



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

Pedro Paulo Búrigo Bastos

**Seleção de Materiais para Tubos Pressurizados Expostos à Ambientes
Salinos: Uma Abordagem Eletroquímica e de Corrosão**

Florianópolis 2025

Pedro Paulo Búrigo Bastos

**Título: Seleção de Materiais para Tubos Pressurizados Expostos à
Ambientes Salinos: Uma Abordagem Eletroquímica e de Corrosão**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Materiais do Centro ou Campus Trindade da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais

Orientador: Dr. Bruno Borges Ramos,

Coorientador: Prof. Dr. Cristiano Binder

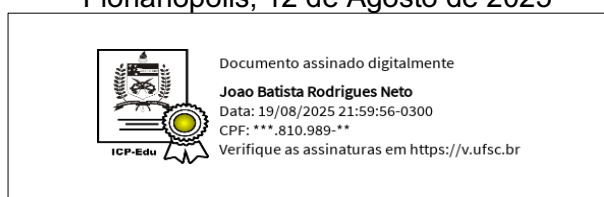
Florianópolis 2025

Pedro Paulo Búrigo Bastos

Seleção de Materiais para Tubos Pressurizados Expostos à Ambientes Salinos: Uma Abordagem Eletroquímica e de Corrosão

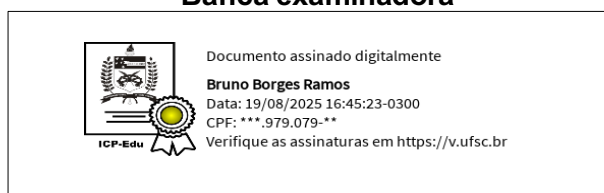
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de “Engenheiro de Materiais” e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora e pelo Curso de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 12 de Agosto de 2025

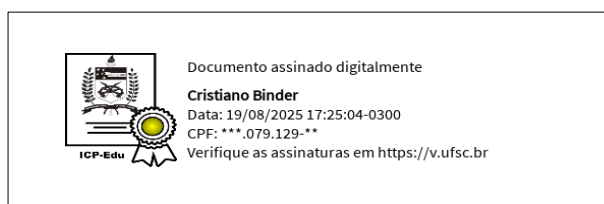


Coordenador do Curso

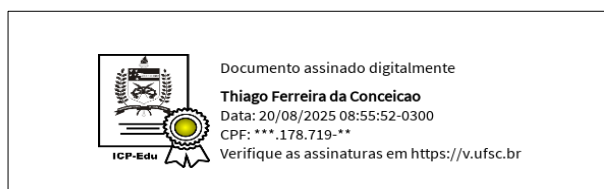
Banca examinadora



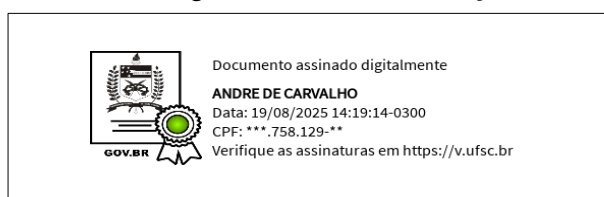
Orientador - Bruno Borges Ramos, Dr.



Coorientador - Prof. Cristiano Binder, Dr.



Prof. Thiago Ferreira da Conceição, Dr.



Eng. André de Carvalho, M.Sc.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, à Universidade Federal de Santa Catarina por ter me proporcionado uma formação de qualidade, com professores altamente capacitados, uma estrutura rica em laboratórios de pesquisa e inúmeras oportunidades de crescimento pessoal e profissional.

Expresso minha profunda gratidão ao meu orientador, Dr. Bruno Borges Ramos, pela disponibilidade, paciência e dedicação em me guiar ao longo desta jornada acadêmica. Sua orientação foi essencial não apenas para a realização deste trabalho, mas também para a minha formação como pesquisador e aluno dentro do ambiente acadêmico e científico do LabMat.

Agradeço também ao meu coorientador, Dr. Cristiano Binder, por me acolher e proporcionar a oportunidade de atuar como bolsista de iniciação científica no LabMat. A experiência adquirida ao participar de diversos projetos técnico-científicos vinculados à indústria e à Engenharia de Materiais foi fundamental para minha formação.

Sou imensamente grato aos colegas e amigos que caminharam comigo durante os três anos de convivência no LabMat. Sem vocês, os desafios das pesquisas teriam sido muito mais difíceis de enfrentar. Meu sincero obrigado a Bárbara, Alexandre, Jéssica e Gustavo.

Agradeço também aos pesquisadores M.Sc. Francisco Vicente, Dr. Diego Salvaro, Dr. Francisco Cavilha e ao M.Sc. Tainan Andrioni, pela oportunidade de colaborar em projetos ligados à Engenharia de Superfícies, que contribuíram para expandir ainda mais meu interesse pelo meio acadêmico e científico.

Deixo registrado um agradecimento especial às amizades construídas ao longo da graduação — vínculos que levarei comigo para toda a vida. Obrigado por estarem ao meu lado e me apoiarem nos momentos mais desafiadores da graduação: Lucas, Gustavo, Luiza, Jeyse, Giovanna e Paulo.

Por fim, agradeço profundamente aos meus pais, Adriana e Paulo, pelo amor, apoio incondicional e pelos valores de caráter, educação e respeito que sempre me transmitiram. Muito Obrigado.

RESUMO

A corrosão externa em tubulações pressurizadas submetidas a ambientes salinos representa um dos principais desafios de integridade em diversos setores da indústria como petroquímica, energia, refinarias e plataformas *offshore*. O processo de falha nestas tubulações pode ocorrer como forma de perda de espessura uniforme ou localizada, ocasionando custos diretos/indiretos e riscos de operação. Visando compreender e simular os processos de corrosão em escala laboratorial, este trabalho avalia, por técnicas eletroquímicas, a corrosão de tubos de cobre, Cu-Ni 90/10 e aço inoxidável 304, expostos a NaCl 3,5 %, com e sem revestimento epóxi. A presença de frestas e defeitos no revestimento (agudos) foram deliberados com finalidade de investigar sua influência no mecanismo e cinética de corrosão dos materiais. Determinaram-se o potencial (E_{corr}) e densidade de corrente de corrosão (j_{corr}) por polarização potenciodinâmica e perda de massa equivalente por cronoamperometria ; MEV e interferometria complementaram a identificação dos mecanismos e produtos de corrosão. As taxas de corrosão obtidas foram relacionadas à espessura mínima calculada pela ASME B31G, permitindo estimar a vida útil simplificada e aproximada dos tubos. O Inox 304 apresentou corrosão localizada por pites e altas taxas de corrosão nas condições mais agressivas; as ligas de cobre e Cu-Ni 90/10 apresentaram corrosão uniforme e perda homogênea de espessura. Entre as amostras revestidas com defeito, o cobre com revestimento grande (GD) e Cu-Ni 90/10 com revestimento pequeno (PD) se mostraram com melhores desempenhos em comparação com as amostras de cobre com revestimento pequeno (PD). A introdução de frestas nos materiais aumentou a taxa de corrosão (carga transferida) entre 10 e 50 vezes para cobre e Cu-Ni e entre 10 e 100 vezes para as de Inox. Por meio de um sistema de pontuação — mecanismo de ataque, desempenho do revestimento, vida útil e custo/manutenção — o Cobre com revestimento Grande e Cu-Ni com revestimento Pequeno foram identificados como as opções mais equilibradas para tubulações pressurizadas em ambiente salino. O estudo fornece dados eletroquímicos objetivos para a seleção de materiais e definição de sobre-espessura para tubulações pressurizadas em componentes industriais.

Palavras-chave: Corrosão; Ligas Cu-Ni; Revestimento; Tubulações Pressurizadas;

ABSTRACT

External Corrosion in pressurized pipelines exposed to saline environments represents one of the main integrity challenges across various industrial sectors such as petrochemical, energy, refineries, and offshore platforms. Failure in these pipelines may occur through uniform or localized wall loss (wall thickness), resulting in direct/indirect costs and operational risks. Aiming to understand and simulate corrosion processes on a laboratory scale, this work evaluates, through electrochemical techniques, the corrosion behavior of copper, Cu-Ni 90/10, and 304 stainless steel pipes exposed to 3.5% NaCl, both with and without epoxy coating. The presence of crevices and deliberate coating defects (acute) was introduced to investigate their influence on corrosion mechanisms and kinetics. Corrosion potential (E_{corr}) and current density (j_{corr}) were determined by potentiodynamic polarization, and equivalent mass loss was assessed by chronoamperometry; SEM and interferometry complemented the identification of corrosion mechanisms and products. The obtained corrosion rates were related to the minimum wall thickness calculated according to ASME B31G, allowing a simplified and approximate estimation of pipe service life. The 304 stainless steel showed localized pitting corrosion and high corrosion rates under the most aggressive conditions; copper and Cu-Ni 90/10 alloys exhibited uniform corrosion and homogeneous wall loss. Among the coated samples with defects, copper with a large coating (200-250 μm) and Cu-Ni 90/10 with a small coating (150-200 μm) performed better compared to copper with a small coating. The introduction of crevices increased the corrosion rate (transferred charge) by 10 to 50 times for copper and Cu-Ni and by 10 to 100 times for stainless steel. Through a scoring system — attack mechanism, coating performance, service life, and cost/maintenance — copper with a large coating and Cu-Ni with a small coating were identified as the most balanced options for pressurized pipelines in saline environments. This study provides objective electrochemical data for material selection and over-thickness definition in pressurized piping used in industrial components.

Keywords: Corrosion; Copper-Nickel Alloys; Coatings; Pressurized Pipelines

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos e formas mais comuns de corrosão.	16
Figura 2 - Mecanismo de Corrosão por Fresta.....	17
Figura 3 - Mecanismo da Nucleação e Crescimento do Pite.....	19
Figura 4 - Formas e morfologias dos pites	20
Figura 5: Curva exemplo de Polarização Potenciodinâmica	25
Figura 6 - Gráfico da Extrapolação de Tafel.....	26
Figura 7 - Curva exemplo de Cronoampetrometria	27
Figura 8 - Fluxograma das etapas adotadas no trabalho	31
Figura 9 - Célula Eletroquímica e esquema representativo.....	35
Figura 10 - Detalhe de montagem das amostras	36
Figura 11 - Detalhe do defeito linear nas amostras revestidas.....	36
Figura 12 - Curvas de PP obtidas dos Materiais Com Revestimento	39
Figura 13 - Curvas de PP obtidas dos Materiais Sem Revestimento	40
Figura 14 - Pites com grande e pequena razão largura/profundidade.....	41
Figura 15 – a) Pites na região da costura e b) corrosão intergranular	42
Figura 16 - a) Superfície do Cobre e b) interface Cobre-Capa plástica após ensaio de PP	43
Figura 17: a) Superfície Cobre-Níquel e b) óxidos formados após ensaio de PP	44
Figura 18 - Curvas de PP obtidas dos Materiais Revestidos com Defeito.....	45
Figura 19: Produtos de corrosão nas amostras a) Cobre PD e b) Cobre GD.....	46
Figura 20 - Produtos de corrosão na região do defeito nas amostras CN PD	46
Figura 21 - Morfologia da camada formada no defeito da amostra de CN PD	47
Figura 22 - Curvas de Cronoamperometria do Aço Inoxidável	49
Figura 23 - Pite formado na superfície do Aço Inox após CA +0,5 V _{ocp}	50
Figura 24 - a) Pite com formato mais "circular" e b) mais "cônico"	51
Figura 25 - Pite com a) perfil mais horizontal e b) perfil mais vertical.....	51
Figura 26 - Curvas de Cronoamperometria do Cobre	52
Figura 27 - Curvas de Cronoamperometria do Cobre-Níquel.....	52
Figura 28 - Curvas de Cronoamperometria para Cobre PD e GD	53
Figura 29 - Curvas de Cronoamperometria para Cobre-Níquel PD.....	53
Figura 30 - Interface Metal - Capa Plástica na amostra de Cobre (sem fresta) após CA + 0,5 V _{ocp}	55

Figura 31 - Taxa de corrosão em função da agressividade do meio63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química via norma(s) em peso (wt%) dos materiais utilizados	32
Tabela 2 - Nomenclatura das amostras utilizadas nos ensaios eletroquímicos	33
Tabela 3 - Valores de OCP, i_{corr} e E_{corr} obtidos dos Ensaio Eletroquímicos de PP..	48
Tabela 4 - Dados compilados de CA e profundidades calculadas/medidas	56
Tabela 5 - Taxas de Corrosão para os materiais/condições	57
Tabela 6 - Resistência Relativa à Corrosão de Metais.....	57
Tabela 7 - Sistema de Pontuação	58
Tabela 8 - Vida útil aproximada do tubo para cada material/condição	59
Tabela 9 - Pontuação em relação a vida útil aproximada de cada material/condição	60
Tabela 10 - Pontuação em relação ao mecanismo/forma de ataque dos materiais/condições.....	61
Tabela 11 - Pontuação do desempenho dos revestimentos nas condições ensaiadas	62
Tabela 12 - Pontuação para Custos + Manutenção de cada material/condição	64
Tabela 13 - Pontuação final em relação aos critérios estabelecidos	65

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Lei de Faraday	27
Equação 2 - Taxa de Corrosão	28
Equação 3 - Profundidade de ataque	28
Equação 4 - Espessura mínima de parede (ASME B31.1).....	30
Equação 5 - Vida útil (anos)	30

Sumário

RESUMO	5
ABSTRACT.....	6
LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABELAS.....	9
LISTA DE EQUAÇÕES.....	10
Sumário	11
1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVO	14
2.1. Objetivos Específicos.....	14
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
3.1. Corrosão e suas Formas	15
3.1.1. Corrosão por Frestas	16
3.1.2. Corrosão por Pites.....	18
3.2. Corrosão em Aços Inoxidáveis	20
3.3. Corrosão em Cobre e Cobre-Níquel	21
3.4. Revestimentos Protetores.....	22
3.5. Técnicas para Avaliação da Corrosão	23
3.5.1. Polarização Potenciodinâmica (PP)	24
3.5.2. Cronoamperometria (CA).....	26
3.6. Relação de Dados Eletroquímicos e Vida Útil de Tubulações.....	29
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
4.1. ENSAIOS ELETROQUÍMICOS.....	33
4.2. MICROSCOPIA ÓPTICA	37
4.3. INTERFEROMETRIA ÓPTICA	37
4.4. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
5.1. POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA E MECANISMOS DE CORROSÃO	39
5.2. TAXA DE CORROSÃO.....	48
5.3. CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DOS MATERIAIS	57
6. CONCLUSÃO	66
REFERÊNCIAS	68

1. INTRODUÇÃO

A corrosão em tubulações metálicas representa um dos principais modos de falha em sistemas de engenharia/indústria que operam com transporte de fluidos pressurizados. Setores como metalúrgicas, geração de energia, indústrias químicas e petroquímicas, refinarias e instalações marítimas aplicam extensamente em pesquisa para o aprimoramento dos materiais e mitigação/controle da corrosão nesses ambientes. Estima-se que a corrosão gere custos de aproximadamente U\$2,5 trilhões em todo o mundo, o que é equivalente a 3,4% do Produto Interno Bruto global. É estimado que entre 15 e 35% desses gastos poderiam ser evitados, o que causaria uma economia de até U\$875 bilhões anualmente (GERHARDUS et al., 2016).

Em tubulações, a deterioração por consequência da corrosão pode ocorrer por diversas maneiras, sendo que a perda de espessura pode ocorrer de forma uniforme ou localizada. A corrosão e falha nestas tubulações podem resultar em grandes catástrofes, levando a perda de produção, risco de vida aos operadores e perdas econômicas significativas (Reda et.al, 2025).

Entre os materiais normalmente especificados para estas aplicações, aços inoxidáveis austeníticos e ligas não ferrosas como cobre e/ou níquel são as mais indicadas por apresentarem propriedades mecânicas que permitem alta conformabilidade, atreladas a alta resistência à corrosão em ambientes severos, acompanhados de processos de fabricação sem grandes complexidades.

A aplicação de revestimentos orgânicos/inorgânicos como método de prevenção à corrosão tem crescido nas últimas décadas, e algumas tintas híbridas de epóxi/poliéster têm apresentado boas combinações de resistência química e a intempéries no meio (FAZENDA, 1995). Sobre a eficiência destes revestimentos frente a presença de defeitos ainda tem muito a se discutir e a literatura apresenta estudos isolados envolvendo técnicas de polarização potenciodinâmica, impedância e cronoamperometria, mas raramente integra dados eletroquímicos a análises de mecanismo de ataque com falhas nos revestimentos para projetos de tubulações pressurizadas.

Diante deste tópico, esse trabalho avalia, com abordagem sistemática e eletroquímica, o comportamento corrosivo dos três materiais em solução NaCl 3,5%, com e sem epóxi, empregando ensaios de polarização potenciodinâmica

(E_{corr} e j_{corr}) e cronoamperometria (Σ *Carga Elétrica*). Técnicas de Microscopia Eletrônica de Varredura, Microscopia Óptica e Interferometria foram utilizadas para identificar os mecanismos e auxiliar nos cálculos de perda de espessura. As taxas de corrosão resultados e aproximadas são correlacionadas com a espessura mínima exigida pela ASME B31G, possibilitando estimar a vida útil e propor critérios básicos de seleção dos materiais para cada condição.

2. OBJETIVO

O trabalho tem como objetivo geral avaliar o comportamento à corrosão das ligas de cobre, cobre-níquel (90/10) e aço inoxidável 304, com e sem revestimento polimérico, expostas a solução de NaCl 3,5%, considerando a influência da presença de frestas no mecanismo e taxa de corrosão dos materiais.

2.1. Objetivos Específicos

- Caracterizar a resistência à corrosão das ligas de cobre, cobre-níquel e aço inoxidável (304) em meio NaCl 3,5%
- Avaliar o desempenho da tinta/revestimento polimérico (epoxi) frente a resistência à corrosão em meio NaCl 3,5%
- Determinar a influência da presença de frestas e defeitos no revestimento na taxa e mecanismo de corrosão dos materiais.
- Correlacionar os resultados experimentais obtidos com critérios técnicos para a seleção de materiais e revestimento em sistemas pressurizados em ambientes salinos.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Corrosão e suas Formas

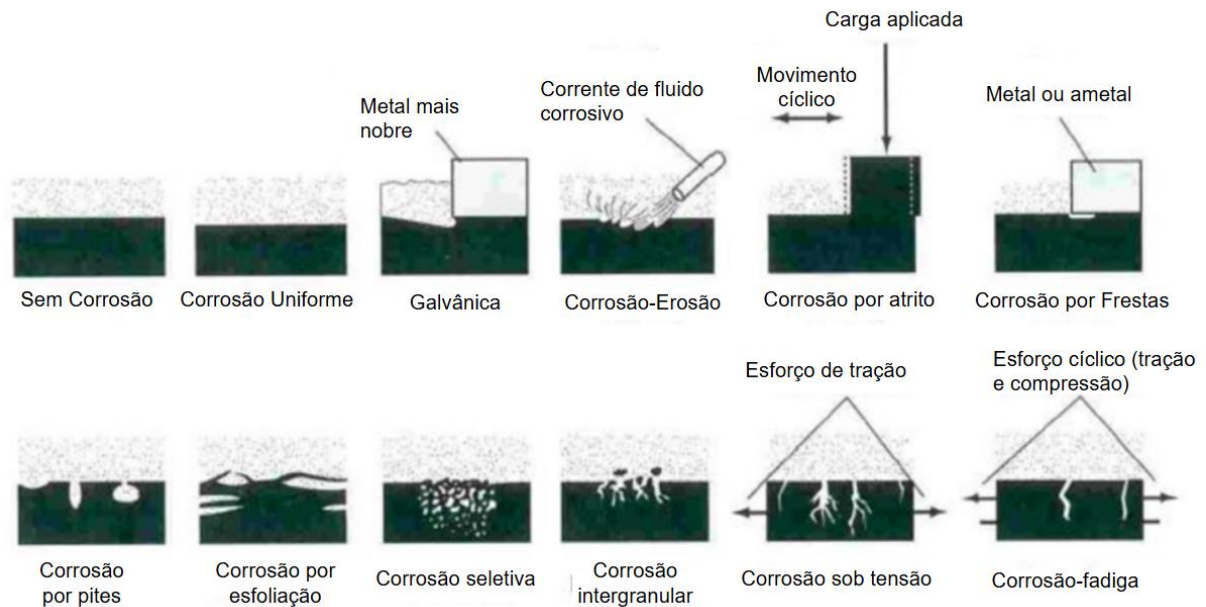
A corrosão pode ser definida como a deterioração de um material por ação química ou eletroquímica do meio na qual ele se encontra, aliada ou não a esforços mecânicos. Essa deterioração representa alterações prejudiciais indesejáveis sofridas pelo material, tais como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais (GENTIL, 2022). Estima-se que a corrosão gere custos de aproximadamente U\$2,5 trilhões em todo o mundo, o que é equivalente a 3,4% do Produto Interno Bruto global. É estimado que entre 15 e 35% desses gastos poderiam ser evitados, o que causaria uma economia de até U\$875 bilhões anualmente (GERHARDUS et al., 2016). Dentre os os gastos causados pela corrosão, podemos classificá-los entre custos diretos e indiretos. Perdas diretas podem ser consideradas como substituição completa dos componentes, custos com a mão de obra, custos com o investimento de ações preventivas como revestimentos, pinturas entre outros. Já os custos indiretos podem ser considerados aqueles nem sempre conseguem ser quantificados, como por exemplo paralisação do equipamento por tempo indeterminado ou contaminação dos produtos/fluidos que passam através da tubulação corroída (GENTIL, 2022).

