

**RODRIGO PEREIRA MARQUES**

**Efeito da corrosão atmosférica marinha sobre os aços ASTM Grau 80, Grau 100 e Grau 120, utilizados na montagem de lingas de corrente.**

Guaratinguetá  
2019

**Rodrigo Pereira Marques**

**Efeito da corrosão atmosférica marinha sobre os aços ASTM Grau 80, Grau 100 e Grau 120, utilizados na montagem de lingas de corrente.**

Dissertação apresentada ao Conselho do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Norberto Codaro  
Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Heloísa Andréa Acciari

Guaratinguetá  
2019

M357e	<p>Marques, Rodrigo Pereira</p> <p>Efeito da corrosão atmosférica marinha sobre os aços ASTM grau 80, grau 100 e grau 120, utilizados na montagem de lingas de corrente / Rodrigo Pereira Marques. – Guaratinguetá, 2019.</p> <p>89 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 85-89</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Eduardo Norberto Codaro</p> <p>Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Heloisa Andréa Acciari</p> <p>1. Aço de alta resistência. 2. Cabos de aço. 3. Corrosão. 4. Microestrutura.</p> <p>I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 669.14(043)</p>
-------	---

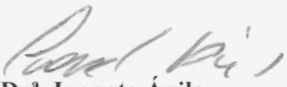
Pâmella Benevides Gonçalves  
Bibliotecária/CRB-8/9203

**RODRIGO PEREIRA MARQUES**

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO: MESTRADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

  
Prof. Dr. Ivonete Ávila  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA:**



Prof. Dr. EDUARDO NORBERTO CODARO  
Orientador / UNESP-FEG



Prof. Dr. MARCELO DOS SANTOS PEREIRA  
UNESP/FEG



Prof. Dr. ROSINEI BATISTA RIBEIRO  
UNIFATEA

## **DADOS CURRICULARES**

### **RODRIGO PEREIRA MARQUES**

<b>NASCIMENTO</b>	11.06.1982 – Volta Redonda / RJ
<b>FILIAÇÃO</b>	Evio Santos Marques Rosamarina Pereira Marques
<b>2009/2014</b>	Engenharia de Produção Metalúrgica – Engenheiro de Produção Faculdade de Engenharia de Resende – AEDB
<b>2015/2017</b>	Engenharia da Qualidade – Engenheiro da Qualidade Centro de Pesquisa, Pós-Graduação e Extensão – AEDB

A *Deus*, essencial em minha vida, pela inspiração, pelas bênçãos, e por permitir a realização de mais um objetivo.

Aos meus pais *Rosamarina* e *Evio*, pelo amor, educação, pela formação dos meus valores e pelas palavras de incentivo ao longo da vida.

À minha amada esposa *Regiane*, minha maior incentivadora desde o início, pelo apoio, carinho, compreensão, e por não me deixar desanimar nos momentos de dificuldade.

Aos meus filhos *Guilherme* e *Giovanna*, pois mesmo sem estarem comigo todos os dias, estão sempre presentes em meus pensamentos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a *Deus*, pela força e perseverança, ajudando-me a superar as dificuldades durante toda esta longa caminhada.

Aos meus orientadores, *Prof. Dr. Eduardo Norberto Codaro* e *Prof.<sup>a</sup> Dra. Heloísa Andréa Acciari*, pelos ensinamentos, disponibilidade e por acreditar na realização deste trabalho.

Ao *Sr. Elias Oliveira*, engenheiro da *RUD CORRENTES INDUSTRIAIS LTDA*, por abrir as portas de sua empresa e por fornecer as amostras necessárias para os ensaios.

Ao *Prof. Dr. Roberto Zenhei Nakazato*, pela paciência e pelo apoio técnico na preparação das amostras.

Ao *Prof. Dr. Luís Rogério de Oliveira Hein*, pelo apoio técnico na microscopia óptica e no processamento das imagens.

Ao *Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira*, pelo pronto atendimento para me auxiliar na identificação das fases presentes na microestrutura dos materiais.

Agradeço também à *D. Conceição Aparecida Matsumoto Dutra*, colaboradora do *Laboratório de Química da FEG/UNESP*, pela paciência, dedicação e pela imensa ajuda oferecida nos ensaios de imersão.

Aos meus colegas de laboratório, *Alexandre Pereira de Lima*, *Dener Pedro da Silva Palma*, *Mariana Cristina de Oliveira*, *Raiana Marcela Izidoro da Silva Santos* e *Rodrigo Monzon Figueredo*, pela troca de experiências e pela grande colaboração nos ensaios, meus sinceros agradecimentos.

“Obstáculos são aquilo que vemos quando  
afastamos nossos olhos do objetivo.”

*Henry Ford*



## RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo avaliar o efeito da corrosão atmosférica marinha sobre os aços ASTM Grau 80, Grau 100 e Grau 120, que são utilizados na montagem de lingas de corrente destinadas à movimentação de cargas. Os problemas atribuídos à deterioração desses materiais são comuns e frequentes, pois basicamente em todos os ramos da atividade econômica há materiais que necessitam ser transportados. E para analisar o comportamento destes aços frente à corrosão, foram realizados ensaios eletroquímicos e ensaios de imersão por perda de massa utilizando uma solução contendo NaCl a 3,56% (em massa) que simula a atmosfera marinha em ambientes laboratoriais. Os resultados dos ensaios de OCP (Potencial em Circuito Aberto) e de Polarização de Tafel revelaram que o processo de corrosão é controlado pela difusão de O<sub>2</sub> dissolvido neste meio. Pode-se concluir que os valores de OCP e de E<sub>corr</sub> (potencial de corrosão) obtidos foram muito similares entre si para todas as regiões do elo analisadas (solda, corpo e deformação). A região do corpo demonstrou maior resistência à corrosão, obtendo os maiores valores médios de resistência de polarização (Grau 80: 10,14 kΩ; Grau 100: 12,61 kΩ; e Grau 120: 11,74 kΩ). As densidades de corrente de corrosão (I<sub>corr</sub>) observadas são baixas e da mesma ordem de magnitude (abaixo de 7μA/cm<sup>2</sup>). Nos ensaios de imersão, observou-se que a perda de massa relativa das amostras, após os 10 dias de permanência na solução, foi mínima (entre 0,05 e 0,08 %/cm<sup>2</sup>), indicando não haver diferença significativa entre os aços e suas respectivas regiões. Na microscopia óptica, as imagens revelaram microestruturas bastante similares entre as amostras, indicando a presença das fases bainíticas e martensíticas, e aparentemente fases residuais de ferrita e austenita retida.

**PALAVRAS-CHAVE:** Lingas de corrente. Aços ASTM Grau 80, Grau 100 e Grau 120. Corrosão atmosférica marinha. Microestrutura.

## ABSTRACT

The present work has the objective of evaluating the effect of marine atmospheric corrosion on ASTM Grade 80, Grade 100 and Grade 120 steels, which are used in the assembly of chain slings intended for cargo handling. The problems attributed to the deterioration of these materials are common and frequent, because basically in all branches of economic activity there are materials that need to be transported. In order to analyze the corrosion behavior of these steels, electrochemical tests and mass loss immersion tests were carried out using a solution containing 3,56% NaCl (in mass) that simulates the marine atmosphere in laboratory environments. The results of OCP (Open Circuit Potential) and Tafel Polarization tests revealed that the corrosion process is controlled by the O<sub>2</sub> diffusion dissolved in this environment. It can be concluded that the values of OCP and E<sub>corr</sub> (corrosion potential) obtained were very similar for all regions of the link analyzed (weld, body and deformation). The region of the body showed higher resistance to corrosion, obtaining the highest values of polarization resistance (Grade 80: 10,14 kΩ; Grade 100: 12,61 kΩ; and Grade 120: 11,74 kΩ). The observed corrosion current densities (I<sub>corr</sub>) are low and of the same order of magnitude (below 7 μA/cm<sup>2</sup>). In the immersion tests, it was observed that the loss of the relative mass of the samples, after 10 days of residence in the solution, was minimal (between 0,05 and 0,08%/cm<sup>2</sup>), indicating that there was no significant difference between steels and their respective regions. In the optical microscopy, the images revealed very similar microstructures between the samples, indicating the presence of the bainitic and martensitic phases, and apparently residual phases of ferrite and retained austenite.

**KEYWORDS:** Chain slings. ASTM Grade 80, Grade 100 and Grade 120 steels. Marine atmospheric corrosion. Microstructure.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1.1 – Lingas de corrente. ....	21
Figura 2.1.2 – Terminais superiores e inferiores. ....	22
Figura 2.1.3 – Acessórios mais comuns utilizados na montagem de lingas de corrente. ....	22
Figura 2.1.4 – Outros tipos de linga (cabos de aço e cintas têxteis). ....	23
Figura 2.2.1 – Representação de um diagrama de transformação isotérmica, ilustrando as regiões de transformação da austenita em perlita (A-P) e da austenita em bainita (A-B). ....	25
Figura 2.2.2 – Micrografias caracterizando a morfologia das fases bainita e martensita em aços carbono de baixa liga. ....	25
Figura 2.2.3 – Diagrama tensão x deformação dos ensaios aplicados na fabricação. ....	29
Figura 2.3.1 – Lingas de corrente com sinais de corrosão. ....	31
Figura 2.5.1.1 – Modelo esquemático para determinação de OCP. ....	34
Figura 2.5.2.1 – Modelo esquemático para determinação das curvas de polarização de Tafel. ....	35
Figura 2.5.2.2 – Processo de corrosão controlado por ativação (polarização de Tafel). ....	36
Figura 2.5.2.3 – Processo de corrosão controlado por difusão (polarização de Tafel). ....	37
Figura 2.5.2.4 – Representação do método de extrapolação das retas de Tafel. ....	38
Figura 3.1.1 – Correntes utilizadas na montagem de lingas. ....	41
Figura 3.1.2 – Corpos-de-prova confeccionados para os ensaios de corrosão e metalográficos. ....	41
Figura 3.1.3 – Regiões do elo de corrente em que foram extraídas as amostras para os ensaios. ....	42
Figura 3.2.1.1 – Politriz da marca STRUERS, modelo DP-10, Panambra. ....	43
Figura 3.2.1.2 – Equipamento utilizado para o banho ultrassônico (Thornton). ....	44

Figura 3.2.2.1 – Potenciostato AUTOLAB, modelo PGSTAT 302N, Metrohm. ....	44
Figura 3.2.2.2 – Célula eletroquímica utilizada nos ensaios eletroquímicos. ....	46
Figura 3.2.3.1 – Configuração adotada nos ensaios de imersão. ....	48
Figura 4.2.1 – Curvas de OCP da região da solda do aço Grau 80. ....	53
Figura 4.2.2 – Polarização de Tafel da região da solda do aço Grau 80. ....	53
Figura 4.2.3 – Curvas de OCP da região do corpo do aço Grau 80. ....	54
Figura 4.2.4 – Polarização de Tafel da região do corpo do aço Grau 80. ....	54
Figura 4.2.5 – Curvas de OCP da região da deformação do aço Grau 80. ....	55
Figura 4.2.6 – Polarização de Tafel da região da deformação do aço Grau 80. ....	55
Figura 4.2.7 – Curvas de OCP da região da solda do aço Grau 100. ....	56
Figura 4.2.8 – Polarização de Tafel da região da solda do aço Grau 100. ....	56
Figura 4.2.9 – Curvas de OCP da região do corpo do aço Grau 100. ....	57
Figura 4.2.10 – Polarização de Tafel da região do corpo do aço Grau 100. ....	57
Figura 4.2.11 – Curvas de OCP da região da deformação do aço Grau 100. ....	58
Figura 4.2.12 – Polarização de Tafel da região da deformação do Grau 100. ....	58
Figura 4.2.13 – Curvas de OCP da região da solda do aço Grau 120. ....	59
Figura 4.2.14 – Polarização de Tafel da região da solda do aço Grau 120. ....	59
Figura 4.2.15 – Curvas de OCP da região do corpo do aço Grau 120. ....	60
Figura 4.2.16 – Polarização de Tafel da região do corpo do aço Grau 120. ....	60
Figura 4.2.17 – Curvas de OCP da região da deformação do aço Grau 120. ....	61
Figura 4.2.18 – Polarização de Tafel da região da deformação do aço Grau 120. ....	61
Figura 4.2.19 – Diagrama de dispersão do potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ) para as diferentes regiões do elo de corrente – Grau 80. ....	68
Figura 4.2.20 – Diagrama de dispersão da densidade de corrente de corrosão ( $I_{\text{corr}}$ ) para as diferentes regiões do elo de corrente – Grau 80. ....	68
Figura 4.2.21 – Diagrama de dispersão do potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ) para as diferentes regiões do elo de corrente – Grau 100. ....	69

Figura 4.2.22 – Diagrama de dispersão da densidade de corrente de corrosão ( $I_{\text{corr}}$ ) para as diferentes regiões do elo de corrente – Grau 100. ....	70
Figura 4.2.23 – Diagrama de dispersão do potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ) para as diferentes regiões do elo de corrente – Grau 120. ....	71
Figura 4.2.24 – Diagrama de dispersão da densidade de corrente de corrosão ( $I_{\text{corr}}$ ) para as diferentes regiões do elo de corrente – Grau 120. ....	71
Figura 4.3.1 – Perda de massa das amostras extraídas das três regiões do aço Grau 80, a cada ciclo de decapagem. ....	74
Figura 4.3.2 – Perda de massa das amostras extraídas das três regiões do aço Grau 100, a cada ciclo de decapagem. ....	75
Figura 4.3.3 – Perda de massa das amostras extraídas das três regiões do aço Grau 120, a cada ciclo de decapagem. ....	76
Figura 4.4.1 – Micrografia das três regiões do elo de corrente - Grau 80. Ataque: Nital 2%. Ampliação: 500 vezes. ....	79
Figura 4.4.2 – Micrografia das três regiões do elo de corrente - Grau 100. Ataque: Nital 2%. Ampliação: 500 vezes. ....	80
Figura 4.4.3 – Micrografia das três regiões do elo de corrente - Grau 120. Ataque: Nital 2%. Ampliação: 500 vezes. ....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.2.1 – Composição química recomendada para adição dos elementos de liga Ni, Cr e Mo aos aços constituintes das lingas de corrente.....	26
Tabela 2.2.2 – Grau de qualidade dos aços de acordo com a resistência.....	29
Tabela 3.2.2.1 – Composição química da água do mar sintética simulada neste estudo.....	45
Tabela 4.1.1 – Resultado da análise da composição química dos aços ASTM Grau 80, Grau 100 e Grau 120.....	51
Tabela 4.2.1 – Resultados dos parâmetros obtidos nas curvas de OCP e Tafel - Grau 80.....	64
Tabela 4.2.2 – Resultados dos parâmetros obtidos nas curvas de OCP e Tafel - Grau 100.....	65
Tabela 4.2.3 – Resultados dos parâmetros obtidos nas curvas de OCP e Tafel - Grau 120.....	66
Tabela 4.3.1 – Perda de massa observada em cada amostra, após os ciclos de decapagem.....	73
Tabela 4.3.2 – Valores percentuais de perda de massa por unidade de área.....	77
Tabela 4.4.1 – Fração volumétrica média das fases presentes nas regiões dos elos de corrente Grau 80, Grau 100 e Grau 120.....	82

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	15
1.2	JUSTIFICATIVA.....	17
1.3	OBJETIVO.....	18
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>18</b>
1.4	ESTRUTURA .....	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>20</b>
2.1	LINGAS .....	20
2.2	CARACTERÍSTICAS E COMPOSIÇÃO DOS AÇOS .....	23
2.3	INSPEÇÕES DE SEGURANÇA.....	30
2.4	CORROSÃO ATMOSFÉRICA.....	31
2.5	ENSAIOS ELETROQUÍMICOS.....	33
<b>2.5.1</b>	<b>Potencial em Circuito Aberto .....</b>	<b>34</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Polarização de Tafel .....</b>	<b>35</b>
2.6	ENSAIOS DE IMERSÃO.....	38
2.7	METALOGRAFIA .....	39
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>40</b>
3.1	CONFECÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA .....	40
3.2	ENSAIOS DE CORROSÃO.....	42
<b>3.2.1</b>	<b>Preparação dos corpos-de-prova.....</b>	<b>42</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Ensaio eletroquímico .....</b>	<b>44</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Ensaio de imersão (perda de massa).....</b>	<b>47</b>
3.3	ANÁLISE METALOGRAFICA .....	49
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>51</b>
4.1	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS AMOSTRAS .....	51
4.2	MEDIDAS DE OCP E POLARIZAÇÃO DE TAFEL .....	52

4.3	ENSAIOS DE CORROSÃO POR PERDA DE MASSA.....	72
4.4	MICROSCOPIA ÓPTICA .....	78
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>83</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>84</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>85</b>



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Há milhares de anos, a necessidade de movimentar e manusear cargas já fazia parte da rotina do homem primitivo, o qual se utilizava apenas do artifício de sua própria força e a dos animais em suas atividades. Com a Revolução Industrial, os equipamentos e acessórios de movimentação de cargas passaram a ser produzidos com aço e ferro fundido. A partir de 1880, aços resistentes foram desenvolvidos contendo elevados teores de Cu (cobre), sendo o cobre posteriormente substituído por Ni (níquel) e Cr (cromo) na composição (AL-FADHALAH; ELKHOLY; MAJEED, 2010; MARQUES; FRANÇA, 2014; MELCHERS, 2008; SOUZA, 2008).

Atualmente, há várias soluções desenvolvidas exclusivamente para esta finalidade, proporcionando ao homem maior facilidade nas operações de movimentar cargas de diversas naturezas, formatos e pesos. Dentre elas, encontram-se as lingas de correntes, que são dispositivos constituídos de terminais, acessórios e ramais formados por correntes de elos curtos de formato oblongo e seção circular, fabricadas com arames de aço ASTM Grau 80, Grau 100 ou Grau 120 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012, 2013a, 2013b; DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2006; RUD CORRENTES INDUSTRIAIS, 2014).

Apesar das lingas de corrente, há muito tempo, serem utilizadas em operações de elevação e amarração de cargas, diversas questões referentes ao seu desempenho em serviço não têm sido adequadamente investigadas ao longo dos anos. Pesquisadores apontam, como questão crítica a ser considerada nos estudos, a integridade da solda do elo da corrente quando sujeitas a operações em ambientes agressivos, cuja durabilidade está relacionada principalmente a tratamentos térmicos inadequados, ao processo produtivo, ao estado de tensão e à ciclicidade da carga aplicada (AL-FADHALAH; ELKHOLY; MAJEED, 2010).

Dependendo da complexidade da carga a ser movimentada, uma falha no desempenho das lingas de corrente possui grande potencial de causar acidentes devido à própria natureza dos riscos inerentes à atividade de suspender cargas, tanto no que se refere a danos materiais

como também a danos pessoais, cujas perdas são difíceis de contabilizar e podem se tornar irreparáveis.

Dentre os principais tipos de falhas que tendem a causar fraturas de elos de corrente das lingas, e que podem levar à ocorrência de potenciais acidentes e descontinuidade das operações, destaca-se a corrosão. Estudos revelam que a ação da corrosão provoca uma redução significativa de dureza, de resistência à tração e diminuição do alongamento até a ruptura nos aços (RAGAB; ALAWI; SOREIN, 1994).

A deterioração causada pela interação físico-química com a atmosfera a que está exposta, associada a esforços mecânicos de tração, provoca desgastes e alterações estruturais indesejáveis na linga, tornando-a inadequada para o uso no decorrer do tempo, de modo que sua durabilidade e desempenho deixam de satisfazer os fins para a qual foi destinada (GENTIL, 2007).

A corrosão atmosférica é uma fonte de grande preocupação do setor econômico, e desenvolver alternativas tecnológicas para controlá-la tem se tornado um dos principais desafios em todo o mundo, como estratégia de redução de custos.

Responsável por grande parte das perdas de materiais e de estruturas de torres, pontes, portos, embarcações e de atividades “offshore”, estima-se que o custo total da corrosão é de, no mínimo, 4% a 5% do PIB dos países, sendo que 20% a 25% deste custo poderiam ser reduzido com o uso de tecnologias apropriadas para seu efetivo controle (GENTIL, 2007; MA; LI; WANG, 2010).

Há na literatura diversos estudos que demonstram os efeitos nocivos de atmosferas marinhas nos aços, o que é devido à presença de oxigênio dissolvido no ar e contaminantes como os compostos à base de enxofre e cloreto de sódio. Um dos contaminantes naturais mais significativos, considerado o principal agente corrosivo que influencia o processo de corrosão (dependendo do clima) – o íon cloreto – quando em suspensão no ar, tende a atacar a fina camada passiva da superfície dos aços (AL-FADHALAH; ELKHOLY; MAJEED, 2010; CALLISTER; RETHWISCH, 2012; CORVO, 2005; GENTIL, 2007; MA; LI; WANG, 2009).

Como forma de detectar o avanço da corrosão nos elos de corrente, a norma técnica ABNT NBR 15516-2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013b) recomenda aos usuários realizarem uma inspeção visual para verificar se há sinais de

desgaste, trinca ou corrosão nos elos e nos demais componentes da linga, a fim de determinar suas condições de uso.

Tal prática, no entanto, sustenta-se apenas da experiência e da sensibilidade dos inspetores e pode gerar discussões a respeito dos resultados e propiciar também uma condição insegura ao longo do tempo, pois as lingas de corrente não apresentam prazo de validade fixado pelo fabricante (MARQUES; FRANÇA, 2014).

Durante a fabricação dos elos e demais componentes das lingas de corrente são efetuados ensaios não destrutivos, como ensaio de carga de prova, e aplicação de líquido penetrante e partículas magnéticas. Porém, não há quaisquer recomendações estabelecidas pelas normas técnicas para execução destes ensaios após o uso, cujas lingas estão sujeitas aos mais variados esforços e condições de operação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, 2012, 2013a, 2013b).

Baseando-se neste contexto, medidas de prevenção e controle dos riscos poderiam ser empregadas com o auxílio de técnicas eletroquímicas que permitam avaliar o comportamento corrosivo dos aços constituintes das lingas, submetendo-os a ambientes marinhos simulados em laboratório, para que seja possível, a partir dos resultados obtidos, adotar critérios para antecipar a ocorrência de falhas que podem não ser detectadas numa inspeção visual apenas.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Considerando os riscos de acidentes associados às operações de elevação de cargas, utilizando lingas de correntes expostas a atmosferas marinhas (como nos casos de operações portuárias e atividades “offshore”), além dos prejuízos econômicos já conhecidos que a corrosão atmosférica representa a nível global, verificou-se a importância de investigar o comportamento corrosivo nos aços constituintes destes equipamentos.

