

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA

**VICTOR FREITAS DE JESUS**

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE METODOLOGIA DE DESGASTE  
CONTROLADO DE AÇO GALVANIZADO PARA ENSAIOS DE CORROSÃO  
ATMOSFÉRICA EM CAMPO

RIO DE JANEIRO  
2025

**Victor Freitas de Jesus**

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE METODOLOGIA DE DESGASTE  
CONTROLADO DE AÇO GALVANIZADO PARA ENSAIOS DE CORROSÃO  
ATMOSFÉRICA EM CAMPO

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química, Instituto de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito parcial necessário para obtenção do grau de Mestre em Química.

Orientadores: Maiara Oliveira Salles, D.Sc.

Débora França de Andrade, D.Sc.

Elber Vidigal Bendinelli, D.Sc.

Rio de Janeiro

2025

## CIP - Catalogação na Publicação

J56d Jesus, Victor Freitas de  
Desenvolvimento e aplicação de metodologia de  
desgaste controlado de aço galvanizado para ensaios  
de corrosão atmosférica em campo /| Victor Freitas  
de Jesus. -- Rio de Janeiro, 2025.  
105 f.

Orientadora: Maiara Oliveira Salles.  
Coorientadora: Débora França de Andrade.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do  
Rio de Janeiro, Instituto de Química, Programa de Pós  
Graduação em Química, 2025.

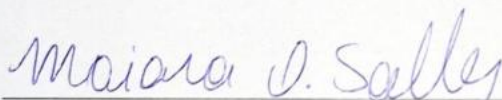
1. aço galvanizado. 2. desgaste controlado. 3.  
planejamento experimental. 4. corrosão. 5. setor  
elétrico. I. Salles, Maiara Oliveira, orient. II.  
Andrade, Débora França de, coorient. III. Título.

**Victor Freitas de Jesus**

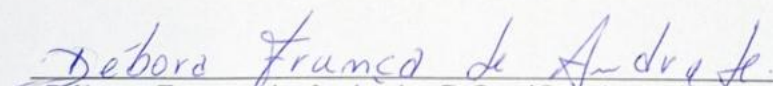
DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE METODOLOGIA DE DESGASTE  
CONTROLADO DE AÇO GALVANIZADO PARA ENSAIOS DE CORROSÃO  
ATMOSFÉRICA EM CAMPO

Dissertação de mestrado apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em Química,  
Instituto de Química, Universidade Federal  
do Rio de Janeiro, como requisito parcial  
necessário para obtenção do grau de  
Mestre em Ciências (Química).

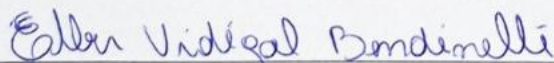
Aprovada em: 30 de junho de 2025.



Maiara Oliveira Salles, D.Sc. (Orientadora), DQA – IQ/UFRJ



Débora Franca de Andrade, D.Sc. (Coorientadora), DQA – IQ/UFRJ  
(Presidente da banca)



Elber Vidigal Bendinelli, D.Sc. (Coorientador), DMM/Cepel



Eliane d'Elia, D.Sc., DQI – IQ/UFRJ



Vivian María Saez Martínez, D.Sc., DQA – IQ/UFRJ

“Dedico este trabalho ao meu Eu criança,  
que um dia pensou em ser cientista,  
mas desacreditado pela sua orientação sexual  
(ainda a descobri-la e abraçá-la),  
duvidou de sua capacidade de vencer grandes desafios.”

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Eliane e Laércio, que sempre incentivaram meus estudos e apoiaram as minhas vontades e decisões. Agradeço ao meu irmão, que mesmo à distância, será sempre meu maior orgulho na vida. A vocês lhes devo um mundo de gratidão. Essa conquista não é só minha, ela é nossa! Amo muito vocês!

Ao meu marido, Alexander, parceiro de vida. Obrigado por todos os momentos de descontração, todo o carinho e cumplicidade. A vida ao seu lado junto dos nossos gatos, Jabuticaba e Pitaya, é o meu motivo maior para seguir e a razão das minhas maiores felicidades.

Às minhas orientadoras, Profa. Maiara e Profa. Débora, que desde o início confiaram plenamente no meu potencial e aceitaram me orientar durante o mestrado. Carregarei os conselhos e ensinamentos por toda minha vida profissional.

Ao meu coorientador, Elber, que para além de supervisor foi essencial para a construção e conclusão desse dessa dissertação. Pareceria profissional que carregarei por anos.

Aos meus avós, vó Zéza, Vó Lena, vô Bino, minha madrinha Bethe e minha tia Carmem, pelos ensinamentos e por serem referência de caráter para mim. Vocês são a minha base e minhas maiores relíquias.

À minha prima, Elizandra, que mesmo estando milhares de quilômetros de distância, foi sempre uma das maiores incentivadoras e apoiadoras dos meus sonhos. Você é a irmã mais velha que eu sempre quis. Te amo!

Ao meu grupo maravilhoso de amigos do Rio de Janeiro, os *Busaibes*. À Thayná, por toda a parceria de laboratório e de vida. Vizinhos de bancada e de vida, competitivos em tudo quanto é jogo e a nossa tattoo ainda sai um dia! À Camila, carioca número um da minha vida, obrigado por todo o carinho e acolhimento na sua própria família. Ao Adel, o amigo que conheci durante a graduação e que carregarei no peito como irmão para sempre.

Aos meus amigos Amanda, Marcelo, Juliano, Dimitri, Vivia, Maiara, Letycia, Yanna e Kalícia, pelos ótimos momentos que tivemos juntos. A ideia de família que a gente escolhe, com vocês, faz sentido. Saudades dos tempos em que nosso convívio era diário!

Aos amigos e amigas Beatriz, Bianca, Janaína, Jefferson e Jéssica, amigos paulistas que carrego no coração todos os dias. A gente pode ficar longe por muito

tempo, mas sinto um carinho especial por cada um de vocês ... e a amizade é para além da vida. Apoio, conselhos, diversão, muito amor e fotos de gatinhos... é isso que eu imagino quando penso em vocês.

A alguns tios, tias, primos e primas que sei que mesmo de longe, estiveram sempre na torcida pelas minhas conquistas.

Aos demais amigos e amigas do IQ IQ/UFRJ, que mesmo depois de diferentes caminhos seguidos após a conclusão da graduação, ainda seguem com um espacinho particular aqui no coração por termos vivenciado e superado vários perrengues juntos.

Ao Felipe Garcia que esteve sempre disposto a ensinar, questionar e apoiar o meu projeto, com ideias e direcionamentos essenciais para a conclusão da minha dissertação. Ao Marcos Sá que esteve do meu lado na linha de frente operacional, auxiliando em muitas etapas experimentais do meu projeto. Ao Christian, que desde a época de estagiário já se tornou um grande colega de trabalho, e muitas vezes me ajudou com o meu projeto e na descontração do cafezinho da tarde.

Aos estagiários e estagiárias do Laboratório de Materiais e Propriedades Mecânicas do Cepel, que sem questionar, muito me ajudaram nos ensaios realizados durante a minha dissertação: Alessandra, Felipe Duarte, Helga, Juliana e Luiza. Agradeço, por fim, a todos os membros da equipe de Corrosão do Cepel, por darem todo o suporte e acreditarem no meu trabalho.

*“Eu não quero sentir, eu não quero chorar  
Então vou dançar até me sentir bem”  
(LoveDrug, Lady Gaga)*

## RESUMO

JESUS, Victor Freitas de. **Desenvolvimento e aplicação de metodologia de desgaste controlado de aço galvanizado para ensaios de corrosão atmosférica em campo**. Rio de Janeiro, 2025. Dissertação (Mestrado em Química). Instituto de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento e aplicação de uma metodologia inovadora de desgaste controlado para aço galvanizado, voltada para ensaios de corrosão atmosférica em campo. O preparo dos corpos de prova galvanizados gerou três grupos de trabalho por conta do tratamento de superfície do substrato de aço carbono: o jateamento abrasivo seco com granalha de aço (grupo G), o jateamento abrasivo seco com microesfera de vidro (grupo V) e a decapagem ácida da carepa de laminação (grupo C). Utilizou-se planejamento experimental para a definição das metodologias de desgaste. Foram realizados ensaios preliminares para se estabelecer parâmetros iniciais de avaliação, até a definição de dois tipos de desgaste viáveis: químico e físico. As variáveis testadas foram concentração da solução e tempo de imersão, para o desgaste químico, e grão da lixa do tipo disco *flap* e tempo de contato da lixa com a superfície do corpo de prova, para o desgaste físico. Os ensaios de triagem e de otimização das metodologias basearam-se em planejamentos experimentais do tipo fatorial completo ( $n^k$ ) com triplicata de ponto central. As metas foram estipuladas em 50% de redução da camada original de galvanizado, correlacionando esse valor com uma variação de massa correspondente à cada desgaste. Foram aplicados ensaios de conformidade de galvanizado e técnicas eletroquímicas para avaliar os desgastes, comparando-os a superfícies não desgastadas. Os resultados indicaram que a metodologia otimizada de desgaste químico foi mais promissora, validada com 95% de confiança. Os ensaios complementares possibilitaram um melhor entendimento dos desgastes executados. Os primeiros dados de taxa de corrosão indicam a possibilidade de obtenção de modelos preditivos de corrosão atmosférica mais assertivos para o setor elétrico. Isso contribuirá para o estabelecimento de manutenções preventivas mais aprimoradas, além maior garantia na extensão da vida útil de estruturas metálicas galvanizadas.

Palavras-chave: aço galvanizado; desgaste controlado; planejamento experimental; corrosão; setor elétrico.

## ABSTRACT

JESUS, Victor Freitas de. **Development and application of controlled wear methodology of galvanized steel for field atmospheric corrosion tests**. Rio de Janeiro, 2025. Dissertation (Master's degree in Chemistry). Instituto de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

This dissertation shows the development and application of an innovative methodology for controlled wear of galvanized steel, aiming field atmospheric corrosion tests. Galvanized sample preparation generated three different groups according to different carbon steel surface treatment: dry steel grit blasting (group G), dry glass bead blasting (group V) and mill scale acid pickling (group C). The experimental approach used design of experiments (DoE) to decide wear methodology. Preliminary assays were performed to determine initial evaluation parameters, getting to two viable wear types: chemical and physical. Tested variables were solution concentration and immersion time for chemical wear, and flap disc grit and contact time of flap disc with sample surface for physical wear. Screenings and optimization assays were based on full factorial design of experiment ( $n^k$ ) with triplicate at the central point. The aimed goal was 50% reduction of the original galvanized layer, relating this value to mass variation according to each kind of wear. Galvanized compliance tests were performed, as well as electrochemical techniques to evaluate worn surfaces compared to non-worn surfaces. Results indicated that the optimized chemical wear was the most promising, validated with 95% accuracy. Complementary assays allowed a better understanding of the surface wear techniques used. The first data for corrosion rate indicated the possibility to create better predictive models for atmospheric corrosion aiming the electric sector. This work contributes to establish better benchmarks for preventive maintenance, as well as more accurate analysis of extending the service life of galvanized metal structures.

Keywords: galvanized steel; controlled wear; design of experiments; corrosion; electric sector.

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E FÓRMULAS QUÍMICAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGA	<i>American Galvanizers Association</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
Cepel	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CCC	Cúbica de corpo centrado
CFC	Cúbica de face centrada
CP	Corpo(s) de prova
CuSO <sub>4</sub>	Sulfato de cobre (II)
DPR	Desvios padrões relativos
ECS	Eletrodo de calomelano saturado
F	F-valor
gl	Graus de liberdade
HCl	Ácido clorídrico
HCP	Hexagonal compacta
HNO <sub>3</sub>	Ácido nítrico
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido sulfúrico
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IZA	<i>International Zinc Association</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MQ	Médias Quadradas
Mt	Megatoneladas
NaCl	Cloreto de sódio
NH <sub>4</sub> Cl	Cloreto de amônio
OCP	Potencial de Circuito Aberto ( <i>Open Circuit Potential</i> )
PIB	Produto Interno Bruto
PVC	Policloreto de vinila
SQ	Soma de Quadrados
USP	Universidade de São Paulo
vs	<i>versus</i>
ZnCO <sub>3</sub>	Carbonato de zinco
ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	Sulfato de zinco heptahidratado

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produção mundial de aço carbono bruto em milhões de toneladas. ....	23
Figura 2 – Uso aparente de aço (produto acabado) por setor industrial, em escala mundial, em 2023. ....	24
Figura 3 – Mecanismo de atuação do zinco na proteção catódica do ferro. ....	26
Figura 4 – Microestrutura de diferentes tipos de revestimento de zinco. ....	27
Figura 5 – Fluxograma do processo de galvanização por imersão a quente. ....	29
Figura 6 – Porção de alta concentração de zinco no diagrama de equilíbrio de fases para ligas de Fe-Zn. ....	30
Figura 7 – Micrografia de seção transversal de aço galvanizado por imersão a quente. ....	31
Figura 8 – Etapas de formação das fases intermetálicas durante a galvanização. ....	31
Figura 9 – Ramo anódico de curvas de polarização de aço galvanizado após diferentes intervalos de tempo ( $t_0 < t_1 < t_2$ ) de exposição a agentes corrosivos em comparação ao aço e zinco. ....	34
Figura 10 – Exemplos de voltamogramas de dissolução anódica de fases intermetálicas Fe-Zn. ....	35
Figura 11 – Voltamogramas de dissolução anódica em estudo de corrosão com aço galvanizado. ....	36
Figura 12 – Arranjo de parte dos corpos de prova na linha de produção da Raitz Galvanização. ....	43
Figura 13 – Pontos de medição de espessura de galvanizado por face de corpo de prova. ....	44
Figura 14 – Execução do ensaio Preece: (a) corpo de prova antes da imersão na solução saturada de sulfato de cobre II e (b) ciclo de imersão em andamento. ....	45
Figura 15 – Ensaio de consumo do revestimento de zinco da Norma ABNT 7397: (a) solução inicial, (b) desprendimento intenso de bolhas durante a dissolução do zinco e (c) encerramento do ensaio. ....	46
Figura 16 – Esquema geral para ensaios eletroquímicos: (a) ilustração da montagem do sistema de ensaio e (b) célula montada em gaiola de Faraday. ....	48
Figura 17 – Esquema de corte e identificação das peças cortadas a partir do corpo de prova original. ....	49

Figura 18 – Equipamentos usados nos ensaios preliminares de desgaste físico: (a) lixadeira de fita, (b) poltriz, (c) jateamento abrasivo seco com microesfera de vidro e (d) lixadeira elétrica.....	50
Figura 19 – Representação gráfica das matrizes de planejamento experimental de triagem para os desgastes: (a) químico e (b) físico.....	52
Figura 20 – Representação gráfica da matriz de planejamento experimental de otimização para os desgastes químico e físico. ....	55
Figura 21 – Desenhos esquemáticos de referência para a construção dos varais nas subestações. ....	58
Figura 22 – Instalação dos corpos de prova nas subestações de energia elétrica da Eletrobras.....	59
Figura 23 – Exemplo teórico de gráfico obtido em ensaio de perda de massa, com destaques para os patamares e a interseção entre as retas.....	61
Figura 24 – Aspecto visual do substrato metálico: (a) corpo de prova de aço carbono, (b) corpo de prova após os tratamentos de superfície com granalha de aço, (c) microesfera de vidro e (d) solução ácida para decapagem da carepa de laminação e (e) corpo de prova após o revestimento com zinco.....	63
Figura 25 – Micrografias de amostras de corpos de prova: (a) grupo G, (b) grupo V e (c) grupo C. ....	65
Figura 26 – Histogramas de distribuição, por grupos, dos corpos de prova galvanizados com base nas médias de espessura (x) de revestimento de zinco: (a) grupo G, (b) grupo V e (C) grupo C. ....	66
Figura 27 – Histograma geral de distribuição dos corpos de prova galvanizados com base nas médias de espessura (x) de revestimento de zinco. ....	67
Figura 28 – Resultado do ensaio de Preece de amostras dos três grupos de corpos de prova. ....	68
Figura 29 – Depósito de cobre aderente e brilhante após ensaio de Preece.....	68
Figura 30 – Resultado do teste de verificação de superfície passivada.....	69
Figura 31 – Gráfico de acompanhamento de redução de massa e espessura de galvanizado durante ensaio preliminar de desgaste químico, com solução de HCl 1,2 mol·L <sup>-1</sup> .....	71

Figura 32 – Gráficos de acompanhamento de redução de massa e espessura de galvanizado: (a) lixadeira de fita e lixa grão #600, (b) politriz e lixa d'água grão #320, (c) jateamento abrasivo seco com microesfera de vidro, (d) lixadeira elétrica e lixa grão #120, (e) lixadeira elétrica e lixa disco <i>flap</i> grão #120 e (f) lixadeira elétrica e lixa grão #16.....	73
Figura 33 – Voltamogramas de dissolução anódica de amostras de aço galvanizado. ....	74
Figura 34 – Comparação dos resultados das triagens propostas para o desgaste químico: (a) percentual de redução de massa e (b) percentual de redução média de espessura. ....	77
Figura 35 – Diagramas de Pareto referentes aos resultados de desgaste químico: (a) 1ª triagem e (b) 2ª triagem. ....	77
Figura 36 – Representação gráfica de seis simulações de resultados de redução de massa (%), baseadas na equação da superfície de resposta obtida com o tratamento dos dados do planejamento experimental da 2ª triagem de desgaste químico. ....	78
Figura 37 – Diagrama de Pareto referente aos resultados da otimização de desgaste químico.....	80
Figura 38 – Diagramas de Pareto referentes aos resultados das novas otimizações para o desgaste químico: (a) grupos G e V e (b) grupo C.....	82
Figura 39 – Comparação dos resultados das triagens propostas para o desgaste físico: (a) percentual de redução de massa e (b) percentual de redução média de espessura. ....	84
Figura 40 – Diagramas de Pareto referentes aos resultados de desgaste físico: (a) 1ª triagem e (b) 2ª triagem.....	85
Figura 41 – Representação gráfica de quatro simulações de resultados de redução de massa (%), baseadas na equação da superfície de resposta obtida com o tratamento dos dados do planejamento experimental da 2ª triagem de desgaste físico. ....	86
Figura 42 – Diagrama de Pareto referente aos resultados da otimização para o desgaste físico. ....	87
Figura 43 – Micrografias de amostras de corpos de prova desgastados pelos dois métodos: (a, b, c) químico e (d, e, f) físico. ....	89

Figura 44 – Voltamogramas de dissolução anódica dos corpos de prova agrupados pela condição à qual foram submetidos antes da exposição em ensaio de campo: (a) CP referência, (b) CP do desgaste químico e (c) CP do desgaste físico. ....	91
Figura 45 – Voltamogramas de dissolução anódica dos corpos de prova agrupados por tratamento de superfície do substrato: (a) CP do grupo G, (b) CP do grupo V e (c) CP do grupo C. ....	92
Figura 46 – Ramo anódico da polarização potenciodinâmica dos corpos de prova agrupados pela condição à qual foram submetidos antes da exposição em ensaio de campo: (a) CP referência, (b) CP do desgaste químico e (c) CP do desgaste físico. ....	94
Figura 47 – Ramo anódico da polarização potenciodinâmica dos corpos de prova agrupados por tratamento de superfície do substrato: (a) CP do grupo G, (b) CP do grupo V e (c) CP do grupo C. ....	95
Figura 48 – Taxa de corrosão dos corpos de prova após 4 meses de exposição: (a) agrupamento por condição à qual o material foi submetido e (b) agrupamento por subestação de instalação. ....	96

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Potenciais de redução de materiais utilizados na proteção catódica galvânica. ....	25
Quadro 2 – Características dos diferentes tipos de revestimento de zinco para estruturas de aço. ....	28
Quadro 3 – Características das fases intermetálicas do aço galvanizado por imersão a quente. ....	32
Quadro 4 – Testes de conformidade de aço galvanizado estabelecidos pela ABNT NBR 6323. ....	33
Quadro 5 – Tratamento de superfície nas chapas de aço carbono. ....	42
Quadro 6 – Matriz de planejamento experimental para as triagens do desgaste químico. ....	51
Quadro 7 – Matriz de planejamento experimental para as triagens do desgaste físico. ....	52
Quadro 8 – Matriz de planejamento experimental para as otimizações dos desgastes químico e físico. ....	54
Quadro 9 – Locais definidos para a instalação em campo dos corpos de prova. ....	57
Quadro 10 – Definição das quantidades de corpos de prova preparados. ....	57
Quadro 11 – Metais e suas respectivas soluções químicas decapantes. ....	60
Quadro 12 – Graus de corrosividade atmosférica em função da taxa de corrosão dos metais ( $r_{corr}$ ), conforme a Norma ABNT NBR ISO 9223. ....	62
Quadro 13 – Avaliação geral das técnicas e/ou ferramentas utilizadas nos ensaios preliminares de desgaste físico. ....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Potencial de circuito aberto das fases intermetálicas. ....	35
Tabela 2 – Níveis dos fatores utilizados em cada planejamento experimental de triagem. ....	53
Tabela 3 – Variáveis e níveis dos planejamentos experimentais de otimização. ....	54
Tabela 4 – Dados dos corpos de prova de aço carbono após os tratamentos de superfície. ....	64
Tabela 5 – Resultados da determinação da massa de revestimento de zinco por unidade de área. ....	69
Tabela 6 – Matrizes de experimentos e resultados das triagens propostas para o desgaste químico. ....	76
Tabela 7 – Resultados da otimização para o desgaste químico. ....	79
Tabela 8 – Resultados da nova otimização para o desgaste químico dos grupos G e V. ....	81
Tabela 9 – Resultados da nova otimização para o desgaste químico do grupo C. ....	81
Tabela 10 – Parâmetros dos fatores avaliados das otimizações finais do desgaste químico. ....	82
Tabela 11 – Matrizes de experimentos e resultados das triagens propostas para o desgaste físico. ....	83
Tabela 12 – Resultados da otimização para o desgaste físico. ....	86

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>22</b>
3.1	AÇO COMO ELEMENTO ESTRUTURAL .....	22
3.2	CORROSÃO E MÉTODOS DE PROTEÇÃO ANTICORROSIVA.....	25
3.3	AÇO GALVANIZADO .....	27
<b>3.3.1</b>	<b>Tecnologias de revestimento com zinco metálico</b> .....	<b>27</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Galvanização por imersão a quente</b> .....	<b>28</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Avaliação da conformidade do galvanizado</b> .....	<b>32</b>
3.4	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	36
<b>3.4.1</b>	<b>Conceitos fundamentais e objetivos da aplicação</b> .....	<b>36</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Planejamentos fatoriais e aplicação</b> .....	<b>38</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>41</b>
4.1	PREPARO DAS SOLUÇÕES.....	41
4.2	OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA METÁLICOS .....	41
<b>4.2.1</b>	<b>Processo de galvanização e o pós-tratamento</b> .....	<b>42</b>
4.3	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL METÁLICO .....	43
<b>4.3.1</b>	<b>Medição de espessura de galvanizado</b> .....	<b>44</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Verificação da uniformidade do revestimento</b> .....	<b>44</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Determinação da massa do revestimento por unidade de área</b> .....	<b>45</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Teste rápido para comprovar passivação</b> .....	<b>46</b>
<b>4.3.5</b>	<b>Microscopia óptica do aço galvanizado</b> .....	<b>47</b>
<b>4.3.6</b>	<b>Ensaio eletroquímico</b> .....	<b>47</b>
<b>4.3.6.1</b>	<b><i>Voltametria de dissolução anódica</i></b> .....	<b>48</b>
<b>4.3.6.2</b>	<b><i>Polarização potenciodinâmica</i></b> .....	<b>48</b>
4.4	PLANEJAMENTOS EXPERIMENTAIS .....	48
<b>4.4.1</b>	<b>Ensaio preliminares</b> .....	<b>49</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Triagens (<i>Screenings</i>)</b> .....	<b>51</b>
<b>4.4.3</b>	<b>Otimização e validação das metodologias</b> .....	<b>53</b>
4.5	PREPARO DE AMOSTRAS PARA ENSAIO DE CAMPO.....	56
<b>4.5.1</b>	<b>Aplicação das metodologias validadas</b> .....	<b>56</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Instalação em campo</b> .....	<b>57</b>

4.5.3	<b>Perda de massa e cálculos de velocidade de corrosão .....</b>	<b>59</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>63</b>
5.1	CORPOS DE PROVA.....	63
5.2	AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE DO GALVANIZADO .....	65
5.3	PLANEJAMENTOS EXPERIMENTAIS .....	70
<b>5.3.1</b>	<b>Ensaio preliminar.....</b>	<b>70</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Desgaste químico.....</b>	<b>75</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Desgaste físico .....</b>	<b>83</b>
5.4	AVALIAÇÃO DA CAMADA DE GALVANIZADO DESGASTADA .....	88
<b>5.4.1</b>	<b>Microscopia óptica do material desgastado .....</b>	<b>88</b>
<b>5.4.2</b>	<b>Voltametria de dissolução anódica.....</b>	<b>90</b>
<b>5.4.3</b>	<b>Polarização potenciodinâmica .....</b>	<b>93</b>
5.5	CÁLCULO DAS TAXAS DE CORROSÃO .....	96
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>99</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>101</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>102</b>
	<b>APÊNDICE A – MAPAS DE INSTALAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA NAS CINCO SUBESTAÇÕES DA ELETROBRAS.....</b>	<b>106</b>
	<b>APÊNDICE B – TESTE DE GRUBBS DOS RESULTADOS DAS TRIPLICATAS DO PONTO CENTRAL DE TODOS OS PLANEJAMENTOS PARA AMBOS OS DESGASTES.....</b>	<b>109</b>
	<b>APÊNDICE C – TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS DOS PLANEJAMENTOS EXPERIMENTAIS EXECUTADOS.....</b>	<b>110</b>
	<b>APÊNDICE D – APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO 3 NO CÁLCULO DAS METAS DE REDUÇÃO DE MASSA PARA OS PLANEJAMENTOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>118</b>
	<b>APÊNDICE E – RESULTADOS DA EXECUÇÃO DAS METODOLOGIAS OTIMIZADAS E VALIDADAS .....</b>	<b>119</b>
	<b>APÊNDICE F – DADOS DOS CP DESGASTADOS PARA OS ENSAIOS ELETROQUÍMICOS.....</b>	<b>122</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O aço galvanizado fabricado pelo processo de imersão a quente é amplamente utilizado no setor elétrico. Esse material conta com um revestimento metálico de zinco que, quando exposto ao meio corrosivo, sofre o processo de oxidação preferencialmente ao substrato de aço (Ozturk; Evis; Kilic, 2017). A principal aplicação do aço galvanizado no setor elétrico se dá na fabricação de estruturas para linhas de transmissão e subestações de energia elétrica, justificada pela sua elevada resistência à corrosão e por suas propriedades mecânicas (Serra, 2006).

O Brasil é o maior país da América do Sul, possui altitudes modestas, sem grandes cadeias de montanhas e o relevo é formado principalmente por planaltos e planícies, sendo os planaltos a maior parte do território. A vegetação brasileira é bastante diversificada e o clima é, em grande parte, tropical (Ministério das Relações Exteriores, 2022). Nos últimos 60 anos houve uma ampliação expressiva do sistema de transmissão de energia elétrica no país, principalmente a partir da década de 1990, quando se verifica um avanço no processo de interiorização da transmissão pelo Brasil. Ao considerar a extensão territorial do país e as particularidades de cada região, entende-se o motivo da necessidade de uma malha de transmissão grandiosa para atender toda a sociedade (Eletrobras, 2025; Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2024).

O aço galvanizado pode apresentar-se em boas condições de conservação por períodos de até 50 anos em regiões de baixa agressividade atmosférica como, por exemplo, áreas rurais. Quando o ambiente é bastante corrosivo, como áreas próximas à complexos industriais, há o risco de perda da integridade mecânica das estruturas após períodos da ordem de 10 anos ou menos, devido à corrosão intensificada (Nunes *et al.*, 2018; Sebrao; Ordine; De Oliveira, 2012).

O sistema brasileiro de transmissão elétrica enfrenta um envelhecimento natural devido a diversos fatores que influenciam na depreciação dos ativos. Quando avaliada a dimensão da rede, fica simples de entender os motivos de tantas estruturas metálicas e equipamentos estarem próximos do fim de sua vida útil, sejam nas linhas de transmissão ou nas subestações. Esse cenário foi construído ao longo dos anos, com baixa taxa de reposição dos bens depreciados geridos pelas concessionárias, e que agora enfrentam dificuldades técnicas e financeiras de reverter de maneira

instantânea os efeitos provocados pela corrosão dos ativos (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2021).

Um estudo conduzido nos Estados Unidos entre 1999 e 2001 estimou que o custo total decorrente da corrosão atingiu cerca de 6% do Produto Interno Bruto (PIB) do país, representando um montante próximo a 900 bilhões de dólares (Koch *et al.*, 2001). No contexto brasileiro, uma pesquisa desenvolvida pela Universidade de São Paulo (USP) em parceria com a *International Zinc Association* (IZA) indicou que os custos com corrosão chegaram a aproximadamente 300 bilhões de reais em um único ano, representando cerca de 4% do PIB à época (Cunha, 2023). Em escala global, estima-se que os custos associados à corrosão atinjam cerca de 2,5 trilhões de dólares, o equivalente a aproximadamente 3% do PIB mundial (Koch, 2017).

Quando se trata das perdas causadas pelos efeitos da corrosão, pode-se citar as perdas diretas e perdas indiretas. As perdas diretas abrangem a substituição de componentes e equipamentos, as despesas com sistemas de proteção anticorrosiva, bem como os encargos relacionados à mão de obra especializada para execução e manutenção dessas estratégias. As perdas indiretas frequentemente superam os custos diretos e englobam aspectos críticos como a perda de eficiência operacional, as paradas não programadas de ativos industriais, superdimensionamento de projetos, riscos à segurança ocupacional, além de prejuízos ambientais causados, por exemplo, pela contaminação por subprodutos da corrosão (Gentil, 2017).

O desenvolvimento de modelos de perda de espessura para aço galvanizado em condições reais de exposição atmosférica e de previsibilidade de sua vida útil são valiosos para a gestão da manutenção de linhas de transmissão, subestações e unidades geradoras de energia elétrica. Nesse contexto, este trabalho propõe, de forma inédita, o desenvolvimento e a validação de uma metodologia para o desgaste controlado da camada de zinco em aços galvanizados, para ensaios de corrosão atmosférica em campo, que contribuirão para o desenvolvimento de modelos preditivos de corrosão mais assertivos para o setor elétrico.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho é desenvolver e validar uma metodologia de desgaste controlado da camada de zinco do aço galvanizado, para viabilizar ensaios de corrosão atmosférica em campo desse material, com o intuito de obter modelos preditivos de corrosão mais assertivos para o setor elétrico. Dentre os objetivos específicos do presente trabalho, pode-se destacar:

- a) caracterizar a conformidade do galvanizado dos corpos de prova antes e após desgaste;
- b) avaliar em laboratório formas artificiais de desgaste da camada de zinco por métodos físico, químico e eletroquímico;
- c) definir, otimizar e validar os parâmetros das metodologias de desgaste da camada de zinco com base em planejamento experimental;
- d) avaliar a influência dos desgastes na velocidade de corrosão do aço galvanizado nos diferentes ambientes estudados.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 AÇO COMO ELEMENTO ESTRUTURAL

O aço é uma liga metálica composta principalmente por ferro e carbono. São adicionados elementos de liga, como manganês, molibdênio, níquel, silício etc., a fim de aprimorar alguma propriedade como, por exemplo, a resistência à corrosão, dureza, temperabilidade, resistência mecânica, ductilidade, maleabilidade, tenacidade e uniformidade, de acordo com a aplicação (Bhadeshia; Honeycombe, 2017). A Norma ABNT NBR 8800 fornece diversas recomendações sobre o uso de aço em estruturas, desde detalhes acerca do dimensionamento de elementos estruturais até requisitos para uso de aços fundidos e forjados, parafusos, porcas e arruelas etc. As propriedades do aço permitem a construção de estruturas com elevada capacidade de carga e propriedades mecânicas das mais variadas (ABNT, 2024a).

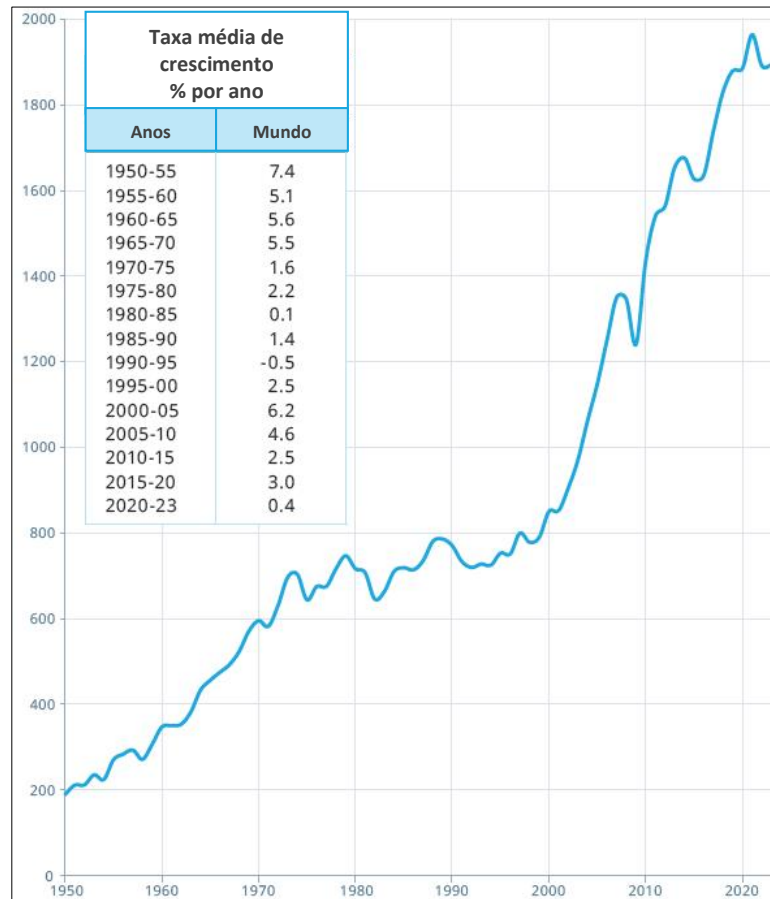
De acordo com a *World Steel Association*, por ser considerado o material de engenharia mais importante no mundo, o grande consumo de energia para sua produção tornou-se uma questão ambiental global. As melhorias nos processos de fabricação de aço proporcionaram gastos de energia 50% menores para a produção de uma tonelada de aço, quando comparada à produção feita há 30 anos atrás. Os aços especiais de alta resistência são mais fortes e leves, portanto, menos aço é necessário para garantir a mesma integridade estrutural e, por exemplo, em carros e navios tem-se maiores eficiências em termos de combustível, reduzindo as emissões de gases do efeito estufa. Além disso, cerca de 97% dos subprodutos da sua fabricação podem ser reutilizados, como é o caso da escória de siderúrgicas utilizada frequentemente na produção de concreto (*World Steel Association*, 2023).

Uma vez produzido, o aço pode ser reutilizado infinitas vezes, sem perder a qualidade. Em razão de sua alta taxa global de recuperação, o aço é classificado como o material mais reciclado do mundo, consolidando-se como um componente essencial na dinâmica da economia circular. No Brasil, cerca de 30% da produção de aço é derivada de materiais reciclados, demonstrando a importância da sucata como insumo estratégico na indústria siderúrgica (Benite; Taniguti; Gonzalez, 2019). A incorporação de sucata ao processo produtivo do aço representa uma estratégia importante para minimizar o uso de matérias-primas não renováveis, ao mesmo tempo em que reduz significativamente as emissões de gases de efeito estufa associadas à etapa de

redução do minério de ferro a ferro-gusa, matéria-prima usada para a fabricação de aço bruto (Instituto Aço Brasil, 2020).

A produção mundial de aço bruto se mantém estável desde 2020 em uma taxa de cerca de 1900 Mt (megatoneladas) por ano. A Figura 1 mostra o baixo crescimento (0,4%) na produção mundial entre os anos 2020 e 2023. Em relação ao ano de 2023, quando a produção mundial de aço bruto totalizou 1892 Mt, os três países que lideraram o *ranking* foram a China, com 1019,1 Mt (53,9%), seguida pela Índia, com 140,8 Mt (7,4%), e pelo Japão, com 87,0 Mt (4,6%). O Brasil ocupou a 9ª posição, com uma produção de 31,8 Mt (1,7%) (*World Steel Association, 2024*).

Figura 1 – Produção mundial de aço carbono bruto em milhões de toneladas.

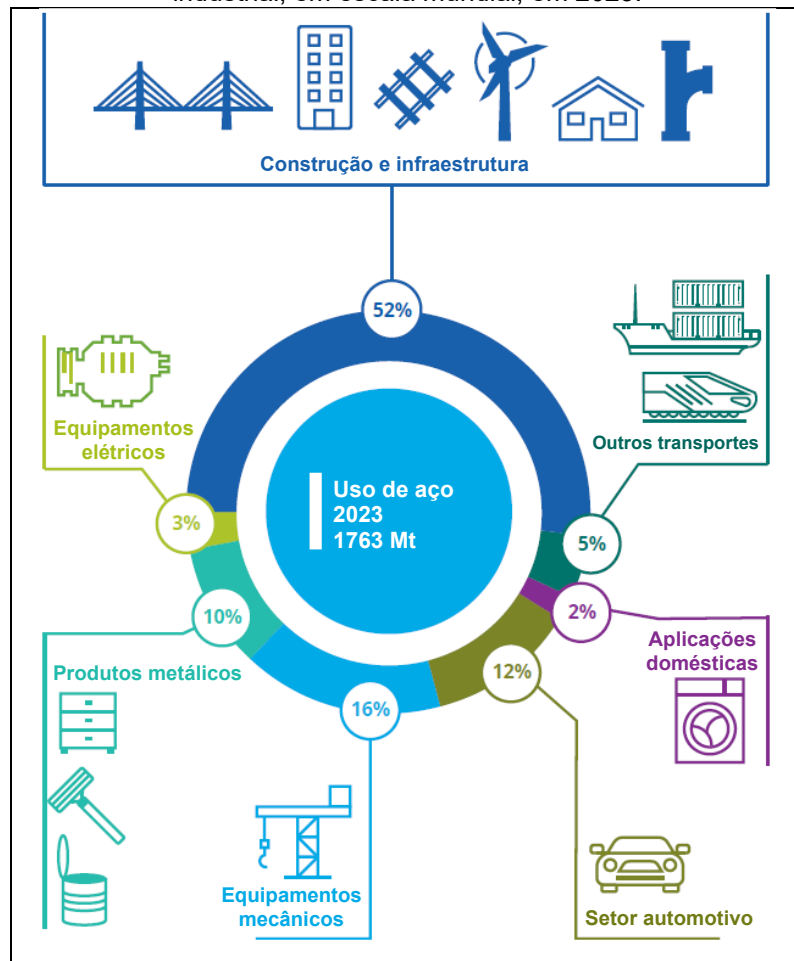


Fonte: adaptado de (*World Steel Association, 2024*).

Em relação ao volume de produto acabado de aço produzido, os dados indicam grande similaridade, com os três países mais relevantes do ramo de produção de aço bruto mantendo suas respectivas posições no *ranking*. Para o ano de 2023, a produção estimada foi de 1763 Mt, volume este segmentado em sete categorias de

aplicação: construção e infraestrutura, equipamentos elétricos, equipamentos mecânicos, produtos metálicos, utilidades domésticas, indústria automotiva e outros meios de transporte. A Figura 2 mostra a participação percentual de cada setor no total de aço acabado produzido em 2023, com destaque para construção e infraestrutura, que concentrou 52% da produção, confirmando sua posição como principal área de aplicação do aço bruto (*World Steel Association, 2024*).

Figura 2 – Uso aparente de aço (produto acabado) por setor industrial, em escala mundial, em 2023.



Fonte: adaptado de (*World Steel Association, 2024*).

Diante da ampla aplicação do aço em diversos setores da economia, é natural que se busquem alternativas para ampliar sua durabilidade e desempenho, especialmente em ambientes sujeitos à corrosão. Nesse contexto, o aço galvanizado surgiu como uma solução eficaz, capaz de aliar a resistência mecânica do aço à proteção contra agentes contaminantes por meio de revestimento de zinco (Yan *et al.*, 2022). A seguir, serão abordadas as principais características, processos de galvanização e aplicações industriais associadas a esse tipo específico de aço.

### 3.2 CORROSÃO E MÉTODOS DE PROTEÇÃO ANTICORROSIVA

Segundo Gentil (2017), a corrosão pode ser definida como o processo de deterioração progressiva de materiais, especialmente metais, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, estando esse processo, em certas situações, associado à presença de esforços mecânicos. Yan e colaboradores (2022) relatam que a corrosão não apenas prejudica a resistência e a ductilidade, como também reduz o desempenho à fadiga e outras propriedades mecânicas de acordo com o grau de degradação do material. O desempenho mecânico e a operacionalidade de estruturas ficam comprometidos, uma vez que os processos corrosivos podem gerar fissuras, deflexões intensas, falhas de fragilidade e perda de espessura.

Diante da suscetibilidade do aço à corrosão, diversas técnicas são utilizadas para combater esse processo natural, sendo os revestimentos protetores uma das principais alternativas. Esses revestimentos podem ser de origem orgânica, inorgânica ou metálica, com destaque para as opções que utilizam o zinco como elemento principal para a proteção anticorrosiva (Gentil, 2017). O Quadro 1 elenca materiais metálicos, numa espécie de série galvânica prática, utilizados na proteção anticorrosiva baseada em sistemas bimetálicos.