Os processos de corrosão estão intimamente atrelados aos fenômenos ocorrendo na superfície de cada material. Reações de oxidação e redução estão envolvidas durante todo o processo, sendo que uma parte sempre irá ceder elétrons (ânodo) e outra parte irá recebê-los (cátodo). De maneira geral, a corrosão pode ser considerada como o processo de oxidação dos metais, cedendo elétrons para outra(s) substância(s) no sistema, logo a corrosão é um processo de degradação/destruição do material metálico que progride a partir de sua superfície (GENTIL, 2022).

A corrosão pode ocorrer de diferentes formas, sendo que classificá-las pode nos ajudar a entender mais sobre seus mecanismos e sua origem. Os tipos de corrosão podem ser classificados segundo a aparência ou forma de ataque e suas diferentes causas. A morfologia, mecanismos, o meio, presença ou não de esforços mecânicos e a localização do ataque são categorias que podemos classificar e diferenciar as formas de corrosão. A Figura 1 abaixo representa

algumas formas de corrosão nos materiais metálicos.

Figura 1 - Tipos e formas mais comuns de corrosão.



Fonte: Slides da disciplina de Engenharia de Superfícies UFSC.

3.1.1. Corrosão por Frestas

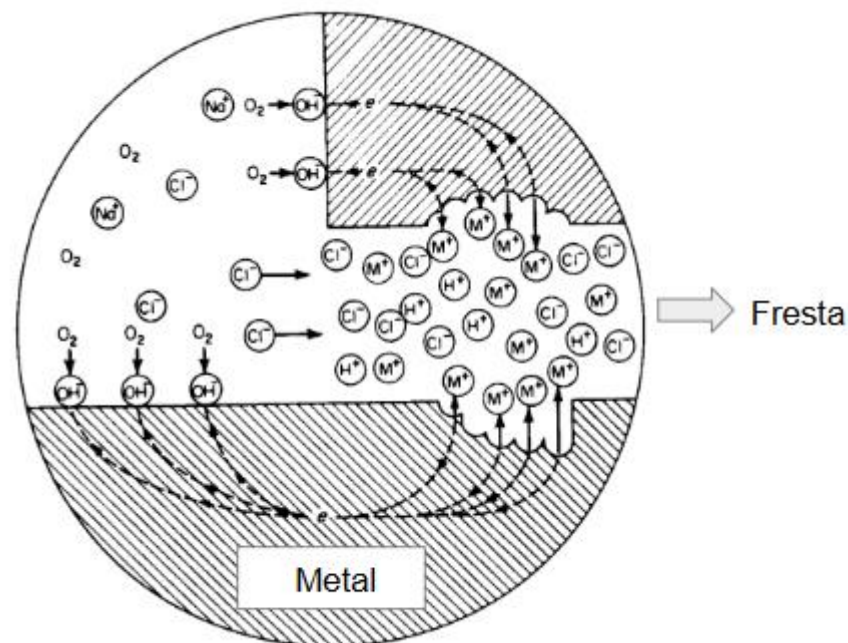
O processo de corrosão por frestas ocorre quando um metal está submerso em uma solução contendo concentrações diferentes dos eletrólitos envolvidos (íons). É comum ocorrer essa pilha quando se têm superfícies metálicas superpostas e em contato, havendo, entre elas, pequenas frestas por onde o eletrólito possa penetrar. Ocorre também no contato entre superfícies metálicas não metálicas, desde que haja frestas. A fresta deve ser suficientemente estreita para manter o meio corrosivo estagnado e suficientemente aberta para permitir que o meio corrosivo penetre nela. (GENTIL 2022).

O mecanismo explicado por FONTANA (2005) considera que inicialmente as reações de oxidação $M \rightarrow M^+ + e^-$ e redução do oxigênio $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ ocorrem uniformemente na superfície metálica com o meio/eletrólito. Após um determinado tempo, a disponibilidade de oxigênio fica reduzida no interior da fresta e assim criando uma região com menos oxigênio, levando a uma diferença de potencial eletroquímico dessa região com o meio externo.

Consequente a velocidade de reação de redução do oxigênio diminui e em contrapartida a oxidação e liberação de íons metálicos M^+ dentro da fresta continua. Íons negativos como cloretos por exemplo migram para o interior da fresta e desenvolvem uma reação auto catalítica, aumentando o consumo do metal.

À medida que a taxa de corrosão aumenta dentro da fresta, as taxas das reações de redução do oxigênio nas áreas adjacentes aumentam, como mostrado na Figura 2. Este mecanismo é comum em vários eletrólitos, mas se mostra mais intenso em ambientes contendo íons cloretos, sendo que um período de incubação pode ser considerado antes do início da corrosão devido a fresta, podendo ser de 6 meses a 1 ano, entretanto quando iniciado a taxa de corrosão aumenta e continua, devido ao caráter auto catalítico do mecanismo (FONTANA, 2005). A Figura 2 mostra o mecanismo e as reações ocorrendo no interior e áreas adjacentes da fresta.

Figura 2 - Mecanismo de Corrosão por Fresta.



Fonte: Adaptado de FONTANA, 2005.

Em sistemas de engenharia, frestas são formadas na maioria das vezes pela união ou acoplamento de materiais. Em outras situações, podem ser criadas por

entalhes, defeitos em revestimentos, fissuras, soldas com mal acabamento e etc. Sendo assim, é de extrema importância que os projetos evitem condições que induzem a ocorrência de frestas (GEMILLI, 2024).

3.1.2. Corrosão por Pites

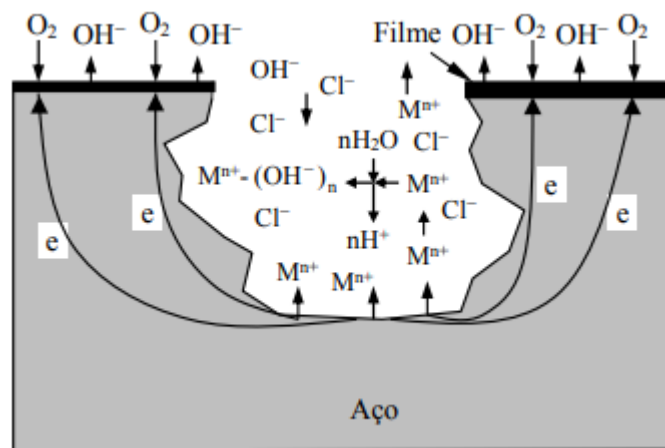
A corrosão por pites (ou puntiforme) definida pela Norma ASTM G15 – 04 pode ser considerada como a corrosão da superfície de um metal, confinada em um ponto ou pequena área, que ocorre na forma de cavidades. Ocorre normalmente em materiais metálicos que possuam pontos da sua superfície desprotegidos, sejam eles revestidos ou passivados. O início e formação dos pites está associada com interações localizadas entre o filme passivo e determinados ânions presentes no meio aquoso, chamados de ânions agressivos. A susceptibilidade à corrosão por pites depende do material, do tipo de ânions agressivos e de suas concentrações, dos ânions não agressivos e suas concentrações e do pH do meio (GEMELLI, 2024).

Dentre os principais ânions agressivos que induzem a corrosão por pites nas ligas metálicas, o cloreto é comumente encontrado em águas naturais, no solo, na atmosfera e em determinados produtos comerciais. Várias aplicações industriais e de engenharia envolvem ambientes agressivos envolvendo íons cloretos em suas composições, sendo assim a importância significativa dos estudos e metodologias para avaliação de sua influência na corrosão de várias ligas metálicas. A corrosão por pites pode ser frequentemente observada em aços inoxidáveis, ligas de alumínio, sendo que estes ocupam uma grande participação na aplicação destes materiais em instalações domésticas, industriais e componentes de Engenharia. (GEMELLI, 2024).

O mecanismo da corrosão por pites está relacionado a estágios que podem ser resumidos em nucleação e crescimento do pite (metaestável e estável). Íons agressivos, como os cloretos, conseguem penetrar nos filmes passivos devido à presença de defeitos na estrutura cristalina, como interstícios, discordâncias, lacunas de oxigênio, entre outros. Com sua migração para regiões mais internas do filme, esses íons interferem na concentração e na mobilidade de espécies ativas, promovendo a formação de áreas anódicas (dentro do pite) e catódicas (ao redor do pite) na superfície metálica. A nucleação dos pites ocorre de forma muito

rápida e em pontos imprevisíveis, o que torna esse fenômeno difícil de ser monitorado. Após a nucleação, os íons agressivos reagem com íons metálicos (M^{n+}), formando compostos solúveis que levam à ruptura localizada do filme passivo. A contínua dissolução de espécies metálicas no interior do pite provoca uma queda significativa do pH, devido a reações de hidrólise, o que favorece ainda mais o crescimento do pite (FONTANA, 2005). A Figura 3 abaixo representa o crescimento de um pite na superfície de um aço passivado imerso em meio neutro ou básico naturalmente aerado contendo cloreto.

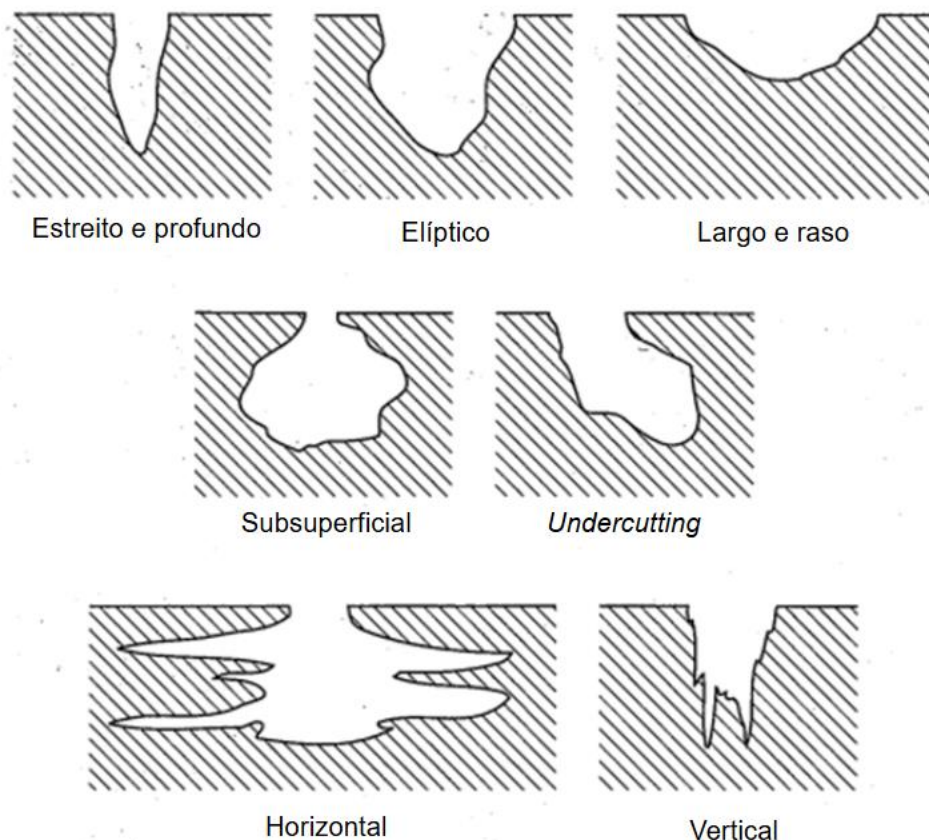
Figura 3 - Mecanismo da Nucleação e Crescimento do Pite.



Fonte: GEMELLI, 2024.

O formato e geometria das cavidades pode variar em cada condição material-meio e não existe uma unificação entre os autores para as nomenclaturas dos pites. Basicamente os pites podem ter os formatos e morfologias apresentados abaixo na Figura 4.

Figura 4 - Formas e morfologias dos pites.



Fonte: ASTM G46 – 76.

3.2. Corrosão em Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis contendo simultaneamente cromo e níquel em sua composição, chamados austeníticos, constituem os melhores tipos de aços resistentes à corrosão. O carbono, forçosamente presente em todos os tipos de aços, diminui ligeiramente a corrosão dos aços inoxidáveis quando no estado dissolvido. O Molibdênio geralmente aumenta a passividade e a resistência à corrosão nos ácidos sulfúrico e sulfuroso a altas temperaturas e pressão e em soluções neutras de cloreto, particularmente na água do mar (CHIAVERINI, 1996).

A resistência à corrosão dos aços inoxidáveis está relacionada com os elevados teores de cromo, acima de 11%, dessas ligas. Quando esses materiais são expostos ao ar, o cromo reage com o oxigênio formando uma fina camada de óxido de cromo, que protege o material da corrosão. Esse fenômeno é chamado de passivação (KRUGER, 2003). No entanto, fatores como a presença de íons de haleto afetam a estabilidade dessa camada passiva. Concentrações elevadas de

íons de cloreto, em especial, prejudicam o desempenho desses materiais: a adsorção ou incorporação desses íons gera a dissolução localizada do filme passivo, gerando uma região ativa, propícia para a nucleação e propagação de pites (SEDRIKS, 1986).

Dentre as principais classes dos aços inoxidáveis, os que possuem melhor desempenho frente a propagação de pites ou frestas são as ligas que possuem alto teor de Cromo (>20%) e alguns teores de Molibdênio. Em ambientes salinos, os aços inoxidáveis são mais utilizados em aplicações atmosféricas do que submersas, devido à ação agressiva dos íons cloreto. Ainda assim, são empregados com sucesso em componentes como condensadores, sistemas de exaustão, hélices e impulsores de bombas, especialmente quando há fluxo contínuo de água. No entanto, podem apresentar problemas se permanecerem inativos e cheios de água do mar por longos períodos (REUBEN, 1994).

3.3. Corrosão em Cobre e Cobre-Níquel

O cobre se diferencia de outros metais pois consegue combinar uma boa resistência à corrosão atrelado a uma boa condutividade elétrica e térmica. Para os processos de fabricação em geral o cobre apresenta uma boa conformabilidade e usinabilidade, sendo que a adição de elementos de liga possibilita ganhos de resistência mecânica (FONTANA, 2005).

Em relação à corrosão, o cobre se classifica como um metal nobre, posicionando em potenciais mais positivos (nobres) nas séries galvânicas. Possui também uma baixa tendência termodinâmica para a corrosão, devido a sua baixa energia livre de reação química em soluções aquosas. Devido a esses fatores, cobre e suas ligas são relativamente resistentes à corrosão em várias atmosferas e ambientes aquosos não oxidantes. Alguns ácidos fortes e oxidantes podem aumentar a corrosão uniforme, sendo que a presença de amônia pode induzir à corrosão sob tensão em algumas de suas ligas (JONES, 1996)

As ligas de cobre-níquel são as ligas comerciais mais utilizadas quando se necessita de uma alta resistência à corrosão sendo que ligas da série 400, com 30% de níquel possuem a máxima resistência à corrosão-erosão e corrosão sob tensão. A adição de manganês e ferro aumenta a resistência à corrosão-erosão, aumentando a aderência da camada passiva protetiva na superfície do metal.

Somado as características de corrosão, as ligas de cobre-níquel com adição de elementos como ferro possuem boas propriedades mecânicas como Tensão de Escoamento a baixas temperaturas possibilitando aplicações criogênicas. Em temperatura ambiente e em altas temperaturas algumas ligas com adição de ferro apresentam bons valores de tensão de escoamento (JONES, 1996; KLASSERT, 2007).

Estas ligas são tradicionalmente utilizadas quando se consideram aplicações em ambientes salinos. Algumas ligas podem ser aplicadas para a fabricação de tubulações, sendo aplicadas sobre pressão em condensadores e trocadores de calor presentes em plataformas offshore. Sua boa conformabilidade e soldabilidades possibilita sua fabricação em diferentes geometrias, servindo como parte de bombas, válvulas, sistemas de refrigeração, embarcações, plataformas, indústria químicas e óleo/gás.

3.4. Revestimentos Protetores

Os revestimentos protetivos aplicados nos materiais e diversos componentes presentes na indústria podem melhorar ainda mais suas propriedades de resistência à corrosão, aumentando assim sua vida útil. Além de melhorar a resistência à corrosão da liga revestida, a deposição de um revestimento pode aperfeiçoar propriedades mecânicas e tribológicas, estendendo a vida útil desses materiais (MARTIN, 2010).

Seu mecanismo consiste em formar uma barreira entre o substrato (material a ser protegido) e o meio agressivo (espécies corrosivas). O início da corrosão não ocorre sem esse contato, considerando que o filme protetivo permaneça intacto. O processo de degradação do revestimento pode-se iniciar com a penetração de espécies reativas no meio como água, oxigênio, íons sulfetos, etc. O deslocamento/abertura do revestimento pode ocorrer devido a formação de óxidos ou espécies alcalinas que reagem com o revestimento na interface metal-revestimento (JONES, 1996).

Um dos principais usos do revestimento epóxi se destina a isolamentos elétricos e aplicações que demandam de proteção à corrosão, como tubulações de gás e óleo. Como o passar dos anos, algumas tintas híbridas foram projetadas para apresentarem propriedades complementares em certos ambientes/meios. A

relação 50 % poliéster e 50 % epóxi resulta em um revestimento com excelente resistência química e resistência à água em ebulição, porém a resistência a intempéries é deficiente. A relação 70 % poliéster e 30 % epóxi, que é a mais utilizada, produz um revestimento com melhor comportamento à intempérie, maior resistência ao amarelecimento, porém, apresenta menor resistência química (FAZENDA, 1995).

3.5. Técnicas para Avaliação da Corrosão

Para verificar o desempenho e comportamento dos materiais e/ou projetos de engenharia, podemos realizar ensaios de corrosão simulando as condições agressivas do meio ou aplicação. Podemos caracterizar a agressividade de um determinado meio corrosivo e fornecer fundamentos para o controle e mitigação da corrosão com os resultados e informações advindas destes ensaios.

Na escolha dos ensaios podemos separá-los de acordo com os objetivos a serem estudados

1. Do processo corrosivo (forma/mecanismo);
2. Na complexidade de fabricação/montagem do(s) ensaio(s);
3. Reprodutibilidade das amostras e;
4. Tempo necessário para a realização dos ensaios e tratamento dos dados.

Os ensaios podem ser realizados em campo ou em laboratórios, sendo que nos ensaios em campo as condições podem ser análogas às de serviço enquanto e demandam tempos maiores de ensaios, já que permitem obter resultados mais completos para observar fatores aceleradores e retardadores do processo de corrosão, como: Atmosfera, temperatura, umidade, aeração, impurezas, fatores biológicos entre outros (GENTIL, 2022).

Nos ensaios em laboratórios, em menor escala, pode-se utilizar de métodos eletroquímicos que nos permitem obter resultados de maneira mais rápida e em ambientes controlados para cada aplicação. Os ensaios podem fornecer informações quantitativas que podem determinar informações valiosas como: taxa de corrosão, mecanismos de reação, avaliação de revestimentos e curvas de polarização.

Os resultados dos ensaios eletroquímicos podem ser complementados com técnicas de caracterização e identificação como: Microscopia Óptica ou Eletrônica para observar os produtos de corrosão, EDS ou DRX para identificação da composição química e interferometria óptica para avaliação de rugosidade, topografia e perda de massa na superfície do material.

