

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**CORROSÃO EM VERGALHÃO THERMEX EM MEIO CONTENDO
CLORETOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ASAFE LORENÇO

RIO GRANDE, RS
2024

ASAFE LORENÇO

**CORROSÃO EM VERGALHÃO THERMEX EM MEIO CONTENDO
CLORETOS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande-FURG como requisito para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Mecânica” – Área de Concentração: Engenharia de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Volcanoglo Biehl

RIO GRANDE, RS

2024

Ficha Catalográfica

L869c Lorengo, Asafe.
 Corrosão em vergalhão thermex em meio contendo cloretos /
 Asafe Lorengo. – 2024.
 139 f.

 Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande –
 FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,
 Rio Grande/RS, 2024.
 Orientador: Dr. Luciano Volcanoglo Biehl.

 1. Corrosão 2. Vergalhões soldáveis 3. Vergalhões thermex 4.
 Ambiente marinho 5. Concreto armado 6. Prevenção da corrosão
 I. Biehl, Luciano Volcanoglo II. Título.

CDU 621

Catálogo na Fonte: Bibliotecária Simone Tarouco Przybylski CRB 10/1166



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPMec



Ata nº **3/2024** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos vinte e três dias do mês de fevereiro de dois mil e vinte e quatro, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às nove horas, online via web conferência, a que se submeteu o mestrando **Asafe Lorenzo**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa Engenharia de soldagem e materiais, com o seguinte título: **CORROSÃO EM VERGALHÃO THERMEX EM MEIO CONTENDO CLORETOS**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Luciano Volcanoglo Biehl, Jorge Luis Braz Medeiros do Amaral, e a convidada Célia de Fraga Malfatti sob a presidência do Professor Luciano Volcanoglo Biehl. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Luciano Volcanoglo Biehl: APROVADO
2. Jorge Luis Braz Medeiros: APROVADO
3. Célia de Fraga Malfatti: APROVADO

Foi concedido um prazo de 30 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1. _____
CPF: 575.195.100-00

Documento assinado digitalmente
LUCIANO VOLCANOGLO BIEHL
Data: 23/02/2024 12:12:24-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

2. _____
CPF: 588.871.210-87

Documento assinado digitalmente
JORGE LUIS BRAZ MEDEIROS
Data: 23/02/2024 12:20:21-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

3. _____
CPF: 602.800.340-91

Documento assinado digitalmente
ASAFE LORENÇO
Data: 24/02/2024 09:13:26-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Asafe Lorenzo: _____

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha amada esposa Camila S. Lorenço que é a razão de todo meu esforço.

AGRADECIMENTOS

Ao maior de todos os engenheiros, o SENHOR, “*que no princípio criou os céus e a terra*¹”, dirijo meu primeiro e mais sincero louvor. À Ele, que me guardou, dirigiu e me cercou dos melhores professores, meu reconhecimento de que ele esteve ao meu lado desde meu primeiro dia de aula, e que de suas mãos veio a capacidade para realizar esta obra que ora se concretiza.

Aos meus mestres, incansáveis no nobre sacerdócio do ensino, irrepreensíveis em tudo quanto foi necessário à minha formação, homenageio-os na pessoa do insigne e querido professor Dr. Jorge Luis Braz Medeiros, dedicando-lhe as palavras do também mestre Isaac Newton: “*Gigantes são os mestres, nos ombros dos quais eu me elevei*”. Vocês, mestres, são estes gigantes que emprestaram os ombros para eu chegar neste momento especial de minha vida.

Ao meu orientador, professor Dr. Luciano Volcanoglo Biehl, que caminhou comigo as veredas desta pesquisa, me dando suporte e me inspirando confiança, meu sincero agradecimento!

Ao meu sogro Marcos Aurelio Cruz Santanna, por sua valiosa contribuição à minha pesquisa, sua experiência e perspicácia foram um verdadeiro farol de orientação durante todo o processo. Meu reconhecimento sincero e gratidão àqueles que foram fonte de cuidado e apoio, minha família, que se tornaram meu porto seguro em cada dia desta jornada. Por derradeiro, à Camila, o amor da minha vida.

¹ Bíblia Sagrada, Livro do Gênesis cap. 1, v 1

RESUMO

Este estudo tem como objetivo investigar os efeitos da corrosão em vergalhões soldáveis expostos em meio contendo cloreto. Durante a pesquisa, amostras amarradas com arame recozido e amostras soldadas com eletrodo revestido foram submetidas a ensaios eletroquímicos, ensaio de perda de massa, observadas através do MEV, microscópio óptico e comparados seus resultados. Foram identificados os principais tipos e fatores que causam a corrosão nos vergalhões Thermex, bem como compreendidos os mecanismos corrosivos envolvidos nesse contexto. O estudo também se dedicou a analisar a inicialização do processo corrosivo induzido por cloretos. Para avaliar a taxa de corrosão e as propriedades elétricas do material, foram realizadas medições do potencial de circuito aberto, espectroscopia de impedância eletroquímica e curvas de polarização. Essas técnicas forneceram informações valiosas sobre a cinética da corrosão e permitiram uma melhor compreensão dos processos corrosivos nos vergalhões Thermex. Foram conduzidas análises da microestrutura formada após a corrosão dos vergalhões, utilizando técnicas como a Espectroscopia de Emissão Óptica, Energia Dispersiva de Raios X (EDS) no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e o microscópio óptico. Essas análises permitiram uma caracterização detalhada da estrutura do material antes e após a corrosão, auxiliando na compreensão dos mecanismos corrosivos envolvidos. Os resultados obtidos neste estudo são de grande importância para o avanço do conhecimento na área da corrosão em vergalhões soldáveis expostos em meio contendo cloretos. As informações e diretrizes fornecidas contribuem para o desenvolvimento de práticas de engenharia mais eficazes, visando aumentar a vida útil das estruturas e garantir a segurança das construções costeiras. Os resultados desta pesquisa destacaram o bom desempenho do eletrodo E6013 em relação a ausência de par galvânico com o metal base. A corrosão predominante foi identificada como corrosão por pites e corrosão por frestas com incidência inferior. Verificou-se que as amostras amarradas apresentaram uma perda de massa maior em comparação com as amostras soldadas. Além disso, foi possível prever o tempo em que levaria para o consumo total das amostras soldadas por meio dos declives de Tafel. Medidas de controle e prevenção adequadas, como o uso de revestimentos protetores e a implementação de projetos robustos, juntamente com a monitorização regular da corrosão e a realização de manutenção preventiva, são fundamentais para minimizar os efeitos da corrosão nos vergalhões Thermex e consequentemente prolongar a vida útil das estruturas de concreto armado expostas a um meio contendo cloretos.

Palavras-chave: corrosão, vergalhões soldáveis, vergalhões thermex, ambiente marinho, concreto armado, prevenção da corrosão.

ABSTRACT

This study aims to investigate the effects of corrosion on weldable rebar exposed in a chloride-containing medium. During the research, samples tied with annealed wire and samples welded with a coated electrode were subjected to electrochemical tests, mass loss tests, observed through SEM and optical microscope and their results were compared. The main types and factors that cause corrosion in Thermex rebars were identified, as well as the corrosive mechanisms involved in this context were understood. The study was also dedicated to analyzing the initiation of the corrosive process induced by chlorides. To evaluate the corrosion rate and electrical properties of the material, open circuit potential measurements, electrochemical impedance spectroscopy and polarization curves were performed. These techniques provided valuable information on corrosion kinetics and allowed a better understanding of the corrosive processes in Thermex rebars. Analyzes of the microstructure formed after the corrosion of rebars were carried out, using techniques such as Optical Emission Spectroscopy, Energy Dispersive X-rays (EDS) in the Scanning Electron Microscope (SEM) and the optical microscope. These analyzes allowed a detailed characterization of the material structure before and after corrosion, helping to understand the corrosive mechanisms involved. The results obtained in this study are of great importance for the advancement of knowledge in the area of corrosion in weldable rebar exposed in a medium containing chlorides. The information and guidelines provided contribute to the development of more effective engineering practices to increase the useful life of structures and ensure the safety of coastal constructions. The results of this research highlighted the good performance of the E6013 electrode in relation to the absence of galvanic couple with the base metal. The predominant corrosion was identified as pitting corrosion and crevice corrosion with a lower incidence. It was found that the tied samples showed a greater mass loss compared to the welded samples. Furthermore, it was possible to predict the time it would take for the total consumption of the samples welded through the Tafel slopes. Adequate control and prevention measures, such as the use of protective coatings and the implementation of robust designs, together with regular monitoring of corrosion and carrying out preventive maintenance, are essential to minimize the effects of corrosion on Thermex rebars and consequently prolong their life. useful life of reinforced concrete structures exposed to a medium containing chlorides.

Keywords: corrosion, welded walls, thermex walls, marine environment, reinforced concrete, corrosion prevention.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS GERAIS	17
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2.	ESTADO DA ARTE	18
2.1	ASPECTOS GERAIS SOBRE A CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO	18
2.2	CONCRETO ARMADO	20
2.3	CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS METÁLICOS	24
2.4	AÇOS UTILIZADOS NO CONCRETO	26
2.5	PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO UTILIZADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO	29
2.6	CORROSÃO	30
2.6.1	Oxidação e redução	31
2.6.2	Potencial de eletrodo	33
2.6.3	Pilha eletroquímica	35
2.6.4	Cinética da corrosão	38
2.7	CORROSÃO NA ARMADURA DO CONCRETO	39
2.8	DETALHAMENTO DO CONCRETO	44
2.9	PASSIVAÇÃO	45
2.10	MECANISMO DA CORROSÃO NO CONCRETO ARMADO	49
2.11	RESISTIVIDADE	54
2.12	POTENCIAL DE CORROSÃO	55
2.13	VELOCIDADE DE CORROSÃO (ICORR)	57
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	58
3.1	MATERIAIS	58
3.2	MÉTODOS	59
3.2.1	Preparação das amostras	63
3.2.2	Processo de embutimento	64
3.2.3	Lixamento e polimento	67
3.2.4	Limpeza das amostras – ensaio perda de massa	68
3.2.5	Caracterização eletroquímica	70
3.2.6	Espectroscopia de impedância eletroquímica	71
3.2.7	Polarização potenciodinâmica	71
3.2.8	Caracterização microestrutural	72
3.2.9	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	72
3.2.10	Microscópio óptico	72
3.2.11	Perda de massa por imersão	73
4.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	75

4.1	ENSAIO ELETROQUÍMICO	75
4.1.1	Espectroscopia de impedância eletroquímica	75
4.1.2	Polarização potenciodinâmica	78
4.2	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL.....	80
4.3	PERDA DE MASSA	111
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	117
6.	CONCLUSÃO	121
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	121
7.	REFERÊNCIAS	124
8.	REFERÊNCIAS POR ESTRATO	132
9.	REFERÊNCIAS POR QUALIS	133
10.	REFERÊNCIAS POR DATAS DOS ARTIGOS	134
11.	APÊNDICE A - IMAGENS	135
12.	APÊNDICE B – DIAGRAMA DE NYQUIST	138
13.	APÊNDICE C – CURVAS DE POLARIZAÇÃO	139

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Barco de concreto armado	21
Figura 2 - Local do ensaio de ultrassom	24
Figura 3 - Classificação dos materiais.....	25
Figura 4 - Valores das propriedades mecânicas em ensaio de tração unidirecional	26
Figura 5 - Esquema referente a oxidação e redução	32
Figura 6 - Tabela periódica.....	33
Figura 7 - Pilha de Daniell	36
Figura 8 - Eletrodo após funcionamento da pilha	38
Figura 9 - Ensaio de carbonatação em viga	41
Figura 10 - Ensaio de carbonatação em viga	42
Figura 11 - Ensaio colorimétrico de aspersão de nitrato de prata	43
Figura 12 - Zona de transição do concreto.....	44
Figura 13 - Classe de agressividade ambiental.....	47
Figura 14 - Diagrama de Pourbaix	48
Figura 15 - Pilha eletroquímica da corrosão no concreto armado	51
Figura 16 - Diferença de potencial geradas por fissuras	52
Figura 17 - Acesso do oxigênio no concreto	52
Figura 18 - Formas de corrosão no vergalhão	53
Figura 19 - Ensaio de Resistividade	55
Figura 20 - Registro da medição realizada no ensaio de Potencial de Corrosão	56
Figura 21 - Ensaio de velocidade de corrosão	57
Figura 22 - Fluxograma	59
Figura 23 - Armadura por traspasse.....	60
Figura 24 - Máquina de solda utilizada para realizar o pontemaneto nos vergalhões.....	61
Figura 25 - Vergalhões marcados para iniciar o processo de soldagem	61
Figura 26 - Máquina de Solda Merkle Balmer Super 180 Geração 4	62
Figura 27 - Vergalhões submetidos ao processo de soldagem.....	62
Figura 28 - Representação do processo de embutimento.....	65
Figura 29 - Amostras embutidas	65

Figura 30 - Adesivos PVC utilizados no ensaio eletroquímico	66
Figura 31 - Adesivos PVC aplicados nas amostras.....	66
Figura 32 - Hidróxido de Sódio PA.....	69
Figura 33 - Equipamento de Banho Ultrassônico Com Aquecimento utilizado	69
Figura 34 - Pesagem das amostras	74
Figura 35 - Amostras posicionadas para o ensaio de imersão em NaCl.....	74
Figura 36 - Diagrama de Nyquist.....	77
Figura 37 - Curvas de polarização sobrepostas	79
Figura 38 - Amostras preparadas para ensaio MEV e Microscópio Ótico	81
Figura 39- Amostra não soldada nervo x1K BEC.....	82
Figura 40 - Amostra não soldada nervo	83
Figura 41 - Amostra não soldada x1K.....	83
Figura 42 - Metal Base SEC x1K BEC	84
Figura 43 - Metal Base SEC x1K.....	85
Figura 44 - MS 1 Centro x1K BEC	86
Figura 45 - MS 1 Centro x1K.....	87
Figura 46 - ZAC 1 Topo x1K BEC	87
Figura 47 - Zac Topo e Centro respectivamente	88
Figura 48 - Amostras preparadas para ensaio MEV após corrosão.....	89
Figura 49 - Amostra preparada para ensaio MEV antes da corrosão	90
Figura 50 - Amostras comparadas antes e após corrosão - MEV	91
Figura 51 - Aumento em focos de corrosão	92
Figura 52 - Foco de corrosão 25x	94
Figura 53 - Foco de corrosão 100x	95
Figura 54 - Foco de corrosão 400x	96
Figura 55 - Comparativo: Amostra corroída e não corroída	97
Figura 56 - Amostra não corroída.....	98
Figura 57 - Corrosão localizada pite.....	99
Figura 58 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) - 1.000x amostra corroída	100
Figura 59 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) - 2.000x amostra corroída	101
Figura 60 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) corrosão - 8.000x amostra corroída	102

Figura 61 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) corrosão - 20.000x .	103
Figura 62 - Metal de Base 500x	104
Figura 63 - Metal de Base 1000x	105
Figura 64 - Metal de Base 200x	105
Figura 65 - Metal de Base 500x	106
Figura 66 - Metal de solda 200x	107
Figura 67 - Metal de solda 500x	108
Figura 68 - Zona termicamente afetada (ZTA) 500x	109
Figura 69 - Zona termicamente afetada (ZTA) 500x	110
Figura 70 - Amostras soldadas.....	112
Figura 71 - Amostras amarradas.....	113
Figura 72 - Amostras corroídas após 3 meses de imersão em NaCl	113
Figura 73 - Vergalhões soldados e amarrados.....	135
Figura 74 - Vergalhões soldados e amarrados.....	135
Figura 75 - Amostras amarradas.....	137
Figura 76 - Amostras amarradas.....	137
Figura 77 - Metal Base 1, 2 e 3	138
Figura 78 - Metal de Solda 1, 2 e 3	138
Figura 79 - Metal Base 1, 2 e 3	139
Figura 80 - Metal de Solda 1, 2 e 3	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens do uso do concreto armado	22
Tabela 2 - Classificação do carbono no aço	27
Tabela 3 - Potencial de redução.....	34
Tabela 4 - Resultados obtidos no ensaio para verificação dos cloretos livres .	43
Tabela 5 - Recomendações para avaliar o risco de corrosão nas armaduras de concreto	54
Tabela 6 - Probabilidade de corrosão - ASTM 876:2009	56
Tabela 7 - Critérios de avaliação para potencial de corrosão	57
Tabela 8 - Quantitativo corpo de prova	63
Tabela 9 - Componentes eletrônicos Impedância Eletroquímica	76
Tabela 10 - Dados taxa de corrosão - Declives de Tafel.....	78
Tabela 11 - Resultados Espectroscopia de Emissão Óptica – Metal base	80
Tabela 12 - Resultados Espectroscopia de Emissão Óptica – Eletrodo E6013	80
Tabela 13 - Composição química dos pontos marcados na imagem (círculo vermelho)	82
Tabela 14 - Composição química dos pontos marcados na imagem (quadrado vermelho n. 1)	84
Tabela 15 - Composição química dos pontos marcados na imagem (quadrado vermelho n. 2)	85
Tabela 16 - Composição química dos pontos marcados na imagem (quadrado vermelho n. 3)	85
Tabela 17 - Composição química dos pontos marcados na imagem (quadrado vermelho)	86
Tabela 18 - Composição química dos pontos marcados na imagem (quadrado vermelho)	88
Tabela 19 - Pesagem antes da perda de massa.....	114
Tabela 20 - Pesagem após perda de massa.....	114
Tabela 21 - Tabela de perda de massa.....	115

1. INTRODUÇÃO

Considerando que o concreto armado é o material de construção mais consumido no mundo (HELENE, et al. 2007) e que as patologias nesse sistema acarretam grande impacto econômico e risco para a sociedade, essa pesquisa se torna imprescindível para contribuir com a maior durabilidade e desempenho das estruturas de concreto armado.

São diversas as patologias que deterioram o concreto armado, sendo a corrosão a que mais se destaca, principalmente nos ambientes marítimos em que os aerodispersóides de cloreto de sódio estão altamente concentrados na atmosfera local.

A corrosão das armaduras vem afetando negativamente a construção civil no mundo, causando perdas econômicas e humanas. As principais causas da corrosão dos vergalhões são a penetração de íons cloreto na rede porosa do concreto em ambiente marinho e a carbonatação do concreto em ambientes rurais e urbanos. (TROCONIS DE RINCÓN, O. et al. 2016, pág. 4)

As ondas do mar quando se quebram dispersam gotículas de água na forma de aerodispersóides, fazendo com que o cloreto de sódio presente na água marinha seja pulverizado nas estruturas presentes nesses ambientes. O cloreto de sódio faz o papel de eletrólito, facilitando a troca de elétrons e formando uma pilha eletroquímica, resultando na corrosão e deterioração desses materiais.

A corrosão das armaduras de aço-carbono é um dos principais processos de deterioração das estruturas de concreto, podendo levar ao seu comprometimento antes do atendimento ao prazo de vida útil previsto em projeto. (DE ARAUJO, et al. 2017, pág. 1)

Ainda hoje a corrosão é um grande desafio para a civilização, especialmente na área da construção civil, uma vez que o fenômeno da corrosão deteriora as estruturas de diversas formas, principalmente, ocasionando a perda

de propriedades mecânicas das estruturas trazendo como consequência diminuição da sua vida útil e ocasionando perdas, acidentais ou não (humanas e materiais). O processo de corrosão deteriora aproximadamente 30% da produção mundial de ferro e aço, correspondendo a um impacto de 1 a 5% do PIB mundial. Em 2019, somente o Brasil teve um prejuízo aproximado a 4% do PIB, o que equivaleu a R\$ 290 bilhões devido somente a corrosão (IBRAM, 2020).

Como alternativa ao concreto armado tradicional, temos observado o avanço da utilização de vergalhões soldáveis no mundo, esse processo tem otimizado as construções trazendo mais qualidade na montagem das armaduras. (BATISTA, 2007).

Contudo, é imprescindível conhecer a forma como a corrosão se manifesta também nesse tipo de vergalhão, já que a carga térmica aplicada no vergalhão no momento da soldagem favorece a ocorrência de precipitações que intensificam a corrosão localizada, em destaque a corrosão intergranular. (ZEEMANN, 2003)

O resfriamento acelerado com água durante o processo de fabricação dos vergalhões soldáveis ocasiona um rearranjo microestrutural no vergalhão, que pode ocasionar alteração na resistência a corrosão das armaduras.