Quadro 1 – Potenciais de redução de materiais utilizados na proteção catódica galvânica.

<b>Série galvânica</b>	<b>Material</b>	<b>Potencial de redução (V)*</b>	
Extremidade anódica (corrosão)	Magnésio comercialmente puro	-1,75	
	Liga de magnésio (6% Al, 3% Zn, 0,15% Mn)	-1,60	
	Zinco	-1,10	
	Liga de alumínio (5% Zn)	-1,05	
	Alumínio comercialmente puro	-0,80	
	Aço (limpo)	-0,50 a -0,80	
	Aço corroído	-0,20 a -0,50	
	Ferro fundido (não grafitizado)	-0,50	
	Chumbo	-0,50	
	Aço em concreto	-0,20	
	Cobre, bronze, latão	-0,20	
	Ferro fundido com alto teor silício	-0,20	
	Extremidade catódica (proteção)	Aço com carepa de laminação	-0,20
		Carbono, grafite, coque	+0,30

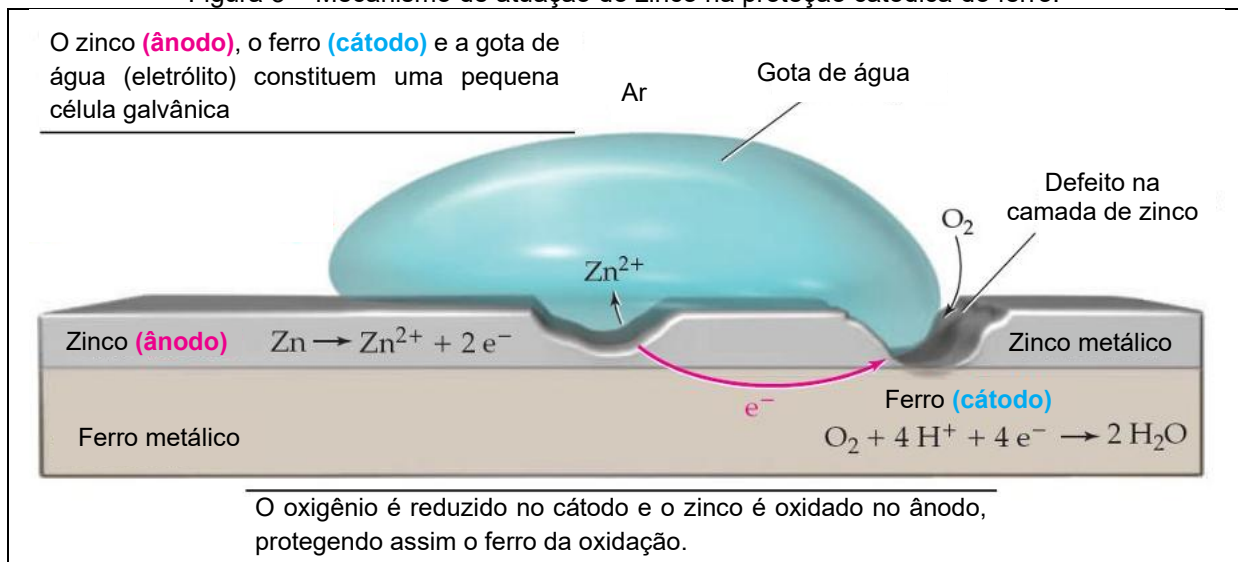
Fonte: adaptado de (Gentil, 2017).

Nota: \*potenciais observados em solos neutros e em água, medidos em relação a um eletrodo de Cu/CuSO<sub>4</sub>, podendo apresentar variações dependendo do meio em que se encontra o metal.

Como evidenciado no Quadro 1, o zinco apresenta menor potencial de redução em comparação ao aço e, portanto, ele se comporta como ânodo quando está em contato com o aço, sofrendo corrosão preferencial e conferindo proteção ao substrato ferroso. Nos sistemas bimetálicos, a interação eletroquímica dos materiais com diferentes potenciais de redução leva à corrosão daquele com menor potencial de redução, o qual passa a desempenhar o papel de ânodo na célula galvânica formada. Simultaneamente, o metal de maior potencial de redução assume o papel de cátodo, sendo o sítio das reações redutoras e, conseqüentemente, permanecendo imune ao processo corrosivo (Kuklik; Kudláček, 2016).

Tendo em vista os mecanismos de proteção anticorrosiva proporcionados por revestimentos metálicos, fundamentados na formação de células galvânicas, uma variedade de metais pode ser empregada no desenvolvimento de sistemas de revestimentos protetivos (Gentil, 2017). No caso do zinco, a proteção do aço é gerada pela barreira física do revestimento que isola os contaminantes do meio da superfície do aço; pelo princípio da proteção catódica, por conta da célula galvânica formada no contato bimetálico; e, pela capacidade de se passivar, evitando assim sua própria oxidação (Gentil, 2017; Kuklik; Kudláček, 2016; Marder, 2000). A Figura 3 detalha essa atuação do zinco na proteção catódica de metais ferrosos.

Figura 3 – Mecanismo de atuação do zinco na proteção catódica do ferro.



Fonte: adaptado de (McMurry; Fay; Robinson, 2014).

Em virtude do mecanismo de proteção galvânica característico desse sistema, o aço não é convertido em seus produtos de corrosão, mesmo em situações de defeito

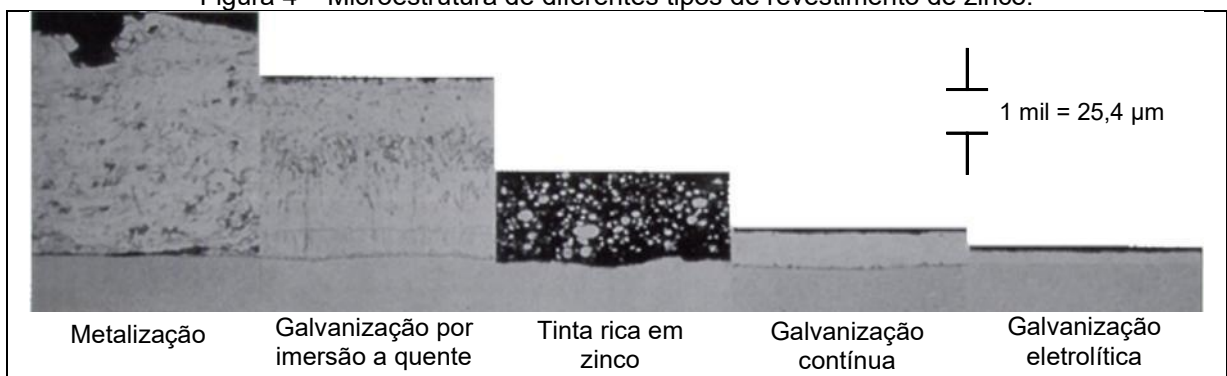
no revestimento que leve à exposição do substrato. Nesse caso, a proteção catódica acontece desde que haja zinco adjacente à região exposta. Assim, na eventualidade de exposição do aço aos contaminantes do meio, o zinco atua como ânodo de sacrifício, oxidando-se preferencialmente ao aço, o qual permanece passivo ao processo corrosivo (Marder, 2000; Ozturk; Evis; Kilic, 2017).

### 3.3 AÇO GALVANIZADO

#### 3.3.1 Tecnologias de revestimento com zinco metálico

A aplicação de revestimentos metálicos é usada de forma decorativa, no aumento da dureza, na recuperação de estruturas desgastadas, mas principalmente com o intuito de elevar a resistência à corrosão. As técnicas mais frequentemente usadas para aplicação de revestimentos metálicos são cladização, imersão a quente, aspersão térmica, eletrodeposição, cementação, deposição em fase gasosa e redução química (Gentil, 2017). O zinco para a proteção do aço pode ser utilizado de diversas formas, como por exemplo, na pintura com tinta rica em zinco, metalização, galvanização eletrolítica, galvanização contínua e galvanização por imersão a quente (*American Galvanizers Association*, 2015). A Figura 4 mostra uma análise comparativa de microestruturas de revestimentos à base de zinco.

Figura 4 – Microestrutura de diferentes tipos de revestimento de zinco.



Fonte: adaptado de (*American Galvanizers Association*, 2015).

É possível perceber, em termos de espessura, que cada método apresenta capacidades protetivas diferentes. Entre as tecnologias que apresentaram maior espessura de revestimento, a galvanização por imersão a quente é capaz de gerar um revestimento mais compacto, enquanto aquele produzido por metalização é mais

poroso (Kuklik; Kudláček, 2016). A tinta rica em zinco, embora eficaz em certas aplicações, apresenta menor durabilidade quando comparada à oferecida pela galvanização por imersão a quente (*American Galvanizers Association*, 2007).

O Quadro 2 organiza algumas características dos métodos de revestimento de zinco. A interação metalúrgica zinco-aço proporciona revestimentos mais aderidos ao substrato. Sendo assim, associada à capacidade de barreira evidenciada na Figura 4, a galvanização por imersão a quente passa a se apresentar como a melhor opção de aplicação do zinco como revestimento metálico para a proteção anticorrosiva.

Quadro 2 – Características dos diferentes tipos de revestimento de zinco para estruturas de aço.

Método	Descrição	Aplicação	Tipo de interação zinco-aço
Metalização	Aplicação de zinco fundido e pulverizado sobre a peça de aço	Em fábrica ou em campo	Mecânica
Galvanização por imersão a quente	Imersão do aço em banho de zinco fundido	Em fábrica	Metalúrgica
Tinta rica em zinco	Aplicação de tinta contendo alto teor de zinco metálico particulado	Em fábrica ou em campo	Mecânica
Galvanização contínua	Imersão a quente aplicado em lâminas de aço, de forma contínua, a uma velocidade pré-definida	Em fábrica	Metalúrgica
Galvanização eletrolítica	Aplicação de revestimento de zinco por eletrodeposição	Em fábrica	Mecânica

Fonte: adaptado de (*American Galvanizers Association*, 2015).

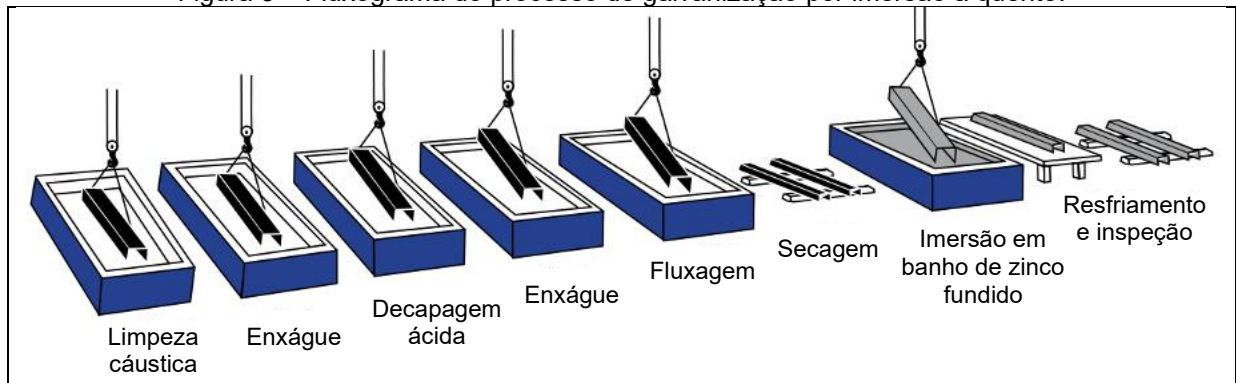
### 3.3.2 Galvanização por imersão a quente

A galvanização por imersão a quente, aplicada na produção de aço galvanizado, é uma das principais estratégias de proteção contra corrosão em estruturas metálicas, com vasta aplicação nos setores elétrico, da construção civil e arquitetura, em componentes de equipamentos mecânicos, no setor de transportes e na agricultura (Maass, 2011). Empregado desde a década de 1930, esse método de proteção permanece até os dias atuais como uma tecnologia consolidada e economicamente viável para o revestimento de aço com zinco (Yan *et al.*, 2022).

Essa técnica consiste na imersão de componentes de aço em um banho de zinco fundido, a cerca de 450 °C, promovendo a formação de uma camada metálica de liga de ferro e zinco (Fe-Zn) que atua como barreira protetora contra agentes corrosivos (Kuklik; Kudláček, 2016). Existem basicamente dois métodos principais de galvanização que são o processo contínuo, mais indicado para tubulações e produtos

em bobina, como chapas e fios, e o processo por batelada, normalmente indicado para produtos de geometrias complexas, de tamanhos muito pequenos e em quantidades reduzidas (Marder, 2000; Schulz; Thiele, 2011). A Figura 5 ilustra as etapas da galvanização por imersão a quente pelo processo por batelada.

Figura 5 – Fluxograma do processo de galvanização por imersão a quente.



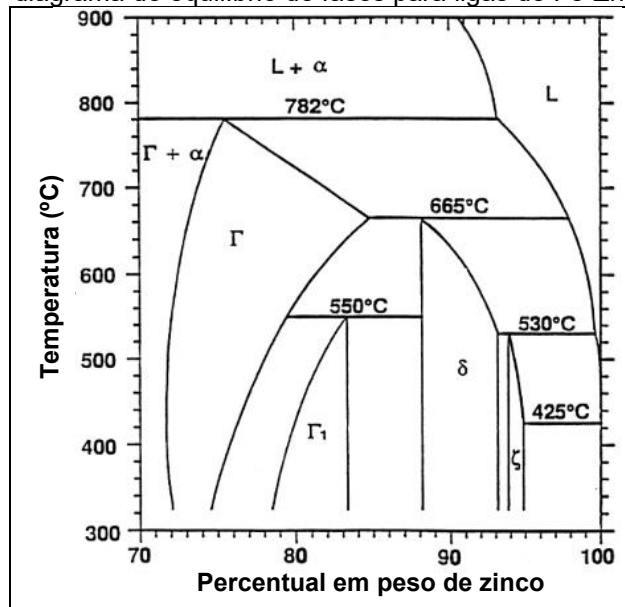
Fonte: adaptado de (*American Galvanizers Association*, 2012).

O processo de galvanização por imersão a quente compreende três fases essenciais: (i) a preparação adequada da superfície metálica, visando a remoção de contaminantes e óxidos; (ii) a galvanização propriamente dita; e (iii) a inspeção final, que assegura a conformidade do revestimento com os critérios de qualidade e de desempenho. A preparação da superfície é a etapa mais crítica na aplicação de revestimentos. Falhas prematuras, em geral, estão associadas a deficiências nesse estágio do processo (*American Galvanizers Association*, 2012).

A galvanização por batelada mostrada na Figura 5 segue o método de galvanização a seco, por conta da etapa secagem incluída no processo. A limpeza cáustica remove da superfície metálica contaminantes orgânicos, como graxa e óleo; a decapagem ácida remove carepa de laminação e óxidos de ferro (produtos de corrosão); as etapas de enxágue lavam as estruturas, removendo resquícios de solução dos banhos anteriores. A fluxagem consiste na imersão das peças em solução contendo cloreto de zinco e cloreto de amônio e, em seguida, elas são secas em forno à temperaturas entre 60 °C e 120 °C, antes da imersão no zinco fundido (Eijnsbergen, 1994; Kuklik; Kudláček, 2016; Schulz; Thiele, 2011). Essa etapa garante a remoção de quaisquer óxidos remanescentes na superfície do aço, além de depositar uma camada protetora no aço para evitar que ele corra antes da imersão no zinco fundido (*American Galvanizers Association*, 2012; Ozturk; Evis; Kilic, 2017).

Quando o substrato de aço é imerso no banho de zinco fundido, ocorrem diversas reações metalúrgicas que estão associadas à composição do banho e da composição química do aço. As reações químicas e de difusão entre Fe-Zn promovem a formação de camadas (fases intermetálicas) com diferentes concentrações desses elementos. Essas reações tendem ao equilíbrio termodinâmico, correlacionando a composição química com a temperatura (Ozturk; Evis; Kilic, 2017; Schulz; Thiele, 2011). A Figura 6 ressalta a região do zinco, em altas concentrações, do diagrama de equilíbrio de fases para ligas Fe-Zn.

Figura 6 – Porção de alta concentração de zinco no diagrama de equilíbrio de fases para ligas de Fe-Zn.



Fonte: adaptado de (Marder, 2000).

As fases intermetálicas de zinco-ferro também se diferenciam em termos de morfologia dos grãos e o tempo para se formarem. Em suma, são formadas quatro fases denominadas eta ( $\eta$ ), zeta ( $\zeta$ ), delta ( $\delta$ ) e gama ( $\Gamma$ ), como mostra a Figura 7. Observa-se que a concentração de ferro nas fases intermetálicas é mais elevada nas camadas mais próximas ao substrato, resultado da maior difusão de átomos de ferro a partir do aço carbono. A espessura de cada fase está diretamente associada ao tempo de imersão no banho de zinco fundido, de modo que, quanto maior o tempo de imersão, maior será a espessura. Adicionalmente, a temperatura e a presença de outros elementos de liga no banho de zinco, a espessura de chapa, a rugosidade da superfície e a composição do aço base também exercem influência sobre a espessura das fases intermetálicas (Eijnsbergen, 1994; Kuklik; Kudláček, 2016).



O Quadro 3 elenca algumas características de cada fase intermetálica. Fica evidente que existem muitas diferenças entre as fases intermetálicas, demonstrando uma correlação direta entre o teor de ferro com as propriedades analisadas, particularmente no que se refere à dureza. Isso demonstra que a galvanização proporciona não apenas proteção anticorrosiva, mas também melhoria nas propriedades mecânicas do aço.

Quadro 3 – Características das fases intermetálicas do aço galvanizado por imersão a quente.

Fase	% Ferro (m/m)	Fórmula	Estrutura cristalina	Dureza Vickers
Eta ( $\eta$ Zn)	0,03 – 0,08	Zn(Fe)	HCP	70
Zeta ( $\zeta$ )	5,0 – 6,2	FeZn <sub>13</sub>	Monocíclica	179
Delta ( $\delta$ )	7,0 – 11,5	FeZn <sub>10</sub>	HCP	244
Gama ( $\Gamma_1$ )	17,0 – 19,5	Fe <sub>5</sub> Zn <sub>21</sub>	CFC	250
Gama ( $\Gamma$ )	23,5 – 28,0	Fe <sub>3</sub> Zn <sub>10</sub>	CCC	
Aço carbono ( $\alpha$ Fe)	98 – 99	Fe(Zn)	CCC	159

Fonte: adaptado de (*American Galvanizers Association*, 2012; Kuklik; Kudláček, 2016; Marder, 2000; Pokorny *et al.*, 2016b).

Nota: HCP - hexagonal compacta; CFC - cúbica de face centrada; CCC - cúbica de corpo centrado.

### 3.3.3 Avaliação da conformidade do galvanizado

O objetivo da inspeção do aço galvanizado é garantir a conformidade com os requisitos das especificações técnicas e, embora possam existir diferenças na aparência e no acabamento, elas não são motivo para rejeição, a menos que afetem a proteção contra corrosão a longo prazo. Uma variedade de testes pode ser realizada para avaliar as propriedades do aço galvanizado por imersão a quente. Analisam-se a espessura, uniformidade e aderência do revestimento, no intuito de evitar falhas prematuras e inesperadas após o início de operação da estrutura (*American Galvanizers Association*, 2012, 2016; ABNT, 2016a). Além disso, a inspeção visual da aparência é de fundamental importância, uma vez que permite identificar eventuais regiões em que o aço base não foi adequadamente recoberto pelo zinco (Ozturk; Evis; Kilic, 2017). A Norma ABNT NBR 6323 estabelece uma série de critérios técnicos que garantem a qualidade de aços galvanizados fabricados por imersão a quente (ABNT, 2016a). O Quadro 4 resume alguns testes e seus respectivos parâmetros de aceitação.

Quadro 4 – Testes de conformidade de aço galvanizado estabelecidos pela ABNT NBR 6323.

Teste	Descrição do método	Critério de aceitação
Inspeção visual	Avaliação detalhada da superfície revestida com zinco	Defeitos estéticos não são considerados; empenamento de peças e falhas no revestimento (áreas do aço-carbono maiores que 8 mm <sup>2</sup> ) é que são fatores críticos
Aderência do revestimento	Os métodos de ensaio são enrolamento, incisão, corte em granel e por martelo-basculante. Contudo, para estruturas com substrato de aço-carbono, esse ensaio pode ser descartado por conta das interações metalúrgicas geradas pela galvanização e que garantem a aderência do revestimento	O material é aprovado caso não apresente descamação ou esfoliação aparente na camada de zinco
Massa de revestimento por unidade de área	O método gravimétrico, baseia-se na diferença de massa da peça antes e depois da remoção da camada de galvanizado com solução ácida, considerando a área superficial	Para materiais fundidos a massa mínima por unidade de área deve apresentar média amostral de 500 g·cm <sup>-2</sup>
Espessura do revestimento	Utilização de equipamentos medidores de espessura seca ou por meio da conversão da massa de revestimento por unidade por área para espessura, com base na densidade nominal do zinco (7,14 g·cm <sup>-3</sup> )	Para materiais fundidos a espessura média de revestimento deve ser de no mínimo 70 µm
Uniformidade do revestimento	As peças são imersas em uma solução saturada de sulfato de cobre II e verifica-se o surgimento de depósitos aderentes de cobre metálico após ciclos sucessivos de imersão	O material é aprovado se após 6 ciclos de imersão não surgirem depósitos maiores que 2 mm <sup>2</sup>

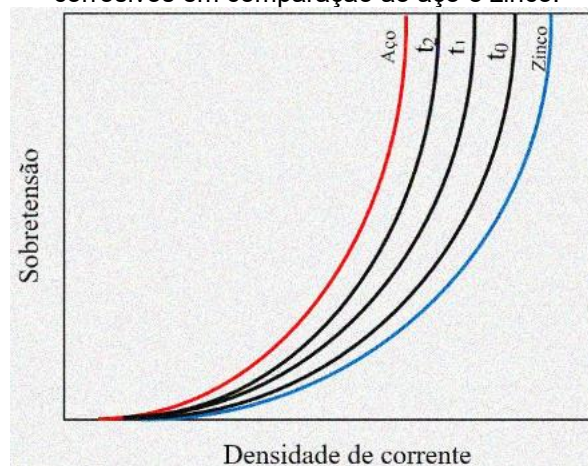
Fonte: adaptado de (ABNT, 2016a).

Com base na literatura e na experiência técnica da área, há uma demanda constante por análises mais aprofundadas das características dos revestimentos galvanizados, devido às diversas condições de aplicação. Alguns ensaios, como o de Preece, apresentam limitações na interpretação, especialmente na determinação da área de deposição de cobre em superfícies irregulares. Além disso, a ASTM define outros procedimentos específicos, como testes de fragilização e flexão, essenciais para avaliar o desempenho de aços galvanizados em aplicações estruturais (*American Galvanizers Association*, 2016).

Ensaio eletroquímico também podem ser aplicados na análise de superfícies galvanizadas. A polarização potenciodinâmica, por exemplo, avalia se o aço está mais protegido ou mais propenso a corroer, de acordo com o deslocamento do ramo anódico da curva de polarização. Isso ocorre porque a polarização potenciodinâmica avalia a disponibilidade de zinco na superfície do material, já que o processo anódico durante a polarização é dominado pelo consumo da camada de galvanizado (dissolução do zinco). Essa técnica é, portanto, considerada semiquantitativa em

relação ao nível de desgaste da camada de galvanizado. Ou seja, quanto maior a quantidade de zinco na superfície do CP, maior a densidade de corrente gerada no ramo anódico da polarização (Besseyrias *et al.*, 1997). A Figura 9 exemplifica o deslocamento teórico de curvas de polarização de amostras de aço galvanizado submetidas a corrosão da camada de zinco, em diferentes intervalos de tempo. Conforme a superfície do galvanizado corrói, menor é a quantidade de zinco disponível e o comportamento do material fica mais parecido com o do aço, deslocando a curva de polarização para a esquerda.

Figura 9 – Ramo anódico de curvas de polarização de aço galvanizado após diferentes intervalos de tempo ( $t_0 < t_1 < t_2$ ) de exposição a agentes corrosivos em comparação ao aço e zinco.



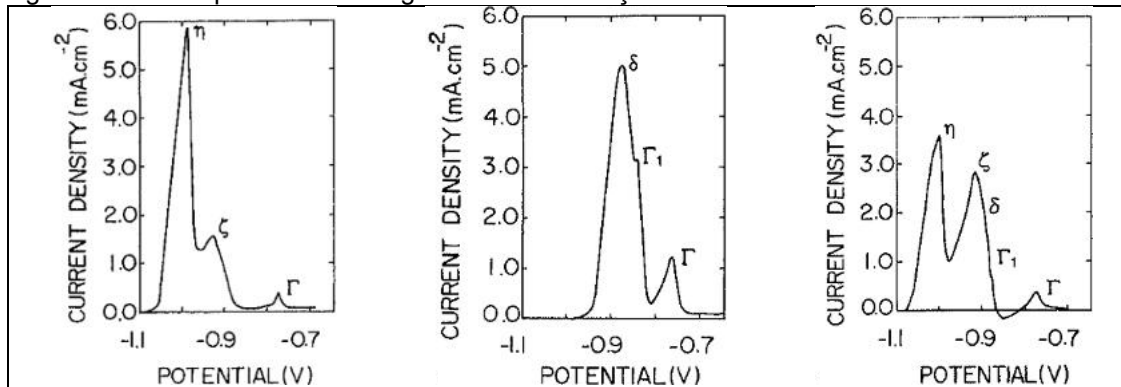
Fonte: (Santana, 2022).

A voltametria de dissolução anódica permite correlacionar qualitativamente a presença das fases intermetálicas do revestimento a partir de sua dissolução controlada, induzida pela aplicação de um potencial crescente. À medida que o potencial atinge o potencial de corrosão de cada fase, ocorre sua dissolução seletiva, sendo fundamental adotar taxas de varredura suficientemente baixas para garantir a separação adequada dos picos correspondentes a cada uma delas (Nogueira; Seixas; Rios, 1998; Nunes *et al.*, 2018). O monitoramento da corrente elétrica gerada entre o eletrodo de trabalho e o eletrodo auxiliar fornece dados precisos sobre a composição da camada (Pacheco *et al.*, 2013).

Em peças galvanizadas, que normalmente apresentam a fase  $\eta$  em sua camada externa, a dissolução inicia-se em potenciais próximos ao do zinco, devido à elevada concentração desse metal nessa fase. À medida que o potencial aplicado se torna menos negativo, ocorre a dissolução das camadas mais internas,

correspondentes às fases intermetálicas Fe-Zn. Esse processo gera picos de densidade de corrente associados aos potenciais característicos de cada fase do revestimento (Queiroz; Costa, 2007). Nogueira, Seixas e Rios (1998) relataram em estudo com aço *galvannealed*<sup>1</sup> que dependendo do modo de fabricação desse aço, tem-se fases intermetálicas com diferentes teores de ferro, alterando, portanto, os picos resultantes do ensaio, bem como suas respectivas intensidades (Figura 10).

Figura 10 – Exemplos de voltamogramas de dissolução anódica de fases intermetálicas Fe-Zn.



Fonte: adaptado de (Nogueira; Seixas; Rios, 1998).

Besseyrias e colaboradores (1997) investigaram o comportamento eletroquímico das diferentes fases intermetálicas presentes no aço galvanizado, utilizando como eletrólito uma solução composta por cloreto de sódio (NaCl) e sulfato de zinco heptahidratado ( $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) ( $3,4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  de NaCl e  $0,3 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  de  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ). Para isso, os pesquisadores sintetizaram amostras contendo fases intermetálicas (zeta ( $\zeta$ ), delta ( $\delta$ ), gama ( $\Gamma_1$ ) e gama ( $\Gamma$ )) puras e homogêneas, caracterizando-as por meio de análises de difração de raios-X. Em seguida, os potenciais de circuito aberto de cada fase foram determinados por meio de sua exposição à solução eletrolítica. A Tabela 1 apresenta o potencial de circuito aberto para cada uma das fases do aço galvanizado avaliadas nesse estudo.

Tabela 1 – Potencial de circuito aberto das fases intermetálicas.

Fases intermetálicas	Zeta ( $\zeta$ )	Delta ( $\delta$ )	Gama ( $\Gamma_1$ )	Gama ( $\Gamma$ )
<b>E (mV) vs ECS</b>	-960	-930	-840	-860

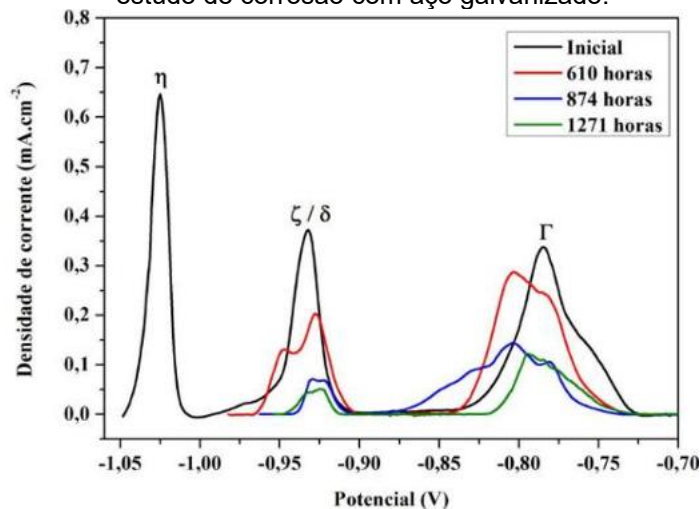
Fonte: adaptado de (Besseyrias *et al.*, 1997).

Nota: medidas de OCP foram obtidas após 30 minutos de imersão das amostras na solução eletrolítica ( $3,4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  de NaCl e  $0,3 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  de  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ); ECS é o eletrodo de referência (eletrodo saturado de calomelano).

<sup>1</sup>É um tipo de aço fabricado por imersão a quente que passa por um processo adicional de recozimento, resultando em fases intermetálicas de liga Fe-Zn diferentes do aço galvanizado (GalvInfo Center, 2011).

A Figura 11 mostra o resultado de um estudo de envelhecimento acelerado de aço galvanizado. Nunes e colaboradores (2018) confirmaram, por meio da voltametria de dissolução anódica, o consumo das fases intermetálicas devido à corrosão do aço galvanizado após diferentes intervalos de tempo em névoa salina. Esse tipo de voltametria ainda é pouco explorado na investigação da corrosão do aço galvanizado. Percebeu-se que quanto mais envelhecido estava o corpo de prova (CP), menores eram os picos referentes às fases intermetálicas obtidos no voltamograma. Inclusive, a fase eta ( $\eta$ ) – fase mais externa e, conseqüentemente, mais exposta aos agentes corrosivos do ensaio –, foi detectada apenas na amostra não envelhecida (inicial), já indicando o seu consumo total após o primeiro tempo de exposição analisado.

Figura 11 – Voltamogramas de dissolução anódica em estudo de corrosão com aço galvanizado.



Fonte: (Nunes *et al.*, 2018).

### 3.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.4.1 Conceitos fundamentais e objetivos da aplicação

É comum que pesquisadores atentem à estatística apenas quando se deparam a uma quantidade enorme de dados. No entanto, a atividade mais relevante da estatística vai além da simples análise de dados. O planejamento dos experimentos para a obtenção desses dados é de fato a parte mais importante (Barros Neto; Scarminio; Bruns, 2007).

Diante da demanda crescente por otimização de produtos e processos — com foco na minimização de custos e prazos, e na maximização de rendimento,

produtividade e qualidade — profissionais de diversas áreas têm recorrido a métodos sistemáticos de planejamento experimental (Rodrigues; lemma, 2009). A estatística passa a ser uma aliada não apenas na análise de dados experimentais, mas também no planejamento e otimização de experimentos (Miller; Miller; Miller, 2018).

Todavia, quando o planejamento não é feito de forma apropriada, os resultados podem se tornar números dos quais não se conclui nada com respaldo estatístico (Barros Neto; Scarminio; Bruns, 2007). Ou seja, a ausência de um planejamento adequado pode resultar na obtenção de dados insuficientes — ou, ao menos, insuficientes do tipo necessário — ou ainda na realização de um número excessivo de medições desnecessárias. Em alguns casos, ambas as situações podem ocorrer simultaneamente, com a coleta de muitas medições de um tipo e poucas de outro. Independentemente do cenário, a qualidade das conclusões será comprometida e recursos valiosos, como tempo, amostras e reagentes, serão desperdiçados (Miller; Miller; Miller, 2018).

Uma das primeiras etapas de um planejamento de experimentos é definir a resposta de interesse. Em seguida, são elencadas as variáveis que a princípio influenciam essa resposta. As variáveis são tratadas como fatores e o objetivo principal do analista é descobrir quais são os valores – os níveis – dos fatores que possuem maior relevância para alcançar a resposta desejada. Ao final, obtém-se uma função matemática que descreve a influência dos fatores na resposta, a qual é conhecida como superfície de resposta (Barros Neto; Scarminio; Bruns, 2007; Leardi, 2009).

A utilização de planejamento experimental visa, em geral, as etapas de: (i) identificação dos fatores que podem afetar o resultado de um experimento; (ii) planejamento do experimento de forma que os efeitos de fatores não controlados sejam minimizados; (iii) uso de análise estatística para separar e avaliar os efeitos dos vários fatores analisados (Miller; Miller; Miller, 2018); (iv) aprimoramento e otimização de metodologias pré-estabelecidas (Rodrigues; lemma, 2009).

Dentre as principais vantagens do uso de planejamento experimental, pode-se ressaltar a quantidade reduzida de experiências ou repetições necessárias para obtenção dos resultados, além de melhorar a qualidade da informação obtida. Isso significa uma diminuição no trabalho e, conseqüentemente, do tempo e do custo final do estudo. Naturalmente, é preciso dedicar um tempo no planejamento geral e no

estudo das variáveis, já que é comum ser necessário realizar algumas triagens até que se atinja o objetivo estabelecido (Leardi, 2009; Rodrigues; lemma, 2009).

Outra vantagem bastante interessante é a avaliação das interações entre os fatores avaliados, uma vez que eles são analisados simultaneamente (Barros Neto; Scarminio; Bruns, 2007), tornando possível a identificação e quantificação de efeitos sinérgicos e antagônicos entre os fatores de interesse. É possível também otimizar mais de uma resposta ao mesmo tempo e calcular e avaliar o erro experimental (Rodrigues; lemma, 2009).

Diversos fatores podem influenciar diretamente os resultados experimentais, de modo que, em determinadas situações, torna-se necessário empregar planejamentos experimentais mais complexos. Esse aspecto, por vezes, explica a baixa adoção dessas ferramentas na prática. Além disso, a definição dos níveis operacionais mais adequados para cada fator — ou seja, a busca pela otimização das condições experimentais — demanda investigações detalhadas e criteriosas. Esses métodos, aliados a outras abordagens multivariadas, compõem o escopo da quimiometria, ciência que se dedica à aplicação de ferramentas estatísticas e matemáticas para extrair informações relevantes de dados experimentais de natureza química (Miller; Miller; Miller, 2018).

### **3.4.2 Planejamentos fatoriais e aplicação**

Os planejamentos experimentais fatoriais são muitos úteis em investigações preliminares quando não se sabe quais fatores têm influência sobre a resposta. São planejamentos de fácil execução e servem como base para executar planejamentos mais sofisticados conforme a necessidade de otimização (Barros Neto; Scarminio; Bruns, 2007). É possível executar planejamentos fatoriais de forma aleatorizada, em blocos, em quadrados latinos, de modo completo ou fracionado. Vale ressaltar que no modo completo, todas as combinações de níveis e fatores são avaliadas, enquanto na versão fracionada é escolhida uma parte dos experimentos, em geral, porque a quantidade é muito grande e deseja-se facilitar a execução (Rodrigues; lemma, 2009).

Uma das principais vantagens da realização de planejamentos fatoriais é a possibilidade de checar a interação de fatores e a influência dessa interação na obtenção da resposta. Em geral, nos planejamentos fatoriais cada fator é avaliado em apenas dois níveis, comumente denominados baixo (-) e alto (+). Isso permite reduzir

significativamente o número de experimentos necessários para a confiabilidade estatística. Por essa razão, esse tipo de delineamento é frequentemente empregado em etapas preliminares, sendo conhecido como planejamento experimental de triagem, cujo objetivo principal é identificar os fatores que exercem maior influência sobre as variáveis de interesse (Miller; Miller; Miller, 2018).

A representação simplificada de planejamento fatorial completo é  $n^k$ , em que “ $n$ ” representa a quantidade de níveis em que os fatores “ $k$ ” serão testados. Portanto, um planejamento fatorial de dois fatores avaliados em dois níveis é  $2^2$ , o qual resulta em quatro combinações de experimentos a serem executados. Essa lista de combinações gera a chamada matriz de planejamento de experimentos (Barros Neto; Scarminio; Bruns, 2007; Rodrigues; lemma, 2009). Contudo, um planejamento como esse, sem repetições, não apresenta graus de liberdade para o resíduo, ou seja, não existe erro padrão. Por essa razão, não se pode construir estimativas por intervalos, testes de hipóteses ou prever resultados. Para resolver esse problema, é usual adicionar pontos centrais (a partir de três repetições) para inferir estatística e possibilitar o cálculo de resíduos (Rodrigues; lemma, 2009).

Rodrigues e lemma (2009) ressaltam que a estratégia de escolha do planejamento experimental depende principalmente da quantidade de fatores e níveis que se quer avaliar, além do conhecimento inicial que se tem sobre o processo. A relação custo x benefício é essencial para atingir mais rapidamente as condições otimizadas, com otimização de recursos e o devido suporte estatístico para discutir os resultados. A sequência estratégica pode ser resumida em 3 etapas:

- a) inicia-se com uma triagem para selecionar as variáveis relevantes, aplicando planejamentos fatoriais completos ou fracionados, dependendo da complexidade;
- b) segue para a otimização, aplicando planejamentos fatoriais completos a fim de se construir modelos preditivos e definir a região ótima para obtenção da resposta;
- c) finaliza com a validação das condições otimizadas, confirmando experimentalmente se os resultados obtidos condizem com a superfície de resposta, definindo assim a eficácia da otimização.

Em suma, as técnicas utilizadas neste estudo foram cuidadosamente selecionadas e aplicadas para garantir a precisão e a reprodutibilidade dos resultados. A preparação dos CP e a aplicação das metodologias de desgaste controlado foram fundamentadas em normas técnicas e em estudos preliminares detalhados. A validação das metodologias de desgaste químico e físico, bem como a caracterização dos CP, são etapas essenciais para apresentação de resultados relevantes para a área de corrosão e materiais. O caráter inédito deste trabalho evidencia a dificuldade em se obter resultados totalmente satisfatórios. Ainda assim, a adoção de metodologias estatísticas voltadas à garantia da confiabilidade dos dados constitui uma base sólida para o avanço de futuras pesquisas sobre o tema.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 PREPARO DAS SOLUÇÕES

Todas as soluções foram preparadas com água destilada de um sistema de purificação a água deionizada tipo II (condutividade máxima de 1  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Todos os reagentes foram usados sem purificação prévia. Os reagentes líquidos utilizados foram: acetona PA, ácido clorídrico (HCl) 37,25% PA, adquiridos do fabricante Isofar (Duque de Caxias, RJ, Brasil); ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) 66% PA e ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 96% PA, adquiridos do fabricante Merck (Rio de Janeiro, RJ, Brasil); solução de nital 2% (v/v), adquirida do fabricante Êxodo Científica (Sumaré, SP, Brasil). Os reagentes sólidos foram: cloreto de sódio (NaCl) PA, cloreto de amônio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) PA, hexametilenotetramina PA, sulfato de cobre II ( $\text{CuSO}_4$ ) PA e sulfato de zinco heptahidratado ( $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), adquiridos do fabricante Isofar (Duque de Caxias, RJ, Brasil).

### 4.2 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA METÁLICOS

Foram adquiridas 900 chapas de aço carbono AISI 1020 com dimensões de 80 mm x 60 mm x 6,6 mm (altura, largura e espessura), cada uma com um furo de 6 mm de diâmetro próximo à borda de menor comprimento. Essas chapas foram utilizadas como substrato para a produção das peças galvanizadas.

O processo de galvanização das peças foi feito em parceria com um fabricante que se disponibilizou a preparar o material sem custos, mas sem a permissão de alterar as condições nos procedimentos de fabricação, como por exemplo, o tempo de permanência no banho de zinco fundido ou o espaçamento entre as peças. Portanto, no intuito de preparar CP com médias distintas de espessuras do revestimento de zinco, como recomendado pela Norma ABNT NBR 6323 (ABNT, 2016a), as chapas de aço carbono foram separadas em três grupos (G, V e C) e cada um deles foi submetido a um tratamento de superfície diferente, como mostra o Quadro 5.

Quadro 5 – Tratamento de superfície nas chapas de aço carbono.

Grupo de corpos de prova	Tratamento de superfície aplicado	Quantidade de peças galvanizadas
Grupo G	Jateamento abrasivo seco com granalha de aço (G40 e G50 na proporção 3:1)	300
Grupo V	Jateamento abrasivo seco com microesfera de vidro	300
Grupo C	Decapagem química com solução ácida para remoção de carepa de laminação	290

Fonte: o próprio autor.