3.5.1. Polarização Potenciodinâmica (PP)

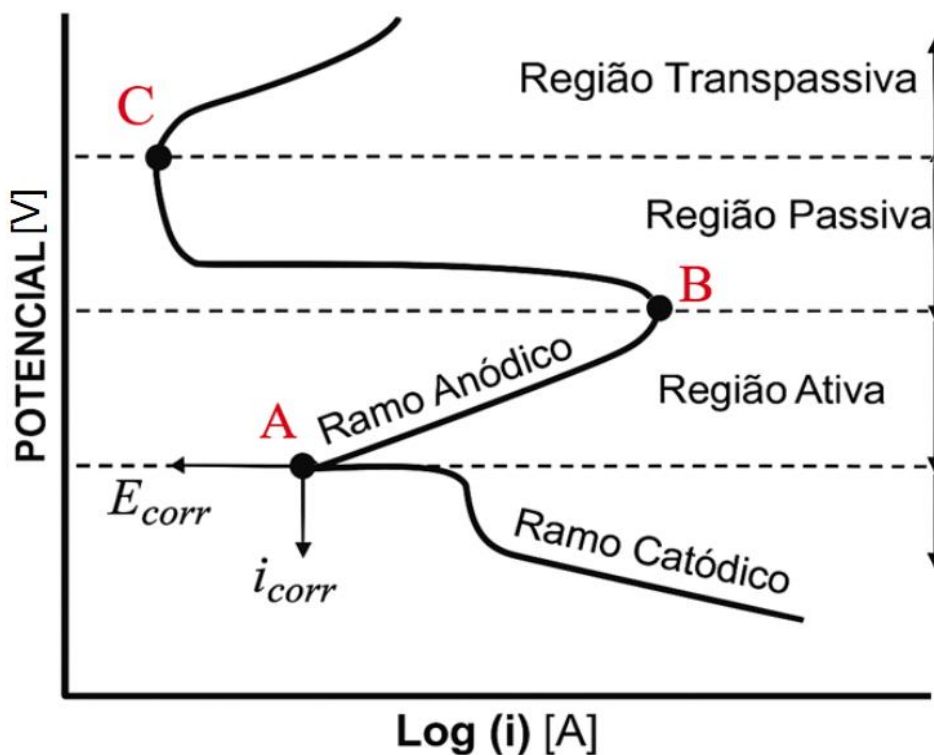
A polarização potenciodinâmica é uma técnica que pode ser utilizada para determinar a região de potencial no qual o material se comporta como ativo ou passivo quando exposto em um determinado meio corrosivo. Com o ensaio, é possível estimar tanto a ocorrência da passivação espontânea do material quanto a resistência dessa camada protetora (POPOV, 2015).

A técnica consiste em inserir uma amostra com área superficial pré-definida e submergi-la no meio corrosivo. Um sistema eletroquímico é formado com os componentes básicos: Cátodo (Contra Eletrodo), Ânodo (Eletrodo de Trabalho) e o Eletrólito (Meio Corrosivo). Após um determinado tempo, as reações de oxidação e redução atingem a mesma taxa, entrando em equilíbrio termodinâmico. Este potencial atingindo é comumente chamado de Potencial De Corrosão ou Potencial de Circuito Aberto – PCA, ou em inglês, *Open Circuit Potential – OCP*.

Após atingir o OCP, uma varredura de potencial é aplicada a uma taxa constante, geralmente 1 mV/s, na direção do ramo anódico. Podemos observar o comportamento da curva para cada material no meio corrosivo, acompanhando a evolução da corrente com o tempo. Após a varredura do potencial podemos identificar as regiões onde o material se comporta como ativo (corrosão) e onde é passivo (caso ocorra o fenômeno).

No gráfico de polarização é possível adquirir o potencial de corrosão E_{corr} que se associa com a respectiva corrente de corrosão i_{corr} . O potencial de corrosão está atrelado a tendência termodinâmica para início do processo corrosivo, enquanto a corrente de corrosão está atrelada ao aspecto cinético da corrosão. Quanto mais positivo for o valor de E_{corr} , menor suscetibilidade à corrosão terá o material naquele meio. Já para i_{corr} , quanto menor for este valor, menor será a taxa de corrosão. Um gráfico típico de polarização potenciodinâmica para materiais com fenômeno de passivação está mostrado na Figura 5.

Figura 5: Curva exemplo de Polarização Potenciodinâmica.

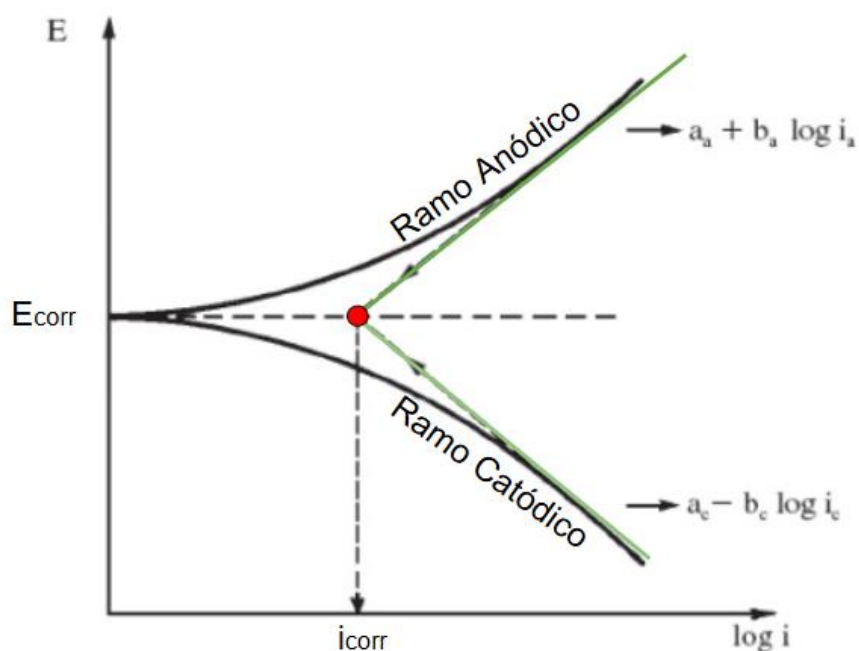


Fonte: Adaptado de PEREZ (2016).

Após a realização dos ensaios de polarização potenciodinâmica, os dados são tratados e interpretados por meio do software Nova 2.1.5. As coordenadas e os valores de E_{corr} e i_{corr} foram obtidos utilizando o método de extrapolação de Tafel, conforme descrito por Gentil (2022). Esse método consiste na construção manual de duas retas tangentes aos ramos anódico e catódico da curva de polarização, cujo o ponto de interseção determina as coordenadas de E_{corr} e i_{corr} . As retas tangentes podem ser representadas por funções lineares do tipo $f(x) = A \pm B \log(i)$, em que os coeficientes A e B estão relacionados a propriedades do sistema eletroquímico, como a constante dos gases, constante de Faraday, temperatura, coeficiente de transferência de carga e número de oxidação da(s) espécie(s) eletroativa(s).

Após a obtenção dos valores de E_{corr} e i_{corr} , podemos calcular o valor de j_{corr} que corresponde a densidade de corrente de corrosão para a respectiva área exposta com a solução/eletrolito. A Figura 6 abaixo representa um esquema da extrapolação de Tafel.

Figura 6 - Gráfico da Extrapolação de Tafel.



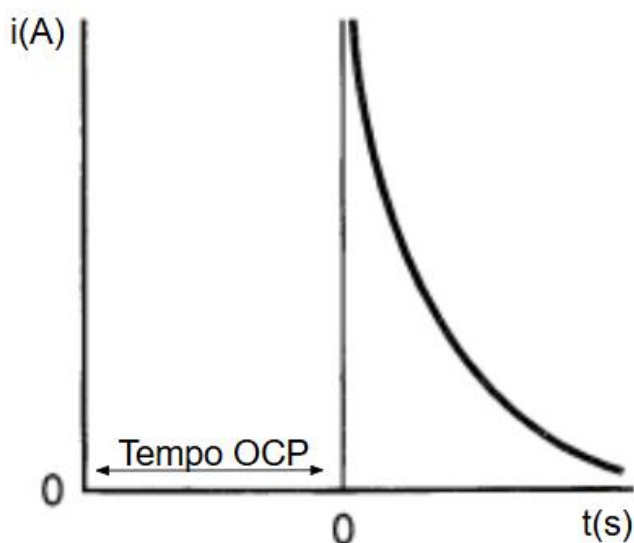
Fonte: Adaptado de GENTIL (2022).

3.5.2. Cronoamperometria (CA)

A Cronoamperometria (CA) é uma técnica eletroquímica em que corrente é monitorada como uma função do tempo, a partir da aplicação de uma faixa ou valor fixo de potencial pré-definido. Uma curva típica obtida após um ensaio de cronoamperometria pode ser observado na Figura 7.

Neste trabalho, a CA foi empregada para avaliar a resposta eletroquímica das ligas metálicas sob potenciais pré-selecionados a partir da análise das curvas de polarização potenciodinâmica (PP). Após analisar as curvas de PP para cada material, obtemos os valores e regiões de potenciais onde os materiais podem se comportar como ativos ou passivos frente à corrosão.

Figura 7 - Curva exemplo de Cronoampetrometria.



Fonte: Adaptado de BALD & FAULKNER (2001).

Através da integração da curva de corrente em função do tempo, obtém-se a carga total transferida (Q), a qual pode ser relacionada com a quantidade de material corroído, via a Lei de Faraday segundo a equação 1:

Equação 1 - Lei de Faraday

$$m = \frac{Q \cdot EW}{n \cdot F}$$

Onde:

m = massa do metal corroído [g]

Q = Carga elétrica [C]

EW = Peso Equivalente do Metal [g/mol]

n = número de elétrons transferidos por átomo que sofre a oxidação

F = Constante de Faraday [96.485 C/mol]

A partir do cálculo da massa de material corroído, pode-se estimar a perda volumétrica e, conseqüentemente, a taxa de corrosão. Adaptando-se a Lei de Faraday para correlacionarmos a área do material exposta durante os ensaios e a densidade de corrente de corrosão (j_{corr}) obtida pela extrapolação de Tafel, conseguimos obter a equação 2 que fornece a taxa de corrosão geralmente expressa em [mm/ano].

Equação 2 - Taxa de Corrosão

$$CR = \frac{j_{corr} \cdot EW \cdot K}{\rho}$$

Onde:

CR = Taxa de corrosão (*Corrosion Rate*) [$\mu\text{m}/\text{ano}$]

j_{corr} = Densidade de corrente de corrosão [A/cm^2]

EW = Peso equivalente [g/mol]

ρ = Densidade do material [g/cm^3]

K = Constante de conversão de unidade

Pode-se ainda fazer uma adaptação da equação 2 se considerarmos que a densidade de corrente média (j_{corr}) utiliza a quantidade de carga por tempo e a área efetiva para ser calculada. Considerando que a quantidade de carga envolvida na(s) reação(s) foi obtida pela integração das curvas de CA, obtemos a equação 3 que nos fornece profundidade do dano/ataque da corrosão nas amostras, sendo essa profundidade expressa em centímetros [cm].

Equação 3 - Profundidade de ataque

$$PC = \frac{EW \cdot Q}{\rho \cdot F \cdot A}$$

Onde:

PC = Profundidade de corrosão [cm]

EW = Peso equivalente [g/mol]

Q = Carga elétrica [C]

ρ = Densidade do material [g/cm^3]

F = Constante de Faraday [96.485 C/mol]

A = Área efetiva [cm^2]

3.6. Relação de Dados Eletroquímicos e Vida Útil de Tubulações

A corrosão em tubulações metálicas representa um dos principais modos de falha em sistemas de engenharia/indústria que operam com transporte de fluidos pressurizados. Setores como metalúrgicas, geração de energia, indústrias químicas e petroquímicas, refinarias e instalações marítimas aplicam extensamente a aplicação em pesquisa para o aprimoramento dos materiais e mitigação/controle da corrosão nesses ambientes. A corrosão e falha nestas tubulações podem resultar em grandes catástrofes, levando a perda de produção, risco de vida aos operadores e perdas econômicas significativas (Reda et.al, 2025).

As tubulações industriais estão frequentemente expostas a ambientes agressivos, como o solo ou a atmosfera, os quais podem conter espécies agressivas que, sob determinadas condições, favorecem a ocorrência de mecanismos de corrosão localizada, como a corrosão por pite. Adicionalmente, falhas de projeto ou de montagem podem propiciar a formação de frestas, promovendo também a corrosão por esse mecanismo.

Conforme discutido em tópicos anteriores, tais mecanismos corrosivos são severos e apresentam baixa previsibilidade e detecção precoce. A perda de espessura, seja uniforme ou localizada, compromete significativamente a integridade estrutural das tubulações, sendo, portanto, fundamental realizar uma criteriosa seleção preliminar do material a ser empregado, considerando as condições ambientais às quais o sistema estará submetido. Simultaneamente, a seleção do material ou da liga metálica deve contemplar as solicitações mecânicas envolvidas, bem como a pressão interna de operação, levando em consideração a degradação progressiva por corrosão ao longo da vida útil da tubulação/componente.

Para o cálculo das pressões e espessura mínima de parede para que o vaso opere sem entrar em colapso a norma ASME B31.1 - "*Power Piping*" American National Standard Institute fornece uma equação que relaciona as propriedades do material e fabricação/projeto. A equação que fornece a espessura mínima de parede para tubos retilíneos é dada pela equação 4:

Equação 4 - Espessura mínima de parede (ASME B31.1)

$$t_{\min} = \frac{P \cdot R_0}{(SE + Py)} + A$$

Onde:

t_{\min} = Espessura Mínima de Parede Necessária [mm]

P = Pressão Interna Projetada [kPa] – Neste trabalho: 5 MPa

R_0 = Raio Interno do Tubo [mm]

SE = Tensão de Escoamento do material + Fator de Junção de Solda [kPa]

y = Constante Correlacionada a Temperatura de Operação [adimensional]

A = Espessura Adicional devido a fatores de Projeto, Segurança e Ambientais - Corrosão [mm]

Os dados advindos das técnicas eletroquímicas de polarização potenciodinâmica e cronoamperometria podem ser correlacionados com as amostras do trabalho, utilizando as medidas de espessura de parede e diâmetro dos tubos. A equação 4 é válida e pode ser utilizada no trabalho desde $t < 0,5 R$ e $P < 0,385 SE$. A pressão interna foi estimada em 5 MPa e o fator E para tubos com costura é de 0,85.

A partir da definição da espessura mínima de parede considerando os fatores mecânicos/geométricos dos tubos e das propriedades mecânicas dos materiais de fabricação, podemos fazer uma previsão da vida útil da tubulação considerando o fator da corrosão. Esta correlação pode ser feita após a obtenção da taxa de corrosão para cada material/condição após os ensaios eletroquímicos. A equação 5 pode fornecer de forma simplificada a vida útil da tubulação considerando a espessura mínima e a taxa de corrosão no sistema.

Equação 5 - Vida útil (anos)

$$Vida \acute{U}til \ (anos) = \frac{e_{real} - e_{\min}}{CR}$$

Onde:

e_{real} = Espessura inicial do tubo [mm] – medida com paquímetro ou MO

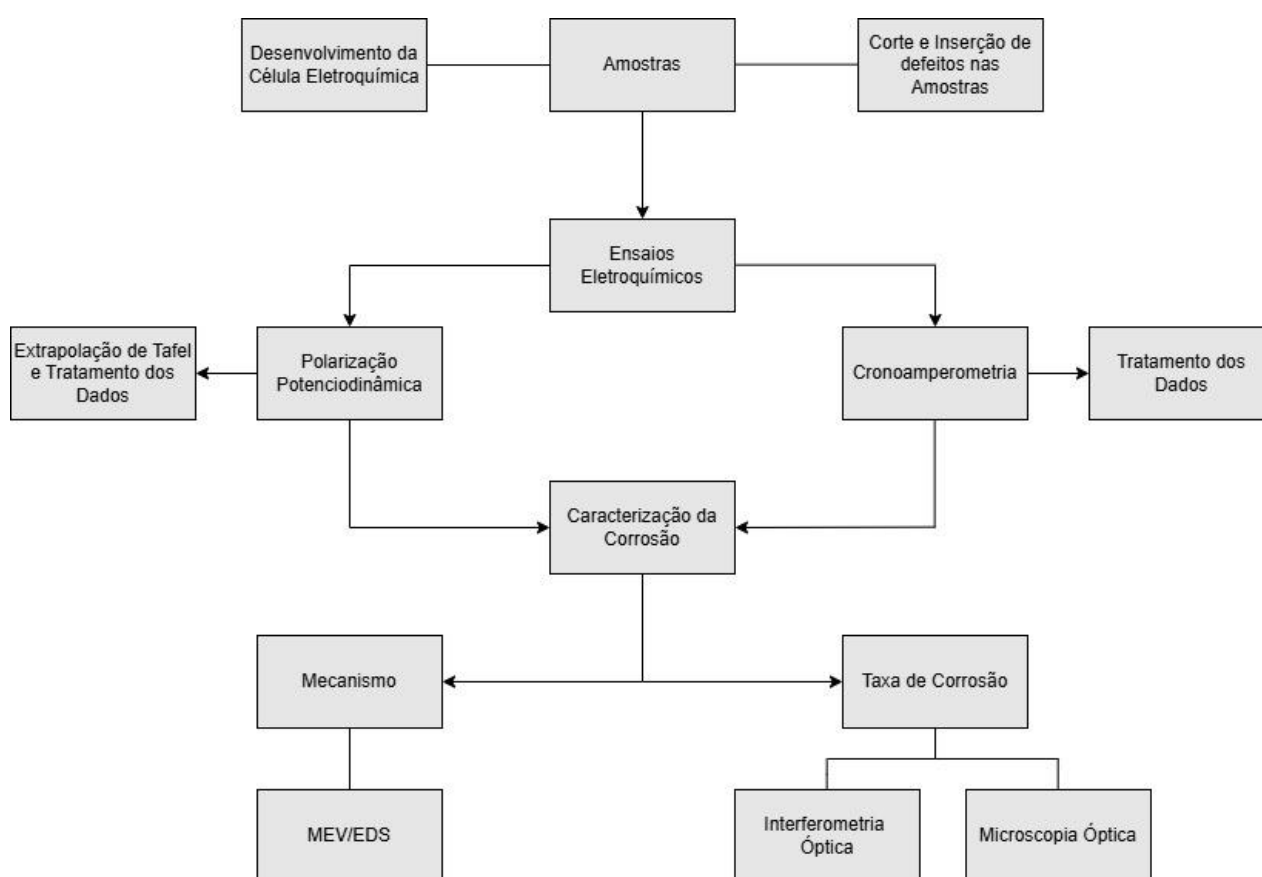
e_{\min} = Espessura mínima definida pela equação 4

CR = Taxa de corrosão em [mm/ano], estimada a partir da equação 2.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentado a metodologia desenvolvida no trabalho para a avaliação do comportamento corrosivo das amostras com suas respectivas condições. Abaixo na Figura 8 está representado um fluxograma das etapas e procedimentos realizados durante o trabalho.

Figura 8 - Fluxograma das etapas adotadas no trabalho.



Fonte: Autor.

Os materiais utilizados para os procedimentos experimentais no trabalho estão apresentados na Tabela 1. As composições químicas em peso atômico dos elementos residuais estão conforme as normas: ABNT NBR 5601 para o aço inoxidável e Unified Numbering System for Metals and Alloys (UNS) para as ligas de cobre. As propriedades mecânicas e geométricas dos materiais utilizadas para os cálculos dos ensaios eletroquímicos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 1 - Composição química via norma(s) em peso (wt%) dos materiais utilizados.

Wt (%)	Carbono (C)	Cobre (Cu)	Cromo (Cr)	Níquel (Ni)	Ferro (Fe)	Manganês (Mn)	Outros
AISI 304	0,08	-	17,5 - 20,0	8,00 – 10,5	-	2,00	-
Cobre C12200	-	99,9	-	-	-	-	P 0,015 – 0,04 Pb máx. 0,05 Zn máx. 1,00
Cobre-Níquel (90/10) C70600	0,1	Bal.	-	9,0 – 11,0	1,0 – 1,8	1,00	

Fonte: Autor.

Tabela 2 - Propriedades Mecânicas e Geométricas dos materiais.

	Cobre	Cobre-Níquel (90/10)	Aço Inox 304
Peso Equivalente [g/mol]	32,77	31,5	25,12
Densidade [g/cm ³]	8,96	8,9	7,9
Tensão de Escoamento [Mpa]	45	110	205
Espessura de Parede [µm]	670	630	620
Raio Interno [mm]	2,6	2,55	2,5

Fonte: Autor.

As amostras utilizadas no trabalho apresentam o formato cilíndrico, com altura padronizada para 10 mm. As condições superficiais (rugosidade) foram deixadas intactas com a qualidade do fornecedor. Apenas um processo de ultrassom foi realizado após o corte das amostras visando a limpeza superficial pré ensaios eletroquímicos.

Uma das características deste trabalho foi avaliar o comportamento da corrosão frente a presença de frestas e/ou defeitos no revestimento. A classificação do revestimento foi dividida em 2 categorias: Pequeno (P) e Grande (G), com espessuras entre e [150 – 200] µm e [200 – 250] µm, respectivamente. No presente trabalho, apenas as amostras de cobre e cobre-níquel possuíam o revestimento Epóxi, sendo que as amostras de cobre-níquel apenas possuem o revestimento Pequeno (P).

Um grupo de amostras revestidas foi danificado propositalmente para avaliar o desempenho do filme frente à corrosão. O defeito (D) foi padronizado para uma inserção/risco linear feito por estilete no sentido longitudinal da amostra.