Neste cenário de insuficiência e escassez de artigos científicos sobre o tema, constatado após uma insistente e criteriosa pesquisa bibliográfica, e aliada à experiência profissional adquirida ao longo dos anos neste segmento, tornou-se, portanto, motivador e desafiador desenvolver estudos que possam contribuir para melhorar a segurança das instalações e, principalmente, do usuário envolvido nas atividades de movimentar cargas.

E ainda, ao buscar uma justificativa que reforçasse a necessidade de desenvolvimento desta pesquisa, foram consultadas algumas fontes estatísticas nacionais especializadas em segurança e saúde no trabalho. Porém, os dados apresentados para a abordagem em questão não relacionam quaisquer acidentes ou incidentes registrados com aqueles provocados pela falha destes dispositivos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018; BRASIL, 2018; FUNDACENTRO, 2018).

É importante ressaltar que, diante da diversidade de componentes e acessórios existentes para montagem de lingas de corrente, os estudos desenvolvidos neste trabalho foram direcionados apenas aos elos de corrente, por se tratar do principal elemento da linga projetado para suportar e centralizar os principais esforços exigidos durante as operações.

### 1.3 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi analisar, qualitativa e quantitativamente, o efeito da corrosão atmosférica marinha sobre os aços ASTM Grau 80, Grau 100 e Grau 120 utilizados na montagem de lingas de corrente, quando submetidos a ensaios eletroquímicos e ensaios de imersão em solução de NaCl 3,56% (em massa), a qual simula a exposição a estes ambientes e, por meio de técnicas de metalografia, verificar se havia variações microestruturais entre as amostras, a fim de avaliar de que forma estas possíveis variações poderiam influenciar os resultados dos ensaios de corrosão.

#### 1.3.1 Objetivos específicos

Para o alcance do objetivo proposto, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- 1) Analisar o comportamento corrosivo dos aços ASTM Grau 80, Grau 100 e Grau 120 por meio de ensaios eletroquímicos de OCP (Potencial em Circuito Aberto) e de Polarização de Tafel.

- 2) Avaliar a perda de massa relativa por unidade de área das amostras dos aços ASTM Grau 80, Grau 100 e Grau 120 após exposição à solução de NaCl 3,56% (em massa).
- 3) Verificar a correlação entre os aços ASTM Grau 80, Grau 100 e Grau 120 quanto à composição microestrutural e avaliar a influência das fases presentes no comportamento corrosivo destes materiais.

#### 1.4 ESTRUTURA

Este trabalho foi dividido em seis capítulos e estruturado da seguinte forma:

- a) Capítulo 1: refere-se a esta parte introdutória.
- b) Capítulo 2: descreve a fundamentação teórica sobre os tipos de lingas com seus respectivos componentes e acessórios (2.1); a composição, o processo de fabricação e o grau de qualidade dos aços empregados (2.2); os critérios de inspeção estabelecidos para avaliar as condições de uso de uma linga (2.3); a corrosão atmosférica marinha e seus efeitos sobre os aços de alta resistência (2.4); a metodologia dos ensaios eletroquímicos de OCP (Potencial em Circuito Aberto) e de Polarização de Tafel (2.5); a metodologia do ensaio de corrosão por perda de massa (2.6); e a técnica metalográfica empregada: microscopia óptica (2.7).
- c) Capítulo 3: descreve os materiais utilizados e a metodologia adotada na confecção e preparação dos corpos-de-prova (3.1), nos ensaios de corrosão eletroquímicos e de perda de massa (3.2) e nas análises metalográficas (3.3).
- d) Capítulo 4: refere-se às discussões dos resultados encontrados nos ensaios.
- e) Capítulo 5: descreve as conclusões alcançadas e as perspectivas de trabalhos futuros.
- f) Capítulo 6: descreve uma ideia ou sugestão para futuros trabalhos.

Ao final, em REFERÊNCIAS, encontra-se toda a bibliografia que forneceu o suporte necessário ao desenvolvimento deste trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo trata da fundamentação teórica que sustentou este estudo, descrevendo os principais tipos de lingas, a composição, o processo de fabricação e o grau de qualidade dos aços empregados, os critérios de inspeção estabelecidos para avaliar as condições de uso de uma linga de corrente, os efeitos da corrosão atmosférica marinha sobre os aços de alta resistência, a metodologia dos ensaios eletroquímicos de OCP (Potencial em Circuito Aberto), de Polarização de Tafel e do ensaio de corrosão por perda de massa, e a técnica de metalografia empregada para promover a caracterização microestrutural dos aços.

### 2.1 LINGAS

Lingas são dispositivos constituídos por correntes, cabos de aço ou por cintas têxteis, compostas por um ou mais ramais conectados a terminais superiores e inferiores que permitem conectar cargas a equipamentos como, por exemplo, pontes rolantes e guindastes, de modo que sejam facilmente movimentadas de um lugar para outro (AMERICAN SOCIETY FOR TEST MATERIALS, 2016a; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013a).

As lingas de correntes (Figura 2.1.1) são constituídas de terminais, acessórios e ramais formados por correntes de elos curtos, de seção circular, fabricadas com arames de aço de 04 mm a 45 mm de diâmetro, soldados por corrente elétrica e posteriormente tratados termicamente. São indicadas em condições cujas temperaturas variem entre  $-40^{\circ}\text{C}$  e  $400^{\circ}\text{C}$  (AMERICAN SOCIETY FOR TEST MATERIALS, 2016a; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012).

Figura 2.1.1 – Lingas de corrente.



Fonte: RUD Correntes Industriais (2018).

As normas ABNT NBR 15516-1 e NBR 15516-2 especificam os requisitos mínimos de segurança para classificação, ensaios, utilização, armazenagem e inspeção de lingas de corrente *grau 8*, adotando esta nomenclatura como referência ao aço ASTM Grau 80 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013a, 2013b).

Já a norma alemã DIN PAS 1061, que complementa os padrões estabelecidos nas normas DIN EN 818-1 e EN 818-4, especifica os requisitos e condições gerais de ensaios em correntes de *grau 10* (fazendo referência, também, ao aço ASTM Grau 100) que possuem propósitos de içamento (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2006, 2008a, 2008b).

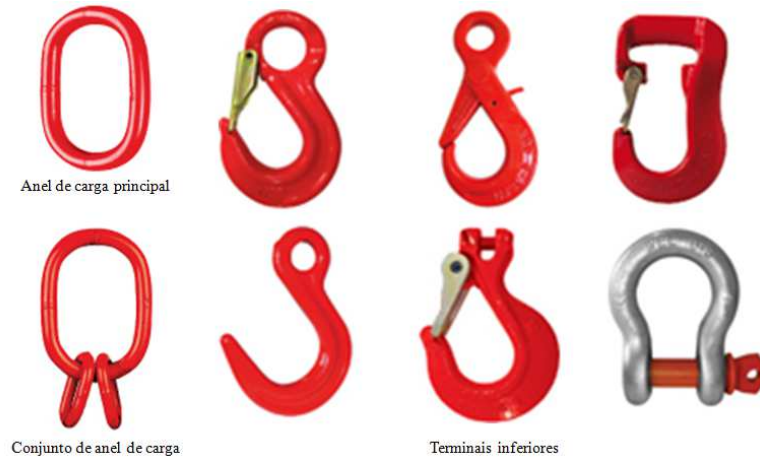
As lingas de corrente de *grau 12* (Grau 120) não possuem ainda referências normativas publicadas ou disponíveis na literatura científica.

As lingas de corrente, ainda, são dotadas de terminais superiores e inferiores produzidos e montados com os mesmos aços constituintes dos elos de corrente. Há, basicamente, dois tipos de terminais superiores: *anel de carga principal*, através do qual a linga é acoplada ao gancho dos equipamentos para elevação de carga; e *conjunto de anel de carga*, formado por um anel de carga principal e dois anéis de cargas intermediários, dimensionados para conectar um ou mais ramos de uma linga ao anel principal (AMERICAN SOCIETY FOR TEST MATERIALS, 2016a; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007).

Os terminais inferiores compreendem os elementos montados na extremidade oposta do ramo da linga e que se conectam aos pontos de fixação da carga (quando disponíveis),

como ganchos, manilhas, etc. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, 2013c). A Figura 2.1.2 mostra os principais tipos de terminais superiores e inferiores encontrados no mercado.

Figura 2.1.2 – Terminais superiores e inferiores.



Fonte: RUD Correntes Industriais (2018).

Além destes terminais citados acima, as lingas de corrente podem apresentar também acessórios que complementam sua estrutura, como dispositivos mecânicos de ligação, popularmente conhecidos como “elos de união”, e ganchos encurtadores, conforme mostra a Figura 2.1.3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013c; RUD CORRENTES INDUSTRIAIS, 2014).

Figura 2.1.3 – Acessórios mais comuns utilizados na montagem de lingas de corrente.



Fonte: RUD Correntes Industriais (2018).



Outros tipos de lingas utilizam dos mesmos terminais e acessórios empregados na montagem de lingas de corrente, conforme demonstra a Figura 2.1.4.

As lingas de cabo de aço são constituídas de terminais e ramais formados por cabos de aço com olhais, e acessórios. As normas ABNT NBR 13541-1 e NBR 13541-2 especificam os requisitos mínimos de segurança para aquisição, fabricação, cálculo da carga máxima de trabalho, certificação, utilização, armazenagem e inspeção de lingas de cabo de aço (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, 2017a).

As lingas de cintas têxteis são constituídas de terminais, acessórios e ramais formados por cintas de formato plano ou tubular, manufaturadas com fios sintéticos de alta tenacidade. As normas ABNT NBR 15637-1, NBR 15637-2 e NBR 15637-3 especificam os requisitos mínimos de segurança para fabricação, ensaios, utilização, armazenagem, manutenção e inspeção de lingas compostas por cintas têxteis (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017b, 2017c, 2017d).



Fonte: Spanset do Brasil (2013, 2017).

## 2.2 CARACTERÍSTICAS E COMPOSIÇÃO DOS AÇOS

Os aços empregados na fabricação de elos de corrente podem ser enquadrados na categoria dos aços *de alta resistência, baixa liga* (ARBL) ou *high-strength, low-alloy* (HSLA) por possuírem baixo teor de C (carbono), entre 0,18% e 0,20% (em massa). Outros elementos

de liga podem ser adicionados à sua composição, de modo a conferir maior resistência mecânica que os aços-carbono comuns, como Ni (níquel), Cr (cromo), e Mo (molibdênio) (CALLISTER; RETHWISCH, 2012; CARDOSO, 2011; SILVA; MEI, 2010; BRAMFITT; LAWRENCE, 2004).

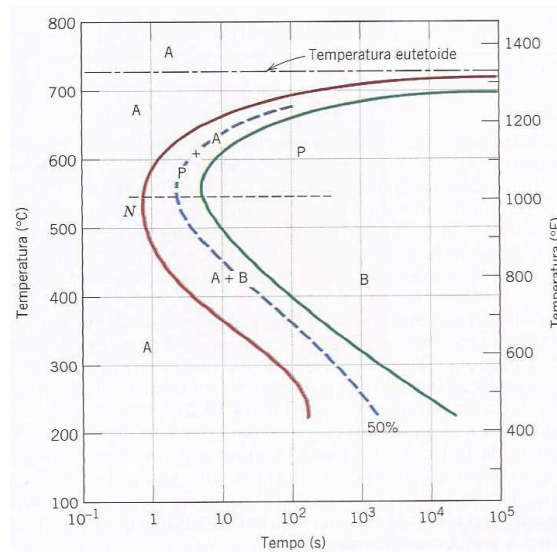
Estes aços apresentam boa ductilidade, boa conformabilidade e são usináveis. Tratados termicamente, podem alcançar limites de resistência à tração acima de 480 MPa. São aplicados na construção de vasos de pressão, pontes, torres, entre outras aplicações na indústria (incluindo a aeronáutica, aeroespacial e nuclear), por apresentarem maior resistência à corrosão atmosférica que os aços-carbono mais utilizados (CALLISTER; RETHWISCH, 2012; CARDOSO, 2011; CARNEIRO; ALVARENGA, 2010).

Os aços bainíticos, pertencentes também à categoria dos aços ARBL, são os que possuem maior potencial em termos de pesquisa e desenvolvimento na atualidade devido à necessidade de desenvolver materiais de alta tenacidade e elevada resistência mecânica. No diagrama de transformação isotérmica (Figura 2.2.1), a transformação bainítica ocorre a partir da decomposição da austenita cujas temperaturas se encontram abaixo do cotovelo da curva, ou seja, abaixo da granulação perlítica e acima da transformação martensítica - entre 550°C e 220°C (CALLISTER; RETHWISCH, 2012; COLPAERT, 1974; EILISES et al., 2008; SOUZA, 2008).

A bainita e a perlita são produtos originados da transformação austenítica, cujas microestruturas são compostas das fases ferrita ( $\alpha$ ) e cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). São consideradas, portanto, concorrentes entre si.

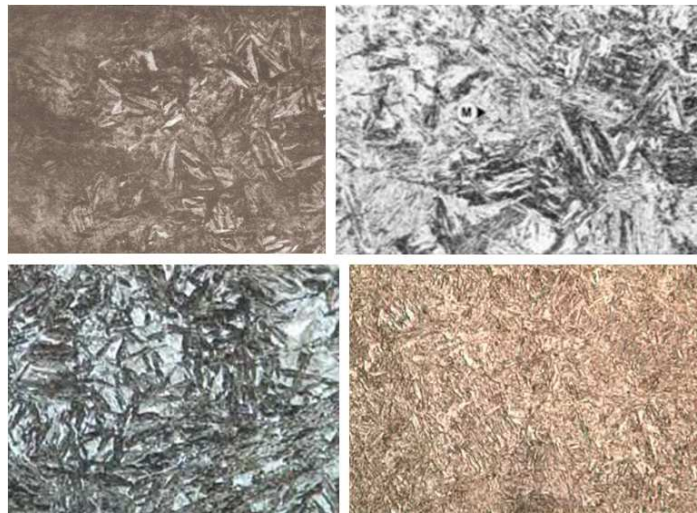
Dependendo da temperatura de transformação, a bainita pode formar-se como agulhas ou placas (Figura 2.2.2). Entre 550°C e 400°C, a bainita apresenta-se como ripas de ferrita separadas por partículas alongadas de cementita. Entre 400°C e 250°C, observa-se a formação de placas de ferrita com partículas estreitas de cementita em seu interior. Pode constituir-se, também, de uma estrutura ferrítica com morfologia acicular, desorganizada, e nucleada de forma intergranular em sítios de carbonetos ou de martensita (CALLISTER; RETHWISCH, 2012; SOUZA, 2008; COLPAERT, 1974).

Figura 2.2.1 – Representação de um diagrama de transformação isotérmica, ilustrando as regiões de transformação da austenita em perlita (A-P) e da austenita em bainita (A-B).



Fonte: Callister; Rethwisch (2012).

Figura 2.2.2 – Micrografias caracterizando a morfologia das fases bainita e martensita em aços carbono de baixa liga.



Fonte: Chiaverini (1996), Modenesi (2004) e Souza (2008). Adaptado pelo Autor.

Segundo a literatura técnica, no mínimo, dois dos três elementos químicos citados no primeiro parágrafo (Ni, Cr e Mo) devem estar presentes na composição do aço-liga, em teores suficientes de acordo com a Tabela 2.2.1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS

TÉCNICAS, 2012; DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2006; RUD CORRENTES INDUSTRIAIS, 2014; SILVA; MEI, 2010).

O aço Grau 120, por ser um produto mais novo no mercado, ainda não possui referências normativas disponíveis na literatura que regulem e padronizem seus processos de fabricação, cujo método ainda permanece restrito a um grupo de fabricantes que detém a tecnologia de desenvolvimento.

Tabela 2.2.1 – Composição química recomendada para adição dos elementos de liga Ni, Cr e Mo aos aços constituintes das lingas de corrente.

<b>Aço</b>	<b>Quantidade mínima aproximada (% em massa)</b>		
	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>
<b>Grau 80</b>	0,40	0,40	0,15
<b>Grau 100</b>	0,70	0,50	0,30
<b>Grau 120</b>	0,70	0,50	0,30

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012), Deutsches Institut für Normung (2006) e RUD Correntes Industriais (2014). Adaptado pelo Autor.

Em geral, os aços recebem adições de elementos de liga como níquel, cromo e molibdênio para melhorar a resistência à corrosão ou para condicioná-los a determinados tratamentos térmicos e termomecânicos. A influência destes elementos promove alterações na microestrutura, formando soluções sólidas ou compostos intermetálicos, modificando a temperatura na qual a transformação de fase ocorre (CALLISTER; RETHWISCH, 2012; CHIAVERINI, 1996; SOUZA, 2008).

O níquel é adicionado principalmente para proporcionar boa tenacidade na junta de solda, evitando trincas por corrosão quando o material permanece sob tensão. Cromo e molibdênio, considerados elementos de baixa liga, são adicionados à composição para aumentar a temperabilidade dos aços e permitir sua utilização em temperaturas mais elevadas. Aços contendo teores de cromo e níquel, embora sejam resistentes à corrosão, não devem ser expostos a certos meios corrosivos (SILVA; MEI, 2010; SOUZA, 2010).

Após adequados ciclos de tratamentos térmicos de têmpera e revenido, o processo proporciona aos elos de corrente maior resistência mecânica, maior tenacidade, sem alterar as propriedades de soldabilidade e ductilidade do material. Os aços resultantes tendem a apresentar, ainda, boa performance para trabalho a frio, dobramento e corte (AMERICAN SOCIETY FOR TEST MATERIALS, 2012a, 2012b; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012; DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2006; MODENESI, 2004; SILVA; MEI, 2010).

De uma forma geral, estes aços são produzidos por processos siderúrgicos que utilizam eletricidade ou adição de oxigênio, de modo que forneçam à microestrutura um tamanho de grão austenítico igual a 6 ou mais fino (AMERICAN SOCIETY FOR TEST MATERIALS, 2016b; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, 2012; DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2006).

Na etapa de desoxidação, deve-se garantir uma quantidade suficiente de Al (alumínio) em sua composição – em torno de 0,025% em massa - que permita ao aço ser estabilizado contra fragilização por envelhecimento. O mesmo processo é adotado na fabricação dos terminais e acessórios (AMERICAN SOCIETY FOR TEST MATERIALS, 2016b; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, 2012; DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2006).

Além disso, deve-se controlar o teor máximo de S (enxofre) e P (fósforo) na composição dos aços – entre 0,025 e 0,035% em massa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, 2012; DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2006).

O enxofre tende a causar a chamada *fragilidade a quente* quando combinado predominantemente ao Fe (ferro) na insuficiência de Mn (manganês), e submetido a uma temperatura acima do ponto de fusão do eutético Fe-FeS (MARQUES; FRANÇA, 2014; CALLISTER; RETHWISCH, 2012; SILVA; MEI, 2010).

O fósforo, considerado incompatível com o carbono, tende a causar a chamada *fragilidade a frio*, pois causa o endurecimento da ferrita ao dissolver-se nela, aumentando o tamanho do grão do aço, o que proporciona baixa resistência ao choque e à tenacidade. (CALLISTER; RETHWISCH, 2012; MARQUES; FRANÇA, 2014; SILVA; MEI, 2010).

As correntes soldadas e acabadas são submetidas ao tratamento térmico de têmpera, condicionando-as a uma temperatura acima do ponto  $AC_3$  (acima de 860°C,

aproximadamente) do diagrama de fases Fe-C (ferro-carbono), sendo resfriadas bruscamente em água. Em seguida, as correntes são revenidas à temperatura mínima de 400°C permanecendo nesta condição durante uma hora (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, 2012).

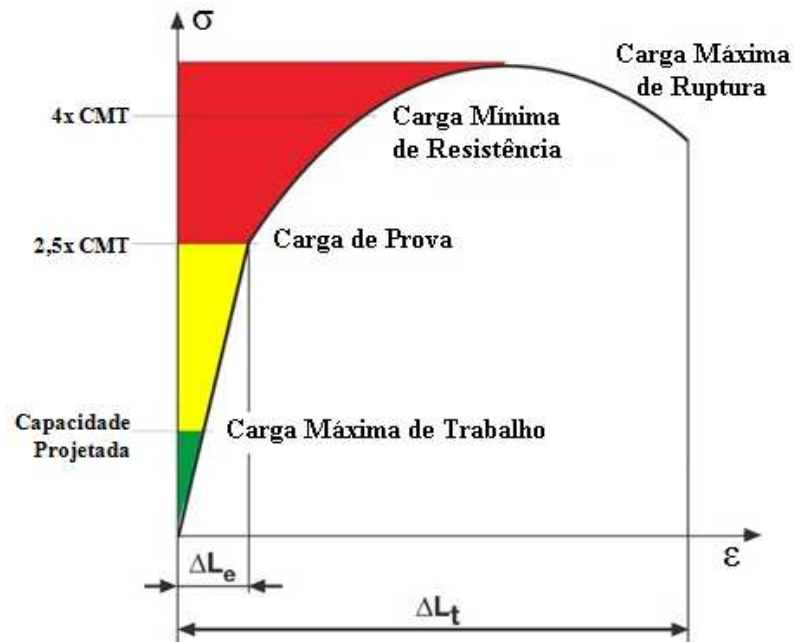
Posteriormente, as correntes são resfriadas à temperatura ambiente para manutenção das propriedades mecânicas especificadas nas normas técnicas. O tratamento de cementação não é adequado neste caso, pois apesar de ser empregado para melhorar a resistência ao desgaste e à fadiga, a cementação causa o endurecimento da camada superficial do aço devido ao processo de carbonetação ou nitretação (AMERICAN SOCIETY FOR TEST MATERIALS, 2012a, 2012b; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, 2012; CALLISTER; RETHWISCH, 2012; CHIAVERINI, 1996; DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2006).

Para verificação das propriedades mecânicas das correntes, os seguintes ensaios são realizados durante a fabricação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012; DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2006):

- a) *Carga de prova*: ensaio de tração não destrutivo que consiste na aplicação de uma força equivalente a 2,5 vezes a CMT (carga máxima de trabalho) projetada ao componente, de modo que, após a retirada da força aplicada, suas dimensões permaneçam dentro dos limites de tolerâncias especificados.
- b) *Carga mínima de resistência*: ensaio de tração destrutivo que consiste na aplicação de uma força equivalente a 4 vezes a CMT projetada ao componente, que corresponde também ao seu fator de segurança. As correntes deverão suportar esta tensão antes de seu rompimento, cujo alongamento até a ruptura não deverá ser inferior a 20% da dimensão original dos elos de corrente.

A Figura 2.2.3 mostra um diagrama tensão x deformação, considerando as cargas aplicadas após a fabricação dos elos de corrente para fins de verificação das propriedades mecânicas mencionadas.

Figura 2.2.3 – Diagrama tensão x deformação dos ensaios aplicados na fabricação.



Fonte: RUD Correntes Industriais (2014). Adaptado pelo Autor.