A motivação para definir três tratamentos de superfície diferentes foi para gerar perfis de rugosidade distintos no substrato de aço carbono, para obtenção de faixas de espessura de revestimento de zinco diferentes que possibilitariam o andamento do projeto com três grupos de CP. A sobra de material (10 peças) foi armazenada em laboratório para caracterizações físico-químicas e/ou metalográficas do próprio aço carbono em caso de necessidade futura. Os perfis de rugosidade foram mensurados com medidor de rugosidade Positector® SPG e a influência do perfil de rugosidade na medição de espessura foi obtida com o medidor de espessura DeFelsko PosiTector® 6000 Standard, calculando-se média e o desvio padrão para ambos.

#### 4.2.1 Processo de galvanização e o pós-tratamento

O processo de galvanização por imersão a quente foi realizado em parceria com o fabricante Raitz Galvanização, na unidade de Resende – RJ, pelo processo por batelada. As 890 peças foram levadas à fábrica e manteve-se a separação nos três grupos (G, V e C). As peças foram presas pelos furos, de forma espaçada, utilizando fios de aço. Em seguida, os fios foram pendurados em ganchos, mantendo as peças enfileiradas na vertical. Esses ganchos estavam acoplados a uma estrutura maior, similar a uma plataforma, a qual foi içada por meio de uma ponte rolante por cada etapa do processo: desengraxe, enxágue, decapagem ácida, enxágue, fluxagem, secagem, imersão em zinco fundido e resfriamento. A galvanização seguiu o procedimento padrão da fábrica e a etapa de imersão no banho de zinco fundido a 440 °C durou cerca de 3 minutos. A Figura 12 mostra a disposição das peças após a etapa final de resfriamento.

Figura 12 – Arranjo de parte dos corpos de prova na linha de produção da Raitz Galvanização.



Fonte: o próprio autor.

Fez-se uma inspeção visual nos 890 CP à procura de defeitos gerados no processo de galvanização. Os CP foram lixados manualmente com lixa d'água grão #120, para remoção de alguns defeitos (rebarbas e escorrimentos de zinco) e depois desengraxados com tolueno. Foram atribuídos códigos a cada CP, com numeração sequencial iniciando em "001" e finalizando em "890", precedidos da letra que representa o grupo do tratamento de superfície ao qual foi submetido. Cada CP foi pesado em balança analítica digital Sartorius®, com incerteza de 0,1 mg, e dimensionado com auxílio de paquímetro digital Starrett®, com incerteza de 0,01 mm. Esses registros foram usados em alguns ensaios de qualidade do galvanizado e nos cálculos de taxa de corrosão após exposição em campo.

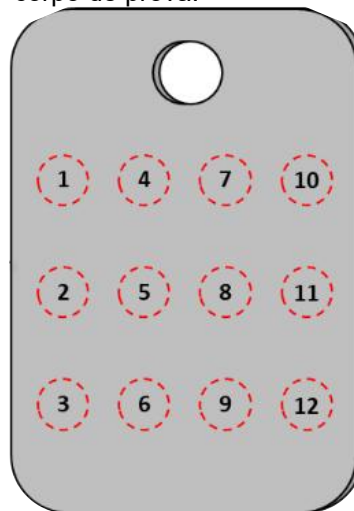
#### 4.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL METÁLICO

Alguns ensaios foram realizados para avaliar a qualidade do aço galvanizado, enquanto outros foram feitos para auxiliar nas caracterizações físico-químicas do metal-base e do revestimento de zinco residual após a execução dos desgastes.

#### 4.3.1 Medição de espessura de galvanizado

As espessuras do revestimento de zinco foram obtidas com base na Norma ABNT NBR 7399 (ABNT, 2015a), a partir de um medidor DeFelsko PosiTector® 6000 Standard, com incerteza de 1  $\mu\text{m}$  e que opera por resistência de fluxo magnético. A média da espessura por CP foi calculada a partir de 24 valores distintos de espessura do revestimento, sendo feitas 12 medições em cada face como esquematiza a Figura 13. Além da inspeção visual, a espessura média foi utilizada como critério para escolha e direcionamento dos CP para os diversos ensaios realizados.

Figura 13 – Pontos de medição de espessura de galvanizado por face de corpo de prova.



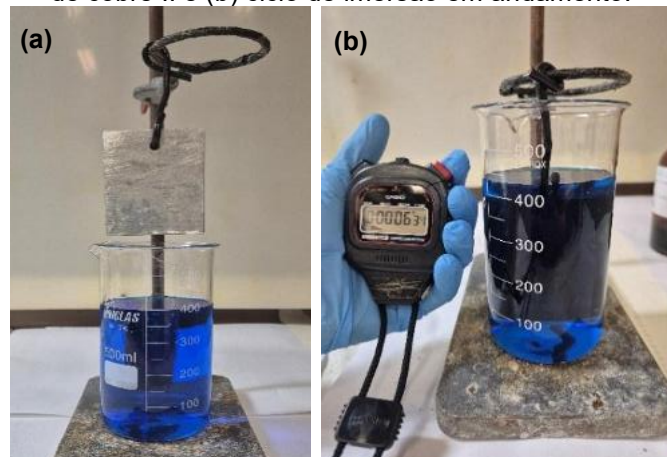
Fonte: o próprio autor.

#### 4.3.2 Verificação da uniformidade do revestimento

A verificação da uniformidade do revestimento foi feita por ensaio de Preece, segundo os procedimentos descritos na Norma ABNT NBR 7400 (ABNT, 2015). Os CP foram imersos durante 1 minuto em solução saturada de sulfato de cobre II ( $\text{CuSO}_4$ ), com densidade de  $1,186 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  à temperatura ambiente. A imersão do CP na solução foi feita sem tocar as paredes do recipiente, como apresentado na Figura 14. Após cada ciclo de imersão o CP foi lavado em água corrente com auxílio de escova de cerdas macias para remoção de material não aderente à superfície. O procedimento foi repetido, limitando-se a um número máximo de seis imersões. Para o material sob ensaio, o critério de aprovação foi definido pela Norma ABNT NBR 6323

(ABNT, 2016a) como sendo o não aparecimento, após as seis imersões, de depósito de cobre aderente e brilhante na superfície lisa e distante das bordas, com área superior a 2 mm<sup>2</sup>. O ensaio foi conduzido em duas réplicas para cada grupo de CP.

Figura 14 – Execução do ensaio Preece: (a) corpo de prova antes da imersão na solução saturada de sulfato de cobre II e (b) ciclo de imersão em andamento.



Fonte: o próprio autor.

#### 4.3.3 Determinação da massa do revestimento por unidade de área

O ensaio de determinação da massa de revestimento de zinco por unidade de área foi feito segundo a Norma ABNT 7397 (ABNT, 2016b), cujo fundamento consiste em remover completamente a camada de zinco da amostra, por meio da ação de solução ácida de HCl, e calcular a diferença entre as massas inicial ( $M_i$ ) e final ( $M_f$ ), expressas em gramas (g). Essa diferença de massa é aplicada na Equação 1, juntamente com a área de superfície da amostra ( $A$ ), expressa em mm<sup>2</sup>, para poder obter a massa de revestimento por unidade de área ( $M_{Zn}$ ), expressa em g.m<sup>-2</sup>.

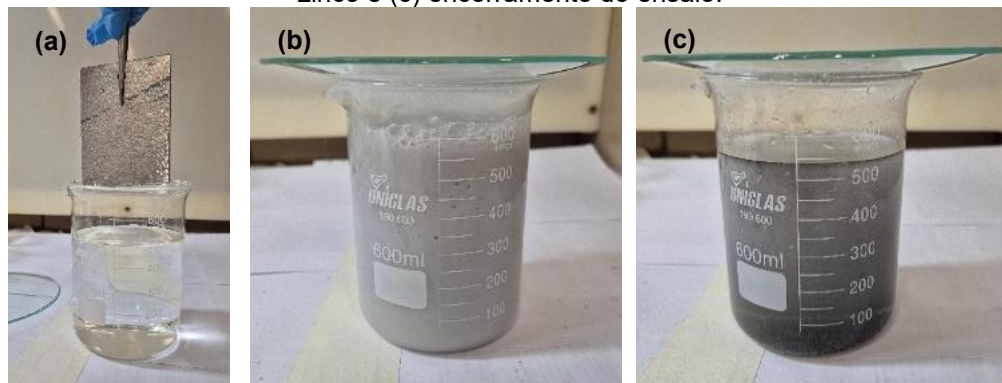
$$M_{Zn} = \frac{M_i - M_f}{A} \times 10^6 \quad (1)$$

O resultado do ensaio depende do cálculo da espessura de revestimento ( $e$ ), expressa em  $\mu\text{m}$ , segundo a Equação 2, que se baseia na massa de revestimento por unidade de área ( $M_{Zn}$ ) e a massa específica ( $\rho$ ) do zinco (7,14 g.cm<sup>-3</sup>).

$$e = \frac{M_{Zn}}{\rho} \quad (2)$$

A dissolução do galvanizado foi feita com solução<sup>1</sup> de HCl  $6,1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , acrescida de hexametilenotetramina na concentração de  $0,025 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ . O desprendimento excessivo de bolhas indica o “consumo” do zinco metálico a zinco na sua forma iônica (reação de oxidação). As bolhas são de gás hidrogênio liberado para a atmosfera (reação de redução da água). Quando a quantidade de zinco metálico na superfície da amostra finaliza, o desprendimento de bolhas reduz drasticamente e o ensaio é encerrado. A Figura 15 ilustra as etapas desse ensaio.

Figura 15 – Ensaio de consumo do revestimento de zinco da Norma ABNT 7397: (a) solução inicial, (b) desprendimento intenso de bolhas durante a dissolução do zinco e (c) encerramento do ensaio.



Fonte: o próprio autor.

#### 4.3.4 Teste rápido para comprovar passivação

A presença de tratamento de passivação (por exemplo, cromatização ou fosfatização), executada ao final da galvanização, pode ser detectada utilizando uma solução de  $\text{CuSO}_4$  em uma concentração de  $0,125 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ . A Norma SSPC-SP 16 (SSPC, 2020) define que uma vez garantido que não há produto de corrosão na superfície galvanizada, três diferentes regiões de aproximadamente  $6,5 \text{ cm}^2$  são avaliadas: a primeira é mantida intocada, a segunda e terceira são desengraxadas com solvente (por exemplo, acetona), e a terceira deve ser lixada com lixa d'água. Após o tratamento das três regiões, fez-se o contato das superfícies com algodão embebido da solução de  $\text{CuSO}_4$ . O resultado pode ser interpretado de formas diferentes: se as três regiões escurecerem imediatamente, não há passivação na superfície; se a primeira região não escurecer em até 10 segundos e a segunda

<sup>1</sup>Essa solução é preparada dissolvendo 3,5 g do reagente hexametilenotetramina em 500 mL de HCl PA (37,25% m/m). A mistura é transferida para um balão volumétrico de 1000 mL e avolumada com água destilada.

e a terceira escurecerem imediatamente, não há passivação na superfície, mas existe a possibilidade de existência de óleo na superfície; se a primeira e a segunda região não escurecerem em até 10 segundos e a terceira região escurecer imediatamente, existe algum tipo de passivação sobre a superfície galvanizada.

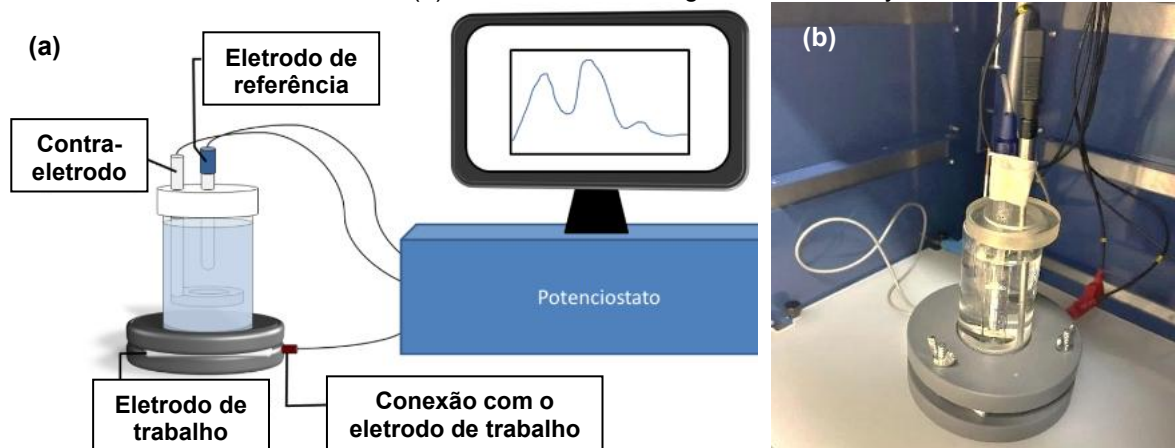
#### 4.3.5 Microscopia óptica do aço galvanizado

A análise microestrutural na seção transversal das amostras de aço galvanizado foi feita via microscopia óptica. Foram geradas imagens com aumento de 500 vezes, em um microscópio óptico OLYMPUS GX 71, no *software* Stream Motio. Para revelar as fases intermetálicas do galvanizado com melhor resolução, após o corte da peça e o embutimento metalográfico em baquelite (resina fenólica), fez-se um ataque químico da superfície com solução de nital 2% (v/v) durante o polimento final das amostras.

#### 4.3.6 Ensaios eletroquímicos

Os CP usados nos ensaios eletroquímicos tiveram a superfície lixada com lixa d'água grão #600 e limpos com trapo umedecido com acetona. Foram realizados ensaios em duplicata para cada grupo estudado, seja novo ou desgastado. Foi utilizado um potenciostato modelo AUTOLAB PGSTAT302N, da Metrohm, conectado à célula eletroquímica, e o *software* Nova 2.1.5 para obtenção dos resultados. A Figura 16 mostra o esquema ilustrado da montagem do sistema e célula eletroquímica de três eletrodos utilizada nos ensaios: amostra de aço galvanizado como eletrodo de trabalho (cerca de 15 cm<sup>2</sup> de área ensaiada); eletrodo de calomelano saturado (ECS) – em solução de cloreto de potássio a 3 mol·L<sup>-1</sup> –, como eletrodo de referência; e, contra eletrodo de aço inoxidável. Os ensaios foram realizados com volume fixo de 0,1 L da solução correspondente na célula eletroquímica, renovando-o por um novo volume de solução para cada CP ensaiado. Foram realizados ensaios de polarização potenciodinâmica e voltametria de dissolução anódica utilizando essa mesma montagem de célula eletroquímica.

Figura 16 – Esquema geral para ensaios eletroquímicos: (a) ilustração da montagem do sistema de ensaio e (b) célula montada em gaiola de Faraday.



Fontes: (a) adaptado de (Santana, 2022) e (b) o próprio autor.

#### 4.3.6.1 Voltametria de dissolução anódica

A voltametria de dissolução anódica utilizou como eletrólito uma solução aquosa de NaCl  $3,42 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , acrescida de sulfato de zinco heptahidratado ( $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) a uma concentração de  $0,35 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , para melhor definição dos picos referentes às fases intermetálicas. Foi feita uma varredura que compreendeu o intervalo entre o potencial de circuito aberto (OCP – *Open Circuit Potential*) até  $-0,70 \text{ V}_{\text{ECS}}$ , com velocidade de varredura de  $5,0\cdot 10^{-6} \text{ V}\cdot\text{s}^{-1}$ . Os voltamogramas foram obtidos após um tempo mínimo de 120 minutos de estabilização do OCP.

#### 4.3.6.2 Polarização potenciodinâmica

A polarização potenciodinâmica foi realizada utilizando como eletrólito solução aquosa de cloreto de sódio (NaCl)  $0,06 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  (aproximadamente  $3,5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ). As curvas foram construídas do OCP até uma sobretensão anódica de  $0,3 \text{ V}$ , com velocidade de varredura de  $0,1 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$  e tempo de estabilização do OCP de 90 minutos.

### 4.4 PLANEJAMENTOS EXPERIMENTAIS

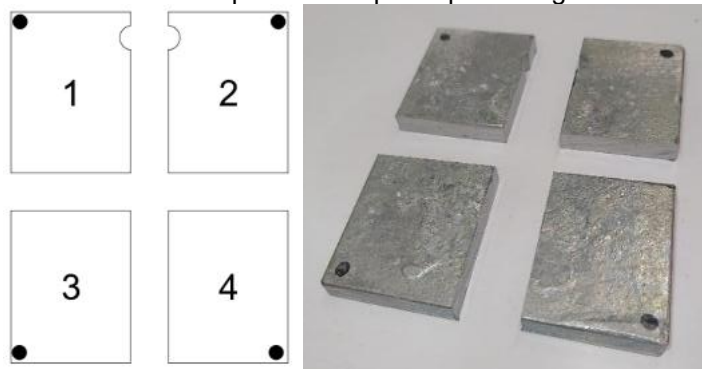
Visando a confiabilidade estatística dos resultados e a otimização no desenvolvimento da metodologia de desgaste do revestimento de zinco, foi tomada como base do estudo a aplicação de ferramentas de planejamento experimental. Em

todas as etapas foram utilizados CP dos três grupos (G, V e C) para garantir a confiabilidade dos resultados considerando todas as amostras.

#### 4.4.1 Ensaios preliminares

Foram propostas três possíveis abordagens para o tipo de desgaste a ser empregado no projeto: química, física e eletroquímica. Após a execução de cada ensaio preliminar, os CP foram pesados e tiveram sua espessura residual de galvanizado medida para fins de compreensão da intensidade dos desgastes. Para evitar o desperdício amostral, uma vez que ainda seria necessário compreender o comportamento geral dos desgastes efetuados no aço galvanizado, os CP foram cortados em quatro partes antes de realizar alguns ensaios preliminares de desgaste químico e físico. A Figura 17 exemplifica um CP cortado em 4 peças menores, com destaque para a identificação numérica e da marcação com caneta preta na frente (face A), para diferenciá-la do verso (face B) e possibilitar o rastreo durante os testes.

Figura 17 – Esquema de corte e identificação das peças cortadas a partir do corpo de prova original.

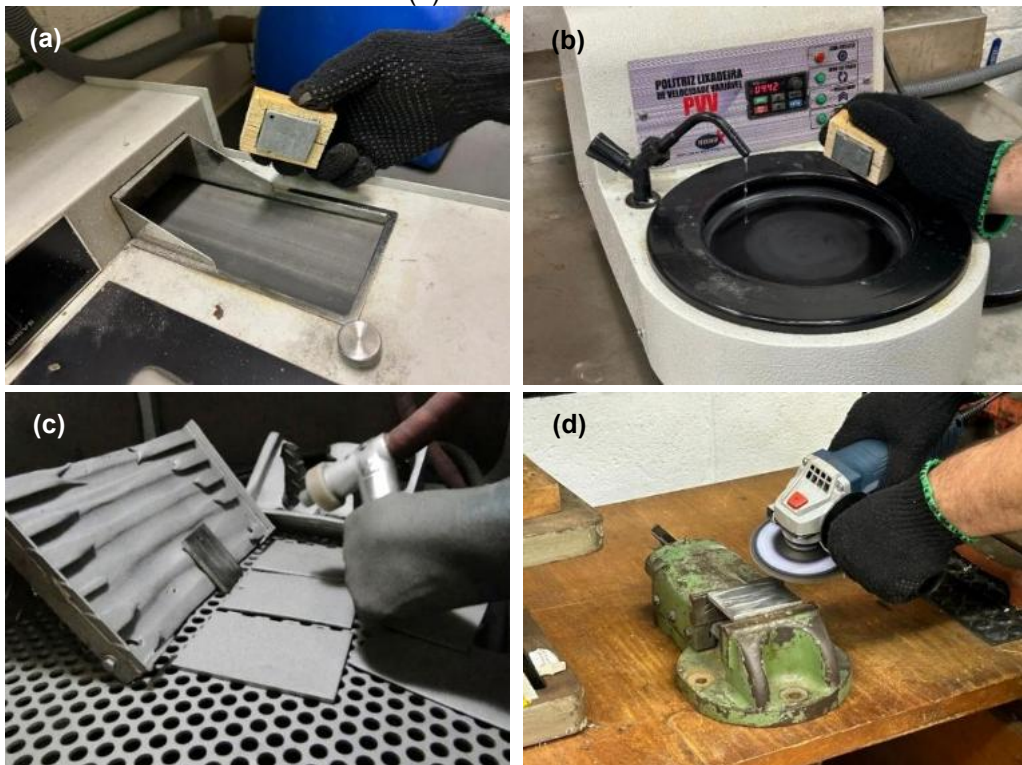


Fonte: o próprio autor.

Os ensaios preliminares de desgaste químico foram adaptados do ensaio de determinação da massa de revestimento de zinco por unidade de área, descrito na Norma ABNT NBR 7397 (ABNT, 2016b). A solução de HCl utilizada nesse ensaio normatizado foi usada como a primeira opção para os ensaios preliminares de desgaste químico, uma vez que ela já é usada na avaliação da qualidade do aço galvanizado e poderia ser adaptada para esse estudo. Foram verificadas variações da concentração do ácido e o tempo de imersão do CP na solução.

Os ensaios preliminares de desgaste físico foram conduzidos utilizando técnicas diversas de tratamento de superfície, enunciadas na Figura 18, a fim de se encontrar uma que fosse de fácil reprodutibilidade e com menor influência do operador nos resultados. Dentre as opções testadas – lixadeira de fita, politriz, jateamento abrasivo seco e lixadeira elétrica –, variou-se a velocidade dos equipamentos, a granulometria das lixas usadas, o tempo de contato da superfície das amostras com as lixas, o tempo de jateamento da superfície e a proximidade do bico da mangueira do jateamento em relação à amostra. Para os ensaios preliminares de ambos os desgastes, foram obtidas as espessuras médias residuais de revestimento de zinco por face e as massas dos CP a cada ciclo de desgaste executado, a fim de se acompanhar cuidadosamente o processo.

Figura 18 – Equipamentos usados nos ensaios preliminares de desgaste físico: (a) lixadeira de fita, (b) politriz, (c) jateamento abrasivo seco com microesfera de vidro e (d) lixadeira elétrica.



Fonte: o próprio autor.

Os ensaios preliminares de desgaste eletroquímico foram baseados na voltametria de dissolução anódica. Essa é uma análise qualitativa que promove o consumo gradual das fases intermetálicas do aço galvanizado quando aplicado um potencial no sistema por meio de um potenciostato. Essa técnica, de forma adaptada, seria outra possibilidade de gerar desgastes controlados do revestimento de zinco.

#### 4.4.2 Triagens (*Screenings*)

Os primeiros planejamentos de triagem (*screening*) foram delineados a partir dos resultados dos ensaios prévios de desgaste. Para os métodos escolhidos, foram estabelecidos dois fatores (variáveis) e ao menos dois níveis para cada um deles. Os planejamentos experimentais escolhidos para essa etapa foram do tipo fatorial completo ( $n^k$ ) com triplicata do ponto central, sendo que  $n$  representa o número de níveis e  $k$  o número de fatores (variáveis) a serem avaliados. Foram utilizados CP dos três grupos, com espessuras médias entre 100 e 110  $\mu\text{m}$  e desvio padrão máximo de 10  $\mu\text{m}$ . Os experimentos foram executados em ordem aleatorizada, diferente de como são apresentados nas matrizes de planejamento e de experimentos ao longo do texto. Os resultados dos desgastes foram interpretados em termos de percentual de redução de massa e de redução de espessura, ambos em relação aos valores iniciais de cada CP. Os dados foram tratados nos *software* Statistica® 8.0, Origin® Pro 8 e Microsoft® Excel. Especificamente, para os resultados das triplicatas de cada planejamento, foi empregado o teste de Grubbs para identificação de valores discrepantes (*outliers*) antes do tratamento estatístico final.

O planejamento experimental para as triagens no método de desgaste químico foi o fatorial completo com dois fatores e dois níveis ( $2^2$ ), com a triplicata de ponto central. O Quadro 6 apresenta a matriz de planejamento para a execução dos ensaios, sendo feitas duas triagens com sete experimentos cada. Os fatores (ou variáveis) avaliados foram tempo de imersão da amostra na solução de desgaste (variável 1,  $X_1$ ) e concentração da solução (variável 2,  $X_2$ ), variando ambos em dois níveis (-1 e +1). O ponto central (0) em relação aos níveis definidos foi executado em triplicata. Os CP foram desgastados por imersão completa e individual, em volume único da solução.

Quadro 6 – Matriz de planejamento experimental para as triagens do desgaste químico.

Experimento	Variável 1 ( $X_1$ )	Variável 2 ( $X_2$ )	Resposta
1	-1	-1	R1
2	+1	-1	R2
3	-1	+1	R3
4	+1	+1	R4
5	0	0	R5
6	0	0	R6
7	0	0	R7

Fonte: o próprio autor.

Nota: (-1) menor nível; (0) ponto central; (+1) maior nível.

O planejamento experimental para as triagens no método de desgaste físico foi o fatorial completo com dois fatores e níveis mistos. De maneira análoga ao planejamento experimental de desgaste químico, optou-se pela triplicata de ponto central para garantir o respaldo estatístico. O Quadro 7 apresenta a matriz de planejamento para a execução dos ensaios, sendo feitas duas triagens com nove experimentos cada. Os fatores avaliados foram tempo de contato da lixa com a superfície do CP (variável 1,  $X_1$ ) e grão da lixa usada na lixadeira elétrica (variável 2,  $X_2$ ). O fator  $X_1$  variou em dois níveis (-1 e +1) enquanto o fator  $X_2$  variou em três níveis (-1, 0 e +1). O ponto central (0) em relação aos níveis definidos foi executado em triplicata. Os CP tiveram as faces desgastadas, uma de cada vez, enquanto estavam presos a uma morsa de bancada; as laterais dos CP não foram desgastadas.

Quadro 7 – Matriz de planejamento experimental para as triagens do desgaste físico.

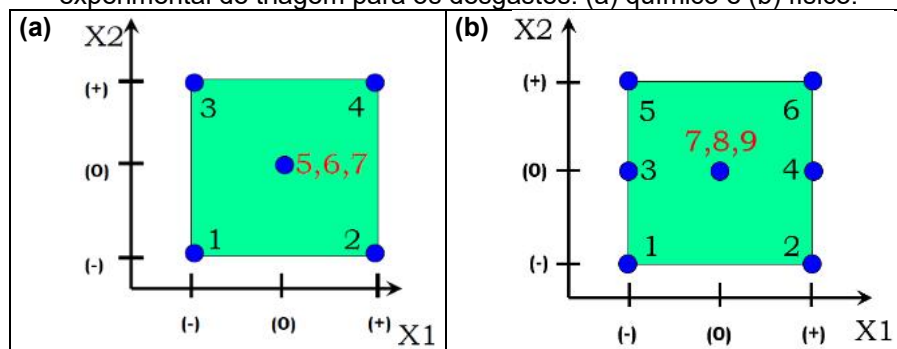
Experimento	Variável 1 ( $X_1$ )	Variável 2 ( $X_2$ )	Resposta
1	-1	-1	R1
2	+1	-1	R2
3	-1	0	R3
4	+1	0	R4
5	-1	+1	R5
6	+1	+1	R6
7	0	0	R7
8	0	0	R8
9	0	0	R9

Fonte: o próprio autor.

Nota: (-1) menor nível; (0) ponto central; (+1) maior nível.

A Figura 19 mostra a forma gráfica das matrizes de planejamento experimental apresentadas no Quadro 6 e no Quadro 7.

Figura 19 – Representação gráfica das matrizes de planejamento experimental de triagem para os desgastes: (a) químico e (b) físico.



Fonte: o próprio autor.

Os níveis testados para as variáveis nos planejamentos experimentais de triagem estão resumidos na Tabela 2. Para ambos os desgastes, os parâmetros para as primeiras triagens foram baseados nos resultados dos ensaios preliminares, enquanto os parâmetros das segundas triagens foram redefinidos a partir das respostas obtidas com as primeiras triagens. Exclusivamente para o fator lixa, durante o tratamento estatístico no *software* Statística® 8.0, os níveis definidos foram -1, 0 e +1 pois esta foi considerada uma variável categórica, já que as granulometrias são fixas de acordo com a disponibilidade no mercado. Na prática, esses valores estão representando os grãos #80 (-1), #120 (0) e #220 (+1), adquiridos pelo laboratório.

Tabela 2 – Níveis dos fatores utilizados em cada planejamento experimental de triagem.

	Triagem	Fator / Unidade	Nível das variáveis		
			Menor nível (-1)	Ponto central (0)	Maior nível (+1)
Desgaste Químico	1 <sup>a</sup>	(X <sub>1</sub> ) Tempo / s	300	500	700
		(X <sub>2</sub> ) Concentração / mol·L <sup>-1</sup>	0,61	1,52	2,43
	2 <sup>a</sup>	(X <sub>1</sub> ) Tempo / s	300	500	700
		(X <sub>2</sub> ) Concentração / mol·L <sup>-1</sup>	0,36	0,61	0,85
Desgaste Físico	1 <sup>a</sup>	(X <sub>1</sub> ) Tempo / s	20	50	80
		(X <sub>2</sub> ) Lixa / grão	80	120	220
	2 <sup>a</sup>	(X <sub>1</sub> ) Tempo / s	120	150	180
		(X <sub>2</sub> ) Lixa / grão	80	120	220

Fonte: o próprio autor.

A espessura média residual de revestimento de zinco foi medida em cada face de CP ensaiado, seguindo os mesmos critérios descritos na seção 4.2.1. Para fins de comparação com esse valor mensurado, o percentual de redução de massa foi convertido a um percentual de redução de espessura calculado, por meio da Equação 2 usada nos cálculos do ensaio de determinação da massa de revestimento de zinco por unidade de área (ver 4.3.3, pág. 45). O resultado das triagens de ambos os desgastes foi fundamental para prosseguir para as etapas de otimização.

#### 4.4.3 Otimização e validação das metodologias

O tratamento de dados das triagens feito no *software* Statística® 8.0 gerou, dentre todas as análises estatísticas, uma equação que modela a superfície de respostas. A partir dessa equação foi possível simular resultados de percentual de redução de massa para os CP, variando-se os níveis dos fatores definidos para cada metodologia de desgaste. A triagem mais promissora feita para cada desgaste teve a

sua respectiva equação do modelo aplicada nas simulações de resultados. Definiu-se a otimização da metodologia com direcionamento para uma redução de 50% da espessura inicial de revestimento de zinco, sendo que esse número equivale a um percentual de redução de massa específico para cada metodologia de desgaste. Dentre as simulações propostas, selecionou-se aquela em que os resultados se adequaram mais ao critério estabelecido: valores mais próximos da meta de 50% de redução de espessura e, conseqüentemente, mais distantes dos extremos de desgaste, seja ele um desgaste total do revestimento (100%) ou um desgaste quase nulo (0%). A Tabela 3 resume os níveis testados para as variáveis, conforme as simulações mais apropriadas para as otimizações de cada metodologia de desgaste.

Tabela 3 – Variáveis e níveis dos planejamentos experimentais de otimização.

Otimização	Variável / Unidade	Nível das variáveis		
		Menor nível (-1)	Ponto central (0)	Maior nível (+1)
Desgaste Químico	( $X_1$ ) Tempo / s	200	300	400
	( $X_2$ ) Concentração / mol·L <sup>-1</sup>	0,85	0,97	1,09
Desgaste Físico	( $X_1$ ) Tempo / s	60	120	180
	( $X_2$ ) Lixa / grão	80	120	220

Fonte: o próprio autor.

O planejamento experimental executado, para ambos os desgastes, foi do tipo fatorial completo com dois fatores e três níveis ( $3^2$ ) e triplicata de ponto central (0). Utilizou-se CP dos três grupos em cada planejamento. O Quadro 8 apresenta de maneira geral a matriz de planejamento experimental construída para as otimizações, contemplando a execução de onze experimentos.

Quadro 8 – Matriz de planejamento experimental para as otimizações dos desgastes químico e físico.

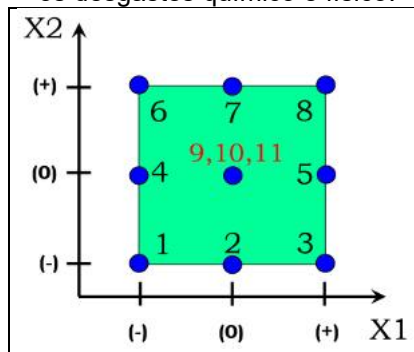
Experimento	Variável 1 ( $X_1$ )	Variável 2 ( $X_2$ )	Resposta
1	-1	-1	R1
2	0	-1	R2
3	+1	-1	R3
4	-1	0	R4
5	+1	0	R5
6	-1	+1	R6
7	0	+1	R7
8	+1	+1	R8
9	0	0	R9
10	0	0	R10
11	0	0	R11

Fonte: o próprio autor.

Nota: (-1) menor nível; (0) ponto central; (+1) maior nível.

A Figura 20 mostra a forma gráfica da matriz de planejamento experimental apresentada no Quadro 8.

Figura 20 – Representação gráfica da matriz de planejamento experimental de otimização para os desgastes químico e físico.



Fonte: o próprio autor.

Cada planejamento experimental de otimização gerou onze respostas (em percentual de redução de massa), as quais correspondem, individualmente, a um percentual de redução de espessura por CP. Para estabelecer o valor, em percentual de redução de massa, correspondente à meta de otimização de desgaste (50% de redução de espessura), fez-se o cálculo individual para cada uma das onze respostas por meio de uma regra de três simples representada pela Equação 3. Utilizou-se para cada resposta o percentual de redução média de espessura (A) e o percentual de redução de massa (B), com base, respectivamente, na espessura de galvanizado residual e na massa final mensuradas. A partir da meta de otimização de desgaste de 50% de redução de espessura do revestimento (C), calculou-se o percentual teórico de redução de massa (D) para cada CP ensaiado na otimização. Em seguida, foi obtida a média desses onze percentuais teóricos de redução de massa, a qual foi definida como meta de otimização para ambos os desgastes.

$$D = \frac{B * C}{A} \quad (3)$$

A equação do modelo do planejamento experimental de otimização de cada desgaste foi utilizada, juntamente com a meta definida, para se determinar os “níveis ótimos” a se trabalhar com cada variável. Uma vez concluídas as otimizações, a etapa subsequente foi de validação das metodologias. A validação consistiu na aplicação da metodologia otimizada em um bloco amostral de cinco CP e obtenção de resultado

médio com erro relativo absoluto (variação em relação à meta) abaixo de 5%. O erro relativo absoluto inferior a 5% garantiria 95% de confiança na aplicação das metodologias desenvolvidas.

A metodologia de desgaste físico foi validada com a execução em dez CP, visto que os resultados variaram muito entre si. Foi preciso aumentar a tolerância quanto ao erro relativo absoluto do resultado em relação à meta, estabelecendo um máximo de até 20%. O erro relativo absoluto abaixo de 20% garantiria 80% de confiança na aplicação da metodologia desenvolvida.

Para as otimizações, validações e preparo dos CP para exposição em campo, foram calculados os desvios padrões relativos (DPR) dos resultados, a fim de se determinar a flutuação entre os valores obtidos em relação à média global.

#### 4.5 PREPARO DE AMOSTRAS PARA ENSAIO DE CAMPO

O desenvolvimento e otimização da metodologia de desgaste do aço galvanizado foi uma etapa de um projeto do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), cujo intuito era levar a campo, CP de aço galvanizado com e sem desgaste. O planejado foi, ao longo de 2 anos de projeto, retirar amostras, determinar as taxas de corrosão em diferentes ambientes e gerar modelos matemáticos mais precisos para a avaliação da vida útil de aço galvanizado em operação em campo, definindo com mais assertividade prioridades de manutenções.

##### 4.5.1 Aplicação das metodologias validadas

Os CP instalados em campo foram desgastados em laboratório com base nas metodologias otimizadas e validadas. Durante as etapas de triagem, otimização e validação, todos os CP ensaiados apresentavam espessura de galvanizado entre 100  $\mu\text{m}$  e 110  $\mu\text{m}$ . Entretanto, para compor o lote das peças que foram instaladas em campo, considerando a quantidade restante disponível com menos defeitos de galvanização, foram selecionados CP que apresentavam espessura inicial de galvanizado entre 90  $\mu\text{m}$  e 130  $\mu\text{m}$ . Ao final dos desgastes, todas as peças foram pesadas para confirmação do percentual de redução de massa, além de terem a espessura de galvanizado residual de cada face mensurada.

#### 4.5.2 Instalação em campo

As instalações em campo ocorreram entre os dias 01/03/2024 e 05/04/2024. Os CP foram instalados em subestações de energia elétrica da Eletrobras definidas previamente para exposição a diferentes condições climáticas encontradas ao redor do Brasil, de acordo com o Quadro 9.

Quadro 9 – Locais definidos para a instalação em campo dos corpos de prova.

Subestação de energia elétrica	Cidade - Estado	Atmosfera	Condições climáticas adicionais
Subestação da Usina de Santa Cruz	Rio de Janeiro - RJ	Urbana	Atmosfera mista pela proximidade ao mar e à empresa de mineração
Subestação de Jorge Lacerda B	Capivari de Baixo - SC	Industrial	Atmosfera mista pela proximidade ao mar
Subestação de Fortaleza II	Fortaleza - CE	Marinha	Atmosfera mista por estar em um centro urbano
Subestação de Juazeiro II	Juazeiro - BA	Baixa umidade	-
Subestação de Marabá	Marabá - PA	Alta umidade	-

Fonte: o próprio autor.

Em cada subestação foi programada a exposição de 45 CP de aço galvanizado e 12 CP de metais padrão para classificação da agressividade atmosférica. As quantidades instaladas de cada grupo em cada subestação e em sua totalidade do projeto estão definidas no Quadro 10.

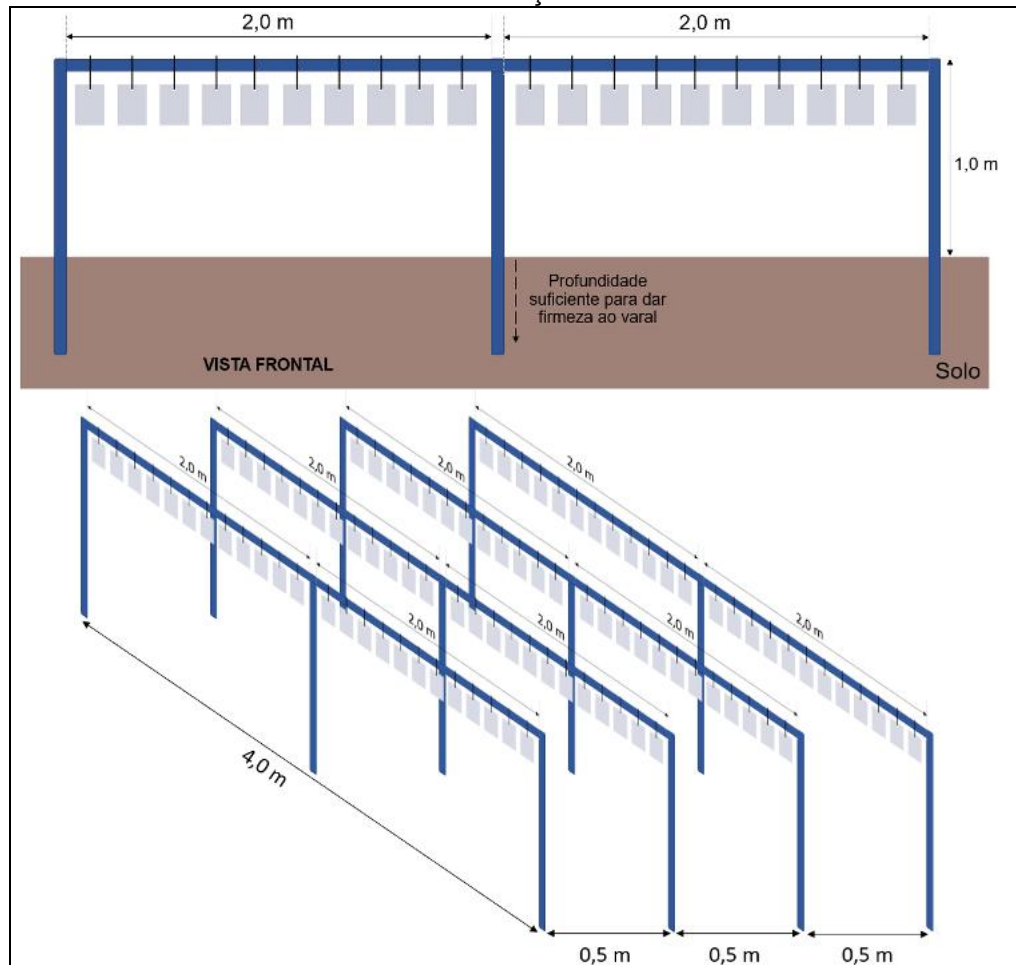
Quadro 10 – Definição das quantidades de corpos de prova preparados.

Grupo ou Condição do CP	Quantidade por Subestação	Quantidade Total	Motivo
Aço galvanizado NÃO desgastado	15	75	Estudo da corrosividade do aço galvanizado em campo após desgaste em laboratório comparando com a referência
Aço galvanizado com desgaste QUÍMICO	15	75	
Aço galvanizado com desgaste FÍSICO	15	75	
Aço carbono	3	15	Classificação da agressividade atmosférica nas regiões das subestações
Alumínio	3	15	
Cobre	3	15	
Zinco	3	15	
<b>Total de CP</b>	<b>57</b>	<b>285</b>	-

Fonte: o próprio autor.

Os CP foram instalados em varais construídos em madeira ou tubos de PVC (policloreto de vinila), com base nos esboços mostrados na Figura 21.