4.1. ENSAIOS ELETROQUÍMICOS

A análise da resistência e tendência à corrosão das amostras foi realizada por meio de ensaios eletroquímicos de polarização potenciodinâmica. Os ensaios eletroquímicos de corrosão foram realizados em um potenciostato da Metrohm, modelo PGSTAT 302, utilizando solução salina de 3,5%wt de NaCl como eletrólito e meio corrosivo. Os ensaios foram realizados em ambiente controlado com temperatura ambiente 22 – 25°C. Os ensaios e a célula eletroquímica foram adaptados da norma ASTM – G61 – 86 da American Society for Testing and Materials (2018). Para a leitura e aquisição dos dados, foi utilizado o potenciostato Metrohm PGSTAT 302N com o software Nova na versão 2.1.5.

A nomenclatura utilizada, número de amostras e suas condições/modificações para os Ensaios Eletroquímicos de PP e CA foram separados de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 - Nomenclatura das amostras utilizadas nos ensaios eletroquímicos.

Material	Nomenclatura	Nº Amostras (PP + CA)	Condições/Modificações
Cobre	Cobre	3 + 5	
Aço Inox 304	Inox	3 + 5	
Cobre-Níquel 90/10	CN	3 + 5	
Cobre Revestido	Cobre PD Cobre GD	4 + 7	PD = Revestimento Pequeno (150-200 µm) c/ Defeito GD = Revestimento Grande (200-250 µm) c/ Defeito
Cobre-Níquel 90/10 Revestido*	CN PD	3 + 4	PD = Revestimento Pequeno (150-200 µm) c/ Defeito

Fonte: Autor.

**As amostras de Cobre-Níquel (90/10) Revestido apenas possuem revestimento Pequeno (150-200 µm).*

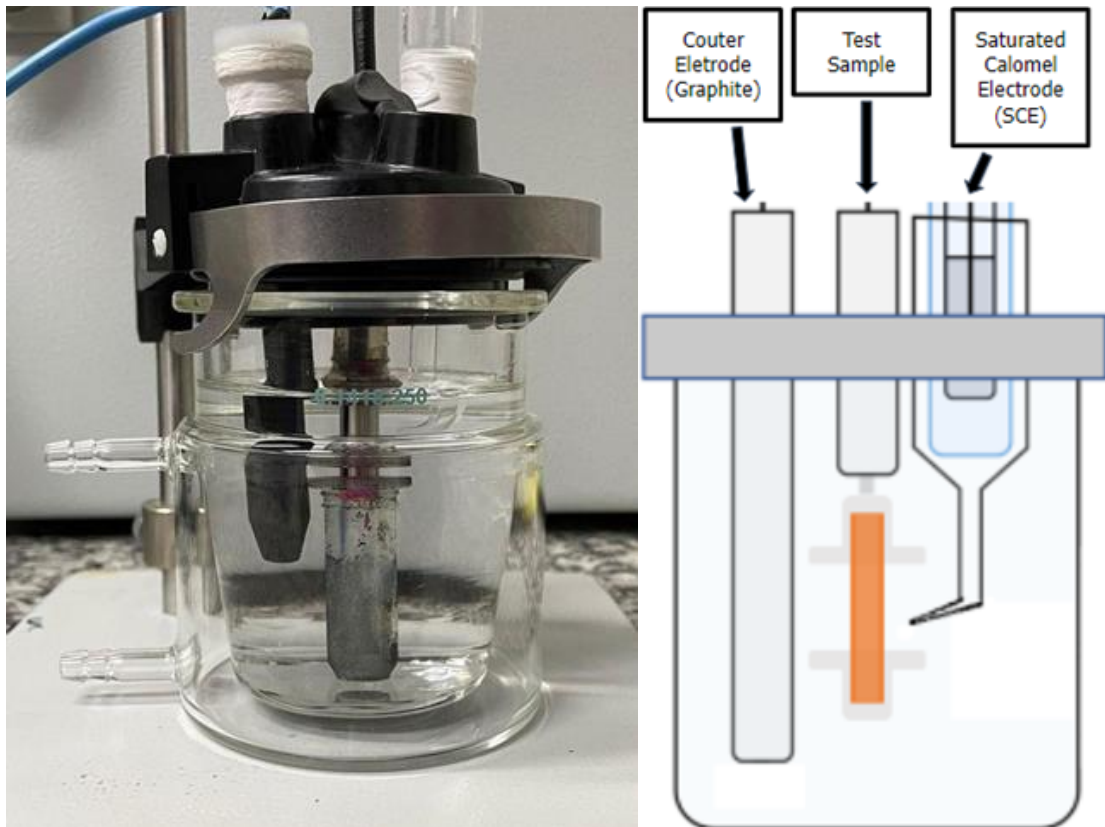
Para os ensaios de Polarização Potenciodinâmica foi obtido o Potencial de Circuito Aberto (V_{ocp}) após um período de 600s, e posteriormente realizado a varredura de potencial entre os valores $[-0,15 V_{ocp}, +0,5 V_{ocp}]$, com uma taxa de

varredura de 1 [mV/s]. Com a aplicação de potencial dentro deste intervalo, as regiões/curvas catódicas e anódicas são obtidas para cada material, assim como a verificação de regiões com comportamento ativo ou passivo frente à corrosão.

Para os ensaios de Cronoamperometria os valores de potenciais escolhidos para a avaliação da evolução da corrente com o tempo foram de $+0,2 V_{ocp}$ e $+0,5 V_{ocp}$. Estes valores foram selecionados após a obtenção das curvas de PP que forneciam informações das faixas de potenciais onde o material se comporta como mais ativo ou passivo, possibilitando assim simular as condições mais agressivas do meio. Os tempos de ensaios foram fixados em 7200 s, mas em alguns casos foram interrompidos previamente para evitar a degradação excessiva das amostras.

Para a realização dos ensaios eletroquímicos, a célula utilizada está indicada na Figura 9 a esquerda com seu desenho representativo a direita. Para os testes, foi utilizando um eletrodo saturado de calomelano como eletrodo de referência e um eletrodo de grafite como contra-eletrodo. Para a realização dos ensaios nas amostras sem revestimento, a área exposta com a solução de NaCl 3,5% wt foi padronizada para $2,041 \text{ cm}^2$.

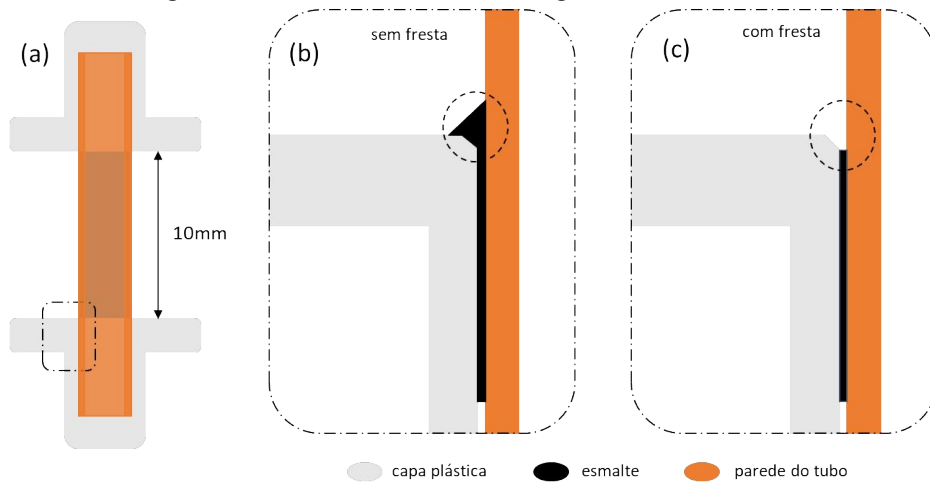
Figura 9 - Célula Eletroquímica e esquema representativo.



Fonte: Autor.

A presença ou não de frestas durante ensaios eletroquímicos foi induzida considerando os detalhes de montagem mostrados na Figura 10 - Detalhe de montagem das amostras. Nos casos onde a presença de frestas deveria ser evitada, um esmalte foi utilizado para garantir o isolamento da extremidade das amostras, na região do apoio da amostra com o suporte de capa plástica.

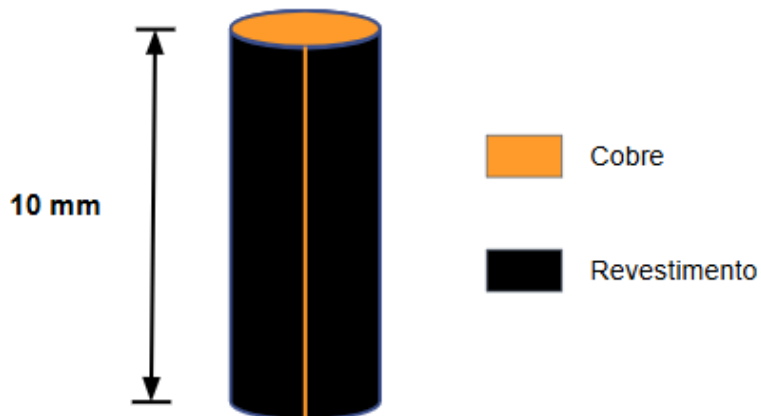
Figura 10 - Detalhe de montagem das amostras.



Fonte: Autor.

A inserção do defeito nas amostras revestidas foi feita com a realização de um risco linear no sentido longitudinal da amostra, como indicado na Figura 11. A área exposta do metal nessas condições foi estipulada com o auxílio do MEV, chegando a um valor aproximado de $0,01 \text{ cm}^2$.

Figura 11 - Detalhe do defeito linear nas amostras revestidas.



Fonte: Autor.

4.2. MICROSCOPIA ÓPTICA

A técnica de Microscopia Óptica foi utilizada para aquisição das medidas das espessuras de parede dos tubos pré e pós ensaios eletroquímicos e também para a avaliação da geometria/forma dos pites formados.

Para obtenção das micrografias, foi utilizado um microscópio Leica – DM 4000 M com câmera digital acoplada (Leica DC 300). O embutimento foi realizado à quente com resina baquelite e as amostras foram lixadas gradativamente com lixas d'água de granulometria #220 a #1200 mesh. A velocidade de lixamento foi definida como baixa (300 rpm) para não deformar ou modificar a estrutura/espessura dos tubos. Posteriormente as amostras foram polidas mecanicamente e de forma manual com Alumina 3 e 1 μm .

4.3. INTERFEROMETRIA ÓPTICA

As imagens obtidas e caracterização das superfícies foram analisadas por meio de um interferômetro de luz branca *Zygo NewView 7300 Optical Surface Profiler*. Os tratamentos dos dados e parâmetros topográficos foram analisados no software MountainsMap 7.4.9. A análise de Interferometria Óptica nos possibilita obter informações da superfície como rugosidade e mapas 3D ou 2D da região de interesse.

A técnica de Interferometria Óptica neste trabalho foi utilizada para obter informações da superfície das áreas que ficaram em contato com a solução durante os ensaios eletroquímicos. Podemos obter os valores da perda de espessura do material como também o formato/geometria e profundidade dos pites formados.

4.4. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

As caracterizações do processo de corrosão das superfícies em aumentos maiores foram realizadas com auxílio de microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo Tescan Vega3 com filamento de tungstênio. O microscópio permite aumentos de até 100.000 vezes que proporciona uma análise dos produtos de corrosão formados na superfície do material após os ensaios eletroquímicos, assim como a avaliação do defeito inserido nas amostras com revestimento Epóxi.

Com seu auxílio foi possível obter uma medida aproximada da área exposta a solução nas amostras com defeito no revestimento, chegando a um valor aproximado de $0,01 \text{ cm}^2$. Este valor foi utilizado posteriormente para os cálculos de E_{corr} e i_{corr} das amostras revestidas com defeito.

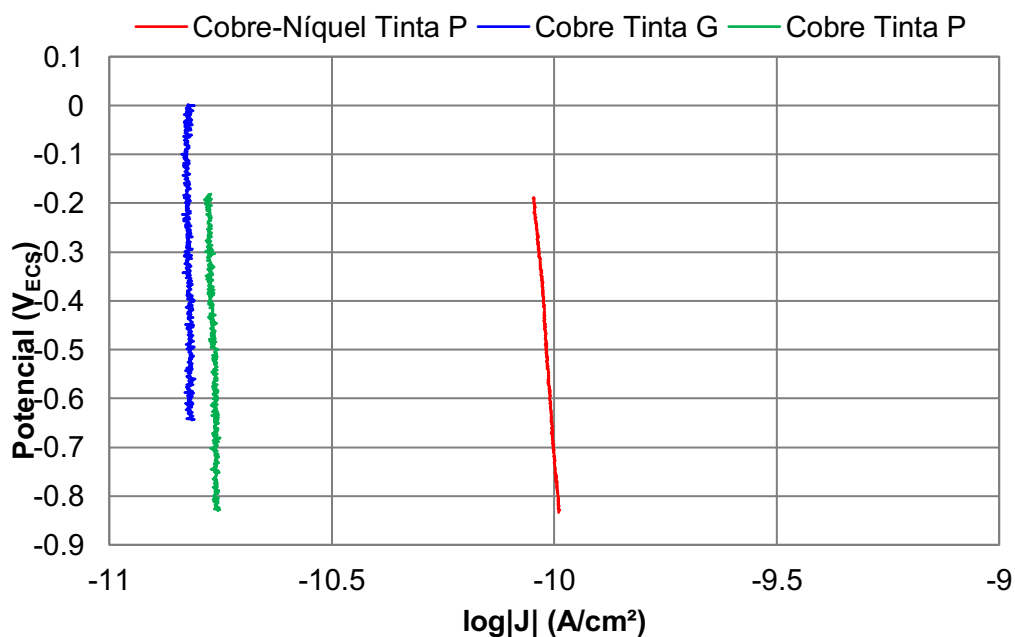
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos dos ensaios eletroquímicos correlacionando-os com o mecanismo e taxa de corrosão das respectivas ligas. O desenvolvimento do capítulo seguiu a ordem de primeiramente apresentar o comportamento das curvas de PP e mecanismo de corrosão dos materiais, para posteriormente entrar na discussão sobre taxa de corrosão e finalizar com a seleção dos critérios para a melhor aplicação dos materiais no ambiente agressivo – NaCl 3,5%.

5.1. POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA E MECANISMOS DE CORROSÃO

As curvas de Polarização Potenciodinâmica (PP) das amostras com revestimento, sem revestimento e com defeito no revestimento, obtidas em solução de NaCl a 3,5% wt, estão apresentadas nas Figura 12, Figura 13 e Figura 18, respectivamente. Inicialmente, foram realizadas as medidas de potencial de circuito aberto (OCP), seguidas pela aquisição das curvas de polarização para cada condição. Os valores correspondentes de OCP, potencial de corrosão (E_{corr}) e densidade de corrente de corrosão (j_{corr}) estão reunidos na Tabela 4

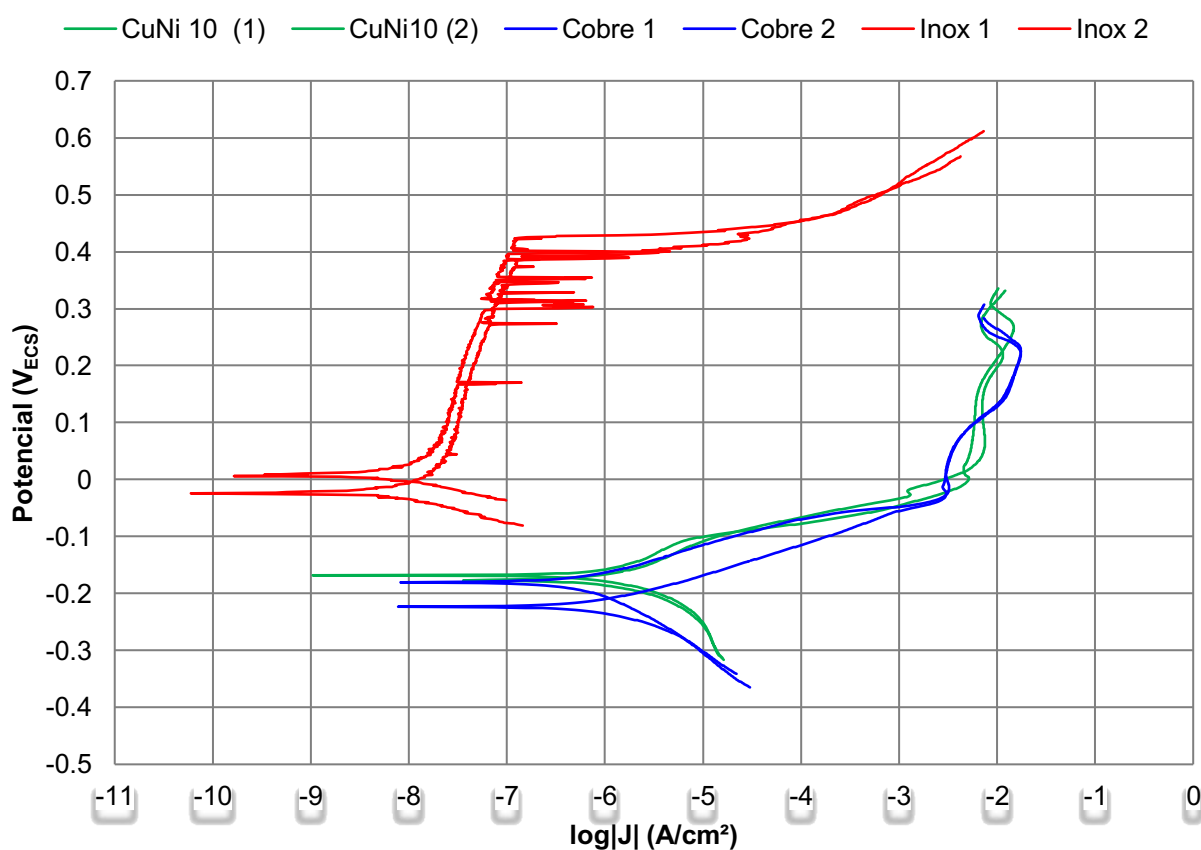
Figura 12 - Curvas de PP obtidas dos Materiais Com Revestimento.



Fonte: Autor.

A Figura 12 apresenta o comportamento das curvas de PP obtidas para os materiais revestidos, cobre com tinta P e G e cobre-níquel com tinta P. Nota-se que não houve polarização tendo em vista que o potenciostato não conseguiu medir qualquer corrente advinda da superfície da amostra. Esse comportamento indica que o processo de pintura foi eficaz em promover o isolamento elétrico da superfície metálica frente à solução de NaCl 3,5% wt, criando assim uma barreira à corrosão e reações eletroquímicas metal-meio agressivo.

Figura 13 - Curvas de PP obtidas dos Materiais Sem Revestimento.



Fonte: Autor.

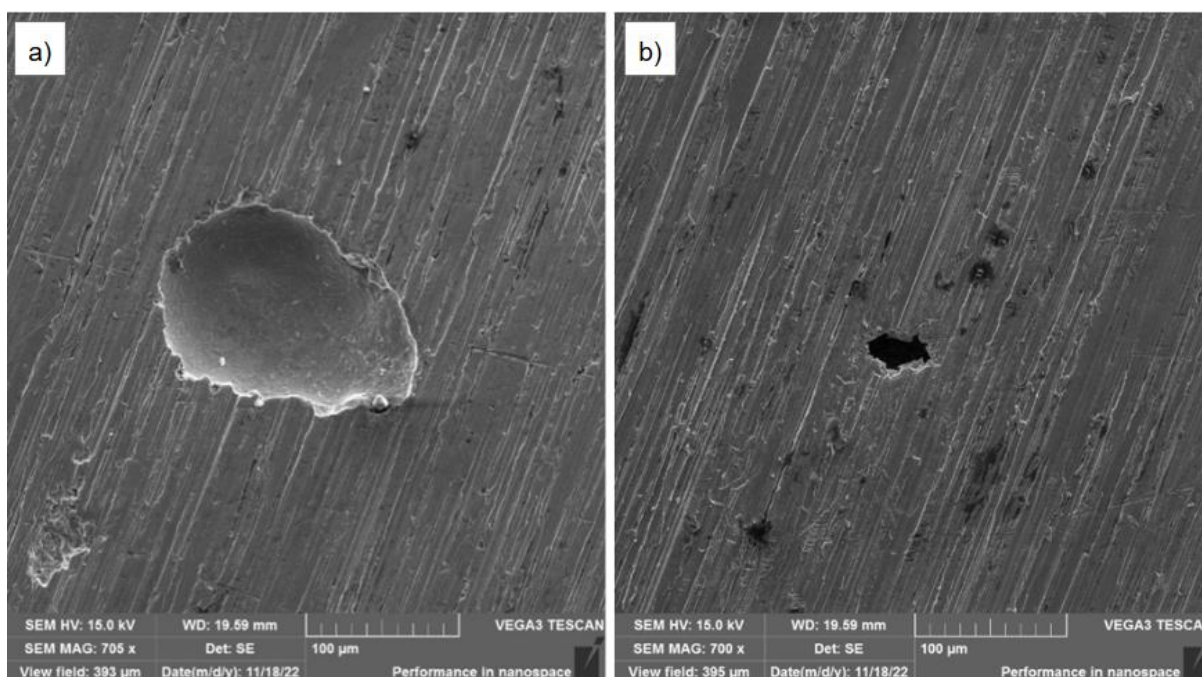
Para as amostras sem revestimento (Figura 13), podemos observar diferentes comportamentos das curvas em relação ao sobrepotencial aplicado. Para as amostras de aço inoxidável nota-se que o E_{corr} se encontra em potencial mais nobres (positivos) em relação as amostras de cobre e cobre-níquel,

demonstrando assim uma menor tendência termodinâmica ao início da corrosão.