Neste contexto, a pesquisa acerca do concreto armado submetido a condições e ambientes marítimos se reveste de importância na medida que possibilita a escolha de materiais mais resistentes ao fenômeno químico da corrosão, possibilita a adoção de novas técnicas construtivas, previne perdas acidentais e contribui, de maneira geral, com a economia nacional e mundial. Embora o vergalhão Thermex ofereça vantagens como maior rigidez da armação e aumento da produtividade, é crucial também examinar o uso de armaduras soldadas sob a perspectiva da corrosão. Compreender os efeitos da corrosão nas estruturas de armaduras soldadas é fundamental para avaliar a durabilidade e a vida útil desses materiais, contribuindo para a escolha adequada e otimização do uso de vergalhões em diferentes formas estruturais.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

O escopo do presente estudo é experienciar e analisar os efeitos da corrosão em vergalhões soldáveis, expostos em meio contendo cloretos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar os principais tipos e fatores que provocam a corrosão em vergalhões thermex expostos em meio contendo cloretos.;
- Analisar os processos corrosivos possíveis nos vergalhões utilizados em concreto armado em ambientes potencialmente agressivos;
- Propor técnicas de controle e prevenção de corrosão em estruturas de concreto armado em meio contendo cloretos.;
- Analisar a inicialização do processo corrosivo induzido por cloretos;
- Avaliar a previsão da vida útil de estruturas de concreto armado em relação a penetração de cloretos;
- Comparar a microestrutura formada após a corrosão do vergalhão thermex, analisando o comportamento das microestruturas do vergalhão em relação a corrosão a partir do ensaio de imersão;

2. ESTADO DA ARTE

2.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE A CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Pode se definir corrosão como a deterioração e perda de material metálico e não metálico devido a reações químicas ou eletroquímicas. Em ambientes agressivos, como exemplo as regiões litorâneas, esse processo ocorre com maior frequência e velocidade (FRAUCHES-SANTOS, 2014).

O fenômeno da corrosão é encarado como a destruição dos materiais metálicos e não metálicos em contato com o meio ou ambiente, devido as interações químicas e/ou mecânicas. Os custos diretos e, principalmente os indiretos atingem somas astronômicas. (FRAUCHES-SANTOS, 2014, p. 295).

Em ambientes litorâneos há uma concentração elevada de sais provenientes da água do mar. As gotículas da água do mar se espalham como névoa² pela região e os íons presentes nessas gotículas de água salgada (cloreto de sódio) fazem o papel de ponte salina³, acelerando a troca de elétrons, o que ocasiona a aceleração da oxidação dos metais presentes nestes ambientes. (ROCHA, 2019). “A corrosão pode ser iniciada por íons de cloreto ou através de dióxido de carbono” (ROCHA, 2019, p. 53), ou seja, a função do NaCl (cloreto de sódio) é basicamente conduzir os íons.

Essa troca de elétrons é semelhante a troca que ocorre em uma pilha. A diferença é que na pilha é gerado corrente elétrica e na oxidação dos metais não é possível medir a eletricidade porque tanto o doador como o receptor dos elétrons se localiza no mesmo ponto da superfície (WARTHA, et al. 2012).

² Uma das espécies de aerodispersóides

³ Ponte salina é um canal utilizado para conectar células de uma pilha.

A movimentação dos elétrons ocorre na natureza nos mais diversos fenômenos, tais como na elétrica, nos processos químicos e processos físicos. Como analogia, podemos associar a maresia⁴ ao sangue humano. O sangue humano, através dos eletrólitos, realiza transmissões dos impulsos elétricos necessários ao funcionamento dos mais diversos órgãos e sistemas do corpo humano, da mesma forma como a maresia facilita a transmissão dos elétrons (MOTTA, 2000).

O concreto exposto aos sais marítimos também sofre deteriorações. Na água do mar estão presentes todos os elementos químicos conhecidos e explicitados na tabela periódica. Essa quantidade variada de elementos químicos, agreda o concreto de variadas maneiras, como ataques químicos, ataque por gelo e degelo, desgaste por ação de sais e abrasão pela areia em suspensão. (MEHTA, et al. 1994)

Desta forma, um dos tantos desafios da engenharia, especialmente no que diz respeito as construções, é escolher os materiais com maior capacidade de resistir ou retardar ao máximo o fenômeno da corrosão, aumentando a vida útil e a segurança das edificações. Na construção civil, a utilização do concreto armado é a forma mais elementar de conferir maior resistência estrutural sendo a base de qualquer projeto de engenharia, além de ser o material de construção mais consumido no mundo (HELENE, et al. 2007).

O concreto possui elevada resistência a compressão, em contrapartida possui baixa capacidade de resistir esforços de tração. Para conferir propriedades mecânicas tais como resistir esforço de tração, é utilizado o aço com parte fundamental nas estruturas do concreto armado. Em razão de sua natureza química, em ambientes marinhos o risco de corrosão se eleva consideravelmente, razão pela qual protege-lo da corrosão se torna um dos principais desafios da engenharia em regiões litorâneas (NEVILLE, 2015).

⁴ Névoa e odor que se originam através do movimento das ondas do mar. São formadas por gotículas de água do mar.

O concreto exposto à água do mar pode ser submetido a várias ações químicas e físicas. Entre elas, estão incluídos ataques químicos, corrosão das armaduras induzida por cloretos, ataque por gelo e degelo, desgaste por ação de sais e abrasão pela areia em suspensão e pelo gelo. (NEVILLE, 2015, pág. 536.)

Assim, compreende-se como uma necessidade crucial entender o processo de corrosão das armaduras do concreto armado nos ambientes potencialmente agressivos à estrutura. Além da corrosão ser um grande problema da sociedade avançada que gera grande impacto no PIB anual de um país, ela afeta diretamente a segurança da população que transita diariamente sob e sobre estruturas de concreto armado (MAURICE, *et al.* 2018).

2.2 CONCRETO ARMADO

Podemos definir o concreto como sendo o resultado da mistura de elementos que são chamados tecnicamente de aglomerantes hidráulicos (cimento), agregados inertes graúdos (brita) e agregado inerte miúdo (areia). O cimento reage quimicamente com a água gerando uma peça monolítica (BARBOZA, *et al.* 2018).

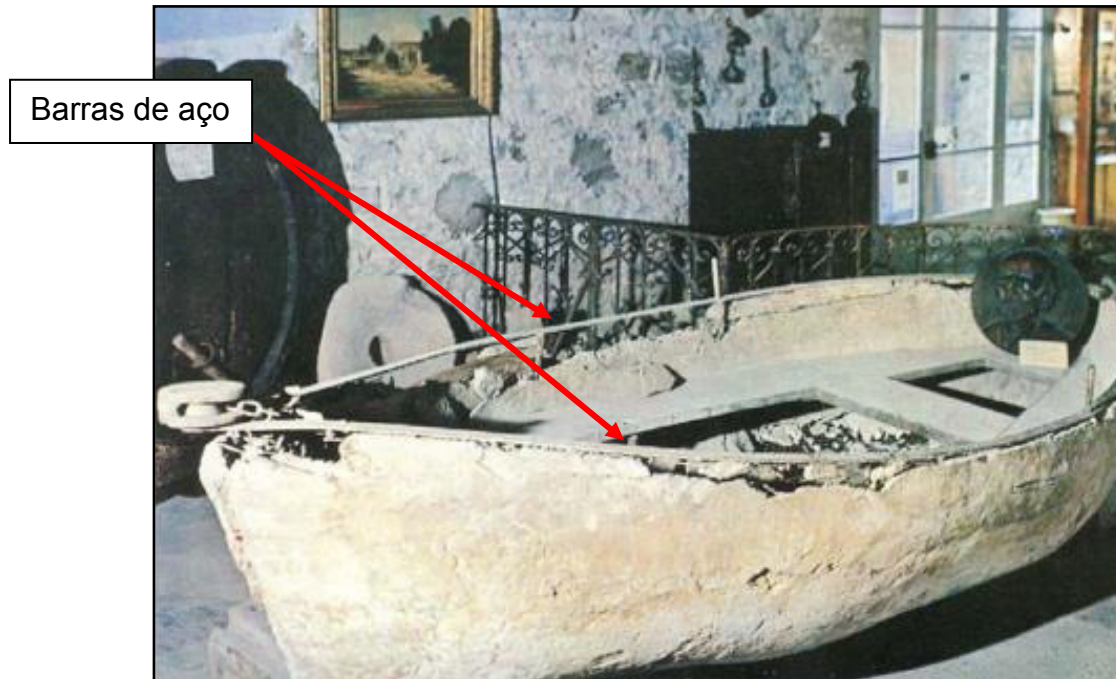
O agricultor francês Joseph Lambot constatou que ao concreto poderia ser adicionado aço, acrescentando a estrutura ótima resistência a compressão e tração, dando início assim a era do concreto armado. (KAEFER, 1998).

Lambot teve a ideia de construir um barco em concreto com uma malha fina e barras de aço, barco este que seria utilizado para lazer em um lago na sua propriedade. Em 1855 Lambot exibiu seu barco na Exposição Mundial de Paris e paralelamente solicitou patente do seu projeto (KAEFER, 1998).

O barco de Lambot possuía aproximadamente 4 metros de comprimento e 1,30 metros de largura, suas paredes possuíam 4 centímetros de espessura.

Lambot é considerado por muitos como o pai do concreto armado, apesar de o Joseph Monier ser quem mais difundiu sua utilização (KAEFER,1998).

Figura 1 - Barco de concreto armado



Fonte: (KAEFER,1998)

Atualmente os engenheiros civis calculistas são os responsáveis por dimensionar e projetar as estruturas de concreto armado utilizados na construção civil. Esse dimensionamento é realizado para que as estruturas suportem os mais diversos esforços que podem ser solicitados (HELENE, *et al.* 1997).

No projeto da estrutura é calculado e definido a bitola do aço que irá compor os variados modelos de peças monolíticas, tais como vigas, pilares, lajes e sapatas. No projeto também é definido o correto cobrimento de concreto entre as barras de aço, que varia conforme a agressividade do ambiente em que o elemento ficará exposto (BASTOS, 2006).

Assim como qualquer método de construção existente, o concreto armado possui vantagens e desvantagens na sua utilização:

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens do uso do concreto armado

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Boa resistência para a maioria dos esforços mecânicos	Redução da área útil
Custo relativamente baixo de manutenção	Quando produzido <i>in loco</i> , a qualidade e resistência do concreto pode ser afetada por erros na mistura
Facilidade de moldagem	Necessidade de formas
Resulta em uma estrutura monolítica	Gera resíduos e lixo de construção
Mão de obra não precisa de grande qualificação (reduz o custo)	Estrutura pesada (aproximadamente 2.500 kg/m ³)
Boa resistência as intempéries	Elevado tempo de construção devido ao tempo de cura
Durabilidade maior do que qualquer sistema de construção	Demolição é de difícil execução
Boa resistência a agentes químicos nocivos (esgoto, água e elementos químicos)	Dentre as patologias do concreto armado, <u>a que mais destaca é a corrosão das armaduras</u>
Boa resistência ao desgaste mecânico (choques e vibrações)	Impacto ambiental associado a sua produção

Fonte: (ALKHAWALDEH, 2021).

Apesar de parecer tão vantajoso e atrativo o uso de concreto armado, de acordo com Alkhawaldeh *et al.* (2021), os engenheiros hodiernamente tem buscado soluções alternativas para substituir o aço no concreto armado, em virtude de a corrosão do aço ser a principal causa da deterioração de edifícios, pontes, túneis e construções em geral. Apesar de existirem soluções como a proteção catódica⁵ da estrutura de concreto armado, nenhum dos procedimentos forneceram soluções em longo prazo.

⁵ Técnica utilizada com a finalidade de evitar a corrosão de uma superfície metálica.

Por mais que o concreto seja uma peça monolítica é também um elemento heterogêneo e complexo porque sua composição pode ser muito variada. Os ensaios de verificação na estrutura de concreto armado são de suma importância. Estes ensaios podem ser classificados como ensaios destrutivos e não destrutivos e servem para avaliar parâmetros de qualidade e durabilidade das estruturas. Como exemplo desses ensaios temos o de ultrassom (não destrutivo) e o de compressão axial em corpos de prova (destrutivo) (GODINHO, 2018).

O ensaio de ultrassom (ensaio qualitativo) tem como finalidade avaliar a qualidade e detectar danos na estrutura interna do concreto. Através de um pulso longitudinal produzido por um transdutor eletroacústico em contato com uma superfície de concreto. Os circuitos de temporização eletrônica permitem medir o tempo de trânsito do pulso. Conhecendo o tempo de viagem das ondas ultrassônicas propagadas na peça de concreto, pode-se estimar as propriedades elásticas e mecânicas do material (GODINHO, 2018).

Quanto maior for o tempo de deslocamento dessas ondas sonoras menor será a qualidade do concreto. Através do ensaio com ultrassom é possível verificar a existência de anomalias e deficiências tais como falhas na homogeneidade do concreto, falhas internas oriundas da concretagem como vazios e outras imperfeições, verificar as fissuras e profundidade dessas, entre outros parâmetros. Além de constatar essas falhas, o ensaio permite a monitoração das anomalias. Este ensaio se torna atraente porque através dele é possível analisar o comportamento do concreto e suas características estruturais sem destruir a peça estrutural (MEDEIROS, 2007).

Em um ensaio realizado com ultrassom na nova ponte do Rio Guaíba⁶ em Porto Alegre/RS, este método demonstrou ser eficaz na estimativa da resistência a compressão da peça, ao passo que o resultado obtido com este experimento

⁶ Nova ponte do Guaíba, inaugurada em 20/12/2020. Localizada no endereço BR-290 - Arquipélago, Porto Alegre - RS, 90250-755.

(estimativa de resistência de compressão) comparado ao método destrutivo tradicional (ensaio de compressão realizado em corpos de prova) evidenciou que este último apresentou uma resistência superior, na ordem de 32,3% em relação ao ensaio de ultrassom (RAMOS, 2019).

Os resultados do ensaio realizado concluíram que a média da estimativa de resistência a compressão nas regiões inspecionadas foram de 41,9 Mpa e a estimativa média do módulo de elasticidade foi de 42,9Gpa. Os resultados são satisfatórios, uma vez que o valor mínimo da resistência a esforços de compressão admissíveis do concreto (de acordo com a NBR 6118) é de 20Mpa.

Figura 2 - Local do ensaio de ultrassom



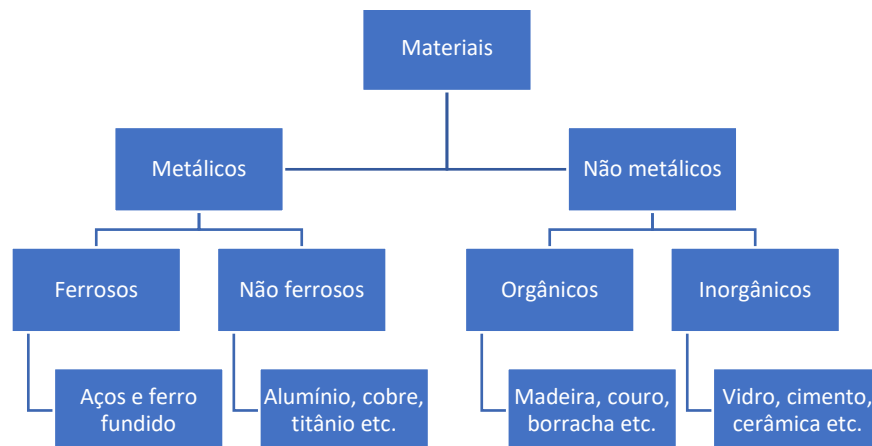
Fonte: (RAMOS, 2019, pág. 100)

2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS METÁLICOS

Os materiais mecânicos são classificados com base na sua estrutura atômica e química. Basicamente podemos classificar os materiais mecânicos em dois grandes grupos, sendo eles os metálicos e não metálicos. (BECKER, 2019)

Eles ainda podem ser subdivididos, conforme demonstra o fluxograma a seguir:

Figura 3 - Classificação dos materiais



Fonte: Próprio Autor

Os materiais metálicos são resultados de uma combinação de elementos químicos e possuem características especiais, como por exemplo não estão ligados a nenhum átomo em específico, possuem grande facilidade de conduzir calor e eletricidade, quando são polidos possuem a aparência lustrosa, são resistentes, podem ser maleados e são amplamente utilizados em aplicações de diversas estruturas. Tratando-se de materiais metálicos, eles são divididos em ferrosos e não ferrosos, sendo o que diferencia essa classificação é a presença do elemento químico de ferro (Fe). O aço encontra-se dentro do subgrupo de materiais metálicos ferrosos que ainda se subdividem em aços e ferros fundidos. (CHIAVERINI, 1977)

O carbono é o que diferencia o ferro gusa, do aço e do ferro fundido. Este percentual de carbono delimita as diferenças entre os materiais. Sendo que de 0 a 0,008% considera-se ferro gusa, para ser considerado aço, o carbono deve variar de 0,008% a 2,11%, e para o material ser considerado ferro fundido o teor do carbono deve estar entre 2,11% e 6,67%. (FERRAZ, 2003)

No aço ainda pode-se adicionar elementos de liga para obter propriedades como o aumento da dureza, aumento da resistência a corrosão, melhor desempenho em baixas e altas temperaturas, controle do tamanho de grãos, melhorar propriedades de conformabilidade, entre outros aspectos. Os principais elementos de ligas encontrados no aço são: Cromo (Cr), Níquel (Ni),

Vanádio (V), Molibdênio (Mo), Tungstênio (W), Cobalto (Co), Boro (B), Cobre (Cu). Sendo o Manganês (Mn), Silício (Si), Fósforo (P) e enxofre (S) elementos residuais, ou seja, foram extraídos da natureza juntamente com os elementos constituintes do aço. (FERRAZ, 2003)

2.4 AÇOS UTILIZADOS NO CONCRETO

No concreto utiliza-se aço (Fe-C) para compor a peça estrutural, ou seja, o percentual de carbono do aço utilizado no concreto estará entre 0,008% e 2,11% obrigatoriamente. (FERRAZ, 2003)

É importante destacar que a dureza do aço aumenta conforme aumenta o percentual de carbono, o contrário ocorre com a ductilidade, ou seja, aumentando o percentual de carbono o aço reduz sua capacidade de ser dútil. (CHIAVERINI, 1977)

O estudo realizado por BEJO *et al* (2021), comparou as principais propriedades mecânicas em ensaio de tração em dois aços para comparação, um dos aços foi o SAE 1045 trefilado a frio (0,45% de Carbono) e o aço SAE 1020 trefilado a frio (0,20% de Carbono). O ensaio demonstrou o seguinte resultado:

Figura 4 - Valores das propriedades mecânicas em ensaio de tração unidirecional

Amostra	Tensão de escoamento (Mpa)	Limite de Resistência a Tração (Mpa)	Alongamento após ruptura (%)
1045	771,8	924,55	11,38
1020	564,8	615,44	11,78

Fonte: Adaptado (BEJO *et al*, 2021)

De acordo com a tabela acima, observamos que o aço SAE 1020 apresentou um maior alongamento percentual após a fratura, em comparação

com o AÇO SAE 1045, indicando que o aço com menor percentual de carbono proporciona uma maior ductibilidade ao aço.

Os aços ainda podem ser subdivididos em baixo, médio ou alto carbono, como se apresenta na tabela a seguir. (FERRAZ, 2003)

Tabela 2 - Classificação do carbono no aço

	Baixo Carbono	Médio Carbono	Alto Carbono
Percentual (%)	0,008 à 0,3%	0,3 a 0,8	0,8 a 2,11
Característica	- Estrutura é ferrítica e perlítica. - Facilidade em conformar e soldar. - Aço de baixa dureza e alta ductibilidade.	- Melhor combinação de tenacidade, ductibilidade, resistência mecânica e dureza. - Aços mais comuns. - Inúmeras aplicações em construção mecânica.	- Baixa ductibilidade e tenacidade. - Apresentam alta dureza e elevada resistência ao desgaste. - Quando temperados são frágeis.

Fonte: (CHIAVERINI,1977)

Os aços utilizados na construção civil são classificados como CA-25, CA-50 e CA-60. A diferença entre eles está, basicamente, na resistência característica. Por exemplo, o aço CA (concreto armado) – 50 possui 500Mpa ou 50Kgf/mm². Sendo que o aço mais utilizado na construção civil é o CA-50. (MITTAL, 2016)

Os vergalhões Thermex possuem uma melhor soldabilidade em relação aos vergalhões tradicionais. A diferença entre os vergalhões soldáveis e não

soldáveis está na produção, mais precisamente na forma como é realizado o resfriamento.

Os vergalhões soldáveis, também conhecidos como Thermex são submetidos a um tratamento térmico, sendo resfriados bruscamente com água, garantindo um resfriamento homogêneo em toda sua extensão. Após o resfriamento controlado, ocorre um auto revenimento, onde a camada superficial do vergalhão passa a ser reaquecida pelo calor mantido em seu núcleo, assim melhorando as propriedades de ductilidade e tenacidade da martensita, além de aliviar as tensões internas. (SOUZA, 2021)

As vantagens de utilizar vergalhão soldável incluem a montagem mais rápida e eficiente, a facilidade de adaptação e moldagem em diferentes formas, proporcionando maior flexibilidade de projeto e possibilitando a criação de estruturas personalizadas. Além disso, o uso de vergalhão soldável contribui para a redução de desperdício, uma vez que não há sobras de arames recozidos ao amarrar a estrutura.

No entanto, também existem desvantagens associadas ao uso do vergalhão soldável: O custo inicial, pois a aquisição de equipamentos e a contratação de mão de obra qualificada são necessárias para realizar a soldagem. Além disso, a preparação adequada da superfície, incluindo a remoção de óxidos, requer atenção extra durante o processo de instalação.

Ao avaliar as vantagens e desvantagens, observa-se que as vantagens superam as desvantagens em relação ao uso do vergalhão soldável. É necessário considerar o impacto do ponto de vista da corrosão, que pode ser um aspecto crítico a ser analisado em relação à durabilidade e manutenção da estrutura.