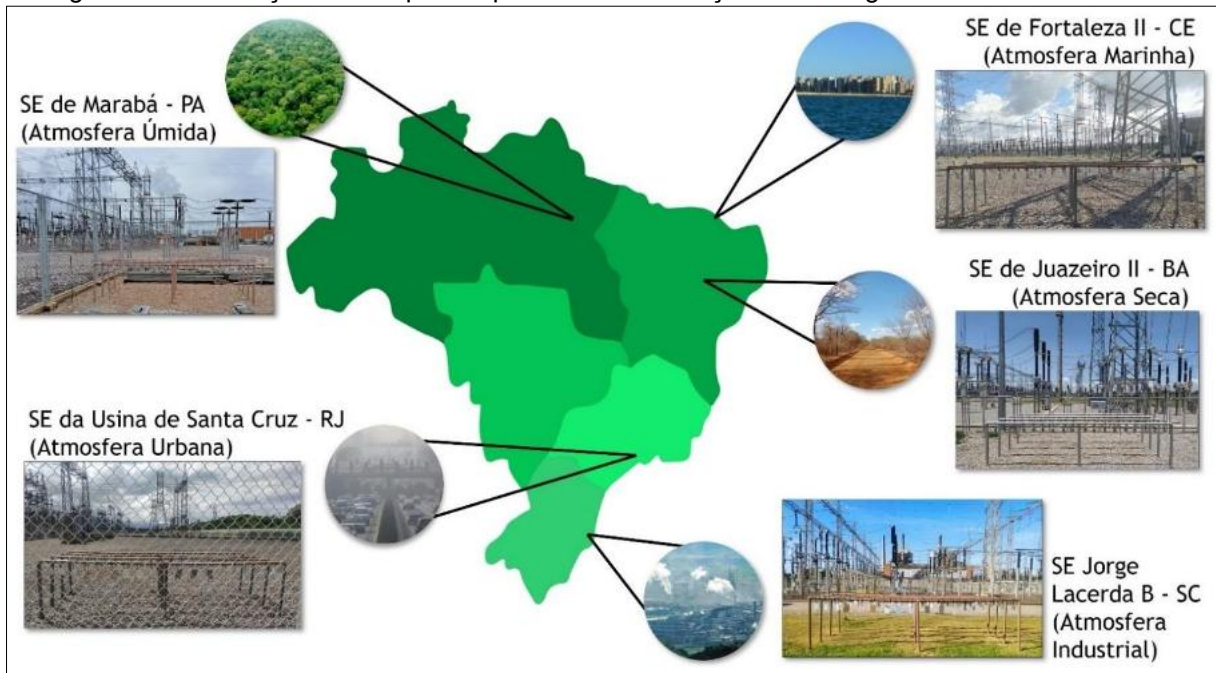
Figura 21 – Desenhos esquemáticos de referência para a construção dos varais nas subestações.



Fonte: o próprio autor.

Os CP referência foram escolhidos de maneira aleatória para cada subestação, visto que a espessura inicial dentre os CP dos grupos estava próxima. Os CP desgastados passaram por um critério de seleção quanto à espessura residual do revestimento, sendo direcionados aqueles com menor espessura residual do galvanizado para subestações com menor corrosividade atmosférica, e aqueles com maior espessura residual do galvanizado para subestações com maior corrosividade atmosférica. A ideia foi tentar evitar corrosão muito intensa em CP com o substrato exposto ou quase exposto, reduzindo assim as chances de influência de taxas de corrosão do substrato (aço carbono) nas taxas de corrosão do aço galvanizado. O APÊNDICE A reúne os mapas de instalação dos CP em cada subestação de energia elétrica. A Figura 22 mostra um resumo gráfico dos locais de instalação e o tipo de atmosfera predominante na região.

Figura 22 – Instalação dos corpos de prova nas subestações de energia elétrica da Eletrobras.



Fonte: o próprio autor.

A programação de retirada dos CP ao longo do tempo de exposição em campo foi estabelecida em 4 meses (1ª retirada), 8 meses (2ª retirada), 1 ano (3ª retirada), 1,5 ano (4ª retirada) e 2 anos (5ª retirada). O lote de 15 CP de aço galvanizado, desgastado e não desgastado, foram preparadas a partir de 5 peças de cada grupo de tratamento de superfície (G, V e C). Planejou-se, a cada retirada, recolher do ensaio de exposição em campo uma triplicata contendo um CP de cada grupo. Exclusivamente para os CP da classificação da agressividade atmosférica, a retirada das três peças foi projetada para ser feita de uma só vez após um ano de exposição em campo, de acordo com a Norma ABNT NBR ISO 9223 (ABNT, 2024b). Essa classificação foi de grande relevância, desde a concepção do projeto até a discussão dos resultados, pois correlaciona a corrosividade atmosférica com as taxas de corrosão do aço galvanizado, além de servir como indicador para definição de troca de materiais ou adição de proteção extra por revestimentos anticorrosivos, dependendo da classificação encontrada para determinada região.

#### 4.5.3 Perda de massa e cálculos de velocidade de corrosão

O ensaio de perda de massa consiste na remoção gradual dos produtos de corrosão por meio de ataque químico, promovido pelo uso de uma solução decapante,

associado a um escovamento manual. O ensaio baseou-se nas Normas ISO 8407 (ISO, 2009) e ABNT NBR 6210 (ABNT, 2008), com soluções de decapagem específicas para cada tipo de material ensaiado, como apresentado no Quadro 11. Como as Normas não definem uma solução decapante específica para o aço galvanizado, utilizou-se a solução indicada para o zinco.

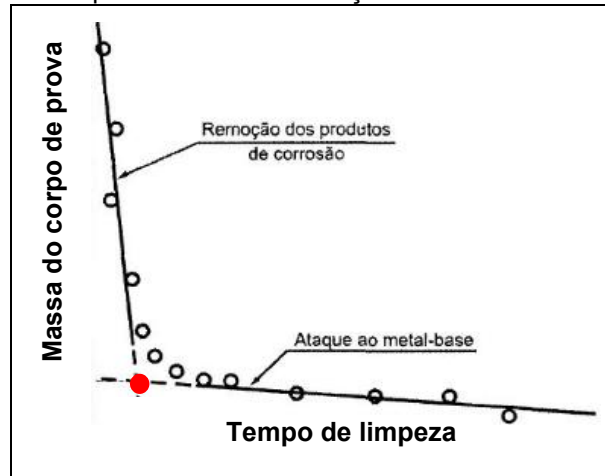
Quadro 11 – Metais e suas respectivas soluções químicas decapantes.

<b>Metal</b>	<b>Decapante</b>
Aço carbono	Solução de ácido clorídrico (HCl) $6,1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , adicionada de hexametilenotetramina em concentração de $0,025 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$
Zinco e Aço galvanizado	Solução de cloreto de amônio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) $1,87 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (m/v), a $70 \text{ }^\circ\text{C}$
Cobre	Solução de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) $1,88 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (m/v)
Alumínio	Ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) PA (66% m/m)

Fonte: adaptado de (ABNT, 2008; ISO, 2009).

Passado o tempo de exposição em campo, os CP retornaram ao laboratório para a remoção controlada de produtos de corrosão, em ciclos de perda de massa. Cada ciclo de decapagem química foi feito pela imersão dos CP em solução decapante correspondente ao material por um determinado tempo e, em seguida, uma escovação manual com escova de aço em água corrente; para os CP de alumínio e cobre, utiliza-se escova de cerda macias. Os CP são secos com jato de ar comprimido e pesados em balança com resolução de 0,1 mg. Os ciclos de decapagem repetiram-se até o ponto em que o corpo de prova estivesse visualmente limpo, ou seja, ao se atingir o patamar horizontal constante do gráfico de perda de massa, como pode ser observado no exemplo teórico ilustrado na Figura 23. O ponto de interseção entre essas duas retas representa a massa final do CP, após limpeza completa dos produtos de corrosão e sem ataque químico ao material base.

Figura 23 – Exemplo teórico de gráfico obtido em ensaio de perda de massa, com destaques para os patamares e a interseção entre as retas.



Fonte: adaptado de (ISO, 2009).

A determinação da taxa de corrosão ( $r$ ) foi feita a partir da diferença da massa final comparada à massa inicial do CP ( $\Delta m$ ), relacionando-a com a área superficial ( $A$ ), expressa em  $\text{mm}^2$ ; o tempo de exposição ( $t$ ), expresso em horas; e, a massa específica ( $\rho$ ) de cada material, expressa em  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . A Equação 4 mostra como foi feito o cálculo de determinação da taxa de corrosão, expressa em  $\mu\text{m}\cdot\text{ano}^{-1}$ , sendo  $K$  uma constante de conversão de unidades, igual a  $8,76 \times 10^9$ .

$$r = \frac{K * \Delta m}{A * t * \rho} \quad (4)$$

A taxa de corrosão final foi obtida a partir da média aritmética da taxa de corrosão de três CP (triplicata). Para os metais padrão, esse valor foi comparado com os valores apresentados no Quadro 12 para avaliação da agressividade atmosférica de cada local, classificando-a em uma das seis categorias de corrosividade atmosférica.

Quadro 12 – Graus de corrosividade atmosférica em função da taxa de corrosão dos metais ( $r_{\text{corr}}$ ), conforme a Norma ABNT NBR ISO 9223.

Categoria de corrosividade	Taxas de corrosão de metais				
	Unidade	Aço-carbono	Zinco	Cobre	Alumínio
C1 (Muito baixo)	g/(m <sup>2</sup> .ano)	$r_{\text{corr}} \leq 10$	$r_{\text{corr}} \leq 0,7$	$r_{\text{corr}} \leq 0,9$	Insignificante
	μm/ano	$r_{\text{corr}} \leq 1,3$	$r_{\text{corr}} \leq 0,1$	$r_{\text{corr}} \leq 0,1$	–
C2 (Baixo)	g/(m <sup>2</sup> .ano)	$10 < r_{\text{corr}} \leq 200$	$0,7 < r_{\text{corr}} \leq 5$	$0,9 < r_{\text{corr}} \leq 5$	$r_{\text{corr}} \leq 0,6$
	μm/ano	$1,3 < r_{\text{corr}} \leq 25$	$0,1 < r_{\text{corr}} \leq 0,7$	$0,1 < r_{\text{corr}} \leq 0,6$	–
C3 (Médio)	g/(m <sup>2</sup> .ano)	$200 < r_{\text{corr}} \leq 400$	$5 < r_{\text{corr}} \leq 15$	$5 < r_{\text{corr}} \leq 12$	$0,6 < r_{\text{corr}} \leq 2$
	μm/ano	$25 < r_{\text{corr}} \leq 50$	$0,7 < r_{\text{corr}} \leq 2,1$	$0,6 < r_{\text{corr}} \leq 1,3$	–
C4 (Alto)	g/(m <sup>2</sup> .ano)	$400 < r_{\text{corr}} \leq 650$	$15 < r_{\text{corr}} \leq 30$	$12 < r_{\text{corr}} \leq 25$	$2 < r_{\text{corr}} \leq 5$
	μm/ano	$50 < r_{\text{corr}} \leq 80$	$2,1 < r_{\text{corr}} \leq 4,2$	$1,3 < r_{\text{corr}} \leq 2,8$	–
C5 (Muito alto)	g/(m <sup>2</sup> .ano)	$650 < r_{\text{corr}} \leq 1500$	$30 < r_{\text{corr}} \leq 60$	$25 < r_{\text{corr}} \leq 50$	$5 < r_{\text{corr}} \leq 10$
	μm/ano	$80 < r_{\text{corr}} \leq 200$	$4,2 < r_{\text{corr}} \leq 8,4$	$2,8 < r_{\text{corr}} \leq 5,6$	–
CX (Extremo)	g/(m <sup>2</sup> .ano)	$1500 < r_{\text{corr}} \leq 5500$	$60 < r_{\text{corr}} \leq 180$	$50 < r_{\text{corr}} \leq 90$	$r_{\text{corr}} > 10$
	μm/ano	$200 < r_{\text{corr}} \leq 700$	$8,4 < r_{\text{corr}} \leq 25$	$5,6 < r_{\text{corr}} \leq 10$	–

Fonte: adaptado de (ABNT, 2024b).

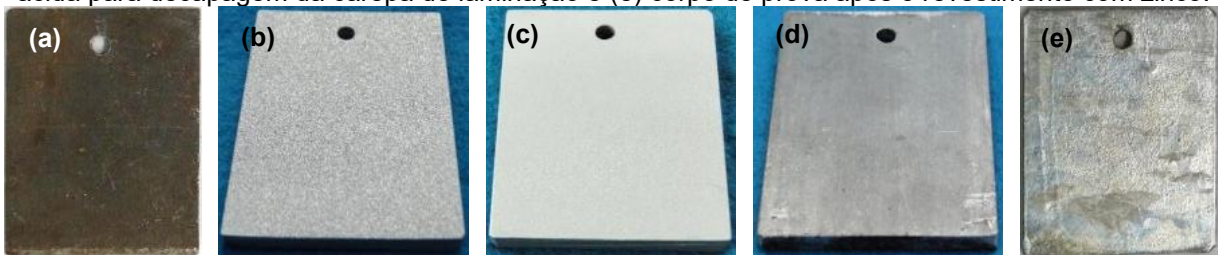
Por questões de prazos, nesta dissertação serão mostradas as taxas de corrosão apenas da primeira retirada de CP, após 4 meses de exposição em campo. Apesar disso, foram detalhadas todas as etapas do ensaio de perda de massa que serão executadas nas próximas retiradas, inclusive no tratamento das amostras de metais padrão para classificação da agressividade atmosférica.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CORPOS DE PROVA

Os CP galvanizados foram obtidos a partir de peças de aço carbono com carepa de laminação. A Figura 24 mostra o aspecto das peças desde a compra até o processo de galvanização: corpo de prova de aço carbono como comprado, com carepa de laminação e início de corrosão vermelha (Figura 24a); aço carbono após tratamentos de superfície feitos com jateamento abrasivo seco com granalha de aço (Figura 24b), jateamento abrasivo seco com microesfera de vidro (Figura 24c) e com solução ácida para decapagem química da carepa de laminação (Figura 24d); e, corpo de prova após processo de galvanização por imersão a quente (Figura 24e).

Figura 24 – Aspecto visual do substrato metálico: (a) corpo de prova de aço carbono, (b) corpo de prova após os tratamentos de superfície com granalha de aço, (c) microesfera de vidro e (d) solução ácida para decapagem da carepa de laminação e (e) corpo de prova após o revestimento com zinco.



Fonte: o próprio autor.

É importante reforçar que a aplicação de tratamentos de superfície diferentes foi feita no intuito de se obter CP com camadas de zinco distintas. Isso porque a rugosidade da superfície do aço impacta no crescimento das fases intermetálicas, influenciando a espessura final do galvanizado devido às reações metalúrgicas entre ferro e zinco (Eijnsbergen, 1994; Kuklik; Kudláček, 2016). Sendo assim, o tratamento de superfície do aço carbono gerou três grupos (G, V e C) com características de superfície distintas, as quais são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados dos corpos de prova de aço carbono após os tratamentos de superfície.

Tratamento de superfície	Referência visual	Grupo	Perfil de rugosidade ( $\mu\text{m}$ )	Influência do perfil de rugosidade na medição de espessura ( $\mu\text{m}$ )
Jateamento abrasivo seco com granalha de aço	Figura 24b	G	$67 \pm 16^*$	$19 \pm 7^*$
Jateamento abrasivo seco com microesfera de vidro	Figura 24c	V	$27 \pm 8^*$	$8 \pm 2^*$
Decapagem química com solução ácida para remoção de carepa de laminação	Figura 24d	C	-	$4 \pm 3^*$

Fonte: o próprio autor.

Nota: \*desvio-padrão obtido a partir de 50 determinações em condições de repetibilidade.

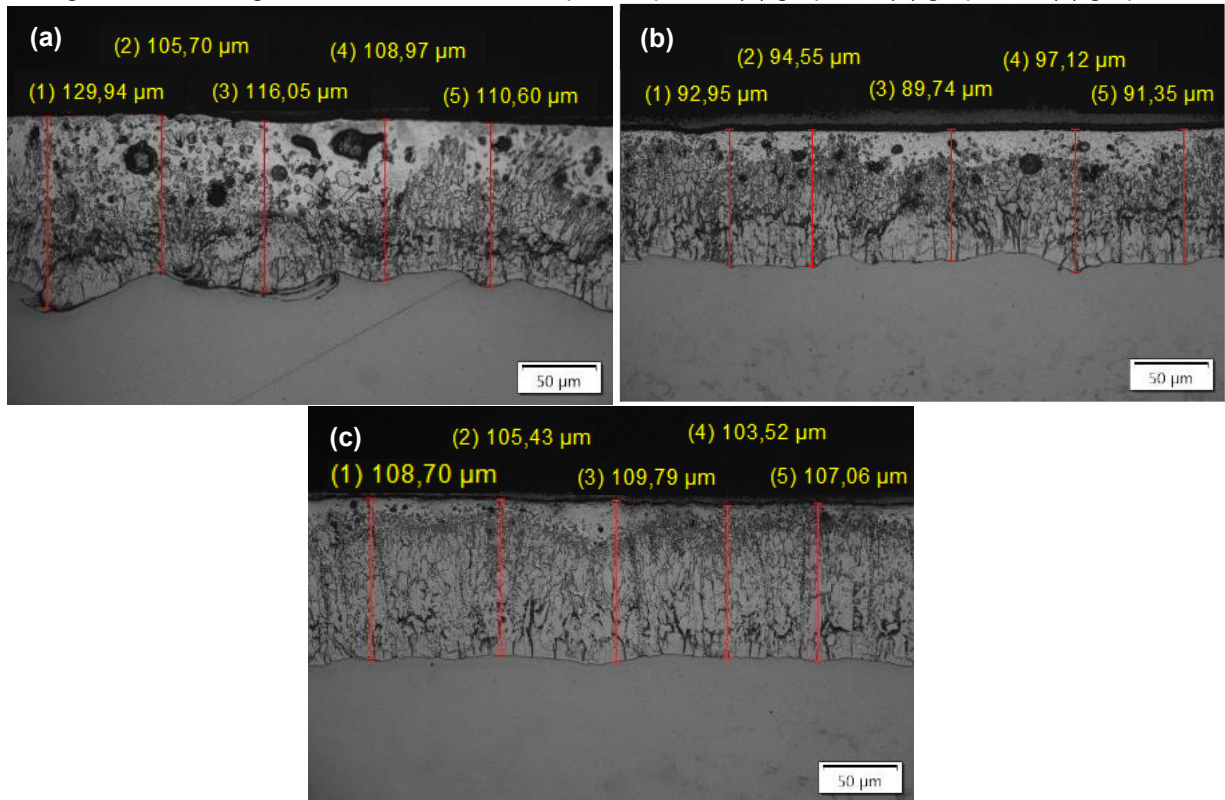
Devido à dureza da granalha de aço quando comparada à microesfera de vidro, o perfil de rugosidade dos CP do grupo G foi mais do que o dobro do perfil de rugosidade dos CP do grupo V. Essa relação foi similar àquela encontrada para a influência do perfil de rugosidade na medição de espessura desses mesmos grupos. Para cada CP dos grupos G e V, a influência do perfil de rugosidade foi deduzida das leituras de medição do revestimento de zinco, a fim de se determinar a espessura real de galvanizado. Os CP do grupo C foram decapados quimicamente e, por essa razão, não houve abertura de perfil; a influência do perfil de rugosidade na medição de espessura desse grupo foi quase nula.

A averiguação desses dados de superfície do substrato é importante, pois o processo metalúrgico de fundição do zinco à superfície do aço pode modificar a rugosidade, diminuindo-a. Além disso, considerando a relação direta entre o perfil de rugosidade e a área superficial, perfis mais elevados favorecem o aumento das reações metalúrgicas que ocorrem durante a imersão do aço carbono no banho de zinco fundido. Confiou-se, portanto, que essas variações de rugosidade resultariam em espessuras de galvanizado significativamente diferentes: quanto maior o perfil de rugosidade, maior a espessura de galvanizado.

As micrografias mostradas Figura 25 evidenciam, além da espessura do revestimento de zinco, a diferença da rugosidade do aço carbono mesmo após o processo de galvanização. A amostra do grupo G (Figura 25a) apresenta uma linha base, referente ao aço carbono, bastante irregular devido ao jateamento com granalha de aço; a amostra do grupo V (Figura 25b) apresenta essa mesma linha base com leves ondulações, devido ao baixo perfil gerado pela microesfera de vidro; e, a amostra do grupo C (Figura 25c) é a que apresenta a linha base mais regular, corroborando a não abertura de perfil. Numa avaliação geral, um perfil de rugosidade

mais baixo ou a inexistência de um perfil de rugosidade tendeu à formação de fases intermetálicas mais regulares e homogêneas.

Figura 25 – Micrografias de amostras de corpos de prova: (a) grupo G, (b) grupo V e (c) grupo C.



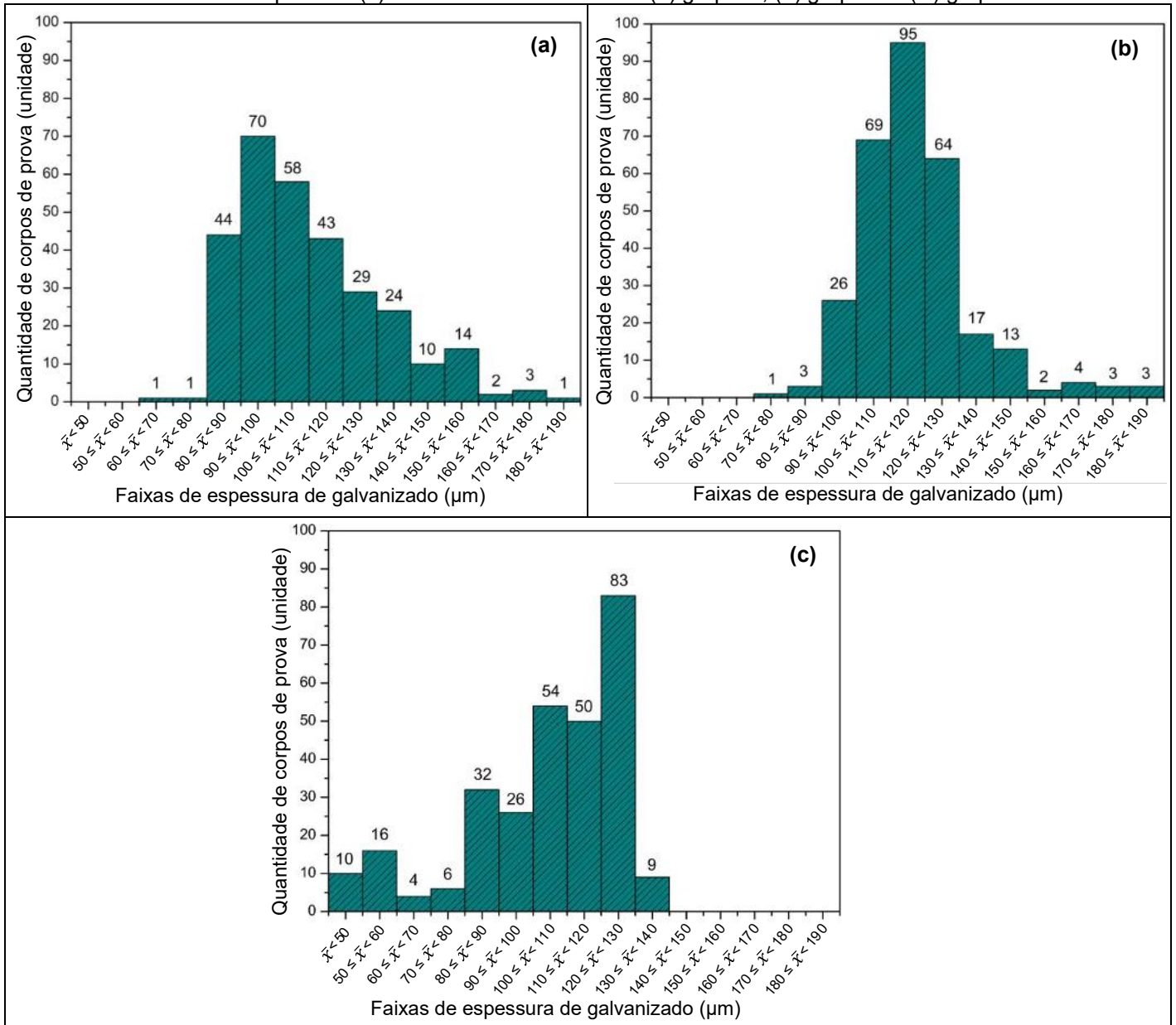
Fonte: o próprio autor.

## 5.2 AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE DO GALVANIZADO

Os critérios de avaliação da conformidade do aço galvanizado utilizados neste trabalho foram a medição de espessura, a uniformidade do revestimento, a quantidade mássica de revestimento por unidade de área e a existência de película passivadora.

A Figura 26 mostra três histogramas de distribuição das médias de espessura dos três grupos de CP galvanizados. Os histogramas confirmaram a previsão de que maiores perfis de rugosidade geram espessuras maiores de galvanizado: o grupo G (Figura 26a), com a maior rugosidade, apresentou um histograma com cauda para a direita, tendendo a valores maiores de espessura; enquanto o grupo C (Figura 26c), que não teve tratamento de superfície que gerasse rugosidade no substrato, apresentou um histograma com cauda para a esquerda, tendendo a valores menores de espessura. O grupo V (Figura 26b), com espessura intermediária, apresentou um histograma mais próximo ao de uma distribuição normal.

Figura 26 – Histogramas de distribuição, por grupos, dos corpos de prova galvanizados com base nas médias de espessura ( $\bar{x}$ ) de revestimento de zinco: (a) grupo G, (b) grupo V e (c) grupo C.

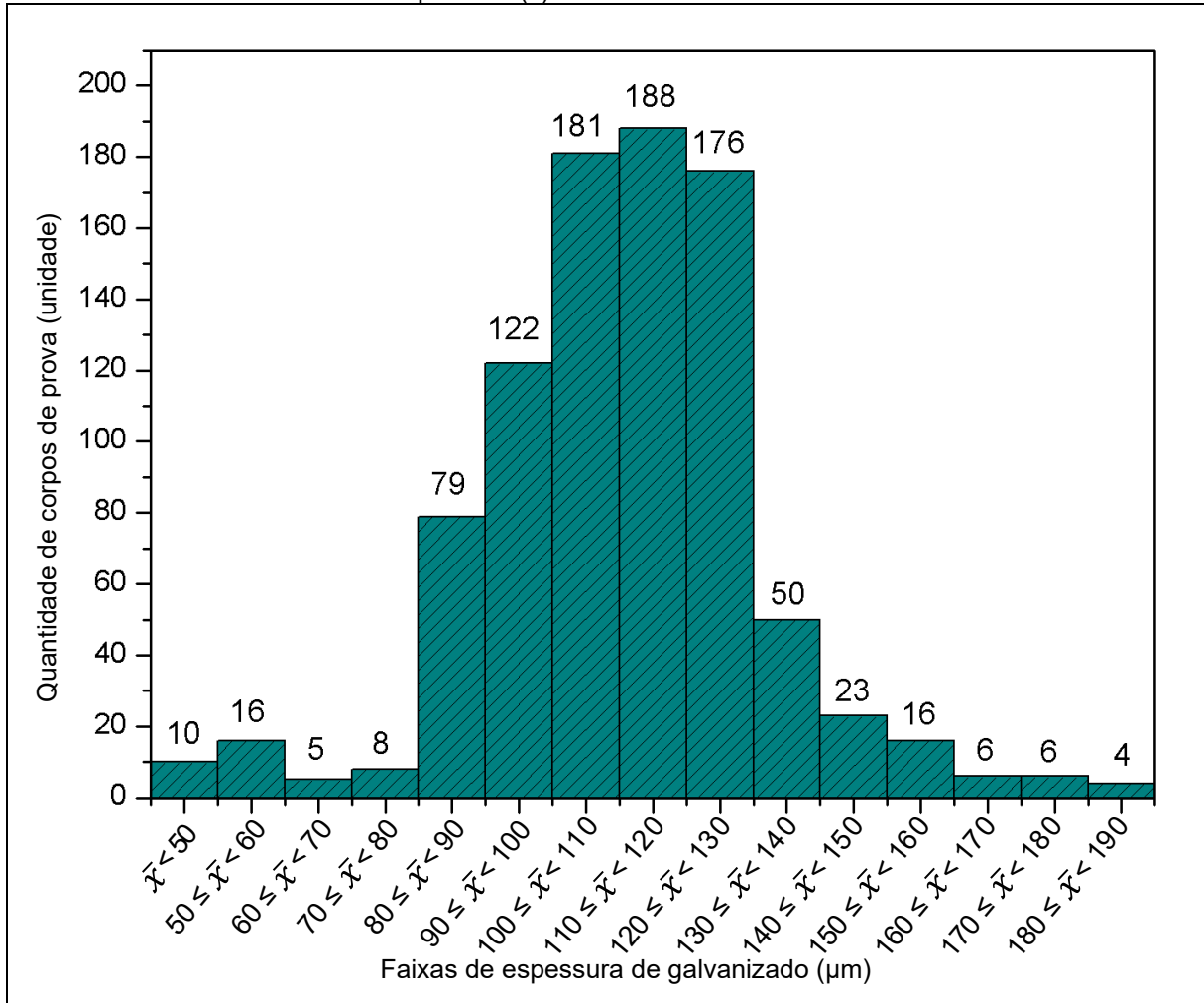


Fonte: o próprio autor.

A Figura 27 reúne as espessuras médias de revestimento de zinco dos 890 CP em um único histograma, com destaque para as médias de espessura por grupo de CP. Nota-se um histograma que segue uma distribuição normal (forma simétrica de sino), com cerca de 75% dos CP apresentando espessura média entre 90  $\mu\text{m}$  e 130  $\mu\text{m}$ . Ao se observar as médias de espessura por grupo de tratamento de superfície do substrato, percebeu-se que não foi possível atingir espessuras significativamente diferentes. Ainda assim o projeto seguiu adiante, porém sem a premissa de trabalhar com grupos que apresentassem diferentes espessuras iniciais de galvanizado;

contudo, a separação por grupo foi mantida por questões de rastreabilidade e possíveis implicações nos resultados dos desgastes controlados.

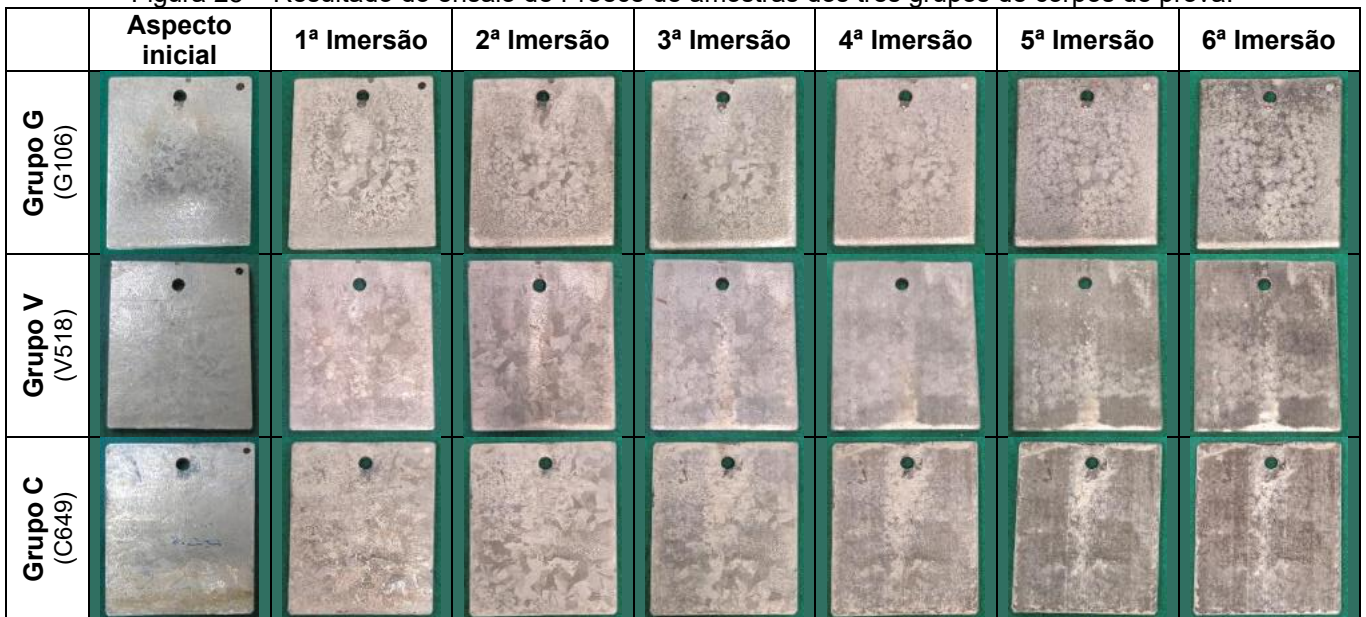
Figura 27 – Histograma geral de distribuição dos corpos de prova galvanizados com base nas médias de espessura ( $\bar{x}$ ) de revestimento de zinco.



Fonte: o próprio autor.

O segundo ensaio realizado de conformidade do galvanizado nos CP deste trabalho, foi o ensaio de Preece, cujo resultado é mostrado na Figura 28. Verifica-se que mesmo após as seis imersões na solução de ensaio, não foi detectado depósito de cobre brilhante e aderente na superfície dos CP. Isso indica que o revestimento de zinco dos CP dos três grupos apresenta uniformidade da camada de galvanizado, sem desvios que comprometessem sua qualidade. Portanto, todos os grupos cumpriram o critério de aceitação estabelecido pela Norma ABNT NBR 6323. Essas heterogeneidades são comuns em estruturas com alta espessura de galvanizado, as quais podem indicar falhas no processo de galvanização (ABNT, 2016a).

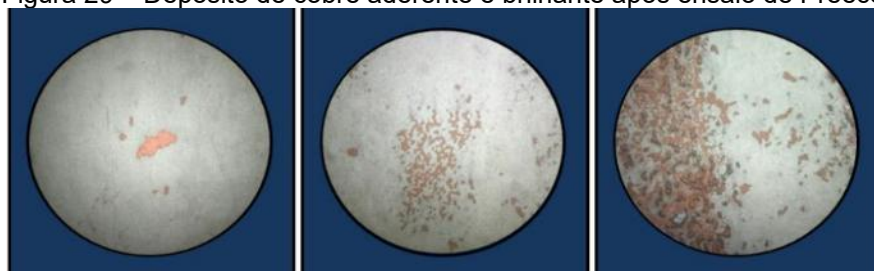
Figura 28 – Resultado do ensaio de Preece de amostras dos três grupos de corpos de prova.



Fonte: o próprio autor.

A Figura 29 ilustra como seria o depósito de cobre caso este fosse aderente na superfície. Em seu trabalho, Santana (2022) submeteu algumas amostras a inúmeras imersões consecutivas na solução de ensaio até que aparecessem os depósitos de cobre aderentes, ultrapassando o número de seis imersões do critério de aprovação da Norma ABNT NBR 6323 (ABNT, 2016a) para fins comparativos. Ao confrontar com os resultados mostrados na Figura 28 é possível confirmar que os CP galvanizados para o presente trabalho estão aprovados no critério de qualidade da uniformidade do revestimento de zinco.

Figura 29 – Depósito de cobre aderente e brilhante após ensaio de Preece.



Fonte: (Santana, 2022).

Em relação ao ensaio de conformidade de determinação da massa de revestimento de zinco por unidade de área, os resultados das triplicatas de CP de cada grupo são apresentados na Tabela 5. Todos os CP atenderam ao critério de aceitação estabelecido pela Norma ABNT NBR 6323, que define uma massa mínima

por unidade de área de  $600 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  para substrato de aço com espessura acima ou igual a 6,0 mm (ABNT, 2016a). A espessura do revestimento, calculada por meio da Equação 2 (ver 4.3.3, pág. 45), foi comparada ao valor obtido com medidor de espessura. A maioria dos valores são coincidentes e poucos se divergem mesmo quando considerada a amplitude da incerteza na medição com o instrumento medidor de espessura. No geral, isso indica que o processo de medição de espessura a partir do instrumento medidor que opera por um princípio magnético, nas condições realizadas, é confiável.

Tabela 5 – Resultados da determinação da massa de revestimento de zinco por unidade de área.

Corpo de prova	Massa inicial (g)* $M_i$	Massa final (g)* $M_f$	Área total (mm <sup>2</sup> )** $A$	Massa de revestimento de zinco (g/m <sup>2</sup> )** $M_{Zn}$	Espessura do revestimento (μm) $e$	
					Calculada**	Mensurada
G049	279,6156	270,0233	13001 ± 4	737,8 ± 0,2	103,33 ± 0,03	91 ± 11
G132	273,3494	264,0189	12719 ± 4	733,6 ± 0,2	102,74 ± 0,03	95 ± 9
G268	276,0249	265,9557	12783 ± 4	787,7 ± 0,2	110,32 ± 0,03	92 ± 10
V495	250,0499	241,8549	11689 ± 4	701,1 ± 0,2	98,19 ± 0,03	99 ± 10
V531	266,8262	257,2438	12410 ± 4	772,2 ± 0,2	108,15 ± 0,03	107 ± 11
V551	271,8920	261,3531	12568 ± 4	838,6 ± 0,3	117,44 ± 0,04	115 ± 11
C622	266,8285	257,0913	12375 ± 4	786,8 ± 0,3	110,20 ± 0,04	101 ± 8
C729	269,5587	259,2218	12526 ± 4	825,2 ± 0,3	115,58 ± 0,04	115 ± 19
C730	266,6177	255,2219	12392 ± 4	919,6 ± 0,3	128,80 ± 0,04	114 ± 7

Fonte: o próprio autor.

Notas: \*a incerteza, em gramas, para os valores de massa inicial e final dos corpos de prova é 0,0001; \*\*A propagação de incertezas foi calculada individualmente para cada resultado.

Como último ensaio de conformidade do galvanizado, a Figura 30 mostra o resultado de confirmação de superfície passivada. O escurecimento exclusivamente na 3ª região testada indicou a existência de algum tipo de passivação na superfície.

Figura 30 – Resultado do teste de verificação de superfície passivada.



Fonte: o próprio autor.

Esse último resultado é bastante relevante pois a passivação proporciona uma proteção extra ao aço galvanizado, evitando a corrosão inicial do zinco mais superficial. Isso reduz as taxas de corrosão desse material quando exposto a agentes corrosivos. Contudo, em sistemas *duplex* – quando se deseja combinar a proteção do aço galvanizado com a proteção de um revestimento orgânico (tinta anticorrosiva) –, é primordial saber se a peça passou pela etapa de passivação após retirada do banho de imersão em zinco fundido, uma vez que a presença desse filme passivador pode afetar a aderência do esquema de pintura (Schulz; Thiele, 2011).

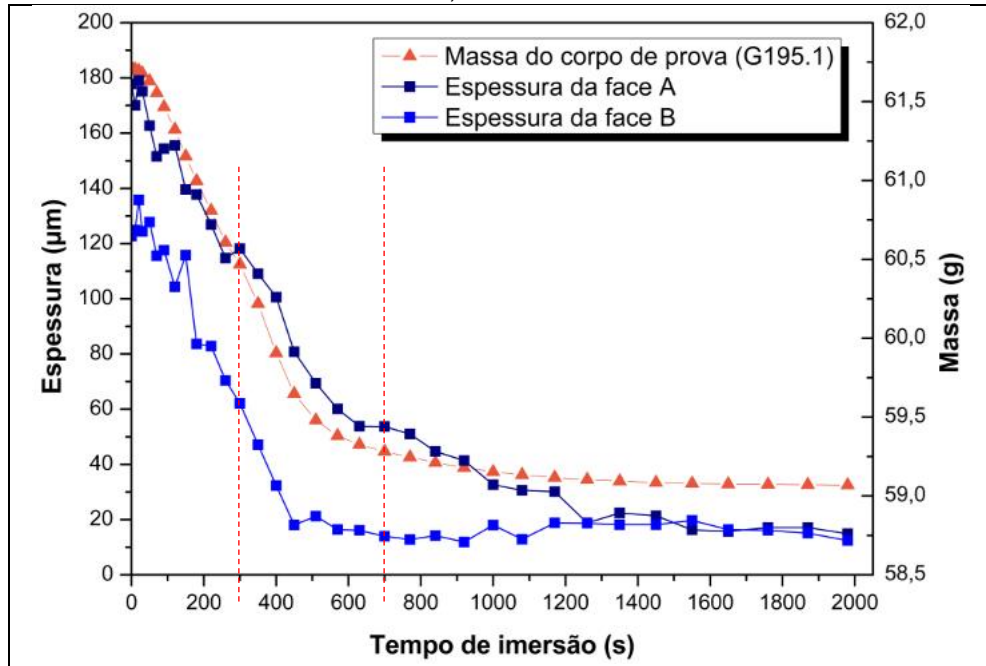
### 5.3 PLANEJAMENTOS EXPERIMENTAIS

#### 5.3.1 Ensaios preliminares

Os ensaios preliminares foram conduzidos devido à ausência de registros na literatura de metodologias laboratoriais voltadas para o desgaste controlado da camada de galvanizado. Dessa forma, não existem procedimentos previamente estabelecidos que possam ser adotados como referência. Todas as técnicas utilizadas nos ensaios preliminares foram baseadas no potencial de consumo da camada de zinco, a fim de propor adaptações para as metodologias a serem desenvolvidas ao longo deste trabalho.