Percebe-se também que no ramo anódico a corrente sofre pequenos incrementos com o aumento do potencial dentro do intervalo aproximado entre os valores [0 , + 0,4V_{ECS}], demonstrando assim o fenômeno de passivação destas ligas. Após atingir este valor de tensão ocorre um aumento abrupto da corrente, indicando que a camada passiva foi quebrada/danificada e o processo de corrosão por *pitting* ocorre de forma estável. Este fenômeno é característico de ligas que possuem o fenômeno de passivação e o valor de potencial onde ocorre a inversão da curva é denominado de Potencial de Breakdown (E_{bd}).

Após a realização dos ensaios de PP os pites puderam ser observados com o auxílio do MEV, sendo que diferentes formatos e razões largura/profundidade foram observados. Pites com grande (Figura 14 - a)) e pequena (Figura 14 - b)) razão largura/profundidade podem ser observados, respectivamente.

Figura 14 - Pites com grande e pequena razão largura/profundidade.

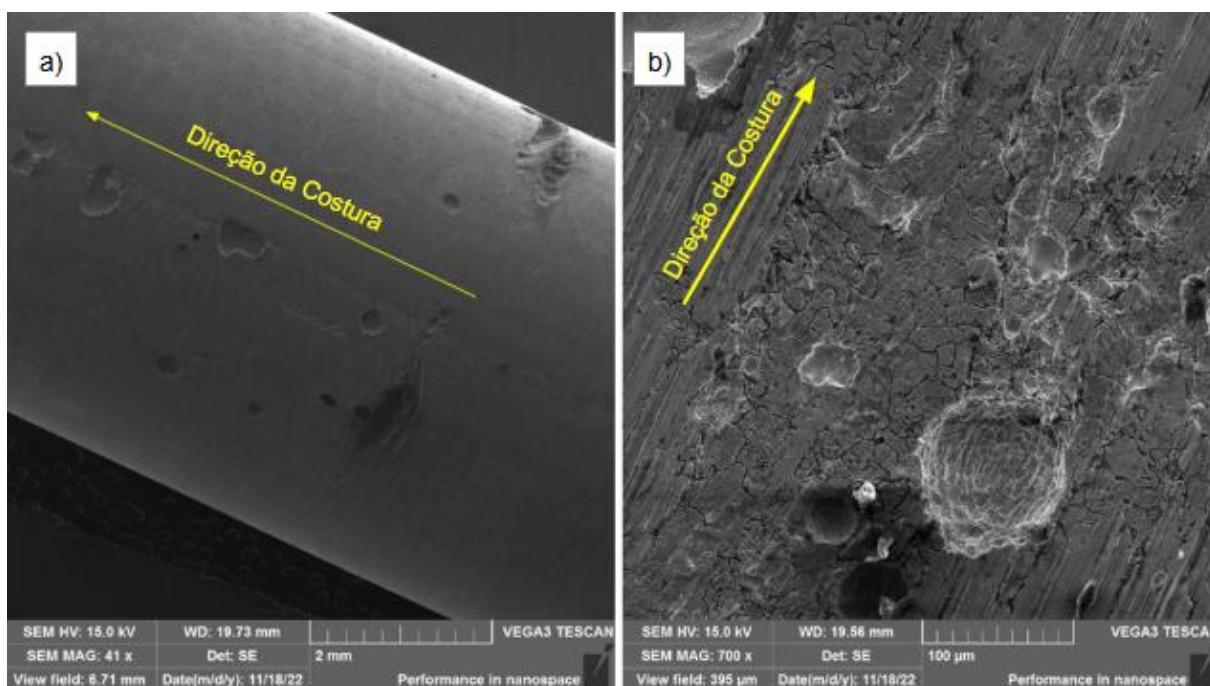


Fonte: Autor.

Durante as observações das amostras de Inox no MEV, uma atenção especial foi realizada na região da costura/soldagem dos tubos. Ligas das famílias 3XX e 4XX podem sofrer o fenômeno de sensitização nesta região, transformando-a em uma região mais ativa e susceptível ao processo de corrosão intergranular. A

Figura 15 mostra uma maior formação de pites ao longo da direção do passe de solda, assim como indícios de corrosão intergranular na mesma região.

Figura 15 – a) Pites na região da costura e b) corrosão intergranular.



Fonte: Autor.

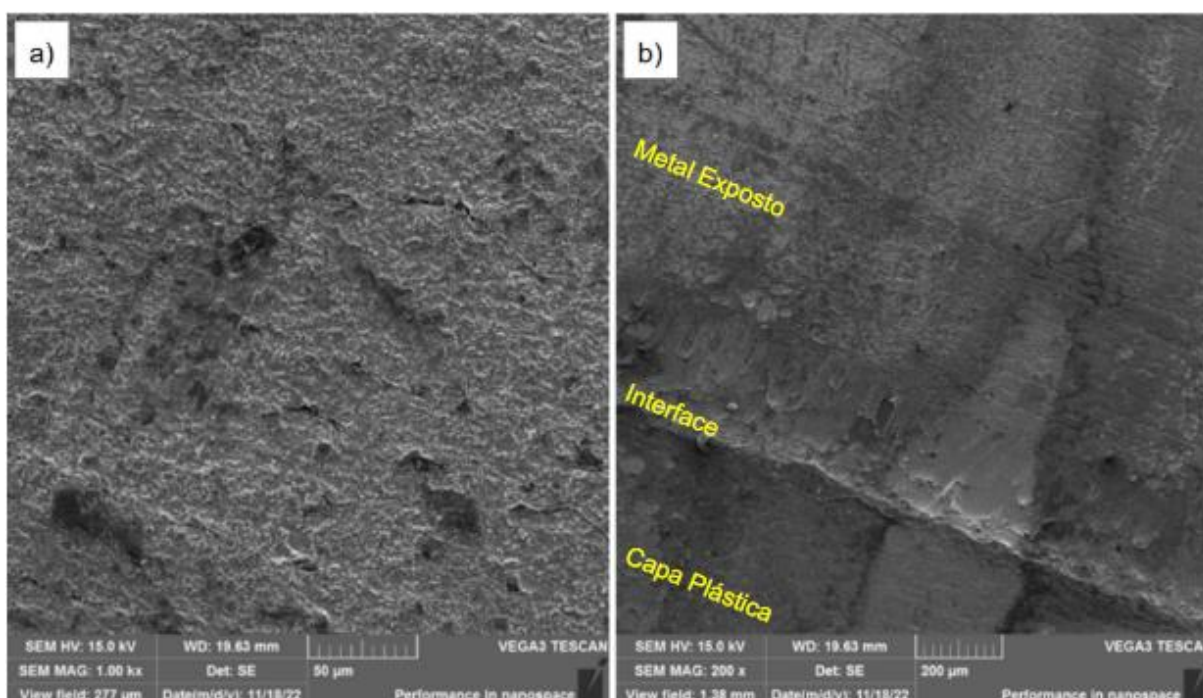
As amostras de cobre e cobre-níquel apresentaram um comportamento bastante similar em relação à corrosão, tanto no formato das curvas de PP quanto no mecanismo observado de corrosão uniforme/homogênea. Os valores de Potencial e corrente de corrosão (E_{corr} e i_{corr}) encontrados permaneceram na mesma faixa e ordem de grandeza como observado na Figura 13, mas as amostras de cobre-níquel apresentaram valores de E_{corr} relativamente mais nobres como indicado na Tabela 4 ao final deste tópico.

Nota-se que próximo do potencial 0 V ocorre uma mudança do comportamento da curva, similar àquela observada nos aços inoxidáveis, indicando a formação da camada de produtos óxidos na superfície. Esta camada não pode ser interpretada como uma camada passiva, já que não protege inteiramente a superfície do material e possibilita a corrosão em taxas mais elevadas (10^{-3} e 10^{-2} A/cm²).

Para o cobre, quando exposto em soluções aquosas aeradas, forma uma camada de óxido misto em sua superfície, geralmente composta de óxidos do tipo

CuCl/CuO₂. A estrutura cristalina formada por estes óxidos possui vacâncias e imperfeições, além de que pode ser classificada como semicondutora do tipo “p”, possibilitando o transporte de íons (Cl⁻) para regiões mais internas da superfície (EZUBER et. al). A Figura 16 mostra a superfície do cobre homogeneamente danificada e também a região da interface cobre-capla plástica, indicando uma perda de massa uniforme em toda a superfície.

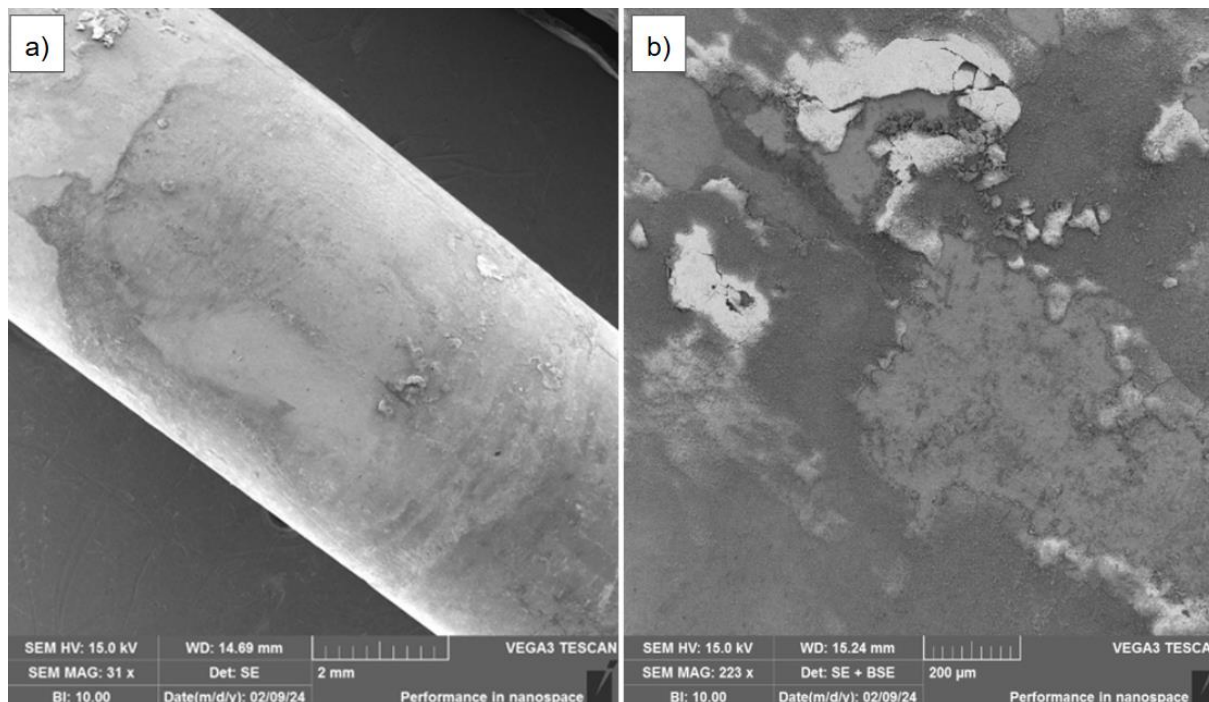
Figura 16 - a) Superfície do Cobre e b) interface Cobre-Capa plástica após ensaio de PP.



Fonte: Autor.

Para as amostras de cobre-níquel a formação de óxidos na superfície continua sendo majoritariamente composta por óxidos do tipo CuO₂, CuCl e Cu(OH)_x, sendo que a adição de Níquel na liga possibilita um aumento da resistência elétrica da camada de óxidos via efeitos eletrônicos (JIN, ZHANG et al). A superfície da amostra de cobre-níquel e a formação de alguns destes óxidos podem ser observados na Figura 17.

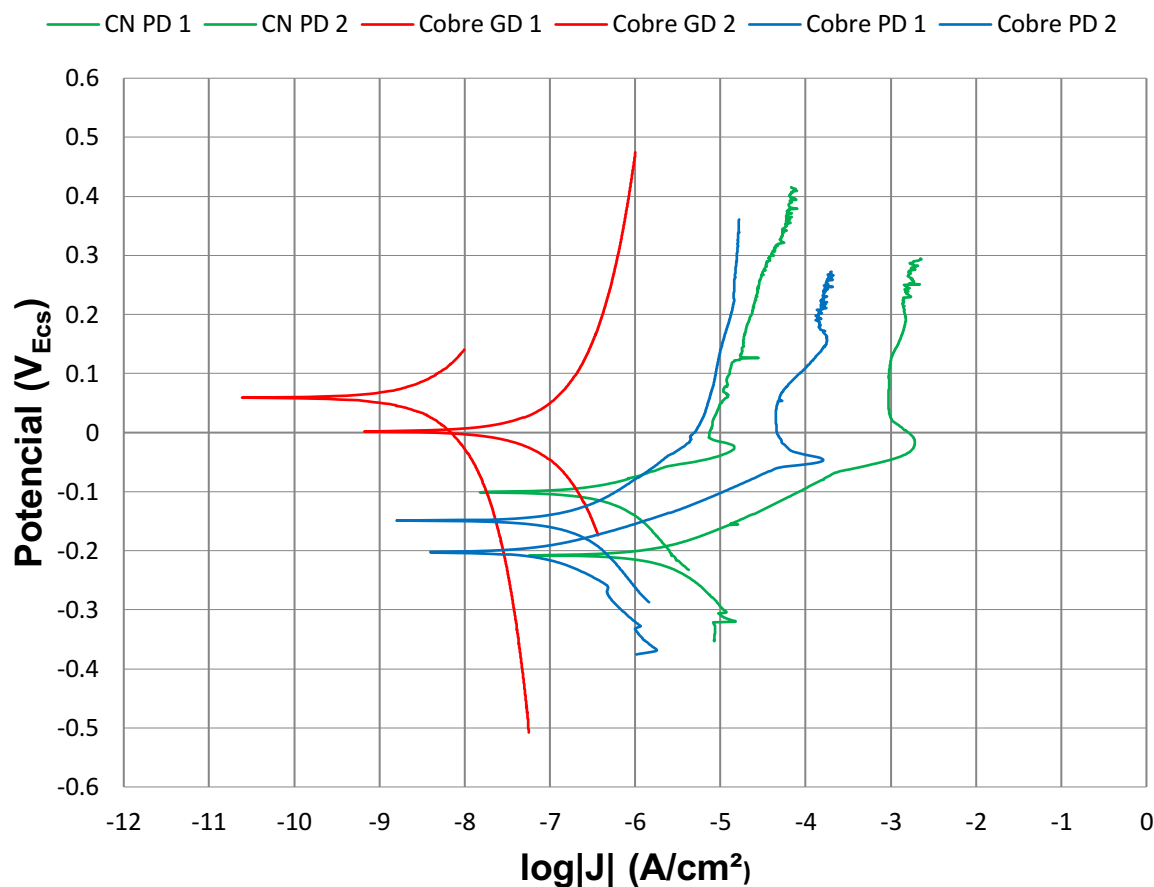
Figura 17: a) Superfície Cobre-Níquel e b) óxidos formados após ensaio de PP.



Fonte: Autor.

Na Figura 18 podemos observar as curvas de Polarização Potenciodinâmica dos materiais revestidos (cobre e cobre-níquel) com o defeito no revestimento. O comportamento dos dois materiais foi similar no sentido a não apresentar um fator intensificador de corrosão quando na presença de um defeito no revestimento. Dentre as três condições de Material - Espessura do Revestimento, as amostras de cobre com revestimento Grande (150 -200 µm) apresentaram desempenho superior, apresentando valores de E_{corr} mais nobres (positivos) e i_{corr} com valores relativamente menores.

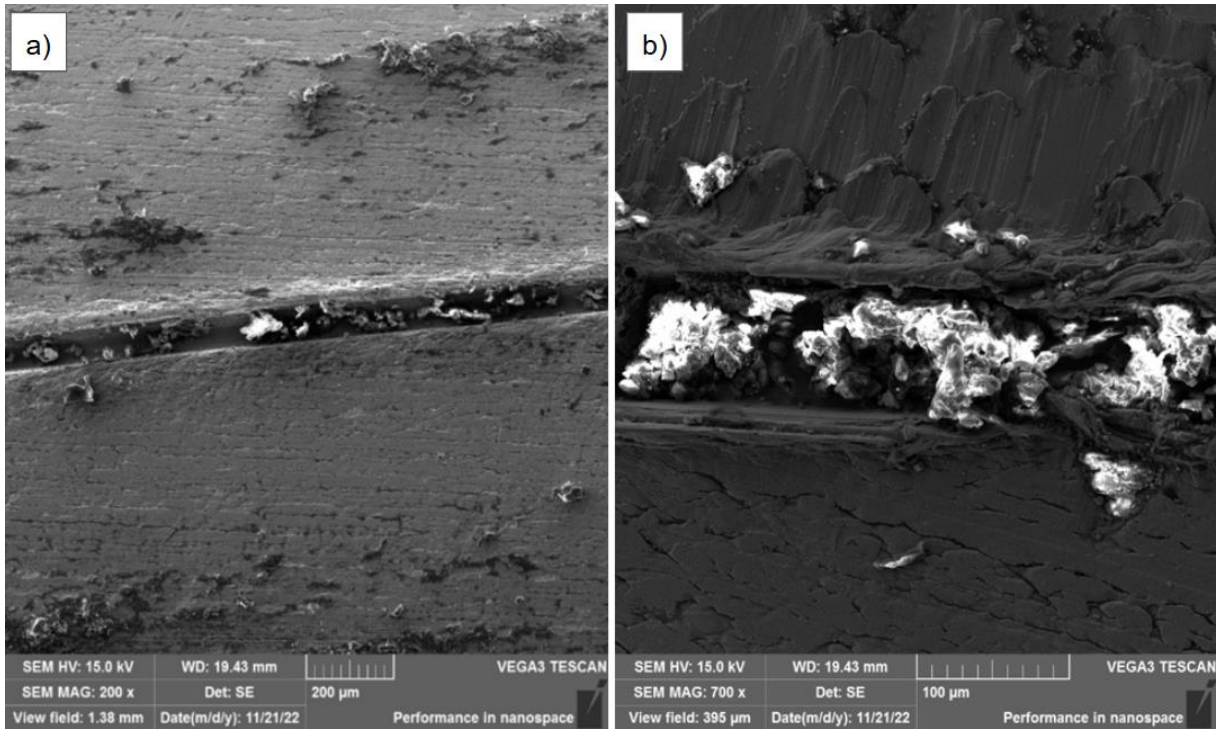
Figura 18 - Curvas de PP obtidas dos Materiais Revestidos com Defeito.



Fonte: Autor.

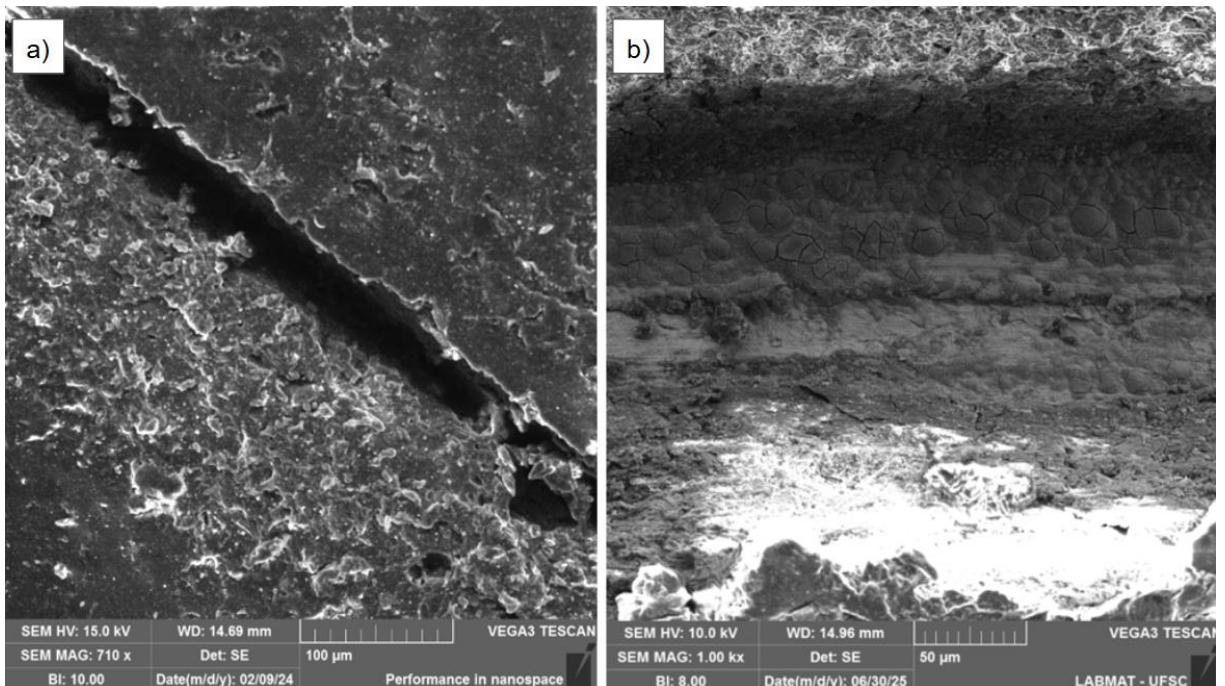
Com o auxílio do MEV foi possível observar a região do defeito após os ensaios eletroquímicos, verificando a possibilidade de formação dos produtos de corrosão no local e analisando a degradação ou não do revestimento. Tanto para as amostras de cobre com revestimento Grande/Pequeno quanto para a amostra de cobre-níquel com revestimento Pequeno apresentaram a formação de produtos de corrosão na região do defeito. As Figura 19 e Figura 20 abaixo mostram o acúmulo de produtos na região do defeito para as amostras de cobre com tinta P/G e cobre-níquel, respectivamente. Na Figura 21 temos uma ampliação maior da Figura 20 - b) fornecendo mais informações da morfologia da camada formada (produto de corrosão) na região do defeito da amostra de cobre-níquel.