O grau de qualidade dos aços pode ser classificado a partir da relação entre a força mínima de resistência e o dobro da área da secção transversal do arame ou elo. Atualmente no mercado, encontra-se correntes fabricadas em aços ASTM Grau 80 (800 MPa), Grau 100 (1000 MPa) e Grau 120 (1200 MPa). Desta forma, à medida que se eleva o grau de qualidade do aço, torna-se possível obter maior capacidade de carga para os componentes da linga, conforme mostra a Tabela 2.2.2 (AMERICAN SOCIETY FOR TEST MATERIALS, 2012a, 2012b; RUD CORRENTES INDUSTRIAIS, 2014).

Tabela 2.2.2 – Grau de qualidade dos aços de acordo com a resistência.

Grau de Qualidade	Resistência [MPa]	Tipo de linga (exemplo)	CMT projetada [kg]
<b>Grau 80</b>	800		5300
<b>Grau 100</b>	1000	Corrente de elo 13 x 39 (mm)	6700
<b>Grau 120</b>	1200		8000

Fonte: RUD Correntes Industriais (2014). Adaptado pelo Autor.

## 2.3 INSPEÇÕES DE SEGURANÇA

Nas operações que envolvem transporte, movimentação, manuseio e armazenagem de materiais, graves acidentes podem ocorrer em função das condições de trabalho ou de eventos inesperados, principalmente quando se verifica inobservância ou negligência quanto às recomendações de segurança contidas nas normas regulamentadoras, procedimentos e instruções operacionais (BRASIL, 2018; MARQUES; FRANÇA, 2014).

Para uma movimentação de carga bem-sucedida, o usuário deve possuir entendimento claro sobre as diretrizes e o planejamento das atividades e estar familiarizado com os métodos de operação dos equipamentos, e estes devem apresentar manuais de instrução elaborados por seus fabricantes, desenvolvidos para aplicações específicas sob condições ideais de operação.

Portanto, as inspeções de segurança têm por objetivo, de um modo geral, identificar antecipadamente potenciais situações de risco que possam causar acidentes, sendo a prevenção, a forma mais eficaz de evitá-los (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013b, 2017b, 2017d; OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION, 2018).

A inspeção visual é a prática mais simples e a mais comum empregada para avaliar as condições de uso de uma linga. Realizada por um responsável qualificado e devidamente treinado, este tipo de inspeção consiste em comparar as medidas atuais com as dimensões nominais de fabricação, seguindo os critérios estabelecidos pelas normas técnicas aplicáveis a cada tipo de linga, de modo a identificar possíveis danos ou desgastes que possam comprometer seu desempenho durante a utilização (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013b, 2017b, 2017c, 2017d; OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION, 2018; RUD CORRENTES INDUSTRIAIS, 2014).

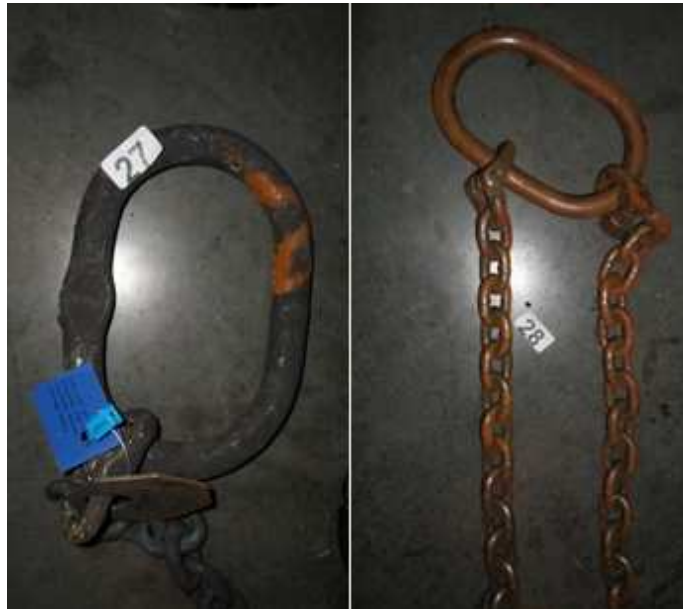
As lingas de corrente possuem características especiais de construção que atribuem maior versatilidade em determinadas condições de operação em função do tipo de configuração, da carga a ser movimentada, dos ambientes a que estão expostas e dos métodos de fixação. Portanto, é necessário garantir que as lingas estejam disponíveis para reutilização de forma segura, observando os critérios de inspeção estabelecidos nas normas técnicas correspondentes (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013b; MARQUES; FRANÇA, 2014; RUD CORRENTES INDUSTRIAIS, 2014).



Dentre os critérios de avaliação estabelecidos que devem ser considerados durante uma inspeção de lingas, como ausência ou ilegibilidade de identificação, alongamento dos elos, descoloração causada por altas temperaturas, desgaste excessivo, sinais de cortes, trincas e deformações, as normas técnicas destacam atentar aos efeitos da corrosão atmosférica sobre as lingas, que tendem a comprometer seu desempenho ao longo do tempo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, 2012, 2013b, 2013c).

A Figura 2.3.1 mostra algumas lingas de corrente que foram submetidas à inspeção visual e que apresentaram sinais de corrosão.

Figura 2.3.1 – Lingas de corrente com sinais de corrosão.



Fonte: Marques; França (2014).

## 2.4 CORROSÃO ATMOSFÉRICA

A corrosão atmosférica se desenvolve durante longos períodos de tempo, até anos, e vários estudos têm sido realizados no sentido de encontrar soluções tecnológicas para evitá-la ou controlá-la, assim como o desenvolvimento de testes simulados que permitam conhecer, mais rapidamente, a influência dos ambientes sobre os materiais expostos (GERALDO, 1993).

E como os aços, ainda, são amplamente empregados em aplicações de engenharia devido às suas características e versatilidade, observa-se um crescente interesse no desenvolvimento de aços cada vez mais resistentes devido aos custos de manutenção envolvidos, custos de aplicação de revestimentos de proteção e à preocupação contínua com os potenciais impactos ambientais decorrentes das medidas de prevenção adotadas (MELCHERS, 2008; RAGAB; ALAWI; SOREIN, 1994).

A corrosão atmosférica e seus efeitos sobre os aços de alta resistência, principalmente expostos a ambientes marinhos, têm seus estudos voltados ao entendimento da cinética, das propriedades e da microestrutura dos produtos desta corrosão. O objetivo é projetar aços que permitam reduzir a permeabilidade da camada passiva à difusão de oxigênio, inibindo ou agindo como uma barreira para retardar o processo corrosivo, uma vez que a taxa de oxidação é influenciada pela quantidade de água depositada na superfície metálica (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001; MA; LI; WANG, 2010; MELCHERS, 2008; ZHANG et al., 2003).

Os produtos da corrosão formados sobre a superfície dos aços têm sido exaustivamente estudados pela comunidade científica em todo o mundo. Takahashi et al. (2005) em seus estudos, por exemplo, identificou que a principal espécie constituinte de produtos da corrosão formados na superfície de um ferro puro e de uma liga de níquel com 5% em massa é o  $\gamma$ -FeOOH. Frações menores de espécies como  $\alpha$ -FeOOH e  $Fe_3O_4$  também são encontradas sob condições específicas.

O íon cloreto é considerado um dos contaminantes naturais mais significativos de atmosferas marinhas e desempenha um importante papel na cinética da corrosão, assim como na morfologia e nas características da camada protetora dos filmes. Porém, a concentração e o mecanismo eletroquímico dos íons cloreto atuante sobre a superfície dos aços podem variar dependendo das condições climáticas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001; CORVO et al., 2005; MA; LI; WANG, 2009).

Mudanças na velocidade de corrosão devem ser consideradas de acordo com o regime de chuvas e a umidade relativa do ar local. Os aspectos da corrosão apresentam comportamento muito diferente em períodos secos quando comparados a períodos chuvosos, cujo processo é altamente dependente da concentração e do tempo de exposição do íon cloreto sobre a superfície do aço, assim como da composição química da água da chuva, sua

intensidade, frequência e do intervalo de tempo entre os períodos secos e chuvosos (CORVO et al., 2005; MA; LI; WANG, 2009; MA; LI; WANG, 2010).

Desse modo, a cinética, as características e os mecanismos da corrosão atmosférica marinha sobre os aços de alta resistência podem ser influenciadas pelos teores de liga adicionados ao aço, a presença do contaminante corrosivo no ambiente e pelas condições climáticas a que estão expostos. Concentrar os estudos na cinética da corrosão pode fornecer parâmetros fundamentais para prever a deterioração dos materiais ao longo do tempo (MA; LI; WANG, 2010).

No entanto, pesquisadores relatam que o caminho para melhorar a resistência à corrosão seria ajustar a composição dos aços, pois alguns elementos de liga tendem a melhorar a capacidade protetiva dos filmes de corrosão formados na presença de íons cloreto. Pequenas adições combinadas de cobre, cromo, níquel, manganês, alumínio, por exemplo, tendem a reduzir o ataque do ambiente corrosivo em 50%, quando comparado ao aço não ligado (RAGAB; ALAWI; SOREIN, 1994; ZHANG et al., 2003).

## 2.5 ENSAIOS ELETROQUÍMICOS

Ensaio eletroquímico têm sido amplamente utilizados para melhor compreensão do comportamento da corrosão dos aços em geral.

Os ensaios eletroquímicos realizados neste trabalho seguiram a sistemática adotada por alguns pesquisadores quanto à determinação do número de repetições (replicatas) necessárias, considerando uma distribuição normal e um erro relativo aceitável para as medidas realizadas (CAPELA et al., 2008; TAIT, 1994).

Sendo assim, os ensaios de OCP (Potencial em Circuito Aberto) e de Polarização de Tafel foram reproduzidos cinco vezes para as três regiões do elo de corrente (solda/corpo/deformação), para cada um dos três tipos de aço empregados na fabricação (Grau 80/Grau 100/Grau 120).

As regiões do elo de corrente de onde foram retirados os corpos-de-prova são detalhadas na Figura 3.1.2, tópico 3.1 (confeção dos corpos de prova).

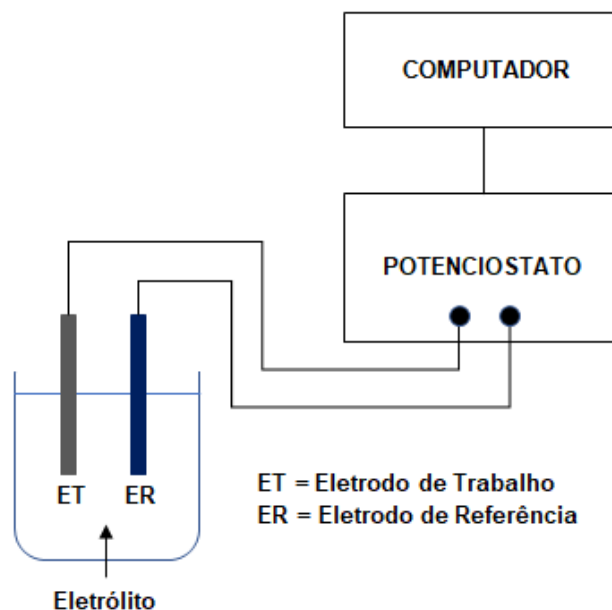
### 2.5.1 Potencial em Circuito Aberto

A metodologia para obtenção de OCP é um dos ensaios eletroquímicos adotados para estudar o comportamento corrosivo dos metais ao longo de um intervalo de tempo pré-determinado, utilizando-se de um equipamento chamado potenciostato, interligado a uma célula eletroquímica.

A célula eletroquímica é composta por um recipiente de vidro, com capacidade para 250 mL de eletrólito (solução), eletrodo de trabalho (metal/amostra) e eletrodo de referência (prata-cloreto de prata KCl 3M), conforme demonstrado na Figura 2.5.1.1.

Conectados ao potenciostato, o potencial do eletrodo de trabalho em relação ao eletrodo de referência varia continuamente em função do tempo que, ao atingir o estado estacionário, determina-se o potencial de corrosão. Os dados são registrados com o auxílio de um software específico instalado em um computador (DOMINGUES, 2010; LOMBARDI, 1993; TAIT, 1994; WOLYNEC, 2003).

Figura 2.5.1.1 – Modelo esquemático para determinação de OCP.



Fonte: Woly nec (2003). Adaptado pelo Autor.

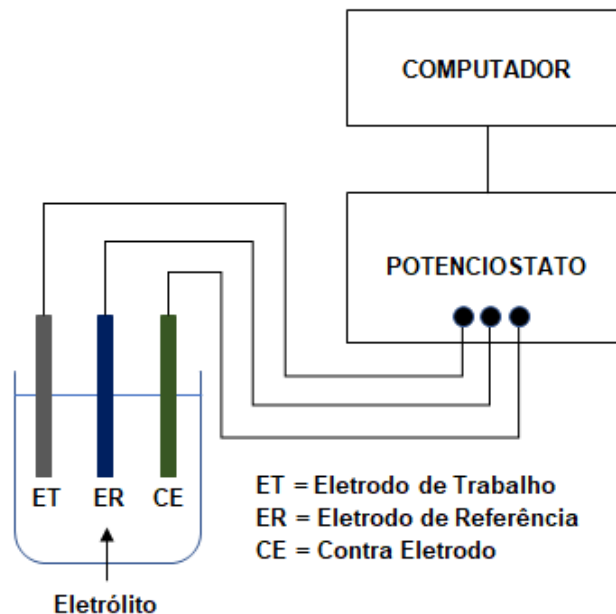
### 2.5.2 Polarização de Tafel

O método de polarização de Tafel consiste em avaliar o comportamento eletroquímico dos metais a partir da obtenção de um potencial de corrosão diferente daquele observado para as condições de equilíbrio (potencial em circuito aberto).

Por meio de um potenciostato interligado a uma célula eletroquímica, um potencial é aplicado ao eletrodo de trabalho em relação ao eletrodo de referência, e a corrente entre o eletrodo de trabalho e o contra eletrodo é medida e registrada por um software de computador (LOMBARDI, 1993; WOLYNEC, 2003).

A célula eletroquímica é composta por recipiente de vidro, com capacidade para 250 mL de eletrólito (solução), eletrodo de trabalho (metal/amostra), eletrodo de referência (prata-cloreto de prata KCl 3M) e contra eletrodo (platina), conforme demonstrado na Figura 2.5.2.1 (LOMBARDI, 1993; WOLYNEC, 2003).

Figura 2.5.2.1 – Modelo esquemático para determinação das curvas de polarização de Tafel.



Fonte: Lombardi (1993) e Wolyneec (2003). Adaptado pelo Autor.

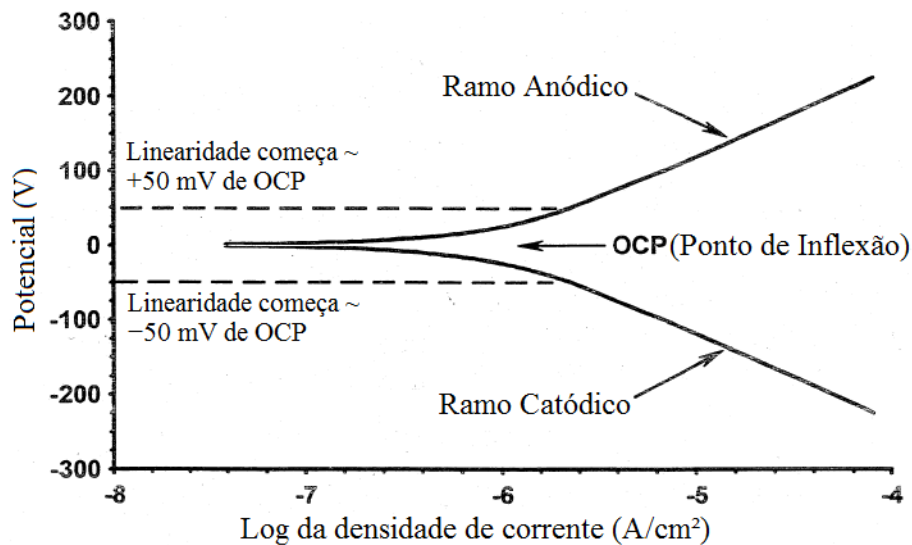
As curvas de polarização de Tafel apresentam dois ramos: o ramo anódico e o ramo catódico. Ambos os ramos apresentam uma variação exponencial de corrente com o potencial,

cuja região da curva demonstra haver um processo controlado apenas pela transferência de elétrons (GERALDO, 1993; TAIT, 1994).

A faixa de potencial aplicada na polarização de Tafel situa-se entre -250 mV e +250 mV a partir do valor de OCP. É possível, ainda, encontrar dois comportamentos distintos de controle no processo de corrosão: controle por *ativação* e controle por *difusão*. (GERALDO, 1993; TAIT, 1994).

No controle por *ativação*, observa-se um aumento contínuo da densidade de corrente em função da velocidade com que o eletrodo de trabalho (metal) perde elétrons para as espécies eletroquimicamente ativas do eletrólito. A Figura 2.5.2.2 mostra uma curva de polarização de Tafel controlada por ativação que apresenta certa linearidade, tanto no ramo anódico como no ramo catódico, a partir de  $\pm 50$  mV do valor de OCP (TAIT, 1994).

Figura 2.5.2.2 – Processo de corrosão controlado por ativação (polarização de Tafel).

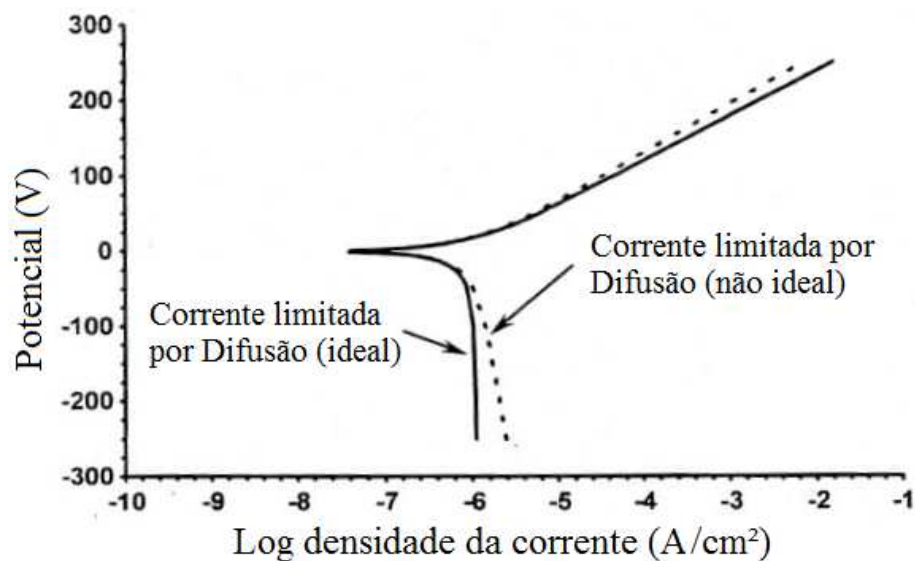


Fonte: Tait (1994).

No controle por *difusão*, observa-se um estado estacionário da corrente em função da taxa de difusão de espécies eletroquimicamente ativas do eletrólito ou presentes na dupla camada eletrolítica que se dirigem à superfície do eletrodo de trabalho (GERALDO, 1993; LOMBARDI, 1993).

A Figura 2.5.2.3 mostra uma curva de polarização de Tafel controlada por difusão em sua condição ideal, que apresenta certa estabilidade da densidade de corrente a partir de  $\pm 50$  mV do valor de OCP. A condição não ideal, representada pela linha pontilhada, pode ser explicada pela formação de filmes de passivação na superfície do metal que se opõem ao aumento da corrente (GERALDO, 1993; LOMBARDI, 1993; TAIT, 1994).

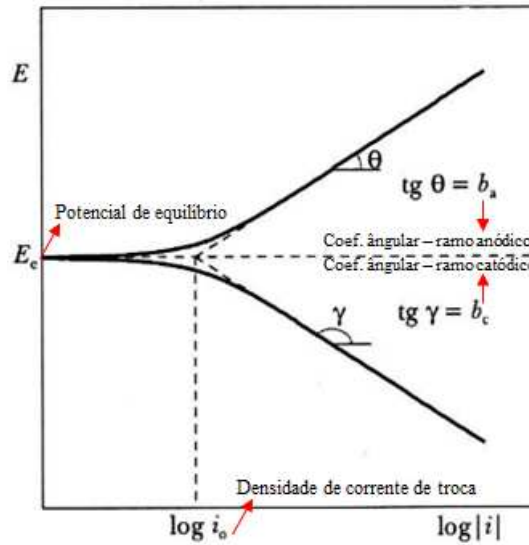
Figura 2.5.2.3 – Processo de corrosão controlado por difusão (polarização de Tafel).



Fonte: Tait (1994).

Segundo Tait (1994) e Wolyneć (2003), a taxa de corrosão pode ser determinada utilizando o método de extrapolação das retas de Tafel, demonstrado na Figura 2.5.2.4. Este método consiste em estender as retas anódicas e catódicas obtidas no gráfico de modo que a corrente de corrosão seja determinada a partir do ponto de intersecção entre elas.

Figura 2.5.2.4 – Representação do método de extrapolação das retas de Tafel.



Fonte: Wolyneć (2003). Adaptado pelo Autor.

## 2.6 ENSAIOS DE IMERSÃO

O ensaio de imersão consiste em analisar quantitativamente, dentro de um intervalo de tempo pré estabelecido, a diferença entre a massa inicial e a massa final do corpo-de-prova, após o término de sua exposição a um meio corrosivo. Desta forma, torna-se possível determinar a vida útil de um material metálico a partir da perda de massa observada e de seu comportamento em um determinado meio, ao longo do tempo (GENTIL, 2007; LOUREIRO; BRASIL; YOKOYAMA, 2007; SOUZA et al., 2010).

A preparação dos corpos-de-prova para realização dos ensaios de perda de massa é conduzida seguindo as orientações da norma ASTM G1-90 que especifica os critérios de preparação, limpeza e avaliação das amostras para ensaios de corrosão. Para a realização dos ensaios de imersão, adota-se os procedimentos-guia descritos na norma ASTM G31-72 (AMERICAN SOCIETY FOR TEST MATERIALS, 1999, 2004).

Segundo a norma ASTM G31-72, os testes de corrosão acelerados fornecem apenas resultados indicativos, o que não devem ser considerados conclusivos devido a diversos fatores que tendem a afetá-los. Para uma adequada interpretação dos resultados obtidos, deve-se considerar a influência de certas variáveis, como a temperatura e a contaminação do meio,



a presença de oxigênio dissolvido, entre outros (AMERICAN SOCIETY FOR TEST MATERIALS, 2004).

Nos testes realizados em laboratório, a norma ASTM G31-72 recomenda que as amostras possuam uma boa relação superfície-massa utilizando corpos-de-prova quadrados ou circulares, porém de espessura mínima e que sejam coerentes com a natureza do material e com o arranjo experimental adotado (AMERICAN SOCIETY FOR TEST MATERIALS, 2004).