A utilização da solução de HCl  $6,1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  acrescida de hexametilenotetramina a  $0,025 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  para o consumo do zinco do aço galvanizado foi a proposta inicial para conduzir os ensaios de desgaste químico, uma vez que existem procedimentos normatizados que a utilizam (ABNT, 2016b). Além da concentração da solução, o tempo de imersão dos CP nessa solução foi o outro fator definido como mais relevante a se avaliar nesse estudo. Contudo, os resultados para os primeiros ensaios não foram promissores porque com apenas um ciclo de 10, 20 ou 30 segundos de imersão da peça na solução, a redução média de espessura do revestimento de zinco dos CP ficou acima de 75%, superando as expectativas. Decidiu-se refazer o ensaio com a mesma solução, porém utilizando menos HCl PA no seu preparo, passando de uma concentração de  $6,1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  para  $1,2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  (redução da concentração em cinco vezes). O resultado foi registrado por meio do gráfico mostrado na Figura 31.

Figura 31 – Gráfico de acompanhamento de redução de massa e espessura de galvanizado durante ensaio preliminar de desgaste químico, com solução de HCl  $1,2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ .



Fonte: o próprio autor.

Esse ensaio mostrou que foi possível controlar o desgaste do revestimento por meio de ataque químico, em ciclos sucessivos de imersão, utilizando uma solução mais diluída em comparação a que foi utilizada inicialmente. Acompanhar a redução da massa do corpo de prova juntamente com a redução de espessura possibilitou definir as condições de contorno para o tempo de imersão a ser usado no desgaste do galvanizado. A Figura 31 ressalta, entre as linhas vermelhas tracejadas, uma região intermediária na qual o desgaste encontra-se próximo a 50% de redução de espessura. Portanto, para o primeiro planejamento experimental a ser executado, o fator tempo ( $X_1$ ) foi determinado para variar entre 300 segundos (menor nível) e 700 segundos (maior nível) e o fator concentração ( $X_2$ ) entre  $0,6 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  (menor nível) e  $2,4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  (maior nível), estando  $1,2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  dentro desta faixa de trabalho.

Em relação ao desgaste físico, na tentativa de se obter um desgaste controlado, foram feitos alguns ensaios preliminares para encontrar a melhor alternativa. Os desafios são maiores visto que as opções de equipamentos disponíveis necessitam de um operador, seja no controle da velocidade e quantidade de “passadas” ou na força aplicada contra a superfície dos CP. Essas variáveis inerentes ao processo são efeitos aleatórios gerados pela ação humana. O Quadro 13 mostra uma avaliação das técnicas e/ou ferramentas disponíveis para aplicar no desgaste físico deste trabalho.

Quadro 13 – Avaliação geral das técnicas e/ou ferramentas utilizadas nos ensaios preliminares de desgaste físico.

<b>Técnica e/ou ferramenta</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Lixadeira de fita	- Possibilidade de usar lixas de granulometrias diferentes (grão #240, #400 e #600).	- Velocidade fixa e muito alta; - Desgaste homogêneo difícil de controlar.
Politriz	- Fácil manipulação para execução do desgaste; - Velocidade ajustável; - Possibilidade de usar lixas de granulometrias diferentes (#60, #120 #240, #320, #400, #600).	- Área pequena para gerar um desgaste homogêneo.
Jateamento abrasivo seco com microesfera de vidro	- Alta produtividade.	- Dificuldade em padronizar a angulação, distância do jato e o tempo de “passada”.
Lixadeira elétrica	- Possibilidade de usar lixas de tipo e granulometrias diferentes (#16, #120 e disco <i>flap</i> #120); - Maior facilidade em controlar as variáveis que influenciam no desgaste.	- Velocidade fixa de 12000 rpm.

Fonte: o próprio autor.

Essa avaliação geral ajuda a explicar os resultados dos ensaios preliminares de desgaste físico apresentados no formato de gráficos na Figura 32. Percebeu-se diferenças na taxa de desgaste da camada de zinco, em função do método utilizado. Dentre os métodos com a lixadeira de fita, o que foi realizado com a lixa grão #600 mostrou o melhor resultado (Figura 32a), porém foi um desgaste muito acentuado em poucos segundos de contato da peça com a lixa. Como relatado no Quadro 13, a velocidade alta e fixa impediu a obtenção de desgastes mais controlados.

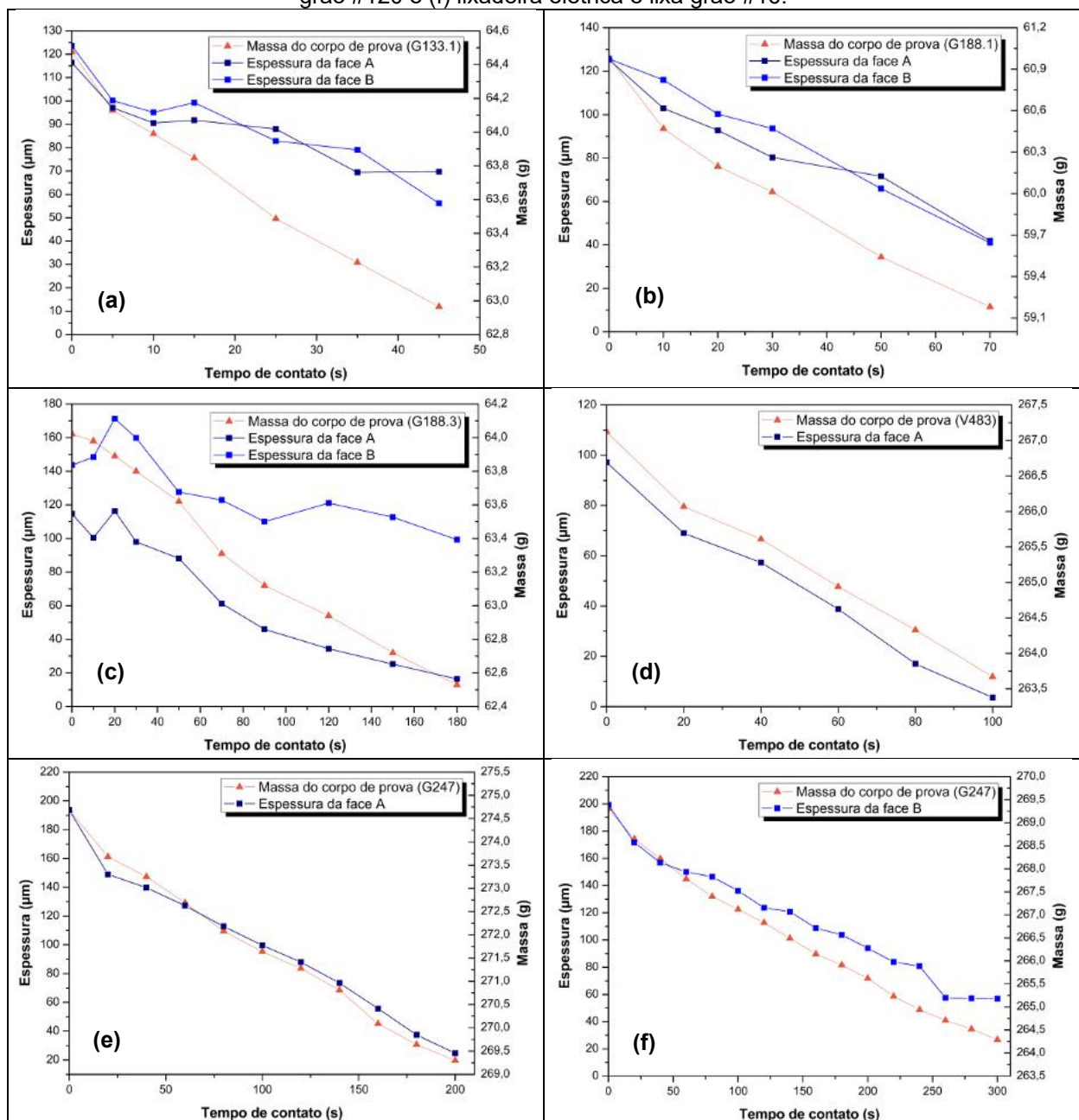
O uso da politriz mostrou um resultado (Figura 32b) com menor taxa de desgaste, quando comparado ao da lixadeira de fita. Além disso a superfície desgastada estava mais homogênea em termos de espessura residual de galvanizado e mais polida. No entanto, o CP utilizado nesse teste era o cortado, representando  $\frac{1}{4}$  das dimensões de um CP original e que acabou facilitando a operação na politriz. Já o CP inteiro dificultaria o processo principalmente porque o movimento circular da lixa tende a desgastar mais rapidamente quanto mais ao centro da lixa estiver o CP, comprometendo a homogeneidade do desgaste da camada.

O jateamento abrasivo seco com microesfera de vidro (Figura 32c) não produziu um desgaste homogêneo da camada. Por mais que seja um método de desgaste mais produtivo, a dificuldade em padronizar a angulação, distância do jato de abrasivo e a velocidade da “passada” pela superfície prejudica muito o resultado.

Por fim, o desgaste com a lixadeira elétrica foi o método que apresentou as menores taxas de desgaste: o uso da lixa grão #120 (Figura 32d) resultou no desgaste mais intenso da camada de zinco, dentre os ensaios feitos com as diferentes lixas,

mas ainda assim os resultados são melhores que os obtidos nos ensaios com outras ferramentas; o emprego do disco tipo *flap* grão #120 (Figura 32e) foi o método que desgastou de maneira mais controlada a camada de galvanizado e em uma taxa de desgaste intermediária quando comparado aos resultados obtidos com as outras lixas; e, o ensaio com a lixa grão #16 (Figura 32f) gerou um desgaste menos intenso, além de um polimento deficiente com riscos grosseiros na superfície desgastada do CP.

Figura 32 – Gráficos de acompanhamento de redução de massa e espessura de galvanizado: (a) lixadeira de fita e lixa grão #600, (b) politriz e lixa d'água grão #320, (c) jateamento abrasivo seco com microesfera de vidro, (d) lixadeira elétrica e lixa grão #120, (e) lixadeira elétrica e lixa disco *flap* grão #120 e (f) lixadeira elétrica e lixa grão #16.

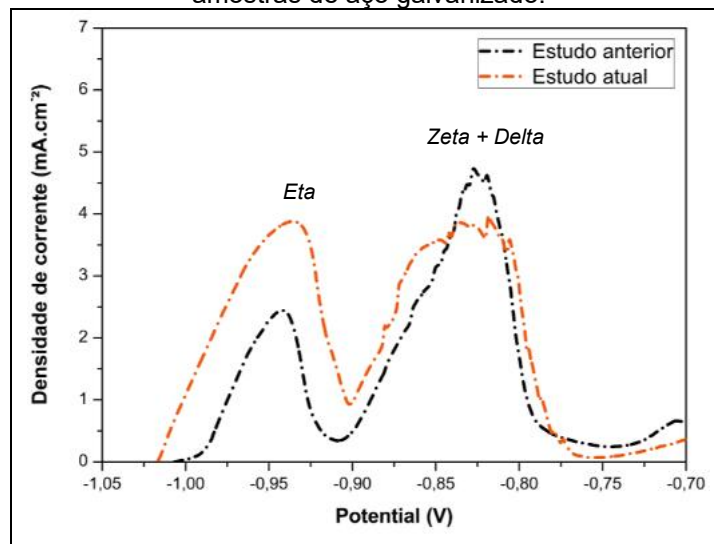


Fonte: o próprio autor.

Ao final da avaliação de todos os resultados, a lixadeira elétrica com o disco de lixa do tipo *flap* grão #120 (Figura 32e) foi eleita como a melhor técnica para obtenção de um desgaste homogêneo e controlado. Apesar da alta influência do operador em todos os métodos testados, o desgaste físico com a lixadeira mostrou-se mais simples para tentar contornar as influências humanas implícitas ao processo e com maior viabilidade prática de execução em larga escala.

Os ensaios preliminares de desgaste eletroquímico foram executados na forma de voltametrias de dissolução anódica. O método adotado gerou voltametrias que demoraram mais de 30 horas para finalizar. Anteriormente a estes ensaios, foram feitas tentativas com velocidade de varredura maior, mas não foi possível a obtenção das curvas com picos evidenciando as fases intermetálicas. Os resultados são mostrados na Figura 33. Percebeu-se um padrão semelhante nos voltamogramas com formação de dois picos tanto para a amostra do atual estudo quanto para a amostra remanescente de um estudo anterior do grupo que avaliou o comportamento de CP com diferentes espessuras de revestimento de aço galvanizado (Santana, 2022).

Figura 33 – Voltamogramas de dissolução anódica de amostras de aço galvanizado.



Fonte: o próprio autor.

Apesar de o resultado do voltamograma indicar semelhanças entre as amostras e que é possível identificar qualitativamente fases intermetálicas presentes no revestimento, decidiu-se que a voltametria de dissolução anódica não prosseguiria o estudo como uma possibilidade de método de desgaste do revestimento de zinco. Isso porque é inviável a sua aplicação em larga escala devido ao longo tempo para

finalização de um ensaio. A produção em massa de CP com camada de zinco desgastada foi necessária após a validação das metodologias otimizadas e, portanto, esse ensaio eletroquímico foi descartado como opção para desenvolvimento de uma metodologia de desgaste. No entanto, a voltametria de dissolução anódica foi aplicada como caracterização complementar à medição de espessura da camada de galvanizado, principalmente na comparação de CP antes e após os desgastes.

Os planejamentos experimentais foram aplicados apenas para os métodos de desgaste químico e físico. Durante os ensaios preliminares, inicialmente tomou-se o percentual de redução espessura como sendo a resposta a ser interpretada estatisticamente. Porém, mesmo que a medição da espessura residual de revestimento seja feita com um instrumento medidor em 24 pontos diferentes, o resultado ainda é uma média amostral dos dados obtidos pontualmente, o que ressalta a imprecisão do resultado. Sendo assim, decidiu-se trocar o modo como os resultados estavam sendo avaliados, passando-se a focar no percentual de redução de massa do CP. Instantaneamente os resultados indicaram melhor precisão, uma vez que o dado tratado a partir de um valor absoluto, a massa do CP, é obtido com muito mais precisão quando comparado à medição de espessura. Dessa forma, as medições de espessura residual de revestimento de zinco ainda passaram a ser registradas ao final de cada ensaio, mas somente para fins comparativos, uma vez que a resposta principal, que é aquela utilizada nos cálculos estatísticos, passou a ser o percentual de redução de massa.

### **5.3.2 Desgaste químico**

A Tabela 6 apresenta, de maneira condensada, as matrizes de experimentos e os resultados das triagens executadas para o desgaste químico. A 1ª triagem foi feita com os níveis das variáveis previstos ao final dos ensaios preliminares de desgaste químico. A maioria dos experimentos resultou em desgastes muito intensos, com 100% de remoção da camada de revestimento de zinco. A 2ª triagem foi feita alterando-se os níveis apenas de concentração da solução, a fim de se trabalhar com soluções de ataque mais diluídas.

Tabela 6 – Matrizes de experimentos e resultados das triagens propostas para o desgaste químico.

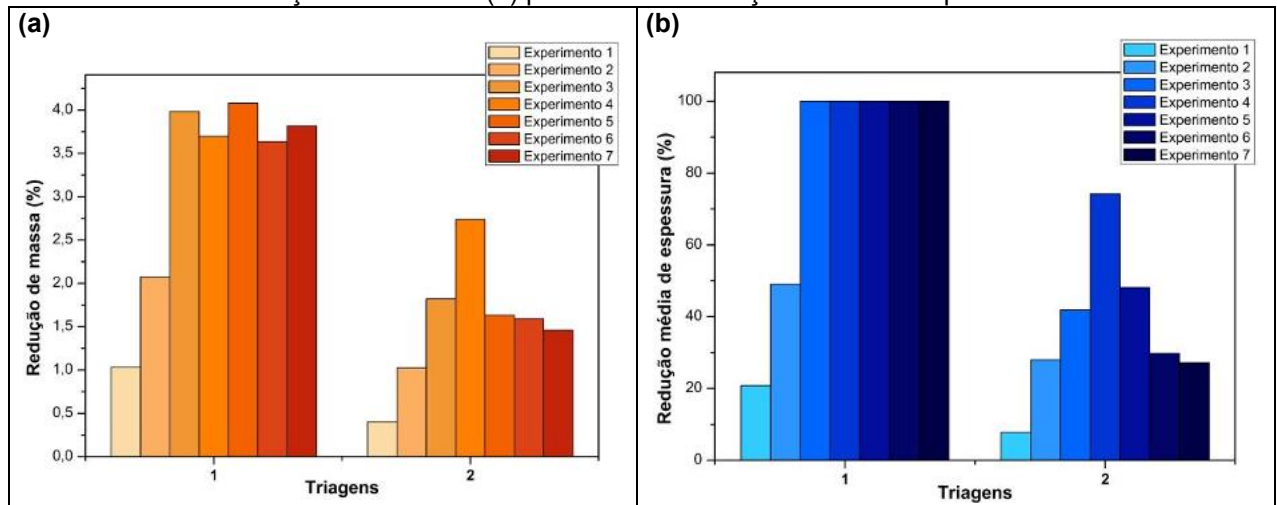
	Experimento - Corpo de prova	Tempo (s)	Concentração (mol·L <sup>-1</sup> )	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Redução de massa (%)	Redução média de espessura (%)
1ª Triagem	1 - C625	300	0,61	-	-	1,0334	20,8
	2 - C856	700	0,61	+	-	2,0734	49,0
	3 - C624	300	2,43	-	+	3,9839	100
	4 - V487	700	2,43	+	+	3,6973	100
	5 - G295	500	1,52	0	0	4,0790	100
	6 - V575	500	1,52	0	0	3,6363	100
	7 - C608	500	1,52	0	0	3,8150	100
2ª Triagem	1 - C855	300	0,36	-	-	0,4034	7,8
	2 - V520	700	0,36	+	-	1,0242	28,0
	3 - V569	300	0,85	-	+	1,8196	41,9
	4 - V382	700	0,85	+	+	2,7364	74,2
	5 - G168	500	0,61	0	0	1,6328	48,1
	6 - C744	500	0,61	0	0	1,5931	29,8
	7 - C875	500	0,61	0	0	1,4572	27,2

Fonte: o próprio autor.

Nota: (-) menor nível; (0) ponto central; (+) maior nível.

A Figura 34 reúne os resultados dos desgastes químicos das triagens de forma gráfica. Cada conjunto de barras representa uma triagem e as barras representam os sete experimentos executados em cada triagem. O gráfico apresentado na Figura 34a mostra os resultados de percentual de redução de massa, enquanto o gráfico apresentado na Figura 34b mostra os resultados de redução média de espessura de galvanizado. Ao compará-los, ficou evidente que próximo a 4% de redução mássica é quando se tem o consumo completo (100%) da camada de galvanizado para os CP ensaiados e um percentual de redução mássica próximo a 2% equivale a 50% de redução de espessura de galvanizado. A 1ª triagem mostrou resultados muito próximos do limite máximo de desgaste, sendo necessária a escolha de soluções ácidas com concentrações menores. A 2ª triagem apresentou melhores resultados, os quais apontam para um desgaste mais controlado e próximo da meta de 50% de redução de espessura de galvanizado. Além disso, a análise dos resultados da 2ª triagem revelou as triplicatas (experimentos 5, 6 e 7) com respostas mais coincidentes quando avaliadas pela perspectiva de redução mássica. Isso evidencia a imprecisão já ressaltada dos resultados quando estes são avaliados por meio da redução média de espessura de galvanizado. Contudo, os resultados de percentual de redução de espessura continuaram sendo registrados para fins comparativos e de estimativa de meta de desgaste otimizado. Os testes de Grubbs de avaliação de possíveis valores *outliers* das triplicatas encontram-se no APÊNDICE B.

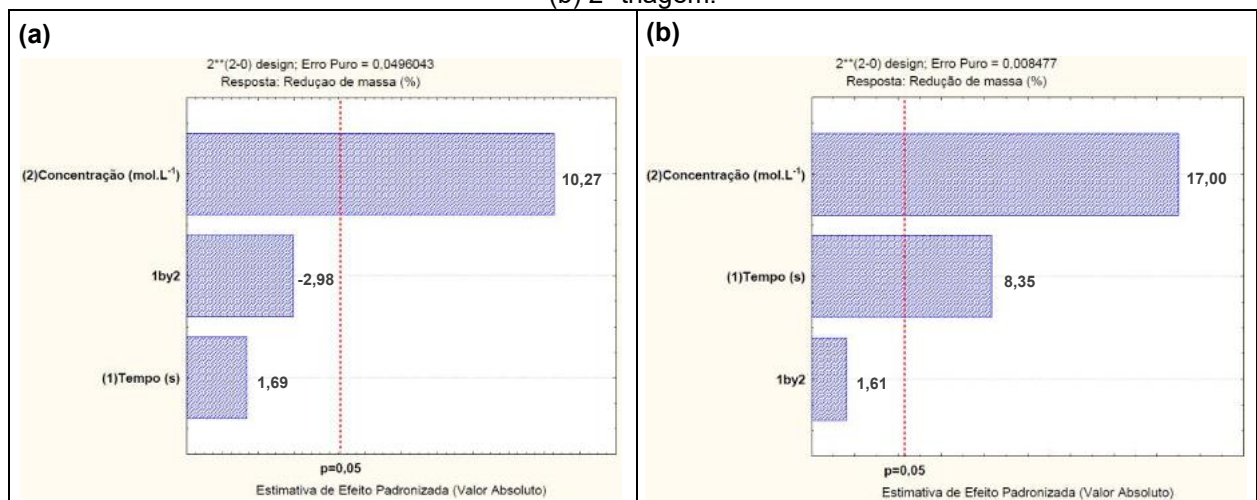
Figura 34 – Comparação dos resultados das triagens propostas para o desgaste químico: (a) percentual de redução de massa e (b) percentual de redução média de espessura.



Fonte: o próprio autor.

A Figura 35 apresenta os diagramas de Pareto das análises estatísticas dos resultados das triagens. O diagrama referente à 1ª triagem (Figura 35a) mostra que apenas o fator concentração indicou ser significativo para o desgaste químico. Supondo-se que o fator tempo provavelmente também influencia estatisticamente na redução de massa dos CP e levando em consideração o desgaste extremo de alguns experimentos da 1ª triagem, refez-se o planejamento experimental utilizando soluções ácidas menos concentradas. O diagrama de Pareto da 2ª triagem (Figura 35b) comprova a suspeita, evidenciando ambos os fatores como significativos no desgaste químico.

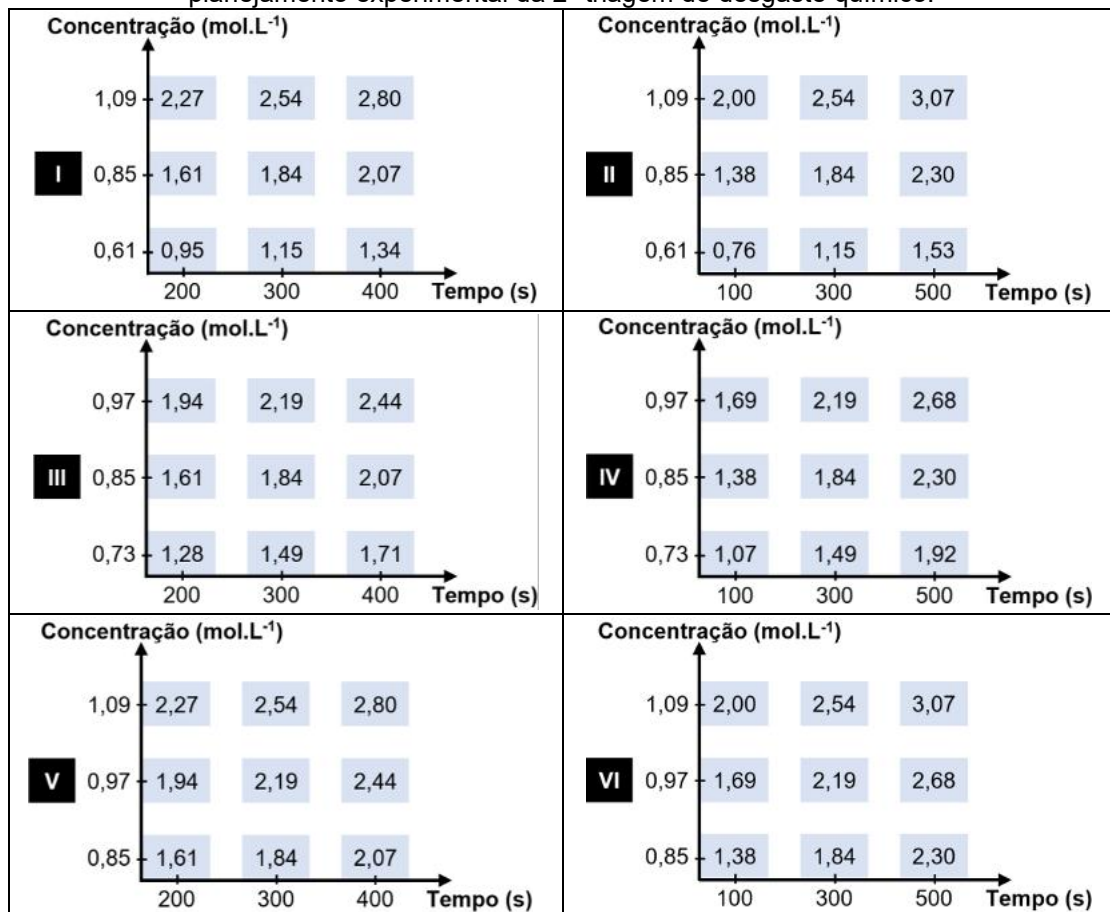
Figura 35 – Diagramas de Pareto referentes aos resultados de desgaste químico: (a) 1ª triagem e (b) 2ª triagem.



Fonte: o próprio autor.

Uma vez que os desgastes apresentaram resultados intermediários e a avaliação estatística indicou ambos os fatores como significativos para a obtenção da resposta, foram projetadas seis simulações de resultados de planejamentos experimentais. Essas simulações basearam-se na Figura 20 (representação gráfica da matriz do planejamento de otimização) e na equação do modelo obtida com os coeficientes de regressão da superfície de resposta da 2ª triagem (Quadro C2 do APÊNDICE C). A Figura 36 mostra as simulações de resultados calculadas para o desgaste químico, a partir da variação dos fatores tempo e concentração.

Figura 36 – Representação gráfica de seis simulações de resultados de redução de massa (%), baseadas na equação da superfície de resposta obtida com o tratamento dos dados do planejamento experimental da 2ª triagem de desgaste químico.



Fonte: o próprio autor.

A melhor simulação foi escolhida com base no conjunto de respostas mais próximas de 2% de redução de massa (equivalente a uma redução média de espessura de galvanizado de 50%). Como critério, tentou-se evitar resultados da simulação que fossem muito extremos, ou seja, reduções de massa abaixo de 1% ou acima de 3%. Isso porque o objetivo é encontrar um nível intermediário de desgaste

– nem muito alto, nem muito baixo –, pois a metodologia será base para preparo de CP que serão posteriormente destinados à ensaios de corrosão em campo. Nessa etapa, CP serão expostos à corrosão atmosférica e o intuito final é compreender os processos corrosivos de cada ambiente avaliado a partir de cada CP desgastado.

A partir das condições de contorno estipuladas, a simulação V foi definida como a mais apropriada e promissora. Um novo planejamento experimental (fatorial completo  $3^2$  com triplicata do ponto central) foi executado com amostras dos três grupos de tratamento de superfície, aplicando-se os níveis definidos na simulação V: fator tempo ( $X_1$ ) variando na faixa de 200 a 400 segundos e o fator concentração ( $X_2$ ) variando na faixa de 0,85 a 1,09 mol·L<sup>-1</sup>. A Tabela 7 apresenta a matriz de experimentos e os resultados da otimização do desgaste químico. Os resultados obtidos foram, em geral, menores que os valores previstos na simulação V, mas ainda assim, próximos de 2%.

Tabela 7 – Resultados da otimização para o desgaste químico.

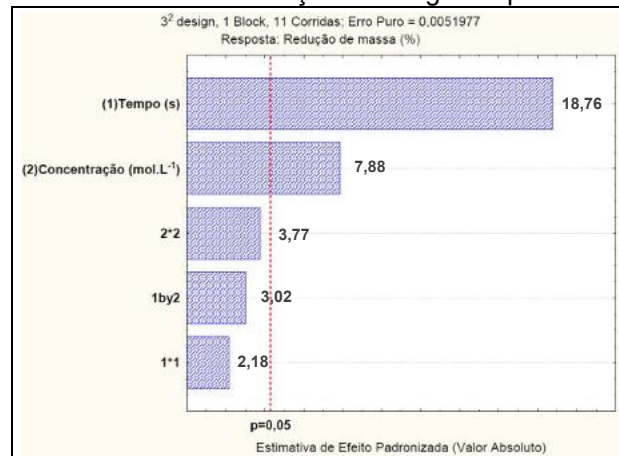
Experimento - Corpo de prova	Tempo (s)	Concentração (mol·L <sup>-1</sup> )	$X_1$	$X_2$	Redução de massa (%)	Redução média de espessura (%)
1 - G112	200	0,85	-	-	1,0543	29,1
2 - C674	300	0,85	0	-	1,3889	27,5
3 - V564	400	0,85	+	-	1,8550	44,3
4 - C874	200	0,97	-	0	1,0998	28,9
5 - G139	400	0,97	+	0	2,3769	71,7
6 - C651	200	1,09	-	+	1,2546	23,2
7 - G153	300	1,09	0	+	1,9441	54,6
8 - V480	400	1,09	+	+	2,4907	63,3
9 - G264	300	0,97	0	0	1,8819	54,5
10 - V351	300	0,97	0	0	1,9272	46,3
11 - V516	300	0,97	0	0	2,0231	53,6

Fonte: o próprio autor.

Nota: (-) menor nível; (0) ponto central; (+) maior nível.

A Figura 37 apresenta o diagrama de Pareto da análise estatística dos resultados dessa otimização. Constatou-se que o tempo e a concentração se mantiveram como únicos fatores significativos para o desgaste químico, contribuindo positivamente para a resposta. Ou seja, quanto maiores os níveis dos fatores avaliados, maior foi o percentual de redução de massa dos CP no desgaste químico. Os demais resultados do tratamento estatístico encontram-se no Quadro C3 do APÊNDICE C.

Figura 37 – Diagrama de Pareto referente aos resultados da otimização de desgaste químico.



Fonte: o próprio autor.

Os resultados de redução de massa e redução média de espessura de galvanizado dos onze experimentos da otimização do desgaste químico foram aplicados individualmente na Equação 3 para obtenção de onze percentuais teóricos de redução de massa (Tabela D1 do APÊNDICE D). Isso foi feito para se encontrar um valor teórico de redução mássica equivalente a 50% de redução de espessura de galvanizado, com base em resultados práticos. A média desses percentuais teóricos foi de 2,0125%, valor este definido como a meta a ser atingida na etapa de validação do método. Utilizando o *software* Statistica<sup>®</sup> 8.0, aplicou-se essa meta teórica calculada na equação da superfície de resposta da otimização. Para tal, foram indicados valores próximos a 300 segundos para o fator tempo e 1,09 mol·L<sup>-1</sup> para o fator concentração.

A validação do método foi feita com cinco CP, com representação dos três grupos de tratamento de superfície (G, V e C), aplicando os parâmetros definidos como ótimos para o desgaste químico. Não foi possível validar o método pois alguns resultados apresentaram discrepância superior a 5% em relação à meta. Em uma segunda tentativa de validação do método, utilizando outros cinco CP, os resultados continuaram apresentando erro relativo absoluto superior a 5%. Identificou-se que em comum às duas tentativas de validação, apenas os CP do grupo C estavam individualmente apresentando essa variação. Por essa razão, foi determinada a realização de novas otimizações, repetindo os níveis de variação dos fatores (estabelecidos pela simulação V da Figura 36) para a execução dos novos planejamentos experimentais. Foi definido um planejamento experimental com CP dos grupos G e V e outro exclusivo com CP do grupo C. Os resultados das novas

otimizações estão reunidos na Tabela 8 (CP dos grupos G e V) e na Tabela 9 (CP do grupo C). Todos os resultados mantiveram-se na faixa de 1 a 3% de redução mássica e, ao compará-los, percebeu-se uma tendência a desgastes mais intensos nos CP dos grupos G e V quando comparados os mesmos pontos experimentais.

Tabela 8 – Resultados da nova otimização para o desgaste químico dos grupos G e V.

Experimento - Corpo de prova	Tempo (s)	Concentração (mol·L <sup>-1</sup> )	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Redução de massa (%)	Redução média de espessura (%)
1 - G015	200	0,85	-	-	1,0082	27,6
2 - V325	300	0,85	0	-	1,7470	38,9
3 - V568	400	0,85	+	-	2,0840	42,2
4 - V535	200	0,97	-	0	1,7418	42,0
5 - G103	400	0,97	+	0	2,8286	70,4
6 - G126	200	1,09	-	+	2,1646	62,4
7 - G137	300	1,09	0	+	2,4392	70,6
8 - V346	400	1,09	+	+	2,6763	71,8
9 - G142	300	0,97	0	0	2,5392	62,6
10 - G150	300	0,97	0	0	2,3427	72,3
11 - V548	300	0,97	0	0	2,4710	58,3

Fonte: o próprio autor.

Nota: (-) menor nível; (0) ponto central; (+) maior nível.

Tabela 9 – Resultados da nova otimização para o desgaste químico do grupo C.

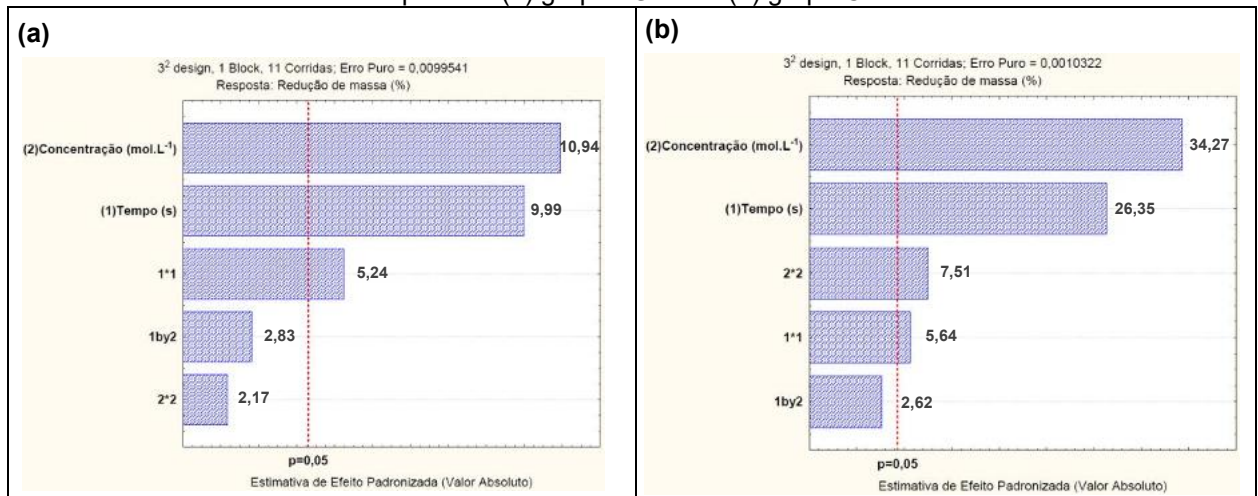
Experimento - Corpo de prova	Tempo (s)	Concentração (mol·L <sup>-1</sup> )	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Redução de massa (%)	Redução média de espessura (%)
1 - C671	200	0,85	-	-	1,1370	24,8
2 - C881	300	0,85	0	-	1,4481	27,7
3 - C873	400	0,85	+	-	1,8846	35,0
4 - C886	200	0,97	-	0	1,3548	25,8
5 - C699	400	0,97	+	0	2,3881	63,8
6 - C876	200	1,09	-	+	1,6284	33,9
7 - C707	300	1,09	0	+	2,3705	58,8
8 - C816	400	1,09	+	+	2,5443	59,7
9 - C716	300	0,97	0	0	2,1050	54,2
10 - C734	300	0,97	0	0	2,0441	46,2
11 - C859	300	0,97	0	0	2,0568	45,4

Fonte: o próprio autor.

Nota: (-) menor nível; (0) ponto central; (+) maior nível.

A Figura 38 apresenta o diagrama de Pareto da análise estatística dos resultados das novas otimizações. Constatou-se que o tempo e a concentração não se mantiveram exclusivos como únicos fatores significativos para o desgaste químico, o efeito quadrático dos fatores passou a ser estatisticamente relevante. Contudo, os fatores de primeira ordem ainda são mais relevantes. Os demais resultados do tratamento estatístico encontram-se nos Quadros C4 e C5 do APÊNDICE C.

Figura 38 – Diagramas de Pareto referentes aos resultados das novas otimizações para o desgaste químico: (a) grupos G e V e (b) grupo C.



Fonte: o próprio autor.

Os resultados de redução de massa e redução média de espessura de galvanizado dos onze experimentos de cada uma das novas otimizações do desgaste químico foram aplicados individualmente na Equação 3 para obtenção de onze percentuais teóricos de redução de massa (Tabela D1 do APÊNDICE D). Isso foi feito para se encontrar novos valores teóricos de redução mássica equivalente a 50% de redução de espessura de galvanizado. As médias obtidas de percentual de redução de massa foram 1,9742% (CP dos grupos G e V) e 2,2783% (CP do grupo C). Essas médias foram definidos como as novas metas de desgaste químico e, quando aplicadas nas equações das superfícies de resposta das otimizações, indicaram os parâmetros mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros dos fatores avaliados das otimizações finais do desgaste químico.

Otimização	Tempo (s)	Concentração (mol·L <sup>-1</sup> )
Grupo G e V	200	1,09
Grupo C	310	1,09

Fonte: o próprio autor.

As metodologias foram validadas, utilizando cinco CP, e os resultados obtidos apresentaram erro relativo absoluto abaixo de 5%. Isso finalmente permitiu o preparo das amostras finais de instalação em campo. Os dados referentes à aplicação das metodologias nos 50 CP dos grupos G e V e nos 25 CP do grupo C estão reunidos, respectivamente, nas Tabelas E1 e E2 do APÊNDICE E. O respectivo erro relativo absoluto médio para esses grupos foi de 1,1% e 1,2% e o respectivo valor de DPR foi

de 3,94% e 3,35%, os quais indicam uma excelente reprodutibilidade e corroboram a confiabilidade de 95% dos métodos de desgaste desenvolvidos.

### 5.3.3 Desgaste físico

Dentre os métodos testados, o uso da lixadeira elétrica com disco de lixa do tipo *flap* foi a alternativa mais indicada para a obtenção de um desgaste controlado e reprodutível. A Tabela 11 apresenta, de maneira condensada, as matrizes de experimentos e os resultados das triagens executadas para o desgaste físico. A 1ª triagem foi feita variando-se o fator tempo de contato da lixa com a superfície do CP e o fator lixa em três diferentes granulometrias (categoricamente representadas por -1, 0 e 1). Os desgastes obtidos ficaram abaixo da meta de 50%, então para a 2ª triagem os níveis do fator tempo foram elevados, a fim de se obter maiores percentuais de redução de massa.

Tabela 11 – Matrizes de experimentos e resultados das triagens propostas para o desgaste físico.

	Experimento - Corpo de prova	Tempo (s)	Lixa (grão)*	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Redução de massa (%)	Redução média de espessura (%)
1ª Triagem	1 - G025	20	80	-	-	1,1916	34,1
	2 - C653	80	80	+	-	1,8320	47,1
	3 - V442	20	120	-	0	0,3598	6,9
	4 - C696	80	120	+	0	0,7748	22,8
	5 - V425	20	220	-	+	0,4270	12,7
	6 - G083	80	220	+	+	0,7769	26,3
	7 - G090	50	120	0	0	1,1462	36,7
	8 - V335	50	120	0	0	0,6384	24,8
	9 - C645	50	120	0	0	0,7243	15,6
2ª Triagem	1 - G146	120	80	-	-	1,9840	72,4
	2 - C845	180	80	+	-	2,1741	64,7
	3 - G165	120	120	-	0	1,6803	57,3
	4 - G204	180	120	+	0	1,4724	52,3
	5 - V578	120	220	-	+	0,9328	29,7
	6 - C770	180	220	+	+	0,8960	25,0
	7 - V349	150	120	0	0	1,2052	38,3
	8 - V583	150	120	0	0	1,1026	32,9
	9 - C772	150	120	0	0	1,0223	25,8

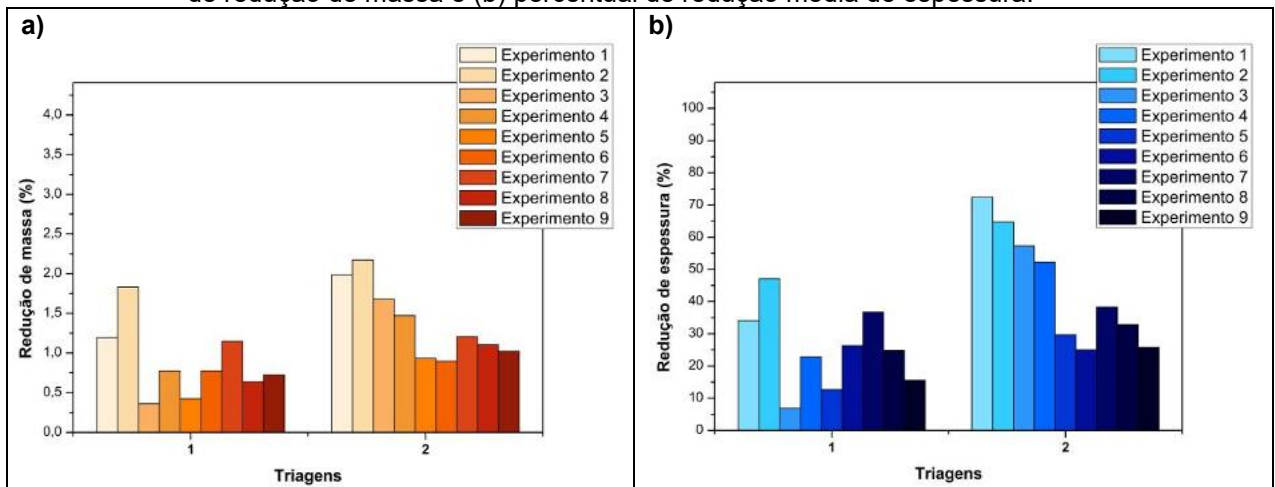
Fonte: o próprio autor.

