caracterização de materiais resistentes ao processo corrosivo, especialmente da superliga de interesse, e conceituar os ensaios usuais e procedimentos padronizados por norma e modelagem matemática que foram adotados para o desenvolvimento do presente estudo.

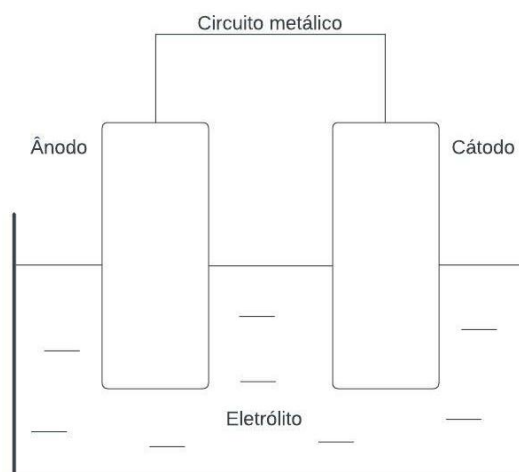
2.1 Corrosão

Discussões acerca da definição do que é a corrosão são realizadas por inúmeros autores. Dessa forma, visando uma compreensão mais didática sobre o tema, pode-se considerar que a corrosão, no contexto da engenharia, é a reação de um material com seu meio, com conseqüente deterioração de suas propriedades (LABIAPARI, 2015). Por ser um processo espontâneo, a corrosão modifica continuamente o material reduzindo sua vida útil.

A norma ASTM G193 (2021) define a corrosão como a reação química ou eletroquímica entre um material, geralmente um metal, e seu ambiente. Todos os materiais metálicos estão sujeitos ao processo corrosivo que comumente se processa por meio de reações eletroquímicas (STEIN *et al.*, 2019).

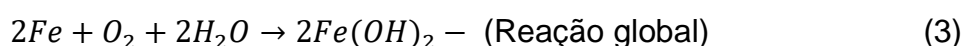
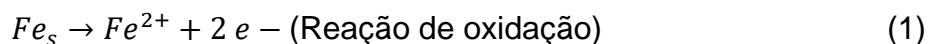
Neste processo, segundo Lima (2007), ocorrem reações de oxirredução entre metais e um eletrólito, composto por água e substâncias químicas, que formam uma pilha eletroquímica, apresentada esquematicamente na Figura 1 .

Figura 1 - Esquemática de uma pilha eletroquímica.



Fonte: Adaptado de GENTIL (2022).

Na pilha eletroquímica, a reação de oxidação do metal ocorre no ânodo e os elétrons cedidos são transportados pelo circuito metálico até o cátodo, onde acontece a redução e os íons gerados no cátodo se deslocam para o ânodo através do eletrólito. As equações abaixo são exemplos de semirreações que se processam em uma pilha eletroquímica.



Cada material apresenta um potencial de corrosão diferente para dado eletrólito e, através do valor deste potencial, é possível indicar a tendência do material ser corroído pela ação do meio.

O potencial de eletrodos padrão é um fator quantitativo que possibilita a análise dos potenciais de oxidação e redução de alguns elementos em determinados meios (GENTIL, 2022). Conforme a Tabela 1, é possível justificar a utilização do Níquel e do Cromo para proteção corrosiva, uma vez que estes elementos apresentam um potencial de oxidação maior em comparação com o Ferro e um potencial de redução menor. Dessa forma, em suas combinações em ligas protegem o Ferro da oxidação, através da formação de uma película passivadora.

Tabela 1 - Potenciais de Eletrodos Padrão a 25°C.

Potencial de oxidação (V)	Reação do eletrodo	Potencial de redução (V)
+ 0,44	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$	- 0,44
+ 0,25	$\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^-$	- 0,25
+ 0,74	$\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^-$	- 0,74

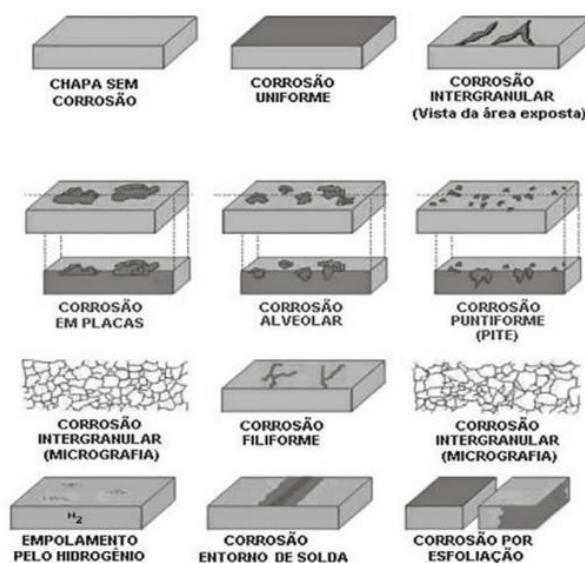
Fonte: Adaptado de CALLISTER JR. *et al.* (2021).

A resistência à corrosão de um determinado material não depende somente das características do meio no qual ele está inserido, mas também de sua composição e estrutura (LABIAPARI, 2015).

2.1.1 Formas de corrosão

Segundo Gentil (2011), o processo de caracterização da forma de corrosão auxilia na compreensão do mecanismo e na proposição de medidas adequadas de proteção. Para classificá-la é preciso considerar sua aparência, avaliar a forma do ataque, suas possíveis causas, assim como seus mecanismos. No entanto, é a aparência da superfície corroída que caracteriza qual a forma de corrosão que pode estar manifestada (STEIN *et al.*, 2019), sendo as principais formas de corrosão apresentadas na Figura 2

Figura 2 - Representação das principais formas de corrosão.



Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CORROSÃO (2017).

O Inconel 625 teve seu desenvolvimento iniciado na década de 1950 para aplicação em tubulações de vapor superaquecido. Esta liga oferece uma combinação de resistência à corrosão em diversos ambientes agressivos (SILVA, 2021) e, devido a essa característica de resistência a corrosão, é utilizada em uma ampla variedade de aplicações industriais. Apesar de ser altamente resistente à corrosão em muitos ambientes, da mesma forma que outras ligas metálicas, a liga Inconel 625 pode sofrer corrosão dois tipos de corrosão: uniforme e localizada (PARONI, 2015).

Conforme Paroni (2015), a corrosão uniforme ou generalizada, ocorre em meios redutores como em soluções que possuem H^+ , nela toda área exposta do metal é corroída uniformemente e a corrosão localizada ocorre em meios oxidantes nos quais o potencial esteja acima do potencial de redução do hidrogênio.

A corrosão por pites, conhecida também como corrosão puntiforme, se caracteriza por ser localizada e ocorre na superfície do metal, formando cavidades que se propagam em profundidade na liga. Esse tipo de corrosão ocorre em metais ou ligas expostos a meios com alta concentração de cloretos e a presença de defeito superficial localizado, como um arranhão ou avarias na composição do metal ou liga favorece a formação do pite (CALLISTER JR. *et al.*, 2021).

Figura 3 - Formas de pites segundo a norma ASTM G 46-76.



Fonte: GENTIL (2022).

A fragilização da estrutura metálica também pode ocorrer através da corrosão intergranular, quando o ataque se manifesta no contorno dos grãos de liga (STEIN *et al.*, 2019) e pode ser visualizada em ligas expostas a ambientes com alta temperatura, como em processos de soldagem e em equipamentos de refino químico.

A ação combinada de um ataque químico com a abrasão ou desgaste mecânico ocasionado pela cinética de um fluido dá origem a erosão-corrosão. Essa forma de corrosão é encontrada com frequência em tubulações nas regiões onde o fluido muda de direção ou o escoamento torna-se repentinamente turbulento, assim, todas as ligas metálicas utilizadas em aplicações dessa natureza, são suscetíveis à erosão-corrosão seja em maior ou menor grau (CALLISTER JR. *et al.*, 2021).

A erosão-corrosão é especialmente prejudicial para as ligas que formam o filme superficial passivo, pois a ação abrasiva pode desgastar esse filme protetor, expondo a superfície do metal e, caso o revestimento não for capaz de recompor o filme passivo continuamente de maneira rápida, a corrosão pode ser severa.

2.2 Curva de Polarização

Segundo Gentil (2011), um metal em contato com uma solução contendo seus próprios íons possui um potencial E que é definido pela Equação de Nernst (Equação 4). Esse potencial varia de acordo com a corrente circular aplicada por esse eletrodo gerando um novo valor de potencial E' . A diferença entre esses potenciais é conhecida como sobre potencial.

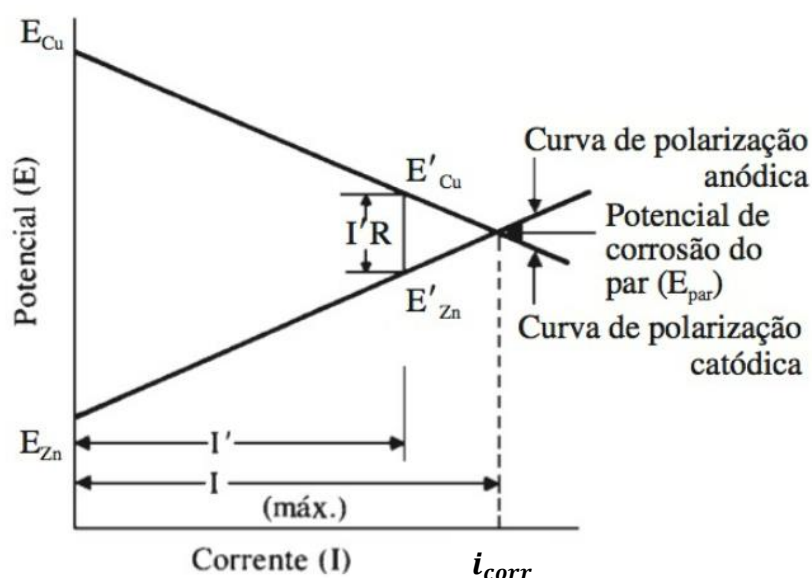
$$\eta = E' - E \quad (4)$$

É muito comum que esse potencial inicial seja diferente do potencial de equilíbrio termodinâmico, devido à presença de outras reações no processo. Nesse caso, este valor é conhecido como potencial de corrosão E_{corr} , cujo qual também varia ao circular uma corrente pelo eletrodo. De acordo com Callister Jr. *et al.* (2021) a polarização consiste no deslocamento de cada potencial de eletrodo a partir do seu valor de equilíbrio. Dessa forma, a modificação do potencial de um eletrodo pode ocorrer através da variação de concentração, sobretensão de um gás ou pela variação de resistência ôhmica.

Como já abordado, no caso da pilha eletroquímica de corrosão, estabelece-se uma diferença de potencial que tende diminuir gradualmente com o tempo, conforme a Figura 4 na qual o potencial do ânodo aproxima-se ao do cátodo e vice-versa. Este fenômeno é conhecido como polarização dos eletrodos e essa diferença de potencial entre dois eletrodos indica apenas que haverá polarização, não indicando conclusões

sobre a cinética da corrosão, pois a velocidade das reações anódica e catódica dependerá das características de polarização de cada um dos metais.

Figura 4 - Variação do potencial em função da corrente.



Fonte: Adaptado de GENTIL (2022).

A existência do efeito do fenômeno da polarização evita um quase curto-circuito ocasionado pela corrente elevada entre ânodos e cátodos combinada apenas às resistências de contato dos eletrodos, já que as resistências elétricas tanto do metal quanto do eletrólito são muito baixas (ABRACO, 2017).

2.2.1 Polarização por ativação

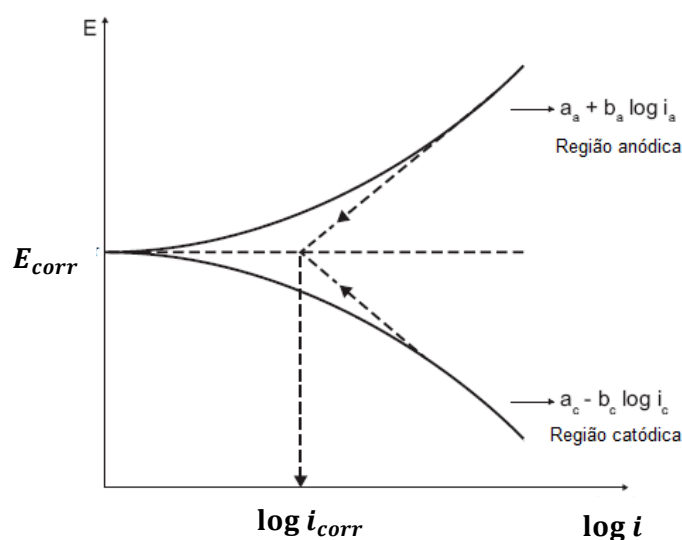
A polarização por ativação (η_{atv}) decorre de uma barreira energética criada na superfície do eletrodo. Conforme as reações se processam na interface eletrodo/eletrólito, formam-se íons na superfície do eletrodo, como uma barreira, que podem gerar uma queda de desempenho da célula dificultando a transferência de elétrons. Para a analogia da corrosão, utiliza-se as equações de Butler-Volmer (GENTIL, 2022) verificadas empiricamente por Tafel pela Equação 5.

$$n = a + b \log i \quad (5)$$

Onde a e b são as constantes de Tafel. A representação gráfica da lei de Tafel pode ser feita num gráfico potencial (E) vs. log corrente (i), e pode ser observado no diagrama da

Figura 5, que apresenta uma curva de polarização potenciodinâmica para um material sem passivação com base na norma ASTM G3 (2014), norma que traz a padronização da prática para convenções aplicáveis a medições eletroquímicas em ensaios de corrosão.

Figura 5 - Diagrama de Tafel.



Fonte: Adaptado de GENTIL (2022).

O E_{corr} corresponde ao início do processo de corrosão, indicando o ponto de menor densidade de corrente na curva de polarização, e é dado pela intersecção das curvas de polarização anódica e polarização catódica. A norma ASTM G59-97 (2020), especifica que pode ser definido o E_{corr} de um material 55 minutos após sua imersão em uma solução eletrolítica. No entanto, alguns materiais estabilizam o E_{corr} com um tempo maior devido às reações que ocorrem na interface metal/solução.

2.2.1.1 Micropolarização

A micropolarização é uma técnica que consiste em promover uma variação de potencial, de ± 10 mV a ± 20 mV, acerca do potencial de corrosão (E_{corr}), conforme

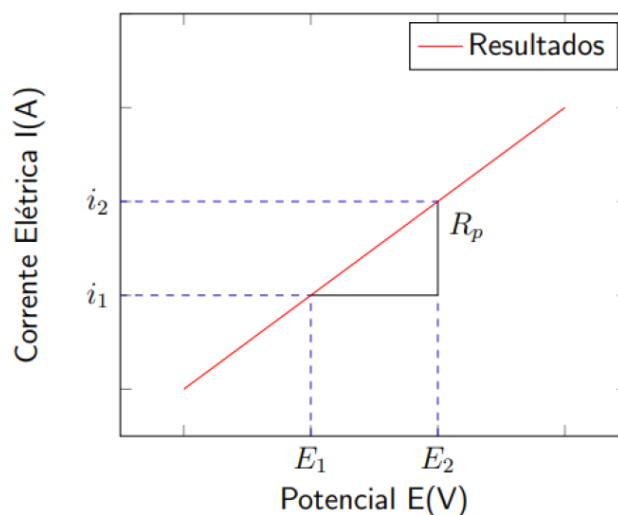
indicada pela norma ASTM G59-97 (2020). Esse potencial é aplicado por uma fonte externa, o potenciostato, e a partir da variação da corrente de polarização em relação ao eletrodo de referência registrada graficamente torna-se possível calcular a resistência de polarização do material (R_p) (ASTM, 2020; TELEGINSKI, 2012). Esta resistência é calculada pela Equação 6.

$$R_p = \frac{\partial E}{\partial i} \Big|_{v \rightarrow 0} \rightarrow R_p = \frac{\Delta E}{\Delta i} \quad (6)$$

Onde R_p é dada em Ω , ΔE é a variação de tensão do potencial de corrosão, dada em V, e Δi a variação da densidade de corrente para a variação da tensão varrida, dada em A/cm².