2.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO UTILIZADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

O concreto possui um excelente desempenho para suportar esforços de compressão, enquanto que o aço possui uma excelente capacidade de resistir a esforços de tração. A união do concreto (material não metálico e inorgânico) e aço (material metálico e ferroso) trabalham de forma harmoniosa para suportar as cargas solicitantes em uma edificação. (ROSSIGNOLO, 2002)

Inicialmente, é imprescindível compreender as características físicas dos aços, algumas características são comuns em todos os aços estruturais. De acordo com Pfeil (2012), as características físicas principais dos aços são:

- Módulo de deformação longitudinal ou módulo de elasticidade $E = 200.000 \text{ Mpa}$
- Coeficiente de Poisson $\nu = 0.3$
- Coeficiente de dilatação térmica $\beta = 12 \times 10^{-6} \text{ por } ^\circ\text{C}$
- Massa específica $\rho_a = 7.850 \text{ kg/m}^3$

As principais propriedades do aço podem ser classificadas como:

Ductilidade: Resume-se na capacidade do material em suportar cargas e deformar sem romper. Um aço pode ser considerado dúctil quando é submetido a aplicação de carga pontual e consegue redistribuir as tensões internas e deformar antes de romper-se. A ductilidade pode ser medida através da deformação após o material romper quando submetido a uma carga. (PFEIL, 2012)

Fragilidade: O aço pode se tornar frágil por diversas razões, como por efeitos térmicos, quando o aço é exposto a baixas temperaturas ou quando é submetido a solda, neste caso a zona termicamente afetada pela solda pode se

tornar uma junta frágil. A fragilidade tem características contrárias a ductilidade, enquanto o aço dúctil deforma antes de romper, o aço frágil rompe sem deformar. Já ocorreram dezenas de acidentes catastróficos em decorrência de fraturas em aços frágeis. (PFEIL, 2012)

Resiliência: A resiliência é a capacidade do aço em absorver energia mecânica no regime elástico e, após a deformação, liberar a energia absorvida e retornar ao formato original. O módulo de resiliência é a quantidade de energia elástica absorvida pela unidade de volume do metal tracionado. (PFEIL, 2012)

Tenacidade: Já a tenacidade é a soma da energia elástica e plástica que o material pode absorver por unidade de volume até sua ruptura. (PFEIL, 2012)

Dureza: A dureza de um aço é a resistência que a superfície do material tem a penetrações. (PFEIL, 2012)

Efeito da temperatura elevada: A temperatura elevada deve ser um ponto de atenção em relação a peças metálicas. Uma vez que o calor modifica as propriedades físicas dos metais em geral, reduzindo a resistência de escoamento, de ruptura e o módulo de elasticidade. (PFEIL, 2012)

Fadiga: A fadiga do material se manifesta quando as peças metálicas são submetidas a esforços mecânicos repetitivos e pode romper em tensão inferior as pré-estabelecidas em outros ensaios, isso ocorre porque o material sofreu 'fadiga' e algumas propriedades como a ductilidade ou resiliência foram reduzidas. (PFEIL, 2012)

2.6 CORROSÃO

A corrosão nos aços é um processo químico que ocorre quando a peça de aço é exposta ao ambiente natural ou quando submetido a aplicação de algum produto corrosivo. A consequência da corrosão é a perda da seção da peça, ou

seja, o aço é desintegrado e as estruturas feitas por ele podem vir a colapsar. A corrosão pode ocorrer em diversos materiais, não somente nos aços. (MENDOZA, 1999)

A corrosão atmosférica de metais é um processo eletroquímico que é a soma de processos individuais que ocorrem quando uma camada eletrolítica se forma no metal. (MORCILLO, 2015, pág. 2)

Existem dois tipos de corrosão: a corrosão química e eletroquímica. Basicamente, a diferença está na forma como ocorre a corrosão, sendo que somente na corrosão eletroquímica ocorre o deslocamento/transferência de elétrons. Já a corrosão química acontece quando o material é degradado superficialmente quando entra em contato direto com o agente corrosivo. Porém, a corrosão eletroquímica é a mais comum. Geralmente a corrosão química compromete materiais não metálicos e a corrosão eletroquímica os materiais metálicos. (MENDOZA, 1999)

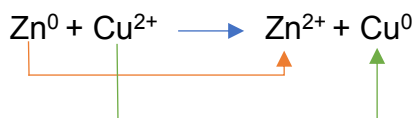
2.6.1 Oxidação e redução

A oxidação e redução é uma forma comum de ocorrer a degradação dos aços através da corrosão. Antes de tratar da oxidação e redução é importante compreender o 'nox' de um elemento químico. O nox, é um termo usado que faz referência a carga elétrica do elemento químico. Quando um elemento químico passa por reações químicas ele pode perder ou ganhar elétrons, e esses processos aumentam ou diminuem seu nox. A oxidação ocorre quando, em decorrência de uma reação química, aumenta o nox do elemento químico com a perda de elétrons. Já a redução, é o contrário, ocorre quando reduz o nox do elemento químico através do ganho de elétrons.

Na oxidação haverá a perda de elétrons, acarretando o aumento do valor de NOX, o elemento que provoca a oxidação é chamado de agente oxidante. Na redução haverá o ganho de elétrons, e diminuição

do valor de NOX, o elemento que provoca a redução é chamado de agente redutor. (ARAUJO, et al. 2021, pág. 3)

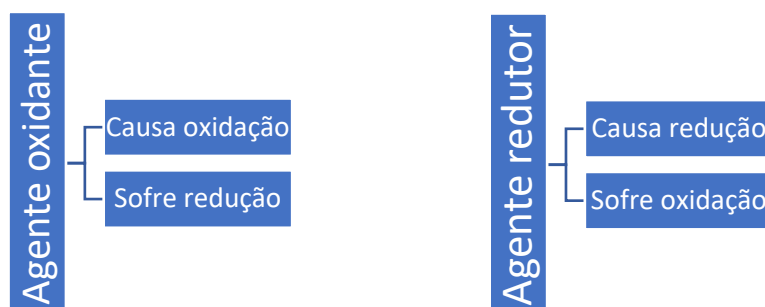
Para um melhor entendimento, segue exemplo de oxidação e redução do elemento Zinco (Zn) e Cobre (Cu). (SILVA, 2015)



O nox do Zn inicialmente é 0, e após a reação transformou-se em 2+, ou seja, o nox aumentou e assim sofreu oxidação. Enquanto o Cu que antes da reação possuía uma carga de 2+ passou a ter a carga de 0, dessa forma o nox do Cu diminuiu, ou seja, sofreu redução. Importante destacar que a oxidação sempre vai caminhar junto com a redução. Se o metal oxidou ele também vai reduzir. Um agente oxidante causa oxidação, ele oxida algo, ao passo que o agente redutor obtém os elétrons de alguém e, conseqüentemente, sofre redução. O nox do agente oxidante diminui. Um agente redutor causa redução, perde os elétrons e sofre a oxidação. Se o elemento perde carga negativa, ficará mais positivo e aumentará seu nox. (SILVA, 2015)

Segue modelo esquemático para melhor compreensão das reações:

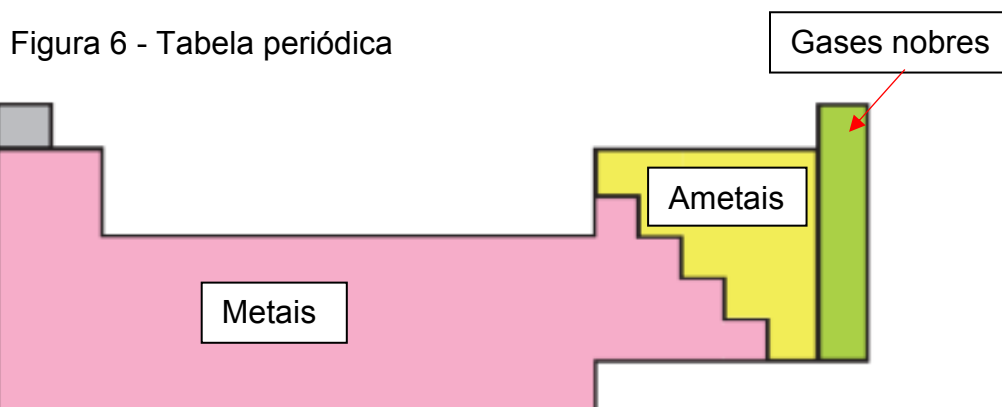
Figura 5 - Esquema referente a oxidação e redução



Fonte: Próprio autor

A tabela periódica é um esquema que agrupa e diz as principais propriedades de todos elementos químicos conhecidos. Ela é basicamente

subdividia em 3 grupos. Sendo eles os Metais, Ametais e Gases nobres. (SILVA, 2015)



Fonte: Próprio Autor.

Os metais possuem tendência em perder elétrons, ou seja, possuem tendência em sofrer oxidação, dessa forma os metais possuem tendência em ser agentes redutores. Já os ametais, a tendência é ganhar elétrons e sofrer redução. Então os metais são agentes redutores e os ametais são agentes oxidantes. (SILVA, 2015)

2.6.2 Potencial de eletrodo

Os metais possuem diferentes tendências a oxidar. Logo, é possível classificar os materiais com sua respectiva facilidade de perder elétrons. O potencial de eletrodo mede a tendência de um elemento em sofrer a oxidação ou redução. O potencial de eletrodo é simbolizado pela letra 'E'. É uma forma quantitativa de medir a tendência de sofrer oxidação ou então redução. " E_{red} " significa 'potencial de redução', ou seja, é a tendência do elemento de ganhar elétrons e sofrer a redução. Outro potencial existente é o potencial de oxidação " E_{oxi} ", ou seja, a tendência de perder elétrons e sofrer oxidação. (DE ARAUJO, 2015)

Quando um metal (eletrodo) é colocado em contato com uma solução (eletrólito), a interface entre essas duas fases apresenta um excesso de cargas elétricas, negativa no eletrodo e positiva no eletrólito, o que configura uma dupla camada elétrica. Independente do tipo de reação eletroquímica que ocorre na interface eletrodo/eletrólito, sempre é formada a dupla camada elétrica e através dela é estabelecida uma diferença de potencial elétrico (i.E), que é denominada de potencial de eletrodo (E), de circuito aberto (E_{ca}) ou de corrosão (E_{corr}). (DE ARAUJO, 2017. Pág. 31)

Essas tendências de o átomo sofrer oxidação ou redução, são medidas a partir do eletrodo de hidrogênio. Abaixo segue uma tabela com alguns potenciais conhecidos:

Tabela 3 - Potencial de redução

Potencial padrão de redução (E° _{red})	E° Volts (V)
$\text{Li}^+_{(\text{aq})} + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Li}_{(\text{s})}$	-3,04
$\text{Zn}^{+2}_{(\text{aq})} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Zn}_{(\text{s})}$	-0,76
$2\text{H}^+_{(\text{aq})} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_{2(\text{g})}$	0,0
$\text{Ag}^+_{(\text{aq})} + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ag}_{(\text{g})}$	+0,80
$\text{F}_{2(\text{aq})} + \text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{F}^-_{(\text{aq})}$	+2,89

Fonte: Próprio Autor.

Os metais quando em contato com um eletrólito podem perder ou ganhar elétrons, em decorrência da diferença de potencial entre os metais ali inseridos. A diferença de potencial eletroquímica depende de vários fatores. (FORTES, 1995)

Tal diferença de potencial, que pode ser positiva, negativa ou nula, depende da natureza do metal, das espécies presentes no eletrólito e de outras variáveis como temperatura, concentração e pressão, porem quando fixadas as variáveis ligadas ao eletrólito, o valor do potencial será função das propriedades de cada metal. (FORTES, 1995, p. 24).

Quando o metal é imerso em um eletrólito ocorre a perda de energia espontânea até que o sistema entre em equilíbrio. O equilíbrio ocorre quando há

a saturação do eletrólito com os cátions. Quando é atingido o equilíbrio entre o metal e o eletrólito, temos o potencial de equilíbrio. (CASCUDO, 1997, p. 22).

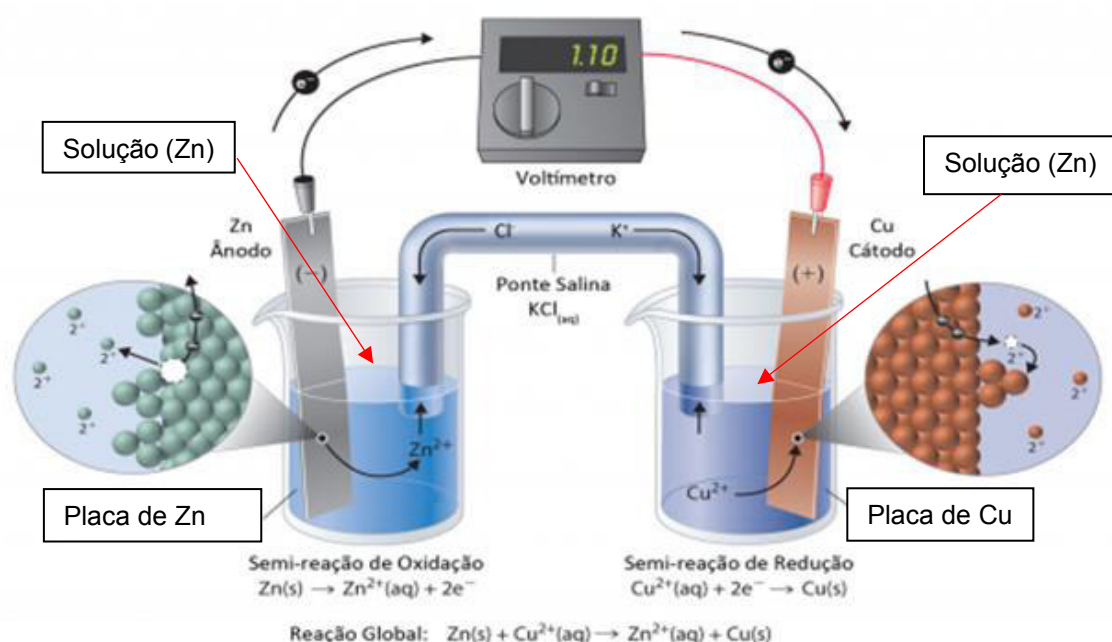
O potencial de equilíbrio é o potencial que se estabelece como resultado do equilíbrio entre duas tendências: a dos átomos metálicos de deixarem o metal e passarem à solução, ionizando-se e hidratando-se e a dos cátions de depositarem-se sobre o metal. (CASCUDO, 1997, p. 22).

A troca de elétrons que ocorre por meio do eletrólito promove a tensão que pode ser medida através de um multímetro.

2.6.3 Pilha eletroquímica

A Pilha eletroquímica é basicamente composta de um eletrodo positivo (também conhecido como cátodo) e um eletrodo negativo (também conhecido como ânodo). Abaixo segue modelo exemplificativo. No modelo apresentado abaixo, o ânodo é uma amostra de uma placa de zinco mergulhada em uma solução de sulfato de zinco, enquanto que o cátodo é uma placa de cobre mergulhada em uma solução de cobre. (ARAUJO, et al. 2021)

Figura 7 - Pilha de Daniell



Fonte: Adaptado de Dino (2022)

Na solução de sulfato de zinco há uma placa metálica de zinco, trata-se de uma substância pura, ou seja, o nox dele é zero. O mesmo ocorre na solução de sulfato de cobre, há uma placa de cobre mergulhada e o nox também é zero. Há uma conexão entre as soluções, essa conexão é conhecida como 'ponte salina'. O termo "ponte" faz relação a conexão entre as duas soluções e "salina" pois geralmente vai uma solução de um sal, sendo o mais utilizado o cloreto de potássio. Dessa forma, fecha o circuito, gerando corrente elétrica. Se o circuito permanecer fechado, a placa de zinco passará a diminuir sua seção ao passo que a placa de cobre irá ganhar massa. Isso ocorre porque o cobre presente na solução é aderido a placa. (ARAUJO, et al. 2021)

O cobre presente na solução tem carga 2+ (Cu^{2+}) e o cobre presente na placa possui carga de 0 (Cu^0). A transformação química que ocorre é uma redução, o Cu^{2+} recebe 2 elétrons e passa a ter carga 0 (Cu^0). A equação que representa essa transformação é:



No zinco, a placa diminuiu, isso ocorre porque o zinco da placa é zero (Zn^0) e o zinco na solução aquosa é 2^+ (Zn^{2+}). A transformação que acontece é representada pela equação:



Na placa de zinco ocorreu oxidação. A oxidação é a liberação de elétrons, ou seja, libera corrente elétrica. Esses elétrons liberados pela placa de zinco, em grande quantidade, formam o polo negativo. Consequentemente a placa de cobre será positiva. Já a ponte salina tem a função de igualar as cargas. O sal presente na ponte salina (no exemplo citado KCl) libera K^+ (catodo) para a solução de cobre, visto que a carga positiva foi diminuída. Da mesma forma ocorre com a solução de Zn, a ponte salina irá liberar Cl^- (ânion) para equilibrar o sistema. (ARAUJO, et al. 2021)

Na pilha o anodo é o polo negativo e o catodo o polo positivo. O elétron sempre irá do polo negativo para o positivo.

O eletrodo no qual ocorre a oxidação é chamado de ânodo, representa o polo negativo da pilha. Já o eletrodo onde é acometida a redução é o cátodo denominado o polo positivo da pilha. Os elétrons são liberados no ânodo e seguem por um fio condutor até o cátodo, onde ocorre a redução. Sendo assim o fluxo de elétrons segue de ânodo para o cátodo. A ponte de salina ou eletrólito é a solução eletrolítica condutora dos elétrons, que permite a circulação no sistema da pilha. (ARAUJO, et al. 2021, pág. 4)

Abaixo segue imagem que demonstra os eletrodos após serem submetidos a pilha supracitada:

Figura 8 - Eletrodo após funcionamento da pilha



Fonte: (Dino, 2022)

2.6.4 Cinética da corrosão

O estudo da cinética da corrosão faz referência a velocidade em que ocorre a corrosão. Existem formas diferentes de obter a taxa de corrosão de um material metálico. Uma das formas de calcular a taxa da corrosão é obtendo a perda de massa por unidade de área por unidade de tempo ($\text{Mg}/\text{m}^2\cdot\text{ano}$). Outra forma de obter a taxa da corrosão é pela perda de espessura por unidade de tempo (mm/ano). Também é possível obter a taxa de corrosão pela densidade de corrente de corrosão (mA/cm^2). No entanto, é preciso entender que a velocidade de corrosão não é constante. Existem dois tipos de velocidade de corrosão, a velocidade média e a velocidade de corrosão instantânea. (DE FREITAS, 2022)

Conhecendo a velocidade média da corrosão é possível estimar o tempo de vida útil da peça metálica, ao passo que a velocidade de corrosão instantânea

permite verificar e controlar a o processo corrosivo, diminuindo a concentração em um determinado instante. Portanto é imprescindível conhecer a velocidade média de corrosão, para verificar o desgaste de uma superfície metálica e com isso determinar o tempo de vida útil de um equipamento ou de instalações industriais. Um exemplo do que pode influenciar na velocidade de corrosão é uma estrutura de aço em uma cidade litorânea. Na cidade litorânea, a atmosfera é composta, dentre outros elementos, por cloreto de sódio. (DE FREITAS, 2022)

A presença do cloreto de sódio faz com que se forme o circuito elétrico, resultando em reações de oxirredução que resultarão na corrosão. A corrosão ocorre devido a migração de elétrons e de íons. Nesse ambiente, úmido e com concentração de sais de cloreto de sódio, acelera a troca de elétrons. Dessa forma, a quantidade de íons dissociados também será maior, funcionando como um eletrólito, promovendo um aumento da migração de elétrons e da velocidade da corrosão. (DE FREITAS, 2022)

É importante conhecer mais a fundo os mecanismos de corrosão do aço carbono em atmosferas marinhas, onde a variável com maior influência é, sem dúvida, a taxa de deposição de íons cloreto (salinidade atmosférica) no local de exposição. (MORCILLO, Manuel et al, 2015, pág. 3)

2.7 CORROSÃO NA ARMADURA DO CONCRETO

A corrosão na armadura do concreto é extremamente danosa a toda peça estrutural, pois comprometerá a peça como um todo e reduzirá a capacidade de suportar cargas. A corrosão que ocorre no concreto armado é a corrosão eletroquímica, que afeta a armadura e o concreto, especialmente quando a peça de concreto armado está imersa em um eletrólito de cloreto de sódio (CASCUDO, 1997).

O termo “corrosão do concreto armado” refere-se não apenas aos problemas de corrosão das armaduras, mas também às condições de maior ou menor proteção do vergalhão pelo próprio concreto. A proteção do aço pelo concreto é feita de duas formas: por barreira

física, pela camada de revestimento e pela ação química que resulta do pH típico do concreto para permitir o desenvolvimento de um filme de passivação sobre o vergalhão. Apesar dessa dupla proteção, existem vários fatores ou condições que levam ao desenvolvimento do processo de corrosão no concreto, como espessura reduzida do revestimento, baixa resistência do revestimento do concreto à penetração de CO_2 , água e sais, má compactação ou vibração do concreto, presença de sais ou gases contaminantes como SO_2 ou CO_2 , presença de bactérias redutoras de sulfato, quantidade reduzida de cimento ou elevada relação água/cimento. (RIBEIRO, 2015, pág. 2)

A corrosão, na estrutura de concreto armado pode ocorrer por ataque de íon cloreto e pela carbonatação do concreto.