Nota: \*o fator lixa é considerado uma variável categórica no tratamento estatístico pois as granulometrias são fixas. A representação das granulometrias no *software* Statistica® 8.0 são -1 (#80), 0 (#120) e +1 (#220).

A Figura 39 reúne os resultados dos desgastes físicos das triagens de forma gráfica. Cada conjunto de barras representa uma triagem e as barras representam os nove experimentos executados em cada triagem. O gráfico da esquerda (Figura 39a) mostra os resultados de percentual de redução de massa, enquanto o gráfico da

direita (Figura 39b) mostra os resultados de redução média de espessura de galvanizado. Percebe-se que uma redução mássica de 2% não é mais equivalente a 50% de redução de espessura de galvanizado; esse percentual provavelmente será menor que 2%, exatamente por não se ter o desgaste das laterais dos CP. A 1ª triagem mostrou resultados de desgaste muito baixos, sendo necessário o lixamento das faces por mais tempo. A 2ª triagem apresentou melhores resultados, os quais apontam para uma redução mássica em torno de 1,5% ser equivalente a redução de espessura de revestimento de 50%. A 2ª triagem revelou as triplicatas (experimentos 7, 8 e 9) com respostas mais coincidentes quando avaliadas pela perspectiva de redução mássica, reforçando o enfoque nos resultados da perspectiva de redução de massa, porém mantendo os de redução de espessura de galvanizado para fins comparativos e de estimativa de meta de desgaste otimizado. Os testes de Grubbs de avaliação de possíveis valores *outliers* das triplicatas encontram-se no APÊNDICE B.

Figura 39 – Comparação dos resultados das triagens propostas para o desgaste físico: (a) percentual de redução de massa e (b) percentual de redução média de espessura.

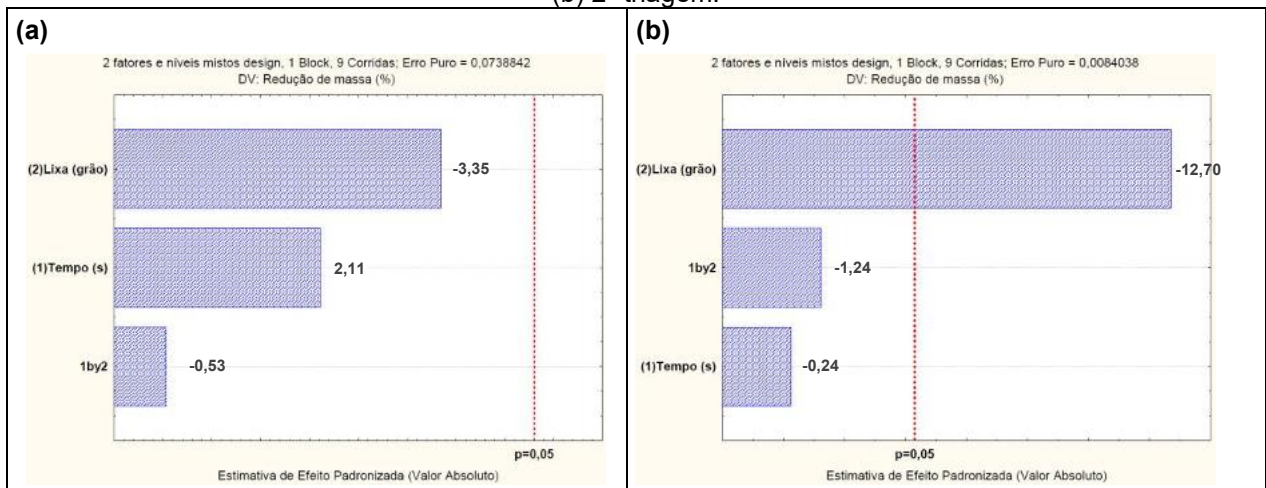


Fonte: o próprio autor.

A Figura 40 apresenta os diagramas de Pareto das análises estatísticas dos resultados das triagens. O diagrama referente à 1ª triagem (Figura 40a) não mostra nenhum fator significativo para o desgaste físico, nos níveis testados, sendo este outro indicativo de reformulação do planejamento experimental. O diagrama de Pareto da 2ª triagem (Figura 40b) mostra o fator lixa como significativo para obtenção da resposta, evidenciando que a escolha da lixa de desgaste é mais significativa que a definição do tempo de contato da lixadeira com a superfície do CP. Com relação à lixa, quanto maiores são os níveis testados, menores são os desgastes, fato este já

previsto, pois lixas d'água com grãos maiores são mais finas e tendem a desgastar menos, além de deixar a superfície mais polida. Mesmo que o tempo não tenha se apresentado como significativamente influente na resposta, ele foi mantido como variável em análise para possibilitar a definição dos parâmetros da metodologia de desgaste físico ao final do estudo.

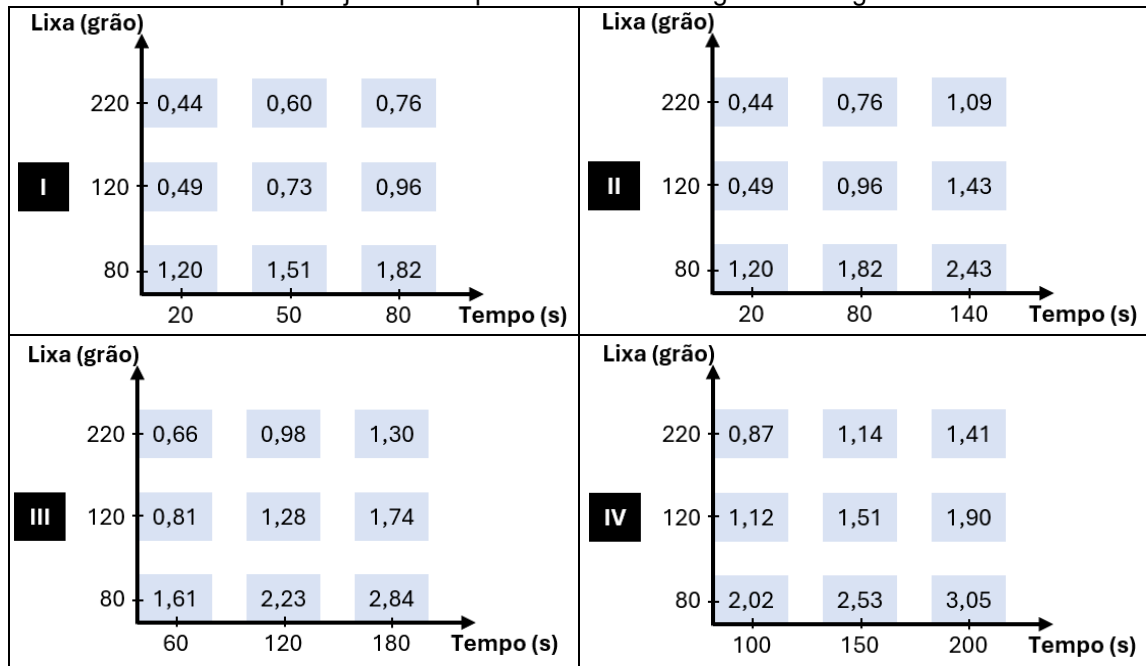
Figura 40 – Diagramas de Pareto referentes aos resultados de desgaste físico: (a) 1ª triagem e (b) 2ª triagem.



Fonte: o próprio autor.

Como a 2ª triagem indicou ao menos um fator como significativo para o desgaste físico, a equação da superfície de resposta já foi utilizada para projetar quatro simulações de resultados de planejamentos experimentais. Essas simulações basearam-se na Figura 20 (representação gráfica da matriz do planejamento de otimização) e na equação do modelo obtida com os coeficientes de regressão da superfície de resposta da 2ª triagem (Quadro C7 do APÊNDICE C). A Figura 41 mostra as simulações de resultados calculadas para o desgaste físico, a partir da variação dos fatores tempo, uma vez que o fator lixa é fixo para as granulometrias disponíveis. Para a escolha de uma simulação mais assertiva, foram realizados os cálculos de previsibilidade de percentual de redução de massa equivalente a uma redução de espessura de 50%, a partir dos valores práticos da 2ª triagem utilizando a Equação 3. Os resultados encontram-se na Tabela D2 do APÊNDICE D; o valor médio encontrado foi de 1,6126% para a redução mássica. Para definir a melhor simulação, tentou-se evitar resultados da simulação que fossem muito extremos (reduções de massa abaixo de 0,5% ou acima de 3%), focando no ponto central estando o mais próximo possível de aproximadamente 1,6%.

Figura 41 – Representação gráfica de quatro simulações de resultados de redução de massa (%), baseadas na equação da superfície de resposta obtida com o tratamento dos dados do planejamento experimental da 2ª triagem de desgaste físico.



Fonte: o próprio autor.

A partir dessas condições de contorno, definiu-se a simulação III como a mais apropriada. Um novo planejamento experimental (fatorial completo  $3^2$  com triplicata do ponto central) foi executado com amostras dos três grupos de CP (G, V e C), aplicando-se os níveis das variáveis definidos na simulação III: fator tempo ( $X_1$ ) variando na faixa de 60 a 180 segundos e o fator lixa ( $X_2$ ) variando na faixa de -1 a 1. A Tabela 12 apresenta a matriz de experimentos e os resultados da otimização do desgaste físico. Os resultados obtidos foram, em geral, menores que os valores previstos na simulação III, mas ainda assim, dentro de uma faixa de 0,6% a 2,2%.

Tabela 12 – Resultados da otimização para o desgaste físico.

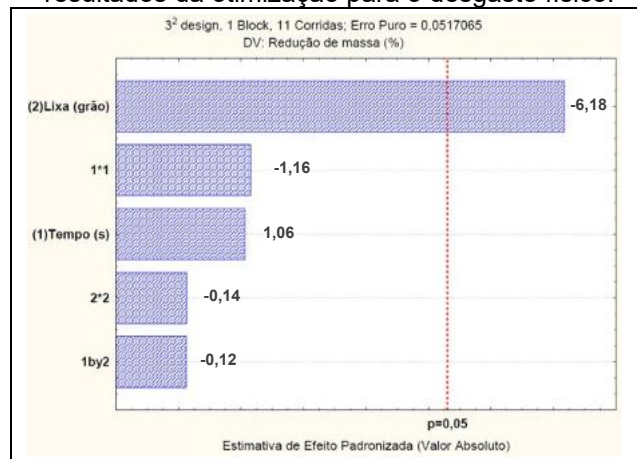
Experimento - Corpo de prova	Tempo (s)	Lixa (grão)*	$X_1$	$X_2$	Redução de massa (%)	Redução média de espessura (%)
1 - G109	60	80	-	-	1,8273	65,0
2 - C788	120	80	0	-	1,5947	43,3
3 - V411	180	80	+	-	2,1319	75,3
4 - V356	60	120	-	0	1,2359	45,4
5 - C686	180	120	+	0	1,2708	39,4
6 - C617	60	220	-	+	0,6213	17,6
7 - V337	120	220	0	+	0,6203	21,7
8 - G203	180	220	+	+	0,8716	37,0
9 - G008	120	120	0	0	1,4031	48,0
10 - V305	120	120	0	0	1,2135	35,2
11 - C728	120	120	0	0	0,9503	27,4

Fonte: o próprio autor.

Nota: \*o fator lixa é considerado uma variável categórica no tratamento estatístico pois as granulometrias são fixas. A representação das granulometrias no *software* Statistica® 8.0 são -1 (#80), 0 (#120) e +1 (#220).

A Figura 42 apresenta o diagrama de Pareto da análise estatística dos resultados da otimização. Constatou-se que o somente o fator lixa mostrou-se significativo para o desgaste físico. Contudo, sabe-se que, quando os tempos de contato da lixadeira com as faces dos CP foram aumentados, necessariamente foram obtidos desgastes mais intensos. Entende-se que a otimização foi bem-sucedida e adiante será feito um trabalho com a equação da superfície de resposta dessa otimização para definição dos parâmetros ótimos do desgaste físico desenvolvido. Os demais resultados do tratamento estatístico encontram-se no Quadro C8 do APÊNDICE C.

Figura 42 – Diagrama de Pareto referente aos resultados da otimização para o desgaste físico.



Fonte: o próprio autor.

Os resultados de redução de massa e redução média de espessura de galvanizado dos onze experimentos da otimização do desgaste físico foram aplicados individualmente na Equação 3 para obtenção de onze percentuais teóricos de redução de massa (Tabela D2 do APÊNDICE D). A média obtida de percentual de redução de massa foi 1,5392% e esse valor foi definido como a meta de redução mássica equivalente a 50% de redução de espessura de galvanizado. Essa meta de desgaste físico, juntamente com a equação da superfície de resposta, foi usada para determinação do melhor cenário para aplicação do método, para os grãos de lixas disponíveis, utilizando a ferramenta *Solver* do programa Microsoft® Excel. Destacando metodologias mais ágeis e precisas, a ferramenta indicou o uso da lixa do tipo disco *flap* grão #120 e o tempo de 196 segundos de contato da lixadeira com a face do CP, para se obter um desgaste de 50% da espessura do revestimento.

As metodologias foram validadas, utilizando dez CP, e os resultados obtidos apresentaram erro relativo absoluto abaixo de 20%. Esse alto erro na validação é causado por conta do agente humano operando a lixadeira: aplicação de mais ou menos força, posicionamento mais ou menos inclinado sobre a superfície, velocidade de passada da lixadeira pela face do CP, cansaço do operador etc. Os dados referentes à aplicação das metodologias nos 75 CP dos grupos G, V e C estão reunidos na Tabela EF3 do APÊNDICE E. O respectivo erro relativo absoluto médio para os 75 CP foi de 6,6% o valor de DPR foi de 24,28%. Um alto valor para o DPR reforça o fato de este método de desgaste físico apresentar uma baixa reprodutibilidade e, portanto, menor confiabilidade na aplicação do método para obtenção de resultados esperados.

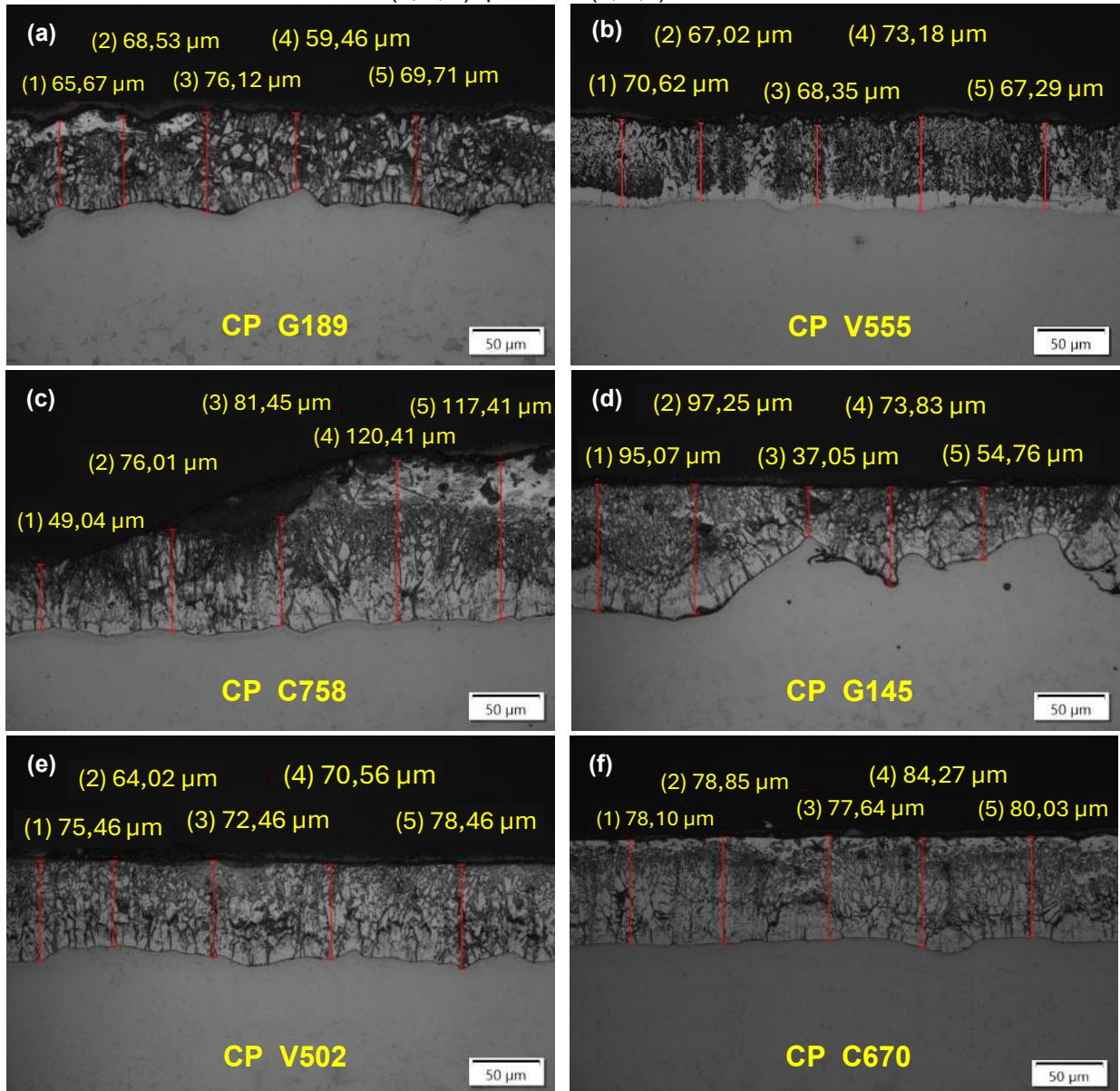
#### 5.4 AVALIAÇÃO DA CAMADA DE GALVANIZADO DESGASTADA

Para avaliar o galvanizado após desgaste foi necessário aplicar as metodologias de desgaste químico e físico em 12 CP extras, além dos 150 CP preparados para exposição em campo. Os dados de redução de massa e espessura após aplicadas as metodologias otimizadas e validadas de desgaste químico e físico para esses CP constam no APÊNDICE F.

##### 5.4.1 Microscopia óptica do material desgastado

A Figura 43 mostra a seção transversal de CP após serem submetidos às metodologias de desgaste otimizadas e validadas.

Figura 43 – Micrografias de amostras de corpos de prova desgastados pelos dois métodos: (a, b, c) químico e (d, e, f) físico.



Fonte: o próprio autor.

Percebeu-se que o método de desgaste químico acontece de maneira mais aleatorizada, sem uma uniformidade no consumo do galvanizado. Isso pode estar relacionado à disponibilidade de íons  $H_3O^+$  nos pites formados e com a formação de regiões mais anódicas (conforme o ferro de fases intermetálicas fica mais exposto) e, portanto, mais propensas ao ataque pela solução ácida. O uso da lixadeira elétrica no desgaste físico revela uma característica intrínseca à técnica, de que o consumo ocorre de forma mais uniforme, polindo aos poucos a superfície até atingir o desgaste no tempo definido pelo método. As superfícies quimicamente desgastadas dos CP G189 (Figura 43a), V555 (Figura 43b) e C758 (Figura 43c) são menos lineares, com

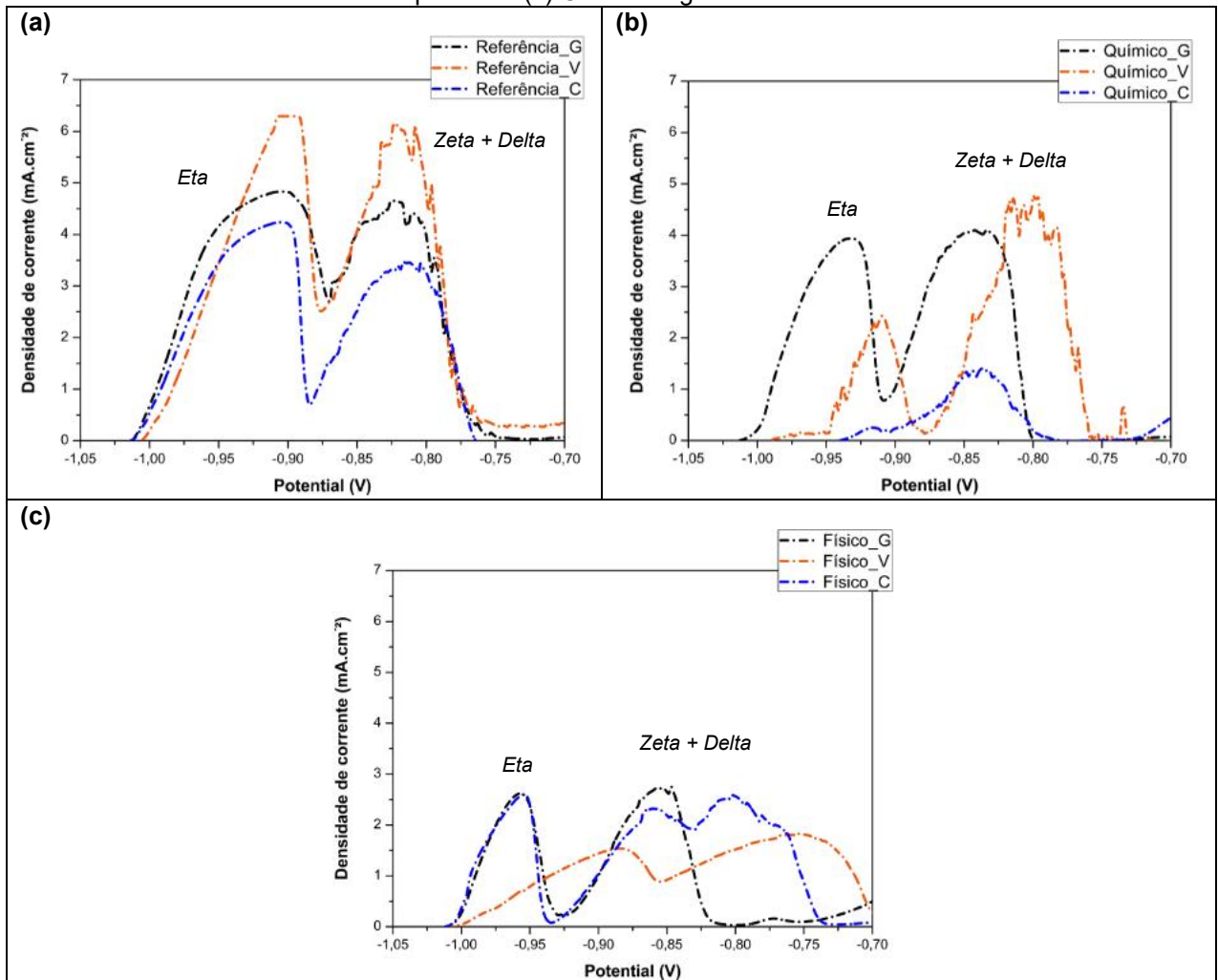
presença de pites e regiões mais desgastadas que outras. As superfícies fisicamente desgastadas dos CP G145 (Figura 43d), V502 (Figura 43e) e C670 (Figura 43f) são mais lineares, característico do polimento gerado com o lixamento, e as variações de espessura podem surgir a partir de um desgaste mais intenso em certas regiões ou por conta das diferenças de rugosidade, como fica visível no CP G145.

#### 5.4.2 Voltametria de dissolução anódica

A voltametria de dissolução anódica é uma técnica eletroquímica muito sensível, capaz de captar deslocamentos de corrente sutis (Nogueira; Seixas; Rios, 1998; Pacheco *et al.*, 2013). É importante frisar que como o processo de galvanização por imersão a quente não é homogêneo – devido às condições da cuba de zinco fundido, forma e tempo de imersão, posição e tamanho da peça, entre outros fatores –, é difícil obter réplicas de resultados coincidentes, principalmente para CP desgastados. Portanto, qualquer que seja a heterogeneidade na fase intermetálica irá gerar deslocamentos de corrente suficientemente perceptíveis por essa técnica.

A Figura 44 apresenta os voltamogramas de dissolução anódica do galvanizado dos CP do OCP até o potencial de -0,70 V. Eles estão agrupados de acordo com a condição a qual foram submetidos os CP: os voltamogramas dos CP referência são mostrados na Figura 44a, dos CP do desgaste químico na Figura 44b e dos CP do desgaste físico na Figura 44c. No geral, os resultados apresentam dois picos para cada voltamograma em regiões semelhantes, sendo que o primeiro pico tem início próximo ao OCP do zinco, característico do consumo da fase *eta*, composta principalmente por zinco puro. A formação desse pico inicial referente à fase *eta* foi demonstrada em trabalhos da literatura (Bendinelli *et al.*, 2015; Nogueira; Seixas; Rios, 1998; Nunes *et al.*, 2018). O segundo pico indica a dissolução das fases intermetálicas *zeta* e *delta*, sendo consumidas ao mesmo tempo por conta de os potenciais de corrosão serem muito próximos, o que leva à obtenção de um único pico para a dissolução de ambas as fases (Besseyrias *et al.*, 1997; Nogueira; Seixas; Rios, 1998; Nunes *et al.*, 2018; Queiroz; Costa, 2007). Visto a baixa espessura da fase *gamma* em comparação às demais fases presentes na camada, a evidência das fases *eta*, *zeta* e *delta* foram tomadas como representativas do revestimento de galvanizado.

Figura 44 – Voltamogramas de dissolução anódica dos corpos de prova agrupados pela condição à qual foram submetidos antes da exposição em ensaio de campo: (a) CP referência, (b) CP do desgaste químico e (c) CP do desgaste físico.



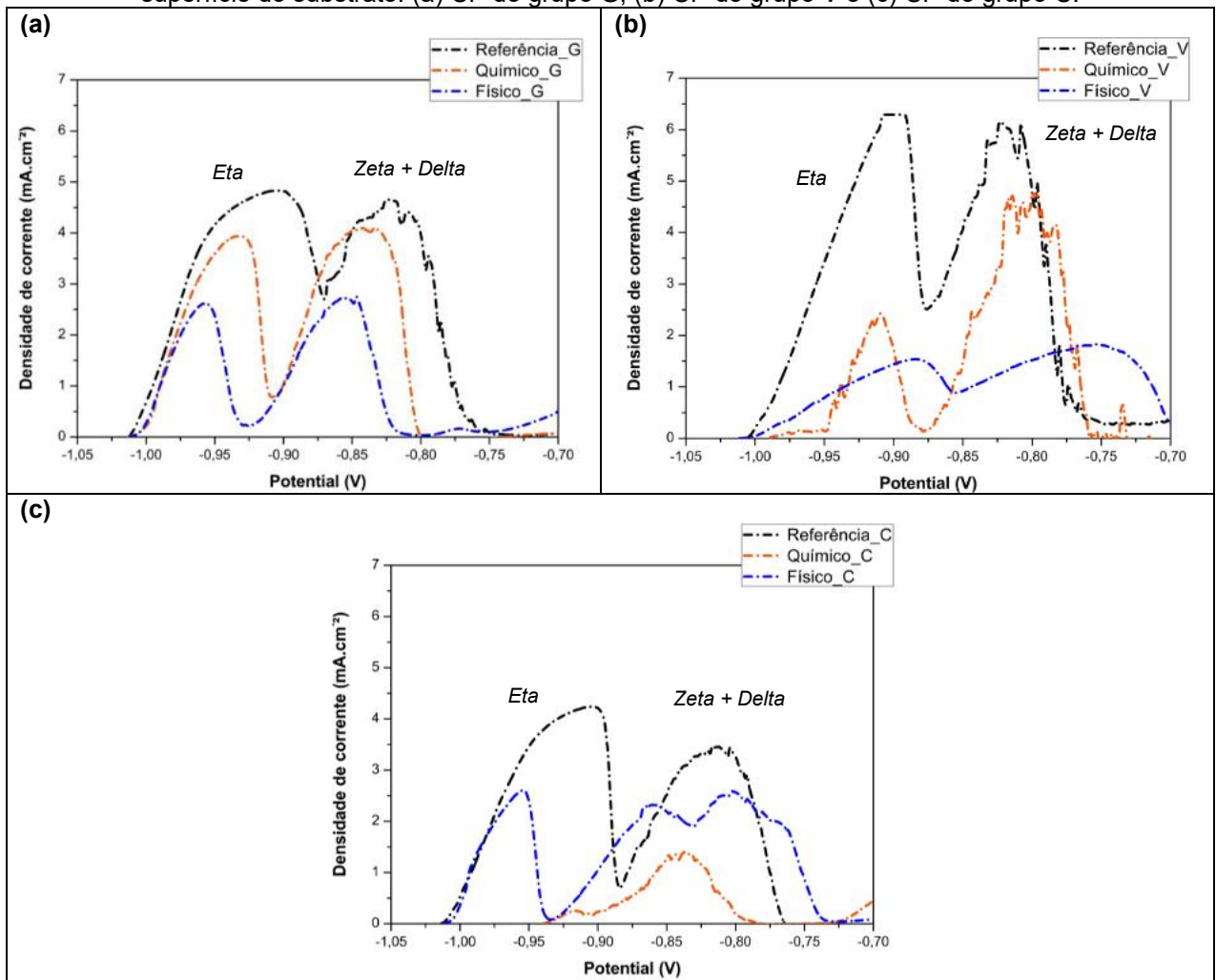
Fonte: o próprio autor.

A Figura 44a evidencia que a superfície do galvanizado dos três grupos é bastante parecida e mostra um consumo bastante similar da camada de galvanizado, variando possivelmente apenas por conta da espessura inicial de cada CP. A Figura 44b ressalta como o desgaste químico pode gerar superfícies mais irregulares por conta do consumo heterogêneo da superfície durante o ataque ácido do desgaste químico: o CP do grupo G foi o que apresentou um voltamograma com os dois picos mais bem definidos; o CP do grupo V apresentou uma redução na fase intermetálica *eta*, além de um deslocamento dos picos para a direita; e, o CP do grupo C mostrou um único pico que tem baixa intensidade e representa uma superfície sem a presença de fase *eta* indicando um desgaste mais intenso, corroborando o método com 310 segundos de imersão, maior que o método para desgaste dos grupos G e V (200 segundos). A Figura 44c mostra voltamogramas com picos bem reduzidos, indicando

um desgaste intenso, porém mais uniforme quando comparado ao desgaste químico, ainda com fase *eta* para os três grupos. O CP do grupo V apresentou o único voltamograma com picos mais dispersos, podendo estar relacionado à produto de corrosão aderente à superfície formado durante a dissolução anódica e que dificulta o consumo completo das fases intermetálicas nos respectivos potenciais de corrosão.

Os voltamogramas organizados na Figura 45 estão agrupados por tipo de tratamento de superfície do substrato: os voltamogramas dos CP do grupo G são mostrados na Figura 45a, dos CP do grupo V na Figura 45b e dos CP do grupo C na Figura 45c.

Figura 45 – Voltamogramas de dissolução anódica dos corpos de prova agrupados por tratamento de superfície do substrato: (a) CP do grupo G, (b) CP do grupo V e (c) CP do grupo C.



Fonte: o próprio autor.

A partir dos voltamogramas apresentados na Figura 45, podemos perceber que as comparações permitem visualizar que nos três casos, os CP referência apresentam

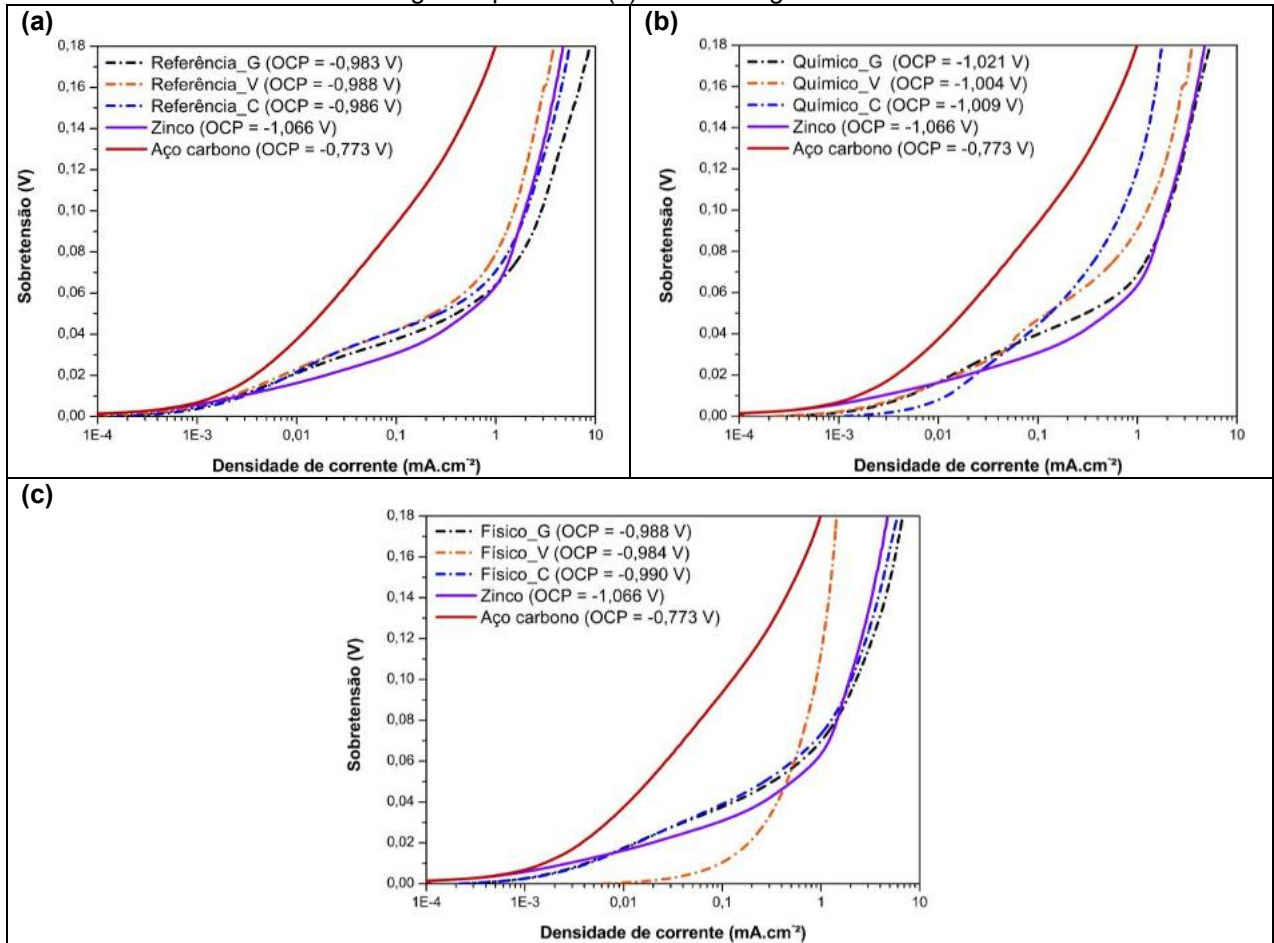
picos maiores, indicando o revestimento original com maior espessura, e picos menores, quando desgastados. Os desgastes químico e físico apresentam-se mais ou menos intensos, dependendo do grupo de CP observado, mas é importante ressaltar que a partir desse ensaio eletroquímico é possível confirmar uma redução de espessura total e de fases intermetálicas do galvanizado. O desgaste químico reduziu as espessuras das fases intermetálicas, mas o desgaste físico reduziu ainda mais, chegando a remover completamente a fase  $\eta$  no desgaste do CP do grupo C. Isso possivelmente resultará em taxas de corrosão não muito concordantes visto que os modelos foram projetados para reduções médias de espessura em torno de 50%. Uma vez que o método físico de desgaste apresentou menor restrição quanto ao critério de confiança (80%), é possível que sejam encontradas taxas de corrosão desses CP também menos concordantes entre si.

#### **5.4.3 Polarização potenciodinâmica**

É importante destacar que a polarização potenciodinâmica do aço galvanizado não indica uma correlação direta com o consumo da camada de revestimento metálico, mas permite compreender melhor a condição da superfície do aço galvanizado após realização dos desgastes.

A Figura 46 apresenta as curvas de polarização potenciodinâmica agrupadas de acordo com a condição à qual foram submetidos os CP: as curvas dos CP referência são mostradas na Figura 46a, dos CP do desgaste químico na Figura 46b e dos CP do desgaste físico na Figura 46c. As polarizações estão plotadas em termos de densidade de corrente em função da sobretensão, a qual é calculada a partir da subtração dos valores de OCP dos potenciais aplicados durante a polarização, a fim de normalizar as curvas e facilitar a comparação direta para variações de densidade de corrente. Avalia-se apenas o ramo anódico pois é durante esse processo que ocorre o consumo do zinco da camada de revestimento. Quanto maior a quantidade de zinco na superfície do material, maior é a densidade de corrente gerada durante a polarização potenciodinâmica e, conseqüentemente, mais deslocada para a direita estará a curva de polarização.

Figura 46 – Ramo anódico da polarização potenciodinâmica dos corpos de prova agrupados pela condição à qual foram submetidos antes da exposição em ensaio de campo: (a) CP referência, (b) CP do desgaste químico e (c) CP do desgaste físico.



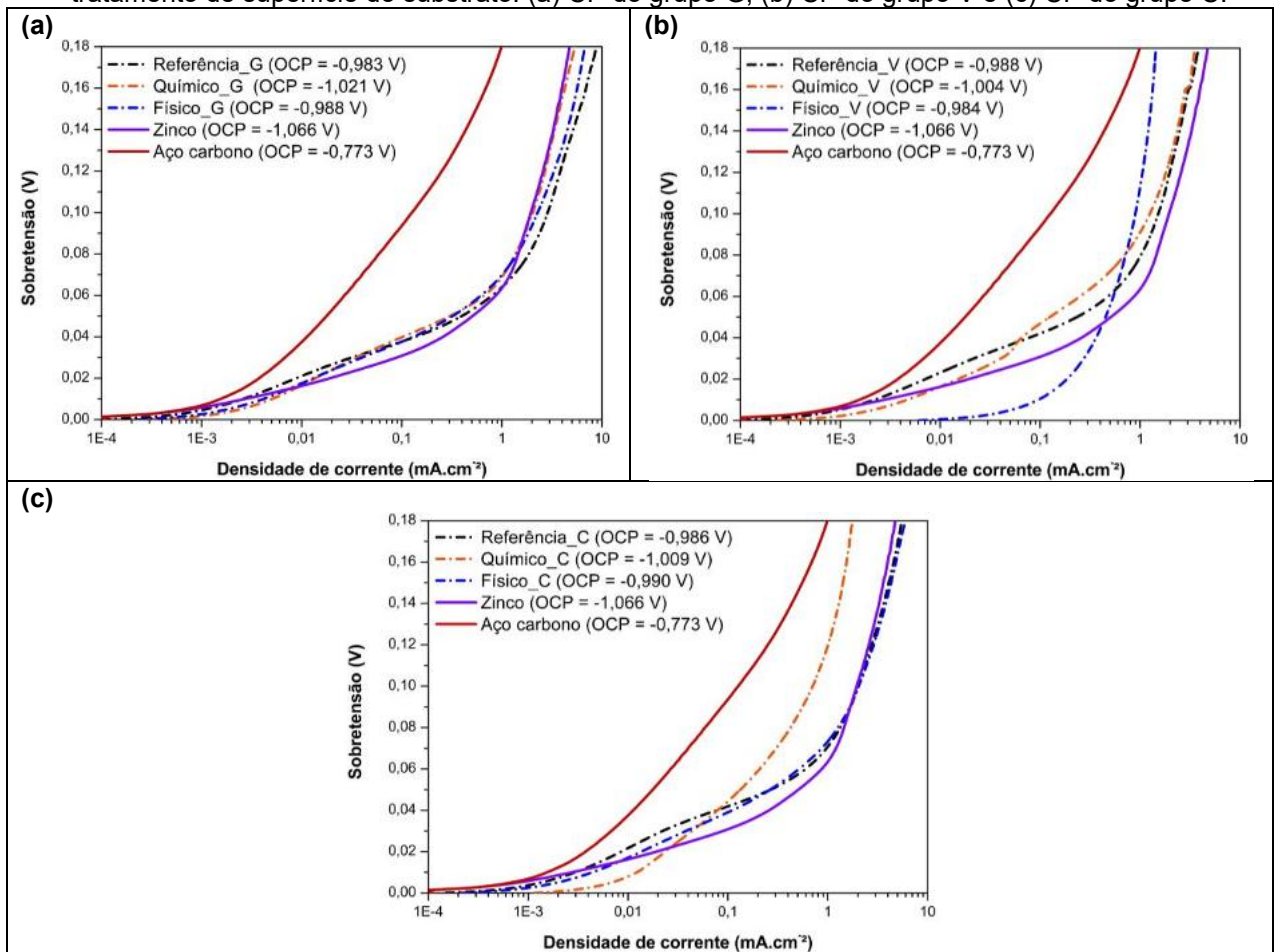
Fonte: o próprio autor.