Segundo considerações feitas por Teleginski (2012) e Sobojak (2019) em suas contribuições acadêmicas, o fato da tensão ser diretamente proporcional a corrente e inversamente proporcional a resistência, pela lei de Ohm, explica o porquê de a resistência de polarização (R_p) ser o inverso do coeficiente angular da reta obtida com os dados da micropolarização apresentados graficamente na Figura 6

Figura 6 - Gráfico para análise de resultados da micropolarização.



Fonte: SOBJAK (2019).

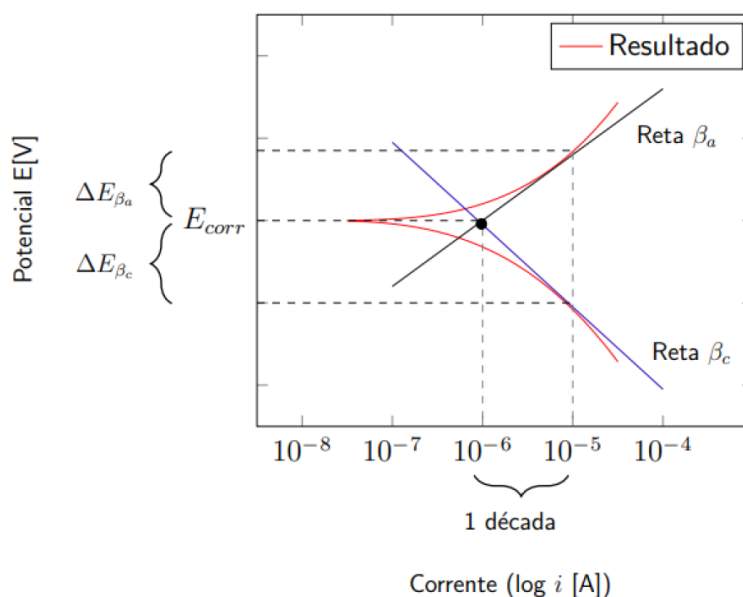
Dessa forma, pode-se observar que quanto maior for a inclinação da reta conseqüentemente menor será a resistência à polarização, acelerando a corrosão devido a dificultar a passagem de corrente (TELEGINSKI, 2012).

2.2.1.2 Macropolarização

A macropolarização é uma técnica cuja variação de potencial estabelecida é de ± 100 mV a ± 150 mV, acerca do potencial de corrosão (E_{corr}), conforme indicada pela norma ASTM G59-97 (2020).

A Figura 7 ilustra o comportamento genérico do potencial pela corrente elétrica obtido pelo método de macropolarização, nesta no eixo das abcissas a corrente está em escala logarítmica e potencial varrido é mostrado no eixo das coordenadas (BORGES, 2019).

Figura 7 - Comportamento genérico do potencial pela corrente elétrica na macropolarização.



Fonte: SOBJAK (2019).

A partir dos gráficos gerados torna-se possível obter duas informações: 1) a inclinação de Tafel catódica (β_c) representada pela curva decrescente e 2) a inclinação de Tafel anódica (β_a) representada pela curva crescente.

As inclinações das retas β_a e β_c , são encontradas a partir das retas traçadas nas regiões de Tafel com os valores exponenciais de Log da corrente, que representam o intervalo de uma década (LIMA, 2022).

A corrente de corrosão é calculada conforme a Equação 7, a partir dos dados de β_c e β_a (WOLYNEC, 2003) e o valor de R_p , encontrado no método de micropolarização (MACIOSKI *et al.*, 2016).

$$i_{corr} = \frac{|\beta_c|\beta_a}{2,303*R_p*(|\beta_c|+\beta_a)} \quad (7)$$

Conforme Daniliszyn (2013), a taxa de corrosão T_{corr} (mm/ano), pode ser determinada a partir da Equação 888.

$$T_{corr} = \frac{i_{corr}*PA*t}{n*F*A*\rho} \quad (8)$$

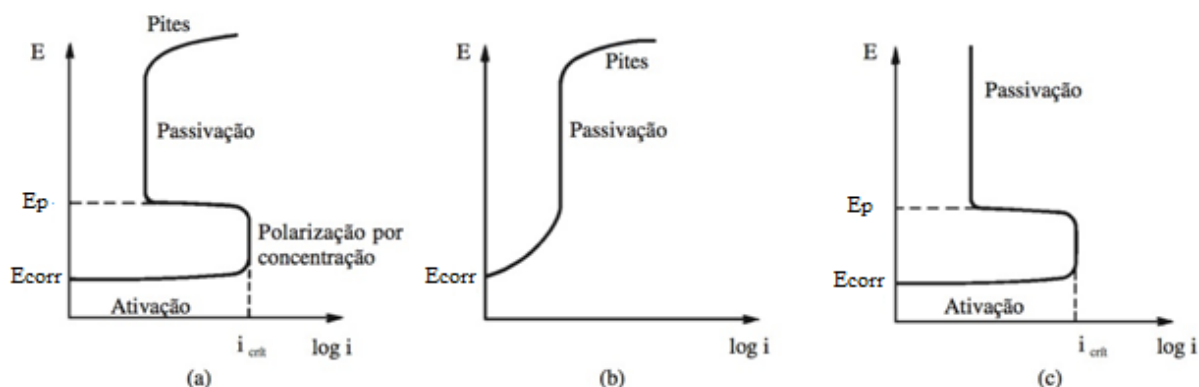
Onde PA é o peso atômico do material (em g/mol), i_{corr} a corrente de corrosão (em A/cm²), t é o tempo (um ano em segundos), n corresponde ao número de elétrons transferidos, F é a constante de Faraday (96487 C/mol), A é a área da superfície do ET (Eletrodo de Trabalho) em contato com o eletrólito (em cm²) e ρ densidade do material (g/cm³).

2.2.2 Passivação

A passivação é um fenômeno que ocorre com alguns metais e ligas e se caracteriza pela perda da reatividade química sob certas condições do meio. Esse fenômeno ocorre com elementos como o Cromo, Ferro, Níquel, Titânio e muitas de suas ligas. Esta propriedade é resultado da formação, sobre a superfície do metal, de uma película de óxido, o que torna o seu comportamento eletroquímico menos ativo que o normalmente apresentado (GENTIL, 2021; STEIN *et al.*, 2019).

Este fenômeno da passivação pode ser explicado em termos da curva de potencial de polarização contra log da densidade de corrente (i), e tem a forma característica tal como apresentada na Figura 8. Ao analisar as curvas, compreende-se que um metal pode estar sofrendo tanto reação de ativação quanto de passivação dependendo da particularidade do meio.

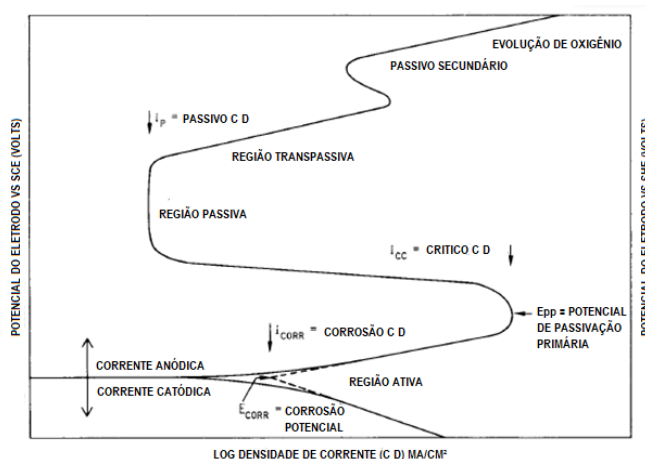
Figura 8 - Curvas de polarização encontradas em sistemas práticos de corrosão.



Fonte: GENTIL (2022).

Na curva (a) observa-se o início da polarização anódica a partir do potencial E_{corr} do metal, no meio de interesse. Há um processo de ativação seguido por uma polarização por concentração, o processo de passivação e a ruptura localizada do filme passivo a partir do potencial de pite, na curva (b) desde o E_{corr} o metal encontra-se passivo. E na curva (c), diferentemente da (a), não aparece ataque localizado, o filme passivo permanece na interface sem sofrer ruptura.

Figura 9 - Curva de polarização potenciodinâmica para um material com comportamento passivo.



Fonte: Traduzido de ASTM G3 (2014).

Na Figura 9 é apresentado o comportamento normalmente encontrado em uma curva de polarização de um metal com tendência passiva. Para valores de potenciais relativamente baixos uma curva linear é observada na região ativa. Com o aumento do potencial, a densidade de corrente diminui para um valor muito baixo

independentemente da variação do potencial, a região é denominada de região de passivação e, para altos valores de potencial, a densidade de corrente novamente aumenta caracterizando uma região denominada de transpassiva.

A existência de metais que possuem a propriedade de passivar-se, a partir de certo potencial que varia com o meio e outros fatores, tem grande importância para fins práticos. Entretanto, podem existir determinadas variações no ambiente como a alteração na concentração das espécies corrosivas ativas que podem reverter o caráter passivante do material da película o tornando ativo.

2.3 Fatores que influenciam na cinética de corrosão

Segundo Gentil (2011), alguns dos fatores que atuam nos fenômenos de polarização e passivação, influenciando diretamente na velocidade de corrosão, são:

- a) Aeração do meio: o oxigênio sendo um elemento despolarizante, age de forma a deslocar a curva de polarização catódica no sentido de maior corrente de corrosão, conseqüentemente, a velocidade de corrosão aumenta proporcionalmente ao aumento da taxa de oxigênio dissolvido.
- b) Acidificação do eletrólito: A maioria dos metais passivam-se em meios básicos. Em pH inferior a 4, normalmente, ocorre uma corrosão severa e rápida dos metais expostos, devido à possibilidade de redução de H^+ . Dessa maneira, em meios ácidos as taxas de corrosão aumentam.
- c) Temperatura: O aumento da temperatura promove a aceleração das reações químicas e a diminuição da resistividade do eletrólito fazendo com que as taxas de corrosão aumentem.
- d) Sais dissolvidos: os sais podem agir acelerando ou retardando a velocidade de corrosão.

2.4 Ensaios eletroquímicos

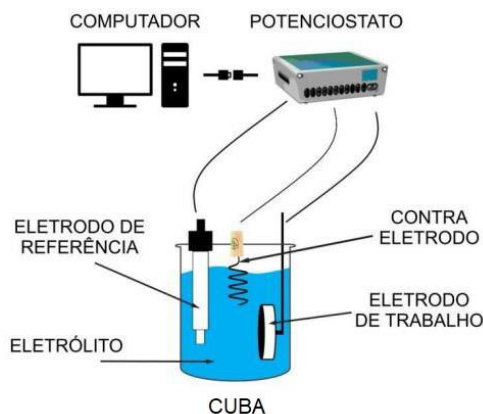
As curvas de polarização a potencial controlado podem ser obtidas através de dois métodos. O método potenciostático consiste na variação descontínua do potencial de eletrodo com valores crescentes e decrescentes ponto a ponto, seguidos da medição da corrente correspondente, após sua estabilização. Os valores obtidos são estacionários. Já o método potenciodinâmico ou potenciodinâmico, consiste na variação contínua do potencial de eletrodo em função do tempo e registra-se o valor imediato da corrente, em função da variação de potencial.

2.4.1 Análise de corrosão em célula eletroquímica

O estudo para estimar as suas taxas de corrosão, é a partir de ensaios com célula eletroquímica com o uso de técnicas que utilizam a passagem de corrente elétrica entre uma solução e o material, de modo a gerar reações aceleradas de oxidação (WOLYNEC, 2003; LIMA, 2022).

Na Figura 10 é apresentado um desenho esquemático dos componentes utilizados em uma célula de corrosão, incluindo o potenciostato e um computador para o envio e a aquisição de dados e a célula eletroquímica de três eletrodos (RESENDE *et al.*, 2017).

Figura 10 - Esquema de célula eletroquímica



Fonte: Adaptado de RESENDE *et al.* (2017)

Conforme a Figura 10 os componentes de uma célula eletroquímica são (NASCIMENTO, 2013; BORGES, 2022):

- Eletrodo de trabalho (ET) - consiste no material cujo potencial de corrosão se deseja analisar;
- Eletrodo de referência (ECS) - estabelece um padrão constante de potencial que servirá de referência, geralmente é de hidrogênio;
- Contra eletrodo (CE) - permite o fluxo de corrente no sistema, a fim de manter a eletrólise, geralmente é de platina;
- Potenciostato - possui a função de controlar o potencial e a corrente elétrica aplicados na célula;
- Cuba - recipiente onde o eletrólito é armazenado.

2.5 Aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são ligas ferrosas com teor de Cromo superior a 11 %, sendo classificados de acordo com sua microestrutura à temperatura ambiente (ANTOSZCZYSZYN, 2014). Em uma grande variedade de atmosferas mantêm-se altamente resistentes a corrosão, devido ao comportamento passivo de formar uma película protetora, rica em Cromo, que mantém a resistência mesmo com o aumento de temperatura acima da ambiente (LABIAPARI, 2015). No entanto, quando submetidos a atmosferas salinas, onde há a presença de íons agressivos e/ou biofilmes microbianos a passividade pode ser comprometida, o que limita a aplicação de algumas ligas de aço inoxidável em ambientes marinhos.

Os aços inoxidáveis têm maior tendência a sofrer corrosão por pite, corrosão localizada que envolve a quebra da camada passivada de um metal ou ligas por um meio agressivo, ocasionando falhas nas propriedades mecânicas e enfraquecimento de estruturas, sem que haja grandes perdas de massa metálica (COSTA, 2012).

2.5.1 Influência dos elementos de liga

Os elementos de liga influenciam de forma direta na microestrutura e podem ser classificados em dois grupos:

- a) Elementos ferritizantes – Conhecidos também como alfégenos, cuja presença favorece a formação e/ou estabilização da ferrita (fase alfa: α): Cromo, Silício, Alumínio, Molibdênio, Tungstênio, Titânio, Nióbio;
- b) Elementos austenitizantes – Conhecidos também como gamágenos, cuja presença favorece a formação da austenita (fase gama: γ): Níquel, Manganês, Nitrogênio, Carbono, Cobre, Cobalto.

A análise dos elementos de liga se torna relevante uma vez que a adição destes elementos altera as propriedades físicas, mecânicas e o comportamento em relação à resistência à corrosão desses materiais. O Níquel contribui na melhoria da ductibilidade e facilita a passivação em determinados meios ambientes não oxidantes (VILLAMIL et al., 2002) e juntamente com o Cromo, têm um papel fundamental na resistência à corrosão.

O Titânio e o Nióbio são utilizados como estabilizadores de Carbono, combinando-se preferencialmente com ele de modo a evitar a precipitação de carbonetos e nitretos de Cromo. O Molibdênio aumenta a resistência à corrosão tanto dos aços austeníticos e quanto dos aços ferríticos, confere resistência mecânica a temperaturas altas e resistência à corrosão localizada (VILLAMIL et al., 2002).