Figura 19: Produtos de corrosão nas amostras a) Cobre PD e b) Cobre GD.



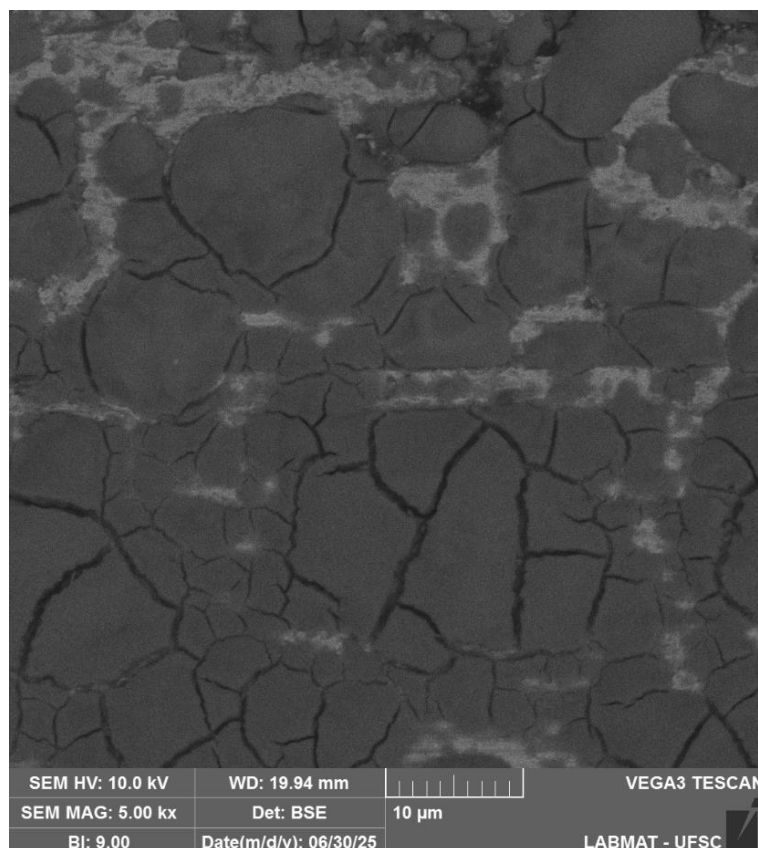
Fonte: Autor.

Figura 20 - Produtos de corrosão na região do defeito nas amostras CN PD.



Fonte: Autor.

Figura 21 - Morfologia da camada formada no defeito da amostra de CN PD.



Fonte: Autor.

Os produtos de corrosão formados nesta região podem funcionar como limitadores de corrosão, já que podem se acumular e formar partes maiores como apresentado nas amostras de cobre P/G (Figura 19), criando assim uma barreira entre a superfície metálica e o meio. Dependendo de fatores do sistema/ambiente como variações de temperatura, pH, aumento da concentração de íons agressivos, vibrações mecânicas, etc podem alterar a estabilidade e solubilidade destes produtos com o meio, facilitando assim sua saída e/ou dissolução para o meio.

Na Figura 21 podemos visualizar uma ampliação da Figura 20 - b) possibilitando uma melhor análise da região do “vale” do defeito. Pode-se observar que a morfologia do produto de corrosão se apresenta com formatos poligonais ou placas, mas que sob condições com íons Cl^- podem formar compostos hidratados como Atacamita ($\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$) ou Malachita ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$) que são frágeis e permeáveis (Kear 2004; Zhang 2016).

Como mostrado na Figura 18 com as curvas de PP, pode-se notar a diferença do comportamento a corrosão considerando as amostras de cobre mudando apenas a espessura do revestimento, indicando que espessuras maiores (200 - 250 μ m) conseguem inibir/controlar mais facilmente à corrosão se em comparação com espessuras menores (150 – 200 μ m). A interação e permanência destes produtos de corrosão na região do defeito com o meio externo pode indicar uma correlação entre espessura do revestimento e permanência dos produtos no local do defeito.

Tabela 4 - Valores de OCP, i_{corr} e E_{corr} obtidos dos Ensaio Eletroquímicos de PP.

Material	OCP (V)	E_{corr}, Obs(V)	j_{corr} (A/cm²)
Cobre	-0,217 ± 0,01	-0,201 ± 0,02	8,60E-07
CN	-0,167 ± 0,00	-0,172 ± 0,00	5,35E-06
Inox	0,082 ± 0,03	-0,007 ± 0,02	1,90E-08
Cobre PD	-0,183 ± 0,06	-0,175 ± 0,03	2,35E-07
Cobre GD	-0,192 ± 0,23	0,030 ± 0,04	2,91E-07
CN PD	-0,145 ± 0,08	-0,154 ± 0,07	1,69E-06

Fonte: Autor.

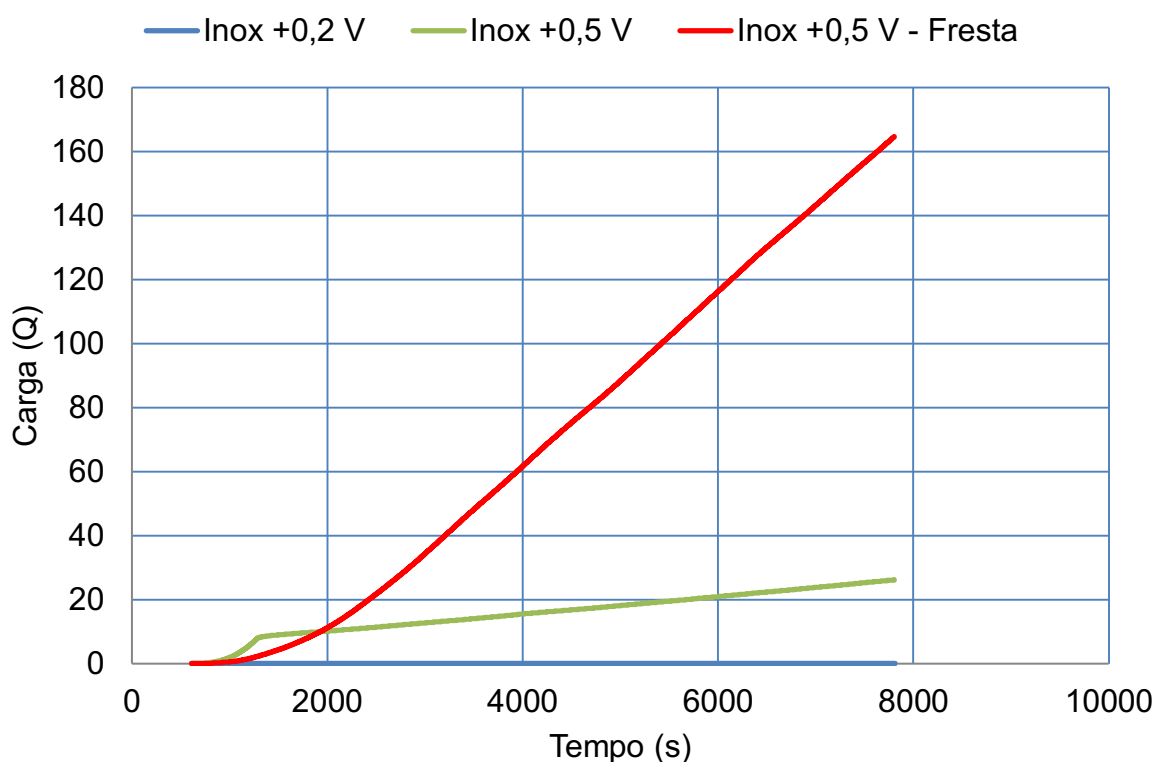
5.2. TAXA DE CORROSÃO

Os resultados dos ensaios de cronoamperometria (CA) realizados em solução de NaCl 3,5%, nas condições de +0,2 V_{ocp} e +0,5 V_{ocp} , estão apresentados nas Figuras 22, 26, 27, 28 e 29. As Figura 22, Figura 26 e Figura 27 referem-se aos materiais não revestidos: Aço Inoxidável, cobre e cobre-níquel, respectivamente. Já as Figura 28 e Figura 29 mostram os resultados obtidos para os materiais revestidos com defeito: cobre P/G e cobre-níquel P.

Os gráficos de cronoamperometria aqui apresentados já estão plotados na condição Carga (C) por tempo (s), ou seja, a partir das curvas geradas de Corrente (A) por tempo (s), utilizou-se a ferramenta dentro do software Nova 2.1 de “Integração das curvas $i \times t$ ”, obtendo assim a quantidade de carga total envolvida nas reações eletroquímicas de cada amostra/condição.

A Tabela 5 ao final do capítulo apresenta as principais condições e informações obtidas dos ensaios de cronoamperometria, além dos valores calculados de profundidade de ataque teóricos (Equação 3). Os valores teóricos de profundidade do ataque foram comparados com as medidas reais obtidas via Interferometria Óptica e Microscopia Óptica da seção transversal dos tubos.

Figura 22 - Curvas de cronoamperometria do aço inoxidável.

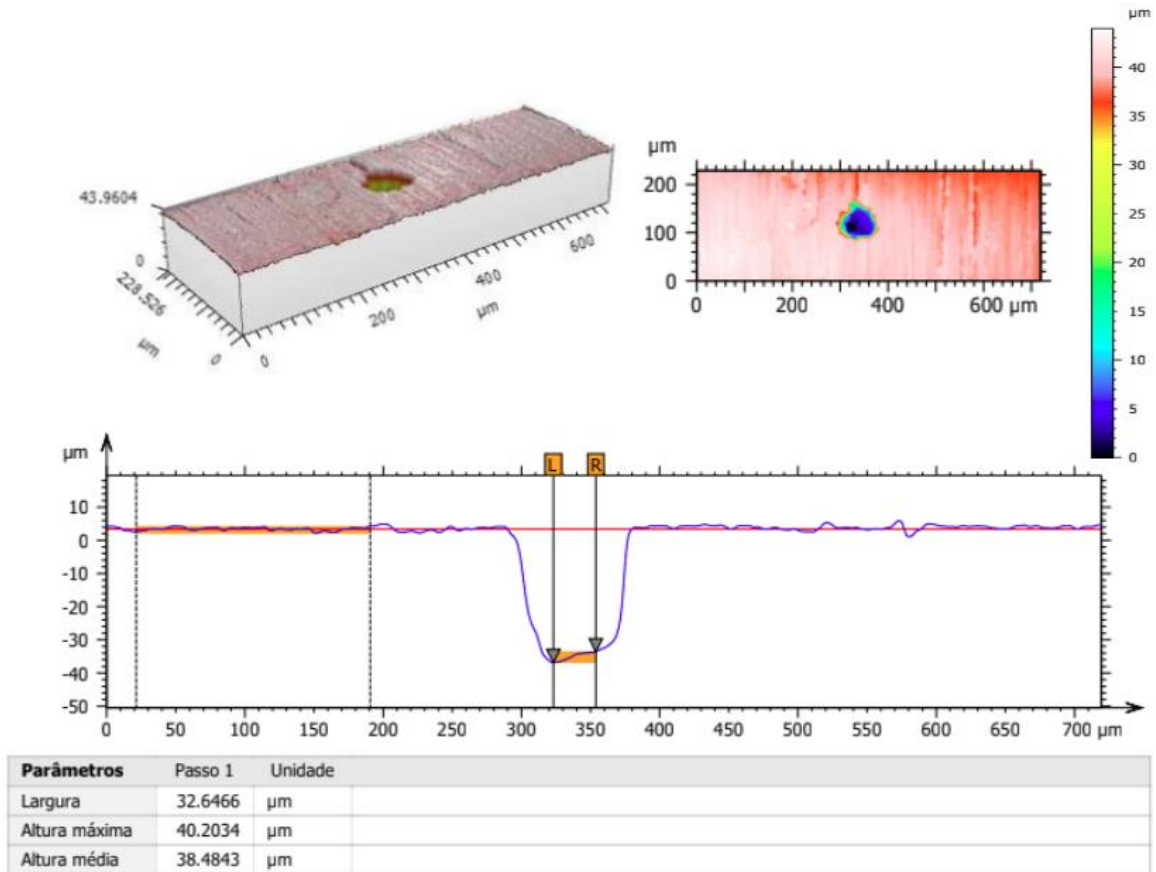


Fonte: Autor.

Todas as amostras apresentaram o comportamento esperado de aumentar a taxa de corrosão com o incremento da tensão aplicada, com um crescimento aproximadamente linear. Para o aço inoxidável (Figura 22), podemos observar que na condição de $+0,2 V_{ocp}$ o material se encontra no estado passivo (ver Figura 13), apresentando assim corrente com valores bem baixos.

Na condição de $+0,5 V_{ocp}$ é esperado a formação de pites, já que o potencial aplicado ultrapassa o valor de *Potencial de Breakdown* (E_{bd}). Um pite encontrado na superfície do Aço Inox após o ensaio de CA $+0,5 V_{ocp}$ pode ser visualizado na Figura 23 abaixo, obtida via Interferometria Óptica.

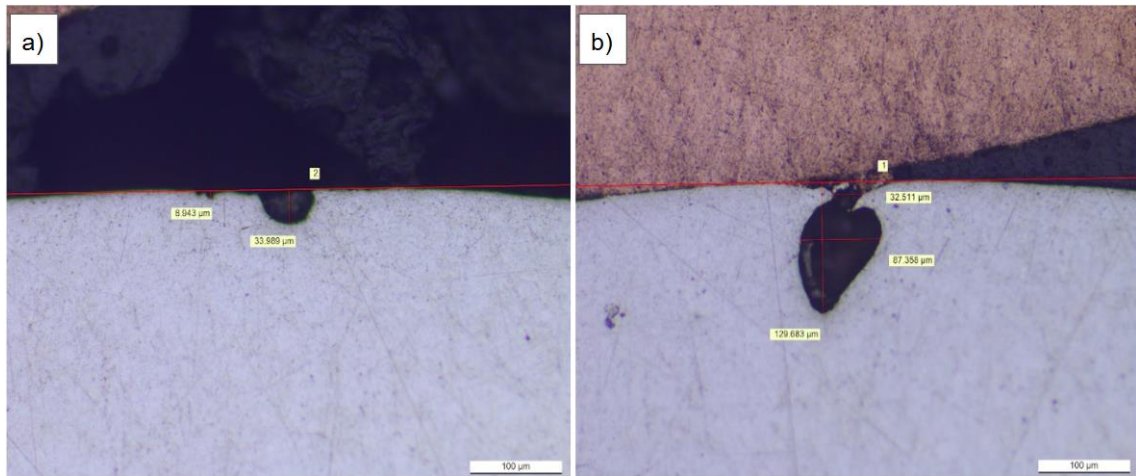
Figura 23 - Pite formado na superfície do Aço Inox após CA $+0,5 V_{ocp}$.



Fonte: Autor.

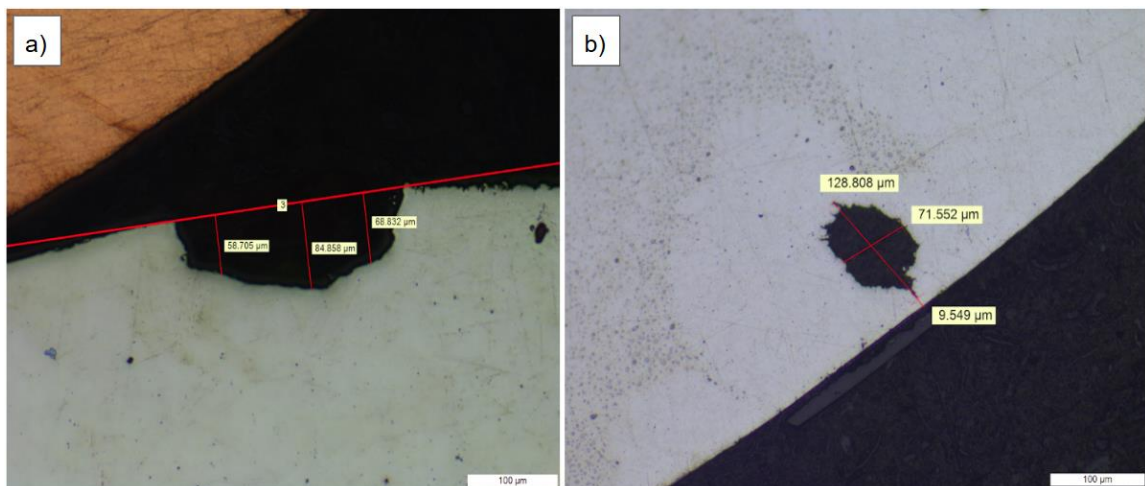
A profundidade dos pites foi calculada utilizando a Equação 3, que como dito anteriormente utiliza a área total exposta durante o ensaio. No caso do aço inoxidável, que sofre o fenômeno de corrosão localizada – *pitting*, este valor foi aproximado para 10% de $2,041 \text{ cm}^2$, definido após a análise e comparações com os cálculos de profundidade calculados e profundidade medidas. Alguns pites com diferentes profundidades e geometrias foram observados também por Microscopia Óptica como mostrados nas Figura 24 e Figura 25 abaixo.

Figura 24 - a) Pite com formato mais "circular" e b) mais "cônico".



Fonte: Autor.

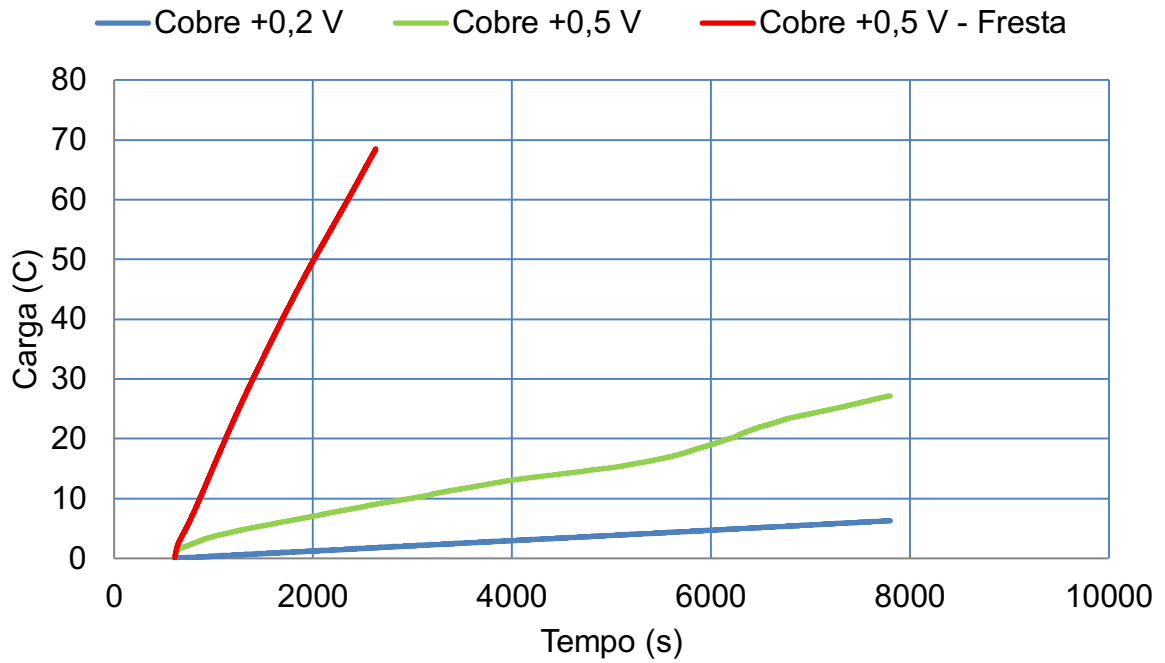
Figura 25 - Pite com a) perfil mais horizontal e b) perfil mais vertical.