A corrosão das armaduras nas estruturas através do ingresso de íons cloreto é uma das formas mais comuns de ataque que leva à deterioração de estruturas de concreto armado. Os danos relacionados às estruturas em ambientes marinhos resultam em um custo de bilhões de dólares por ano destinado ao reparo das mesmas. (TAVARES, 2006, pág. 2).

A carbonatação ocorre devido a presença de água (H_2O), hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e do dióxido de carbono (CO_2). Quando o dióxido de carbono adentra aos poros do concreto e reage com a água, forma-se o ácido carbônico (H_2CO_3) que reage com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Durante a formação do carbonato de cálcio são consumidos os álcalis da pasta reduzindo o Ph. A alta alcalinidade do concreto é fundamental para proteção da camada passivadora do aço. Dessa forma, quando o Ph reduz devido a carbonatação, a camada passivadora do aço é dissolvida e inicia-se o processo de corrosão. É de suma importância identificar a profundidade da carbonatação do concreto (que pode adentrar na peça através das fissuras). Para isso, utiliza-se o ensaio de carbonatação (MEIRA, 2006).

O ensaio de carbonatação é fundamental para verificar a vida útil de uma estrutura de concreto armado. Essa técnica identifica se o Ph da peça estrutural está menor do que é esperado, tanto a carbonatação ou a presença de cloretos

fazem com que o Ph diminua, ao ponto da camada passivadora ser eliminada e criar condições ideais para que a corrosão eletroquímica inicie. (MEIRA, 2006)

Foi realizado um ensaio de carbonatação na Ponte Eusébio Matoso, localizada na cidade de São Paulo/SP. O ensaio foi realizado em alguns pontos da estrutura. Após a abertura de pequenos trechos, foi realizado ensaio que consistiu em umedecer a estrutura com uma solução de fenolftaleína diluída em 1% de álcool e observar a coloração resultante na peça. A fenolftaleína reage nos meios com pH maiores do que 9,5, ficando com uma coloração roxa, nos meios ácidos ele não reage, fica incolor. Através desse ensaio, evidenciou-se a profundidade de 1 cm a profundidade da carbonatação (medido com régua a profundidade até onde a coloração começava a aparecer) (RAMOS, 2019).

Figura 9 - Ensaio de carbonatação em viga



Fonte: (RAMOS, 2019).

Outro ponto de alerta nesse ensaio foi o nível de carbonatação de uma viga que previamente haviam danos superficiais, neste ponto observou-se que a solução da fenolftaleína apresentou coloração roxa somente em uma região mais interna da viga e coloração roseada na região mais próxima à superfície, neste ponto a profundidade da carbonatação foi de 2cm (RAMOS, 2019).

Figura 10 - Ensaio de carbonatação em viga



Fonte: (RAMOS, 2019).

A carbonatação atua como redutor de Ph do concreto e afetando diretamente a camada de passivação do aço. Já o Íon cloreto também é um agente redutor de Ph. No concreto o íon cloreto (Cl^-) reage com a água (H_2O) e gera o ácido clorídrico (HCl) que baixa o Ph do concreto, assim como a carbonatação, quebrando a camada passivadora do aço. O íon cloreto também reage diretamente com o aço, reagindo com o íon ferro e gerando corrosão localizada (também conhecida como corrosão por pites). (SILVA, et al, 2015)

Para verificar a presença de cloretos livres no concreto armado utiliza-se o ensaio de cloretos livres. Este ensaio consiste em aspergir nitrato de prata sobre a superfície a ser inspecionada, após a aspensão se realiza o ensaio visual. Se for verificada a coloração esbranquiçada é um indicativo que há cloretos livres na região observada. (SILVA, et al, 2015)

Em um estudo realizado na Plataforma de pesca Rincão, em Goiânia foi feito um ensaio colorimétrico de aspensão de nitrato de prata para verificação de cloretos livres.

Figura 11 - Ensaio colorimétrico de aspersão de nitrato de prata



Fonte: (SILVA, et al, 2015)

Foi constatado através do ensaio pontos críticos na ponte. Uma vez que os cloretos já ultrapassavam o cobrimento da estrutura.

Tabela 4 - Resultados obtidos no ensaio para verificação dos cloretos livres

Profundidade de Avanço de Frente de Cloretos Livres			
EQUIPAMENTO	AMOSTRA	RESULTADO	ANÁLISE
Trena	M125	80 mm	Passou do Cobrimento
	M107	60 mm	Passou do Cobrimento
	M30	35 mm	Igual ao Cobrimento Máximo
	M17	35 mm	Igual ao Cobrimento Máximo

Fonte: (SILVA, et al, 2015)

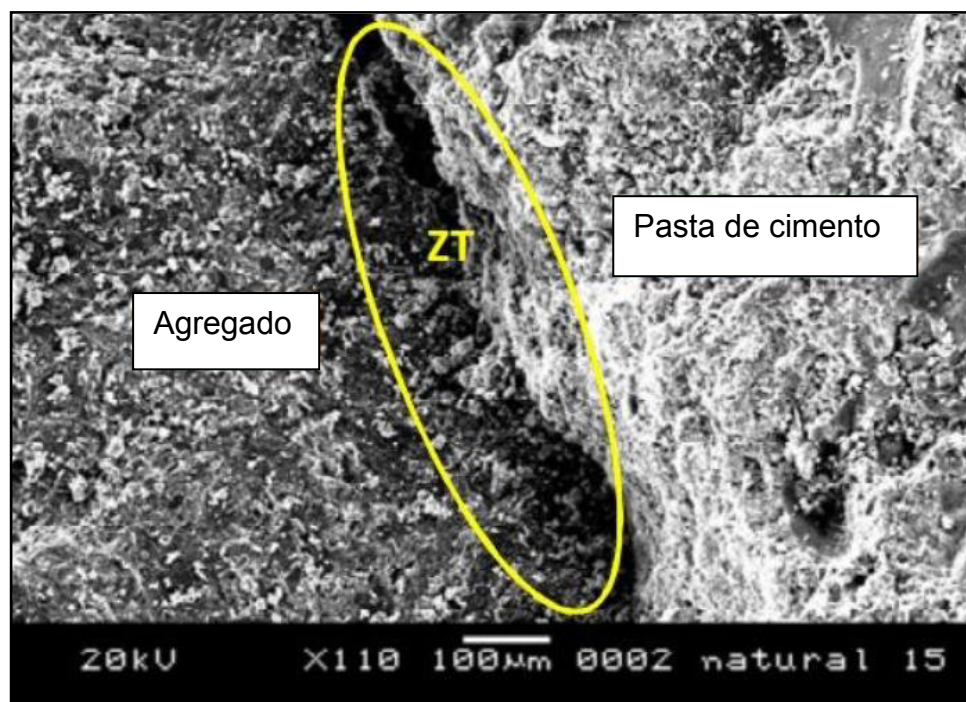
Observa-se que através da análise deste ensaio é possível verificar que a profundidade dos cloretos na peça de concreto já ultrapassa a linha de cobrimento das armaduras, ou seja, o aço do elemento estrutural encontra-se contaminado por cloretos.

2.8 DETALHAMENTO DO CONCRETO

O concreto visto de maneira macroscópica possui apenas 3 constituintes básicos: o aglomerante hidráulico (cimento), o agregado miúdo (areia) e o agregado graúdo (brita). Porém, o concreto é uma estrutura mais complexa. Os aspectos micro e macroestruturais afetam diretamente a durabilidade da estrutura da peça estrutural. O concreto depois que passa pelo tempo de cura, torna-se uma peça monolítica, ou seja, uma peça só. Por muitos é denominado como uma “rocha artificial”. (MEHTA E MONTEIRO, 1994)

Em um ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) realizado pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) foi possível verificar a Zona de Transição (ZT) do concreto.

Figura 12 - Zona de transição do concreto



Fonte: (DUART, 2008)

Neste ensaio foi ampliado em 110 vezes a visualização. Percebe-se que a ZT se trata de um espaço vazio entre o agregado e a pasta de cimento.

Toda partícula de agregado pode conter vários minerais, além de microfissuras e vazios. Analogamente, tanto a matriz da pasta como a zona de transição, contêm geralmente uma distribuição heterogênea, de diferentes tipos e quantidades de fases sólidas, poros e microfissuras, acrescentando-se ainda o fato de estarem sujeitas a modificações com o tempo, umidade ambiente e temperatura, o que torna o concreto, diferentemente de outros materiais de engenharia, um material com características parcialmente intrínsecas ao material (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

A ZT é um local vazio e poroso que favorece a ocorrência das primeiras fissuras na peça estrutural. A espessura da zona de transição fica entre 10 a 50 μm e é considerado um ponto extremamente fraco do concreto. (MEHTA E MONTEIRO, 1994)

Esses vazios influenciam no deslocamento dos íons dentro da peça. Quanto menos porosidade existirem, menos gases e líquidos haverão na estrutura interna do concreto, o que resultará na minimização do transporte de íons, isso contribuirá para que não ocorra a corrosão na armadura do concreto. Dessa forma concluímos que a os vazios na peça estrutural está diretamente ligada a durabilidade do concreto armado. CASCUDO (2005)

2.9 PASSIVAÇÃO

O aço usado no concreto é altamente corrosivo. Isso porque ele é composto por aproximadamente 95% a 97% de ferro (Fe) e de vários outros elementos variados, podendo ser ametais como Carbono (C), enxofre (S) e fósforo (P) e metais como manganês (Mn), cromo (Cr), silício (Si), alumínio (Al), molibdênio (Mb) e níquel (Ni). Os metais possuem níveis de energia diferentes, existem regiões mais eletronegativas que outras. Assim, formam-se micropilhas no interior do aço. (DE ANDRADE, et al. 2021)

O concreto contém em seus poros uma solução de elevada alcalinidade, com pH variando de 12 a 13, devido principalmente ao hidróxido de cálcio formado nas reações de hidratação dos silicatos do cimento e aos álcalis incorporados no clínquer. Em razão de sua natureza alcalina, esta solução proporciona um meio adequado para a formação de uma camada de óxidos, fina, compacta e aderente, na superfície da armadura. Enquanto a solução presente nos poros do concreto conservar o seu caráter básico e for isenta de agentes agressivos, essa camada de óxidos continua presente, protegendo a armadura contra a corrosão. (SATO, et al. 1998, pág 3)

Existem dois processos que favorecem a proteção do aço, o processo químico e o processo físico. O processo químico ocorre quando há formação das micropilhas no interior do aço, quando entra em contato com a água e oxigênio, e assim inicia o processo de oxirredução que gera a corrosão do aço, fisicamente se apresenta como uma película alaranjada. Essa película alaranjada também pode servir como proteção física para que outros agentes corrosivos (contaminantes) não afetem o aço. O próprio concreto protege a armadura dos agentes externos. (DE ANDRADE, et al. 2021)

A corrosão inicia por meio da destruição da camada de passivação na superfície do aço, e isso pode ser realizado por carbonatação do concreto circundante. O processo de carbonatação consiste em converter íons alcalinos que são originados da reação de hidratação do cimento, como íons de sódio (Na^+), potássio (K^+) e especialmente o cálcio (Ca^{2+}), em sais de carbonatos desses elementos, através da ação ácida do dióxido de carbono presente no ar. (DE ANDRADE, et al. 2021, pág. 50)

A NBR 6118 prevê o cobrimento mínimo para cada classe de agressividade ambiental conforme segue:

Figura 13 - Classe de agressividade ambiental

Tabela 6.1 - Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{1), 2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ^{1), 2)}	
IV	Muito forte	Industrial ^{1), 3)}	Elevado
		Respingos de maré	

¹⁾ Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

²⁾ Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

³⁾ Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: NBR 6118-ABNT, 2003.

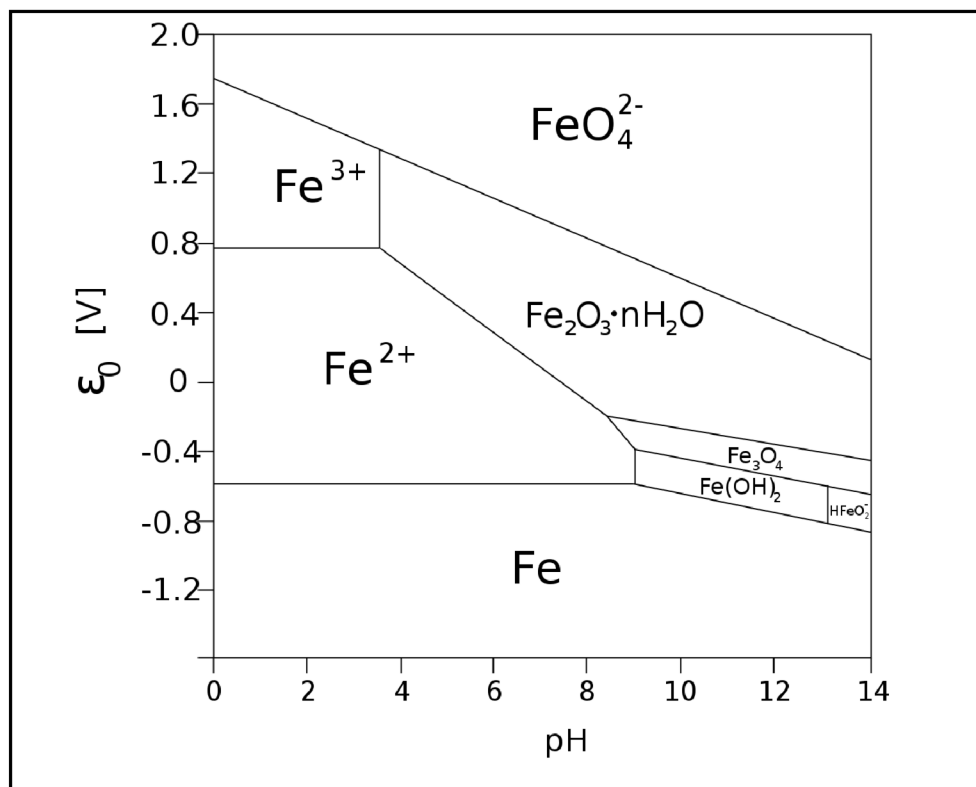
O pH interno do concreto varia entre 12,5 e 13,5 aproximadamente. É um local extremamente alcalino que possibilita uma boa proteção do aço. Esta alcalinidade ocorre devido ao hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 . No decorrer do tempo o pH continua alto, devido a solução de hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH), oriundos dos álcalis do cimento. Os principais responsáveis pela elevação do pH do concreto são os íons Na^+ e K^+ . (RIBEIRO, et al. 2010)

O concreto possui um pH altamente alcalino e quando a estrutura está em uma região urbana industrial onde emite uma grande quantidade de dióxido de carbono, ocorre a carbonatação do concreto que pode baixar o pH. Quando o pH do concreto estiver entre 9,5 e 13, a camada passivadora ainda estará preservada, mas se a carbonatação baixar o pH para menos que 9,5, a camada é quebrada e ocorrerá a corrosão do aço no interior do concreto armado. (RIBEIRO, et al. 2010)

Essa camada é formada devido à alta alcalinidade do concreto e é conhecida como camada de passivação. Essa camada fornece uma barreira contra agentes agressivos, dos quais depende a estabilidade da qualidade da passivação. (BRICEÑO-MENA, et al. 2020, pág. 2)

Através do diagrama de Pourbaix é possível verificar como ocorre a passivação dos metais. A passivação inicia quando uma película de óxidos é depositada sobre a superfície da armadura.

Figura 14 - Diagrama de Pourbaix



Fonte: (Meira, 2017)

A camada de passivação é uma boa proteção para a armadura, pois funciona como uma barreira que impede o acesso dos agentes agressivos. De acordo com SILVA (1995), a película de passivação possui as seguintes características:

- Espessura aproximada de 0,4 Å;
- Baixa condutividade iônica;
- Baixa solubilidade;
- Boa aderência ao aço a largo espectro de potenciais no qual permanece estável.

Há pesquisadores que apontam que a camada de passivação permanece protegendo o aço se o pH do concreto permanecer acima de 11,5 e se não houver cloreto no concreto. A taxa de corrosão do aço é proporcional a diminuição do pH da estrutura. (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

[...] os cimentos Portland hidratados contêm álcalis no fluido dos poros e aproximadamente 20 por cento do peso é constituído de hidróxido de cálcio sólido, normalmente há alcalinidade suficiente no sistema para manter o pH acima de 12. Em condições excepcionais [...] o pH do concreto na vizinhança do aço pode ser reduzido a menos de 11,5, destruindo, portanto, a passividade do aço e acarretando para o processo de corrosão (MEHTA e MONTEIRO, 1994, p. 170)

Quanto menos permeável for a peça de concreto, menor será a penetração de agentes corrosivos e assim diminuirá o fluxo de elétrons que ocasionam a corrosão eletroquímica. (WOLYNEC, 2003)

2.10 MECANISMO DA CORROSÃO NO CONCRETO ARMADO

A corrosão que acomete o concreto é do tipo eletroquímico, que se propaga através das pilhas que são formadas no concreto armado. De acordo com Schwertner *et al* (2017) as principais causas que levam ao início da corrosão eletroquímica no concreto armado são:

Meio corrosivo: A composição química do ambiente onde o concreto armado está exposto, a concentração de impurezas agressivas ao concreto, o pH do concreto, a temperatura do local onde o concreto armado estará exposto entre outros fatores.

Material: A composição química do concreto e as impurezas acrescentadas no processo de fabricação.

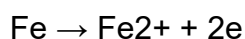
Esforços do material: Solicitações mecânicas, movimento relativo com o meio, condições de imersão.

As pilhas que se formam no concreto também possuem uma parte chamada anódica (onde ocorre a oxidação e a perda de massa) e outra parte chamada catódica (onde acontece a redução de oxigênio) essas reações químicas ocorrem simultaneamente. A formação dessas pilhas gera a corrente elétrica, que percorre a armadura no sentido do anodo para o catodo. Na região da pilha anódica é produzido íons de ferro e elétrons, já na região catódica esses elétrons são utilizados na reação de redução de oxigênio gerando a hidroxila. (SCHWERTNER, et al, 2017)

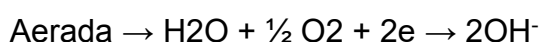
A corrente elétrica que é gerada através da pilha que é formada faz com que ocorra o circuito no sentido contrário da forma iônica pelo eletrólito. A reação entre os íons de ferro e hidroxilas geram óxidos e hidróxidos de ferro gerando a 'ferrugem'. (SCHWERTNER, et al, 2017)

As reações que ocorrem são:

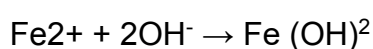
Na área anódica (onde ocorre a corrosão):



Na área catódica (onde não ocorre a corrosão):



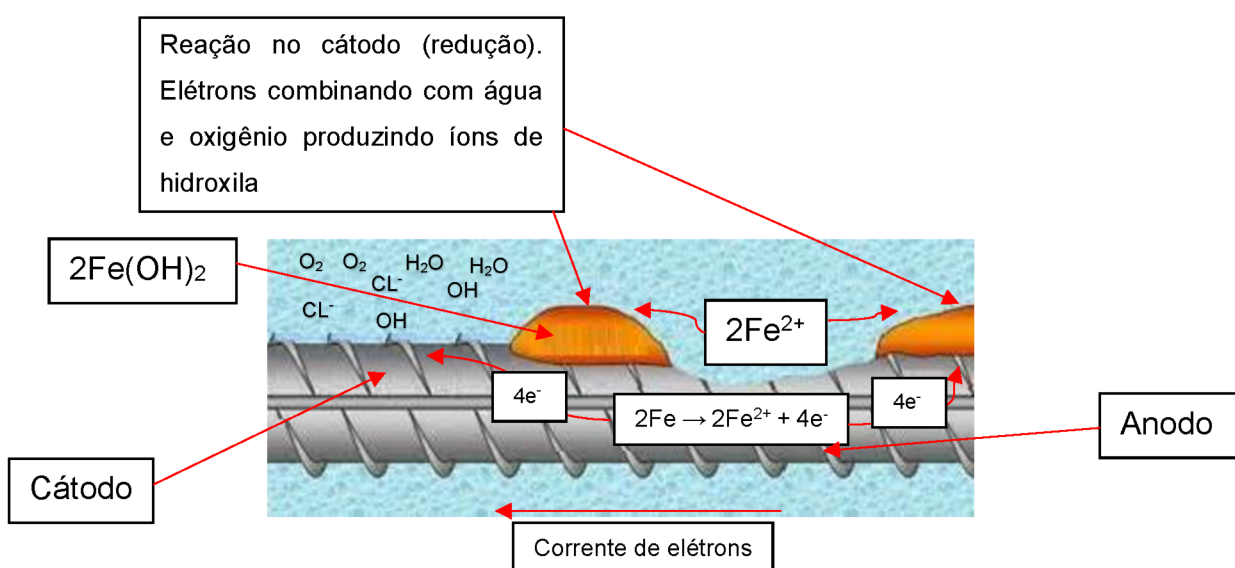
Os íons de ferro Fe^{2+} percorrem o eletrólito em sentido ao cátodo e os íons de hidroxila (OH^-) vão para o anodo. Em uma determinada região ambos se encontram e é gerado o hidróxido ferroso, que é representado pela equação: (SCHWERTNER, et al, 2017)



Podemos dividir o produto da corrosão em dois tipos, sendo o primeiro o hidróxido de ferro ($\text{Fe}(\text{OH})_2$), que quando está em meio não aerado se

transforma em magnetita (Fe_3O_4), que possui como característica a cor preta ou esverdeada e o outro produto da corrosão seria em meio aerado, se transformando em hidróxido de ferro ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), de cor alaranjada. O produto da corrosão também pode se formar em região próxima ao cátodo, visto que o OH^- , um íon maior do que o Fe^{2+} , possui mobilidade iônica menor do que o íon de ferro. (MERÇON, 2017)

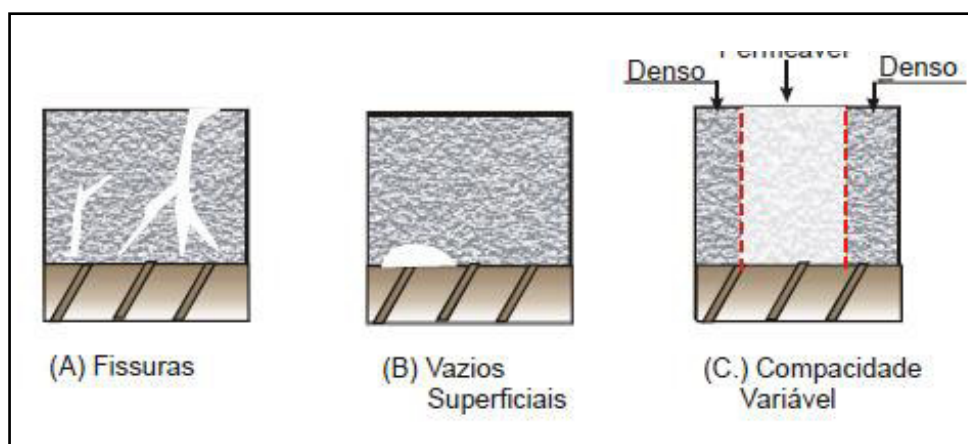
Figura 15 - Pilha eletroquímica da corrosão no concreto armado



Fonte: Adaptado Oliveira, 2019.