A Figura 46a mostra as curvas dos CP referência que se assemelham muito à condição de polarização do zinco puro. Esse comportamento da curva de polarização entre as curvas do aço e do zinco, aproximando-se mais ao comportamento do zinco, é algo já esperado, pois esses CP apresentam a superfície galvanizada intacta (fase eta ( $\eta$ ) com altos teores de zinco sendo avaliada). A Figura 46b mostra CP desgastados quimicamente ainda com superfície parecida com a do zinco puro (CP do grupo G e V), porém uma tendência a um comportamento que se assemelha ao do substrato de aço carbono (grupo C). Isso corrobora os voltamogramas obtidos, uma vez que o desgaste químico para grupo C exigia mais tempo de imersão na solução ácida. Por fim, a Figura 46c que os CP dos grupos G e C apresentaram curva muito similar à polarização do zinco puro, enquanto o CP do grupo V mostrou-se mais similar ao aço carbono (com menor densidade de corrente ao final da polarização), reforçando o desgaste mais intenso desse CP. Percebe-se que, quanto mais exposto

estiver o substrato, os CP se comportarão de maneira mais parecida com um aço carbono do que com um aço galvanizado de camada intacta.

As curvas de polarização organizadas na Figura 47 estão agrupadas por tipo de tratamento de superfície do substrato: as curvas do CP do grupo G são mostradas na Figura 47a, do CP do grupo V na Figura 47b e do CP do grupo C na Figura 47c.

Figura 47 – Ramo anódico da polarização potenciodinâmica dos corpos de prova agrupados por tratamento de superfície do substrato: (a) CP do grupo G, (b) CP do grupo V e (c) CP do grupo C.



Fonte: o próprio autor.

Percebeu-se que para o grupo G (Figura 47a) os desgastes não foram intensos a ponto de diferenciar a superfície dos CP quando comparados à referência. Isso é interessante, pois há o indicativo de geração de superfícies bastante parecidas possivelmente em relação à presença das fases intermetálicas, variando somente as suas respectivas espessuras. Já em relação aos grupos V e C, novamente, tem-se o desgaste físico do grupo V e o desgaste químico do grupo C como as curvas de polarização com padrão mais similar ao do aço carbono, merecendo a devida atenção

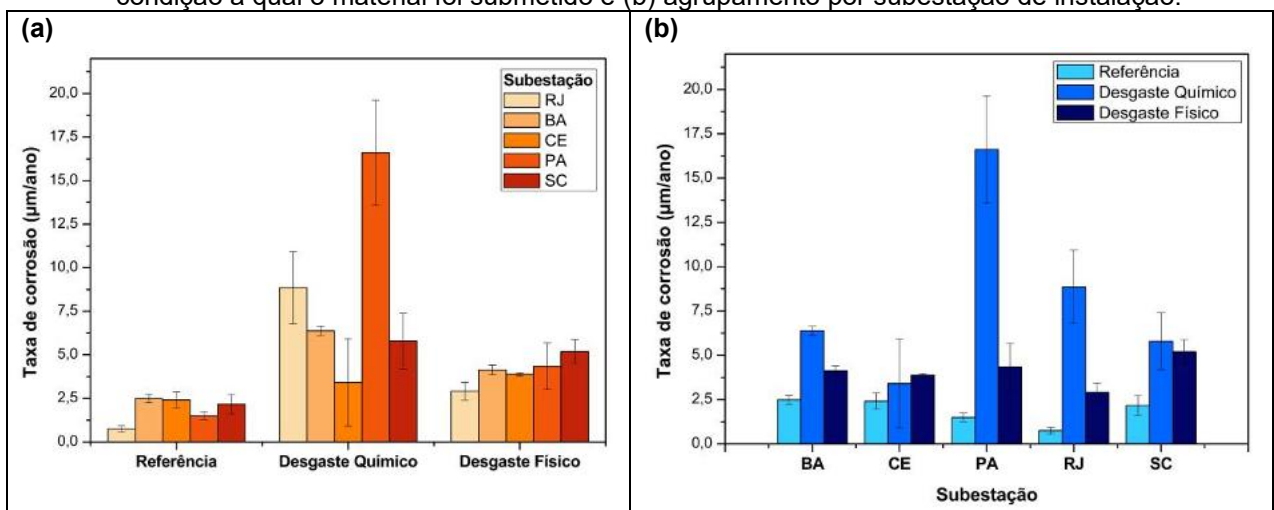
nos futuros ensaios de determinação de taxa de corrosão por conta dessa diferenciação no comportamento das polarizações.

## 5.5 CÁLCULO DAS TAXAS DE CORROSÃO

O intuito inicial foi preparar CP com superfícies diferentes, a partir de metodologias de desgaste controlado em laboratório. Esses CP desgastados simulam um aço galvanizado envelhecido artificialmente. Essa etapa visa avaliar o impacto desse desgaste artificial na velocidade de corrosão atmosférica do aço galvanizado em diferentes ambientes.

Após os 4 meses de exposição à corrosão em campo, alguns CP retornaram ao Cepel para ensaios de perda de massa e cálculo das velocidades de corrosão. De cada subestação foram retirados três CP de cada condição (referência, desgaste químico e desgaste físico), sendo que a triplicata foi necessariamente composta por um CP de cada grupo de tratamento de superfície do substrato (G, V e C). As velocidades de corrosão foram calculadas com base no tempo de exposição de cada grupo de materiais em cada subestação e na diferença de massa obtida com o ensaio de perda de massa. A Figura 48 mostra as taxas de corrosão referentes à primeira retirada.

Figura 48 – Taxa de corrosão dos corpos de prova após 4 meses de exposição: (a) agrupamento por condição à qual o material foi submetido e (b) agrupamento por subestação de instalação.



Fonte: o próprio autor.

A comparação dos resultados feita pelo agrupamento por condição à qual cada CP foi submetido (Figura 48a) indica que os CP referência apresentaram as menores

taxas de corrosão quando comparados aos demais CP desgastados. Isso pode estar relacionado com dois fatores: os CP foram passivados por cromatização ao final do processo de galvanização a quente e/ou a camada íntegra do galvanizado expõe apenas zinco puro à corrosão, reduzindo as velocidades de corrosão dos CP referência, pois a fase intermetálica *eta* corrói mais lentamente quando comparada à velocidade de corrosão de fases intermetálicas *zeta* e *delta*.

O desgaste químico apresentou taxas de corrosão mais variadas e com dispersões de erro elevadas, sendo explicadas possivelmente pelo desgaste não homogêneo das fases intermetálicas, que gera processos corrosivos mais ou menos intensos dependendo da extensão das áreas anódicas e catódicas formadas na superfície desgastada. Além disso, a retenção de ácido no interior da camada desgastada de revestimento pode ter reagido com os poluentes ambientais, principalmente nos CP avaliados das subestações do PA e RJ, os quais apresentaram velocidade de corrosão muito alta e fora dos padrões.

O desgaste físico apresentou uma maior regularidade nos valores de velocidade de corrosão nas cinco subestações avaliadas, além de apresentarem baixa dispersão de erro, outra evidência da obtenção de superfícies mais homogêneas que corroem numa velocidade parecida, podendo variar mais em relação às condições ambientais locais. A Figura 48b mostra as taxas de corrosão de cada condição dos CP em cada subestação de instalação de material. Percebe-se que já é possível reconhecer variações nas velocidades de corrosão numa mesma subestação, quando comparados os métodos de desgaste de preparo dos CP. Existe uma possível tendência a maiores velocidades de corrosão surgirem para os CP preparados pelo desgaste químico.

Em geral, os desgastes da camada de galvanizado aceleraram muito a velocidade de corrosão do galvanizado. Isso pode estar relacionado ao consumo total ou parcial da fase *eta* ( $\eta$ ), que acelera a velocidade de corrosão por conta da ausência de formação de produtos de corrosão protetores da camada de zinco. Esses produtos de corrosão são compostos por carbonatos, cloretos e óxidos de zinco, além de suas variações hidratadas. Eles são formados ao longo do tempo de exposição atmosférica, de acordo com os contaminantes presentes no ambiente, e são capazes de tornar a superfície impermeável e, conseqüentemente, mais protegida contra a corrosão (*American Galvanizers Association*, 2012; Eijnsbergen, 1994; Kuklik; Kudláček, 2016). Essa sugestão é corroborada pelos resultados da voltametria de dissolução anódica

e pela polarização potenciométrica, nos quais foram detectados, respectivamente, a ausência ou diminuição dos picos referentes à fase *eta* ( $\eta$ ) nos voltamogramas e o deslocamento para um comportamento mais parecido com o do aço nas curvas de polarização.

## 6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo demonstram a eficácia das metodologias de desgaste controlado aplicadas ao aço galvanizado para ensaios de corrosão atmosférica em campo. A análise dos corpos de prova (CP) revelou que tanto os métodos de desgaste químico quanto físico foram capazes de reduzir a espessura do revestimento de zinco de maneira controlada e aplicável em larga escala.

No desgaste químico, a otimização dos parâmetros de tempo e concentração da solução ácida permitiu alcançar uma redução média de espessura de aproximadamente 50%, o que foi considerado satisfatório para os objetivos do estudo. A validação do método, embora tenha apresentado variações entre os diferentes grupos de tratamento de superfície, sendo necessário montar novas otimizações ao separar os grupos, mostrou-se confiável para a aplicação em larga escala com baixa dispersão dos resultados quando comparados às metas definidas previamente (95% de confiança nos resultados). Os parâmetros otimizados para o desgaste químico foram o uso de solução de ácido clorídrico a  $1,09 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  e um tempo de imersão de 200 segundos para os CP dos grupos G e V e 310 segundos para os CP do grupo C.

Já no desgaste físico, a utilização da lixadeira elétrica com disco de lixa tipo *flap* grão #120 proporcionou um desgaste homogêneo e controlado, com resultados consistentes ao longo dos ensaios. A escolha desta técnica foi fundamentada na sua simplicidade e viabilidade prática, sendo adequada para a produção em massa de CP desgastados. Ainda que o critério de confiança tenha sido reduzido para 80%, o conjunto de 75 CP preparados para ensaio de campo apresentaram alto desvio padrão relativo (DPR) dos resultados. Isso reforçou os problemas práticos desse método que não puderam ser evitados, como o caso da grande influência do operador na realização do desgaste (aplicação de força, inclinação da lixadeira, velocidade da passada etc.).

Os ensaios de conformidade do aço galvanizado foram eficazes na verificação dos critérios de aceitação do material, de acordo com a norma de qualidade para esse material. Os ensaios eletroquímicos e de microscopia foram essenciais para comparar os níveis de desgaste dos CP e compreender melhor como ficou a superfície do galvanizado após a execução das metodologias otimizadas.

Os ensaios de campo, realizados em diferentes subestações de energia elétrica, forneceram dados iniciais valiosos sobre as taxas de corrosão do aço

galvanizado em condições climáticas diversificadas. Mesmo com pouco tempo de exposição atmosférica (4 meses), já foi possível identificar variações nas velocidades de corrosão nos CP, principalmente entre os métodos de desgaste aplicados. Isso reforça o fato de que é possível implementar novas metodologias desenvolvidas que apresentem alta confiabilidade estatística na obtenção dos resultados (como foi o caso do desgaste químico, com 95% de confiança na padronização do desgaste). Contudo, as taxas de corrosão mostraram-se mais elevadas para os CP desgastados, demonstrando uma influência significativa dos desgastes executados que precisam ser melhor estudadas para confirmar se existe um comparativo direto com a corrosão real de aço galvanizado em estágios mais avançados. É preciso avaliar fatores práticos, como é o caso da inexistência de produtos de corrosão na superfície dos CP desgastados em laboratório, que possivelmente retardariam as taxas de corrosão do galvanizado.

A correlação entre os resultados laboratoriais e os dados de campo permitirá o desenvolvimento de modelos preditivos mais precisos para a avaliação da vida útil do aço galvanizado, contribuindo para a definição de prioridades de manutenção no setor elétrico. Contudo, é preciso investir mais na implementação de metodologias como essa para que alternativas mais promissoras sejam desenvolvidas. Em suma, este estudo não apenas validou as metodologias de desgaste controlado desenvolvidas com respaldo estatístico, mas também destacou a importância de uma abordagem integrada entre ensaios laboratoriais e de campo para a compreensão dos processos corrosivos e a melhoria das práticas de proteção anticorrosiva.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dentre as perspectivas do presente trabalho, pode-se destacar:

- Aplicação de planejamentos compostos centrais na otimização das metodologias, na tentativa de evitar as dificuldades encontradas com os planejamentos fatoriais completos, principalmente na etapa de otimização da metodologia de desgaste físico;
- Implementação de ensaios em Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) dos CP desgastados para avaliar a microestrutura, na intenção de encontrar respostas para as variações de desempenho anticorrosivo em campo e possíveis causas de diferenças nos desgastes aplicados por grupo de CP;
- Desgaste químico do residual de galvanizado para quantificar teores de Zn e Fe, na tentativa de compreender melhor quanto de fato foi desgastado do revestimento original, para respaldar o modo heterogêneo de desgaste químico;
- Quantificação de contaminantes atmosféricos presentes na superfície dos corpos de prova, a partir de extração aquosa a quente das peças ao retornarem para o laboratório após o tempo de exposição;
- Avaliação dos produtos de corrosão dos CP retirados de campo, com implementação de análises por difração de raios X (DRX) e/ou espectroscopia de fotoelétrons de raios X (XPS), a fim de compreender melhor os processos corrosivos dos grupos de CP nos locais de exposição;
- Taxas de corrosão e modelagem de velocidade de corrosão por subestação de instalação e por cada condição dos CP (referência, desgastado químico e desgastado físico) ao longo do tempo de exposição em campo;
- Remodelagem de desgastes, partindo de uma única condição de tratamento de superfície, talvez a opção sem geração de perfil de rugosidade, seguindo um processo de galvanização mais real de estruturas metálicas;
- Definição de percentuais de desgaste diferentes de 50%, a fim de comparar as respostas de taxa de corrosão com exposição no campo.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Relatório de Análise de Impacto Regulatório (AIR) nº 1/2021-SRT/SRM/SGT/SCT/SFE/SFF/ANEEL**. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/air2021001srt.pdf>>. Acesso em: 9 fev. 2025.

AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION. Hot-Dip Galvanized Steel vs. Zinc-Rich Paint. **AGA**, 2007.

AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION. Hot-Dip Galvanizing for Corrosion Protection: a specifier's guide. **AGA**, 2012.

AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION. Revestimientos de zinc: Análisis Comparativo de las Características de Proceso y Rendimiento. **AGA**, 2015.

AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION. Inspection of hot-dip galvanized steel products. **AGA**, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6210**: Corrosão atmosférica - Materiais metálicos - Preparo, limpeza e determinação da taxa de corrosão de corpos-de-prova em ensaios de corrosão. ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7399**: Produto de aço e ferro fundido galvanizado por imersão a quente - Verificação da espessura do revestimento por processo não destrutivo - Método de ensaio. ABNT, 2015a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7400**: Galvanização de produtos de aço e ferro fundido por imersão a quente - Verificação da uniformidade do revestimento - Método de ensaio. ABNT, 2015b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6323**: Galvanização por imersão a quente de produtos de aço e ferro fundido - Especificação. ABNT, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7397**: Produto de aço e ferro fundido galvanizado por imersão a quente - Determinação da massa do revestimento por unidade de área - Método de ensaio. ABNT, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações. ABNT, 2024a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9223**: Corrosão de metais e ligas - Corrosividade de atmosferas - Classificação, determinação e estimativa. ABNT, 2024b.

BARROS NETO, Benício de; SCARMINIO, Ieda Spacino; BRUNS, Roy Edwards. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 3. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2007.

BENDINELLI, Elber Vidigal *et al.* Caracterização Eletroquímica das Fases Intermetálicas de Aços Galvanizados por Imersão a Quente. *In: 13a CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS*. Cabo de Santo Agostinho, PE: COTEC, 2015. p. 1–11.

BENITE, Anderson; TANIGUTI, Eliana; GONZALEZ, Pedro. **Manual da Sustentabilidade da Construção em Aço**. 1. ed. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil/ Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA), 2019.

BESSEYRIAS, A. *et al.* Electrochemical behaviour of zinc-iron intermetallic compounds in an aqueous solution containing NaCl and ZnSO<sub>4</sub>. **Corrosion Science**, v. 39, n. 10–11, p. 1883–1896, 1997.

BHADESHIA, H. K. D. H.; HONEYCOMBE, R. W. K. **Steels: Microstructure and Properties**. 4. ed. Cambridge: Butterworth-Heinemann, 2017.

CUNHA, Jéssica Nogueira da. **Estudo mecanístico e avaliação de inibidores verdes frente à corrosão do aço carbono em ambientes com alta salinidade e saturados com CO<sub>2</sub>**. Tese (Doutorado em Ciências – Química). Rio de Janeiro: Instituto de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2023.

EIJNSBERGEN, J. F. H. van. **Duplex systems: hot-dip galvanizing plus painting**. Amsterdã: Elsevier Science B. V., 1994.

ELETROBRAS. **Transmissão de Energia**. Disponível em: <<https://eletrobras.com/pt/Paginas/Transmissao-de-Energia.aspx>>. Acesso em: 31 jan. 2025.

GALVINFO CENTER. Galvanneal - Diferenças do Galvanizado. **International Zinc Association**, 1 jan. 2011.

GENTIL, Vicente. **Corrosão Gentil**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8407**: Corrosion of metals and alloys - Removal of corrosion products from corrosion test specimens. ISO, 2009.

KOCH, Gerhardus. Cost of corrosion. *In: EL-SHERIK, A. M. (Org.). Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies: Production and Transmission*. [S.l.]: Elsevier Inc., 2017. p. 3–30.

KOCH, Gerhardus H. *et al.* **Corrosion Cost and Preventive Strategies in the United States**. Springfield, EUA: [S.n.].

KUKLIK, Vlastimil; KUDLACEK, Jan. **Hot-Dip Galvanizing of Steel Structures**. Oxford, RU: Butterworth-Heinemann, 2016.

LEARDI, Riccardo. Experimental design in chemistry: A tutorial. **Analytica Chimica Acta**, v. 652, n. 1–2, p. 161–172, 10 jun. 2009.

MAASS, Peter. Examples of Use. *In*: MAASS, Peter; PEISSKER, Peter (Orgs.). **Handbook of Hot-dip Galvanization**. 3. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2011.

MARDER, A. R. The metallurgy of zinc-coated steel. **Progress in Materials Science**, v. 45, p. 191–271, 2000.

MCMURRY, John E.; FAY, Robert C.; ROBINSON, Jill K. **Chemistry**. 7. ed. Nova York: Pearson, 2014.

MILLER, James N.; MILLER, Jane C.; MILLER, Robert D. **Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry**. 7. ed. Harlow, Reino Unido: Pearson Education Limited, 2018.

MINISTÉRIO DAS RELAÇÕES EXTERIORES. **O Brasil: Geografia**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mre/pt-br/embaixada-bogota/o-brasil/geografia>>. Acesso em: 31 jan. 2025.

NOGUEIRA, T. M. C.; SEIXAS, U. R.; RIOS, P. R. Application of Voltammetric Stripping to a Galvannealed Coating on an Interstitial Free Steel Sheet. **ISIJ International**, v. 38, n. 7, p. 775–777, 1998.

NUNES, Felipe Garcia *et al.* Avaliação do comportamento anticorrosivo do aço galvanizado por imersão a quente em diferentes atmosferas. *In*: **INTERCORR 2018**. São Paulo: ABRACO, 2018. p. 1–22.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Sobre o SIN: o Sistema em Números**. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>. Acesso em: 9 fev. 2025.

OZTURK, F.; EVIS, Z.; KILIC, S. Hot-Dip Galvanizing Process. *In*: **Comprehensive Materials Finishing**. 1. ed. [S.l.]: Elsevier Inc., 2017. v. 3 p. 178–190.

PACHECO, Wagner Felipe *et al.* Voltametrias: Uma Breve Revisão Sobre os Conceitos. **Revista Virtual de Química**, v. 5, n. 4, p. 516–537, 2013.

POKORNY, P. *et al.* Reaction kinetics of the formation of intermetallic Fe-Zn during hot-Dip galvanizing of steel. **Metalurgija**, v. 55, n. 1, p. 111–114, 2016a.

POKORNY, P. *et al.* Effect of chemical composition of steel on the structure of hot-Dip galvanized coating. **Metalurgija**, v. 55, n. 1, p. 115–118, 2016b.

QUEIROZ, F. M.; COSTA, I. Electrochemical, chemical and morphological characterization of galvannealed steel coating. **Surface & Coatings Technology**, v. 201, n. 16–17, p. 7024–7035, 21 maio 2007.

RODRIGUES, Maria Isabel; IEMMA, Antonio Francisco. **Planejamento de Experimentos & Otimização de Processos**. 2. ed. Campinas: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor, 2009.

SANTANA, Lucas Carvalho. **Estudo da corrosão do aço galvanizado utilizado no setor elétrico em diferentes ambientes: modelagem da perda de espessura e caracterização eletroquímica**. 2022. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos). Rio de Janeiro: Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2022.

SCHULZ, W. D.; THIELE, M. Hot-dip Galvanizing and Layer-formation Technology. *In*: MAASS, Peter; PEISSKER, Peter (Orgs.). **Handbook of Hot-dip Galvanization**. 3. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2011.

SEBRAO, Mauro Zanini; ORDINE, Alberto Pires; DE OLIVEIRA, Renato Antonio. Monitoramento do Estado de Corrosão das Grelhas Metálicas de Torres de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica, Utilizando Técnicas Eletroquímicas. *In*: **INTERCORR 2012**. Salvador: ABRACO, 2012. p. 1–15.

SERRA, Eduardo Torres. **Corrosão e Proteção Anticorrosiva dos Metais no Solo**. 1. ed. Rio de Janeiro: CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, 2006.

THE SOCIETY FOR PROTECTIVE COATINGS. Surface Preparation Standard **SSPC-SP 16**: Brush-Off Blast Cleaning of Coated and Uncoated Galvanized Steel, Stainless Steels, and Non-Ferrous Metals. SSPC, 2020.

*WORLD STEEL ASSOCIATION*. **The Steel Story**: Tracing steel's development from 2,000 BC to the innovations of today. 2023.

*WORLD STEEL ASSOCIATION*. **World Steel in Figures**. 2024.

YAN, Lei *et al.* Anti-Corrosion Reinforcements Using Coating Technologies – A Review. **Polymers**, v. 14, n. 21, 7 nov. 2022.

## APÊNDICE A – MAPAS DE INSTALAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA NAS CINCO SUBESTAÇÕES DA ELETROBRAS

As Figuras A1 a A5 mostram os mapas, em ordem cronológica de instalação, dos CP posicionados nos varais construídos para ensaio de corrosão em campo em cinco subestações da Eletrobras pelo Brasil.

Figura A1 – Mapa de instalação dos corpos de prova na subestação de energia elétrica da Usina de Santa Cruz, na cidade do Rio de Janeiro, no estado do Rio de Janeiro.



Figura A2 – Mapa de instalação dos corpos de prova na subestação de energia elétrica Jorge Lacerda B, na cidade de Capivari de Baixo, no estado de Santa Catarina.

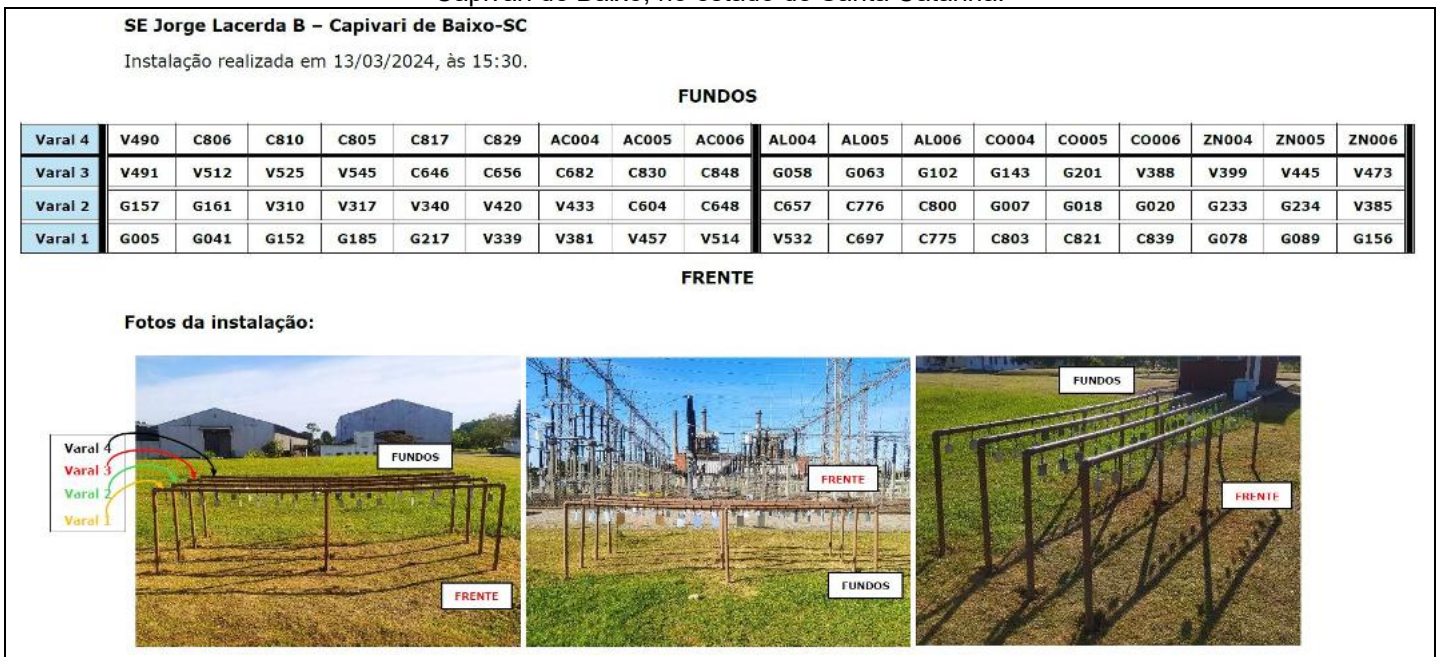


Figura A3 – Mapa de instalação dos corpos de prova na subestação de energia elétrica Fortaleza II, na cidade de Fortaleza, no estado do Ceará.

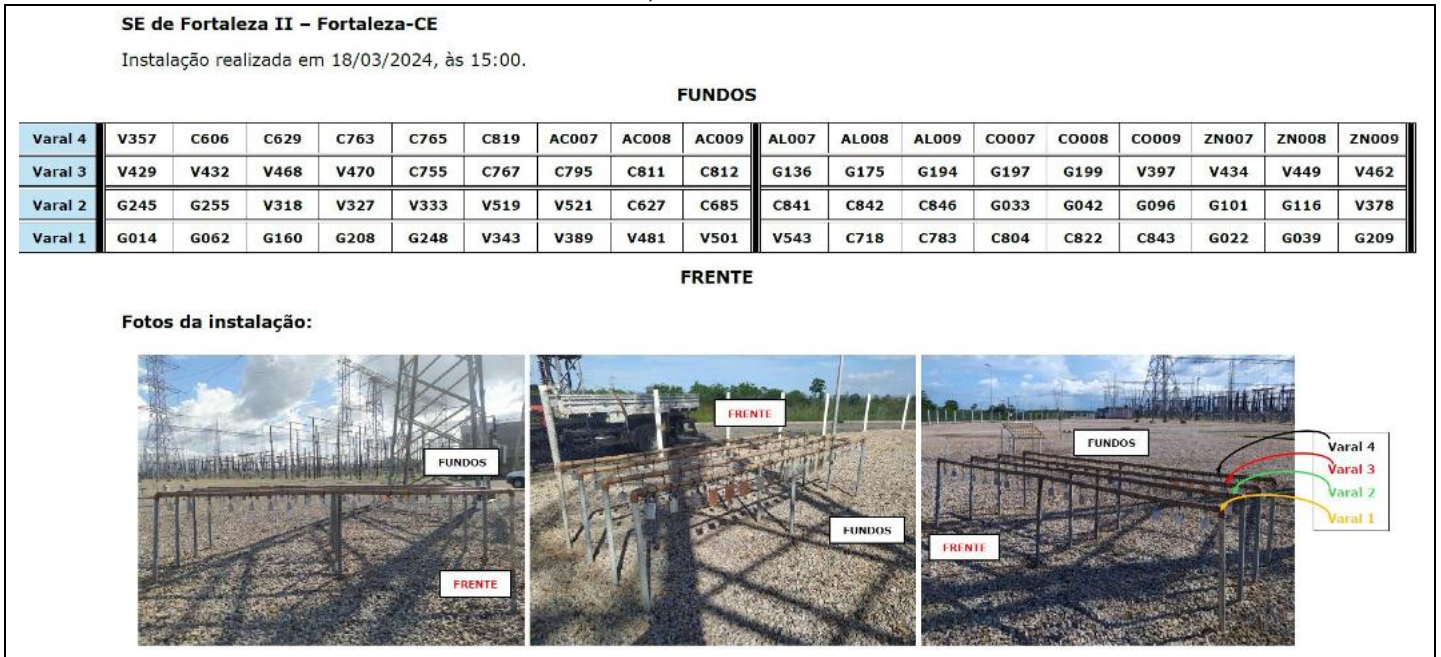


Figura A4 – Mapa de instalação dos corpos de prova na subestação de energia elétrica Juazeiro II, na cidade de Juazeiro, no estado da Bahia.

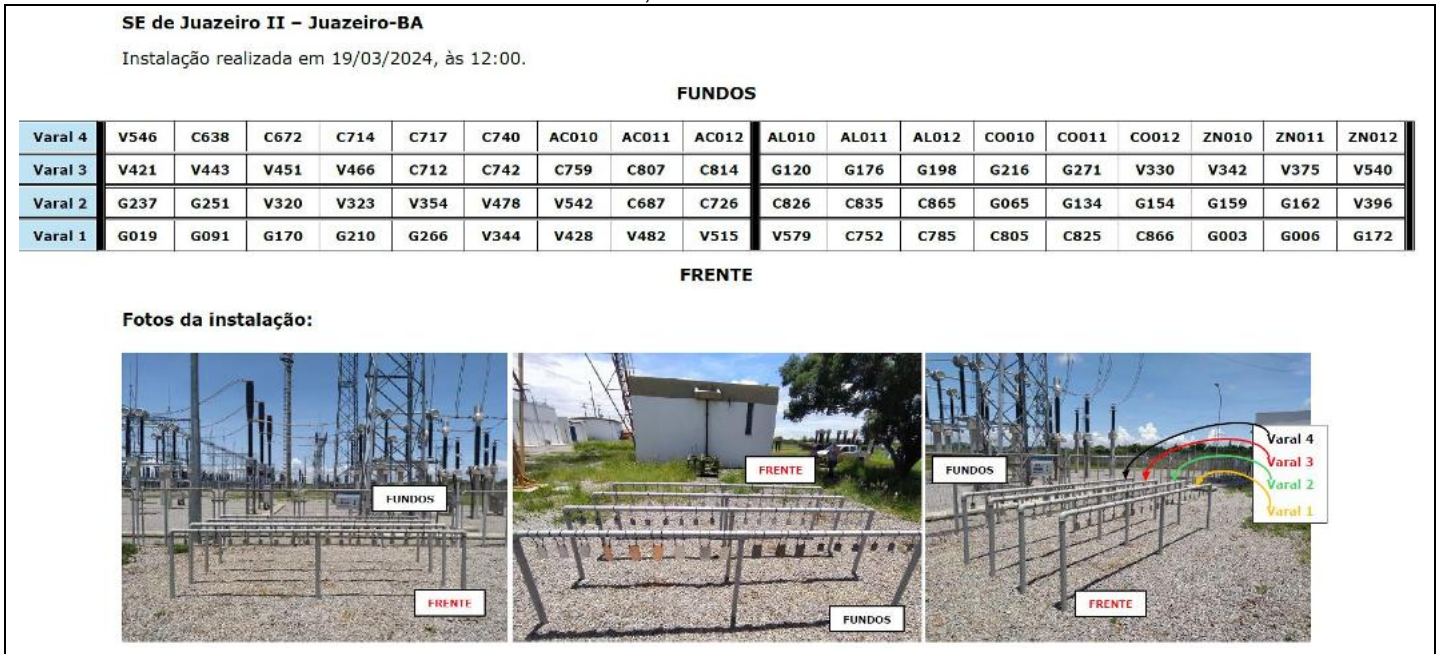
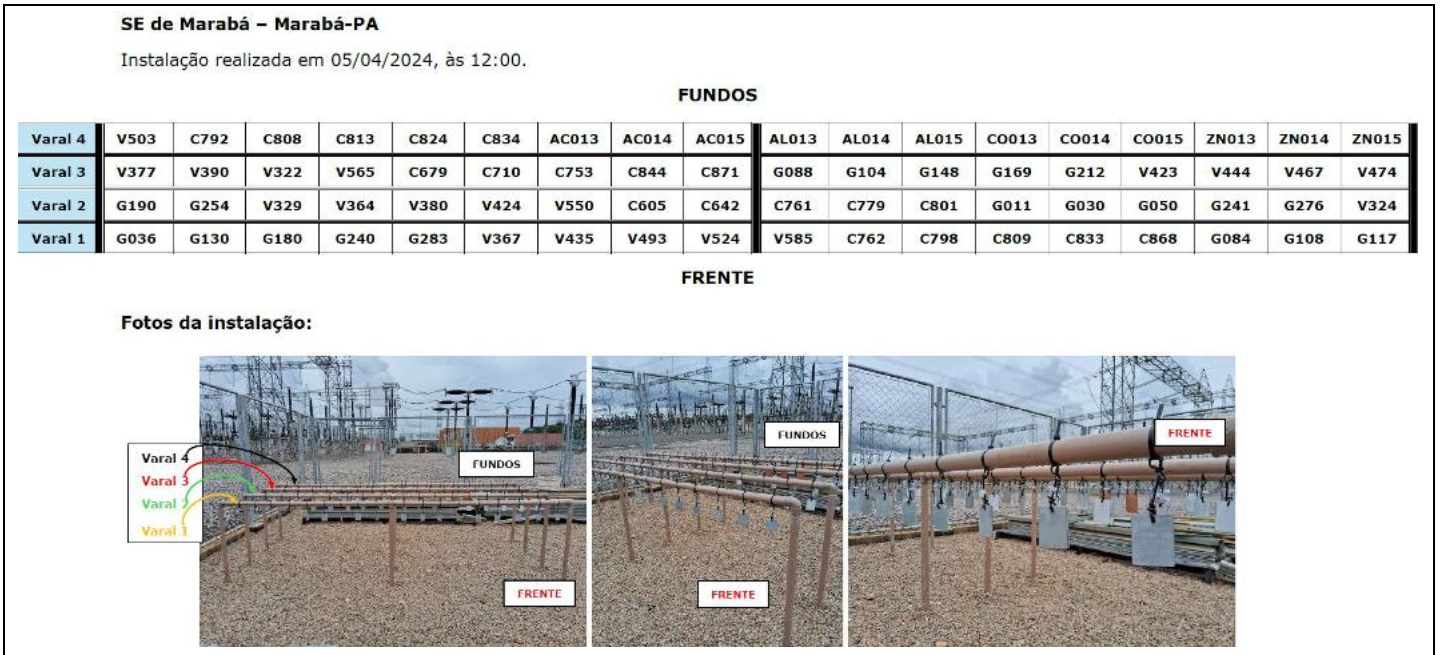


Figura A5 – Mapa de instalação dos corpos de prova na subestação de energia elétrica Marabá, na cidade de Marabá, no estado do Pará.



## APÊNDICE B – TESTE DE GRUBBS DOS RESULTADOS DAS TRIPLICATAS DO PONTO CENTRAL DE TODOS OS PLANEJAMENTOS PARA AMBOS OS DESGASTES

Os testes de Grubbs para verificação de resultados *outliers* das triplicatas dos planejamentos estatísticos das triagens e otimizações são mostrados, respectivamente, nas Tabelas B1 e B2, a partir da comparação entre  $G_{calc}$  e  $G_{tab}$ . Entende-se como *outlier* o resultado que apresenta  $G_{calc}$  maior que  $G_{tab}$ . Não foram encontrados valores *outlier*.

Tabela B1 – Teste de Grubbs para avaliação dos resultados das replicatas das triagens.

TRIAGEM	Corpos de prova da triplicata	Redução de massa (%)	$G_{calc}^*$
Desgaste Químico	1 <sup>a</sup>	G295	4,0790
		V575	3,6363
		C608	3,8150
	2 <sup>a</sup>	G168	1,6328
		V744	1,5931
		C875	1,4572
Desgaste Físico	1 <sup>a</sup>	G090	1,1462
		V335	0,6384
		C645	0,7243
	2 <sup>a</sup>	V349	1,2052
		V583	1,1026
		C772	1,0223

Nota: \*para fins de comparação com os valores de  $G_{calc}$  o valor de  $G_{tab}$  para  $n=3$  é 1,155.

Tabela B2 – Teste de Grubbs para avaliação dos resultados das replicatas das otimizações.

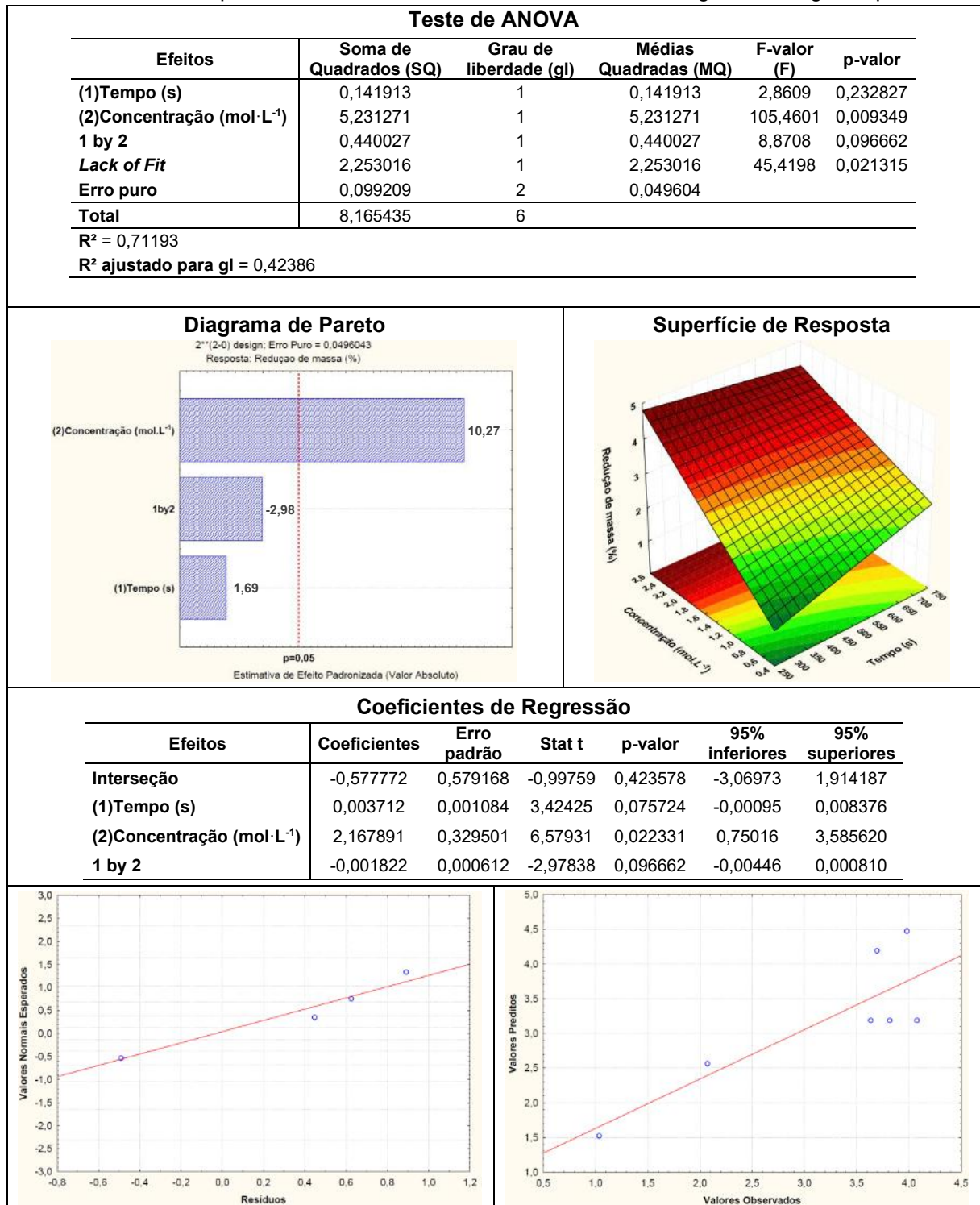
OTIMIZAÇÃO	Corpos de prova da triplicata	Redução de massa (%)	$G_{calc}^*$
Desgaste Químico	1 <sup>a</sup>	G264	1,8819
		V351	1,9272
		V516	2,0231
	Grupos G e V	G142	2,5392
		G150	2,3427
		V548	2,4710
	Grupo C	C716	2,1050
		C734	2,0441
		C859	2,0568
Desgaste Físico	1 <sup>a</sup>	G008	1,4031
		V305	1,2135
		C728	0,9503

Nota: \*para fins de comparação com os valores de  $G_{calc}$  o valor de  $G_{tab}$  para  $n=3$  é 1,155.