Fonte: Autor.

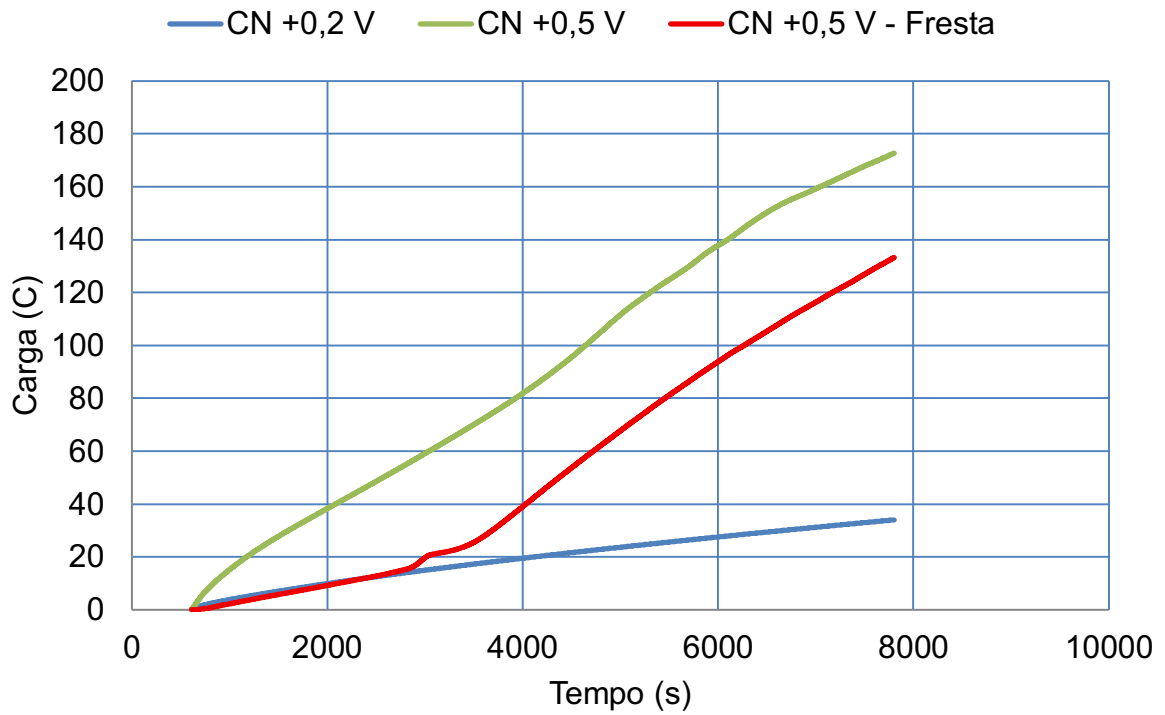
O crescimento e diferentes formatos dos pites estão correlacionados com as interações localizadas entre o filme passivo e os ânions agressivos de Cl^- , sendo que pequenas variações do meio podem levar a formatos completamente diferentes.

Figura 26 - Curvas de cronoamperometria do cobre.



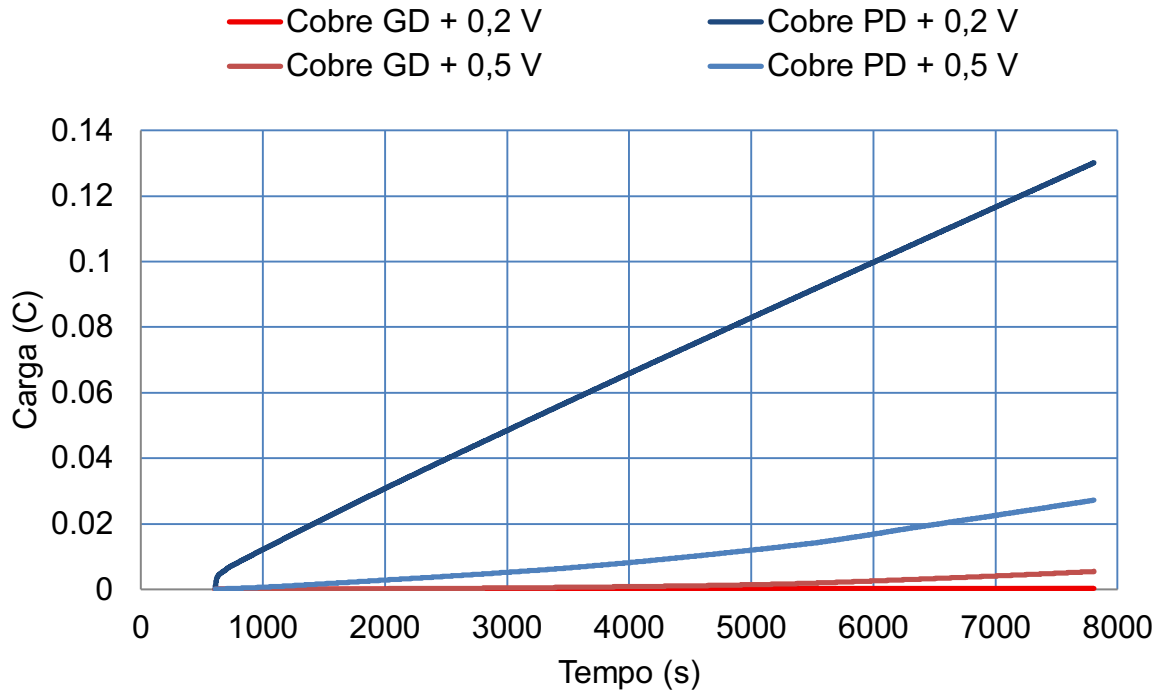
Fonte: Autor.

Figura 27 - Curvas de cronoamperometria do cobre-níquel.



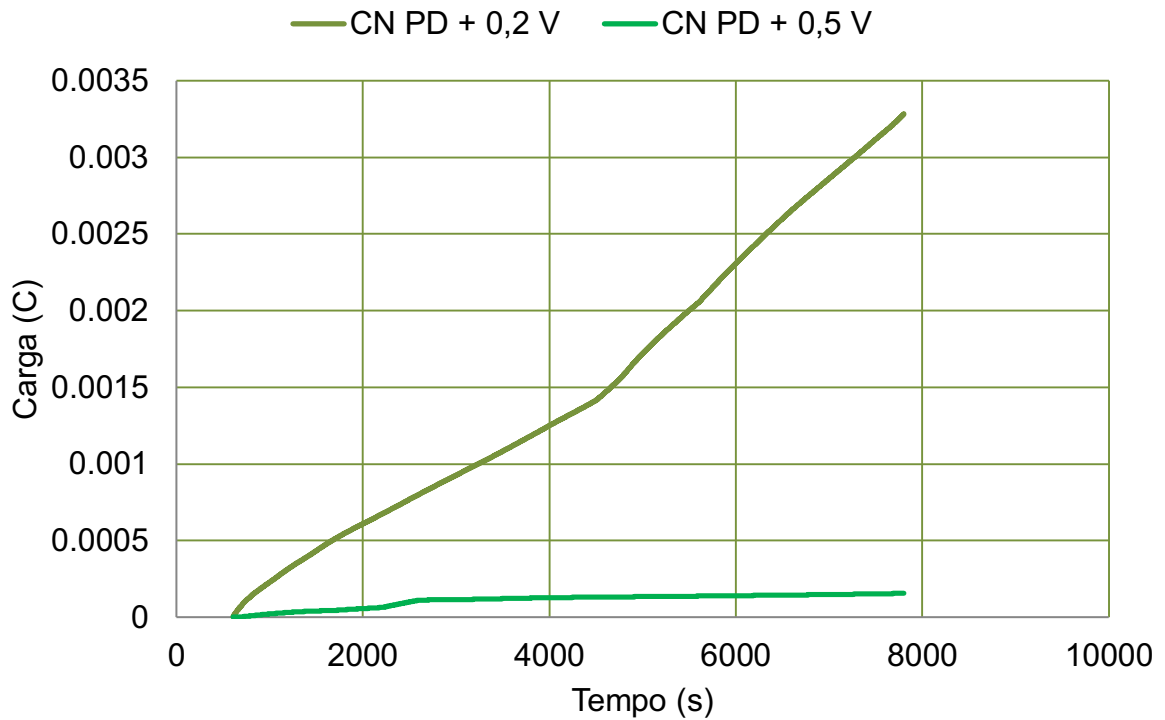
Fonte: Autor.

Figura 28 - Curvas de cronoamperometria para cobre PD e GD.



Fonte: Autor.

Figura 29 - Curvas de cronoamperometria para cobre-níquel PD.



Fonte: Autor.

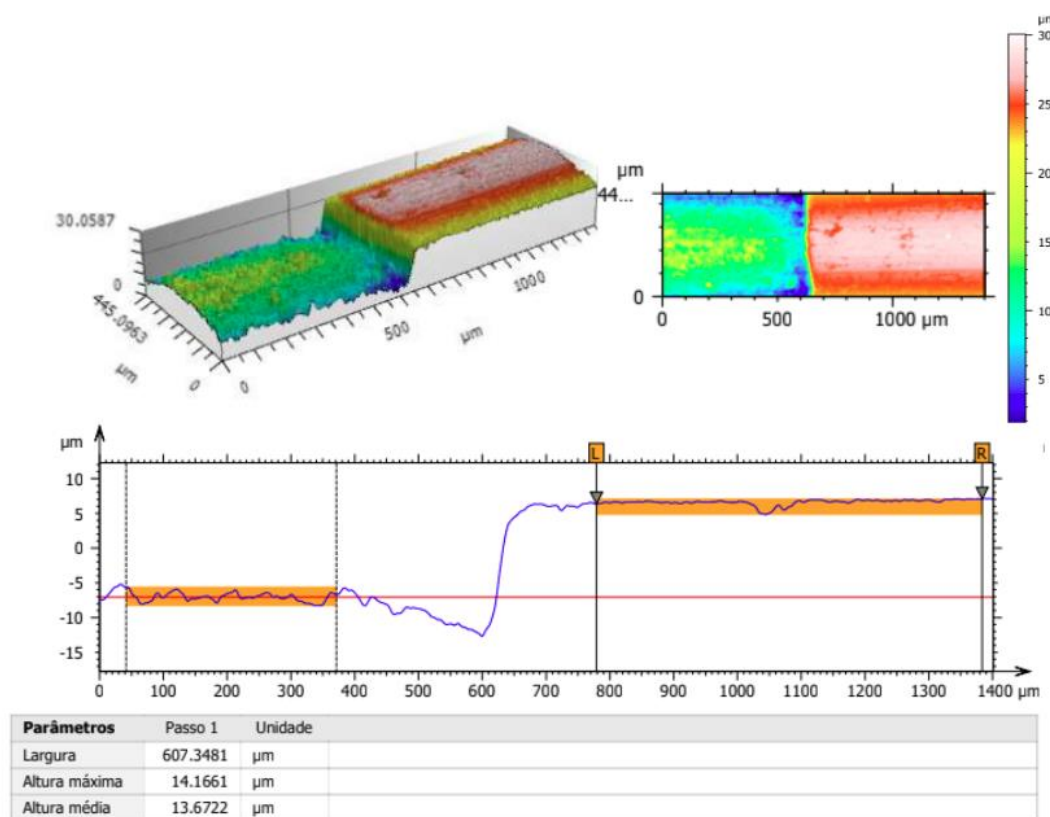
As amostras de cobre e cobre-níquel apresentaram comportamento e desempenho bastante similares nas duas condições de severidade, demonstrando um comportamento aproximadamente linear de carga em função do tempo. Em relação as amostras que foram montadas com a presença de frestas (Figura 10), as amostras de cobre-níquel se mostraram menos susceptíveis à corrosão por frestas em comparação com as amostras de cobre.

As duas ligas apresentam também o comportamento similar de não inibir totalmente a corrosão quando na presença de um defeito na pintura/revestimento, demonstrando que os produtos de corrosão formados não geram efeito protetivo capaz de inibir completamente a corrosão. Deve-se reforçar que o defeito induzido neste trabalho foi “agudo” e que, provavelmente, o efeito de proteção parcial dos óxidos/produtos de corrosão é maior.

Tendo em vista que cobre e cobre-níquel nas condições ensaiadas apresentaram o comportamento de corrosão uniforme, a área considerada para o cálculo da perda de espessura foi considerada sendo toda a superfície cilíndrica do tubo - 2,041 cm². Considerando a quantidade de carga obtida pela integração das curvas obtidas via CA, os valores de perda de espessura encontrando nas amostras foi de [1 – 7] µm e [12 – 30] µm para as condições sem e com frestas, respectivamente.

Com o auxílio do Interferômetro foi possível analisar as amostras de cobre e aço inoxidável após os ensaios de polarização e cronoamperometria, dando foco para a região/interface entre a superfície metálica expostas a solução e a capa plástica de proteção (ver Figura 10). Foi possível observar a perda de espessura de maneira uniforme, se mostrando como uma forma de “degrau” na amostra. Na Figura 30 está mostrado um exemplo do mapa desta região da interface da amostra de cobre após ensaio de CA na condição de potencial + 0,5 V_{ocp}.

Figura 30 - Interface Metal - Capa Plástica na amostra de cobre (sem fresta) após CA + 0,5 V_{ocp}.



Fonte: Autor.

A Tabela 5 e Tabela 6 abaixo apresentam os dados adquiridos de taxa de corrosão para os materiais/condições obtidos via ensaios de Cronoamperometria e Polarização Potenciostática. A Tabela 5 mostra os dados compilados adquiridos dos ensaios de CA, como carga elétrica e profundidades de ataque teórico e calculados. Já a Tabela 6 apresenta as taxas de corrosão, em micrometros por ano, obtidos via coordenadas de E_{corr} e j_{corr} advindos dos ensaios de PP (Tafel). Os valores encontrados podem ser comparados com a literatura como mostrado na Tabela 7 que classificam os diferentes intervalos de corrosão.

Reforça-se que os valores de taxa de corrosão mostrados na Tabela 6 consideram um processo eletroquímico (corrosão) ocorrendo de forma contínua e ininterrupto, e que muito provavelmente com as condições em aplicação real estas taxas podem se mostrar muito superiores. Mudanças como salinidade do meio, temperatura, pH, efeito de frestas podem levar a mecanismos de corrosão localizada e ocasionar a perfuração/falha pré-matura das tubulações.

Tabela 5 - Dados compilados de CA e profundidades calculadas/medidas.

Material	Área Efetiva (cm²)	Tensão Ap. (V_{ocp})	Carga (C)	J média (A/cm²)	Efeito Fresta	Prof. Calc. (µm)	Prof. Medida (µm)
Cobre	2,041	+0,2	6,31	4,30E-04	Não	1,17	3,4
Cobre	2,041	+0,5	1170	8,00E-02	Sim	218	69,7
CN	2,041	+0,2	34,18	2,33E-03	Não	6,14	-
CN	2,041	+0,5	172,75	1,18E-02	Sim	31	-
Inox	0,2	+0,5	26,19	1,80E-02	Não	43,16	40
Inox	0,2	+0,5	164,77	1,10E-01	Sim	271,5	Máx. 250
Cobre PD	0,01	+0,2	0,13	1,80E-03	-	4,93	-
Cobre PD	0,01	+0,5	0,025	3,90E-04	-	1,06	-
Cobre GD	0,01	+0,2	0,0003	4,20E-06	-	0,01	-
Cobre GD	0,01	+0,5	0,0035	4,90E-05	-	0,13	-
CN PD	0,01	+0,2	0,0032	4,50E-05	-	0,12	-
CN PD	0,01	+0,5	0,00015	2,08E-06	-	0,01	-

Fonte: Autor.

Tabela 6 - Taxas de Corrosão para os materiais/condições.

Material/Condição	E_{corr} (V)	J_{corr} (A/cm²)	Taxa de Corrosão (µm/ano)
Cobre	-0,201 ± 0,02	8,60E-07	10,29
CN	-0,172 ± 0,00	5,35E-06	61,92
Inox	-0,007 ± 0,02	1,90E-08	0,2
Cobre PD	-0,175 ± 0,03	2,35E-07	2,81
Cobre GD	0,030 ± 0,04	2,91E-07	3,48
CN PD	-0,154 ± 0,07	1,69E-06	19,55

Fonte: Autor.

Tabela 7 - Resistência Relativa à Corrosão de Metais.

Resistência Relativa à Corrosão	[µm/ano]
Extraordinário	< 25
Excelente	25 - 100
Bom	100 - 500
Razoável	500 - 1000
Pobre	1000 - 5000
Inaceitável	>5000

Fonte: FONTANA, M.

5.3. CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DOS MATERIAIS

Neste capítulo são apresentados os principais dados adquiridos dos ensaios eletroquímicos (cinética e mecanismos) e a correlação com critérios de seleção pré-estabelecidos como essenciais na aplicação destes materiais em tubulações

pressurizadas em ambientes salinos. Nestas aplicações em ambientes mais agressivos considera-se que o principal é ter um controle da corrosão, garantindo o funcionamento integral dos componentes (tubos) por toda vida útil estipulada pelo projeto.

1. Estimativa simplificada da vida útil;
2. Forma e mecanismo de ataque;
3. Desempenho do revestimento protetor;
4. Custo + Manutenção;

Para cada critério comentado neste capítulo, uma tabela com a pontuação cada material/condição foi gerado. A Tabela 8 indica o sistema de pontuação adotado:

Tabela 8 - Sistema de Pontuação.

Pontuação	Desempenho relacionado ao critério
1	Péssimo
2	Ruim
3	Moderado/aceitável
4	Bom
5	Excelente

Fonte: Autor.

O primeiro critério foi pensado em fornecer informação simplificada e direta da estimativa da vida útil de cada tubulação. A estimativa da vida útil pode ser compreendida como o tempo de operação em que a tubulação irá operar de forma segura até atingir o limite mínimo de espessura de parede. As espessuras mínimas de parede são fornecidas pela norma Equação 4 (ASME B31G) e a vida útil aproximada para cada material/condição pode ser calculado utilizando a Equação 5. As taxas de corrosão (*corrosion rate*) consideradas para os cálculos vieram dos valores fornecidos pela Equação 4. A Tabela 9 abaixo fornece os valores aproximados de vida útil para cada material (tubo) considerando suas espessuras mínimas e sobre espessura.

Tabela 9 - Vida útil aproximada do tubo para cada material/condição.

Material / Condição	Espessura Real [mm]	Espessura Mínima [mm]	Sobre Espessura [mm]	Taxa de Corrosão [mm/ano]	Vida Útil Estimada [anos]
Cobre	0,670	0,460	0,210	0,01029	20,04
CuNi	0,630	0,170	0,460	0,06192	7,38
Inox	0,620	0,090	0,530	0,00020	2637,23
Cobre PD	0,670	0,460	0,210	0,00281	73,37
Cobre GD	0,670	0,460	0,210	0,00348	59,24
CN PD	0,630	0,170	0,460	0,01955	23,38

Fonte: Autor.

Alguns pontos devem ser reforçados após a apresentação dos valores na tabela 8. A taxa de corrosão para cada material foi obtida considerando a Equação 4, que utiliza a coordenada de E_{corr} (implicitamente) e j_{corr} (diretamente) para os cálculos. Deve-se lembrar que esta equação considera que os processos de corrosão estão acontecendo de forma contínua, ininterrupta e que o sistema eletroquímico é precisamente controlado (pH, Temperatura, etc). Dito isso, deve-se interpretar como uma comparação de perda de espessura para cada material considerando as condições ensaiadas. Fenômenos como passivação e efeitos de polarização por concentração podem alterar as taxas de corrosão de acordo com as condições do sistema eletroquímico.

Para as amostras de cobre e cobre-níquel observa-se que as taxas de corrosão (ordem de grandeza) se encontram compatíveis com a literatura (KEAR et al., 2004), apresentando valores entre 10 e 60 $\mu\text{m}/\text{ano}$. Em relação as condições com frestas, as amostras de cobre-níquel se mostraram menos susceptíveis a aumento da corrente se em comparação com as de cobre. Nota-se também que devido a maior resistência mecânica da liga de Cu-Ni 90/10, esta possibilita uma maior perda de espessura pela corrosão antes de atingir sua espessura mínima de trabalho se em comparação com a liga de cobre.

Para o aço inoxidável pode-se perceber um valor muito elevado da estimativa simplificada da vida útil apresentado na Tabela 8. Este fato pode ser explicado relembrando que a taxa de corrosão estimada para cada material (Equação 4) considera as coordenadas de E_{corr} e j_{corr} decorrentes da extrapolação

de tafel (ensaios de PP). Como apresentado na Figura 13, podemos perceber que o aço inoxidável 304 encontra-se passivado, e por isso apresentando valores de j_{corr} muito baixos se em comparação com o cobre e Cu-Ni. Deve-se interpretar então, que para condições moderadas, o aço inoxidável na condição passivada apresenta taxa de corrosão (perda de espessura) muito baixa e alta resistência à corrosão uniforme.