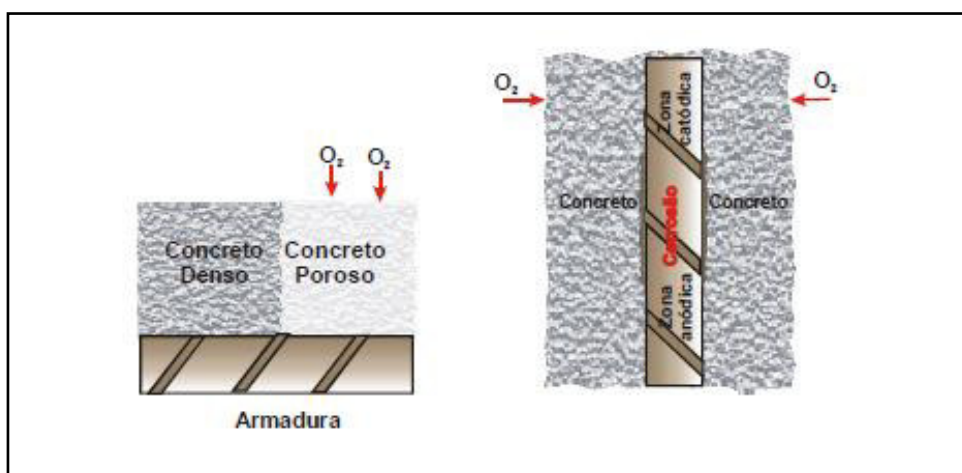
Para prevenir que ocorra a corrosão eletroquímica é necessário evitar as condições necessárias para a formação da pilha, ou seja, não pode haver a presença de eletrólito, aeração diferencial, contato entre materiais diferentes, áreas com diferentes deformações, áreas de diferentes tensões e corrente elétrica. A aeração diferencial é um fator importante visto que pode possibilitar a formação de pilhas do modo de que as regiões menos aeradas transformam-se em área anódica e as regiões mais aeradas transformam-se em cátodo. É comum ocorrer na peça de concreto em virtude da permeabilidade desproporcional do concreto e nas microfissuras. No concreto, a aeração diferencial é muito comum. (MERÇON, 2017)

Figura 16 - Diferença de potencial geradas por fissuras



Fonte: Helene, 1986. pág. 8

Figura 17 - Acesso do oxigênio no concreto

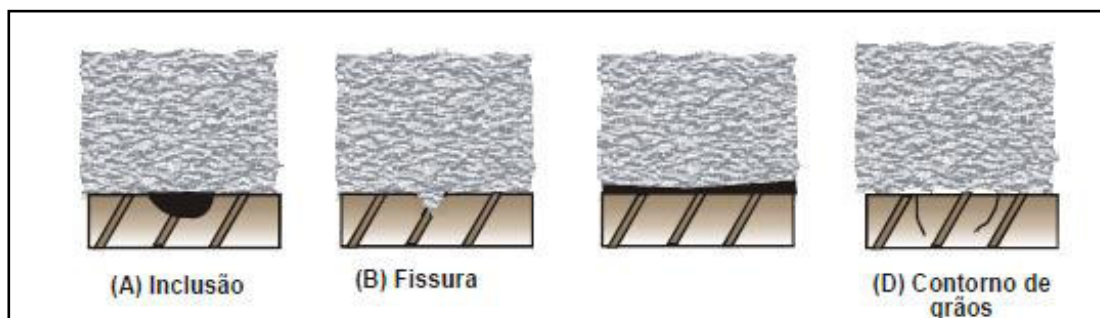


Fonte: Helene, 1986. pág. 8

Quando há diferença dos materiais metálicos, pode criar uma pilha galvânica que acarretará na corrosão do aço. Dessa forma, deve-se evitar o contato entre aços com ligas de cobre ou estanho, pois esse aço age como anodo da pilha formada e certamente sofrerá corrosão. Nos metais que possuem diferentes tensões, a corrosão pode acontecer devido a heterogeneidade que existe no material metálico ou no meio corrosivo. Nas regiões com esforços diferentes, a corrosão é naturalmente mais acentuada visto que nessas regiões existem áreas pequenas anódicas em relação a grandes áreas catódicas. (WOLYNEC, 2003)

Há também a corrosão por corrente elétrica de fuga. Essa corrente elétrica pode dar origem à corrosão eletrolítica. Neste caso o material metálico é obrigado a funcionar como anodo e forma a pilha eletrolítica. Essa corrosão é do tipo por pites e representa um grande risco. Uma corrente com apenas 1 ampere, em um ano pode consumir 9kg do aço. (WOLYNEC, 2003)

Figura 18 - Formas de corrosão no vergalhão



Fonte: Helene, 1986. pág. 8

Em estruturas de concreto armado o pH alcalino do concreto propicia a formação de película passiva na superfície das armaduras, a qual as protege contra a corrosão. Todavia, o concreto de cobertura é susceptível à penetração de íons e umidade, agentes que podem desencadear a formação da pilha eletroquímica. O mecanismo de corrosão nessas estruturas ocorre em meio aquoso e é caracterizado pela transferência de elétrons e íons entre regiões catódicas e anódicas na extensão do metal. Ocorrem, simplificada, a oxidação do ferro nas áreas anódicas e a redução do oxigênio nas áreas catódicas. Os cloretos são íons agressivos responsáveis por romper a película passiva do aço mesmo em pH alcalino, estão presentes em altas concentrações na água marinha e sua penetração no concreto exerce influência na vida útil das estruturas de concreto armado, pois causam corrosão localizada por pite. O pite trata-se de uma cavidade que se desenvolve rapidamente deteriorando as propriedades mecânicas das armaduras. Além disso, os cloretos não são consumidos de forma permanente pelas reações eletroquímicas, subsistindo livres para reagirem novamente, acelerando a corrosão. (DIETRICH, 2017. Pág. 2)

2.11 RESISTIVIDADE

A resistividade do concreto é um dos principais ensaios de monitoramento da corrosão do aço em uma estrutura de concreto. Tratando-se de corrosão em concreto armado é importante conhecer o fluxo dos íons que se deslocam na estrutura de concreto, pois a velocidade da corrosão também ocorre pela velocidade em que os íons se deslocam no interior da estrutura através da solução aquosa presente nos poros do concreto. (BROOMFIELD, 2007)

A resistividade elétrica é a resistência do fluxo de corrente iônica, ou seja, é a resistência sobre a corrente do fluxo de íons que são transportados pela solução aquosa presente nos poros do concreto, essa corrente passa dos ânodos para os cátodos, assim no concreto ocorre a corrosão, é uma propriedade que representa o inverso da condutividade elétrica. O ensaio de resistividade elétrica avalia a capacidade do concreto em resistir a passagem de agentes agressivos. A resistividade é inversamente proporcional à velocidade de corrosão, ou seja, quanto maior for a resistividade elétrica do concreto menor será a velocidade da corrosão. (BROOMFIELD, 2007)

Tabela 5 - Recomendações para avaliar o risco de corrosão nas armaduras de concreto

RESISTIVIDADE DO CONCRETO (K Ω .cm)	RISCO DE CORROSÃO
>20	Negligenciável
10 a 20	Baixa probabilidade
5 a 10	Alta probabilidade
<5	Muito alta probabilidade

Fonte: (WOSNIACK, Laís Mariana et al, 2021)

Em um estudo realizado na Plataforma de pesca Rincão em Goiânia, foi feito um ensaio de resistividade em 17 pontos para avaliar a resistividade elétrica dos elementos estruturais.

Figura 19 - Ensaio de Resistividade



Fonte: (SILVA, et al, 2015)

Os pontos inspecionados permitiram concluir que partes da plataforma apresentavam pouco risco, risco moderado e alto risco. Sendo que dos 17 pontos inspecionados 14 representavam risco moderado, 2 alto risco e 1 pouco risco. Ou seja, 82% dos pontos foram demonstrados como risco moderado. As divergências encontradas nos resultados se dão pelo fato de que cada ponto estar posicionado em locais diferentes, diferentes incidências de raio solar, ação do vento e choque das ondas marítimas influenciam na resistividade elétrica. (SILVA, et al, 2015)

2.12 POTENCIAL DE CORROSÃO

O potencial de corrosão (E_{corr}) pode ser medido no concreto armado. Trata-se de uma técnica não destrutiva que é normatizada pela ASTM C-876. Essa técnica consiste em medir a probabilidade de a armadura estar sofrendo corrosão, mesmo que ainda não haja incidências no ensaio visual. Para este ensaio é utilizado um eletrodo de sulfato de cobre que é conectado na armadura e mede o a diferença de potencial, essa medição é feita através de um voltímetro.

A tabela abaixo demonstra os potenciais de corrosão e sua relação com a probabilidade de corrosão, de acordo com a norma ASTM 876:2009:

Tabela 6 - Probabilidade de corrosão - ASTM 876:2009

ELETRODO DE COBRE/SULFATO DE COBRE	PROBABILIDADE DE CORROSÃO
>- 350 mV	Superior a 90%
<-200 mV	Inferior a 10%
- 200 a – 350 mV	Incerta

Fonte: Adaptado de MEDEIROS, 2017.

Foi realizado este mesmo ensaio de potencial de corrosão na referida Plataforma de pesca Rincão, em Goiânia.

Figura 20 - Registro da medição realizada no ensaio de Potencial de Corrosão



Fonte: (SILVA, et al, 2015)

Neste ensaio foram medidos em dois pontos diferentes para obter a diferença de potencial. Os resultados obtidos foram analisados e demonstraram corrosão em diversos pontos da estrutura, como em vigas e pilares.

2.13 VELOCIDADE DE CORROSÃO (ICORR)

A velocidade de corrosão (I_{corr}) mede a densidade da corrente que passa pelo concreto. Quanto maior for a densidade de corrente, maior será a taxa de corrosão. Segundo Andrade *et al.* (2004), os critérios para avaliação do potencial de corrosão são:

Tabela 7 - Critérios de avaliação para potencial de corrosão

I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	Taxa de Corrosão
$\leq 0,1$	Desprezível
0,1 - 0,5	Baixa
0,5 - 1	Moderada
> 1	Alta

Fonte: Adaptado (ANDRADE; ALONSO, 2004)

No ensaio realizado na plataforma de pesca supracitada, foi verificado a existência de considerável corrosão na maior parte da estrutura.

Figura 21 - Ensaio de velocidade de corrosão



Fonte: (SILVA, et al, 2015)

Os resultados variaram na ordem de 0,45 à 0,67 $\mu A/cm^2$, classificado dessa forma a corrosão com taxa moderada.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico serão apresentados, detalhadamente, os materiais e métodos que serão aplicados no procedimento experimental.

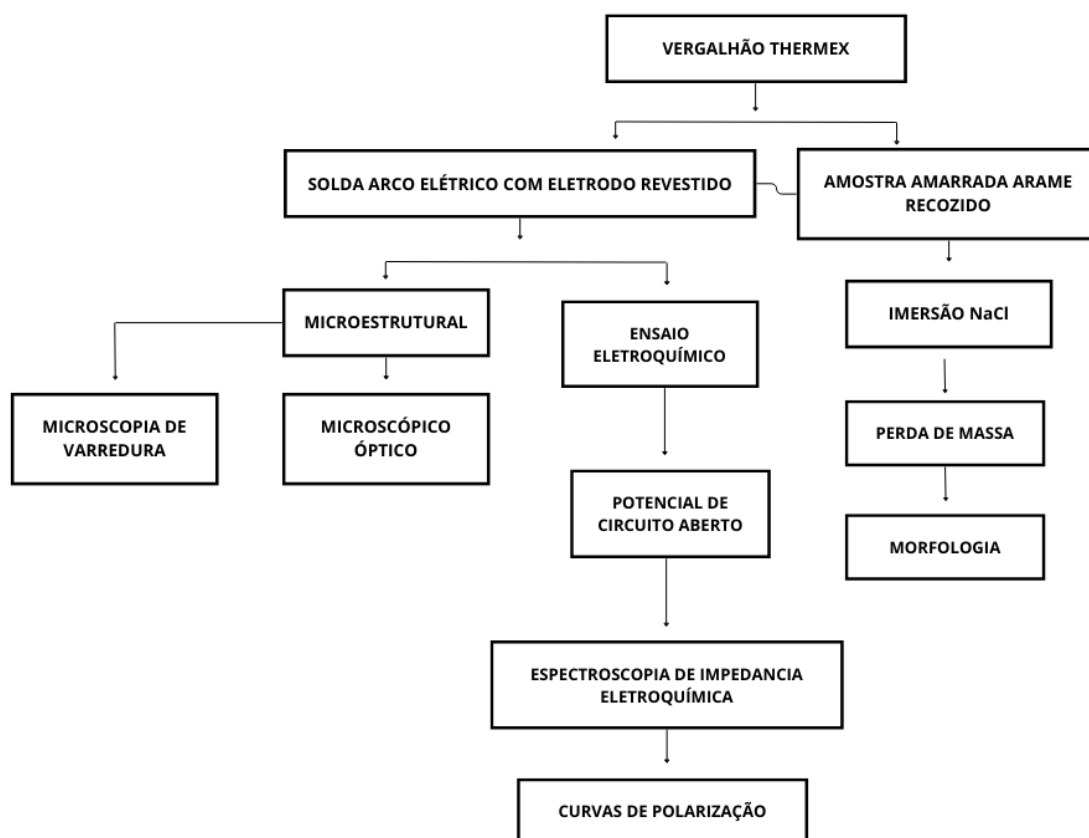
3.1 MATERIAIS

Para o experimento desta pesquisa foram utilizadas 40 amostras de vergalhões com diâmetro de 12,5mm, os vergalhões foram selecionados de acordo com a NBR 7480 de 2007 que estabelece os critérios dos aços destinados a armadura para estruturas de concreto armado. Foram utilizados vergalhões Gerdau Thermex.

3.2 MÉTODOS

Este trabalho foi realizado conforme a sequência apresentada no fluxograma abaixo:

Figura 22 - Fluxograma

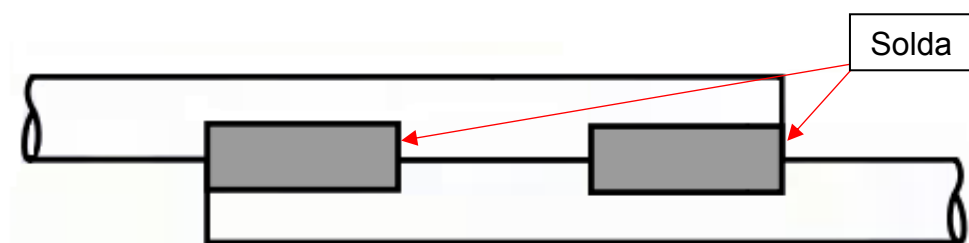


Fonte: Próprio Autor

Para o experimento foi utilizado o vergalhão soldável GG 50, com diâmetro de 12,5 mm. Um vergalhão de 12 metros foi cortado em partes menores de 195 mm cada.

Os vergalhões Thermex soldados foram unidos por traspasse conforme determina a NBR 6118. As junções foram realizadas com dois cordões longitudinais, cada um deles com comprimento de 62,5mm ($5 \times \varnothing$), afastados em 62,5mm ($5 \times \varnothing$). A peça soldada ao ser finalizada estará em acordo com a figura abaixo:

Figura 23 - Armadura por traspasse



Fonte: Adaptado de NBR 6118, (2003), pág. 46.

As amostras foram divididas em dois grupos: 20 amostras foram submetidas a solda e 20 amostras simples não foram soldadas. Para marcar o início e o fim do cordão de solda, foi realizado o pontejamento utilizando a máquina de solda inversora Tig DC Boxer Tigon 220.

Figura 24 - Máquina de solda utilizada para realizar o pontemaneto nos vergalhões



máquina de solda inversora Tig
DC Boxer Tigon 220

Fonte: Próprio autor.

Figura 25 - Vergalhões marcados para iniciar o processo de soldagem



Fonte: Próprio autor

Posteriormente os vergalhões foram soldados com a máquina Merkle Balmer Super 180 Geração 4. Neste processo de soldagem foi utilizado o eletrodo 6013 de diâmetro 2,5mm. A máquina foi ajustada em 180 amperes para garantir boa soldabilidade no vergalhão.

Figura 26 - Máquina de Solda Merkle Balmer Super 180 Geração 4



Fonte: Próprio autor

Os vergalhões do grupo A foram soldados, conforme a imagem abaixo:

Figura 27 - Vergalhões submetidos ao processo de soldagem



Fonte: Próprio autor

Após a soldagem dos vergalhões, eles novamente foram subdivididos em quatro grupos, de acordo com a tabela abaixo:

Quantidade	Corpo de prova	Ensaio
Tabela 8 - Quantitativo corpo de prova		
10 – Amostra submetida a solda		Imersão 3,5% NaCl
10 – Amostra não submetida a solda		Imersão 3,5% NaCl
10 – Amostra submetida a solda		Não serão imersas em NaCl
10 – Amostra não submetida a solda		Não serão imersas em NaCl

Fonte: Próprio autor

3.2.1 Preparação das amostras

Os corpos de provas que foram submetidos ao processo de soldagem passarão a ser chamados de grupo A, e os corpos de prova que não foram submetidos ao processo de soldagem serão denominados de grupo B.

Para o ensaio de Perda de massa, foram preparadas 24 amostras, sendo 12 pertencentes ao grupo A (soldadas) e 12 ao grupo B (amarradas). Foram retiradas quatro amostras de cada grupo a cada mês, ao longo de três meses de imersão. No primeiro mês, foram retiradas quatro amostras do grupo A e quatro do grupo B. No segundo mês, mais quatro amostras de cada grupo foram retiradas. No terceiro mês, as amostras remanescentes, ou seja, quatro do grupo A e quatro do grupo B, foram retiradas para análise.

Para o ensaio eletroquímico, foram preparadas seis amostras, sendo três do grupo A (soldadas) e três do grupo B (amarradas).

A análise das amostras utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e o microscópio óptico foram realizadas em duas etapas, sendo antes e depois do processo de corrosão. Dessa forma, foi possível comparar as características microestruturais das amostras antes e depois da corrosão, tanto no grupo A quanto no grupo B. Essa análise auxiliou na avaliação dos efeitos da corrosão nos materiais e na identificação de possíveis alterações na estrutura após o teste de imersão em NaCl

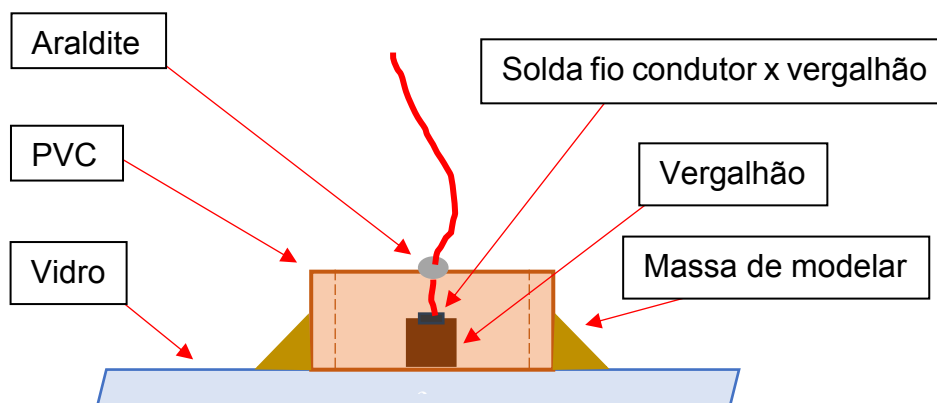
Ambos os grupos foram submetidos a diversos processos de limpeza a fim de remover defeitos de processos anteriores, nivelando as áreas superficiais das amostras para a realização das etapas posteriores.