Ainda segundo esta norma, duas amostras, no mínimo, são suficientes para avaliar o comportamento uniforme da taxa de corrosão, que normalmente variam  $\pm 10\%$  entre as amostras estudadas, com exceções observadas em metais ou ligas dependentes de filme passivo para sua resistência à corrosão (AMERICAN SOCIETY FOR TEST MATERIALS, 2004).

## 2.7 METALOGRAFIA

A necessidade de uma investigação mais abrangente e detalhada dos parâmetros microestruturais dos materiais tem promovido, cada vez mais, o uso das técnicas metalográficas como ferramenta de vital importância para melhor compreensão de sua morfologia, composição e de suas propriedades mecânicas, de modo a minimizar potenciais erros de interpretação, garantindo resultados mais confiáveis (SOUZA, 2008).

A microscopia óptica é comumente utilizada nas análises metalográficas das microestruturas e envolve processos preliminares de preparação das amostras (seccionamento, embutimento, lixamento e polimento) e ataques químicos para identificação das fases presentes.

A visualização da microestrutura da amostra consiste em partir da menor ampliação do campo de visão, aumentando progressivamente até que se obtenha melhor eficiência e clareza na observação, cujas ampliações variam entre 50 e 1000 vezes. Caso haja necessidade de ampliações maiores que esta faixa, é preciso recorrer à técnica de microscopia eletrônica (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1995; BRANFITT, LAWRENCE, 2004; SOUZA, 2008).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve os materiais e a metodologia adotada para a confecção e preparação dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios eletroquímicos, nos ensaios de corrosão por perda de massa e nas análises metalográficas.

#### 3.1 CONFECÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

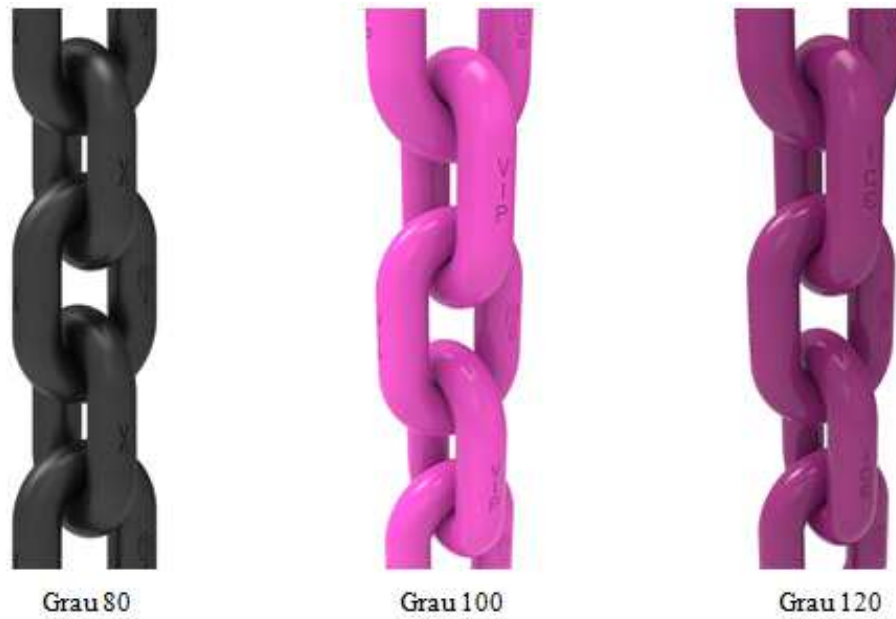
Os aços utilizados neste trabalho – ASTM Grau 80, Grau 100 e Grau 120 – são classificados como aços de baixo carbono e baixa liga. As amostras de correntes disponibilizadas pelo fabricante encontravam-se em condições de armazenamento, sem que houvessem sido anteriormente utilizadas em quaisquer operações.

Os corpos-de-prova foram extraídos da secção transversal dos arames que formam os elos de corrente (Figura 3.1.1). Depois de seccionados, estes corpos-de-prova apresentaram dimensões finais de 13 mm de diâmetro e 3 a 4 mm de espessura, aproximadamente (Figura 3.1.2).

Três regiões do elo de corrente foram estudadas: região da *solda* (que une as extremidades do arame para formar o elo), região do *corpo* (região do arame oposta ao ponto da solda), e região de *deformação* (área de atrito entre os elos, que caracteriza a região de maior tensão e desgaste), conforme demonstrado na Figura 3.1.3.

Desta forma, os corpos-de-prova, que representam os eletrodos de trabalho, foram confeccionados para os ensaios de corrosão e para as análises metalográficas, respectivamente.

Figura 3.1.1 – Correntes utilizadas na montagem de lingas.



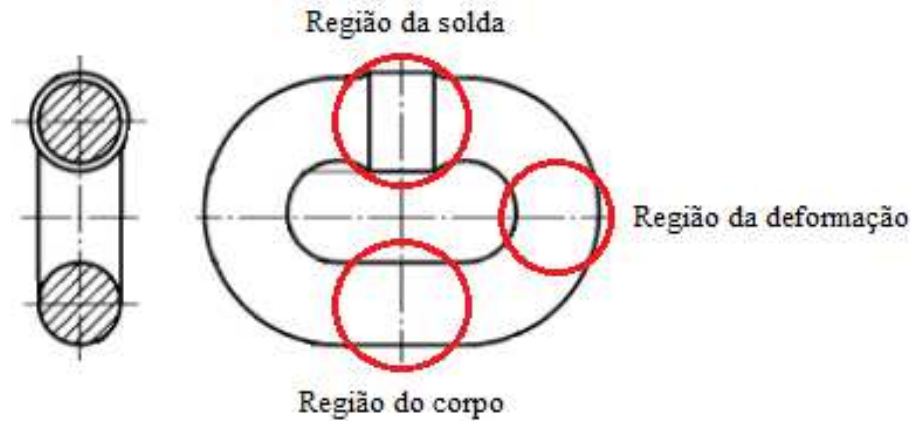
Fonte: RUD Correntes Industriais (2018). Adaptado pelo Autor.

Figura 3.1.2 – Corpos-de-prova confeccionados para os ensaios de corrosão e metalográficos.



Fonte: Autor.

Figura 3.1.3 – Regiões do elo de corrente em que foram extraídas as amostras para os ensaios.



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). Adaptado pelo Autor.

## 3.2 ENSAIOS DE CORROSÃO

Todos os ensaios de corrosão (eletroquímicos e imersão) foram realizados no laboratório de química do Departamento de Física e Química da FEG/UNESP.

### 3.2.1 Preparação dos corpos-de-prova

Para os ensaios eletroquímicos e ensaios de imersão por perda de massa, os corpos-de-prova foram lixados mecanicamente, utilizando uma politriz da marca STRUERS, modelo DP-10, Panambra (Figura 3.2.1.1), equipada sequencialmente com lixas de granulometria 100, 220, 400, 600, 1200 e 2500, de modo a obter superfícies mais lisas, uniformes e sem quaisquer artefatos que pudessem comprometer as análises.

Figura 3.2.1.1 – Politriz da marca STRUERS, modelo DP-10, Panambra.



Fonte: Autor.

Após o lixamento, os corpos-de-prova foram submetidos a um teste de "*quebra da gota d'água*", empregado para detectar se há contaminantes orgânicos (hidrofóbicos) presentes nas superfícies trabalhadas, de modo que estes contaminantes não causassem interferências nos resultados (AMERICAN SOCIETY FOR TEST MATERIALS, 2007).

Em seguida, os corpos-de-prova foram enxaguados em banho ultrassônico com Propan-2-ol por 12 minutos (Figura 3.2.1.2) para remoção de impurezas residuais em suas superfícies, sendo utilizado jato de ar frio para secagem ao final do banho.

Figura 3.2.1.2 – Equipamento utilizado para o banho ultrassônico (Thornton).

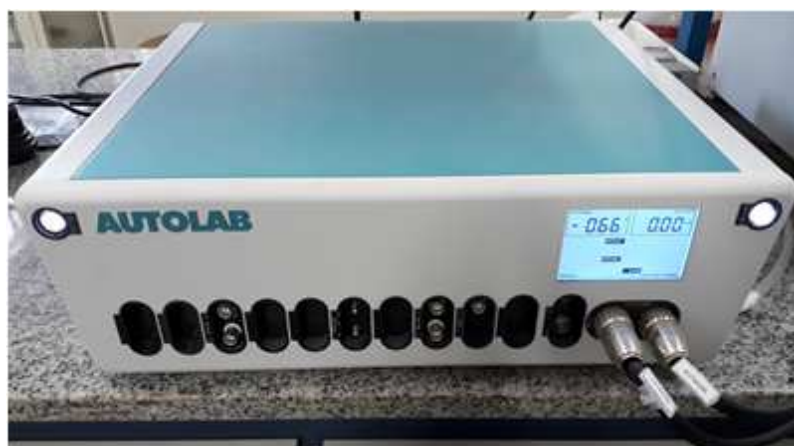


Fonte: Autor.

### 3.2.2 Ensaio eletroquímicos

As medidas eletroquímicas de OCP e Polarização de Tafel foram obtidas com o auxílio do potenciostato/galvanostato AUTOLAB, modelo PGSTAT 302N (Figura 3.2.2.1), equipado com o software Autolab NOVA 1.8 para coleta e análise dos dados. Para a plotagem e elaboração dos gráficos apresentados no Capítulo 4, foi utilizado um software específico instalado no computador.

Figura 3.2.2.1 – Potenciostato AUTOLAB, modelo PGSTAT 302N, Metrohm.



Fonte: Autor.

Para simular a agressividade da atmosfera marinha, foi utilizado como eletrólito uma solução de NaCl 3,56% (em massa) com uma concentração de cloretos totais similar àquela da água do mar natural com pH ajustado em 8,2, em conformidade com a norma ASTM D1141-98. A composição química desta solução sintética é mostrada na Tabela 3.2.2.1 (AMERICAN SOCIETY FOR TEST MATERIALS, 2003).

Pesquisadores comentam que a água do mar, por se tratar de um sistema químico complexo, não é facilmente simulado em laboratórios para ensaios de corrosão devido à presença de poluentes, atividades biológicas, alta concentração de íons menores e de oxigênio dissolvido, e que a solução de NaCl 3,56% (em massa) tem sido frequentemente utilizada para simular esta exposição por ser mais agressiva ao aço carbono do que as águas marinhas naturais (MÖLLER; BOSHOFF; FRONEMAN, 2006).

Tabela 3.2.2.1 – Composição química da água do mar sintética simulada neste estudo.

<b>Composto</b>	<b>Concentração (g / L)</b>
NaCl	24,530
MgCl <sub>2</sub>	5,200
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4,090
CaCl <sub>2</sub>	1,160
KCl	0,695
NaHCO <sub>3</sub>	0,201
KBr	0,101
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0,027
SrCl <sub>2</sub>	0,025
NaF	0,003

Fonte: American Society for Test Materials (2003). Adaptado pelo Autor.

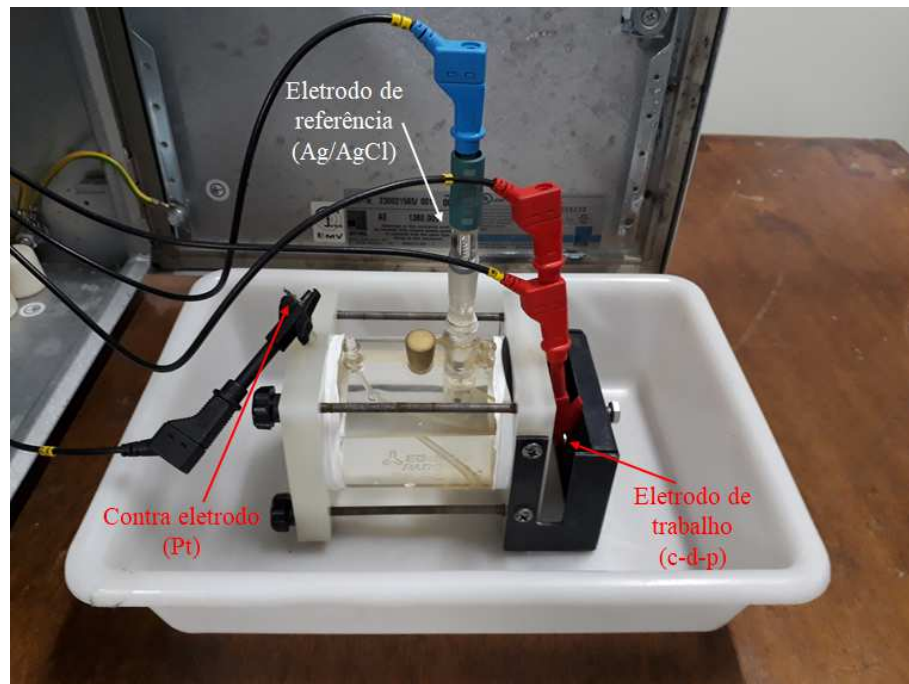
Todas as medidas eletroquímicas foram realizadas à temperatura ambiente e em condições estáticas de imersão. Foram efetuadas cinco replicatas para cada uma das três regiões do elo demonstradas na Figura 3.1.2 (solda, corpo e deformação), para os três tipos de aço constituintes das correntes (ASTM Grau 80, Grau 100 e Grau 120).

Para tal finalidade, utilizou-se uma célula eletroquímica (Figura 3.2.2.2), própria para eletrodos de trabalho planos, da PAR (Princeton Applied Research), contendo 250 mL da solução sintética da água do mar recém-preparada. O eletrodo de referência utilizado em



todos os experimentos foi o Ag/AgCl (prata-cloreto de prata KCl 3M) e o contra eletrodo, um espiral de Pt (platina).

Figura 3.2.2.2 – Célula eletroquímica utilizada nos ensaios eletroquímicos.



Fonte: Autor.

As curvas de OCP foram registradas por 3 horas, a fim de verificar a estabilidade do potencial. O valor final do potencial, após este período, foi tomado como referência para a obtenção das curvas de Tafel, a uma velocidade de varredura de 0,166 mV/s, dentro do intervalo de  $\pm 250$  mV do valor de OCP, durante um período de aproximadamente 50 minutos.

As equações de Tafel são adequadamente empregadas em processos eletroquímicos dominados por transferência de elétrons em sistemas considerados irreversíveis. A resistência de polarização ( $R_p$ ) é a resistência do próprio eletrodo, definida como a variação do potencial em função da variação da corrente aplicada no sistema (GERALDO, 1993; TAIT, 1994).

A resistência de polarização ( $R_p$ ) foi calculada de acordo com a Equação (3.2.2.1) e os resultados são apresentados no Capítulo 4.



$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} = \frac{\beta_a \times \beta_c}{2,303 \times I_{corr} \times (\beta_a + \beta_c)} \quad (3.2.2.1)$$

Onde:  $I_{corr}$  = corrente de corrosão.

$\beta_a$  = coeficiente angular do ramo anódico.

$\beta_c$  = coeficiente angular do ramo catódico.

### 3.2.3 Ensaios de imersão (perda de massa)

Inicialmente, os corpos-de-prova utilizados nos ensaios de imersão para avaliar perda de massa foram confeccionados e disponibilizados em duplicatas, e receberam uma identificação de acordo com o tipo de aço (*G08*: Grau 80 / *G10*: Grau 100 / *G12*: Grau 120), a região do elo (*S*: Solda / *C*: Corpo / *D*: Deformação) e o número da amostra correspondente, como por exemplo:

*G08S-1*: amostra nº 1 do aço Grau 80, região da solda;

*G08C-2*: amostra nº 2 do aço Grau 80, região do corpo;

*G10D-1*: amostra nº 1 do aço Grau 100, região da deformação;

*G10S-2*: amostra nº 2 do aço Grau 100, região da solda;

*G12C-1*: amostra nº 1 do aço Grau 120, região do corpo;

*G12D-2*: amostra nº 2 do aço Grau 120, região da deformação.

Os corpos-de-prova foram cuidadosamente preparados conforme descrito no tópico 3.2.1. Neste procedimento, porém, foi necessário que todas as faces expostas das amostras fossem lixadas, diferentemente do observado nos ensaios eletroquímicos em que apenas a superfície do aço em contato com o eletrólito foi submetida ao processo de lixamento e limpeza.

Em seguida, os corpos-de-prova foram pesados em balança analítica da marca SHIMADZU, modelo AX200, com precisão de 0,1 mg. Os resultados da pesagem inicial, assim como as dimensões de cada amostra, foram tabelados e os respectivos valores são apresentados no Capítulo 4.

A configuração adotada nos ensaios de imersão baseou-se no emprego de recipientes de vidro contendo a mesma solução sintética da água do mar com pH ajustado em 8,2, utilizada nos ensaios eletroquímicos. Por meio de seus orifícios feitos com o auxílio de uma furadeira, as amostras foram amarradas com fios de poliamida de 0,2 mm e, então, mergulhadas na solução sintética, sendo fixadas nas tampas do recipiente de modo que não tivessem contato com as paredes do recipiente, conforme demonstrado na Figura 3.2.3.1.

Os ensaios de imersão foram conduzidos conforme as orientações descritas nas normas ASTM G1-90 e G31-72 (AMERICAN SOCIETY FOR TEST MATERIALS, 1999, 2004) a uma temperatura média de aproximadamente 24°C. As amostras permaneceram nesta condição durante dez dias.

Figura 3.2.3.1 – Configuração adotada nos ensaios de imersão.



Fonte: Autor.

Após este período, os corpos-de-prova foram retirados dos recipientes, lavados com água destilada para remoção dos produtos de corrosão aderidos às superfícies e, então, submetidos a jatos de ar frio para secagem. O pH da solução sintética foi medido para fins de verificação e constatou-se que este se manteve inalterado, mesmo com os produtos de corrosão dissolvidos nesta solução.

O processo de decapagem dos corpos-de-prova foi realizado empregando-se a solução de Clark, adotado pela literatura científica para decapagem de aço carbono. Esta solução foi preparada à temperatura ambiente, obtendo a seguinte composição: 1L de HCl (ácido clorídrico), 50 g de SnCl<sub>2</sub> (cloreto estanhoso) e 20 g de Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (trióxido de antimônio).

Sequencialmente, a cada ciclo de imersão de 1 minuto na solução de Clark, os corpos-de-prova foram pesados na balança analítica, sendo o processo de decapagem encerrado a partir do momento em que não houve mais variação no valor de massa observado anteriormente. Considerando as dimensões e as áreas superficiais expostas de cada amostra, foram calculados os valores percentuais de perda de massa relativa por unidade de área, utilizando a Equação (3.2.3.1).

$$PMR = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (3.2.3.1)$$

Onde:  $PMR$  = perda de massa relativa (%/cm<sup>2</sup>)

$M_i$  = massa inicial (g).

$M_f$  = massa final (g).

$A_s$  = área superficial ou área exposta do corpo-de-prova (cm<sup>2</sup>).

### 3.3 ANÁLISE METALOGRÁFICA

Tendo em vista a necessidade de conhecer e identificar as fases que compõem a microestrutura dos materiais objetos deste estudo, as amostras foram submetidas à caracterização microestrutural por meio de microscopia óptica, realizada no Laboratório de

Análise de Imagens de Materiais (LAIMAT) do Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG/UNESP.

Esta etapa da pesquisa consiste apenas em verificar se há diferenças entre os microconstituintes presentes nas regiões dos elos de corrente e comparar com os resultados encontrados nos ensaios de corrosão, avaliando a potencialidade de sua influência nestes resultados.

O procedimento de preparação das superfícies das amostras para observação em microscopia óptica foi realizado semelhantemente ao adotado no item 3.2.1 para execução dos ensaios de corrosão. Adicionalmente, e depois de efetuado polimento em discos de panos contendo suspensão de alumina 0,04  $\mu\text{m}$ , as amostras foram submetidas a ataques químicos com o reagente Nital.

Reagente Nital, na proporção de 2% de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) e 98% de álcool etílico, normalmente é empregado na revelação de microestruturas de aços carbono, pois promove maior contraste da bainita e da martensita, tornando-as mais escuras para visualização em relação às demais fases potencialmente presentes, como a ferrita e a austenita retida (SOUZA, 2008).

A análise metalográfica foi realizada com o auxílio de um microscópio óptico da marca NIKON, modelo EPIPHOT 200, equipado com uma câmera AxioCam ICc3 interligada a um software específico para obtenção de imagens, instalado em um computador. De modo a oferecer resultados mais confiáveis, tendo em vista a probabilidade de falhas tanto na execução do ataque químico, como durante o polimento, as imagens foram capturadas de forma aleatória, totalizando 30 campos ao longo de toda a região superficial das amostras estudadas.

Em seguida, com o auxílio do software *Image J (Image Processing and Analysis in Java)* que permite o adequado processamento digital das imagens obtidas na microscopia óptica, foi realizada uma análise quantitativa das fases presentes na microestrutura das amostras para determinação de suas frações volumétricas (ANAZAWA, 2007; LOMBARDO et al., 2010).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nos ensaios eletroquímicos, no ensaio de corrosão por perda de massa e na microscopia óptica, assim como as análises e discussões realizadas sobre estes resultados.

### 4.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS AMOSTRAS

Com o objetivo de comparar a composição química dos aços estudados com aquela recomendada pelas normas técnicas, considerando apenas os principais elementos de liga listados na Tabela 2.2.1 (Ni-Cr-Mo), a quantificação dos constituintes das amostras foram realizadas no Laboratório de Análise de Imagens de Materiais (LAIMAT) do Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG/UNESP, com auxílio de um microscópio eletrônico de varredura equipado com detector de energia dispersiva de raios-X (MEV/EDS), modelo ZEISS EVO L515 / OXFORD INSTRUMENTS INCAx-act.

Os resultados obtidos nesta análise estão disponíveis na Tabela 4.1.1 e representados pelas porcentagens em massa dos elementos de liga presentes nos aços.

Tabela 4.1.1 – Resultado da análise da composição química dos aços ASTM Grau 80, Grau 100 e Grau 120.

Aço	Elementos de liga (% em massa)		
	Ni	Cr	Mo
<b>Grau 80</b>	0,39	0,45	0,00
<b>Grau 100</b>	0,64	0,51	0,00
<b>Grau 120</b>	0,62	0,53	0,00

Fonte: Autor.

Na Tabela 4.1.1, observa-se que não foi detectada a presença do molibdênio na microestrutura dos materiais estudados. Mesmo assim, os resultados indicam conformidade com as normas técnicas vigentes (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012; DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2006), onde o fabricante optou por adicionar apenas níquel e cromo à composição dos aços.

Porém, observa-se que os teores de níquel encontrados nos aços Grau 100 (0,64% em massa) e Grau 120 (0,62% em massa) apresentaram valores sensivelmente abaixo do mínimo recomendado e listados na Tabela 2.2.1 (0,70% em massa para ambos). Estes resultados podem sugerir a realização de ensaios mecânicos de tração para verificar se estes aços atingiram o grau de qualidade desejado, mesmo com os teores de níquel abaixo de 0,70% em massa.