2.6 Superliga de Níquel - Inconel 625

A liga recebe comercialmente vários nomes, dentre as denominações mais comuns encontram-se: Inconel 625, Alloy 625, Nickel 625, Chornin 625, Altemp 625, Nickelvax 625 e Haynes 625. Conforme o Unified Numbering System (Sistema de Numeração Unificado), a liga é identificada como UNS N06625/ W.Nr. 2.4856 (ANTOSZCZYSZYN, 2014).

A designação Inconel é uma marca registrada da empresa americana de materiais especiais, a Special Metals Corporation, que desenvolveu essa liga na década de 1950 e o número 625 refere-se a um sistema de numeração padrão da indústria que especifica as propriedades e composição da liga.

Nesse sistema, a liga recebe uma designação de quatro dígitos, em que o primeiro número indica a família da liga (no caso da liga Inconel 625, a família é de ligas de Níquel), enquanto os três últimos números indicam a composição específica da liga. No caso da liga Inconel 625, a composição é de aproximadamente 60% de Níquel, 20% de Cromo, 9% de Molibdênio, 3,5% de Nióbio, 1% de Ferro e percentuais menores de outros elementos.

O Inconel 625 é uma liga à base de Níquel endurecida por solução sólida através da adição dos elementos: Cromo, Molibdênio e Nióbio. A composição da liga, promove uma excelente combinação de propriedades de resistência mecânica em uma ampla gama de temperaturas e pressões aliada à resistência a corrosão, devido a formação de uma fina camada protetora de óxido de Cromo III (Cr_2O_3) que, na presença do Molibdênio, tem a repassivação facilitada que possibilita maior resistência à corrosão localizada (SANTOS, 2018).

A alta resistência à tração, a fluência, a excelente resistência à fadiga e fadiga térmica, a resistência a oxidação e excelente soldabilidade e brasagem a tornam uma interessante escolha também para o campo aeroespacial. No campo nuclear, a liga pode ser usada para componentes de núcleo e haste de controle em reatores nucleares de água. O material é selecionado devido à sua excelente resistência à corrosão uniforme, resistência a rachaduras por tensão e excelente resistência à corrosão em água em temperaturas na faixa de 260°C a 316°C (SPECIAL METALS, 2013).

2.6.1 Composição química da liga Inconel 625

A norma ASTM B444 (2018) estabelece os limites de composição química para a liga Inconel 625, mostrados na Tabela 2

Tabela 2 - Composição da Liga Inconel 625.

Elemento	Limites de composição (%)
Carbono	0,1 máx
Manganês	0,5 máx
Silício	0,5 máx
Fósforo	0,015 máx
Enxofre	0,015 máx
Cromo	20 min - 23 máx
Nióbio + Tântalo	3,15 min - 4,15 máx
Cobalto	1 máx
Molibdênio	8 min - 10 máx
Ferro	5 máx
Alumínio	0,4 máx
Titânio	0,4 máx
Níquel	58 min

Fonte: Traduzido de ASTM B444 (2018).

2.7 Revestimento por Soldagem

Um dos principais processos utilizados para promover a união permanente de peças metálicas, possibilitando a montagem de conjuntos em tempo reduzido, maior segurança e economia de material é conhecido como soldagem (GOMES, 2010). É muito comum, empregar procedimentos de soldagem na recuperação de peças desgastadas ou na formação de revestimento com características especiais através da deposição de material sobre uma determinada superfície, o que caracteriza a soldagem de revestimento.

A soldagem de revestimento é um processo no qual uma ou mais ligas são unidas por soldagem à superfície de um metal base, normalmente, com o intuito de promover melhora nas propriedades corrosivas do material pela adição de uma camada de um material que tenha maior resistência à corrosão ou um revestimento duro.

Diferentemente do que ocorre em um tratamento térmico, no processo de soldagem o material é fundido a altas temperaturas e resfriado sem nenhum controle. Esse processo, influencia diretamente na microestrutura do metal na

região de solda, pois as velocidades de resfriamento podem ser diferentes e induzir a formação de diferentes fases constituintes, pontos de tensão e inclusão, o que favorece as reações de corrosão.

Justamente pela característica de ser uma liga resistente à corrosão, a liga Inconel 625 é utilizada como revestimento sobre um substrato menos nobre (SOUZA *et al.*, 2020). A literatura mostra que os constituintes formados durante a solidificação no processo de revestimento por soldagem da liga Inconel 625 podem ser modificados dependendo de duas variáveis principais: a diluição e o ciclo térmico.

Segundo Souza (2019), dependendo da técnica de tecimento utilizada, pode ou não haver um aumento da energia de soldagem e um aumento na diluição. O ciclo térmico é influenciado principalmente pela energia de soldagem e pode ser comparado a um tratamento térmico que modifica o revestimento em função da severidade da velocidade de resfriamento.

Em suas pesquisas, Souza *et al.* (2020), investigam a resistência à corrosão de revestimentos de Inconel 625 aplicadas pelo processo MIG/MAG sobre substratos menos nobres. Neste estudo, os ensaios de corrosão à temperatura ambiente (25 °C) revelam uma relação entre a energia de soldagem e a resistência à corrosão, observa-se então que conforme há o aumento da energia de soldagem aplicada no revestimento há conseqüentemente um aumento de sua resistência à corrosão, mesmo que a corrosão não seja visível na superfície das amostras. Os testes de corrosão à 60 °C mostram, em contrapartida, que a energia de soldagem tem pouca influência sobre a resistência à corrosão. O aumento de temperatura de 25 °C para 60 °C confere ao revestimento menor resistência à corrosão.

Em operações de revestimento utilizando o processo de soldagem MIG/MAG é comum a aplicação do tecimento, uma técnica utilizada com o intuito de garantir a fusão das paredes laterais da junta, para promover maior estabilização a poça fora da posição plana e expulsão gases (CORAINI *et al.*, 2011).

Quando o material de base e o material de adição são similares, a diluição não apresenta importância significativa, no entanto, quando os materiais são dissimilares o fator da diluição deve ser considerado. A soldagem de revestimento é um desses casos, pois nela, o material de adição é mais nobre do que o de base, nesses casos, quanto menor a diluição melhor. “Um nível mínimo de diluição é requerido, pois valores muito pequenos estariam perigosamente próximos da falta de fusão entre o revestimento e o material de base” (SOUZA, 2019).

As pesquisas realizadas por Xu *et al.* (2022), sobre o comportamento de corrosão intergranular do Inconel 625 depositado por CMT/GTAW revelam que alta diluição da deposição por GTAW causa a difusão de elementos nocivos, como Ferro e Carbono do substrato para a camada de revestimento durante a soldagem, alterando assim a composição química e a microestrutura da camada de revestimento próxima ao substrato. Mesmo que esse efeito seja observado, a maioria das pesquisas se concentra na investigação do desempenho geral de corrosão do revestimento, portanto não há muita atenção voltada para a resistência à corrosão próxima ao substrato.

2.8 Influência da rugosidade no processo corrosivo

A rugosidade superficial dos materiais pode afetar significativamente sua resistência à corrosão, pois a existência de áreas com maior concentração de tensões, reentrâncias e descontinuidades que podem atrair e reter contaminantes, como sais e outros compostos corrosivos são mais propensas à corrosão, especialmente em ambientes agressivos.

A presença de defeitos superficiais no material pode causar formação de regiões específicas e pequenas onde o filme passivo é menos resistente, no qual a ação dos íons agressivos promovendo nucleando pites (RAMOS, 2017).

Segundo Lima (2007), a presença de irregularidades resultantes dos processos de conformação e de soldagem fazem com que a superfície do metal se torne heterogênea. Variações como inclusões não metálicas, na composição

química, no tamanho do grão e tensões internas, ocasionam a formação de pilhas micro ou macroscópicas de corrosão.

Em seus estudos, Guilherme *et al.* (2005), concluem que o fenômeno da corrosão e a rugosidade estão relacionados, pois quanto pior o acabamento superficial, maior possibilidade de precipitar o fenômeno da corrosão e suas consequências podem ser minimizadas realizando o polimento da sua superfície. Callister Jr. *et al.* (2021) também descreve que amostras com superfícies polidas apresentam maior resistência à corrosão por pites e, mesmo que os aços inoxidáveis sejam razoavelmente suscetíveis à esta forma de corrosão, tal problema pode ser contornado a partir da adição de cerca de 2% de Molibdênio na composição da liga.

2.9 Metodologia de Superfície de Resposta

A Metodologia de Superfície de Resposta, traduzida do inglês Response Surface Methodology (RSM), é uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas que são aplicadas para modelar e analisar problemas nos quais a resposta de interesse é influenciada por diversos fatores (MONTGOMERY, 2013).

Problemas científicos, sobretudo experimentais, envolvem a expressão de uma variável resposta, como uma função empírica com um ou mais fatores quantitativos. Por exemplo, o presente estudo deseja avaliar a influência da rugosidade média - Ra - (X_1) e o potencial de Hidrogênio - pH - do meio corrosivo e (X_2) sobre a taxa de corrosão (E_{corr}) da liga Inconel 625.

Então a superfície de resposta do valor da taxa de corrosão, assim, será expressa em termos de Ra e pH, como $y = f (X_1, X_2)$. Geralmente, utiliza-se modelos de primeira ou segunda ordem para aproximar estas funções (MYERS *et al.*, 2016), sendo a Equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.** a equação de primeira ordem aplicada:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \varepsilon \quad (9)$$

Em que y é a variável resposta observada, os β_n são coeficientes, X_1 e X_2 são variáveis independentes e ε é o termo do erro aleatório. Se ε tem média zero, a porção não aleatória do modelo geral de primeira ordem representa a verdadeira resposta média, η .

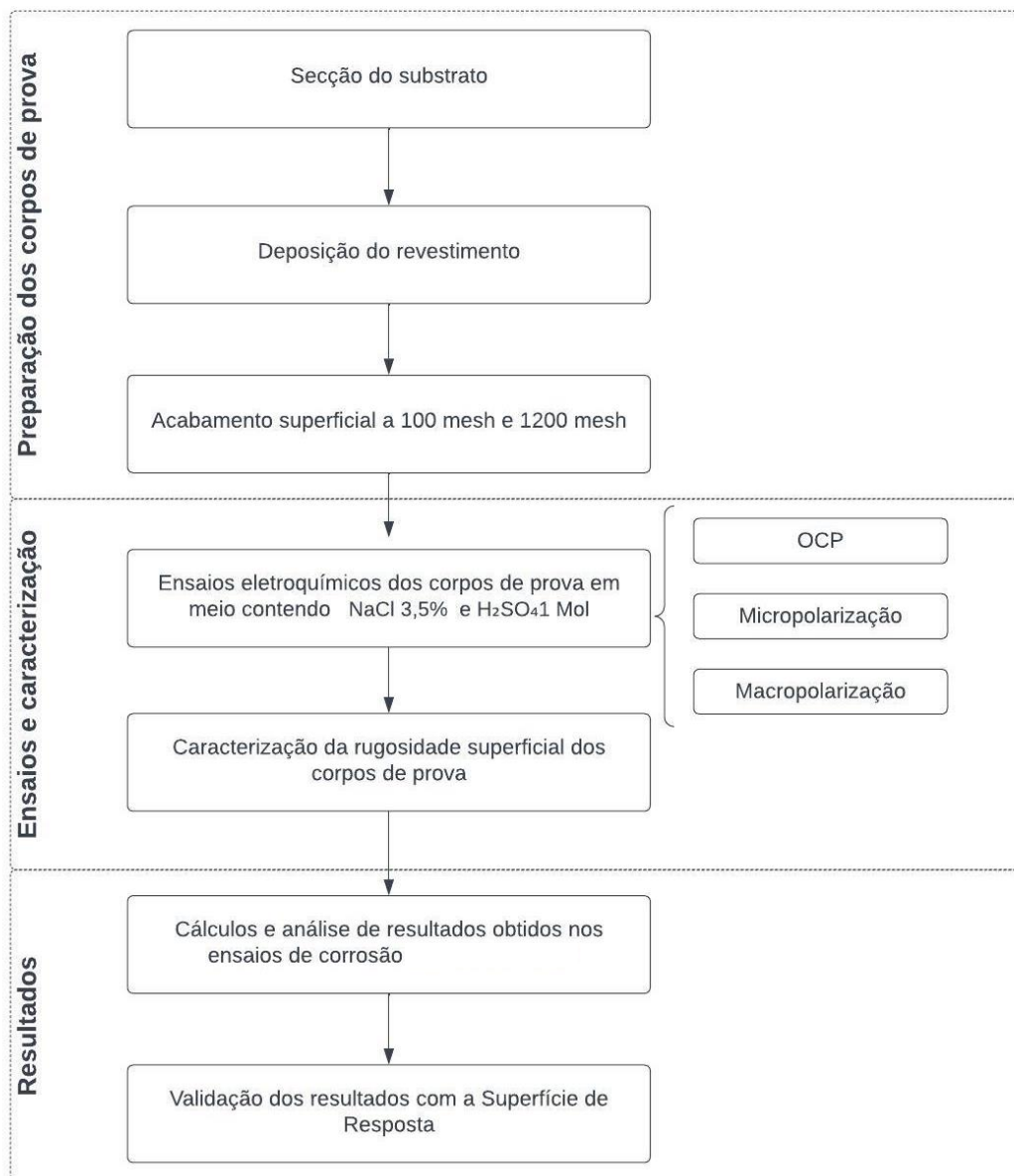
$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i \quad (10)$$

O número de ensaios é determinado pelos fatoriais de níveis. Uma combinação de todos os níveis de todos os fatores escolhidos pelo pesquisador corresponde, dessa forma um fatorial completo com p (níveis) e k (fatores) apresenta p combinações distintas, se $p = k$. As variáveis podem ser codificadas para simplificação dos cálculos em -1 , $+1$ e 0 , que representam, respectivamente, nível de fator baixo, nível de fator alto e o ponto médio entre os níveis alto e baixo.

3 ASPECTOS METODOLÓGICOS

A metodologia utilizada neste trabalho foi resumida em fluxograma apresentado na Figura 11

Figura 11 - Fluxograma das etapas do estudo.



Fonte: Autoria própria (2023).

3.1 Materiais

Os corpos de provas utilizados no presente estudo são de aço inoxidável martensítico macio ASTM A-743 da classe CA6NM, revestidos por uma liga Inconel 625 - através do processo de soldagem MIG. As especificações quanto as composições químicas do substrato e do revestimento, fornecidas pelo fabricante, encontram-se respectivamente na Tabela 3 e na Tabela 4

Tabela 3 - Composição química do substrato analisada por espectrometria de absorção atômica dos metais de adição (% em peso).

Material	%Cr	%Ni	%Mn	%Mo	%C	%P	%S	%Fe
CA6NM	12,40	3,70	0,64	0,42	0,02	0,008	0,0018	Bal.

Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 4 - Composição química do revestimento analisada por espectrometria de absorção atômica dos metais de adição (% em peso).

Liga	%Cr	%Mo	%Nb	%Co	%Si	%Mn	%C	%P	%S	%Ni
Inconel 625	21	9	4,15	1	0,5	0,5	0,1	0,015	0,015	Bal.

Fonte: Autoria própria (2023).