A Tabela 10 abaixo apresenta uma pontuação dos materiais em relação ao primeiro critério de vida útil aproximada do tubo considerando a taxa de corrosão correspondente a Equação 4.

Tabela 10 - Pontuação em relação a vida útil aproximada de cada material/condição.

Material	Pontuação
Cobre	5
CN	5
Inox	5 (condição passivada) 1 (condição agressiva/frestas)
Cobre PD	5
Cobre GD	5
CN PD	4

Fonte: Autor.

O segundo critério de forma e mecanismo de ataque foi pensado considerando em ir além dos valores simplificados de taxa de corrosão e vida útil das tubulações. Em sistemas e aplicações reais de engenharia, o sistema eletroquímico pode, com grande probabilidade, sair do equilíbrio devido a diversos fatores como presença de frestas, mecanismos de corrosão localizada, efeitos de passivação e etc.

Para as ligas de cobre e cobre-níquel, ambos apresentaram o ataque de maneira uniforme/homogênea nas condições moderadas e agressivas. As diferenças entre os valores de taxa de corrosão podem estar correlacionadas a capacidade protetiva dos produtos óxidos formados na superfície de cada liga.

Para o aço inoxidável este comportamento não foi observado já que nas condições mais agressivas de cronoamperometria (+0,5 V_{ocp} sem/com frestas) as

amostras apresentaram o fenômeno de corrosão localizada (*pitting*). Algumas amostras observadas por microscopia óptica apresentaram pites com profundidades de até 250 μm após os ensaios de CA + 0,5 V_{ocp} , se aproximando de 50% de consumo da sobre espessura do tubo. Para as condições com frestas, as amostras de aço inoxidável apresentaram aumentos na taxa de corrosão entre 10 e 100 vezes se em comparação com as condições sem frestas. Estas observações e comportamento do aço inoxidável se mostram totalmente desvantajosas quando lembrado que a aplicação final é em tubulações pressurizadas em meios salinos (agressivos).

A Tabela 11 abaixo apresenta uma pontuação dos materiais em relação ao mecanismo de ataque, sendo perda de massa/espessura do tubo de maneira uniforme ou localizada. Considerando a aplicação em tubulações pressurizadas é de imediato a preferência de corrosão por perda de massa uniforme ao invés de localizada (pites).

Tabela 11 - Pontuação em relação ao mecanismo/forma de ataque dos materiais/condições.

Material	Pontuação
Cobre	4
CN	5
Inox	1
Cobre PD	-
Cobre GD	-
CN PD	-

Fonte: Autor .

O terceiro critério se diz respeito ao desempenho do revestimento polimérico nas amostras revestidas. Tanto para os ensaios de polarização potenciodinâmica quanto para os ensaios de cronoamperometria as amostras de cobre e cobre-níquel revestidas apresentaram comportamento similar de criar uma barreira frente à corrosão. Esta barreira, como já citada nos tópicos anteriores, se refere aos produtos de corrosão formados na superfície de cada liga. Óxidos de cobre e níquel interagem com íons cloreto da solução formando uma camada mista que em muitos

casos formam compostos hidratados que são frágeis e permeáveis (ver figuras 19, 20 e 21). A Tabela 12 abaixo apresenta a pontuação das amostras revestidas nas condições ensaiadas.

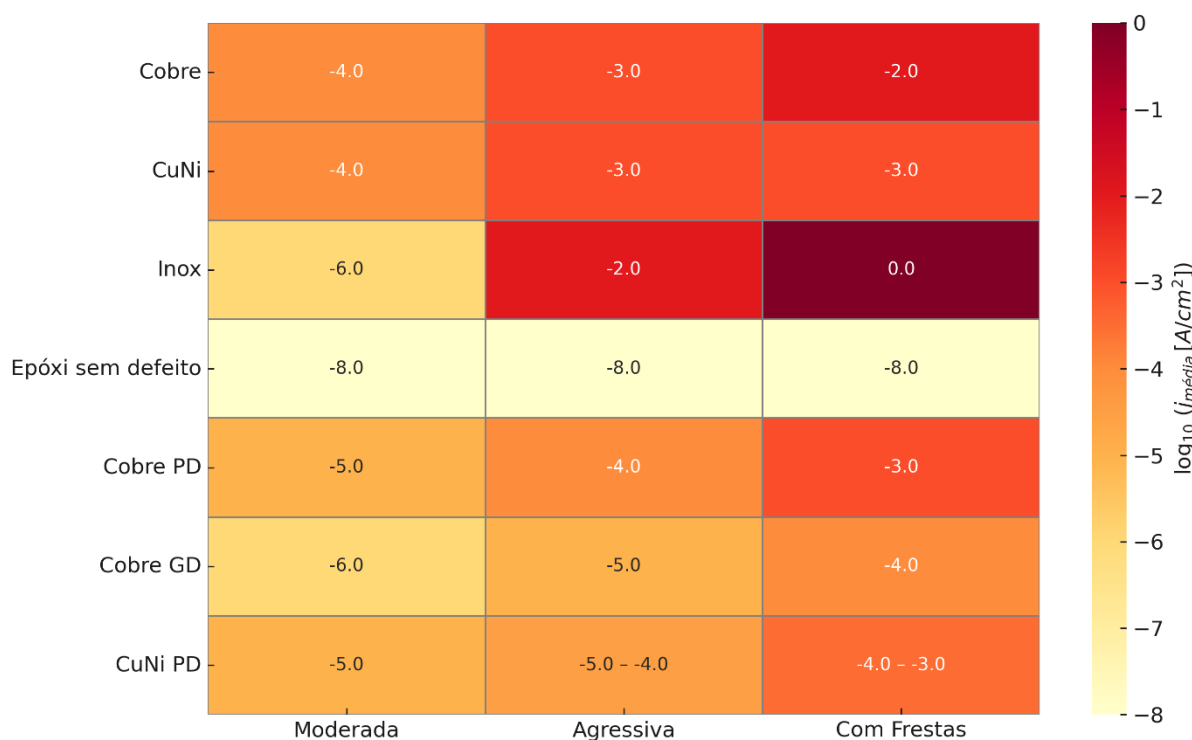
Tabela 12 - Pontuação do desempenho dos revestimentos nas condições ensaiadas.

Material	Pontuação
Cobre	-
CN	-
Inox	-
Cobre PD	3
Cobre GD	4
CN PD	5

Fonte: Autor..

Após a obtenção dos valores de $j_{\text{média}}$ e quantidade de carga nos ensaios de cronoamperometria nas condições de $+0,2 V_{\text{ocp}}$ e $+0,5 V_{\text{ocp}}$, foi possível montar um “Mapa” para melhor visualização dos valores de taxa de corrosão em função da agressividade do meio. Este mapa representa em conjunto das informações e interpretações discutidas nos critérios de seleção 1, 2 e 3 e que representam o desempenho de cada material com/sem revestimento. O mapa pode ser visualizado na Figura 31 abaixo onde os valores apresentados representam a ordem de grandeza da taxa de corrosão ($\text{Log } j_{\text{média}} [\text{A}/\text{cm}^2]$) desenvolvida nos ensaios de cronoamperometria, possibilitando assim maior facilidade de comparação entre os materiais. Os retângulos mais escuros indicam as combinações do material/ambiente que fornecem taxas de corrosão mais elevadas, e analogamente as regiões mais claras indicam as combinações que fornecem taxas de corrosão mais baixas. Em relação as condições moderada e agressiva, foram consideradas os ensaios de CA nas condições $+0,2 V_{\text{ocp}}$ e $+0,5 V_{\text{ocp}}$, respectivamente.

Figura 31 - Taxa de corrosão em função da agressividade do meio.



Fonte: Autor.

O último critério de custos e manutenção foi desenvolvido de maneira simples: correlacionar o custo da matéria prima e processos de fabricação atrelados a custos ao longo da vida útil de operação, como inspeções, reparos ou até substituições.

Entre os materiais estudados, os aços inoxidáveis austeníticos combinam excelentes propriedades mecânicas e de resistência à corrosão-erosão quando submetidos a condições moderadas. As ligas de cobre e principalmente as ligas 90/10 e 70/30 por possuírem excelentes propriedades de resistência à corrosão, corrosão sob tensão e corrosão-erosão são amplamente aplicadas na fabricação de tubos para sistemas mecânicos de condensadores e trocadores de calor. Em contrapartida e a depender do mercado atual seus custos são relativamente mais altos se em comparação com os aços inoxidáveis (HODGKIESS, 2016 ; MALIK, 1993). Em relação a questão de custos e manutenção, os aços inoxidáveis são relativamente bem mais baratos que as ligas de cobre devido sua grande escala de produção e ao processo de reciclagem/fabricação a partir de sucatas. O custo aproximado do inox 304 nas cotações atuais fica em torno de US \$ 0,33-0,40/lb enquanto para as ligas de cobre e cobre níquel 90/10 este valor passa para US \$

4,8 – 5,8/lb e 10 – 12/lb, respectivamente (SMICOPPER, TECTRONMX, ISCRAPP).

Em relação a aplicação do revestimento polimérico, as tintas epóxi e suas variações oferecem excelente resistência à corrosão e aumento da vida útil com um bom fator custo-benefício. Seu custo pode variar entre US \$ 50 – 150, considerando suas variações entre forma/misturas e também da geometria do tubo/superfície (ACE AVANT, XTREME POLISHING, SYSTEMS). Mesmo que se considere o maior valor, o impacto total sobre o custo total da tubulação fica em torno de 5 – 10%.

Considerando o desempenho de cada material/condição frente as condições estudadas e seus custos de fabricação aproximados com o valor de mercado, Tabela 13 abaixo apresenta a pontuação resultante considerando o equilíbrio entre custo + manutenção.

Tabela 13 - Pontuação para Custos + Manutenção de cada material/condição.

Material/condição	Custo inicial	Manutenção	Pontuação
Cobre	Médio	Baixo	5
CN	Alto	Baixo	4
Inox	Baixo	Alta	3
Cobre PD	Médio	Baixo	4
Cobre GD	Médio	Baixo	4
CN PD	Alto	Baixo	4

Fonte: Autor.

Após os comentários e observações feitas acima considerando o compilado de informações coletadas via ensaios eletroquímicos e técnicas de caracterização de materiais, uma tabela final de pontuação foi construída com finalidade de fornecer o ranqueamento dos materiais e condições de revestimento. A Tabela 14 indica a pontuação final considerando os critérios 1, 2, 3 e 4 discutidos neste capítulo.

Tabela 14 - Pontuação final em relação aos critérios estabelecidos.

Material	Vida Útil	Mecanismo de Ataque	Desempenho do Revestimento	Custo + Manutenção	Pontuação Final
Cobre	5	4	-	5	14
Cobre-Níquel	5	5	-	4	14
Inox	1	1	-	3	5
Cobre PD	5	-	3	4	12
Cobre GD	5	-	4	4	13
CN PD	4	-	5	4	13

Fonte: Autor.

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos durante o desenvolvimento trabalho possibilitaram um melhor entendimento do comportamento das ligas e seus revestimentos frente a diferentes fatores considerando sua aplicação em tubulações pressurizadas em ambientes salinos. Os ensaios eletroquímicos realizados com adaptações para tentar simular as condições com frestas e defeitos no revestimento se mostraram satisfatórios em proporcionar resultados coerentes com a literatura.

Entre os materiais sem revestimento, as ligas de cobre e cobre-níquel se mostraram com melhores desempenhos, apresentando corrosão uniforme e menores valores de densidade de corrente (j_{corr}). Por outro lado, o aço inoxidável apresentou suscetibilidade à corrosão localizada – pites, com profundidades até 250 μm quando submetidos nas condições mais agressivas dos ensaios de cronoamperometria. Nas condições com frestas, as ligas de cobre e cobre-níquel apresentaram aumentos de taxa de corrosão em até 10 vezes, enquanto para o Inox os valores ficaram entre 10 e 100 vezes.

Entre as amostras revestidas, observou-se que o revestimento híbrido epóxi-poliéster apresentou excelente desempenho frente à corrosão, mesmo na presença de defeitos pontuais/agudos. Dentre as amostras analisadas com defeito no revestimento, cobre GD e cobre-níquel PD apresentaram menor acúmulo de carga nas condições moderadas e agressivas, quando comparadas ao cobre PD. A formação de produtos de corrosão insolúveis e camadas parcialmente passivas reforça o efeito protetivo dos produtos óxidos, mas que não inibem completamente a corrosão e seu avanço. Ressalta-se, no entanto, que para defeitos mais amplos este efeito protetivo pode não se manter ou ocorrer. Vale ressaltar também que a geometria do defeito (incisão) pode variar de uma amostra para outra e com isso alterar localmente os valores de E_{corr} e j_{corr} obtidos para cada amostra.

Considerando todas as condições avaliadas no trabalho, as ligas de cobre com revestimento grande e cobre-níquel com revestimento pequeno e se mostram mais indicadas para aplicações em tubulações pressurizadas em ambientes agressivos. As ligas de cobre-níquel possuem combinação de sobre espessura, estabilidade da corrosão uniforme mesmo em situações agressivas e maior resistência à corrosão por frestas, resultando uma combinação ideal de fatores. Considerando que o “salto” da diferença de preço entre as ligas de cobre é

significativamente menor do que entre as ligas de aços inoxidáveis, a opção mais segura diante de possíveis problemas de montagem/geometria dos tubos seriam as ligas de cobre-níquel revestidas, por apresentarem maior resistência a corrosão por frestas e formarem produtos de corrosão menos solúveis, quando comparadas ao cobre eletrolítico.

REFERÊNCIAS

JONES, D. A. Principles and prevention of corrosion. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996. 592 p.

FONTANA, M. G. **Corrosion engineering**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1987. 768 p.

GEMELLI, E. **Corrosão: introdução e avaliação**. Joinville: Livro-corrosão, 2024. 567 p. Disponível em: <https://livro-corrosao.vercel.app/>. Acesso em: 18 jul. 2025.

BARD, A. J.; FAULKNER, L. R. **Electrochemical methods: fundamentals and applications**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2001. 850 p.

POPOV, B. N. **Basics of corrosion measurements**. In: POPOV, B. N. *Corrosion engineering*. Amsterdam: Elsevier, 2015. p. 181-237.

FAZENDA, J. M. R. **Tintas e vernizes: ciência e tecnologia**. 2. ed. São Paulo: ABRAFATI, 1995. 1 280 p.

ABRAHAM, G. J.; KAIN, V.; DEY, G. K. **MIC failure of cupronickel condenser tube in fresh water application**. *Engineering Failure Analysis*, v. 16, n. 3, p. 934-943, abr. 2009. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2008.08.007.

COSTA, R. C. *et al.* **Avaliação da resistência à corrosão de revestimentos metálicos depositados por aspensão térmica a arco: uma aplicação em trocadores de calor**. *Soldagem & Inspeção*, v. 19, n. 4, p. 292-301, dez. 2014. DOI: 10.1590/0104-9224/si1904.02.

EZUBER, H. M.; SHATER, A. A. **Influence of environmental parameters on the corrosion behavior of 90/10 cupronickel tubes in 3.5 % NaCl**. *Desalination and Water Treatment*, v. 57, n. 15, p. 6670-6679, mar. 2016. DOI:

10.1080/19443994.2015.1024743.

FRAZÃO, I.; MAGNABOSCO, R.; DELBLANC, A. **Comparison between stainless steels and nickel alloys through pitting corrosion resistance electrochemical tests.** *Materials Research*, v. 24, n. 4, p. 110-118, 2021. DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2020-0386.

FREEMAN, J. R.; TRACY, A. W. **Comparative corrosion resistance of some copper alloy condenser tubes.** *Corrosion*, v. 5, n. 8, p. 245-248, ago. 1949. DOI: 10.5006/0010-9312-5.8.245.

GALLETTO, E.; GASPARINI, R. **The contribution of metallography to the study of some corrosion phenomena observed in copper alloy condenser tubes.** *La Metallurgia Italiana*, v. 8, n. 4, p. 16-23, jun. 1969.

GERHARDUS, K. *et al.* **International measures of prevention, application and economics of corrosion technologies study.** Houston: NACE International, 2016.

JIN, T. *et al.* **Surface characterization and corrosion behavior of 90/10 copper-nickel alloy in marine environment.** *Materials*, v. 12, n. 11, p. 1869, 10 jun. 2019. DOI: 10.3390/ma12111869.

KEAR, G.; BARKER, B. D.; WALSH, F. C. **Electrochemical corrosion of unalloyed copper in chloride media – a critical review.** *Corrosion Science*, v. 46, n. 1, p. 109-135, jan. 2004. DOI: 10.1016/S0010-938X(02)00257-3.

KEAR, G. *et al.* **Electrochemical corrosion behaviour of 90–10 Cu–Ni alloy in chloride-based electrolytes.** *Journal of Applied Electrochemistry*, v. 34, p. 659-669, jul. 2004.

KLASSERT, A.; TIKANA, L. **Copper and copper–nickel alloys – an overview.** In: CORROSION BEHAVIOUR AND PROTECTION OF COPPER AND ALUMINIUM ALLOYS IN SEAWATER. p. 47-61, 2007.

MA, A. L.; JIANG, S. L.; ZHENG, Y. G.; KE, W. **Corrosion product film formed on the 90/10 copper–nickel tube in natural seawater: composition/structure and formation mechanism.** *Corrosion Science*, v. 91, p. 245-261, fev. 2015. DOI: 10.1016/j.corsci.2014.11.028.

MANSFELD, F. *et al.* **The corrosion behavior of copper alloys, stainless steels and titanium in seawater.** *Corrosion Science*, v. 36, n. 12, p. 2063-2095, dez. 1994. DOI: 10.1016/0010-938X(94)90008-6.

BAIRD, G.M. (2011), **The Epidemic of Corrosion, Part 1: Examining Pipe Life.** Journal - American Water Works Association, 103: 14-21. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2011.tb11574.xBaird>

MARTIN, P. M. **Surface preparation for film and coating deposition processes.** In: MARTIN, P. M. *Handbook of deposition technologies for films and coatings.* Oxford: Elsevier, 2010. p. 93-134.

PORTAL MET@LICA. **Tubulações industriais.** Disponível em: <https://www.portalmetalica.com.br/>. Acesso em: 12 ago. 2018.

REUBEN, R. L. **Materials in marine technology.** London: Springer, 1994. 253 p.

REDA, M. A.; SHAHIN, P.; MONTAGUE, R. **Review of material selection for corrosion-resistant alloy pipelines.** *Engineering Science*, v. 33, p. 1373-1390, 2025.

SEDRIS, A. J. **Effects of alloy composition and microstructure on the passivity of stainless steels.** *Corrosion*, v. 42, n. 7, p. 376-389, jul. 1986.

SOBRAL, A. V. C. **Estudo da corrosão em aços inoxidáveis sinterizados com revestimento polimérico.** 2000. 201 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

ZIBETTI, D. H. **Estudo das possíveis causas para ocorrência de corrosão nos tubos de um trocador de calor tipo condensador**. 2023. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

A.U. Malik, P.C. Mayan Kutty, I.A. Andijani, A.A. Al-Fozan, **Materials performance and failure evaluation in SWCC MSF plants**, *Desalination* 93 (1993) 445–460.

T. Hodgkiess, **Current status of materials selection for MSF distillation plants**, *Desalination* 93 (1993) 445–460. 6678 H.M. Ezuber and A. Al Shater / *Desalination and Water Treatment* 57 (2016) 6670–6679

A.U. Malik, S.A. Al-Fozan, F. Al-Muaili, **Corrosion of heat exchanger in thermal desalination plants and current trends in material selection**, *Desalin. Water Treat.* (2014), doi: 10.1080/19443994.2014.940642.

Powell, Carol A., and Harold T. Michels. "**Copper-Nickel Alloys for Seawater Corrosion Resistance and Anti-Fouling - A State of the Art Review.**" Paper presented at the CORROSION 2000, Orlando, Florida, March 2000

ISCRAP APP. 1 Prepared – Scrap Metal Prices. iScrap App, [s.d.]. Disponível em: <https://iscrapapp.com/metals/1-prepared/>. Acesso em: 29 jul. 2025.

TECTRON. A 2025 Evaluation and Prediction of Metal Prices in the Metal Manufacturing Industry. Tectron, 2024. Disponível em: <https://www.tectronmx.com/post/a-2025-evaluation-and-prediction-of-metal-prices-in-the-metal-manufacturing-industry>. Acesso em: 29 jul. 2025.

SMI COPPER. Copper Nickel (CuNi). SMI Copper, [s.d.]. Disponível em: <https://smicopper.com/coppernickel-cuni/>. Acesso em: 29 jul. 2025.

ACE AVANT. Ace Avant – Concrete Construction Company. Ace Avant, [s.d.]. Disponível em: <https://www.aceavant.com/>. Acesso em: 29 jul. 2025.

XTREME POLISHING SYSTEMS. Xtreme Polishing Systems. Xtreme Polishing Systems, [s.d.]. Disponível em: <https://xtremepolishingsystems.com/>. Acesso em: 29 jul. 2025.