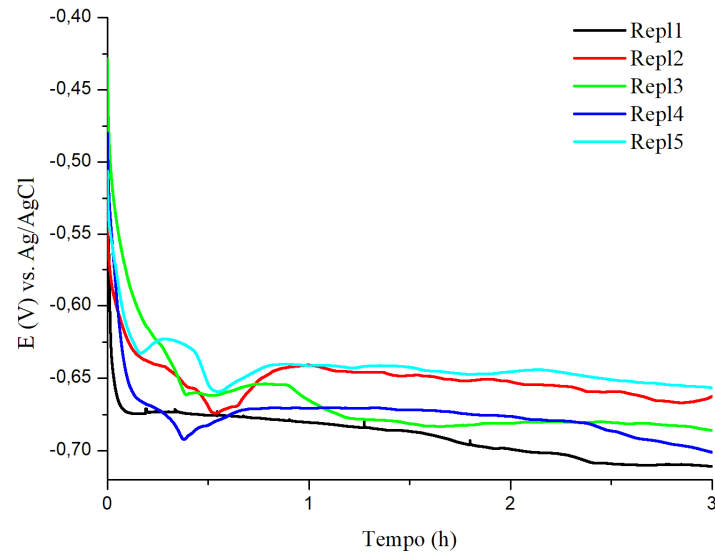
#### 4.2 MEDIDAS DE OCP E POLARIZAÇÃO DE TAFEL

Os valores do potencial de corrosão obtidos a partir dessas curvas não variaram significativamente, pois à medida que as condições na interface aço/solução tendem a estabilizarem-se, a taxa de variação do potencial de corrosão diminui com o tempo. Um critério razoável a ser considerado no estado estacionário seria uma variação menor que 5 mV em um período de dez minutos (POORQASEMI et al., 2009).

E como a densidade de corrente anódica aumenta continuamente com potencial crescente, verifica-se que os aços demonstram um comportamento de dissolução ativa na água do mar sintética. A dissolução anódica obedece à Lei de Tafel, entretanto, a curva de polarização catódica mostra uma corrente limitada pela difusão do O<sub>2</sub>, dissolvido, o que revela a etapa determinante da velocidade de corrosão (MCCAFFERTY, 2005).

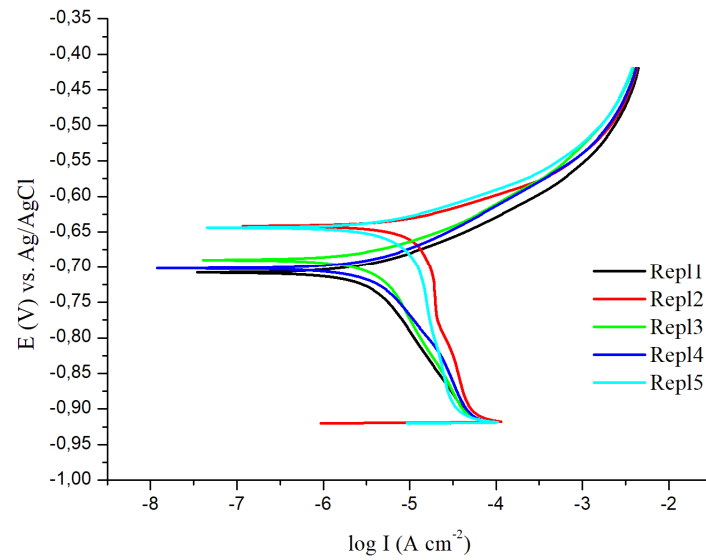
As curvas dos ensaios de OCP e polarização de Tafel realizados foram plotadas com auxílio de software específico e são demonstradas nas Figuras 4.2.1 a 4.2.18, destacadas a seguir de acordo com as regiões do elo e o grau de qualidade dos aços.

Figura 4.2.1 – Curvas de OCP da região da solda do aço Grau 80.



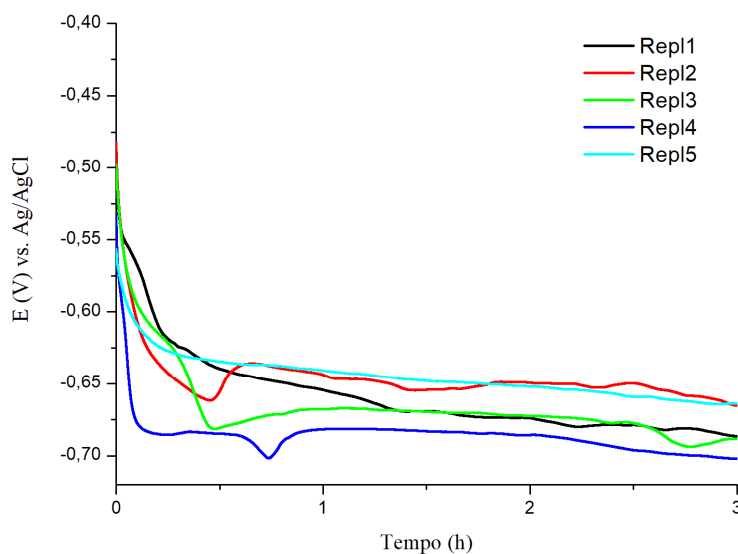
Fonte: Autor.

Figura 4.2.2 – Polarização de Tafel da região da solda do aço Grau 80.



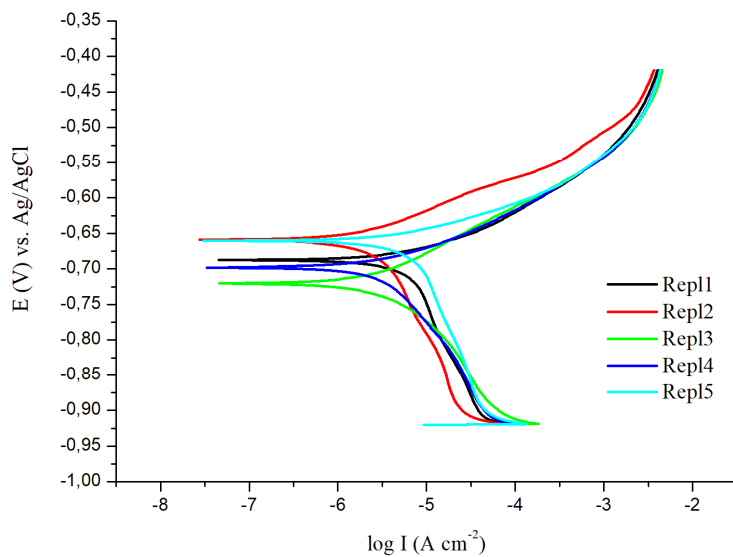
Fonte: Autor.

Figura 4.2.3 – Curvas de OCP da região do corpo do aço Grau 80.



Fonte: Autor.

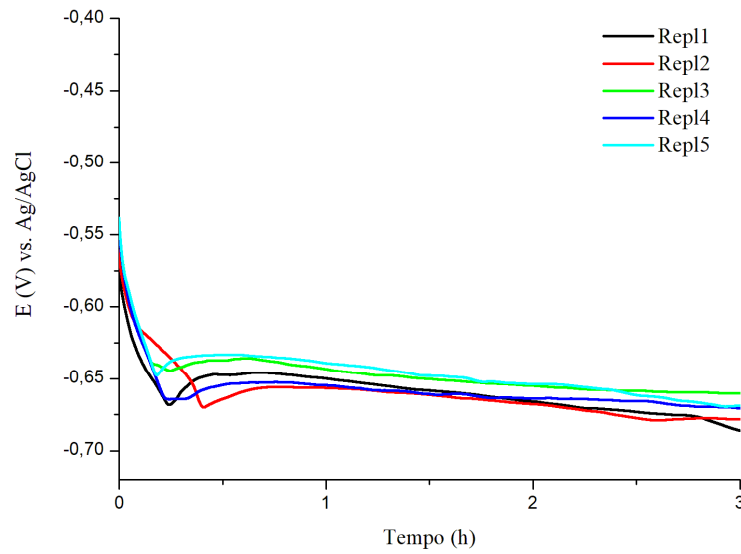
Figura 4.2.4 – Polarização de Tafel da região do corpo do aço Grau 80.



Fonte: Autor.

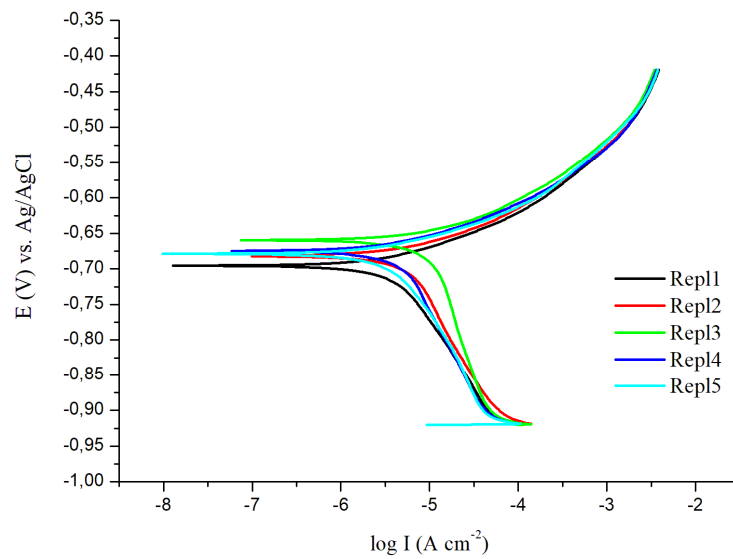


Figura 4.2.5 – Curvas de OCP da região da deformação do aço Grau 80.



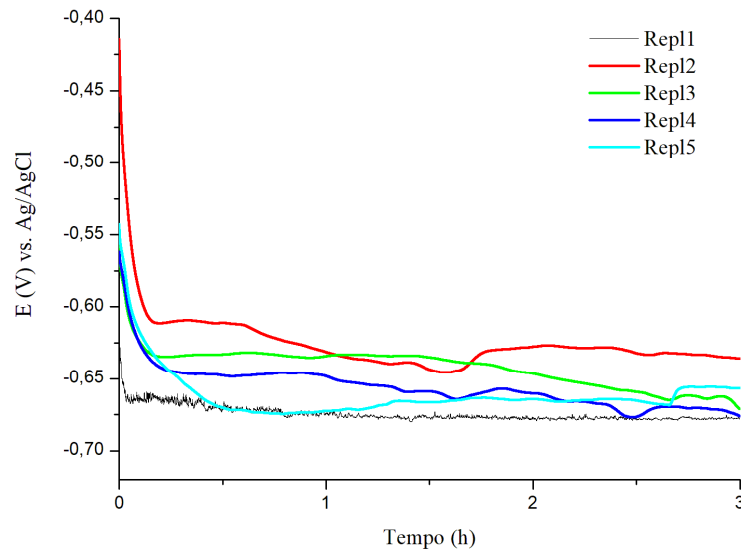
Fonte: Autor.

Figura 4.2.6 – Polarização de Tafel da região da deformação do aço Grau 80.



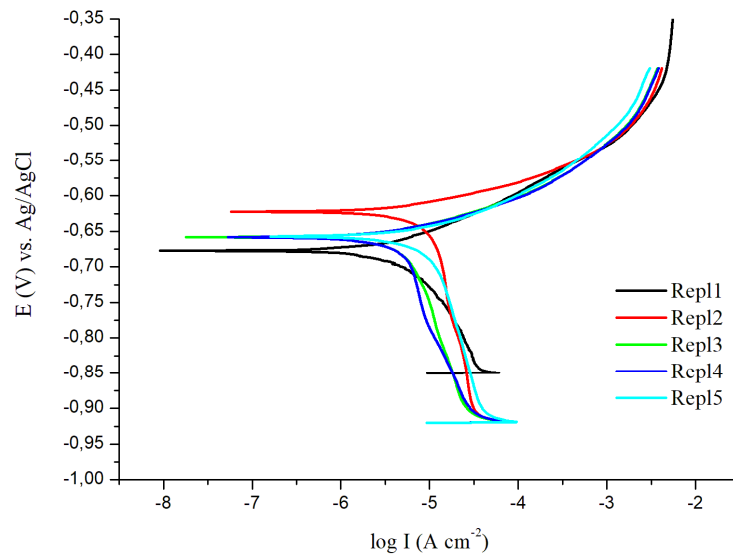
Fonte: Autor.

Figura 4.2.7 – Curvas de OCP da região da solda do aço Grau 100.



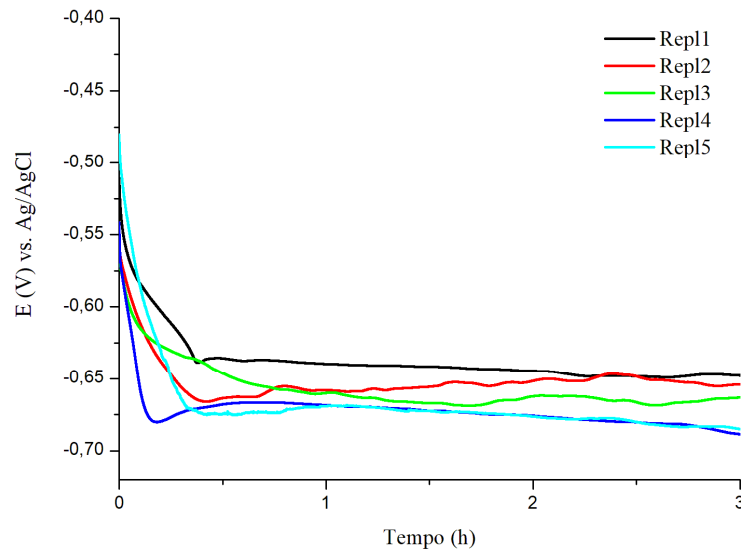
Fonte: Autor.

Figura 4.2.8 – Polarização de Tafel da região da solda do aço Grau 100.



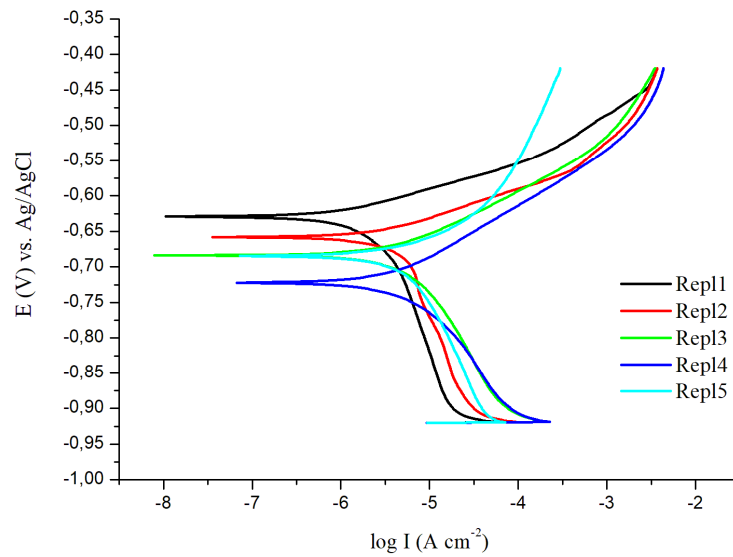
Fonte: Autor.

Figura 4.2.9 – Curvas de OCP da região do corpo do aço Grau 100.



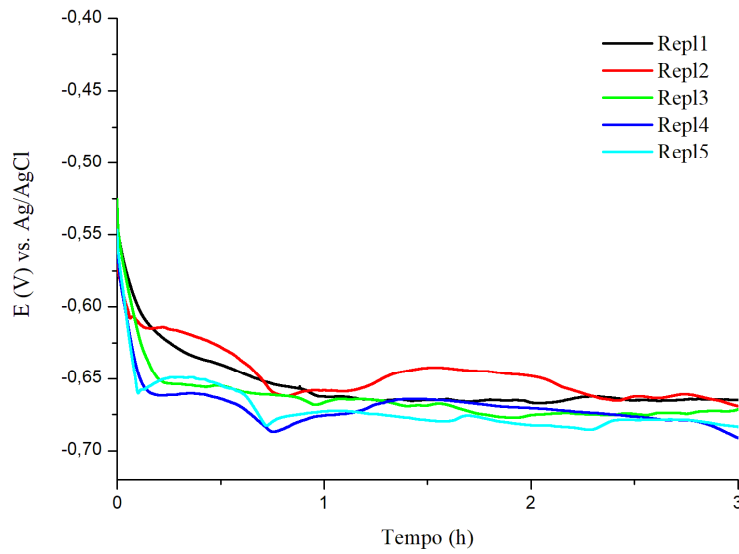
Fonte: Autor.

Figura 4.2.10 – Polarização de Tafel da região do corpo do aço Grau 100.



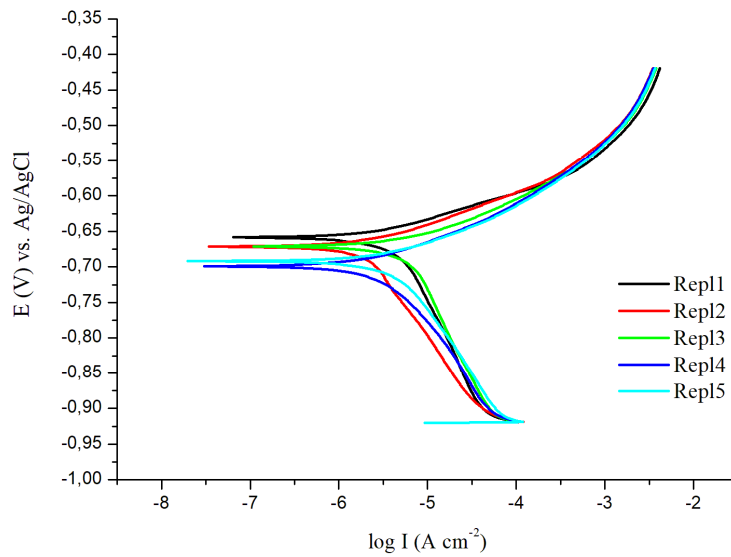
Fonte: Autor.

Figura 4.2.11 – Curvas de OCP da região da deformação do aço Grau 100.



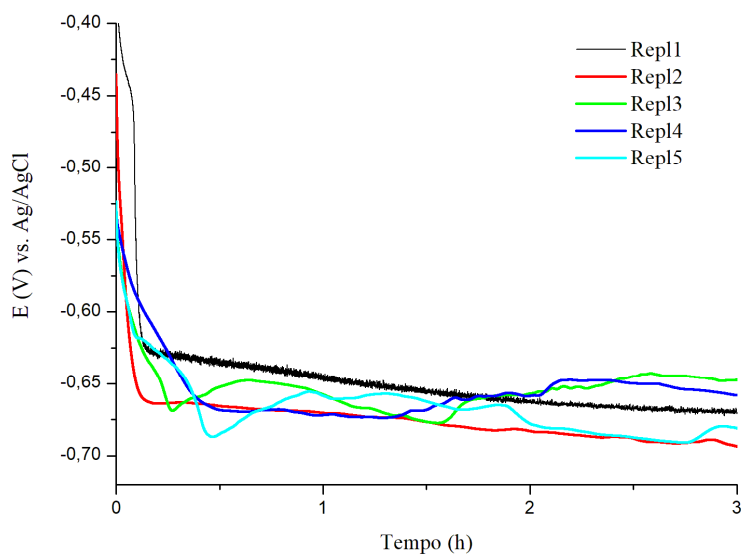
Fonte: Autor.

Figura 4.2.12 – Polarização de Tafel da região da deformação do Grau 100.



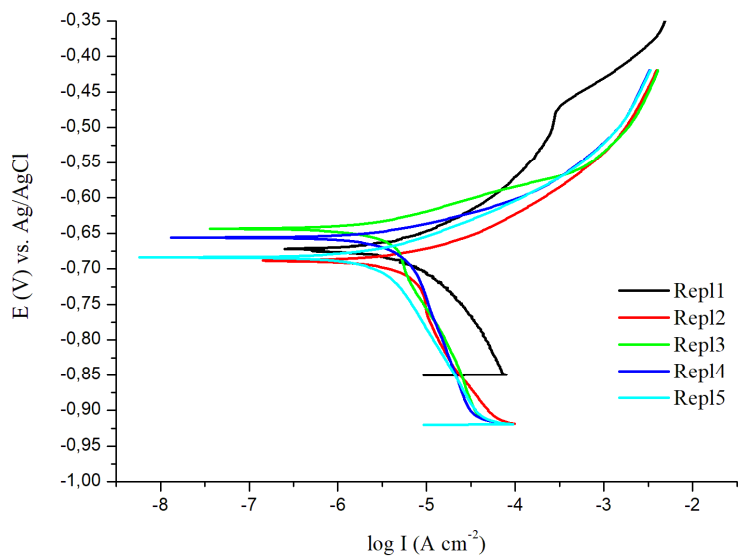
Fonte: Autor.

Figura 4.2.13 – Curvas de OCP da região da solda do aço Grau 120.



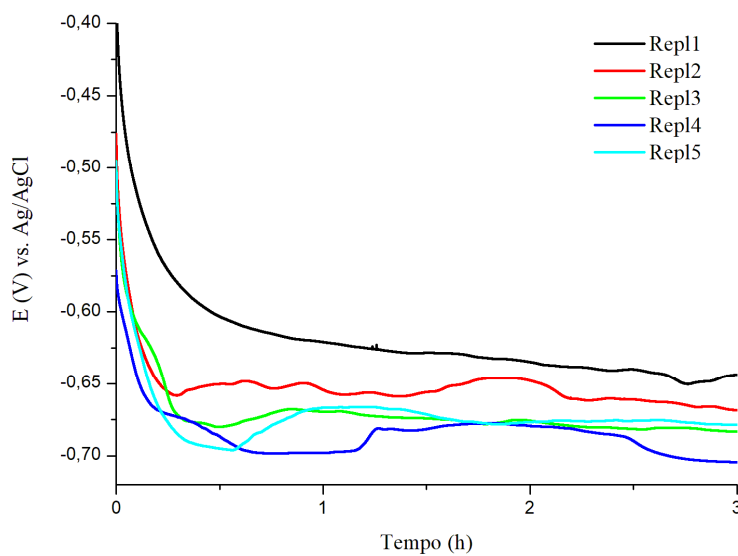
Fonte: Autor.

Figura 4.2.14 – Polarização de Tafel da região da solda do aço Grau 120.