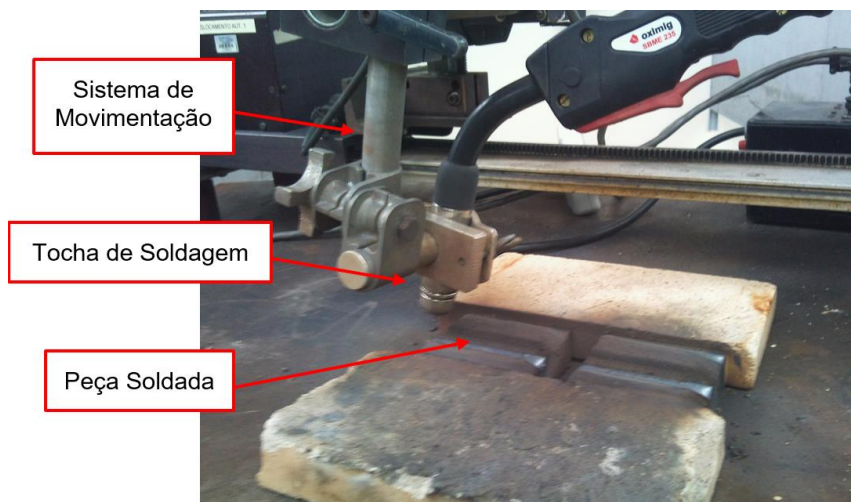
Os corpos de ASTM A-743 CA6NM foram cortados na dimensão de 100 x 80 x 25 mm e revenidos, a fim de promover um alívio das tensões internas geradas durante usinagem e corte do material, em forno tipo Mufla marca Jung, modelo LF2314.

A deposição do revestimento foi realizada em equipamento de solda MIG/MAG marca SUMIG, modelo Hank 335, através de um sistema de movimentação automática da tocha de soldagem, marca Bug'O, com controle de velocidade e dois graus de liberdade X e Y. Antes da soldagem, os corpos de prova foram pré-aquecidos a temperatura de 180°C em forno Mufla. Esta temperatura foi utilizada devido à característica do substrato sofrer a fragilização a frio, pela presença de hidrogênio que tende a se difundir a baixas temperaturas na microestrutura do aço martensítico, gerando tensões e, conseqüentemente, o surgimento de trincas.

O revestimento foi depositado pelo processo de soldagem MIG, com cordões de aproximadamente 10 mm de largura realizados na posição plana puxando, conforme a Figura 12 Nesta técnica, a tocha é posicionada de modo que o arame seja alimentado no sentido oposto ao do deslocamento do arco, sendo o mesmo adicionado ao cordão de solda já feito. Respeitando a condição

dimensional e deixando um mínimo de 5 mm de material nas extremidades dos corpos de prova soldados, cada passe possui 7 cordões.

Figura 12 - Sistema utilizado para soldagem dos revestimentos no substrato.



Fonte: HOLZMANN *et al.* (2022).

O controle de temperatura nos cordões após a deposição foi feito com auxílio de um multímetro marca Minipa, modelo ET-2042D, com termopar do tipo K (-20°C à 1000°C) e precisão de 1%. Na Tabela 5 estão apresentados os parâmetros de solda utilizados, selecionados a partir de análises do acabamento superficial, porosidade, geometria e integridade do cordão e da interface para ambos os arames no substrato.

Tabela 5 - Parâmetros de soldagem utilizados na deposição dos revestimentos de Inconel.

Arame	Vazão de Gás (L/min)	Temperatura Entre Passe (°C)	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (m/min)	Velocidade do Arame (m/min)
Inconel 625	15	150	22	135	0,25	1,5

Fonte: Adaptado de HOLZMANN *et al.* (2022).

Os cortes iniciais dos corpos de prova revestidos foram realizados com uma serra fita marca Ramos, até as dimensões de 20 x 20 x 12 mm. A fim de eliminar possíveis tensões internas indesejáveis, após delimitação das dimensões dos corpos de prova revestidos, foi realizado novo procedimento de revenimento em um forno Mufla até a temperatura de 590°C, permanecendo pelo período de 2 horas sob a temperatura e com resfriamento ao ar.

Na fresa, os corpos de prova revestidos foram usinados até que tanto a espessura de metal base quanto a de revestimento atingissem de 9 mm.

3.2 Acabamento Superficial

São utilizados para os ensaios de corrosão eletroquímica os corpos de prova preparados na etapa anterior. Destes, a superfície do revestimento do corpo de prova foi lixada manualmente com lixa de carbetto silício de granulometria 100 mesh até se obter uma superfície visualmente uniforme enquanto a superfície do revestimento do segundo corpo de prova foi lixada manualmente com lixa de carbetto silício com granulometria crescente até 1200 mesh, de modo a alterar a rugosidade superficial dos revestimentos para fins do presente estudo.

A avaliação das irregularidades superficiais submetidas ao processo corrosivo controlado em laboratório, tem o intuito de analisar o quanto a variação desse procedimento de acabamento tende a afetar a resistência do material à corrosão.

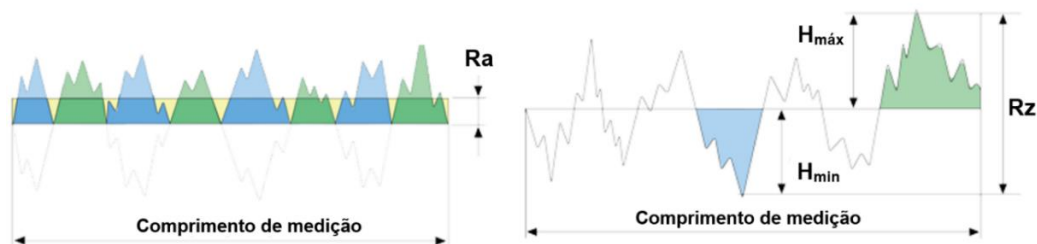
3.3 Perfilometria óptica

Para avaliar a rugosidade dos revestimentos depositados a perfilometria óptica é aplicada. É utilizado um perfilômetro óptico 3D da marca Taylor Hobson CCI Lite, alocado no laboratório de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa.

O ensaio de perfilometria óptica deve ser realizado seguindo a norma ISO 25178-2. Para manter a confiabilidade da medição durante o procedimento busca-se varrer a mesma área nas sucessivas análises, assim, é necessário fazer uma marca impressa nas amostras para usar como referência na medição da topografia. Os parâmetros de rugosidade analisados com o intuito de representar os pontos possíveis de início do desgaste são: a rugosidade média quadrática (R_a), altura máxima média (R_z), assimetria de superfície (S_{sk}) e

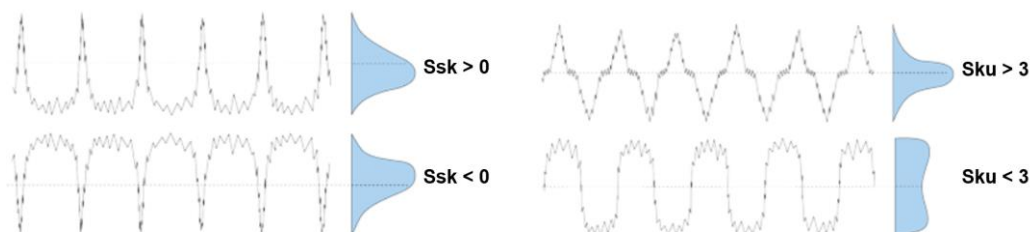
curtose (S_{ku}). Os perfis das superfícies foram medidos antes e após os ensaios de corrosão, a fim de verificar a modificação gerada, tanto para o tipo de preparo da superfície, quanto para o meio corrosivo utilizado. Para efetuou-se 4 medidas para cada região e na sequência realizou-se uma média aritmética simples.

Figura 14 - Parâmetros de rugosidade R_a e R_z .



Fonte: Adaptado de OLYMPUS (2017).

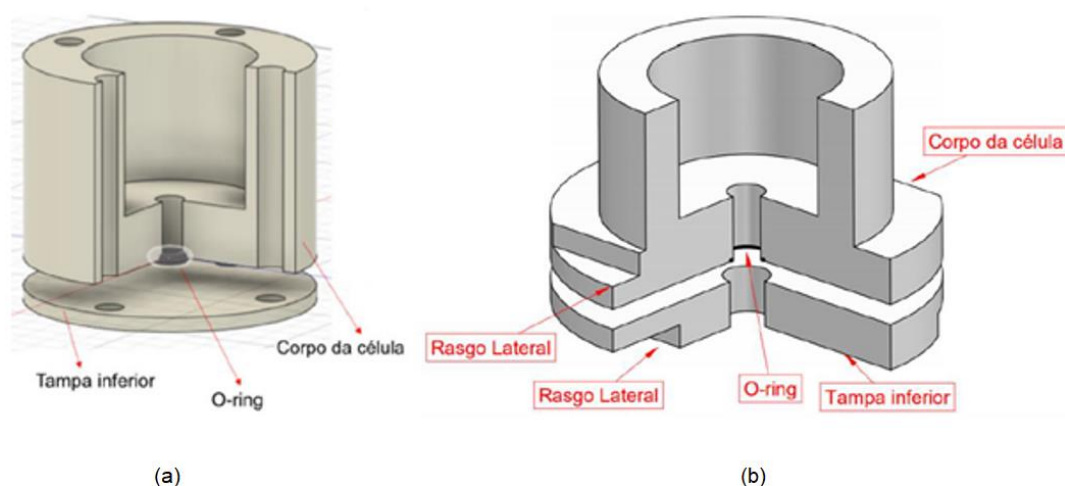
Figura 15 - Parâmetros de rugosidade S_{sk} e S_{ku} .



Fonte: Adaptado de OLYMPUS (2017).

3.4 Ensaios de corrosão

Os ensaios de corrosão foram realizados no Laboratório de Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Guarapuava. Para obtenção dos dados para o cálculo da taxa de corrosão nos corpos de prova, foram realizados ensaios em através de uma célula eletroquímica desenvolvida por Andrade (2019) e adaptada por Lima, Mazur e Mazur (2020), conforme a Figura 16

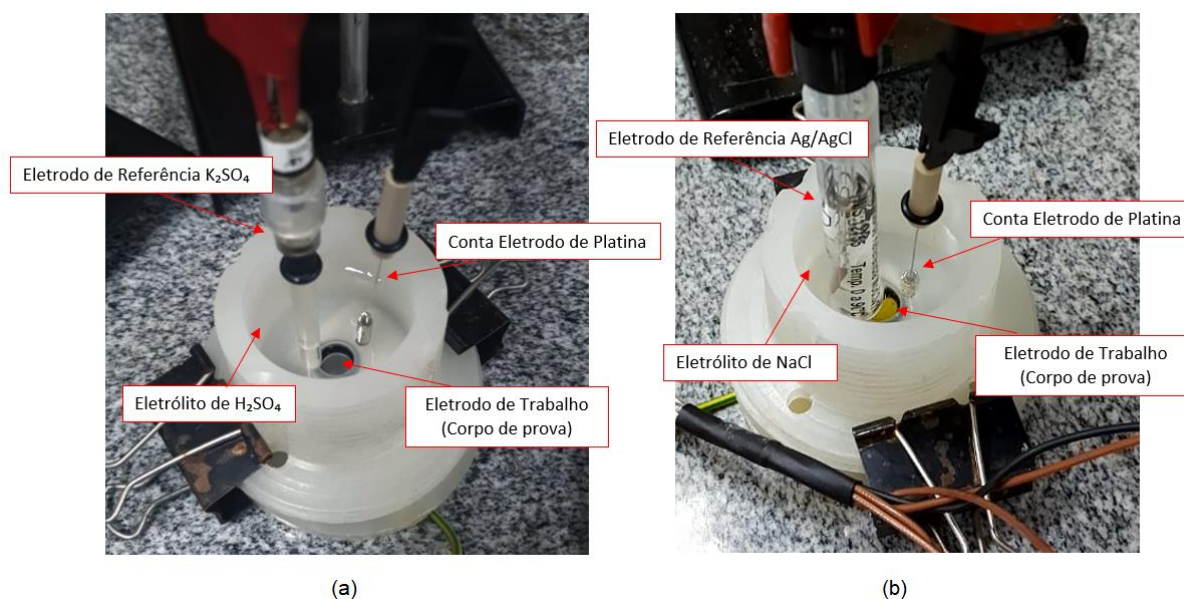
Figura 16 - Esquema da célula de corrosão.

Fonte: (a) ANDRADE (2019) (b) LIMA, MAZUR e MAZUR (2020).

Esta configuração permite que somente a área do furo de 1 cm de diâmetro seja exposta e o contato elétrico é feito na parte inferior com um fio de cobre. Os ensaios de corrosão utilizam-se de um equipamento galvanostato/potenciostato marca Autolab, modelo PGSTAT204. Em um computador conectado ao potenciostato foi realizado, através do Software NOVA, o controle dos ensaios e o registro dos resultados.

A célula eletroquímica utilizada nos ensaios foi montada com duas configurações, sendo a primeira aplicada aos corpos de prova sujeitos à corrosão em meio ácido, solução ácido sulfúrico (H_2SO_4 1 Mol), e a segunda aplicada aos corpos de prova sujeitos à corrosão em solução salina, solução de cloreto de sódio (NaCl 3,5%), conforme a Figura 17.

Figura 17 - Configuração da célula de corrosão.



Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 17 (a) apresenta a configuração utilizada para os ensaios na célula eletroquímica em ácido sulfúrico (H₂SO₄), nela, pode-se observar um contra eletrodo de Platina, o eletrodo de referência de sulfato de potássio (K₂SO₄) e o eletrólito em solução aquosa de H₂SO₄ 1 Mol. Enquanto na Figura 17 (b) a configuração utilizada para ensaio na célula eletroquímica de cloreto de sódio NaCl: um contra eletrodo de Platina, o eletrodo de referência de cloreto de prata (Ag/AgCl) e eletrólito em solução aquosa de NaCl 3,5%.

Segundo Gentil (2022), considerando um processo de corrosão eletroquímica, para que haja de fato a corrosão, o potencial de equilíbrio da reação anódica (oxidação) deve ser menor que o da reação catódica (redução), em outras palavras, enquanto há a oxidação, há elétrons para a que a reação de redução ocorra. O par de reações oxirredução possui seus respectivos potenciais de equilíbrio e as correspondentes curvas de polarização. Quando a intensidade da corrente anódica (i_a) e catódica (i_c) se igualam, o sistema assume um potencial intermediário, que corresponde à interseção das curvas anódica e catódica. Este potencial é então denominado potencial de corrosão (E_{corr}) e pode ser determinado de forma direta experimentalmente com o auxílio de eletrodo de referência.

A norma ASTM G59-97 (2020) norteia a realização dos ensaios. Assim, o potencial de circuito aberto foi medido, em todas as configurações e réplicas, após 55 minutos de imersão na solução. Como a literatura prevê, o potencial medido ao final deste tempo foi considerado como o potencial de corrosão (E_{corr}). A polarização ocorreu em duas etapas que compreendem a variação de tensão em torno do E_{corr} medido. Na primeira etapa realizou-se uma micropolarização, variando a tensão em $\pm 10\text{mV}$ e na segunda realizou-se a macropolarização, variando a tensão em $\pm 100\text{mV}$.

Do ensaio de micropolarização, calculou-se a resistência à polarização (R_p) a partir da regressão linear dos dados. O gráfico logarítmico da corrente elétrica versus o potencial aplicado obtido no ensaio de macropolarização foi utilizado para se obter informações quanto às reações catódicas e anódicas na superfície das amostras e, a partir da extrapolação de Tafel, dos coeficientes angulares da reta catódica e da reta anódica, obteve-se os coeficientes de Tafel β_c (V/década) e β_a (V/década) (WOLYNEC, 2003).