## APÊNDICE C – TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS DOS PLANEJAMENTOS EXPERIMENTAIS EXECUTADOS

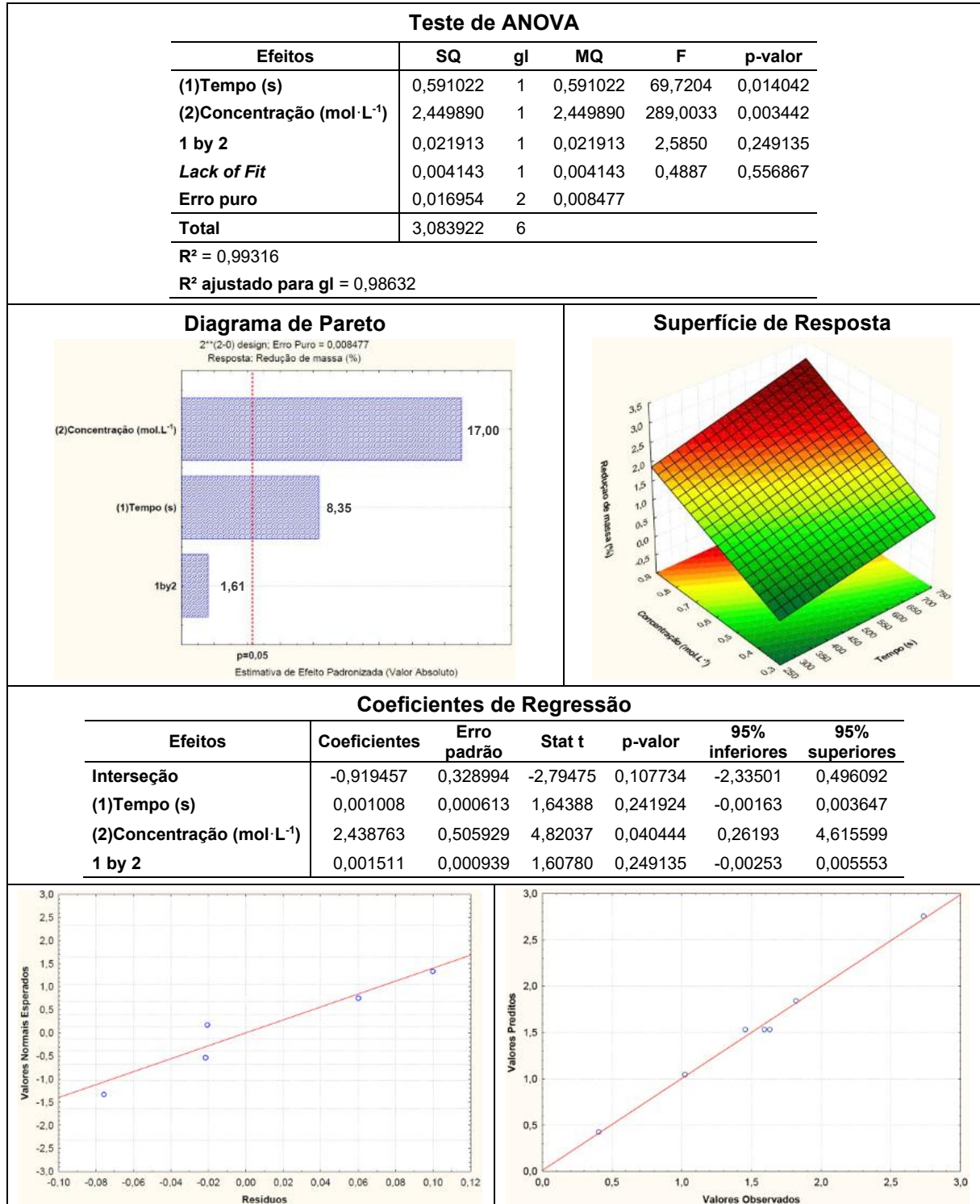
O tratamento estatístico referente aos dados resultantes da 1ª triagem do desgaste químico encontra-se no Quadro C1.

Quadro C1 – Principais resultados do tratamento estatístico da 1ª triagem do desgaste químico.



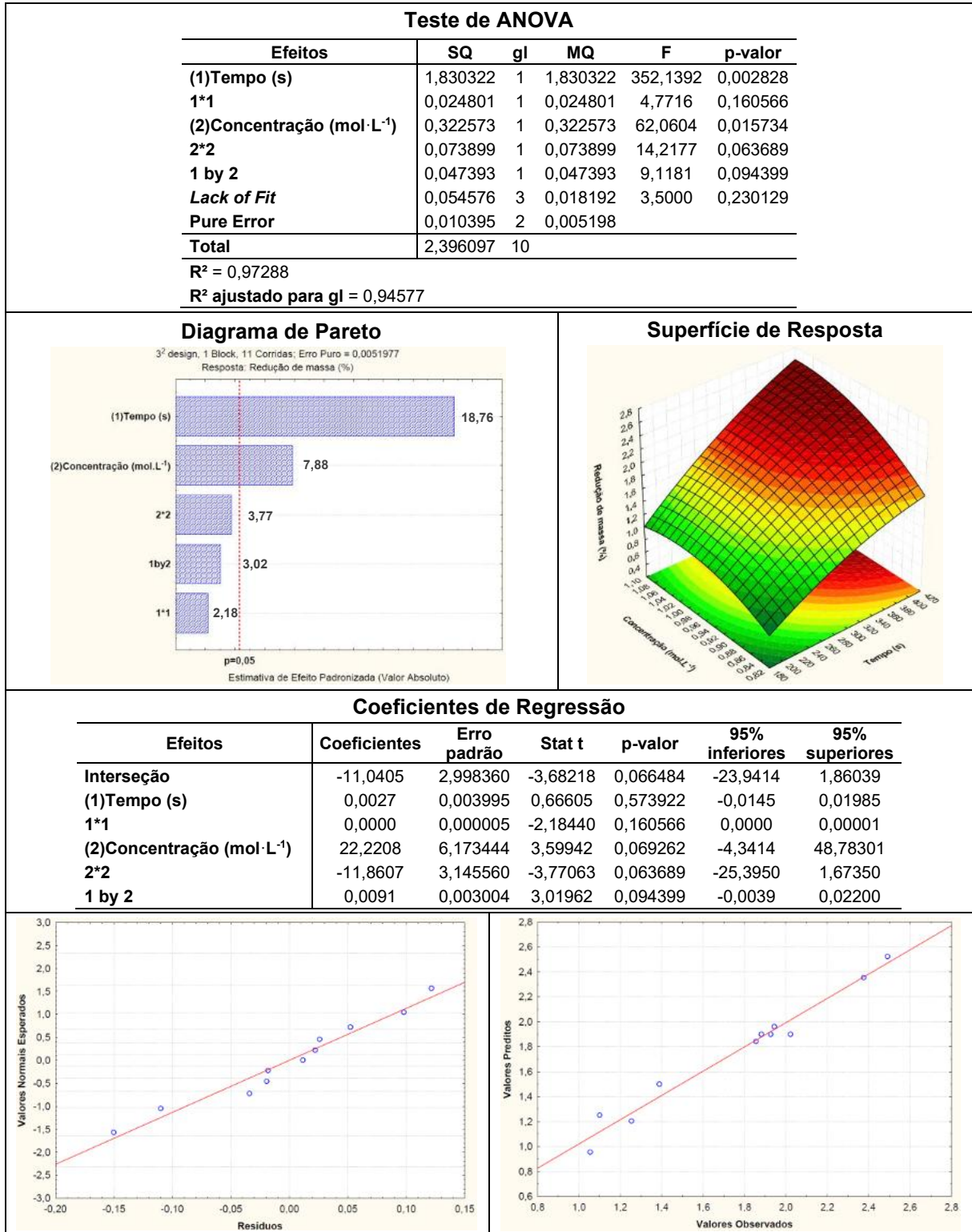
O tratamento estatístico referente aos dados resultantes da 2ª triagem do desgaste químico encontra-se no Quadro C2.

Quadro C2 – Principais resultados do tratamento estatístico da 2ª triagem do desgaste químico.



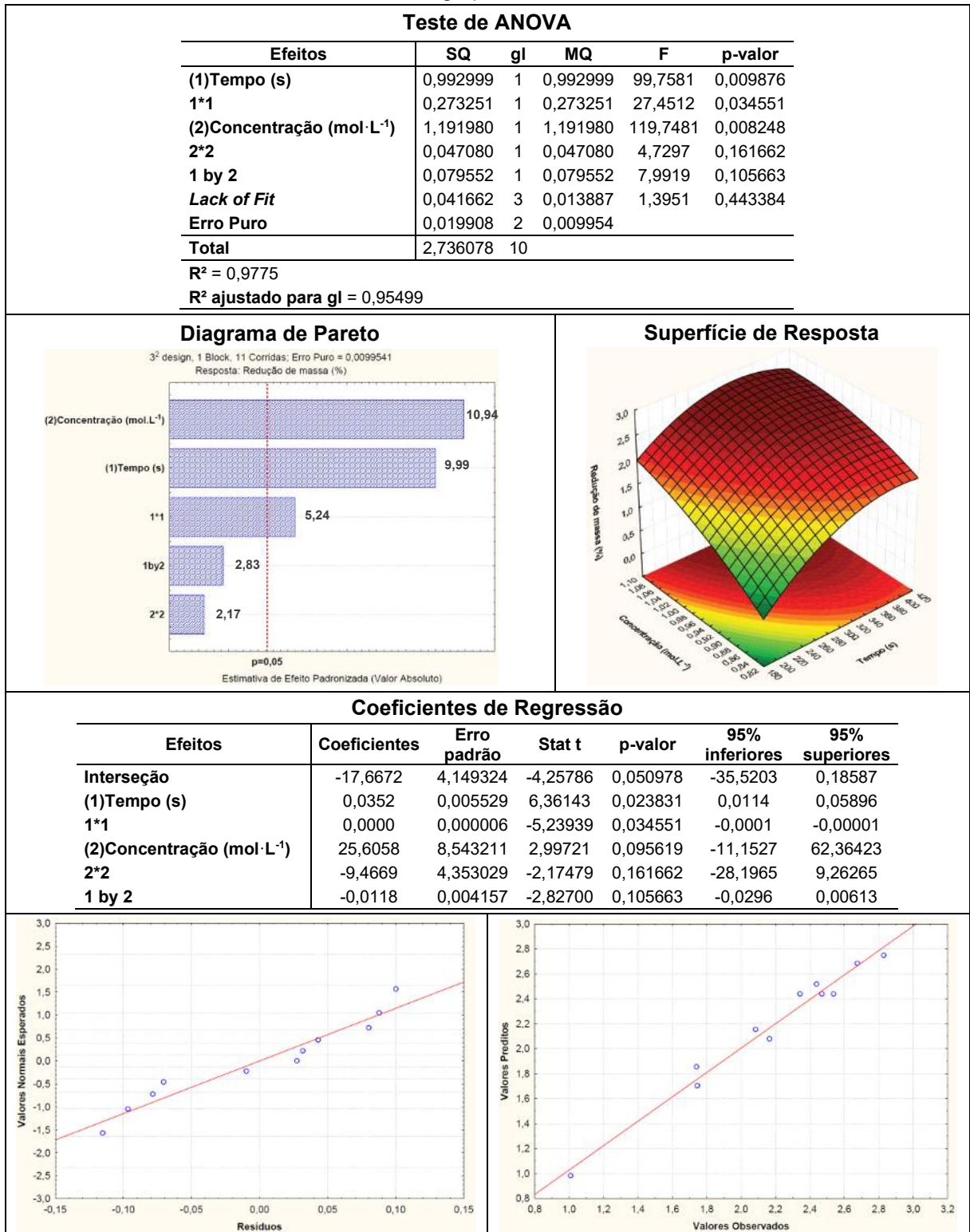
O tratamento estatístico referente aos dados resultantes da 1ª otimização do desgaste químico encontra-se no Quadro C3.

Quadro C3 – Principais resultados do tratamento estatístico da 1ª otimização do desgaste químico.



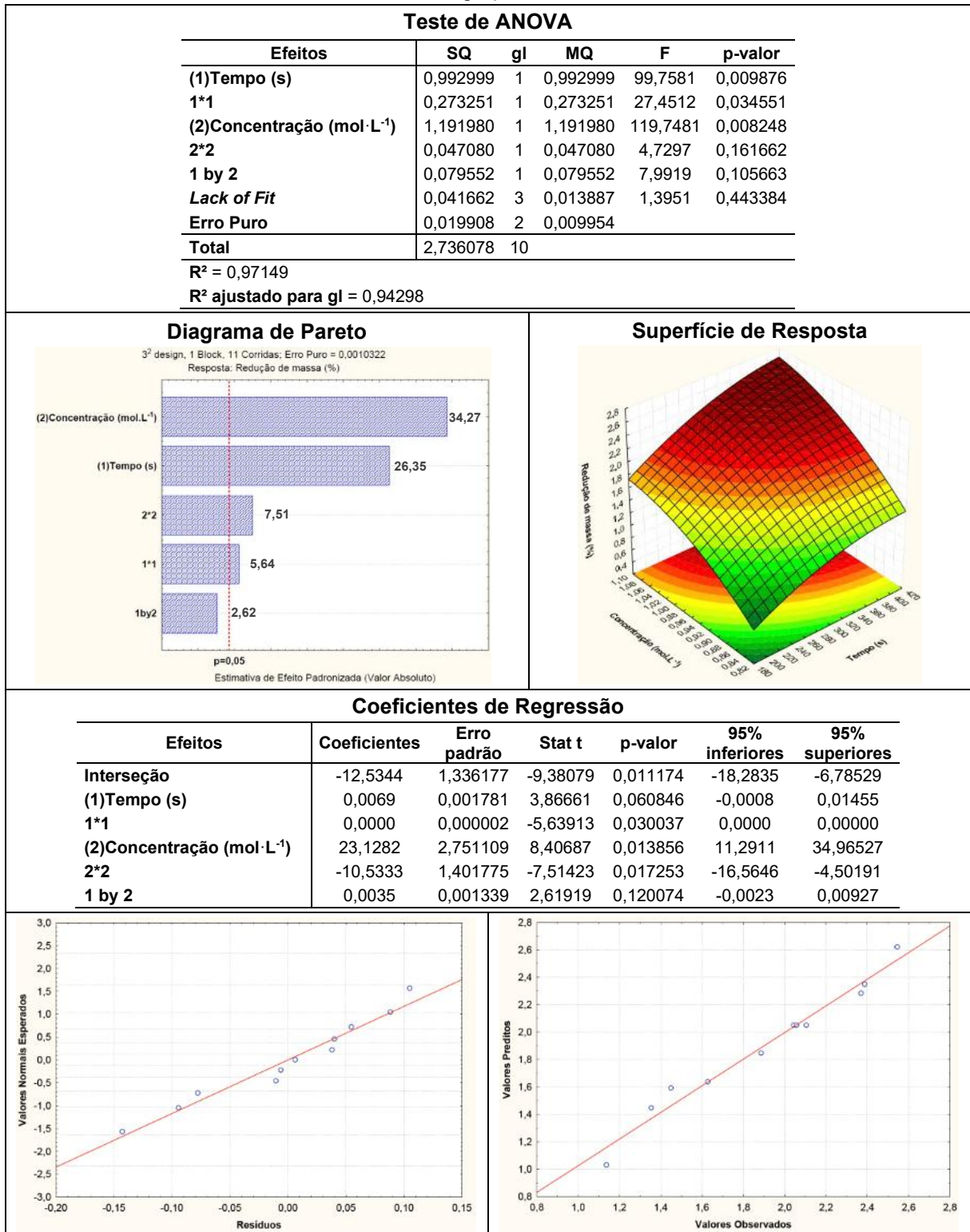
O tratamento estatístico referente aos dados resultantes da nova otimização do desgaste químico feita para utilizando somente CP dos grupos G e V encontra-se no Quadro C4.

Quadro C4 – Principais resultados do tratamento estatístico da nova otimização do desgaste químico dos grupos G e V.



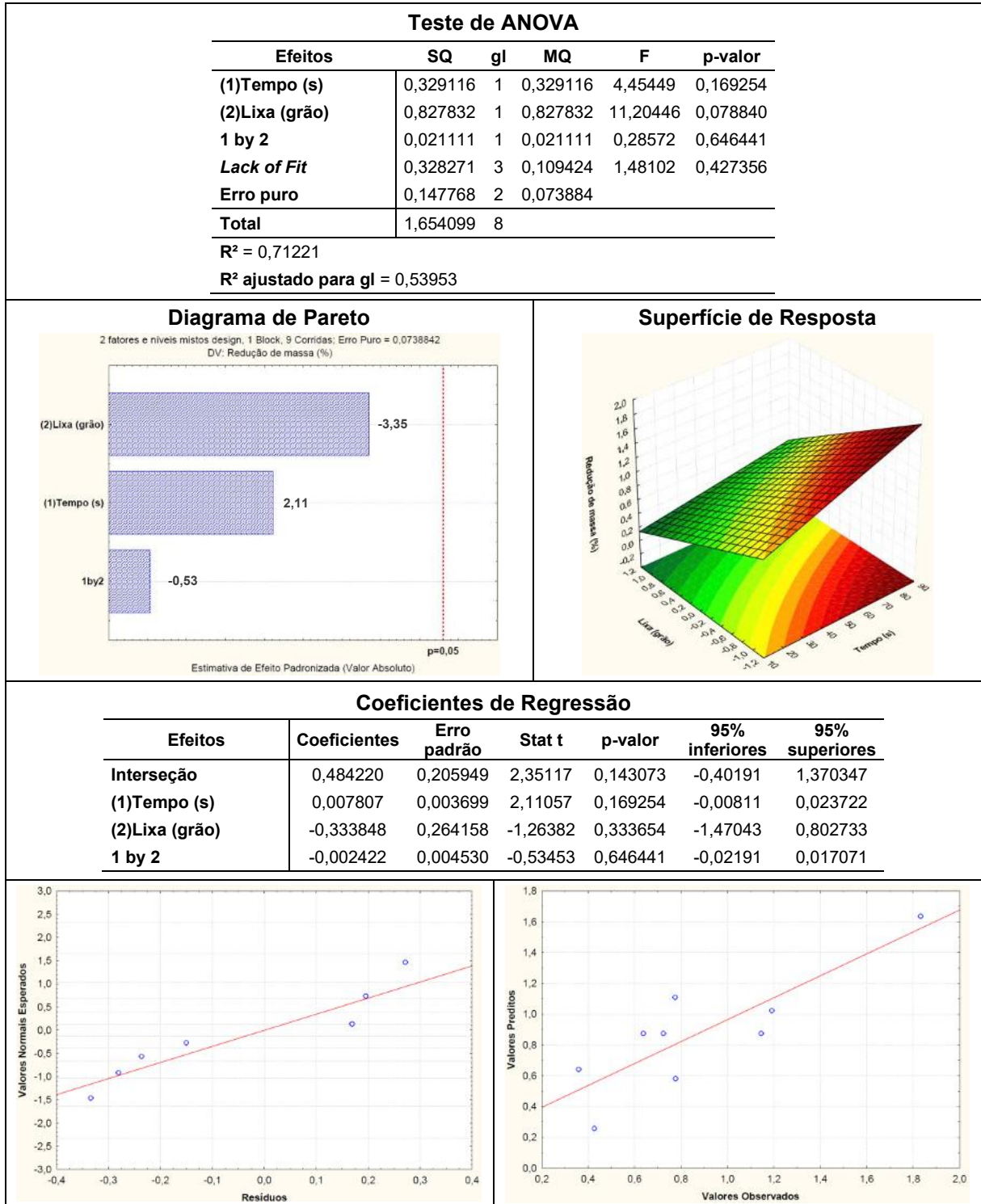
O tratamento estatístico referente aos dados resultantes da nova otimização do desgaste químico feita para utilizando somente CP do grupo C encontra-se no Quadro C5.

Quadro C5 – Principais resultados do tratamento estatístico da nova otimização do desgaste químico do grupo C.



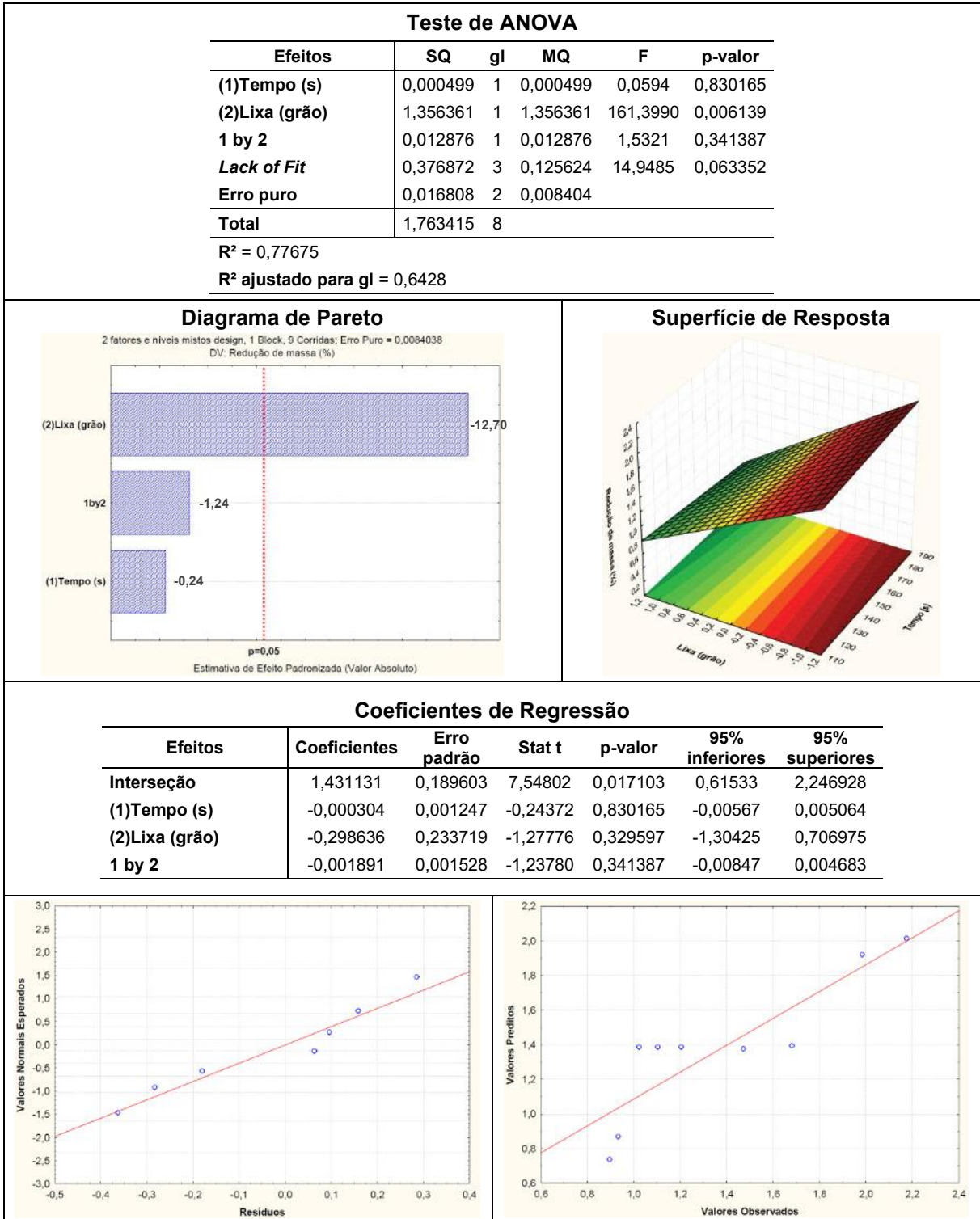
O tratamento estatístico referente aos dados resultantes da 1ª triagem do desgaste físico encontra-se no Quadro C6.

Quadro C6 – Principais resultados do tratamento estatístico da 1ª triagem do desgaste físico.



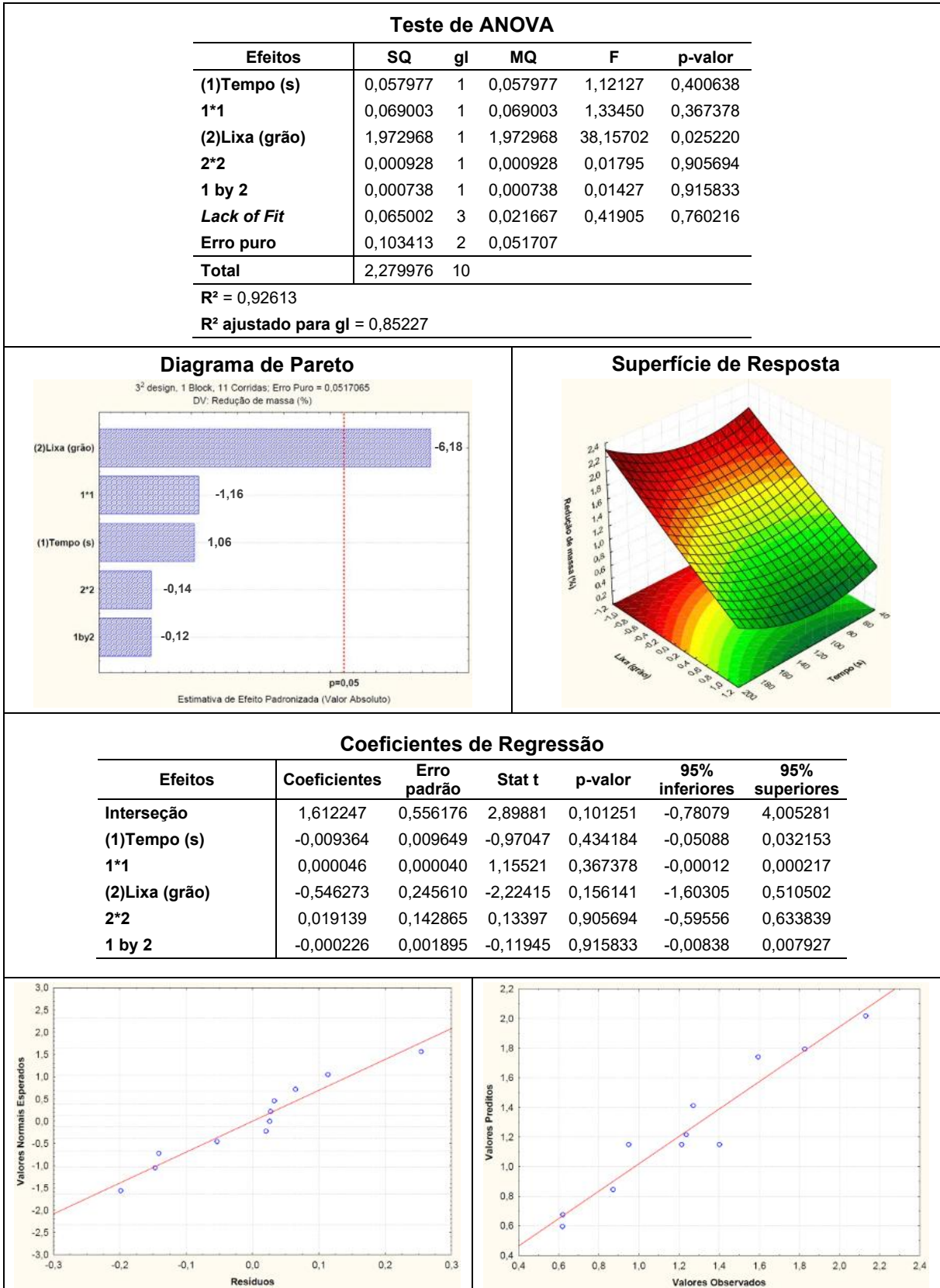
O tratamento estatístico referente aos dados resultantes da 2ª triagem do desgaste físico encontra-se no Quadro C7.

Quadro C7 – Principais resultados do tratamento estatístico da 2ª triagem do desgaste físico.



O tratamento estatístico referente aos dados resultantes da otimização do desgaste físico encontra-se no Quadro C8.

Quadro C8 – Principais resultados do tratamento estatístico da otimização do desgaste físico.



## APÊNDICE D – APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO 3 NO CÁLCULO DAS METAS DE REDUÇÃO DE MASSA PARA OS PLANEJAMENTOS EXPERIMENTAIS

Os resultados dos cálculos de aplicação da Equação 3 na obtenção das metas de desgastes químico e físico para as otimizações encontram-se, respectivamente, nas Tabelas D1 e D2.

Tabela D1 – Resultados dos cálculos para obtenção das metas de redução de massa para os planejamentos experimentais de otimização de desgaste químico.

1ª Otimização			Otimização (G e V)			Otimização (C)		
Redução de massa (%)	Redução média de espessura (%)	Redução teórica de espessura (%)*	Redução de massa (%)	Redução média de espessura (%)	Redução teórica de espessura (%)*	Redução de massa (%)	Redução média de espessura (%)	Redução teórica de espessura (%)*
1,0543	29,1	1,8086	1,0082	27,6	1,8254	1,1370	24,8	2,2882
1,3889	27,5	2,5225	1,7470	38,9	2,2470	1,4481	27,7	2,6117
1,8550	44,3	2,0943	2,0840	42,2	2,4700	1,8846	35,0	2,6951
1,0998	28,9	1,9029	1,7418	42,0	2,0728	1,3548	25,8	2,6255
2,3769	71,7	1,6572	2,8286	70,4	2,0098	2,3881	63,8	1,8723
1,2546	23,2	2,7066	2,1646	62,4	1,7337	1,6284	33,9	2,4036
1,9441	54,6	1,7795	2,4392	70,6	1,7262	2,3705	58,8	2,0149
2,4907	63,3	1,9671	2,6763	71,8	1,8641	2,5443	59,7	2,1299
1,8819	54,5	1,7279	2,5392	62,6	2,0268	2,1050	54,2	1,9436
1,9272	46,3	2,0883	2,3427	72,3	1,6198	2,0441	46,2	2,2118
2,0231	53,6	1,8879	2,4710	58,3	2,1207	2,0568	45,4	2,2646
<b>Média (%)</b>	<b>2,0125 ± 0,33</b>		<b>Média (%)</b>	<b>1,9742 ± 0,25</b>		<b>Média (%)</b>	<b>2,2783 ± 0,28</b>	

Nota: \*valores calculados a partir da Equação 3, com base numa meta de redução de 50% da espessura do revestimento de galvanizado.

Tabela D2 – Resultados dos cálculos para obtenção das metas de redução de massa para os planejamentos experimentais de otimização de desgaste físico.

2ª Triagem			Otimização		
Redução de massa (%)	Redução média de espessura (%)	Redução teórica de espessura (%)*	Redução de massa (%)	Redução média de espessura (%)	Redução teórica de espessura (%)*
1,9840	72,4	1,3703	1,8273	65,0	1,4053
2,1741	64,7	1,6802	1,5947	43,3	1,8428
1,6803	57,3	1,4666	2,1319	75,3	1,4160
1,4724	52,3	1,4086	1,2359	45,4	1,3610
0,9328	29,7	1,5697	1,2708	39,4	1,6129
0,8960	25,0	1,7886	0,6213	17,6	1,7652
1,2052	38,3	1,5732	0,6203	21,7	1,4272
1,1026	32,9	1,6739	0,8716	37,0	1,1780
1,0223	25,8	1,9820	1,4031	48,0	1,4611
-	-	-	1,2135	35,2	1,7251
-	-	-	0,9503	27,4	1,7363
<b>Média (%)</b>	<b>1,6126 ± 0,19</b>		<b>Média (%)</b>	<b>1,5392 ± 0,21</b>	

Nota: \*valores calculados a partir da Equação 3, com base numa meta de redução de 50% da espessura do revestimento de galvanizado.

## APÊNDICE E – RESULTADOS DA EXECUÇÃO DAS METODOLOGIAS OTIMIZADAS E VALIDADAS

Os resultados da execução da metodologia otimizada e validada de desgaste químico para os grupos G e V encontram-se na Tabela E1.

Tabela E1 – Resultados da execução do desgaste químico otimizado e validado para os grupo G e V.

<b>Corpo de Prova</b>	<b>Redução de massa (%)</b>	<b>Erro relativo absoluto (%)*</b>	<b>Corpo de Prova</b>	<b>Redução de massa (%)</b>	<b>Erro relativo absoluto (%)*</b>
G078	1,8679	5,4	V308	2,0067	1,6
G084	2,0120	1,9	V310	2,0223	2,4
G089	2,1027	6,5	V317	2,1155	7,2
G108	1,8603	5,8	V326	2,0484	3,8
G117	2,0519	3,9	V329	2,0042	1,5
G120	1,9542	1,0	V330	2,0546	4,1
G127	1,9520	1,1	V340	2,0209	2,4
G136	1,9628	0,6	V342	1,8858	4,5
G144	2,0570	4,2	V364	2,0112	1,9
G156	1,9908	0,8	V366	2,0005	1,3
G157	2,0843	5,6	V375	1,8979	3,9
G161	1,9391	1,8	V380	2,0117	1,9
G175	1,8813	4,7	V397	1,9085	3,3
G176	2,0349	3,1	V420	1,9291	2,3
G177	1,9713	0,1	V424	1,9609	0,7
G190	2,0725	5,0	V433	2,0067	1,6
G194	2,0589	4,3	V434	1,8628	5,6
G197	2,0783	5,3	V449	1,9161	2,9
G198	1,9570	0,9	V452	1,9460	1,4
G199	2,0732	5,0	V462	1,9009	3,7
G216	2,0977	6,3	V536	1,9605	0,7
G232	2,1382	8,3	V537	1,8226	7,7
G254	2,0287	2,8	V540	2,0388	3,3
G271	2,0982	6,3	V546	2,1517	9,0
G288	1,9984	1,2	V550	1,9638	0,5
<b>Média (%)</b>	<b>2,0129 ± 0,08</b>	<b>2,0</b>	<b>Média (%)</b>	<b>1,9779 ± 0,08</b>	<b>0,2</b>
<b>DPR (%)</b>	<b>3,84</b>		<b>DPR (%)</b>	<b>3,91</b>	
<b>Média geral de redução de massa (%)</b>				<b>1,9954 ± 0,08</b>	
<b>DPR geral (%)</b>				<b>3,94</b>	
<b>Erro relativo absoluto médio (%)</b>				<b>1,1</b>	

Nota: \*erro relativo absoluto foi calculado com base na meta de 1,9742% de redução mássica definida a partir da otimização para o desgaste químico dos grupos G e V.

Os resultados da execução da metodologia otimizada e validada de desgaste químico para o grupo C encontram-se na Tabela E2.

Tabela E2 – Resultados da execução do desgaste químico otimizado e validado para o grupo C.

<b>Corpo de Prova</b>	<b>Redução de massa (%)</b>	<b>Erro relativo absoluto (%)*</b>
C604	2,3629	3,7
C605	2,2130	2,9
C606	2,3155	1,6
C628	2,2292	2,2
C629	2,2202	2,6
C638	2,4038	5,5
C640	2,3300	2,3
C642	2,3854	4,7
C648	2,4718	8,5
C650	2,2942	0,7
C657	2,2120	2,9
C672	2,1647	5,0
C714	2,3699	4,0
C717	2,1712	4,7
C740	2,3136	1,5
C761	2,3097	1,4
C763	2,2935	0,7
C765	2,2406	1,7
C769	2,3447	2,9
C776	2,3894	4,9
C779	2,2932	0,7
C818	2,3366	2,6
C800	2,3862	4,7
C801	2,2562	1,0
C819	2,3170	1,7
<b>Média (%)</b>	<b>2,3050 ± 0,08</b>	<b>1,2</b>
<b>DPR</b>	<b>3,35</b>	

Nota: \*erro relativo absoluto foi calculado com base na meta de 2,2783% de redução mássica definida a partir da otimização para o desgaste químico do grupo C.

Os resultados da execução da metodologia otimizada e validada de desgaste físico encontram-se na Tabela E3.

Tabela E3 – Resultados da execução do desgaste físico otimizado e validado.

Corpo de Prova	Redução de massa (%)	Erro relativo absoluto (%)*	Corpo de Prova	Redução de massa (%)	Erro relativo absoluto (%)*	Corpo de Prova	Redução de massa (%)	Erro relativo absoluto (%)*
G033	1,4876	3,4	V303	1,3146	14,6	C678	0,9788	36,4
G042	2,2167	44,0	V309	1,1509	25,2	C712	1,5154	1,5
G058	1,8362	19,3	V315	1,2371	19,6	C742	1,2793	16,9
G063	2,0098	30,6	V371	1,5080	2,0	C755	1,3145	14,6
G065	2,1173	37,6	V373	0,9735	36,8	C757	0,9983	35,1
G088	2,7063	75,8	V378	1,5570	1,2	C759	1,2986	15,6
G096	1,5496	0,7	V388	1,6750	8,8	C767	1,5106	1,9
G101	1,3012	15,5	V396	1,7198	11,7	C789	1,1605	24,6
G102	2,0442	32,8	V399	1,7309	12,5	C792	1,6323	6,0
G104	2,0645	34,1	V421	1,7272	12,2	C795	1,2647	17,8
G115	1,3471	12,5	V423	1,9567	27,1	C796	1,0270	33,3
G116	1,8342	19,2	V429	1,3620	11,5	C806	1,4599	5,2
G122	1,2411	19,4	V432	1,6413	6,6	C807	1,4198	7,8
G123	1,5666	1,8	V443	1,9105	24,1	C808	1,6663	8,3
G124	1,3302	13,6	V444	1,7106	11,1	C810	1,2875	16,4
G134	2,2985	49,3	V445	1,6593	7,8	C811	1,4332	6,9
G143	2,2283	44,8	V451	1,8967	23,2	C812	1,3000	15,5
G148	2,1516	39,8	V466	2,1187	37,7	C813	1,6482	7,1
G154	1,7741	15,3	V467	1,6940	10,1	C814	1,3332	13,4
G159	2,2965	49,2	V468	1,6790	9,1	C815	1,3212	14,2
G162	2,5657	66,7	V470	1,6142	4,9	C817	1,1975	22,2
G169	2,6074	69,4	V473	1,9648	27,7	C824	1,7777	15,5
G201	2,4542	59,4	V474	1,7613	14,4	C829	1,5029	2,4
G212	1,9662	27,7	V490	1,8362	19,3	C831	1,2287	20,2
G278	1,4442	6,2	V503	1,4068	8,6	C834	1,2066	21,6
<b>Média (%)</b>	<b>1,9376 ± 0,44</b>	<b>25,9</b>	<b>Média (%)</b>	<b>1,6322 ± 0,27</b>	<b>6,0</b>	<b>Média (%)</b>	<b>1,3505 ± 0,21</b>	<b>12,3</b>
<b>DPR (%)</b>	<b>22,65</b>		<b>DPR (%)</b>	<b>16,63</b>		<b>DPR (%)</b>	<b>15,38</b>	

**Média geral de redução de massa (%): 1,6401 ± 0,40**

**DPR geral (%): 24,28**

**Erro relativo absoluto médio (%): 6,6**

Nota: \*erro relativo absoluto foi calculado com base na meta de 1,5392% de redução mássica definida a partir da otimização para o desgaste físico.

## APÊNDICE F – DADOS DOS CP DESGASTADOS PARA OS ENSAIOS ELETROQUÍMICOS

Os dados dos CP desgastados pelos métodos otimizados e direcionados aos ensaios eletroquímicos constam na Tabelas F1.

Tabela F1 – Dados dos corpos de prova preparados para os ensaios eletroquímicos.

Condição	Copo de prova	Massa inicial (g)	Massa após desgaste (g)	Redução de massa (%)*	Espessura inicial (µm)	Espessura após desgaste (µm)	Redução de espessura (%)
Referência	G092	268,4886	-	-	103 ± 14	-	-
	V416	268,1500	-	-	107 ± 11	-	-
	C641	276,9189	-	-	107 ± 8	-	-
Desgaste Químico	G017	268,8343	263,8696	1,8468	97 ± 10	62 ± 9	36,1
	G189	272,7797	267,9806	1,7593	112 ± 11	79 ± 10	29,5
	V510	273,8837	270,5119	1,2311	98 ± 10	75 ± 11	23,5
	V555	270,7616	265,9992	1,7589	114 ± 10	72 ± 12	36,8
	C758	258,2871	253,8193	1,7298	119 ± 9	87 ± 10	26,9
	C832	260,4890	254,6808	2,2297	113 ± 8	60 ± 13	46,9
Desgaste Físico	G094	269,9878	264,4897	2,0364	97 ± 11	43 ± 12	55,7
	G145	267,7461	263,1227	1,7268	97 ± 10	52 ± 8	46,4
	V461	275,6521	270,8377	1,7465	120 ± 11	70 ± 7	41,7
	V502	268,5450	264,0252	1,6831	121 ± 10	69 ± 7	43,0
	C670	270,2309	266,9413	1,2173	116 ± 6	82 ± 3	29,3
	C847	272,5007	269,1719	1,2216	115 ± 8	80 ± 5	30,4

Fonte: o próprio autor.

Nota: \*o desgaste químico tem como metas de redução de massa os valores 1,9742% (CP dos grupos G e V) e 2,2783% (CP do grupo C); o desgaste físico tem como meta de redução de massa o valor de 1,5392% para os CP dos três grupos.