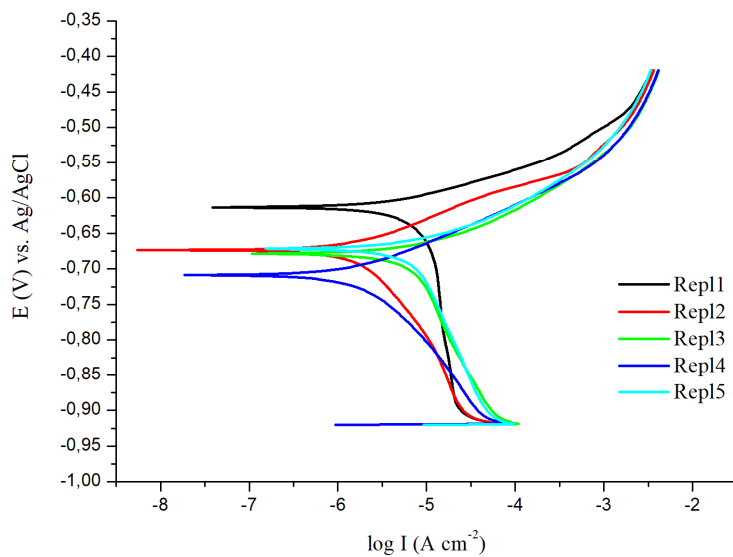
Fonte: Autor.

Figura 4.2.15 – Curvas de OCP da região do corpo do aço Grau 120.



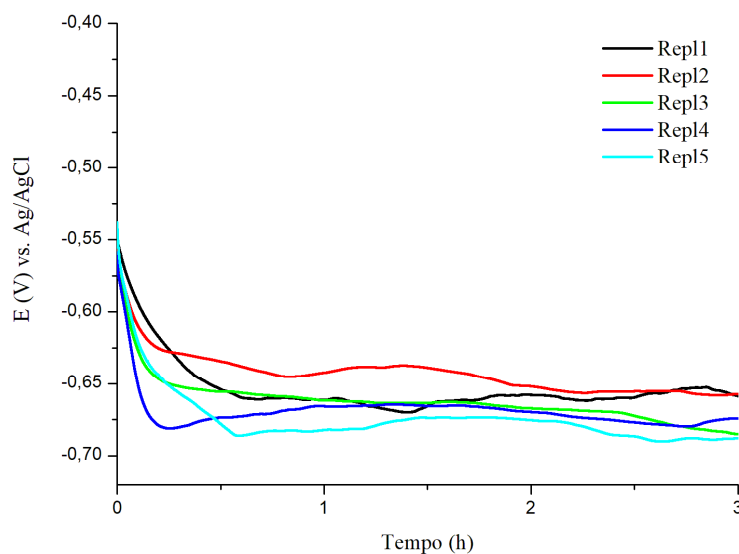
Fonte: Autor.

Figura 4.2.16 – Polarização de Tafel da região do corpo do aço Grau 120.



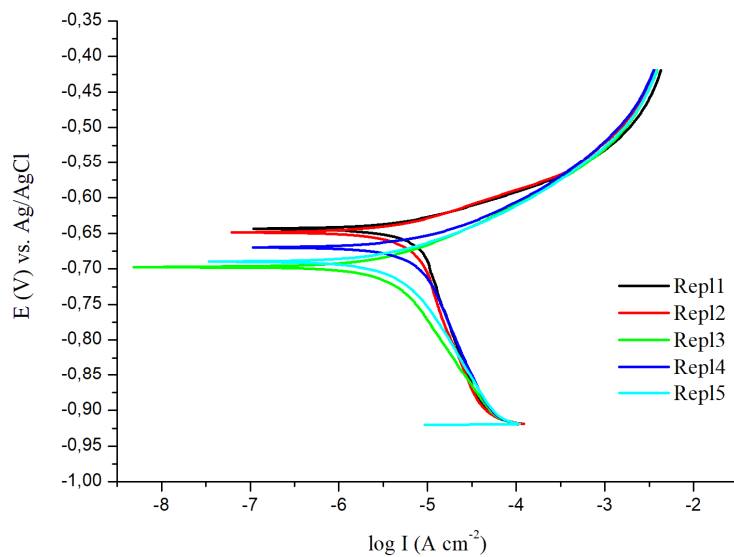
Fonte: Autor.

Figura 4.2.17 – Curvas de OCP da região da deformação do aço Grau 120.



Fonte: Autor.

Figura 4.2.18 – Polarização de Tafel da região da deformação do aço Grau 120.



Fonte: Autor.

De acordo com as figuras apresentadas acima, observa-se a diminuição do potencial de corrosão ao longo do tempo, comportamento característico de sistemas ativos e de corrosão generalizada.

Nota-se ainda que, após certo tempo de exposição para todas as condições avaliadas, as curvas de OCP atingem um estado estacionário com valores de potencial em torno de -0,67 V, aproximadamente. Tal fenômeno indica não haver alterações significativas nas reações anódicas e catódicas durante o processo de corrosão.

A dispersão entre as curvas, com os respectivos valores de OCP no estado estacionário demonstrados na Figura 4.2.5, é significativamente menor para a região de deformação do aço Grau 80, quando comparada às regiões da solda e do corpo. Nas curvas de Tafel, para essa mesma região, foi observado o mesmo comportamento (Figura 4.2.6).

Na Figura 4.2.10, que retrata o comportamento das curvas de Tafel referente à região do corpo do aço Grau 100, apresentou maior dispersão dos dados em relação às demais regiões do elo, cujos valores de potencial oscilaram entre -0,62 V e -0,71 V.

Na região do corpo do aço Grau 120 (Figura 4.2.15), observa-se também maior dispersão dos dados em comparação às demais curvas, embora o valor de OCP em seu estado estacionário tenha oscilado em torno do mesmo valor médio, ou seja, -0,67 V. O mesmo comportamento, nessa mesma região, foi observado nas curvas de Tafel (Figura 4.2.16).

Variações microestruturais, comparando-se as três regiões (solda, corpo e deformação), podem contribuir para o aumento da dispersão entre as curvas obtidas principalmente para os aços Grau 100 e Grau 120.

Estes fenômenos de dispersão dos dados serão melhor avaliados na comparação com os resultados das análises metalográficas, apresentados no tópico 4.4.

Durante a polarização de Tafel, foram registrados os limites eletroativos correspondentes às regiões lineares de uma varredura potenciodinâmica e, a partir dos ramos anódico e catódico, foram calculados os coeficientes de Tafel para ambos os ramos.

Os perfis obtidos foram muito similares, comparando-se os três diferentes tipos de aço e suas respectivas regiões do elo de corrente.



Em todos os casos, observou-se que a corrente catódica resultante é controlada, provavelmente, pela difusão de  $O_2$  dissolvido, uma vez que o meio é arejado naturalmente.

Dentro dos limites de Tafel ( $\pm 250$  mV do valor de OCP), os valores de  $E_{corr}$  determinados foram muito similares aos de OCP, indicando que este sistema não apresenta tendências à passivação (TAIT, 1994).

Os parâmetros obtidos nos ensaios eletroquímicos de OCP e da Polarização de Tafel foram calculados e os resultados são apresentados nas Tabelas 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3.

Todos os aços apresentaram maior resistência à corrosão na região do corpo, observando-se os maiores valores médios de  $R_p$ : 10,14 k $\Omega$ , 12,61 k $\Omega$  e 11,74 k $\Omega$  (Grau 80, Grau 100 e Grau 120, respectivamente), o que pode estar atribuído ao fato desta região ser mais homogênea por não sofrer nenhuma conformação termomecânica durante o processo de fabricação do elo.

Os aços Grau 80 e Grau 120, nas regiões da deformação, apresentaram menor valor médio de  $R_p$  (6,98 k $\Omega$  e 5,93 k $\Omega$ , respectivamente) e com os menores valores de desvio padrão se comparados às demais regiões (2,46 k $\Omega$  e 3,52 k $\Omega$ ), indicando menor variabilidade entre as replicatas.

No caso do aço de Grau 100, o menor valor de  $R_p$  foi conferido à região da solda (5,27 k $\Omega$ , com desvio padrão de 3,05 k $\Omega$ ). Estes resultados sugerem que tais regiões se apresentaram mais suscetíveis ao processo corrosivo e, portanto, menos resistentes à corrosão.

Tabela 4.2.1 – Resultados dos parâmetros obtidos nas curvas de OCP e Tafel - Grau 80.

Região do elo	Replicata	OCP E (V)	E <sub>corr</sub> (V)	I <sub>corr</sub> (μA/cm <sup>2</sup> )	β <sub>a</sub>	β <sub>c</sub>	R <sub>p</sub> (kΩ)
Solda	1	-0,71	-0,71	3,66	0,06	-0,18	10,58
	2	-0,66	-0,63	11,6	0,04	-0,38	1,56
	3	-0,69	-0,70	4,70	0,07	-0,23	8,70
	4	-0,70	-0,71	4,02	0,07	-0,15	13,11
	5	-0,66	-0,64	7,83	0,04	-0,31	2,81
	<b>Média</b>	-0,68	-0,68	6,36	0,05	-0,25	7,35
	<b>Desvio Padrão</b>	0,02	0,04	3,35	0,01	0,10	4,99
Corpo	1	-0,69	-0,70	7,21	0,07	0,31	3,54
	2	-0,67	-0,65	2,54	0,05	-0,25	10,30
	3	-0,69	-0,71	3,05	0,06	-0,12	19,15
	4	-0,70	-0,71	3,63	0,07	-0,15	14,25
	5	-0,66	-0,66	7,03	0,05	-0,31	3,46
	<b>Média</b>	-0,68	-0,69	4,69	0,06	-0,10	10,14
	<b>Desvio Padrão</b>	0,02	0,03	2,25	0,01	0,25	6,82
Deformação	1	-0,69	-0,70	3,93	0,06	-0,17	9,56
	2	-0,68	-0,69	6,42	0,07	-0,25	6,22
	3	-0,66	-0,67	10,3	0,07	-0,38	3,42
	4	-0,67	-0,68	4,86	0,06	-0,24	6,64
	5	-0,67	-0,69	3,90	0,06	-0,17	9,04
	<b>Média</b>	-0,67	-0,69	5,88	0,06	-0,24	6,98
	<b>Desvio Padrão</b>	0,01	0,01	2,67	0,01	0,08	2,46

Fonte: Autor.

Tabela 4.2.2 – Resultados dos parâmetros obtidos nas curvas de OCP e Tafel - Grau 100.

Região do elo	Replicata	OCP E (V)	Ecorr (V)	Icorr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$\beta_a$	$\beta_c$	Rp ( $\text{k}\Omega$ )
Solda	1	-0,68	-0,68	4,47	0,06	-0,15	10,36
	2	-0,64	-0,64	9,55	0,05	-0,39	2,66
	3	-0,67	-0,67	4,74	0,05	-0,25	5,41
	4	-0,68	-0,67	5,46	0,05	-0,50	4,65
	5	-0,66	-0,66	10,2	0,06	-0,39	3,25
	<b>Média</b>	-0,66	-0,66	6,88	0,06	-0,33	5,27
	<b>Desvio Padrão</b>	0,02	0,02	2,76	0,01	0,14	3,05
Corpo	1	-0,65	-0,62	1,36	0,04	-0,15	15,36
	2	-0,65	-0,65	3,12	0,04	-0,23	6,52
	3	-0,66	-0,68	4,53	0,06	-0,16	10,51
	4	-0,69	-0,71	4,33	0,07	-0,13	17,60
	5	-0,69	-0,69	5,45	0,09	-0,21	13,06
	<b>Média</b>	-0,67	-0,67	3,76	0,06	-0,18	12,61
	<b>Desvio Padrão</b>	0,02	0,04	1,58	0,02	0,05	4,31
Deformação	1	-0,67	-0,65	4,03	0,04	-0,24	5,29
	2	-0,67	-0,68	1,81	0,05	-0,16	15,50
	3	-0,67	-0,68	6,36	0,06	-0,27	5,33
	4	-0,69	-0,70	2,77	0,05	-0,14	14,13
	5	-0,68	-0,70	4,37	0,06	-0,17	9,73
	<b>Média</b>	-0,68	-0,68	3,87	0,05	-0,19	9,99
	<b>Desvio Padrão</b>	0,01	0,02	1,73	0,01	0,06	4,78

Fonte: Autor.

Tabela 4.2.3 – Resultados dos parâmetros obtidos nas curvas de OCP e Tafel - Grau 120.

Região do elo	Replicata	OCP E (V)	Ecorr (V)	Icorr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$\beta_a$	$\beta_c$	Rp ( $\text{k}\Omega$ )
Solda	1	-0,67	-0,67	6,32	0,08	-0,13	13,09
	2	-0,69	-0,70	8,33	0,07	-0,74	4,15
	3	-0,65	-0,63	3,24	0,03	-0,29	4,62
	4	-0,66	-0,67	6,11	0,06	-0,33	4,98
	5	-0,68	-0,69	3,41	0,06	-0,20	10,10
	<b>Média</b>	-0,67	-0,67	5,48	0,06	-0,34	7,39
	<b>Desvio Padrão</b>	0,02	0,03	2,15	0,02	0,24	4,00
Corpo	1	-0,64	-0,61	6,53	0,04	-0,27	3,51
	2	-0,67	-0,67	1,58	0,05	-0,16	20,77
	3	-0,68	-0,70	8,07	0,07	-0,29	5,15
	4	-0,70	-0,71	1,84	0,06	-0,13	24,17
	5	-0,68	-0,69	7,84	0,07	-0,27	5,09
	<b>Média</b>	-0,68	-0,67	5,17	0,06	-0,22	11,74
	<b>Desvio Padrão</b>	0,02	0,04	3,22	0,01	0,08	9,89
Deformação	1	-0,66	-0,64	7,59	0,04	-0,39	2,83
	2	-0,66	-0,64	6,63	0,04	-0,39	2,99
	3	-0,69	-0,70	3,87	0,06	-0,18	10,65
	4	-0,67	-0,68	7,73	0,06	-0,28	4,59
	5	-0,69	-0,69	4,54	0,06	-0,18	8,60
	<b>Média</b>	-0,67	-0,67	6,07	0,05	-0,28	5,93
	<b>Desvio Padrão</b>	0,01	0,03	1,77	0,01	0,10	3,52

Fonte: Autor.

No aço Grau 80, os valores médios de  $I_{\text{corr}}$  apresentaram variação entre 4 e 6  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , aproximadamente. Esta oscilação não é considerada significativa comparando-se os resultados das três regiões deste mesmo elo de corrente. Destaque para a região do corpo, que apresentou menor valor de densidade de corrente de corrosão ( $I_{\text{corr}} = 4,69 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ; desvio padrão = 2,25  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ), o que indica maior resistência à corrosão neste meio.

Já no aço Grau 100, não foi observada variação significativa nos valores médios de  $I_{\text{corr}}$  entre as regiões do corpo e da deformação (3,8  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , aproximadamente), porém a região da solda apresentou valor de densidade de corrente maior (6,9  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).

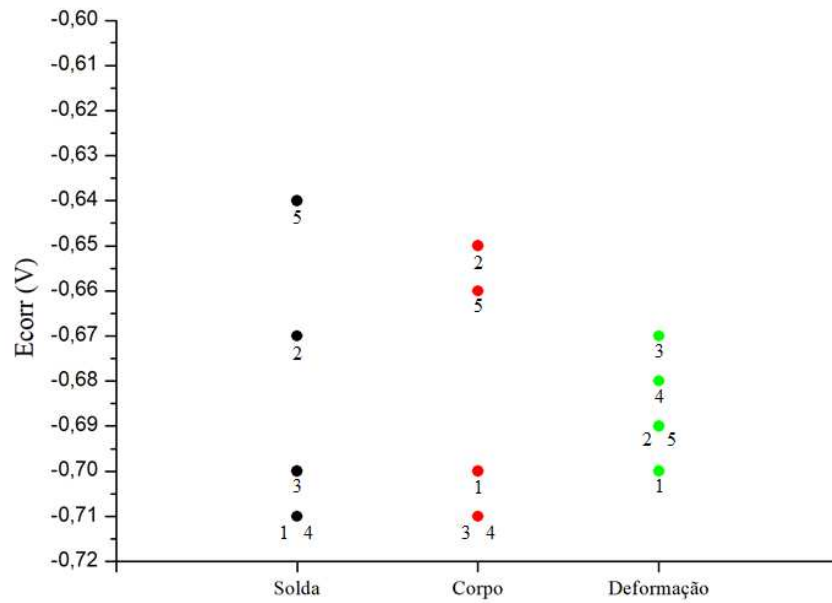
Esta diferença pode ser atribuída às propriedades intrínsecas da ZTA (zona termicamente afetada pelo calor) que tende a alterar a morfologia microestrutural neste local. A região do corpo, ainda, foi a que apresentou menor variabilidade entre as replicatas ensaiadas (desvio padrão = 1,58  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ), não somente da amostra de Grau 100, mas de todos os aços estudados neste trabalho.

Os valores médios de  $I_{\text{corr}}$  encontrados para o aço Grau 120 também foram muito similares, comparando-se as três regiões do elo (entre 5 e 6  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , aproximadamente), com menor variabilidade nos resultados observada na região da deformação (desvio padrão = 1,77  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ). Sensivelmente nessa região, ainda, obteve-se o maior valor médio de  $I_{\text{corr}}$  da amostra (6,07  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ), o que não acompanhou o fenômeno observado nos aços Grau 80 e Grau 100 referente à ZTA nas regiões da solda destes aços.

A seguir, serão apresentados os diagramas de dispersão dos valores de  $E_{\text{corr}}$  e  $I_{\text{corr}}$  obtidos para as três regiões do elo de corrente, elaborados com o auxílio de software específico.

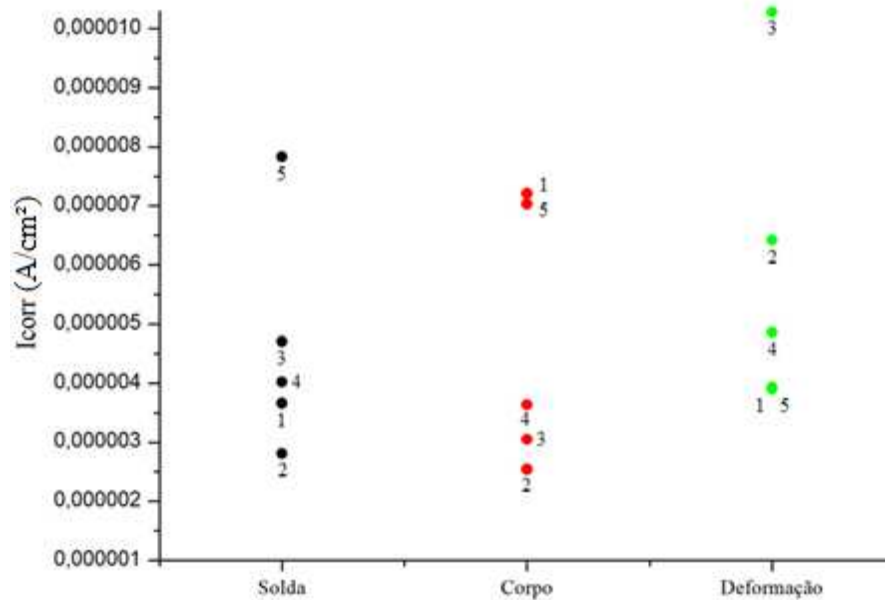
De acordo com as Figuras 4.2.19 e 4.2.20, verifica-se que a dispersão dos valores de  $E_{\text{corr}}$  é menor para os dados correspondentes à região da deformação do aço Grau 80, o que pode indicar menor heterogeneidade superficial nessa região do elo. Observa-se um comportamento semelhante no diagrama de  $I_{\text{corr}}$  deste aço. Além disso, cerca de 80% das replicatas apresentaram valores de densidade de corrente de corrosão abaixo de 7  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

Figura 4.2.19 – Diagrama de dispersão do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) para as diferentes regiões do elo de corrente – Grau 80.



Fonte: Autor.

Figura 4.2.20 – Diagrama de dispersão da densidade de corrente de corrosão ( $I_{corr}$ ) para as diferentes regiões do elo de corrente – Grau 80.

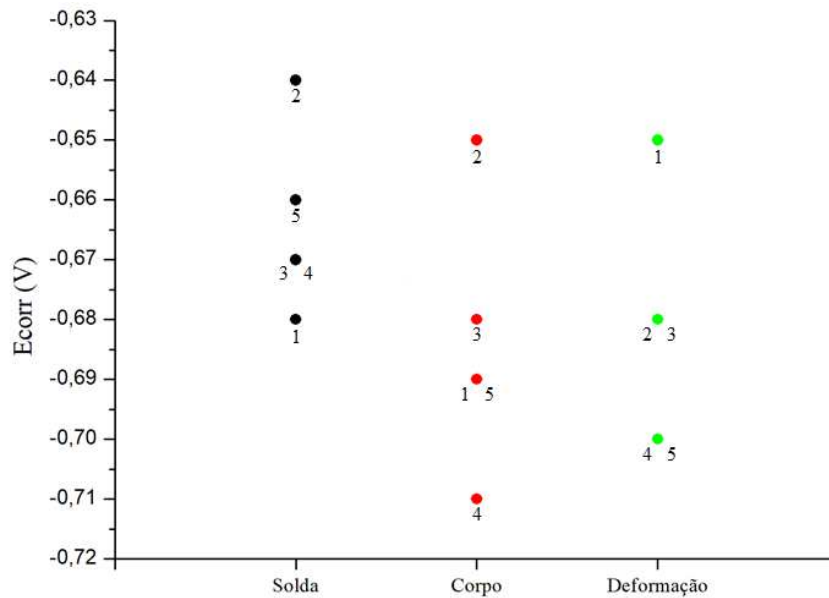


Fonte: Autor.

Nas Figuras 4.2.21 e 4.2.22 a seguir, os diagramas de dispersão indicam também baixa variabilidade entre os valores, havendo maior concentração dos valores de  $E_{\text{corr}}$  numa faixa de potencial compreendida entre -0,67 V e -0,70 V.

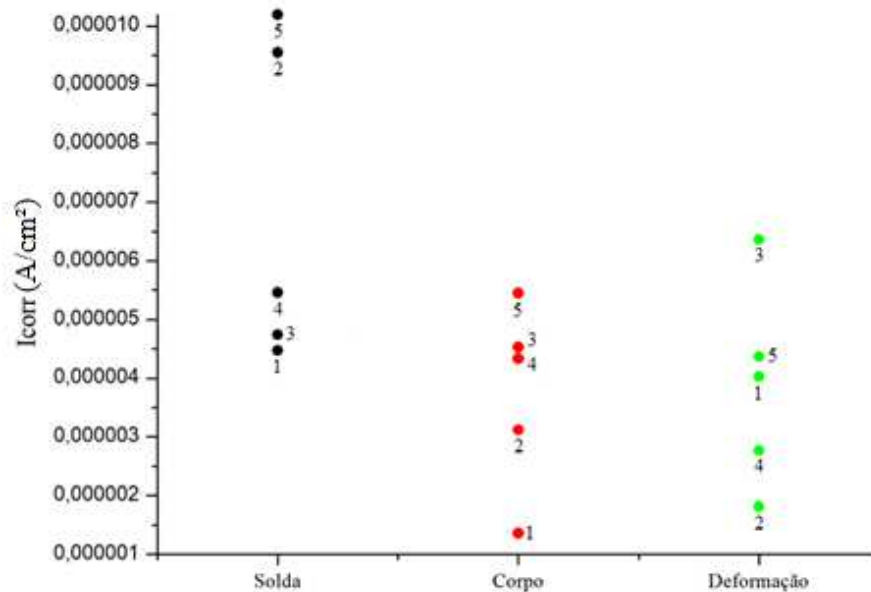
O diagrama de  $I_{\text{corr}}$  demonstra que grande parte das replicatas (cerca de 87%) apresentaram valores abaixo de  $7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Esta mesma disposição dos dados de  $I_{\text{corr}}$  foi observada anteriormente no diagrama do aço Grau 80 (Figura 4.2.20).