Os coeficientes das retas foram obtidos no Software Origin e com os valores de R_p dos ensaios de cada amostra, foi calculada a corrente de corrosão i_{corr} , de acordo com a Equação 7. Assim, a taxa de corrosão pode ser calculada pela Equação 8, em milímetros/ano, relacionando o valor obtido para i_{corr} , o peso atômico do elemento com maior porcentagem na composição da liga Inconel 625 PA, o Níquel (58,69 g/mol), o número de elétrons envolvidos na reação, ou seja, n ($\text{Ni}=2$), a área do eletrodo de trabalho ($0,785\text{ cm}^2$), a constante de Faraday (96487 Coulomb), a densidade do elemento de maior porcentagem em questão ($8,9\text{ g/cm}^3$) e o tempo de um ano em segundos (31536000 s).

3.5 Planejamento Experimental e Superfície de Resposta

Propôs-se um planejamento experimental n fatorial, sendo o mesmo 2^2 com réplica, com os fatores de rugosidade superficial (X_1) e pH (X_2), com dois níveis cada (+1; -1). Em outras palavras, na modelagem de uma superfície de

resposta, é atribuído um nível baixo (-1) e um nível alto (+1) de cada fator contínuo (X_1 e X_2). O planejamento experimental é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Modelo de dados para cálculo da Superfície de Resposta.

Ensaio	X_1	X_2	Resposta
1	-1	-1	<i>Resposta₁</i>
2	1	-1	<i>Resposta₂</i>
3	-1	1	<i>Resposta₃</i>
4	1	1	<i>Resposta₄</i>
5	-1	-1	<i>Resposta₅</i>
6	1	-1	<i>Resposta₆</i>
7	-1	1	<i>Resposta₇</i>
8	1	1	<i>Resposta₈</i>

Fonte: Autoria própria (2023).

A partir da modelagem da superfície de resposta de primeiro grau é possível uma análise significativa do efeito destes fatores sobre a taxa de corrosão na superfície.

A superfície de resposta foi gerada utilizando o Software Designer Expert, considerando como X_1 o pH genérico, a fim de identificar a variação dos meios, como nível alto pH 7 (NaCl) e nível baixo pH 1 (H_2SO_4) e X_2 a granulometria do lixamento da superfície do revestimento, tendo como nível baixo 100 mesh e nível alto 1200 mesh.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Corrosão do revestimento de liga Inconel 625 depositado através do processo MIG

A identificação de cada ensaio é apresentada na Tabela 7 Conforme o que norma ASTM G59-97 (2020) para realização do ensaio eletroquímico, são realizadas a medição de OCP, a micropolarização e a macropolarização.

Tabela 7 - Identificação dos ensaios.

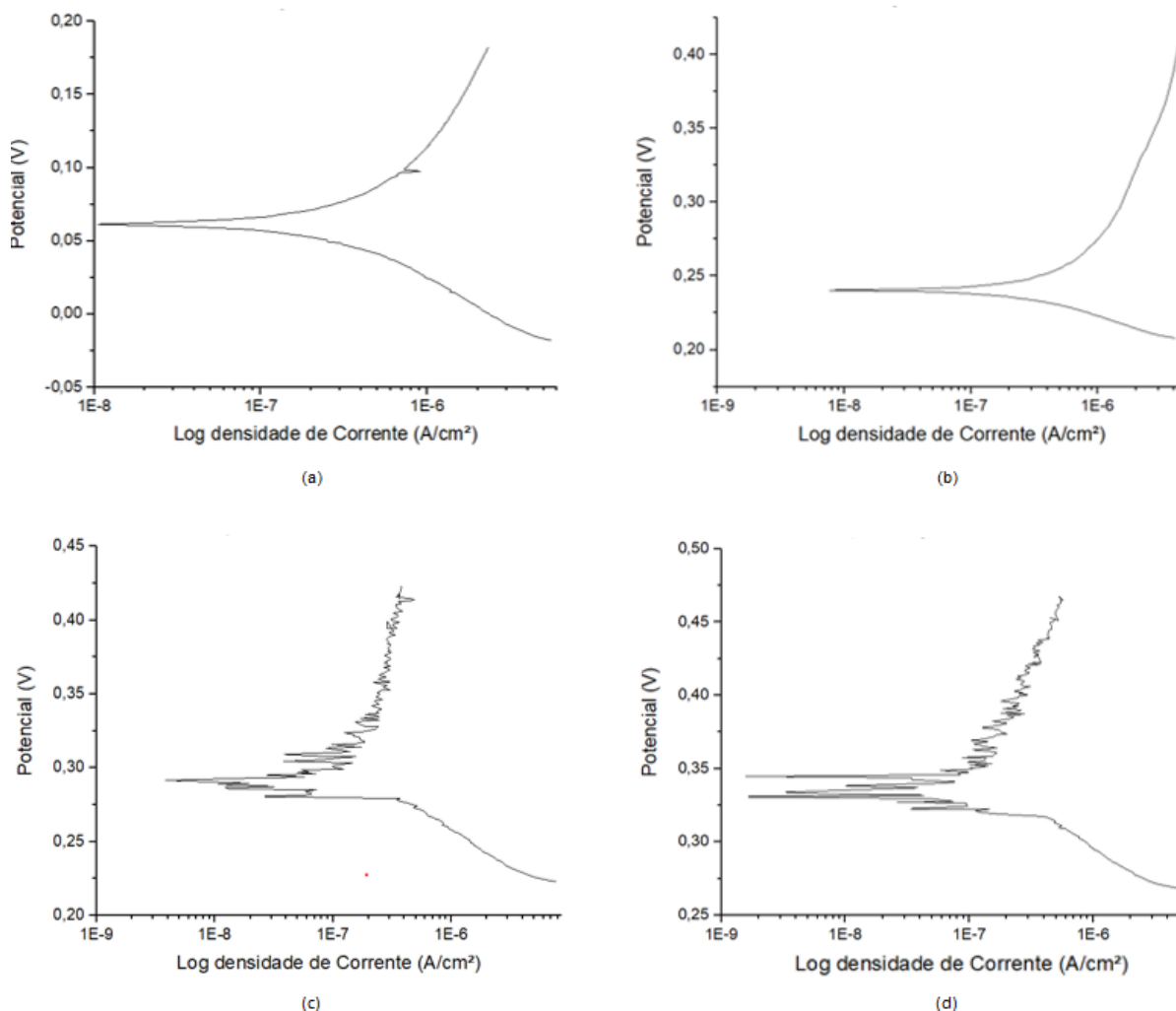
Nomenclatura	Granulometria	Meio
AM1001	100 mesh	NaCl 3,5%
AM1001*		NaCl 3,5%
AM1002		H ₂ SO ₄ 1 Mol
AM1002*		H ₂ SO ₄ 1 Mol
AM12001	1200 mesh	NaCl 3,5%
AM12001*		NaCl 3,5%
AM12002		H ₂ SO ₄ 1 Mol
AM12002*		H ₂ SO ₄ 1 Mol

* Identificação das réplicas dos ensaios

Fonte: Autoria própria (2023).

As curvas de polarização potenciodinâmica de macropolarização obtidas nos ensaios para as amostras com maior rugosidade superficial (100 mesh) na solução contendo eletrólitos de NaCl 3,5% e na solução contendo H₂SO₄ 1 Mol, considerando uma réplica para cada ensaio, conforme a Figura 18

Figura 18 - Curvas potênciodinâmicas de macropolarização para o revestimento a 100 mesh em NaCl 3,5%, (a) e (b) e em H₂SO₄ 1 Mol, (c) e (d).



Fonte: Autoria própria (2023).

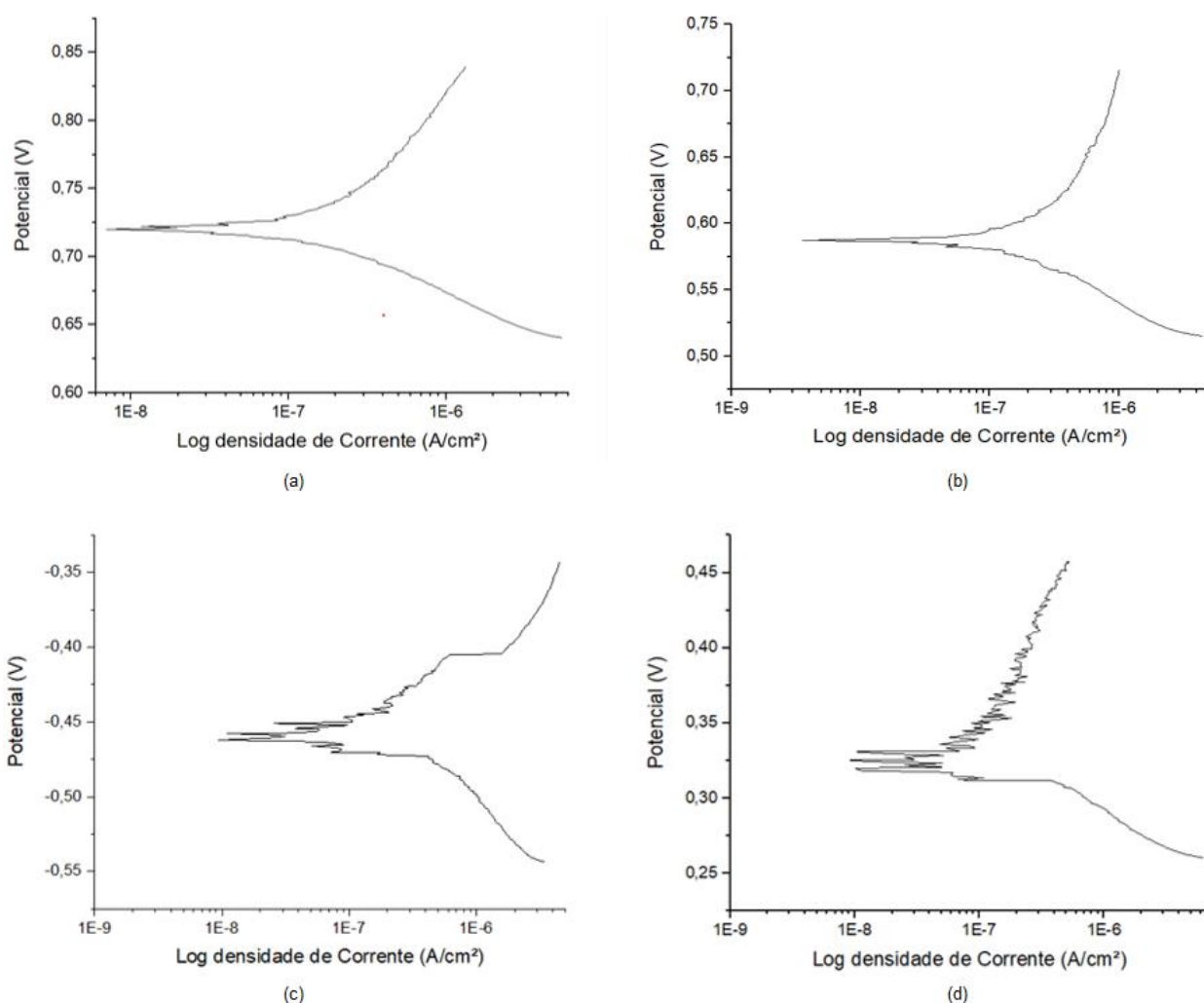
Na Figura 18 (a) e (b) pode-se observar as curvas de polarização obtidas nos ensaios das amostras de 100 mesh em solução contendo NaCl 3,5%. Em (a), o E_{corr} medido foi de 0,0614 V e os coeficientes obtidos a partir das extrapolações das curvas de polarização anódica e catódica foram de 0,0439 e 0,0309, respectivamente. Em (b) é apresentada a curva de macropolarização para a réplica do ensaio, com E_{corr} igual a 0,2402 V e coeficientes das curvas de polarização anódica e catódica obtidos no valor de 0,0258 e 0,0146, respectivamente.

A Figura 18 (c) e (d) apresenta as curvas de polarização potênciodinâmica de macropolarização dos ensaios para as amostras de 100 mesh em solução

contendo H_2SO_4 1 Mol, novamente considerando uma réplica para cada ensaio. Em (c) o E_{corr} medido foi no valor de 0,2915 V e coeficientes das curvas de polarização anódica e catódica de 0,0731 e 0,0270, respectivamente. Em (d) é apresentada a curva de macropolarização para a réplica do ensaio, com o E_{corr} medido igual a 0,3340 V e foram obtidos os valores 0,1356 e 0,0221 para os coeficientes das curvas de polarização anódica e catódica, respectivamente.

Na Figura 19 são apresentadas as curvas de polarização potenciodinâmica de macropolarização dos ensaios para as amostras com menor rugosidade superficial (1200mesh) em solução de NaCl 3,5% e H_2SO_4 1 Mol.

Figura 19 - Curvas potenciodinâmicas de macropolarização para o revestimento a 1200 mesh em NaCl 3,5%, (a) e (b) e em H_2SO_4 1 Mol, (c) e (d).



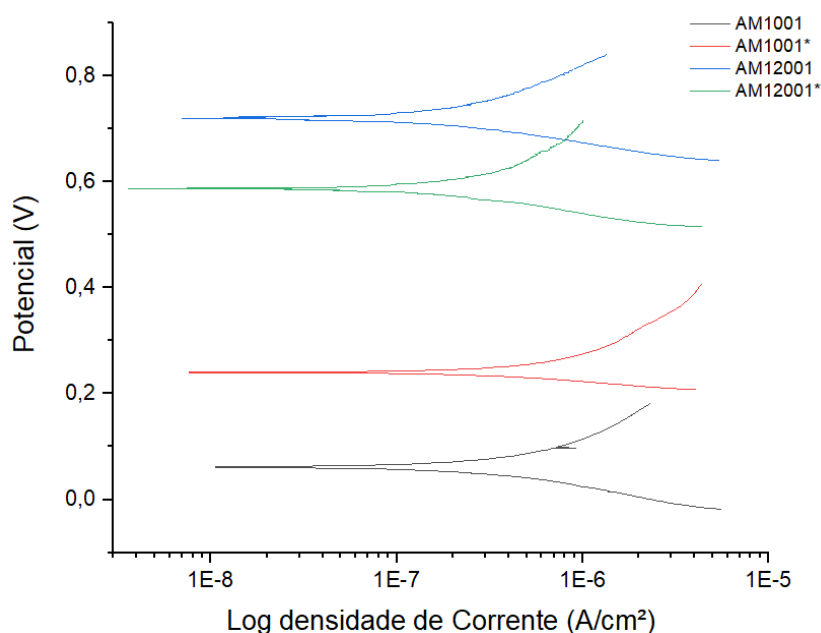
Fonte: Autoria própria (2023).

Nos itens (a) e (b) da Figura 19 observam-se as curvas obtidas nos ensaios realizados nas amostras de 1200 mesh em solução contendo NaCl 3,5%. Em (a) o E_{corr} medido igual a 0,7202 V e os valores 0,0437 e 0,0289 foram obtidos como coeficientes das curvas de polarização anódica e catódica, respectivamente e em (b), a réplica do ensaio, o E_{corr} de 0,5875 V e foram obtidos os valores 0,0371 e 0,0331 como coeficientes das curvas de polarização anódica e catódica.