3.2.2 Processo de embutimento

As amostras dos grupos A e B que foram analisadas pelo MEV, microscópio óptico e submetidas aos ensaios eletroquímicos passaram por um processo de embutimento, visando a criação de eletrodos para garantir o contato adequado entre as peças em análise e o equipamento utilizado nos testes.

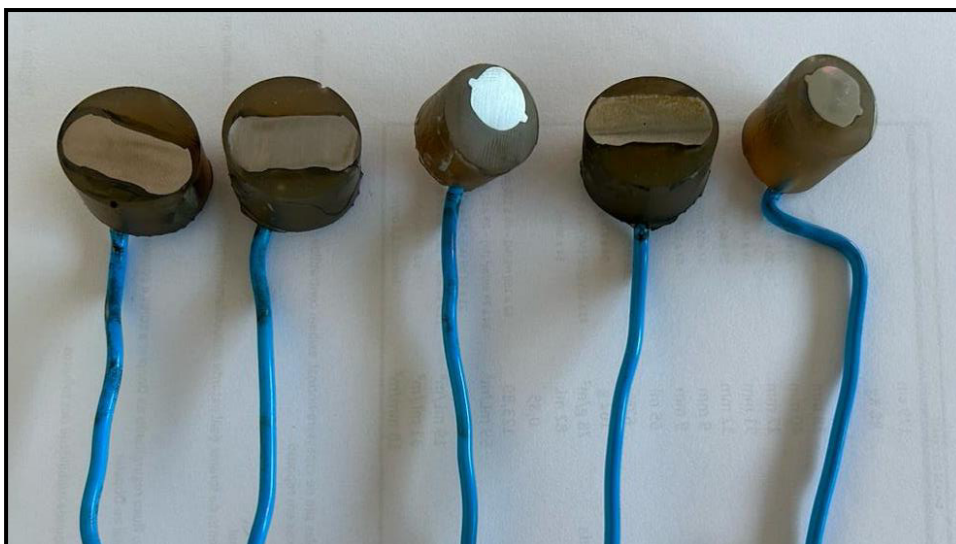
Para preparar os eletrodos, ambos os grupos novamente foram cortados em pequenas amostras de 20 mm. Após foram selecionadas superfícies planas e revestidas com papel ofício. Em seguida, realizou-se a brasagem das amostras do vergalhão a um cabo rígido de 2mm utilizando estanho. Após a brasagem, o eletrodo foi posicionado em um molde de PVC com um diâmetro de 25 mm e altura de 20 mm. Nas bordas inferiores do molde, aplicou-se massa de modelar para evitar vazamentos da resina poliéster que seria adicionada posteriormente. O processo de cura da resina foi realizado com o auxílio de um catalisador, seguindo as proporções adequadas, e levou aproximadamente 3 horas. Na figura 29 é possível observar parcialmente as amostras embutidas.

Figura 28 - Representação do processo de embutimento



Fonte: Próprio autor.

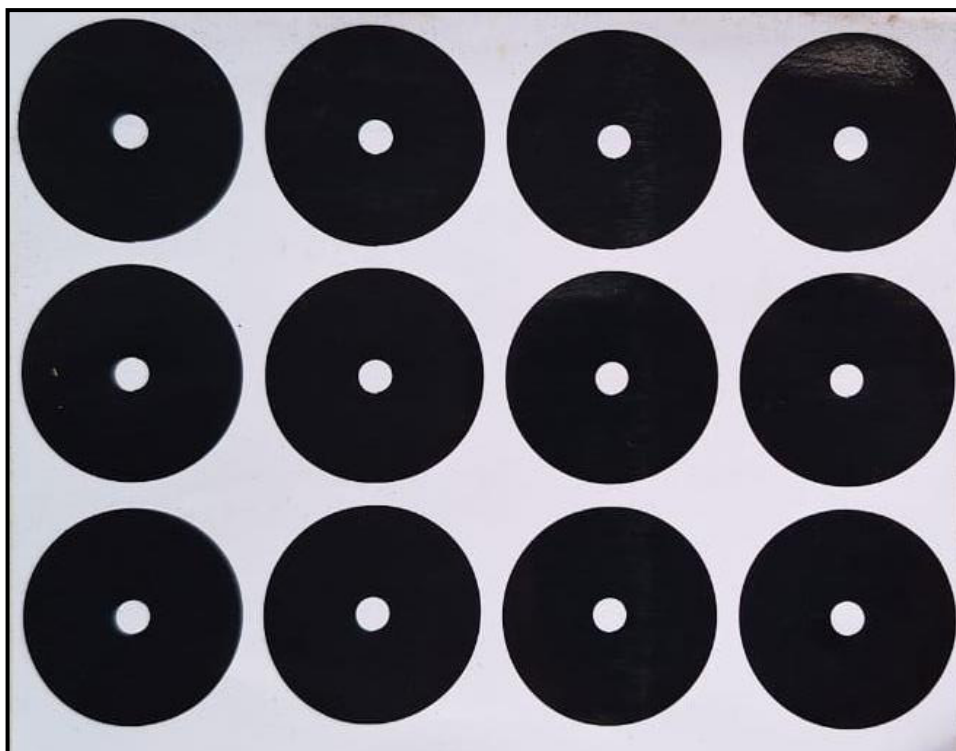
Figura 29 - Amostras embutidas



Fonte: Próprio Autor.

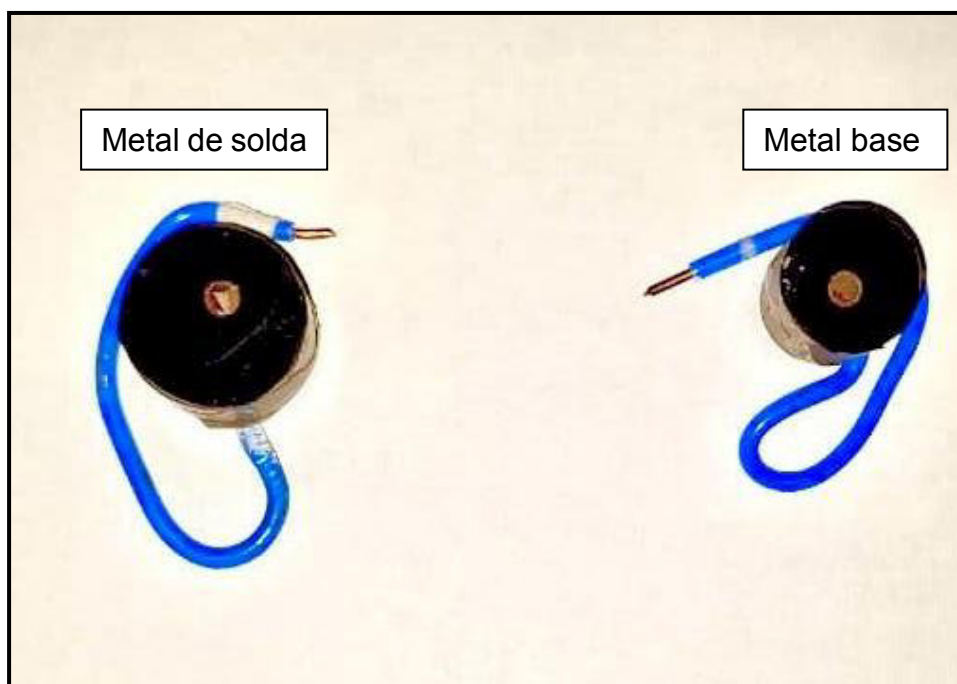
Para os ensaios eletroquímicos foi utilizado adesivo de PVC para isolar o cordão de solda e o metal base, permitindo a análise separada dessas regiões. Essa abordagem garantiu uma área de análise definida e facilitou a obtenção de dados específicos para cada região. O orifício do adesivo possui diâmetro de 5mm. O uso dos adesivos proporcionou uma delimitação precisa das áreas de interesse, permitindo uma análise mais detalhada e a realização de cálculos eletroquímicos com maior precisão.

Figura 30 - Adesivos PVC utilizados no ensaio eletroquímico



Fonte: Próprio Autor.

Figura 31 - Adesivos PVC aplicados nas amostras



Fonte: Próprio Autor.

Na figura acima, pode-se visualizar as amostras preparadas para o ensaio eletroquímico, nas quais os adesivos foram aplicados, expondo as áreas específicas de interesse para a análise.

3.2.3 Lixamento e polimento

Após a etapa de embutimento, iniciou-se o processo de lixamento, utilizando uma variedade de materiais abrasivos. Esse processo baseia-se na utilização progressiva de lixas de carbetto de silício com granulometrias crescentes, especificamente 120, 220, 400, 600 e 2.000. Cada amostra foi submetida a todas as lixas, com a lixa de granulometria 120 sendo a primeira utilizada devido ao seu poder de desbaste mais agressivo, destinado à remoção de defeitos oriundos dos processos de fabricação e corte dos corpos de prova. Após o uso de cada lixa, a amostra foi girada em 90° e o processo foi repetido com a lixa subsequente, até que todos os riscos provenientes da etapa anterior fossem eliminados. Esse procedimento foi repetido até que todas as granulometrias de lixas fossem empregadas.

Após a etapa de lixamento, os corpos de prova foram submetidos a uma limpeza meticulosa utilizando álcool absoluto. Essa limpeza teve como objetivo remover qualquer resíduo ou impureza que pudesse comprometer a qualidade da superfície preparada.

Após a limpeza, os corpos de prova foram secos rapidamente com o auxílio de ar quente. A secagem rápida evita a exposição ao ambiente evitando a ocorrência de inicialização de corrosão na superfície das amostras.

Para proteger as amostras da exposição ao ar ambiente, cada corpo de prova foi cuidadosamente envelopado com plástico filme. Essa medida de proteção ajuda a evitar a contaminação da superfície preparada e garante que

as amostras mantenham sua integridade durante as etapas posteriores da pesquisa.

Essas etapas de limpeza, secagem e envelopamento foram essenciais para garantir uma superfície plana e livre de impurezas, proporcionando condições ideais para as etapas subsequentes do experimento.

Para as amostras que foram analisadas por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), utilizou-se uma boina para acabamento final, usando abrasivo a base de alumina com granulometria de 1 μm , e 0,5 μm para ambos os grupos, o processo foi realizado com lubrificação por meio de álcool 96%. O processo teve duração de 1 hora para cada amostra.

3.2.4 Limpeza das amostras – ensaio perda de massa

As peças inicialmente foram submetidas a uma limpeza com sabão neutro e escovação manual. Em seguida, utilizou-se um agitador magnético modelo 752A, com aquecimento de 650W e frequência de 60Hz, alimentado com 230 V (acompanhado de barra magnética 9x25mm) da marca Fisatom.

O agitador magnético foi utilizado para misturar a água destilada com hidróxido de sódio, resultando em uma solução final com concentração de 10% de hidróxido de sódio. Os vergalhões foram submersos na solução e mantidos por 1 hora, durante as quais o calor gerado foi monitorado com auxílio de um termômetro digital. As amostras foram submetidas a um processo de limpeza por meio de banho ultrassônico de imersão em hidróxido de sódio com a concentração de 10% por 1 hora para remover resíduos decorrentes do processo de fabricação e armazenamento, tais como óleos, gorduras e sujeiras.

Posteriormente as peças foram imersas em uma solução de 3% de nital (ácido nítrico e álcool absoluto) por 10 minutos, com o intuito de remover qualquer resquício de corrosão.

Figura 32 - Hidróxido de Sódio PA



Fonte: Próprio autor

Para reforçar a limpeza do produto de corrosão que havia na superfície do vergalhão, foi realizado um banho ultrassônico em imersão de ácido nítrico com a concentração de 2%, o tempo de imersão foi de 15 segundos para cada amostra.

Figura 33 - Equipamento de Banho Ultrassônico Com Aquecimento utilizado



Fonte: Próprio autor

Por fim as amostras foram submetidas a outro banho ultrassônico de imersão em álcool etílico absoluto PA por 15 minutos, visando remover quaisquer resíduos dos processos anteriores e garantir a completa limpeza das amostras. Depois dessa etapa as peças foram secas com um soprador de ar térmico.

3.2.5 Caracterização eletroquímica

O estudo empregou o ensaio de imersão em cloreto de sódio (NaCl) conforme as diretrizes da norma ASTM G31, que estabelece os procedimentos para esse tipo de ensaio. A solução eletrolítica utilizada consistiu em uma concentração de 3,5% de NaCl em peso, a fim de simular as propriedades eletroquímicas da água do mar, com o pH da solução igual a 6. Os ensaios foram conduzidos empregando uma célula eletroquímica convencional de três eletrodos. Os eletrodos dos vergalhões em estudo foram utilizados como eletrodo de trabalho, uma folha de platina (Pt) com 1 cm² de área foi utilizada como contraeletrodo, e um eletrodo prata/cloreto de prata (Ag/AgCl) imerso em solução saturada de KCl serviu como eletrodo de referência.

Os ensaios eletroquímicos foram realizados utilizando um potenciostato da marca PalmSense, modelo PalmSenses4, e foram controlados pelo software PSTrace 5.9. Foi necessário um tempo aproximado de duas horas para atingir o potencial de circuito aberto em regime estacionário nas amostras que apresentaram uma interação significativa com o eletrólito.

Foram realizadas as verificações para determinação do potencial de corrosão (E_{corr}) dos vergalhões ensaiados e serão comparados seus resultados. O ensaio de Potencial de Circuito Aberto é uma técnica qualitativa, que fornece informações relacionadas a probabilidade de corrosão, ou seja, não é possível avaliar o quanto está correndo, apenas se o processo corrosivo iniciou ou não e suas probabilidades. As amostras analisadas levaram

aproximadamente 2 horas para atingir um regime estacionário, onde os potenciais se estabilizaram

3.2.6 Espectroscopia de impedância eletroquímica

As amostras ensaiadas foram submetidas a espectroscopia de impedância eletroquímica para determinar as propriedades elétricas do material. Sendo este ensaio quantitativo, ou seja, trará resultados a respeito da cinética da corrosão. As curvas que representam a impedância do sistema, obtidas através da técnica de EIE, tiveram variação da frequência de oscilação entre 0,01 e 10000 Hz, utilizando uma amplitude de 10 mV.

3.2.7 Polarização potenciodinâmica

Os ensaios de polarização potenciodinâmica foram conduzidos como uma continuação dos ensaios mencionados anteriormente. Inicialmente, estabeleceu-se uma faixa de varredura de 500 mV, com 250 mV abaixo do potencial de circuito aberto (E_{ocp}) e 250 mV acima, com uma taxa de varredura de 1 mV/s. No entanto, após a realização de alguns testes, observou-se um deslocamento significativo do potencial de corrosão (E_{cor}) em relação ao E_{ocp} , resultando na quase eliminação da região anódica da curva. Como resultado, os ensaios finais foram realizados utilizando uma faixa de varredura de 500 mV abaixo do E_{ocp} e 500 mV acima.

3.2.8 Caracterização microestrutural

A técnica de Espectroscopia de Emissão Óptica por Energia Dispersiva de Raios X (EDS) no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) é predominantemente qualitativa, tornou-se necessário empregar a Espectroscopia de Emissão Óptica para obter uma medição precisa do teor de carbono presente no aço.

3.2.9 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A avaliação e caracterização dos efeitos da corrosão nas amostras após o período de imersão foram realizadas utilizando a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para identificar os elementos químicos presentes nos produtos de corrosão, foi empregada a técnica de espectroscopia de energia dispersiva (EDS). O equipamento utilizado foi o Jeol, modelo JSM-6610LV, equipado com uma microsonda de EDS. Esses procedimentos foram realizados no Centro de Microscopia Eletrônica da Zona Sul (CEME-SUL), localizado na Universidade Federal do Rio Grande (FURG).

3.2.10 Microscópio óptico

O microscópio óptico é um instrumento ótico amplamente utilizado para a observação e análise de objetos e amostras visíveis à luz visível. Composto por uma combinação de lentes, o microscópio óptico permite a ampliação e visualização detalhada do objeto em estudo. Uma fonte de luz integrada ilumina a amostra, possibilitando a visualização dos detalhes em maior escala.

Para obter uma melhor visualização dos grãos da amostra, foi realizado um ataque químico nas amostras. As amostras serão imersas por 20 segundos no Nital 3% (97% de Álcool Etílico e 3% de Ácido Nítrico), posteriormente as amostras foram cuidadosamente secadas com álcool etílico 96% com soprador de ar térmico, dessa forma, revelando importantes características microestruturais do material.

3.2.11 Perda de massa por imersão

Os ensaios de perda de massa foram realizados em conformidade com a norma ASTM G31, utilizando um eletrólito com concentração de 3,5% de NaCl em peso. Inicialmente, as amostras dos grupos A (soldadas) e B (amarradas) foram individualmente pesadas, registrando três valores de peso para cada amostra, a fim de obter a média e minimizar erros de medição. No entanto, a determinação da área de contato da superfície das amostras com o eletrólito apresentou desafios devido à geometria irregular das nervuras do vergalhão, bem como à morfologia resultante do processo de soldagem (nas amostras soldadas) e do arame enrolado (nas amostras amarradas).

Posteriormente, as amostras foram divididas em dois grupos principais: amostras amarradas e soldadas. Cada grupo foi subdividido em três subgrupos, correspondentes a diferentes períodos de exposição: um mês, dois meses e três meses. Para minimizar erros estatísticos, cada subgrupo consistiu em quatro exemplares, devidamente identificados e catalogados para fins de rastreabilidade e análise dos resultados. Os recipientes utilizados para imersão são de polipropileno.

Figura 34 - Pesagem das amostras



Fonte: Próprio autor

Figura 35 - Amostras posicionadas para o ensaio de imersão em NaCl



Fonte: Próprio autor.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 ENSAIO ELETROQUÍMICO

Os ensaios eletroquímicos foram conduzidos em uma solução de cloreto de sódio 3,5% em peso, com o objetivo inicial de determinar o potencial de circuito aberto (E_{ocp}). O E_{ocp} representa um estado de equilíbrio entre o material em estudo e o eletrólito. No contexto deste estudo, foi observado que as amostras analisadas levaram aproximadamente 2 horas para atingir um regime estacionário, onde os potenciais se estabilizaram. Os potenciais de circuito aberto encontrados foram: Metal de solda - 521mV, Metal base - 528mV e do arame recozido sendo - 425mV.

4.1.1 Espectroscopia de impedância eletroquímica

As amostras ensaiadas submetidas a espectroscopia de impedância eletroquímica determinaram as propriedades elétricas do material, ou seja, trará resultados a respeito da cinética da corrosão.

A técnica de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica, foi realizada em torno do E_{ocp} para evitar a polarização e, conseqüentemente, danos na amostra. Por meio dessa técnica, foi possível observar que os dois materiais analisados podem ser representados por circuitos equivalentes distintos.

Embora o valor do chi-squared não tenha atingido um valor tão baixo quanto o ideal, o fitting resultante do software abrangeu a maior parte do sinal apresentado no gráfico de Nyquist. É importante destacar que diversos circuitos

foram fitados, com base em curvas observadas em artigos científicos e na biblioteca do próprio software.