Figura 4.2.21 – Diagrama de dispersão do potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ) para as diferentes regiões do elo de corrente – Grau 100.



Fonte: Autor.

Figura 4.2.22 – Diagrama de dispersão da densidade de corrente de corrosão ( $I_{\text{corr}}$ ) para as diferentes regiões do elo de corrente – Grau 100.



Fonte: Autor.

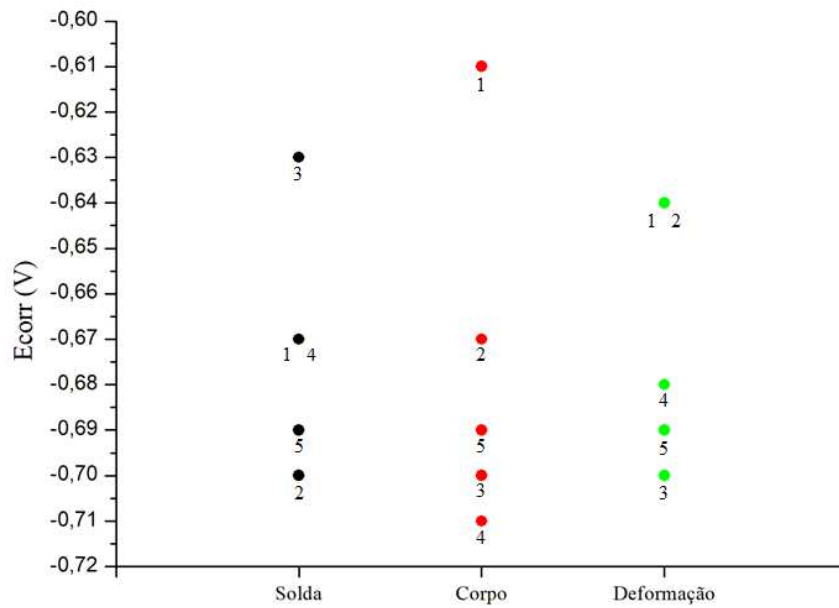
Os diagramas de  $E_{\text{corr}}$  e  $I_{\text{corr}}$  referentes ao aço Grau 120 (Figuras 4.2.23 e 4.2.24) apresentaram comportamentos um pouco distintos dos anteriores. Observa-se maior dispersão dos dados entre as replicatas, principalmente entre as regiões da solda e do corpo. Este fenômeno pode estar relacionado à presença de heterogeneidades superficiais nas amostras.

Verifica-se, ainda, que três replicatas de cada região ensaiada deste aço, apresentaram valores de densidade de corrente de corrosão acima de  $5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  (cerca de 60%), o que demonstra certo equilíbrio dos dados de dispersão se comparados às regiões dos aços discutidas anteriormente.

Este fenômeno sugere que o processamento do aço Grau 120 não tende a influenciar suas propriedades microestruturais e, conseqüentemente, a corrente de corrosão. Este fenômeno será melhor avaliado ao comparar com os dados obtidos na metalografia.

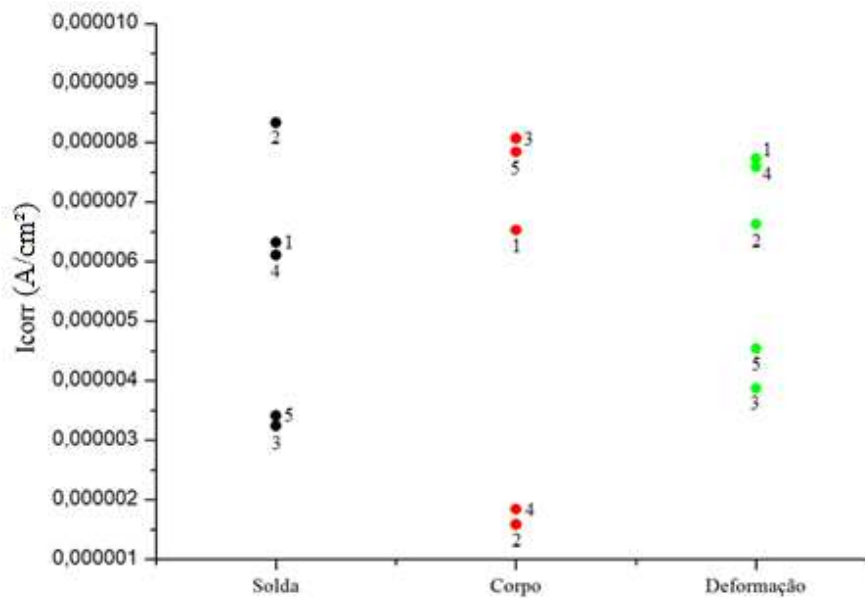


Figura 4.2.23 – Diagrama de dispersão do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) para as diferentes regiões do elo de corrente – Grau 120.



Fonte: Autor.

Figura 4.2.24 – Diagrama de dispersão da densidade de corrente de corrosão ( $I_{corr}$ ) para as diferentes regiões do elo de corrente – Grau 120.



Fonte: Autor.

### 4.3 ENSAIOS DE CORROSÃO POR PERDA DE MASSA

Conforme descrito no tópico 3.2.3, após permanecerem imersas por dez dias na solução sintética da água do mar, as amostras foram lavadas em água destilada para remoção dos produtos de corrosão e secas com ar frio.

Em seguida, foram submetidas aos ciclos de decapagem com posterior pesagem na balança analítica para verificação e registro dos valores de perda de massa.

Os resultados obtidos na pesagem após cada ciclo de decapagem estão demonstrados na Tabela 4.3.1.

Estes valores tabelados também foram representados graficamente por meio das Figuras 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3.

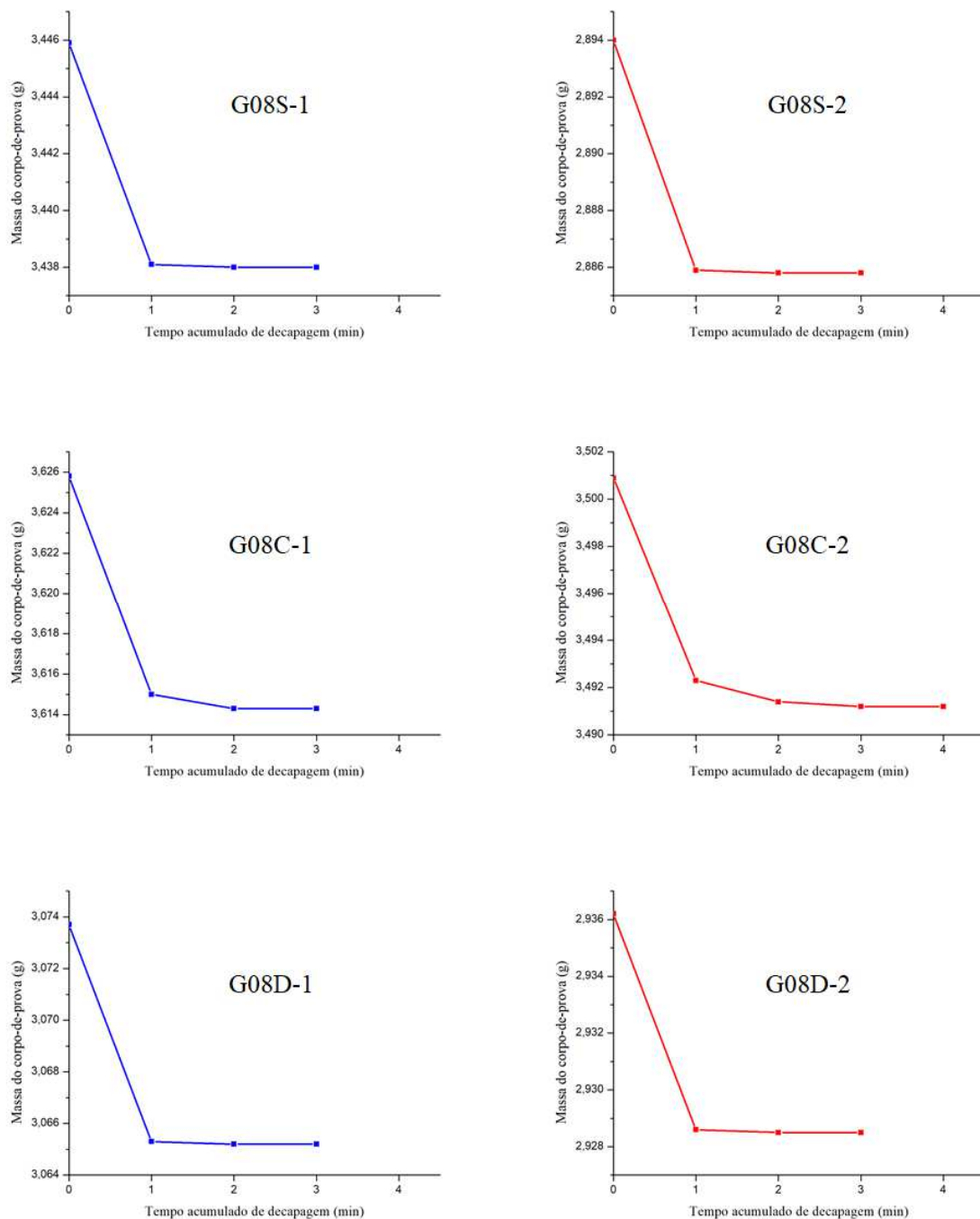
Verifica-se claramente que, como não há tendência à passivação, cujo fenômeno foi constatado anteriormente ao observar a similaridade entre os valores de  $E_{\text{corr}}$  e de OCP, obtidos por meio dos parâmetros extraídos das curvas de Tafel, a perda de massa das amostras após os ciclos de decapagem é mínima, considerando todas as regiões dos aços que formam os elos de corrente.

Tabela 4.3.1 – Perda de massa observada em cada amostra, após os ciclos de decapagem.

Amostra	Massa inicial (g)	Massa após decapagem (g)			
		1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>
G08S-1	3,4459	3,4381	3,4380	3,4380	-
G08S-2	2,8940	2,8859	2,8858	2,8858	-
G10S-1	4,0641	4,0543	4,0540	4,0540	-
G10S-2	3,8403	3,8311	3,8310	3,8309	3,8309
G12S-1	3,6320	3,6237	3,6224	3,6223	3,6223
G12S-2	2,7650	2,7519	2,7514	2,7514	-
G08C-1	3,6258	3,6150	3,6143	3,6143	-
G08C-2	3,5009	3,4923	3,4914	3,4912	3,4912
G10C-1	3,9613	3,9549	3,9548	3,9548	-
G10C-2	4,8280	4,8218	4,8214	4,8212	4,8212
G12C-1	3,9941	3,9852	3,9851	3,9850	3,9850
G12C-2	3,9120	3,8995	3,8993	3,8993	-
G08D-1	3,0737	3,0653	3,0652	3,0652	-
G08D-2	2,9362	2,9286	2,9285	2,9285	-
G10D-1	2,7639	2,7572	2,7571	2,7571	-
G10D-2	2,3578	2,3503	2,3502	2,3502	-
G12D-1	3,1670	3,1589	3,1586	3,1585	3,1585
G12D-2	2,9740	2,9651	2,9649	2,9648	2,9648

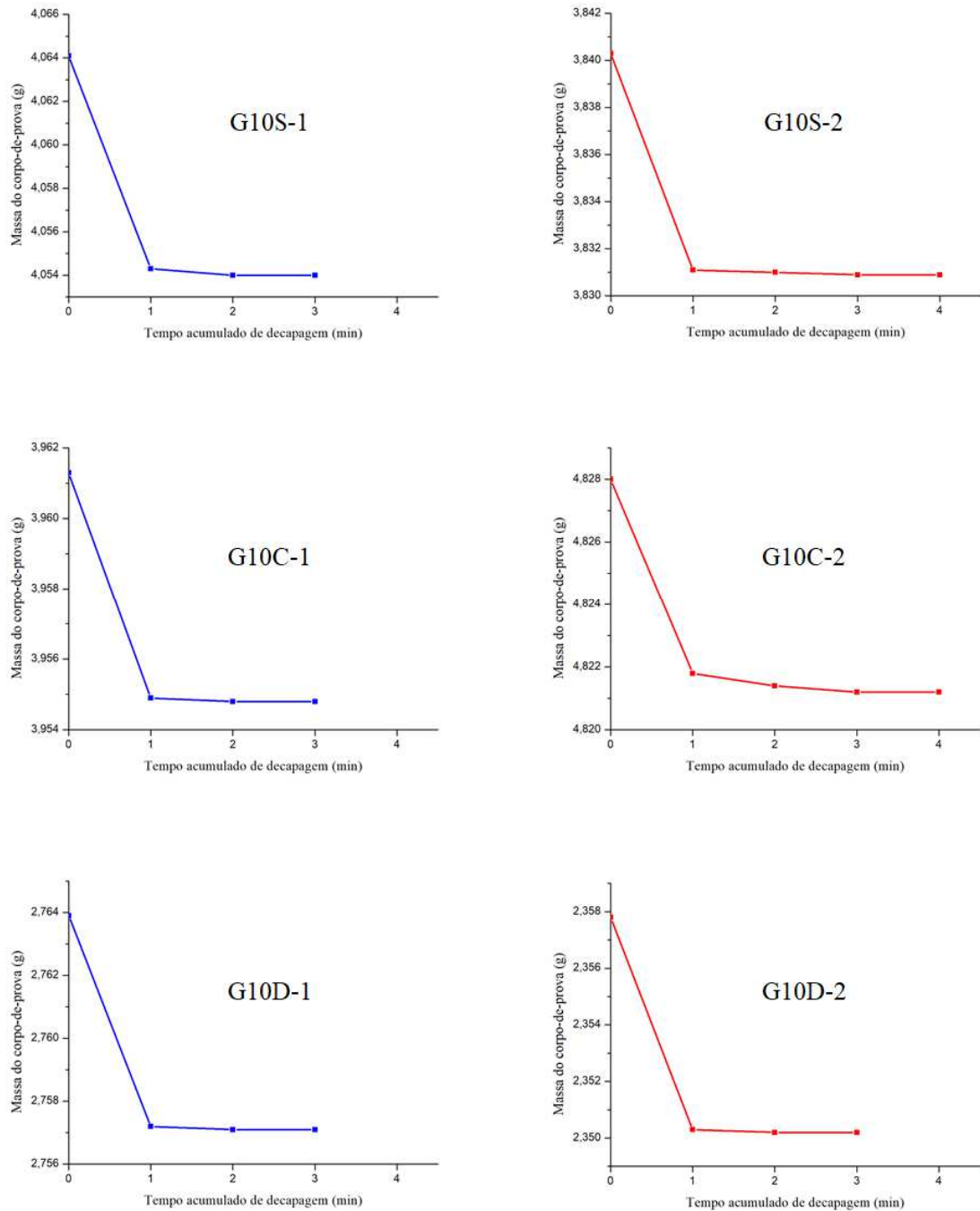
Fonte: Autor.

Figura 4.3.1 – Perda de massa das amostras extraídas das três regiões do aço Grau 80, a cada ciclo de decapagem.



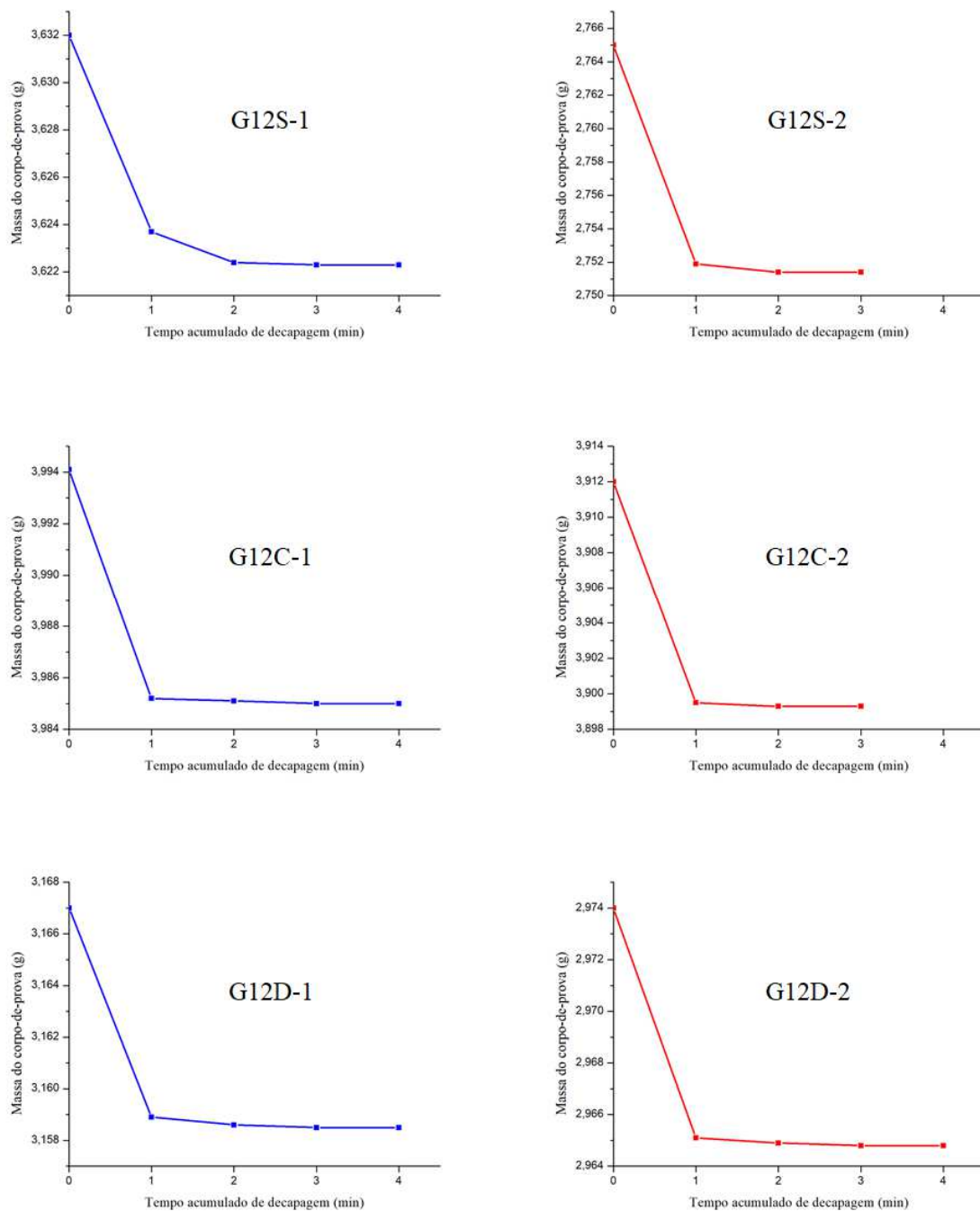
Fonte: Autor.

Figura 4.3.2 – Perda de massa das amostras extraídas das três regiões do aço Grau 100, a cada ciclo de decapagem.



Fonte: Autor.

Figura 4.3.3 – Perda de massa das amostras extraídas das três regiões do aço Grau 120, a cada ciclo de decapagem.



Fonte: Autor.

A partir das dimensões e das áreas superficiais expostas de cada amostra, foram calculados os valores percentuais de perda de massa relativa por unidade de área. Os valores médios apresentados na Tabela 4.3.2 (entre 0,05 e 0,08 %/cm<sup>2</sup>) indicam que não há diferença significativa de perda de massa entre as regiões dos aços estudados quando submetidos a longos períodos de imersão na água do mar sintética.

Tabela 4.3.2 – Valores percentuais de perda de massa por unidade de área.

<b>Amostra</b>	<b>Área superficial (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Perda de massa relativa/amostra (%/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Média (%/cm<sup>2</sup>)</b>
G08S-1	4,37	0,05	0,06
G08S-2	3,94	0,07	
G10S-1	4,76	0,05	0,05
G10S-2	4,63	0,05	
G12S-1	4,47	0,06	0,05
G12S-2	5,01	0,03	
G08C-1	4,29	0,07	0,07
G08C-2	4,27	0,06	
G10C-1	4,66	0,04	0,08
G10C-2	4,26	0,12	
G12C-1	4,79	0,05	0,06
G12C-2	4,76	0,07	
G08D-1	3,96	0,07	0,07
G08D-2	3,95	0,07	
G10D-1	4,19	0,06	0,07
G10D-2	4,00	0,08	
G12D-1	4,45	0,06	0,07
G12D-2	4,23	0,07	

Fonte: Autor.

#### 4.4 MICROSCOPIA ÓPTICA

Como já mencionado anteriormente no tópico 3.3, esta etapa consiste apenas em verificar se há diferenças entre os microconstituintes presentes nos aços e comparar com os resultados obtidos nos ensaios de corrosão, a fim de avaliar de que forma as diferenças, se existentes, influenciaram estes resultados.

As superfícies das amostras foram previamente preparadas, atacadas com o reagente químico Nital e submetidas à caracterização microestrutural para identificação das fases presentes nas regiões da solda, do corpo e da deformação dos elos de corrente. As micrografias obtidas estão ilustradas nas Figuras 4.4.1, 4.4.2 e 4.4.3.

Assim, utilizando-se do microscópio óptico com ampliação de 500 vezes, as imagens obtidas para cada amostra revelaram microestruturas bastante similares entre si, caracterizando fases aparentemente bainíticas e martensíticas (típicas de aços tratados termicamente por têmpera e revenido, o que corrobora com as normas técnicas), representadas pelas tonalidades mais escuras.