Na Figura 19 (c) e (d) apresentam-se as curvas de polarização dos ensaios com 1200 mesh em eletrólito de H_2SO_4 1 Mol. Em (c) o E_{corr} medido igual a 0,2314 V e foram obtidos os valores 0,0516 e 0,0203 como coeficientes das curvas de polarização anódica e catódica, respectivamente e em (d), a réplica do ensaio, o E_{corr} de 0,325 V e como coeficientes das curvas de polarização anódica e catódica, foram obtidos os valores 0,0852 e 0,0281.

Comparando as curvas de polarização obtidas nos ensaios dos corpos com superfície acabada com 100 mesh e 1200 mesh em ambiente contendo NaCl 3,5%, pode-se observar um comportamento semelhante entre elas

Figura 20 - Curvas potênciodinâmicas de macropolarização para o revestimento com rugosidade superficial de todas as amostras em ambiente contendo NaCl 3,5%.



Fonte: Autoria própria (2023).

No entanto, como mostra a Figura 20 o potencial de corrosão do ensaio e de sua réplica para a amostra com menor rugosidade superficial são superiores aos obtidos nos ensaios da amostra de maior rugosidade, além de apresentar a corrente de corrosão menor no processo anódico o que indica que a taxa de oxidação do metal é reduzida nessa região. Isso pode ocorrer devido a vários fatores, como a presença de inibidores de corrosão, proteção catódica, revestimentos protetores ou condições favoráveis do ambiente.

Conforme Łyczkowska *et al.* (2017), o valor do E_{corr} caracteriza a presença das relações termodinâmicas entre o material testado e o ambiente corrosivo. A partir dos valores de E_{corr} obtidos e apresentados na Tabela 8, nota-se que para o caso específico dos ensaios no ambiente com cloreto de sódio os menores valores de E_{corr} estão associados a menores de R_p .

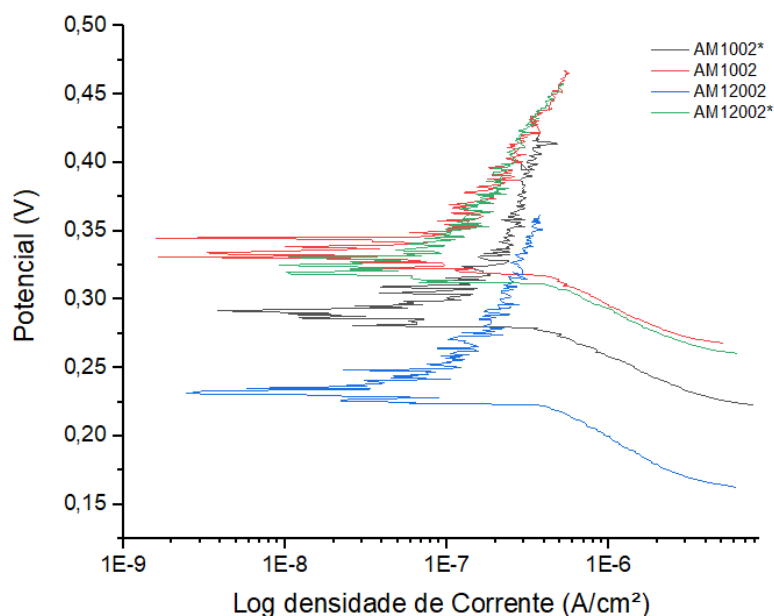
Nesta comparação, a principal diferença está nos valores de densidade de corrente da curva anódica das amostras com menor rugosidade superficial, sendo inferiores às densidades de corrente obtidas nos ensaios em amostras com maior rugosidade superficial o que indica que o processo de oxidação foi reduzido após a formação de uma camada passiva mais uniforme sobre a superfície menos rugosa. A liga Inconel 625 sob corrosão eletroquímica em solução de NaCl, forma filmes de óxido compostos por uma camada externa de $Ni(OH)_2$ /NiO e uma camada interna de Cr_2O_3 (SUN *et al.*, 2009; SUN *et al.*, 2008; WANG *et al.*, 2017; ALVES, 2022).

Enquanto na superfície com rugosidade mais elevada a presença das microcavidades ou asperezas atuam como sítios de corrosão, nos quais ocorrem reações eletroquímicas mais intensas e aceleradas. Nessas regiões, a taxa de oxidação é aumentada, resultando em uma maior corrosão localizada.

Wang *et al.* (2017) ao investigar efeito do cloreto de sódio na corrosão eletroquímica da liga Inconel 625 em alta temperatura e pressão, conclui que o NaCl estimula a corrosão eletroquímica da liga Inconel 625 por dois motivos: Há uma intensa penetração de íons cloreto devido ao seu pequeno raio iônico e o filme de óxido menos estável crescido na superfície da liga Inconel 625 devido à crescente dissolução de NiO e Cr_2O_3 .

As curvas de polarização obtidas nos ensaios das amostras de 100 mesh e 1200 mesh em ambiente contendo H_2SO_4 , são apresentadas na Figura 21

Figura 21 - Curvas potênciodinâmicas de macropolarização para o revestimento com rugosidade de todas as amostras em ambiente contendo H_2SO_4 1 Mol.



Fonte: Autoria própria (2023).

Observa-se na Figura 21 em todos os testes executados, a oscilação de densidade de corrente na curva anódica das reações da superfície do revestimento de Inconel 625 depositado através do processo MIG exposta ao ambiente ácido tanto na superfície lixada a 100 mesh quanto na de 1200 mesh. Ainda assim, as oscilações da densidade de corrente são consideravelmente mais abruptas nos testes em superfície 100 mesh, novamente pela maior heterogeneidade da superfície. Pode-se observar que especialmente no ensaio AM1002 ocorreram 2 pontos, aparentemente simétricos ao E_{corr} considerado, com densidade de corrente ainda menor que a do E_{corr} medido. Considerando a Figura 21 os E_{corr} de todos os testes foram semelhantes, variando de 0,23 V a 0,33 V, o que indica certa proximidade nos valores obtidos de R_p para cada ensaio.

No estudo desenvolvido por Paroni (2015) ao investigar o comportamento eletroquímico da liga de Níquel UNS N07090 exposta a diferentes concentrações H_2SO_4 , considerando as reações do diagrama de Pourbaix do sistema, conclui

que há participação dessas reações no processo catódico para as concentrações de 4M, 3M e 2M H₂SO₄, no entanto, para a concentração 1M H₂SO₄ não há a participação da reação de hidrogênio e o processo catódico desenvolvido apenas pelas reações de SO⁻².

Segundo Rebak (2007, apud PARONI, 2015), a taxa de corrosão da liga Inconel 625 em função da concentração de H₂SO₄, a 80°C é sempre crescente. No entanto, no caso do HCl, a 66 °C, a taxa de corrosão aumenta até a concentração de 10% e diminui em concentrações superiores a esta.

A Tabela 8 traz os resultados de cada parâmetro obtido nos ensaios na célula eletroquímica, descritos no presente trabalho, juntamente com a taxa de corrosão anual calculada a partir das Equações 6, 7 e 8.

Tabela 8 - Resultados da caracterização eletroquímica de revestimento de liga Inconel 625 com 100 mesh e 1200 mesh em NaCl 3,5% e H₂SO₄ 1 Mol.

Amostras	E_{corr} (V)	R_p (Ω)	β_a (V/dec)	β_c (V/dec)	I_{corr} (A/cm ²)	T_{corr} (mm/ano)
AM1001	0,061	3,6E+7	0,0439	0,0309	2,2115E-10	3,035E-6
AM1001*	0,240	3E+7	0,0258	0,0146	1,3508E-10	1,854E-6
AM1002	0,291	6,7E+7	0,0731	0,0270	1,2874E-10	1,767E-6
AM1002*	0,333	7,3E+7	0,1356	0,0221	1,1340E-10	1,725E-6
AM12001	0,720	6E+7	0,0437	0,0289	1,2642E-10	1,735E-6
AM12001*	0,587	5,84E+7	0,0371	0,0331	1,2999E-10	1,78E-6
AM12002	0,231	8,99E+7	0,0516	0,0203	7,0416E-11	9,66E-7
AM12002*	0,325	7,3E+7	0,0852	0,0281	1,2569E-10	1,725E-6

Fonte: Autoria própria (2023).

A liga Inconel 625 apresenta valores para as taxas corrosão tão baixos que, ao invés de serem expressos em milímetros/ano, podem ser expressos em nanômetros/ano, conforme as taxas de corrosão apresentadas na Tabela 8. Maiores valores da taxa de corrosão anual, são associados a menor resistência à polarização combinada a maior valor de corrente de corrosão. De forma geral, a elevada resistência à corrosão das ligas de Níquel é atribuída tanto ao fenômeno da passividade quanto à nobreza de tais ligas, que dificultam o deslocamento do hidrogênio em soluções ácidas.

Analisando a Tabela 8 observa-se que taxa de corrosão tende a ser maior com o aumento da rugosidade da superfície, sujeita tanto ao meio contendo NaCl

3,5% quanto ao meio contendo H_2SO_4 1 Mol. Nota-se também que em meio contendo cloreto a taxa de corrosão obtida foi maior, mesmo existindo uma pequena variação entre todos os resultados.

Segundo Alvarães *et al.* (2020) e Xu *et al.* (2019) ao realizar procedimento de soldagem com a liga Inconel 625, os elementos Nb e Mo podem segregar nas regiões interdendríticas e esses precipitados podem diminuir a resistência à corrosão, alterar as propriedades mecânicas e podem ter implicações significativas na suscetibilidade à corrosão interdendrítica do metal de solda. A possível existência da corrosão interdendrítica da liga também pode ser explicada pela depleção de Cr adjacente aos contornos de grão ao longo dos quais o carboneto de cromo se forma.

A partir da análise dos resultados obtidos e conforme o estudo desenvolvido por Ramos (2017) sobre a resistência à corrosão de junta soldada de Inconel 625 em meios com NaCl 3,5%, NaCl 3,5% + $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0,01M e NaCl 3,5% + H_2SO_4 1M, a quebra do filme protetor sobre a superfície da liga Inconel 625 ocorre devido a ação de íons cloretos na superfície. Dessa maneira, não só a concentração dos íons considerados agressivos como o Cl^- , como a presença de íons considerados menos agressivos para a liga como o OH^- , NO_3^- , SO_4^- , influencia a corrosão localizada.

Por considerações também apresentadas por Paroni (2015) pode-se considerar que o material do revestimento é mais suscetível a corrosão localizada (corrosão nos contornos de grão e corrosão por Pites) do que a corrosão uniforme, o que não exclui a necessidade de mais estudos a respeito da exposição deste revestimento a longos períodos a estes mesmos ambientes e que contemple a análise da composição da superfície após ataque corrosivo.

Tabela 9 - Média da taxa de corrosão para cada combinação.

Amostras	T_{corr} (mm/ano)
AM1001	2,4444E-06
AM1002	1,74588E-06
AM12001	1,76E-06
AM12002	1,34564E-06

Fonte: Aatoria própria (2023).

Uma comparação percentual entre as médias dos ensaios, apresentados na Tabela 9, permite verificar que o ambiente mais crítico para a superfície de maior rugosidade é em ambiente NaCl 3,5%, pois apresenta comparado ao ambiente H₂SO₄ 1 Mol, um aumento de aproximadamente 27,87% na taxa de corrosão. Comportamento que se repete na superfície de menor rugosidade, no entanto com um aumento da taxa em NaCl em relação à H₂SO₄ 1 Mol de aproximadamente 23,54%.

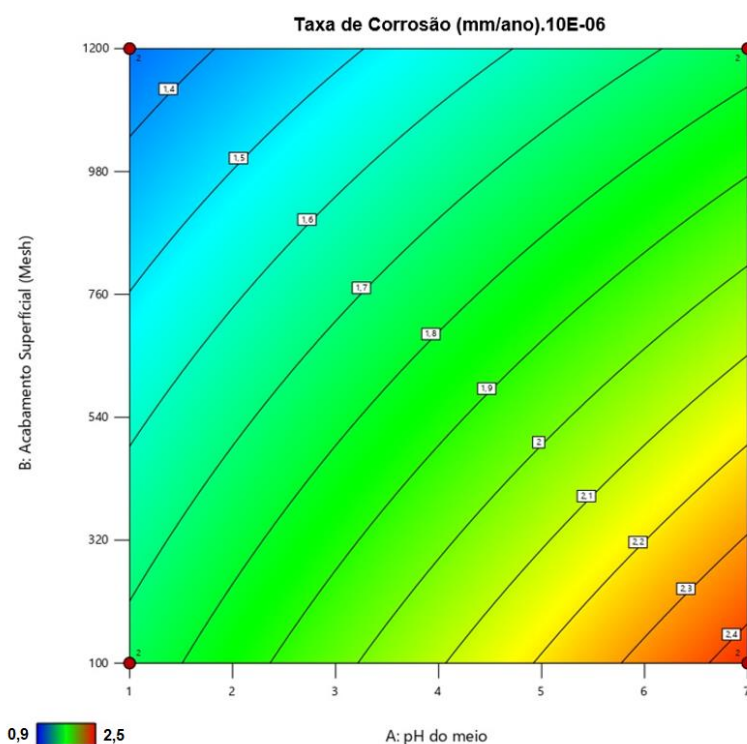
Se a mesma comparação for aplicada com o intuito de analisar o desempenho da variação da rugosidade, em H₂SO₄ 1 Mol obtém-se um aumento de aproximadamente 30% na taxa de corrosão da amostra de maior rugosidade em relação a de menor rugosidade. No caso do NaCl 3,5%, obtém-se um aumento de aproximadamente 44% na taxa de corrosão da amostra de maior rugosidade em relação ao resultado obtido para a menor rugosidade.

Os resultados obtidos para os coeficientes de Tafel, β_a e β_c , não são suficientes para constatar que estes possuam um mesmo comportamento nos corpos de prova, mesmo sendo réplicas sobre as mesmas condições. A redução da i_{corr} da liga pode estar associada ao aumento da R_p e, essa combinação de menor corrente de corrosão com maior resistência à polarização, confere as menores taxas de corrosão

4.2 Superfície de resposta

Através do gráfico da superfície de resposta da Figura 22 tomando um nível alto de X_1 (NaCl), e um nível baixo de X_2 (100 mesh), são obtidas taxas de corrosão mais altas, logo, corresponde a um cenário crítico que deve ser evitado. O ponto ótimo da taxa de corrosão é obtido com a combinação de nível baixo de X_1 e nível alto de X_2 , ou seja, corrosão da superfície de 1200 mesh em H₂SO₄ 1 Mol.

Figura 22 - Superfície de resposta obtida do planejamento experimental.



Fonte: Autoria própria (2023).

A equação característica da taxa de corrosão na superfície calculada pelo modelo 2^2 é apresentada na Equação 11.

$$y = 1,82E - 06 + 15,9E - 06X_1 - 15,6E - 06X_2 - 4,07E - 06X_1X_2 \quad (11)$$

Observando os coeficientes termo a termo, encontra-se interações próximas entre os fatores X_1 e X_2 . A Equação 12, obtida pelo Software Designer Expert, corresponde à tratativa estatística do modelo estatístico próprio do Software, com mais interações, trazendo valores de coeficientes semelhantes aos calculados.