Considerando que os circuitos equivalentes são diferentes, cada um apresenta diferentes componentes eletrônicos, como; constante de fase da dupla camada (CPEdl), resistência a transferência de carga da dupla camada (Rtc), resistência do eletrólito (Rs), constante de Warburg (WD) e resistência a polarização (Rp) para os respectivos materiais, conforme apresentado na tabela abaixo:

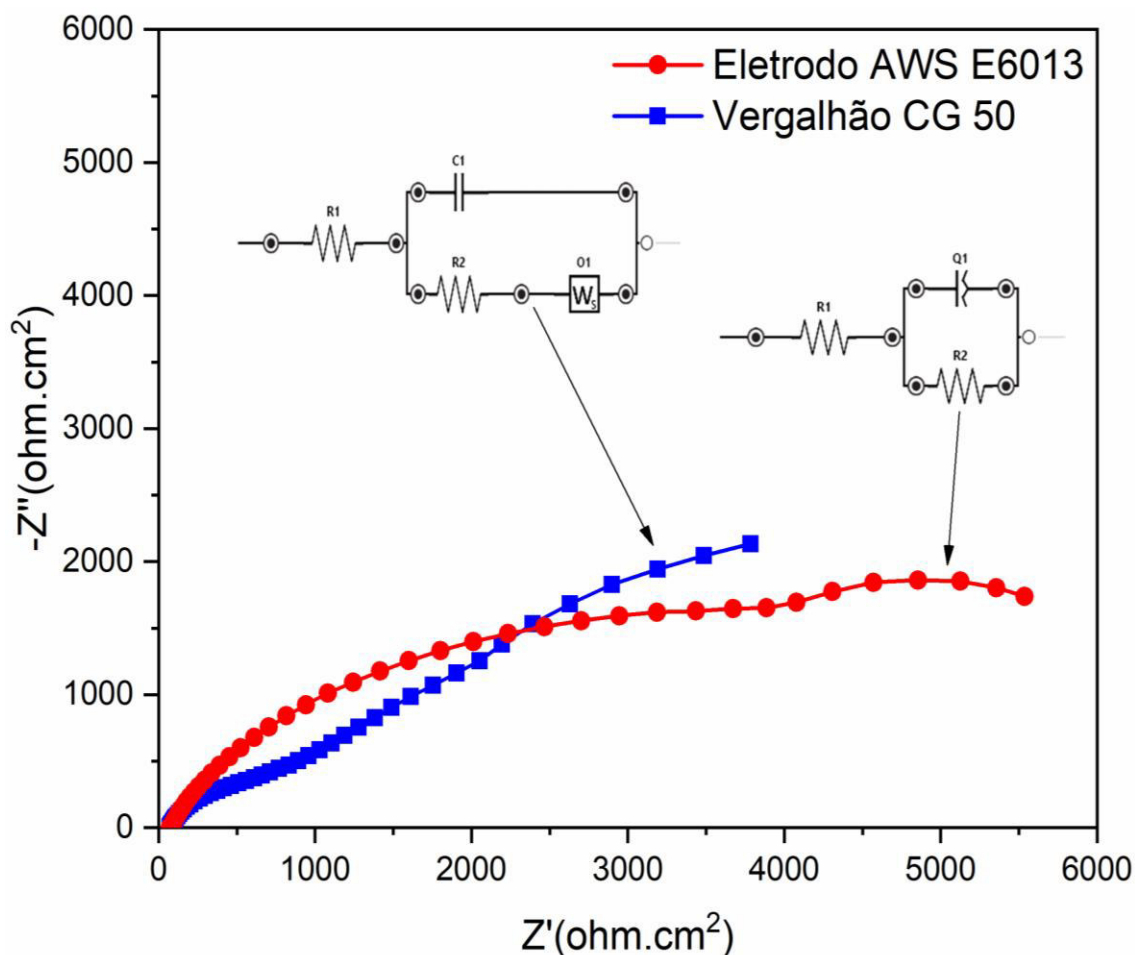
Tabela 9 - Componentes eletrônicos Impedância Eletroquímica

Element	AWS E6013	CG 50
Rs (Ω)	10.33	14.49
CPEdl (μT)	1000	-
CPEdl (ϕ)	0.573	-
Cdl (nF)	-	7,27E+07
Rct (Ω)	-	1,00E-03
WD (Ω)	-	0.161
WD ($\sqrt{s}$)	-	7.780
WD (ϕ)	-	0.667
Rp (Ω)	1382	160.8
Chi-Squared	0.0308	0.0021
terasões	249	496
I _{corr} (μA)	4,06E-02	3,05E-01
Taxa de corrosão (mm/Ano)	3.795	28.47

Fonte: Próprio Autor.

O diagrama de Nyquist apresentado abaixo ilustra as curvas que tiveram melhor fitting. As demais curvas individuais de cada amostra podem ser encontradas no Apêndice B.

Figura 36 - Diagrama de Nyquist



Fonte: Próprio Autor.

Foi observado um comportamento interessante relacionado a reatância capacitiva em função da queda da frequência. Foi observado que, na medida que a frequência diminui, a reatância capacitiva aumenta proporcionalmente.

Esse resultado sugere uma resposta eletroquímica mais eficiente em frequências mais baixas. A reatância capacitiva é uma medida da capacidade de armazenamento de carga em uma interface eletrodo-eletrólito. Portanto, o aumento proporcional da retenção capacitiva indica uma maior resistência ao fluxo de elétrons e conseqüentemente menor capacidade de corrosão.

4.1.2 Polarização potenciodinâmica

Foi realizada uma varredura de 500 mV, tanto abaixo como acima do E_{ocp} , com uma taxa de varredura de 1 mV/s. No ensaio de polarização potenciodinâmica, conforme representado na Tabela a seguir, é notável que as curvas medidas obtidas em triplicata para os materiais investigados exibiram uma notável similaridade. Ambos os materiais demonstraram potenciais muito próximos, sendo que o material de adição exibiu um comportamento ligeiramente mais nobre, com uma diferença de apenas 37 mV. Essa pequena discrepância minimiza a possibilidade de formação de um par galvânico.

Tabela 10 - Dados taxa de corrosão - Declives de Tafel

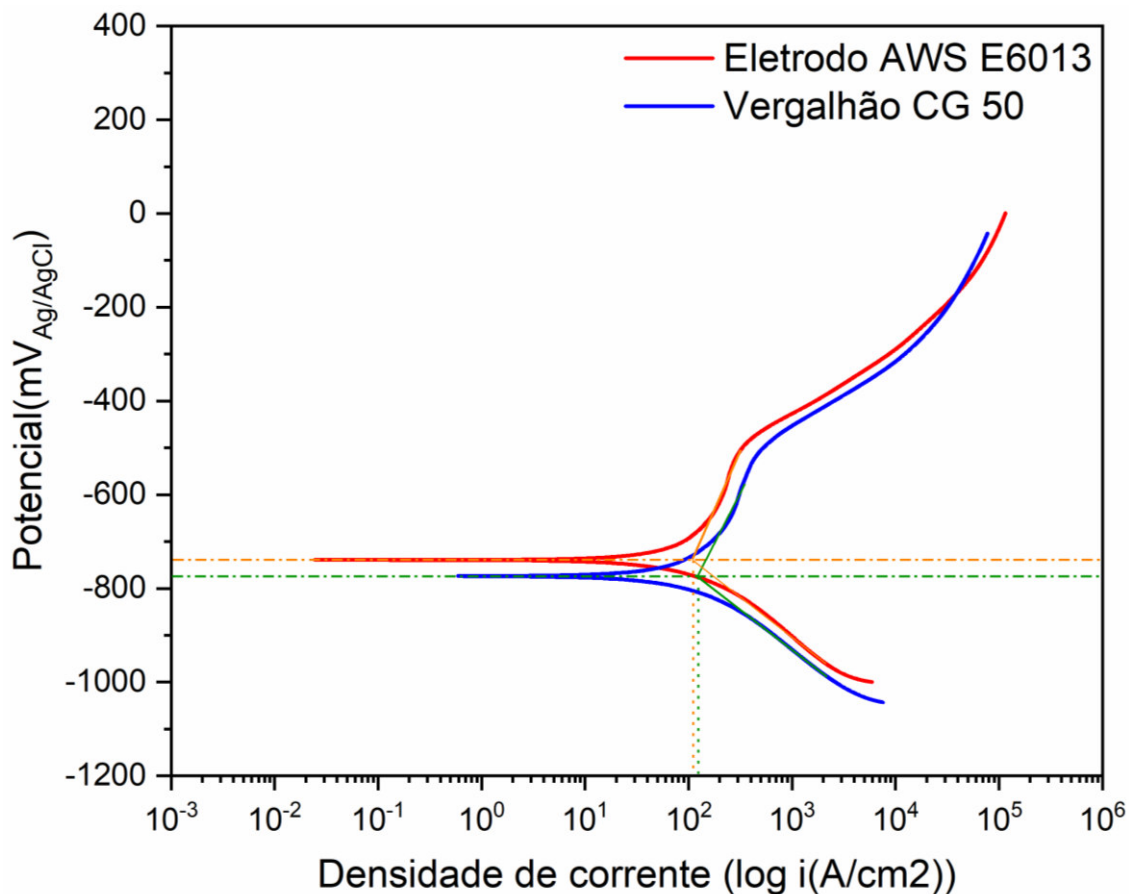
Declives de Tafel	AWS E6013	CG 50
E_{corr} (mV)	-737	-774
I_{corr} (μ A)	21.83	20.47
R. Polarização, Ω	2579	2397
β_a (V/Dec)	0.513	0.383
β_c (V/Dec)	0.173	0.160
Taxa de corrosão (mm/Ano)	2.039	1.913

Fonte: Próprio Autor.

Conforme mencionado anteriormente, a análise das curvas de polarização potenciodinâmica revelou uma proximidade significativa nos potenciais de corrosão entre o metal de solda e o metal base, o que indica uma minimização na formação de um possível par galvânico. Esse resultado é considerado positivo, pois indica que não há uma diferença substancial de potencial entre os materiais, reduzindo assim o risco de ocorrência de corrosão galvânica.

As curvas de polarização apresentadas abaixo ilustram as médias das três curvas obtidas no ensaio eletroquímico para o eletrodo e metal base. As curvas individuais de cada amostra podem ser encontradas no Apêndice C.

Figura 37 - Curvas de polarização sobrepostas



Fonte: Próprio autor.

Além disso, as correntes de corrosão (i_{corr}) foram observadas na mesma ordem de grandeza para ambos os materiais, indicando que eles possuem taxas de corrosão semelhantes. Esses resultados sugerem que o metal de adição selecionado é adequado e atende perfeitamente as exigências de sua aplicação.

4.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

A análise inicial da amostra foi realizada utilizando a técnica de Espectroscopia de Emissão Óptica, que é empregada para determinar o percentual de elementos da tabela periódica contidos no material, possibilitando a avaliação desses elementos em uma única amostra. Os resultados detalhando a presença dos elementos encontrados estão apresentados a seguir, expressos em percentual.

Tabela 11 - Resultados Espectroscopia de Emissão Óptica – Metal base

Fe	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
97,8	0,364	0,614	0,195	0,0076	0,0156	0,149	0,106	0,167

Fonte: Próprio autor

De acordo com o fabricante, a composição química do eletrodo utilizado está de acordo com a tabela abaixo:

Tabela 12 - Resultados Espectroscopia de Emissão Óptica – Eletrodo E6013

Fe	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
-	0,32 – 0,55	0,30	0,30	0,035	0,030	-	-	-

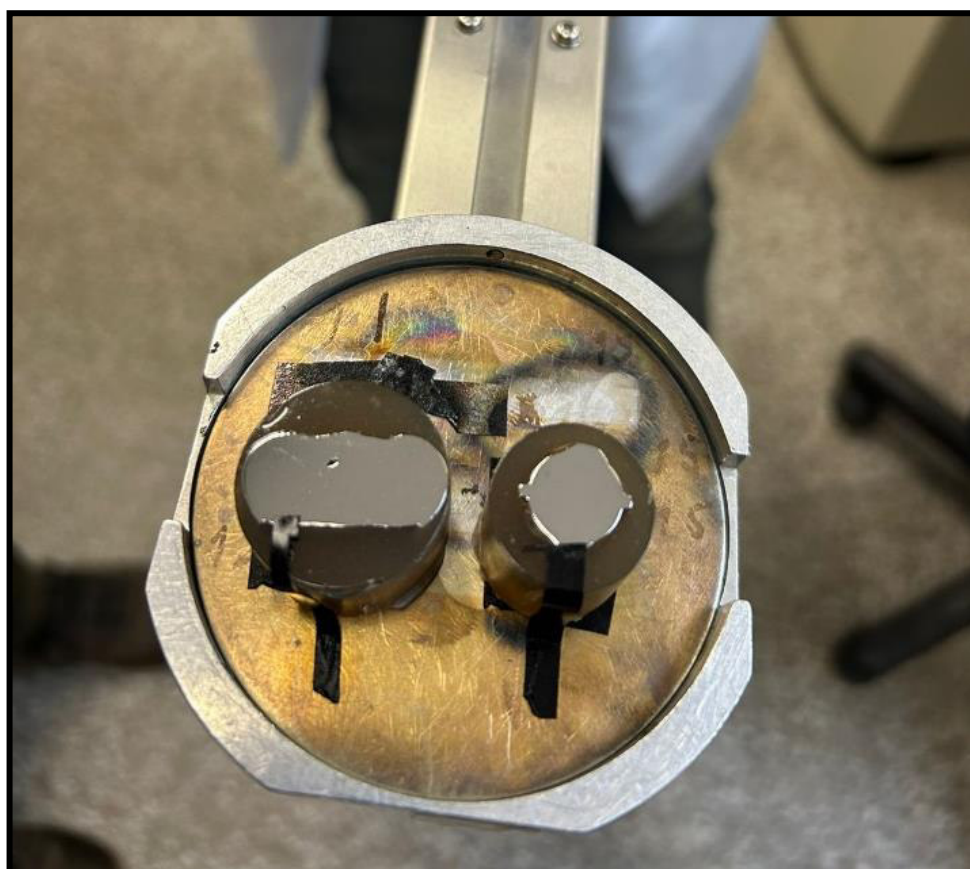
Fonte: Adaptado (Balmer, 2024).

De acordo com Chiaverini (1977) a inclusão de elementos como cromo, níquel, cobre e fósforo em teores relativamente baixos pode significativamente melhorar a resistência à corrosão atmosférica. Esses elementos, portanto, presentes no vergalhão em análise, sugerem que sua presença contribuiu para retardar os efeitos corrosivos.

Inicialmente, as amostras não corroídas, ou seja, aquelas que inicialmente foram separadas para apenas servir de amostras como sendo o estado antes da corrosão, foram observadas pelo MEV, em regiões estratégicas do vergalhão. Com o objetivo de obter informações mais precisas, foram selecionados pontos específicos na imagem obtida pelo MEV, os quais foram marcados por

quadrados em vermelhos. Através da técnica de Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS), foi possível realizar a detecção aproximada da composição química dos materiais. Essa técnica é comumente utilizada em conjunto com o microscópio, proporcionando uma técnica interessante para a identificação dos elementos químicos presentes na superfície da amostra. Segue abaixo imagem das amostras (não submetidas ao ensaio de corrosão) que serão verificadas no MEV e no microscópio ótico.

Figura 38 - Amostras preparadas para ensaio MEV e Microscópio Ótico

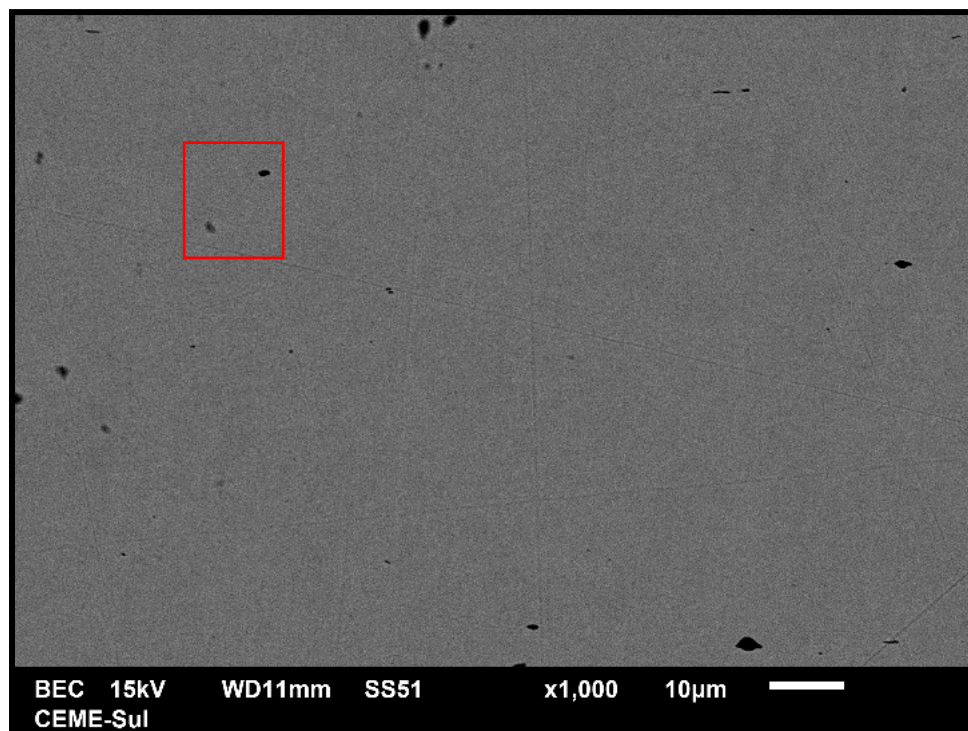


Fonte: Próprio autor

Abaixo seguem resultados das amostras não soldadas:

Nervos do vergalhão:

Figura 39- Amostra não soldada nervo x1K BEC



Fonte: Próprio autor

A EDS (Espectroscopia por Energia Dispersiva) trata-se de um ensaio semi-quantitativo, ou seja, fornece valores que servem como uma estimativa aproximada da composição química da amostra. No caso do vergalhão analisado, trata-se de um aço hipoeutetóide, onde todo o carbono encontra-se na fase da perlita.

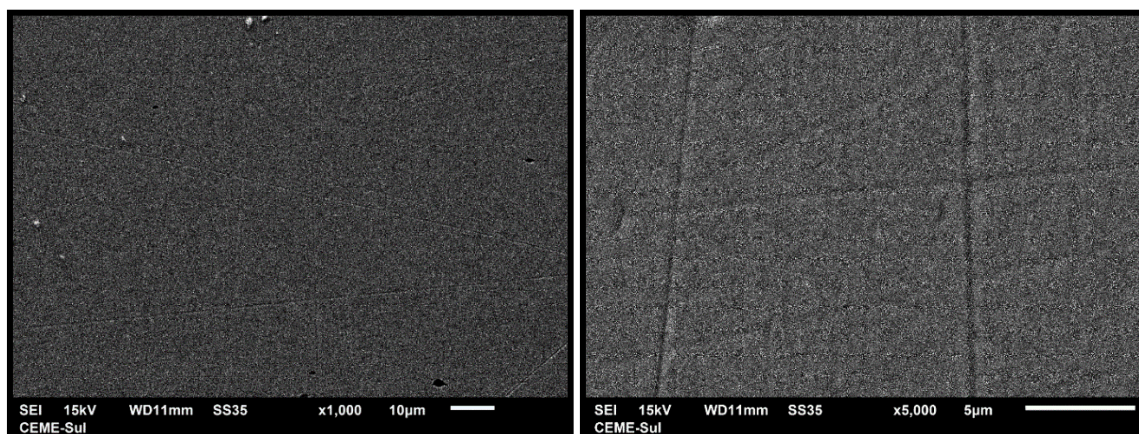
A tabela a seguir apresenta a composição percentual dos elementos químicos encontrados nos respectivos pontos marcados na imagem:

Tabela 13 - Composição química dos pontos marcados na imagem (círculo vermelho)

Carbono (C)	Alumínio (Al)	Silício (Si)	Enxofre (S)	Fósforo (P)	Manganês (Mn)	Ferro (Fe)
0,92%	0,12%	0,31%	0,07%	0,03%	0,93%	97,62%

Fonte: Próprio autor

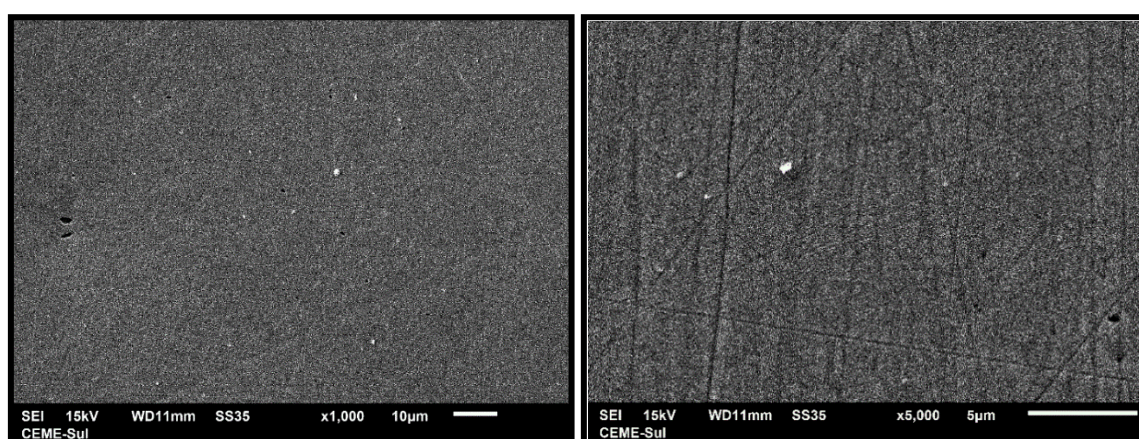
Figura 40 - Amostra não soldada nervo



Fonte: Próprio autor

AMOSTRA NÃO SOLDADA METAL BASE

Figura 41 - Amostra não soldada x1K



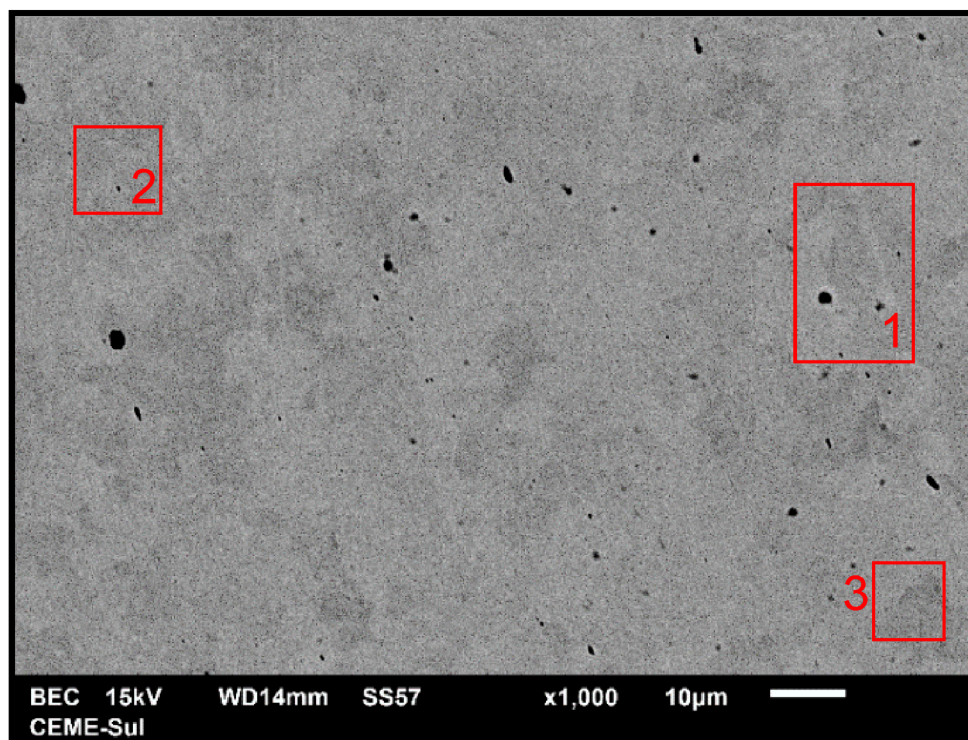
Fonte: Próprio autor

Foram identificadas apenas algumas inclusões e poros no material, o que era esperado, uma vez que o metal passou por um processo de polimento. Também foram observadas marcas de riscos, também provenientes do processos de polimento.