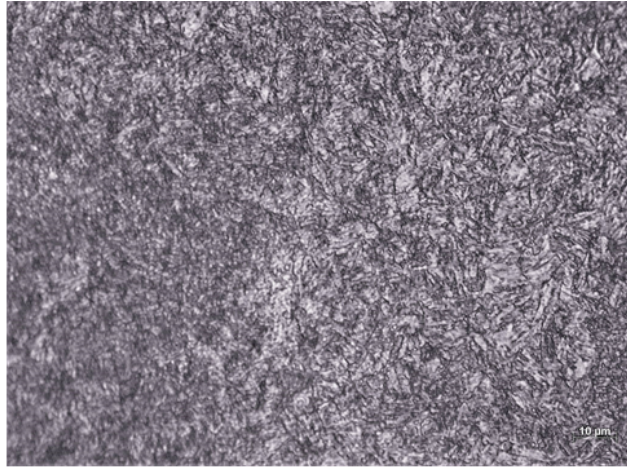
A obtenção da microestrutura bainítica ocorre em função do processamento termomecânico efetuado de forma controlada, e não somente devido aos elementos de liga Ni e Cr adicionados à composição dos aços abordados neste estudo.

Observa-se a formação de inúmeras ripas de bainita, com geometria fina e grosseira, alternando entre feixes dispostos de forma paralela com morfologia acicular, e feixes desorganizados dispostos sob diferentes orientações cristalográficas ao longo da matriz mais clara.

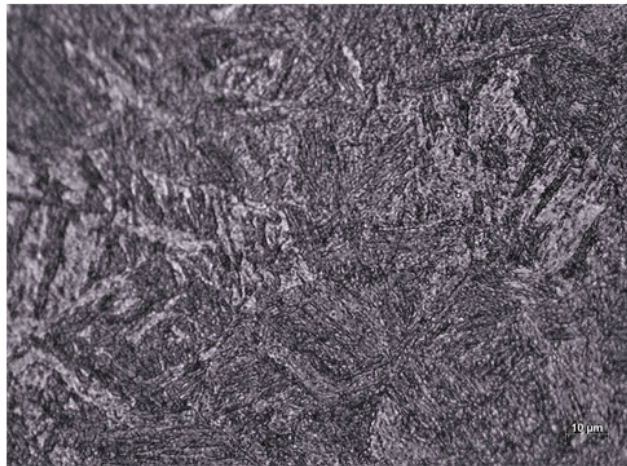
As regiões mais claras, neste caso, tendem a indicar a presença de fases residuais de ferrita e austenita retida que não sofreram transformação durante o tratamento térmico. Entretanto, não é possível afirmar com exatidão esta suspeita considerando apenas os resultados deste ataque químico empregado, pois as imagens apresentaram pouca nitidez para uma análise adequada e, portanto, não proporcionou a eficácia desejada para caracterizar estas microestruturas.



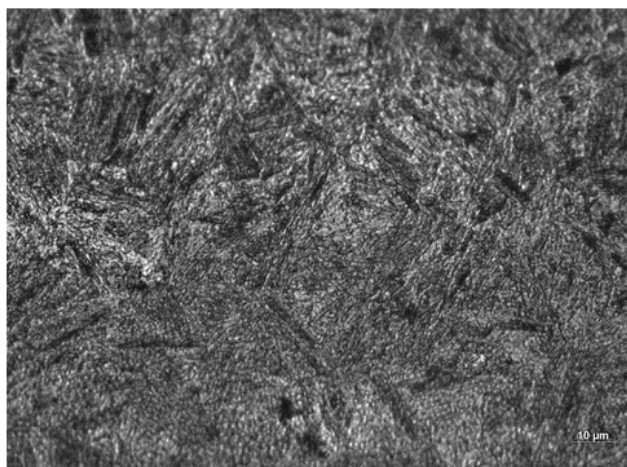
Figura 4.4.1 – Micrografia das três regiões do elo de corrente - Grau 80. Ataque: Nital 2%.  
Ampliação: 500 vezes.



Amostra G08S – Ampliação: 500 vezes.



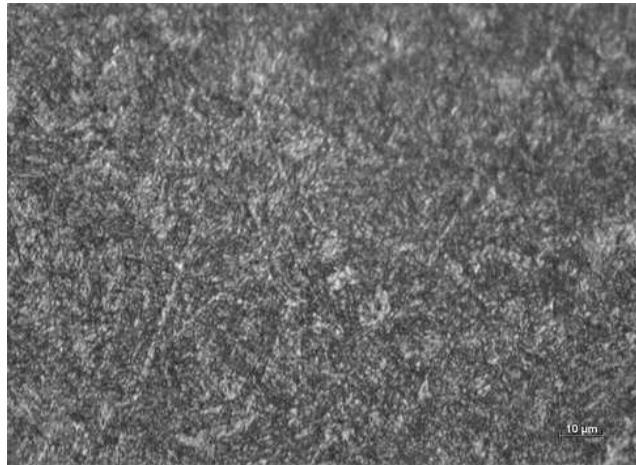
Amostra G08C – Ampliação: 500 vezes.



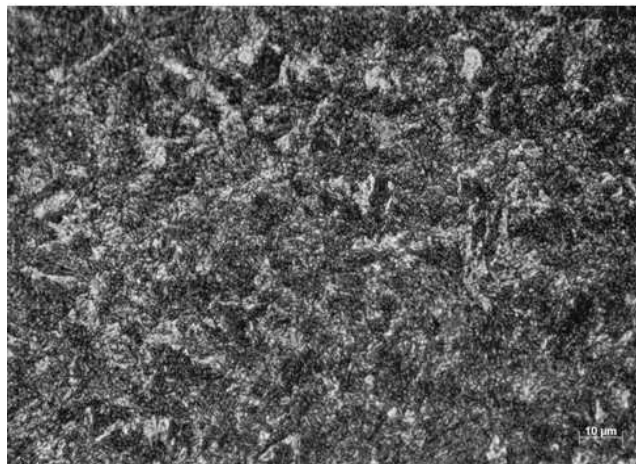
Amostra G08D – Ampliação: 500 vezes.

Fonte: Autor.

Figura 4.4.2 – Micrografia das três regiões do elo de corrente - Grau 100. Ataque: Nital 2%.  
Ampliação: 500 vezes.



Amostra G10S – Ampliação: 500 vezes.



Amostra G10C – Ampliação: 500 vezes.

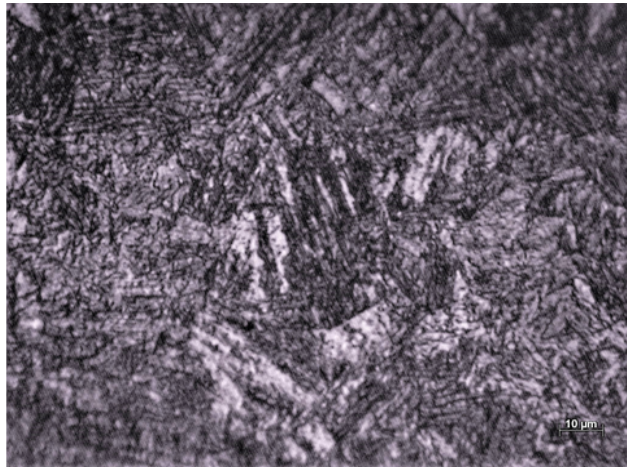


Amostra G10D – Ampliação: 500 vezes.

Fonte: Autor.



Figura 4.4.3 – Micrografia das três regiões do elo de corrente - Grau 120. Ataque: Nital 2%.  
Ampliação: 500 vezes.



Amostra G12S – Ampliação: 500 vezes.



Amostra G12C – Ampliação: 500 vezes.



Amostra G12D – Ampliação: 500 vezes.

Fonte: Autor.

Utilizando o software *Image J*, foi realizado o processamento das imagens observadas nas Figuras 4.4.1, 4.4.2 e 4.4.3, por meio do qual foi possível quantificar a fração volumétrica média das fases presentes em cada região dos elos de corrente. Os resultados são apresentados na Tabela 4.4.1.

De acordo com os resultados apresentados nesta tabela, o que poderia indicar uma correlação seriam os valores percentuais de “bainita + martensita” observados nas regiões da solda dos aços Grau 80 e Grau 100 (*G08S* e *G10S*), no que diz respeito à ZTA. Entretanto, verifica-se também altos valores percentuais para os aços Grau 100 e Grau 120 nas regiões da deformação (*G10D* e *G12D*).

Estes resultados percentuais, encontrados a partir das micrografias obtidas, apesar de aparentemente demonstrarem certa variabilidade entre os aços, não podem ser considerados conclusivos a ponto de indicar diferenças microestruturais entre os aços e suas respectivas regiões que poderiam ter influenciado significativamente os resultados dos ensaios de corrosão.

Tabela 4.4.1 – Fração volumétrica média das fases presentes nas regiões dos elos de corrente Grau 80, Grau 100 e Grau 120.

Fases presentes	Aços / regiões do elo								
	G08S	G08C	G08D	G10S	G10C	G10D	G12S	G12C	G12D
<b>Bainita + Martensita (%)</b>	88,1	67,19	64,77	74,21	60,56	79,37	68,96	62,82	89,11
<b>Outras fases (%)</b>	11,9	32,81	35,23	25,79	39,44	20,63	31,04	37,18	10,89
<b>Desvio padrão (%)</b>	2,81	4,34	5,2	2,41	5,11	6,52	7,63	10,26	5,62

Fonte: Autor.

## 5 CONCLUSÕES

Considerando os resultados obtidos nos ensaios eletroquímicos (OCP e Tafel), nos ensaios de corrosão por perda de massa e na microscopia óptica, é possível concluir que:

- a) O processo de corrosão dos aços ASTM Grau 80, Grau 100 e Grau 120, submetidos à exposição à água do mar sintética, é controlado pela difusão de  $O_2$  dissolvido neste meio. Os valores de OCP e do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) obtidos foram muito similares entre si para todos os cenários observados. A região do corpo de todos os aços demonstrou maior resistência à corrosão, obtendo os maiores valores médios de resistência de polarização ( $R_p$ ). As densidades de corrente de corrosão ( $I_{corr}$ ) são baixas e da mesma ordem de magnitude (abaixo de  $7 \mu A/cm^2$ );
- b) Nos ensaios de imersão, cujas amostras permaneceram mergulhadas na água do mar sintética por dez dias, a perda de massa das amostras observada após os ciclos de decapagem foi mínima. Os resultados indicaram não haver diferença significativa de perda de massa entre as regiões dos aços estudados. O comportamento das curvas de perda de massa é similar aos ensaios de imersão encontrados na literatura científica.
- c) Com o objetivo de conhecer as fases presentes nos aços para auxiliar na análise dos resultados dos ensaios de corrosão, a fim de avaliar a influência das potenciais variações microestruturais nestes resultados, pode-se dizer que este objetivo foi alcançado, mesmo apesar do ataque químico não ter proporcionado a eficácia esperada para caracterizar estas microestruturas. As imagens revelaram microestruturas bastante similares entre si, demonstrando aparentemente as fases bainíticas e martensíticas (regiões mais escuras), e indicando, possivelmente também, fases residuais de ferrita e austenita retida (regiões mais claras).

## 6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Conforme mencionado no Capítulo 3, as amostras de correntes disponibilizadas pelo fabricante encontravam-se em condições estáticas de armazenamento e sem utilização anterior em operações de elevação de cargas. É possível que a região da deformação represente maior risco de falhas ao longo do tempo por se tratar de um local de maior tensão e desgaste por atrito entre os elos, quando comparada às demais regiões que não sofrem esta interação mecânica continuamente.

Portanto, como sugestão para trabalhos futuros, caso haja interesse em melhor investigar ou comparar os resultados obtidos neste estudo, seria interessante sujeitar lingas de corrente a ensaios mecânicos de tração, ensaios com líquidos penetrantes e/ou com partículas magnéticas após determinado tempo de uso em atmosferas marinhas, a fim de avaliar a perda da capacidade de carga para determinação de sua vida útil em operação, mesmo que as dimensões nominais de fabricação dos elos estejam dentro dos limites de tolerância estabelecidos pelas normas técnicas, evidenciados por meio de inspeções de segurança.

Sugere-se, ainda, aprofundar estudos sobre a correlação entre a microestrutura e o efeito da corrosão atmosférica marinha sobre os aços ASTM Grau 80, Grau 100 e Grau 120, especialmente quanto às fases presentes na microestrutura destes aços.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Comitês técnicos de normalização**. Disponível em: <<http://www.abnt.org.br/normalizacao/comites-tecnicos>>. Acesso em: 29 jun. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13541-1**: linga de cabo de aço. Parte 1: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13541-2**: linga de cabo de aço. Parte 2: utilização e inspeção. Rio de Janeiro, 2017a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14643**: corrosão atmosférica - classificação da corrosividade de atmosferas. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15516-1**: corrente de elos curtos para elevação de cargas - lingas de correntes. Parte 1: grau 8 - requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15516-2**: corrente de elos curtos para elevação de cargas - lingas de correntes. Parte 2: utilização, manutenção e inspeção. Rio de Janeiro, 2013b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15637-1**: cintas têxteis para elevação de cargas. Parte 1: cintas planas manufaturadas, com fitas tecidas com fios sintéticos de alta tenacidade formados por multifilamentos. Rio de Janeiro, 2017b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15637-2**: cintas têxteis para elevação de cargas. Parte 2: cintas tubulares manufaturadas, com fitas tecidas com fios sintéticos de alta tenacidade formados por multifilamentos. Rio de Janeiro, 2017c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15637-3**: cintas têxteis para elevação de cargas. Parte 3: cintas tubulares manufaturadas, com cordões de fios sintéticos de ultra alta tenacidade formados por multifilamentos. Rio de Janeiro, 2017d.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 3076**: corrente de elos curtos de aço de seção circular para elevação de cargas - correntes de tolerância média para lingas de corrente grau 8. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 8539**: acessórios de aço forjado para utilização em elevação com correntes de grau 8. Rio de Janeiro, 2013c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 16798**: anel de carga grau 8 para uso em lingas. Rio de Janeiro, 2007.
- AL-FADHALAH, Khaled; ELKHOLY, Ahmed; MAJEED, Majed. Failure analysis of Grade-80 alloy steel towing chain links. **Engineering Failure Analysis**, Oxford, v. 17, n. 7-8, p. 1542-1550, 2010.

ANAZAWA, Roberto Masato. **Caracterização mecânica e microestrutural de um aço 300M com microestrutura multifásica**. 2007. 193 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica – Projetos e Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals handbook: metallography and microstructures**. Metals Park, Ohio: ASM, 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TEST MATERIALS. **A391**: standard specification for grade 80 alloy steel chain. West Conshohocken, 2012a.

AMERICAN SOCIETY FOR TEST MATERIALS. **A906**: standard specification for grade 80 and grade 100 alloy steel chain slings for overhead lifting. West Conshohocken, 2016a.

AMERICAN SOCIETY FOR TEST MATERIALS. **A952**: standard specification for forged grade 80 and grade 100 steel lifting components and welded attachment links. West Conshohocken, 2016b.

AMERICAN SOCIETY FOR TEST MATERIALS. **A973**: standard specification for grade 100 alloy steel chain. West Conshohocken, 2012b.

AMERICAN SOCIETY FOR TEST MATERIALS. **D1141-98**: standard practice for the preparation of substitute ocean water. West Conshohocken, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TEST MATERIALS. **F22-02**: standard test method for hydrophobic surface films by the water-break test. West Conshohocken, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TEST MATERIALS. **G1-90**: standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens. West Conshohocken, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TEST MATERIALS. **G31-72**: standard practice for laboratory immersion corrosion testing of metals. West Conshohocken, 2004.

BRAMFITT, B. L.; LAWRENCE, S. J. Metallography and microstructures of carbon and low-alloy steels. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 2004, Ohio. **Metals handbook: metallography and microstructures**. Metals Park, Ohio: ASM, 2004.

BRASIL. Ministério do Trabalho. **Norma regulamentadora nº 11**: transporte, movimentação, armazenagem e manuseio de materiais. Disponível em: <<http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR11.pdf>>. Acesso em: 25 jul. 2018.

BRASIL. Secretaria de Previdência Social. **AEAT - Anuário Estatístico de Acidentes do Trabalho**. Disponível em: <<http://www.previdencia.gov.br/dados-abertos/dados-abertos-sst/>>. Acesso em: 29 jun. 2018.

CALLISTER JÚNIOR, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 8.ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2012.



CAPELA, M. V. et al. Repeatability of corrosion parameters for titanium–molybdenum alloys in 0.9% NaCl solution. **Journal of Alloys and Compounds**, Lausanne, v. 465, n. 1-2, p. 479-483, 2008.

CARDOSO, A. S. M. **Caracterização mecânica e microestrutural dos aços SAE 4340 e 300M após soldagem a laser e tratamento superficial de nitretação a plasma**. 2011. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais – Materiais Metálicos, Cerâmicos e Poliméricos) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

CARNEIRO, R. A.; ALVARENGA, E. A. **Novos aços estruturais de elevada resistência à corrosão marinha**. Disponível em: <<http://www.abcem.org.br/construmetal/2010/downloads/contribuicoes-tecnicas/21-novos-acos-estruturais-de-elevada-resistencia-a-corrosao-marinha.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2016.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1996.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1994.

CORVO, F. et al. Changes in atmospheric corrosion rate caused by chloride ions depending on rain regime. **Corrosion Science**, Oxford, v. 47, n. 4, p. 883-892, 2005.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **EN 818-1: kurzgliedrige rundstahlketten für hebezwecke - sicherheit - teil 1: allgemeine abnahmebedingungen**. Berlin, 2008a.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 818-4: kurzgliedrige rundstahlketten für hebezwecke - sicherheit - teil 4: anschlagketten - güteklasse 8**. Berlin, 2008b.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **PAS 1061: rundstahlketten für anschlagketten – güteklasse 10**. Berlin, 2006.

DOMINGUES, H. C. N. **Estudo do comportamento eletroquímico do aço carbono, em meio de bicarbonato de sódio e gás carbônico, utilizando a técnica do ruído eletroquímico**. 2010. 211 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Tecnologia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

EILISES, C.C.A. et al. Caracterização mecânica e microestrutural de um aço baixo carbono microligado com estrutura multifásica. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, p. 398-404, 2008.

FUNDACENTRO. **Estatísticas de acidentes de trabalho**. Disponível em: <<http://www.fundacentro.gov.br/estatisticas-de-acidentes-de-trabalho/inicio>>. Acesso em: 29 jun. 2018.

GENTIL, V. **Corrosão**. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos, 2007.

GERALDO, A. B. C. **Corrosão de aços carbono e patinável em ambiente marinho**. 1993. 112 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.

LOMBARDI, C. C. M. **Estudo da influência da fase ferrítica sobre o comportamento de corrosão de aços**. 1993. 140 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

LOMBARDO, S. et al. Método para o cálculo da fração volumétrica de austenita retida através do software de análise digital de imagens. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 19., 2010, Campos do Jordão. **Anais...** Campos do Jordão: CBECIMAT, p. 4968-4975.

LOUREIRO, A.; BRASIL, S.; YOKOYAMA, L. Estudo da corrosividade de solo contaminado por substâncias químicas através de ensaios de perda de massa e índice de Steinrath. **Corrosão e Protecção de Materiais**, Amadora, v. 26, n. 4, p. 113-121, 2007.

MA, Yuantai; LI, Ying; WANG, Fuhui. Corrosion of low carbon steel in atmospheric environments of different chloride content. **Corrosion Science**, Oxford, v. 51, n. 5, p. 997-1006, 2009.

MA, Yuantai; LI, Ying; WANG, Fuhui. The atmospheric corrosion kinetics of low carbon steel in a tropical marine environment. **Corrosion Science**, Oxford, v. 52, n. 5, p. 1796-1800, 2010.

MARQUES, R. P.; FRANÇA, K. V. **A importância da aplicação de ensaios não destrutivos nas inspeções periódicas de lingas para movimentação de cargas**. 2014. 72 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Produção Metalúrgica) - Faculdade de Engenharia de Resende, Associação Educacional Dom Bosco, Resende, 2014.

MELCHERS, R. E. A new interpretation of the corrosion loss processes for weathering steels in marine atmospheres. **Corrosion Science**, Oxford, v. 50, n. 12, p. 3446-3454, 2008.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade dos aços transformáveis**. Disponível em: <<http://www.demet.ufmg.br/labs/soldagem/textos/metferritic.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2019.

MÖLLER, H.; BOSHOFF, E. T.; FRONEMAN, H. The corrosion behaviour of a low carbon steel in natural and synthetic seawaters. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, Johannesburg, v. 106, n. 8, p. 585-592, 2006.

MCCAFFERTY, E. Validation of corrosion rates measured by the Tafel extrapolation method. **Corrosion Science**, Oxford, v. 47, n. 12, p. 3202-3215, 2005.

OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION. **Guidance on safe sling use**. Disponível em: <<https://www.osha.gov/dsg/guidance/slings/index.html>>. Acesso em: 25 jul. 2018.

POORQASEMI, E. et al. Investigating accuracy of the Tafel extrapolation method in HCl solutions. **Corrosion Science**, Oxford, v. 51, n. 5, p. 1043-1054, 2009.

RAGAB, A.; ALAWI, H.; SOREIN, K. Effect of atmospheric and marine corrosive environments on tensile, impact and hardness properties of some steels. **Mechanics of materials**, Oxford, v. 18, n. 1, p. 69-77, 1994.

RUD CORRENTES INDUSTRIAIS. **Treinamento de movimentação de cargas**. Mogi das Cruzes, 2014.

RUD CORRENTES INDUSTRIAIS. **Produtos para movimentação e amarração de cargas**. Disponível em: <<http://www.rud.com.br/produtos/movimentacao-amarracao-cargas/>>. Acesso em: 09 ago. 2018.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

SOUZA, E. D. **Análise de corrosão por meio de perda de massa e espessura em aços pela ação da água produzida de poços petrolíferos**. 2010. 143 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais – Caracterização, Propriedades e Desenvolvimento de Materiais) – Universidade Federal de Sergipe, Sergipe, 2010.

SOUZA, G. A. **Caracterização microestrutural de um aço médio carbono e baixa liga com estrutura bainítica/martensítica, via microscopia óptica**. 2008. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Projetos e Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

SPANSET DO BRASIL. **Catálogo de elevação**. Disponível em: <[http://www.spanset.com.br/cat\\_elevacao.zip](http://www.spanset.com.br/cat_elevacao.zip)>. Acesso em: 01 nov. 2017.

SPANSET DO BRASIL. **SIP-13 katalog**: catálogo. 12. ed. Resende, 2013. 394 p.

TAIT, William Stephen. An introduction to electrochemical corrosion testing for practicing engineers and scientists. **PairODocs Publications**, Racine, v. 26, n. 1, p. 138, 1994.

TAKAHASHI, Yohei et al. In-situ X-ray diffraction of corrosion products formed on iron surfaces. **Materials transactions**, Sendai, v. 46, n. 3, p. 637-642, 2005.

WOLYNEC, Stephan. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. São Paulo: Edusp, 2003.

ZHANG, Q. C. et al. Corrosion behavior of weathering steel in marine atmosphere. **Materials Chemistry and Physics**, Lausanne, v. 77, n. 2, p. 603-608, 2003.