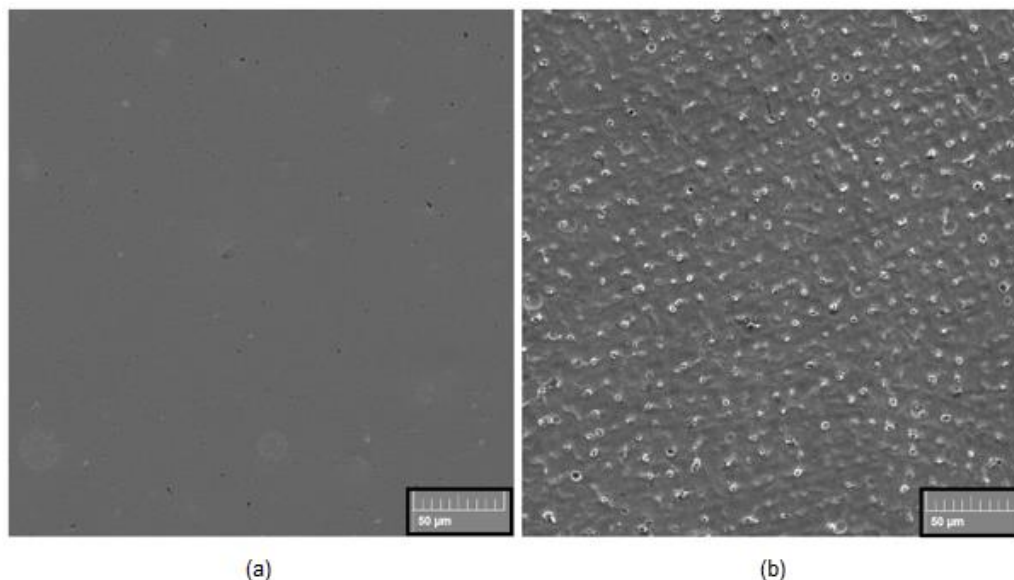
$$y = 1,82E - 06 + 0,2796E - 06X_1 - 0,209E - 06X_2 - 0,0724E - 6X_1X_2 \quad (12)$$

4.3 Caracterização da superfície

A Figura 23 (a) apresenta a imagem obtida por MEV da superfície preparada com lixa 1200 mesh, nota-se uma superfície plana com pouca ou

nenhuma protuberância (picos ou vales), o que pode ser comprovado pelos valores obtidos de S_{sk} próximos a 0. Na Figura 23 (b) pode-se observar a superfície preparada a 1200 mesh após o ataque corrosivo em ambiente contendo H_2SO_4 1 Mol.

Figura 23 - Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície preparada com lixa 1200 (a) anterior ao ataque corrosivo e (b) posterior ao ataque corrosivo em H_2SO_4 1 Mol.

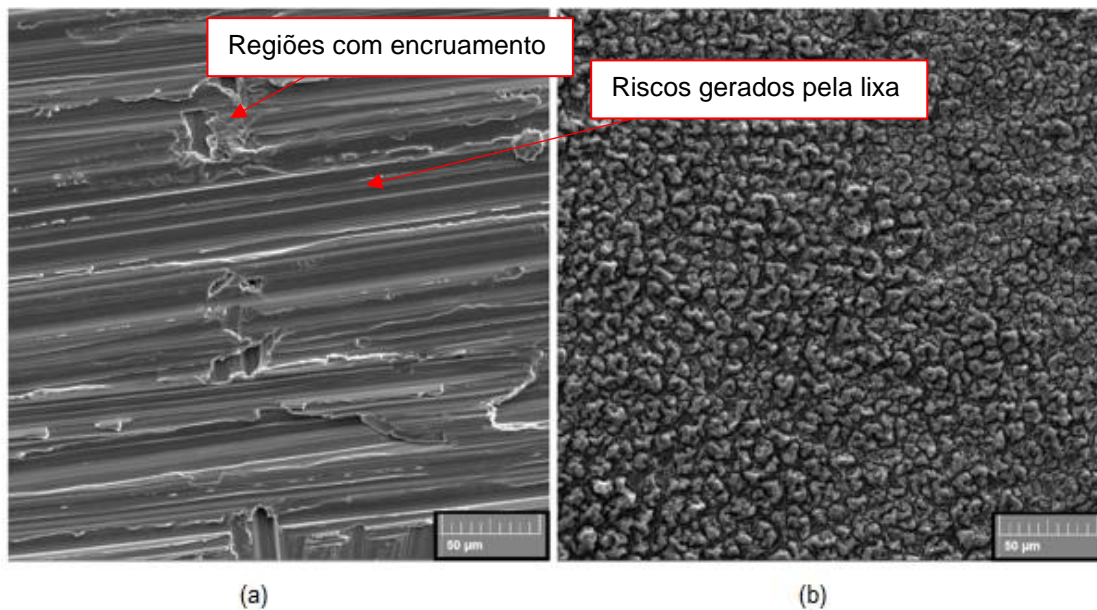


Fonte: Autoria própria (2023).

A superfície preparada com lixa 100 mesh é apresentada na Figura 24 nota-se a presença de riscos protuberantes oriundos do processo de lixamento que podem favorecer a incidência do processo corrosivo na superfície, tal como a presença de defeitos residuais oriundos do processo de fabricação ou tensões residuais do processo de soldagem, também favorecem a formação destas regiões críticas (RODRIGUES *et al.*, 2022; ALVES, 2022).

Na Figura 24 (a) destacam-se ainda regiões com encruamento acentuado, propiciado pelos grãos abrasivos da lixa, que deformam o material da superfície da amostra, estas regiões provavelmente apresentam maior energia de contorno de grão que podem ser pontos de início do desgaste corrosivo. Na Figura 24 (b) pode-se observar a superfície após o ataque corrosivo em ambiente contendo NaCl.

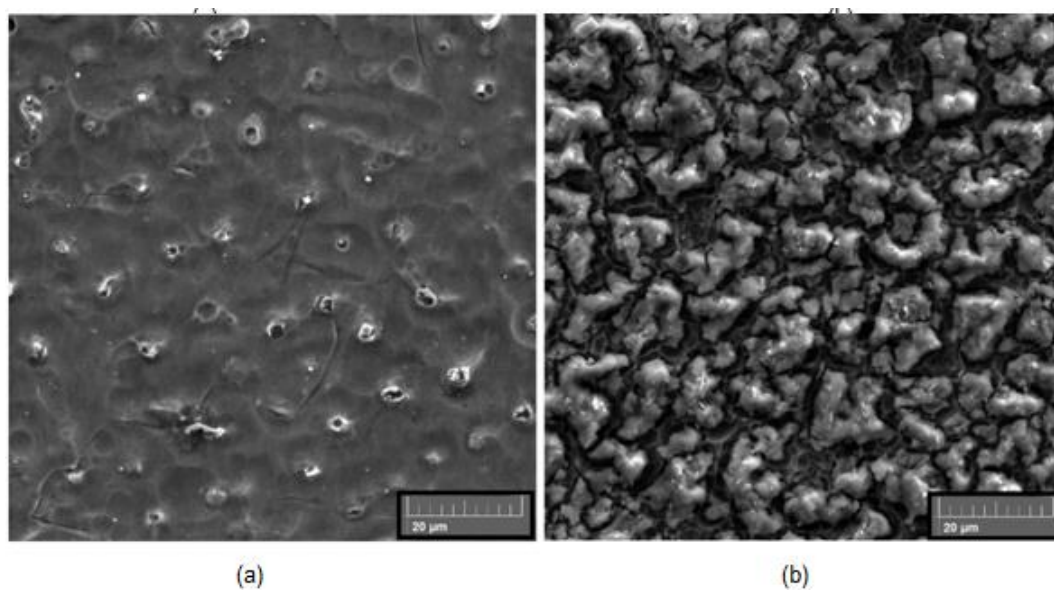
Figura 24 - Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície preparada com lixa 100 mesh (a) anterior ao ataque corrosivo e (b) posterior ao ataque em NaCl 3,5%.



Fonte: Autoria própria (2023).

Nos casos apresentados nas imagens em MEV estão a melhor superfície após ensaio de corrosão (H_2SO_4 – 1200 mesh) Figura 25 (a) e a pior superfície após o ensaio de corrosão (NaCl -100 mesh) Figura 25 (b).

Figura 25 - Microscopia Eletrônica de Varredura da superfície preparada com lixa (a) 1200 mesh em H_2SO_4 1 Mol e (b) 100 mesh em NaCl 3,5%.



Fonte: Autoria própria (2023).

A característica obtida nas amostras tanto em H_2SO_4 quanto NaCl se apresentam em formas de pites pontuais, comprovação obtida também por Kobe *et al.* (2005), ao avaliarem a liga Inconel 600 em soluções contendo pH 9,5 com e sem cloretos e sulfatos, revelando que o íon sulfeto juntamente ao íon cloreto estão relacionados à quebra da película passiva, a maior diferença entre a Figura 25 (a) e Figura 25 (b) está a severidade do ataque local e/ou combinação de ataques localizados.

Nas amostras ensaiadas com NaCl 3,5% a superfície se mostrou com um aspecto craquelado, com corrosão característica em contornos de grão, além do tipo por pites, sendo mais severa se comparadas as amostras ensaiadas em H_2SO_4 1 Mol, observadas na Figura 25 (a).

Para uma análise efetiva da superfície, costuma-se caracterizar a mesma em função da quantidade de picos e vales presentes, e da geometria dos mesmos, visto que Ra não representa efetivamente a superfície, podendo mascarar pontos de desgaste significativos ou o desgaste em regiões mais elevada (picos).

Tabela 10 - Resultados médios obtidos para cada parâmetro na perfilometria óptica.

Parâmetro	100 mesh	1200 mesh	AM1001 NaCl	AM1002 H2SO4	AM12001 NaCl	AM12002 H ₂ SO ₄
Ra	1,13	0,346	1,87	1,45	1,342	0,897
Rz	2,21	0,76	2,96	2,57	1,87	1,21
SSk	2,67	0,21	3,56	3,12	0,86	0,58
Sku	3,56	3,21	3,96	4,11	2,76	3,06

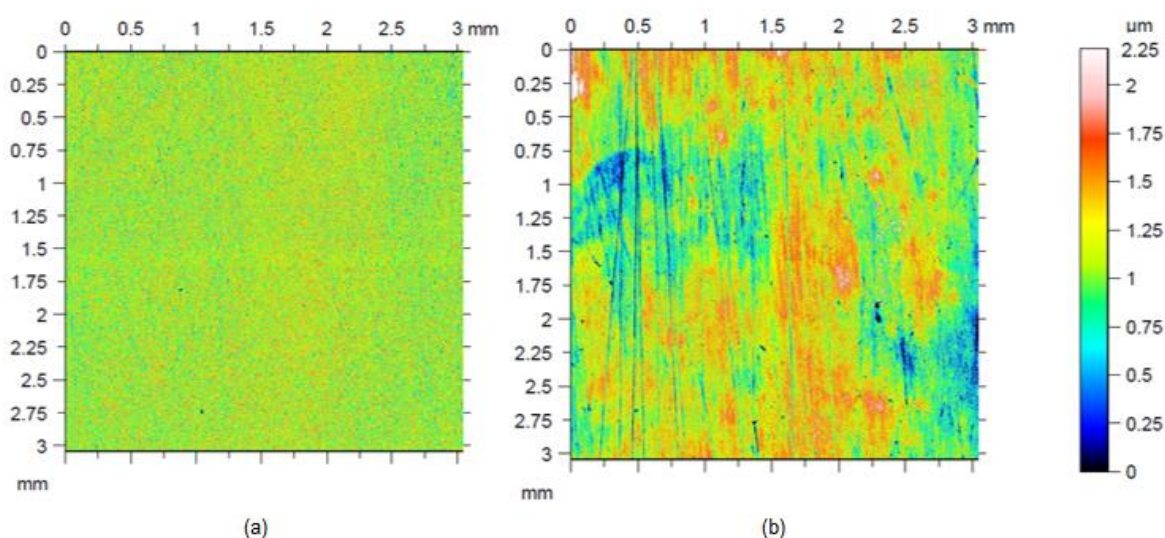
Fonte: Autoria própria (2023).

Da Tabela 10 , a partir dos valores obtidos para Ra e Rz, nota-se uma diferença significativa entre as superfícies preparadas pela lixa 100 mesh e 1200 mesh, o que acarreta diretamente no processo de corrosão, pois em superfícies menos rugosas, ou seja, com Ra mais próximas a 0, menor é a área de contato entre o metal e o meio corrosivo (TOLOEI *et al.*, 2013; NIU *et al.*, 2019) e maior é a resistência à corrosão, e isso é comprovado pela incidência mais severa de íons agressivos com ataque local, Figura 25 (b), na superfície contendo arranhões e regiões de encruamento pela não recuperação efetiva da película protetora. No entanto, mesmo tendo a presença de regiões endurecidas na

superfície com lixa 100 mesh ainda não se pode confirmar sua relação direta com a incidência do processo corrosivo nessas condições.

Pela Figura 26 percebe-se claramente a diferença entre a superfície considerada a melhor condição, 1200 mesh em H_2SO_4 , Figura 26 (a), e a superfície que representa a pior condição, 100 mesh em NaCl, Figura 26 (b). Destaca-se que tanto a rugosidade inicial da superfície, quanto o meio utilizado influenciaram a rugosidade final do revestimento, sendo que o meio corrosivo NaCl 3,5% proporcionou uma superfície final mais rugosa.

Figura 26 - Rugosidade superficial (a) 1200 mesh em H_2SO_4 1 Mol e (b) 100 mesh em NaCl 3,5%.



Fonte: Autoria própria (2023).

A característica dessas superfícies são bem representadas por S_{sk} e S_{ku} , que demonstram tanto a característica de preparação da superfície inicial, quanto do meio ensaiado, a superfície do acabamento feito com 1200 mesh ao possuir valores de S_{sk} próximos a 0, apresenta com uma superfície simétrica, o que revela que a corrosão se deu de forma uniforme em toda a superfície ensaiada. Menores valores de rugosidade superficial estão diretamente relacionados a diminuição da taxa de corrosão assim como Toloei *et al.* (2013) concluíram em seus trabalhos, ao analisarem o Níquel em solução de H_2SO_4 0,5 mol/L.

Quanto a geometria dos picos e vales, avaliados através de S_{ku} , quanto mais próximo a 3, mais uniforme a superfície, não se percebeu grandes discrepâncias entre as amostras iniciais e após ensaio.

5 CONCLUSÃO

A liga Inconel 625 apresenta valores para as taxas corrosão tão baixos que, ao invés de serem expressos em milímetros/ano, podem ser expressos em nanômetros/ano. Os resultados apresentados confirmam que a escolha deste material como revestimentos componentes para aplicações em ambientes agressivos é uma excelente alternativa.

Os maiores valores da taxa de corrosão anual obtidos para o revestimento de liga Inconel 625 soldado pelo processo MIG estão associados a menor resistência à polarização combinada a um maior valor da corrente de corrosão. Assim como superfícies mais uniformes também estão diretamente relacionadas à diminuição da taxa de corrosão, pois há um menor contato do material com o meio e a presença de arranhões e regiões de encruamento também dificulta a recuperação da película protetora.

No entanto, mesmo tendo a presença de regiões endurecidas na superfície com lixa 100 mesh ainda não se pode confirmar sua relação direta com a incidência do processo corrosivo nessas condições.

A comparação percentual entre as médias dos ensaios, revela que a combinação mais crítica de rugosidade e meio corrosivo para o revestimento de liga Inconel 625 soldado por MIG é com lixa a 100 mesh em ambiente NaCl 3,5%.

Nas amostras ensaiadas com NaCl 3,5% a superfície apresentou um aspecto craquelado, com corrosão característica em contornos de grão, além do tipo por pites, sendo mais severa se comparadas as amostras ensaiadas em H₂SO₄ 1 Mol.

Pela análise das taxas de corrosão obtidas em cada solução e pela revisão da literatura disponível para a liga Inconel 625, pode-se considerar que o material é mais suscetível à corrosão localizada do que à corrosão uniforme, o que não exclui a necessidade de mais estudos a respeito da exposição deste revestimento a longos períodos a estes mesmos ambientes e que contemple a análise da composição da superfície após ataque corrosivo.

Tanto a rugosidade inicial da superfície quanto o meio a que a superfície foi exposta influenciaram a rugosidade final do revestimento, sendo que o meio corrosivo contendo NaCl 3,5% proporcionou uma superfície final mais rugosa devido à ação combinação das formas de corrosão de ataque local identificadas e observadas em MEV.

As conclusões trazidas no presente estudo acerca da influência de fatores conjuntos no processo corrosivo da liga Inconel 625 é verificada pela modelagem da superfície de resposta e da equação característica. Fato que valida também a proposição de análise de resultados por meios de verificação estatística como ferramenta indispensável para as pesquisas acadêmicas.

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Caracterização do comportamento eletroquímico do revestimento de liga de Inconel 625 soldado por MIG em soluções ácidas com a variação das concentrações das espécies e/ou temperatura.

Investigação da interface revestimento/substrato com a variação energia de soldagem, pois uma alta energia de soldagem pode ocasionar a diluição excessiva do substrato, e por consequência, comprometer a resistência à corrosão.

Emprego de técnicas de análise de elementos e substâncias presentes na composição química das películas passivas ou produtos de corrosão formados.

7 REFERÊNCIAS

ALVARAES, Camila P; JORGE, Jorge C.F.; SOUZA, Luís F.G. de; ARAÚJO, Leonardo S.; MENDES, Matheus C.; FARNEZE, Humberto N. Microstructure and corrosion properties of single layer Inconel 625 weld cladding obtained by the electroslag welding process. **Journal of materials research and technology**, v. 9, n. 6, p. 16146 -16158, 1 nov. 2020.

ALVES, Élide Mariana Almeida. **Estudo do comportamento de corrosão do revestimento Inconel 625 depositado por soldagem TIG no aço AISI 4130**. 2022. 64 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, São Paulo, 2022.

ANDRADE, L. A. S. **Estudo da alteração em taxa de corrosão da liga DOMEX 700 MC devido a soldagem a laser**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2019. Disponível em:< <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/15507>>. Acesso em: 10 de nov. 2022.

ANTOSZCZYSZYN, Tiago José. **Revestimentos de Liga de Níquel Inconel 625 por Plasma com Arco Transferido (PTA) sobre aços API 5L X70 e AISI 316L**. 2014. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

ASM International. **Corrosion Tests and Standards. Application and Interpretation**. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CORROSÃO. Pesquisa Tecnológica: essencial ao desenvolvimento do conhecimento da Corrosão. **Revista Corrosão & Proteção**. Ano 16, n.66, jan./fev./mar. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CORROSÃO. **Corrosão: uma abordagem geral**. [S.l.]: ABRACO, 2017. Disponível em:

<http://paginapessoal.utfpr.edu.br/israel/teoria/Teoria_Corrosao_ABRACO.pdf/at_download/file>. Acesso em: 12 de jun. 2023.

ASTM International. **ASTM G3-14 - Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing**. 2014.

ASTM International. **ASTM B444-18 - Standard Specification for Nickel-Chromium Molybdenum-Columbium Alloys (UNS N06625 and UNS N06852) and Nickel Chromium-Molybdenum-Silicon Alloy (UNS N06219) Pipe and Tube**. 2018.

ASTM International. **ASTM G193-12c - Standard Terminology and Acronyms Relating to Corrosion**. 2021.

ASTM International. **ASTM G59-97 - Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements**. 2020.

BORGES, Guilherme Coutinho. **Estudo de corrosão de revestimento ferro/níquel/cromo em substrato de aço domex 700**. 2019. 45 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2019.

CALLISTER JR., William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

COSTA, Rytney Santos. **Estudo da corrosão do aço inox AISI 304 em álcool etílico hidratado combustível**. 2012. 120 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

CORAINI, Rafael; KOBAYASHI, Yukio; GONÇALVES, Gilberto de Magalhães Bento. Influência do Tipo de Chanfro, Tecimento e Sentido de Laminação na Distorção Angular em Soldagem GMAW-P Robotizada de Alumínio. **Revista Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 16, n. 2, p. 123-136, abr./jun. 2011.

DANILISZYN, Kaio Lincoln Keller. **Análise do potencial de repouso e taxa de corrosão em ácido sulfúrico 0,1 molar e ácido oxálico 0,1 molar de um aço aisi 1020 submetido a processo de encruamento**. 2013. 54 p. Trabalho de

conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2013.

EDMUR, Edésio; SOUZA, Fabiano. **Avaliação metalúrgica da soldagem de revestimento com aço inoxidável austenítico sobre aço astm a-36**. 2016. 82 p. Monografia (Especialização Soldagem) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 6 ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2011. E-book. ISBN 978-85-216-1944-4. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-1944-4/>>. Acesso em: 08 nov. 2022.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 7 ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2022. E-book. ISBN 9788521637998. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521637998/>> Acesso em: 08 nov. 2022.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 3. ed. rev. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2006.

GOMES, José Henrique de Freitas. **Análise e otimização da soldagem de revestimento de chapas de aço ABNT 1020 com utilização de arame tubular inoxidável austenítico**. 2010. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós - Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal De Itajubá, Itajubá, 2010.

GUILHERME, A. S.; HENRIQUES, G. E. P.; ZAVANELLI, R. A.; MESQUITA, M. F. Surface roughness and fatigue performance of commercially pure titanium and Ti-6Al-4V alloy after different polishing protocols. **J Prosthet Dent**, Saint Louis, v. 93, n. 4, 2005.

HOLZMANN, H. A.; BORAKOUSKI, B; SANTOS, H. D.; HUPALO, M.F.; PUKASIEWICZ, A.G.M.; Characterization of cobalt based stainless coating deposited GMAW process for use of cavitated surfaces. **Revista Soldagem & Inspeção**, v. 27, 2022.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produto Interno Bruto – PIB**. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/explica/pib.php> Acesso em 02 de out. 2022.

KOBE, B. A.; RAMAMURTHY, S.; BIESINGER, M. C.; MCINTYRE, N. S.; BRENNENSTÜHL, A. M. XPS Imaging Investigations of Pitting Corrosion Mechanisms in Inconel 600. **Surface and Interface Analysis**, v. 37, ed. 5, p. 478-494. 2005,

LABIAPARI, Wilian da Silva. **Abrasão-corrosão em aços inoxidáveis ferríticos**. 2015. 162 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2015.

LIMA, A. B. L; MAZUR, M. M; MAZUR, V. M. Deposição de nióbio para redução da taxa de corrosão do aço DOMEX 700. **XXV Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR**, 2020.

LIMA, Andressa Boeno De. **Efeitos da deposição de revestimentos de nióbio na taxa de corrosão do aço domex 700**. 2022. 61 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2022.

LIMA, Lisiane Gonçalves. **Avaliação Técnico-econômica dos critérios de proteção catódica em meios de diferentes resistividades**. 2007. 132 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Rio de Janeiro, 2007.

ŁYCZKOWSKA, K.; MICHALSKA, J. Studies on the corrosion resistance of laser-welded inconel 600 and inconel 625 nickel-based superalloys. **Archives of Metallurgy and Materials**, v. 62, n. 2, p. 653-656, 2017. ISSN 1733-3490. Disponível em: < <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0100>>. Acesso em 28 de mai. 2023.

MACIOSKI, G.; SOUZA, D. J. de; BRANDÃO, A. P. Capraro; MEDEIROS, M. H. F. de. Análise da corrosão de barras de aço em função da variação do pH do meio. **Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad**, Ponta Grossa, v. 6, n. 3, p. 223- 234, 9 set. 2016.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments**. New York: John Wiley & Sons, 2009.

MARQUES, P. V., MODENESI, P. J., E BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 8 ed. New York: John Wiley & Sons, 2013.

NASCIMENTO, Cleberson Lopes do. **Diagnóstico de corrosividade em eletrodo de aterramento elétrico cobreado**. 2013. 116 p. Dissertação (Mestrado em Materiais Metálicos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

NIU, Jintao; LIU, Zhanqiang; HUA, Yang; WANG, Bing. Effect of machining-induced surface integrity on the corrosion behavior of Al–Li alloy 2A97 in sodium chloride solution. **Materials and Corrosion**, v. 70, n. 2, p. 259-267, 2019. <https://doi.org/10.1002/maco.201810380>. >. Acesso em 24 de jul. 2023.

OLYMPUS. **Introduction to Surface Roughness Measurement: Roughness measurement guidebook**. 2017. Disponível em: < <https://www.olympus-ims.com/pt/metrology/surface-roughness-measurement-portal/>>. Acesso em 20 de nov. 2022.

PARONI, Alexandra Sílvia Matheisen. **Estudo do comportamento eletroquímico da liga UNS N07090 em diferentes concentrações de ácido sulfúrico**. 2015.120 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. São Paulo, 2015.

RAMOS, Leandro Brunholi. **Resistência à corrosão e morfologia de junta soldada de Inconel 625**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2017.

RESENDE, C.; DINIZ, A. F.; MARTELLI, P. B.; BUENO, A. H. S. Avaliação da eficiência de inibidores de corrosão para concretos em ambientes contaminados com CO_2 e íons cloretos. **Revista Virtual de Química**, Ponta Grossa, v. 9, n. 2, p. 699-716, 4 abr. 2017.

RODRIGUES, Tiago A; CIPRIANO FARIAS, Francisco Werley; ZHANG, Kaiping; SHAMSOLHODAEI, A.; SHEN, Jiajia; ZHOU, N.; SCHELL, Norbert; CAPEK, Jan ; POLATIDIS, E.; SANTOS, Telmo G.; OLIVEIRA, J.P. Wire and arc additive manufacturing of 316L stainless steel/Inconel 625 functionally graded material: development and characterization. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 21, n.3, p. 237-251, nov. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.169>>. Acesso em 26 de jun. 2023.

SANTOS, Regina Paula Garcia. **Microabrasão-corrosão de revestimentos de Inconel 625 depositados por plasma pó (PTAP)**. 2018. 200 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2018.

SILVA, André Luiz V. da Costa E.; MEI, Paulo R. **Aços e ligas especiais**. Editora Blucher, 2021. E-book. ISBN 9786555061611. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786555061611/>>. Acesso em: 09 de mar. 2023.

SILVA, Cleiton; MOTTA, Marcelo Ferreira; MIRANDA, Edvan Cordeiro de; MIRANDA, Hélio Cordeiro de. Minimização de defeitos em revestimentos de superligas de níquel depositada pelo processo TIG com alimentação de arame frio. **Revista Soldagem & Inspeção**. São Paulo, vol. 19, n. 4, p. 323-332, out./dez. 2014.

SILVA, Rafael Gomes Nunes; PEREIRA, Adriano de Souza Pinto; SOUSA, Jurandir Marcos Sá de; PEREIRA, Milton; SILVA, Régis Henrique Gonçalves. Tribological comparison of Inconel 625 coatings deposited via laser metal deposition and tungsten inert gas welding process. **Journal of Laser Applications**, v. 32, n. 2, 30 abr. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.2351/7.0000090>>. Acesso em 13 de jun. 2023.

SOBJAK, Taylor Wesley. **Análise de corrosão em aço strenx 700 com revestimento de óxido de titânio**. 2019. 62 p. Trabalho de conclusão de curso

(Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2019.

SOUZA, Daniel; TAVARES, Amanda Figueira; COSTA, Henara Lillian; OSORIO, Alice Gonçalves. Efeito da energia de soldagem sobre a microestrutura e resistência à corrosão de revestimentos de Inconel 625 aplicados pelo processo GMAW. **Revista Matéria**, 2 abr. 2020.

SOUZA, Lídia Beatriz Oliveira de. **Avaliação eletroquímica do mecanismo de corrosão dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 e AISI 316 em meio salino**. 2019. 55 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

SPECIAL METALS. **Technical bulletin INCONEL® alloy 625**, disponível em: < <http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20625.pdf> > Acesso em 10 de out. 2022.

STEIN, Ronei T.; GEHLEN, Rubens Z C.; ROJAS, Fernando C. Tecnologia dos materiais. Porto Alegre: Grupo A, 2019. E-book. ISBN 9788595022355. Disponível em: < <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595022355/> >. Acesso em: 12 de jun. 2023.

SUN, Hua; WU, Xinqiang; HAN, En-Hou. Effects of temperature on the protective property, structure and composition of the oxide film on Alloy 625. **Corrosion Science**, v. 51, n. 11, p. 2565-2572, nov. 2009. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.corosci.2009.06.043> >. Acesso em 17 de jul. 2023.

SUN, Mingcheng; WU, Xinqiang; ZHANG, Zhaoen; HAN, En-Hou. Analyses of oxide films grown on Alloy 625 in oxidizing supercritical water. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 47, n. 2, p. 309-317, dez. 2008. ISSN 0896-8446. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2008.07.010> >. Acesso em 17 de mai. 2023.

TELEGINSKI, Viviane. **Resistência à corrosão e simulação numérica da temperatura e tensões induzidas na refusão superficial a laser da liga aeroespacial Al-1,5% Fe**. 2012. 94 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa,

2012. Disponível em: < <https://tede2.uepg.br/jspui/handle/prefix/1418> >. Acesso em 12 de out. 2022.

TOLOEI, A.; STOILOV, V.; NORTHWOOD, D.O. Simultaneous effect of surface roughness and passivity on corrosion resistance of metals. **WIT transactions on engineering sciences**, v. 90, p. 355-367, 2015. Disponível em:< <https://doi.org/10.2495/MC150321> >. Acesso em 24 de jul. 2023.

VILLAMIL, R. F. V.; et al. Aços inoxidáveis em implantes ortopédicos: fundamentos e resistência à corrosão. **Revista Brasileira de Ortopedia**, v. 37, p. 471-476, nov/dez, 2002. Disponível em: < <https://www.rbo.org.br/detalhes/104/pt-BR/acos-inoxidaveis-em-implantes-ortopedicos--fundamentos-e-resistencia-a-corrosao-> >. Acesso em 18 de out. de 2022.

XU, Lianyong; SHAO, Chunsheng; TIAN, Lei; ZHANG, Jianli; HAN, Yongdian; ZHAO, Lei. Intergranular corrosion behavior of Inconel 625 deposited by CMT/GTAW. **Corrosion Science**, v. 201, 1 jun. 2022.

XU, Lianyong; ZHANG, Jianyang; HAN, Yongdian; ZHAO, Lei; JING, Hongyang. Insights into the intergranular corrosion of overlay welded joints of X65-Inconel 625 clad pipe and its relationship to damage penetration. **Corrosion Science**, v.160, nov. 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108169> >. Acesso em 31 de jun. 2023.

WANG , Luying; LI, Heping ; LIU, Qingyou ; XU, Liping; LIN, Sen; ZHENG, Kai. Effect of sodium chloride on the electrochemical corrosion of Inconel 625 at high temperature and pressure. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 703, p. 523-529, mai. 2017. ISSN 0925-8388. Disponível: < <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.01.320> >. Acesso em 28 de jun. 2023.

WOLYNEC, Stephan. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão**. 1 ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003, 166 p.