Abaixo seguem resultados das amostras soldadas:

Metal base:

Figura 42 - Metal Base SEC x1K BEC



Fonte: Próprio autor

A tabela a seguir apresenta a composição percentual dos elementos químicos encontrados nos respectivos pontos marcados na imagem:

Tabela 14 - Composição química dos pontos marcados na imagem (quadrado vermelho n. 1)

Carbono (C)	Silício (Si)	Fósforo (P)	Enxofre (S)	Alumínio (Al)	Manganês (Mn)	Ferro (Fe)
0,84%	0,22%	0,00%	0,05%	0,05%	0,80%	98,05%

Fonte: Próprio autor

Tabela 15 - Composição química dos pontos marcados na imagem (quadrado vermelho n. 2)

Carbono (C)	Silício (Si)	Fósforo (P)	Enxofre (S)	Alumínio (Al)	Manganês (Mn)	Ferro (Fe)
0,94%	0,24%	0,00%	0,14%	0,00%	0,96%	97,72%

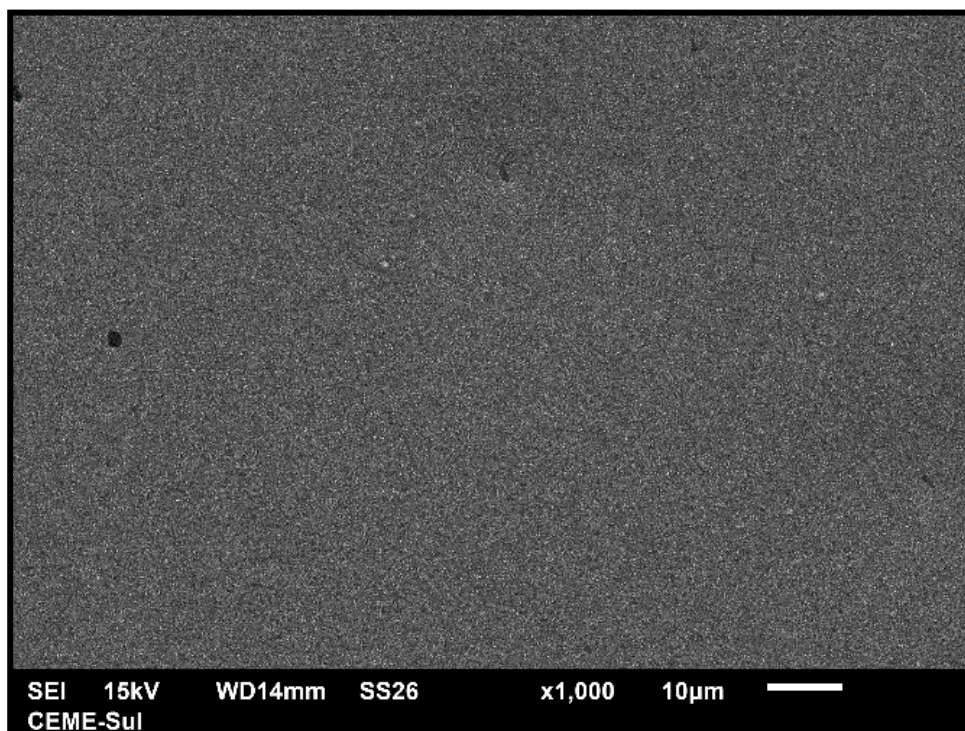
Fonte: Próprio autor

Tabela 16 - Composição química dos pontos marcados na imagem (quadrado vermelho n. 3)

Carbono (C)	Silício (Si)	Fósforo (P)	Enxofre (S)	Alumínio (Al)	Manganês (Mn)	Ferro (Fe)
1,17%	0,26%	0,00%	0,00%	0,00%	0,93%	97,64%

Fonte: Próprio autor

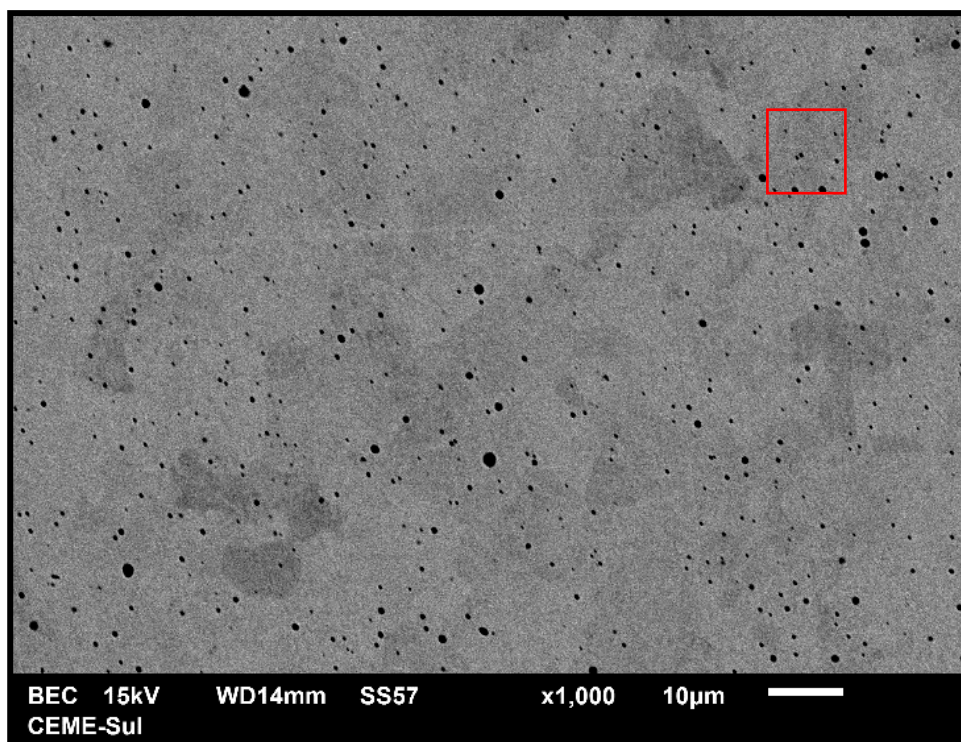
Figura 43 - Metal Base SEC x1K



Fonte: Próprio autor

Metal de solda:

Figura 44 - MS 1 Centro x1K BEC



Fonte: Próprio autor

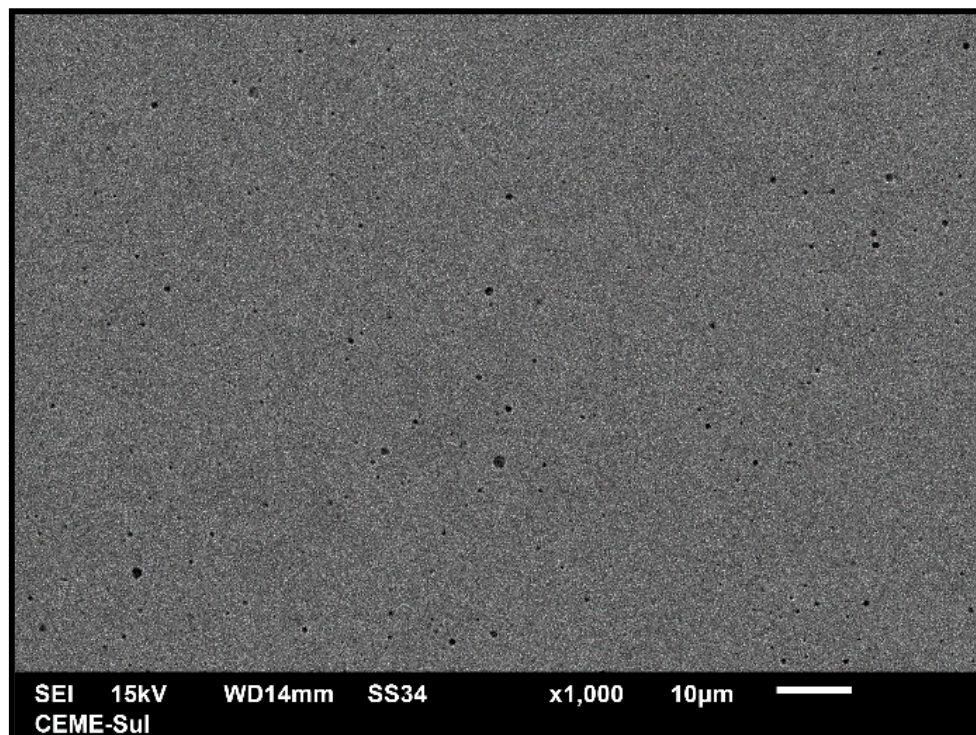
A tabela a seguir apresenta a composição percentual dos elementos químicos encontrados nos respectivos pontos marcados na imagem:

Tabela 17 - Composição química dos pontos marcados na imagem (quadrado vermelho)

Carbono (C)	Silício (Si)	Fósforo (P)	Enxofre (S)	Cromo (Cr)	Manganês (Mn)	Ferro (Fe)
0,77%	0,41%	0,08%	0,04%	0,00%	0,00%	98,69%

Fonte: Próprio autor.

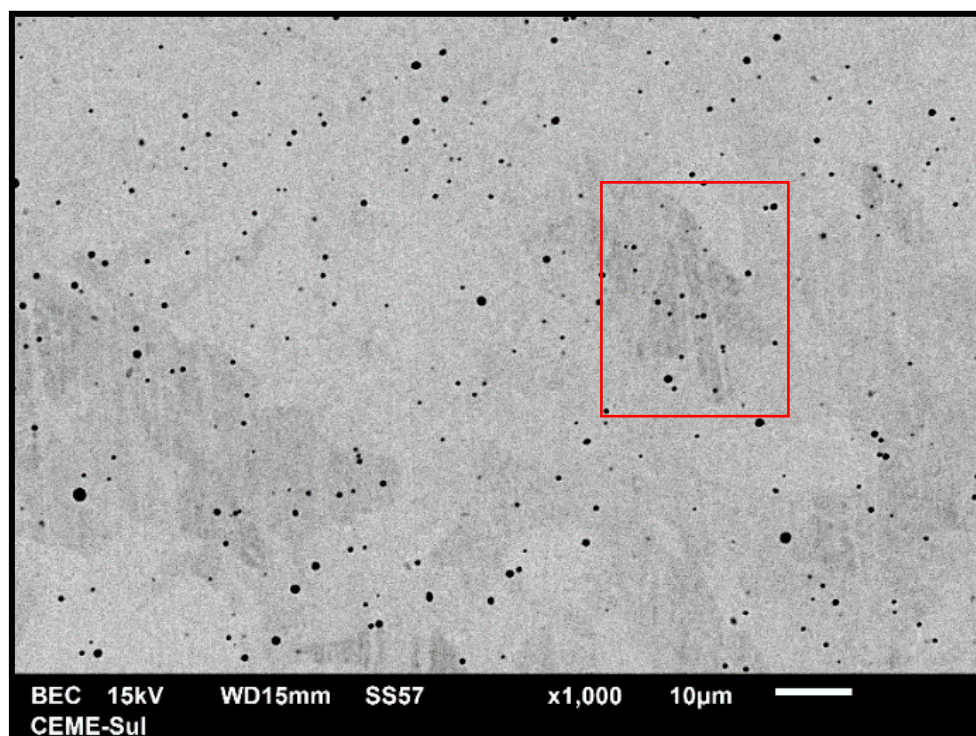
Figura 45 - MS 1 Centro x1K



Fonte: Próprio autor

Zona termicamente afetada:

Figura 46 - ZAC 1 Topo x1K BEC



Fonte: Próprio autor

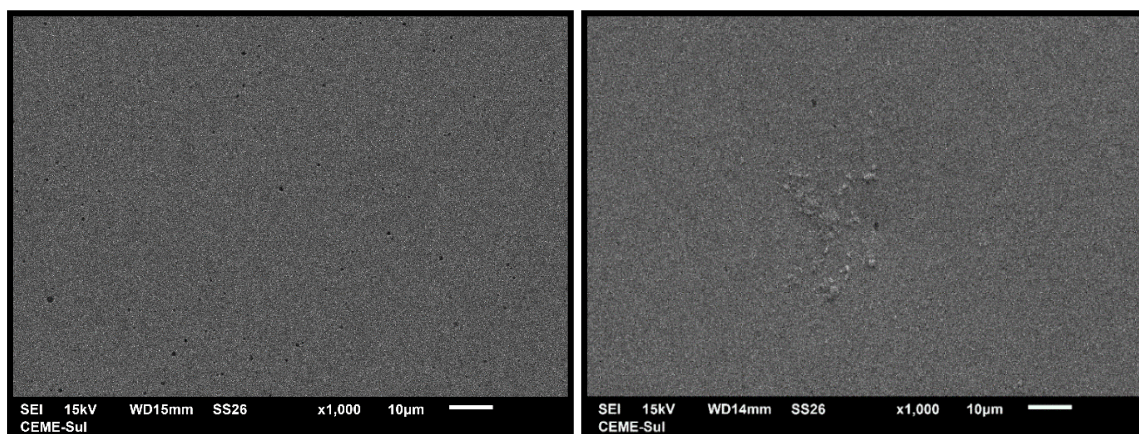
A tabela a seguir apresenta a composição percentual dos elementos químicos encontrados nos respectivos pontos marcados na imagem:

Tabela 18 - Composição química dos pontos marcados na imagem (quadrado vermelho)

Carbono (C)	Silício (Si)	Fósforo (P)	Enxofre (S)	Cromo (Cr)	Manganês (Mn)	Ferro (Fe)
0,75%	0,30%	0,01%	0,04%	0,00%	0,00%	98,89%

Fonte: Próprio autor

Figura 47 - Zac Topo e Centro respectivamente



Fonte: Próprio autor

ANÁLISE FACE VERGALHAO MEV:

Figura 48 - Amostras preparadas para ensaio MEV após corrosão



Fonte: Próprio autor

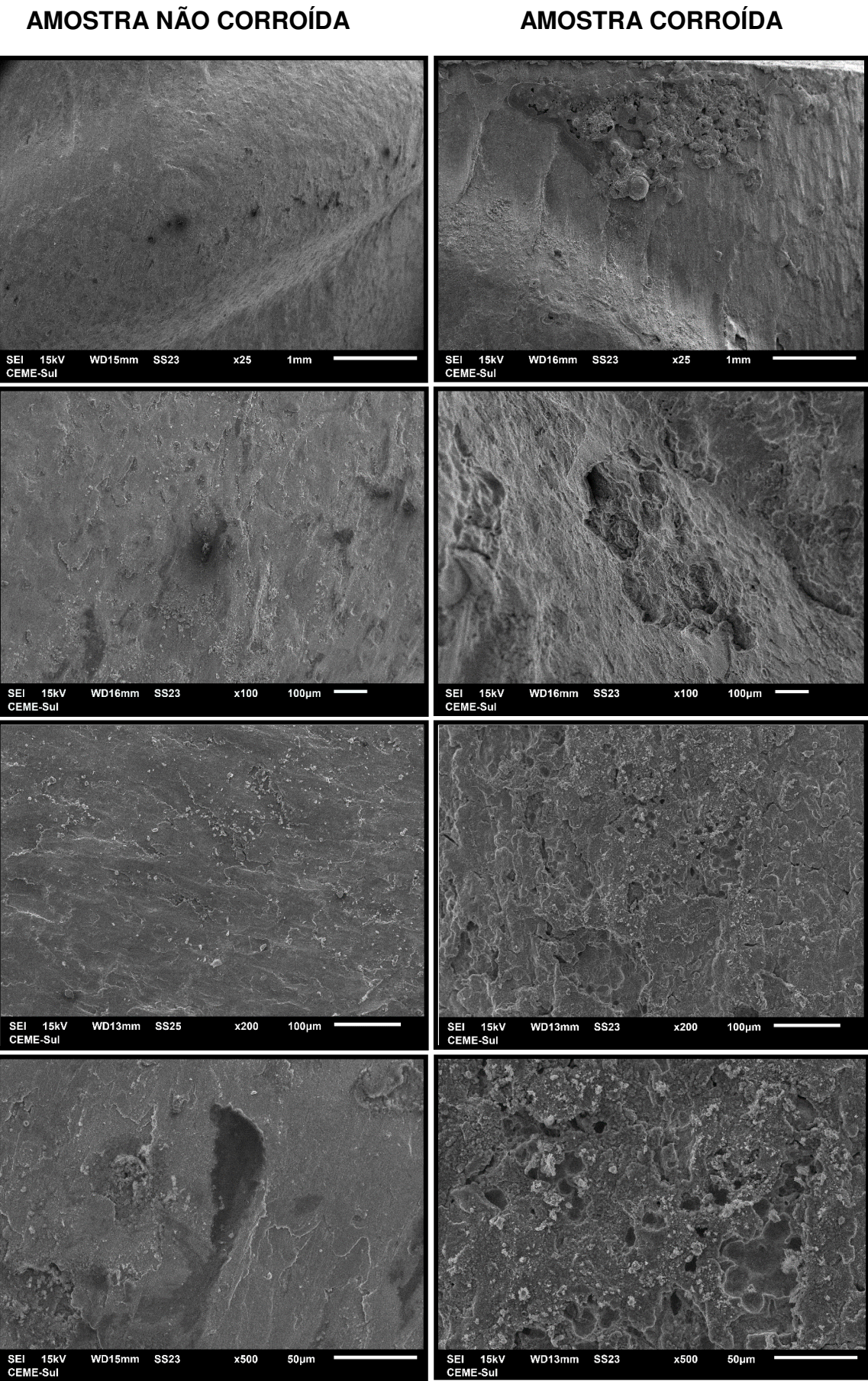
Figura 49 - Amostra preparada para ensaio MEV antes da corrosão

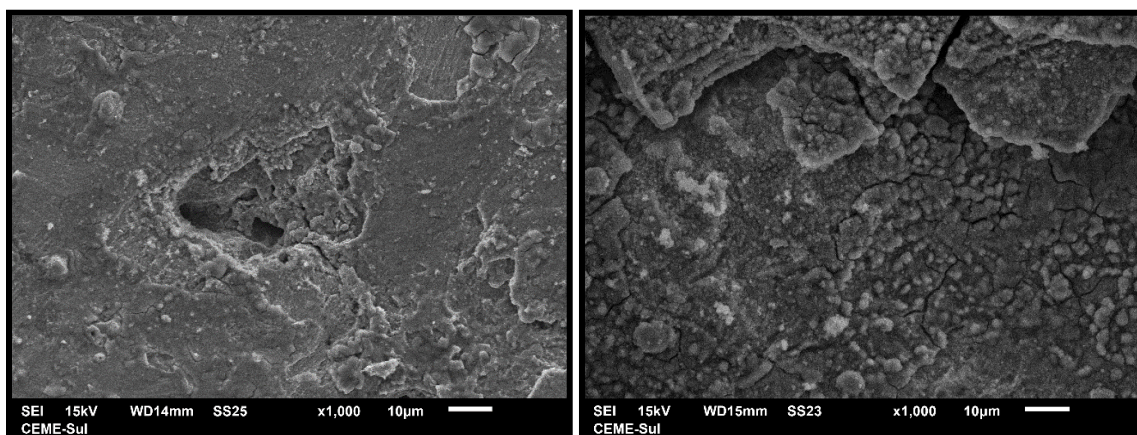


Fonte: Próprio autor

METAL BASE

Figura 50 - Amostras comparadas antes e após corrosão - MEV



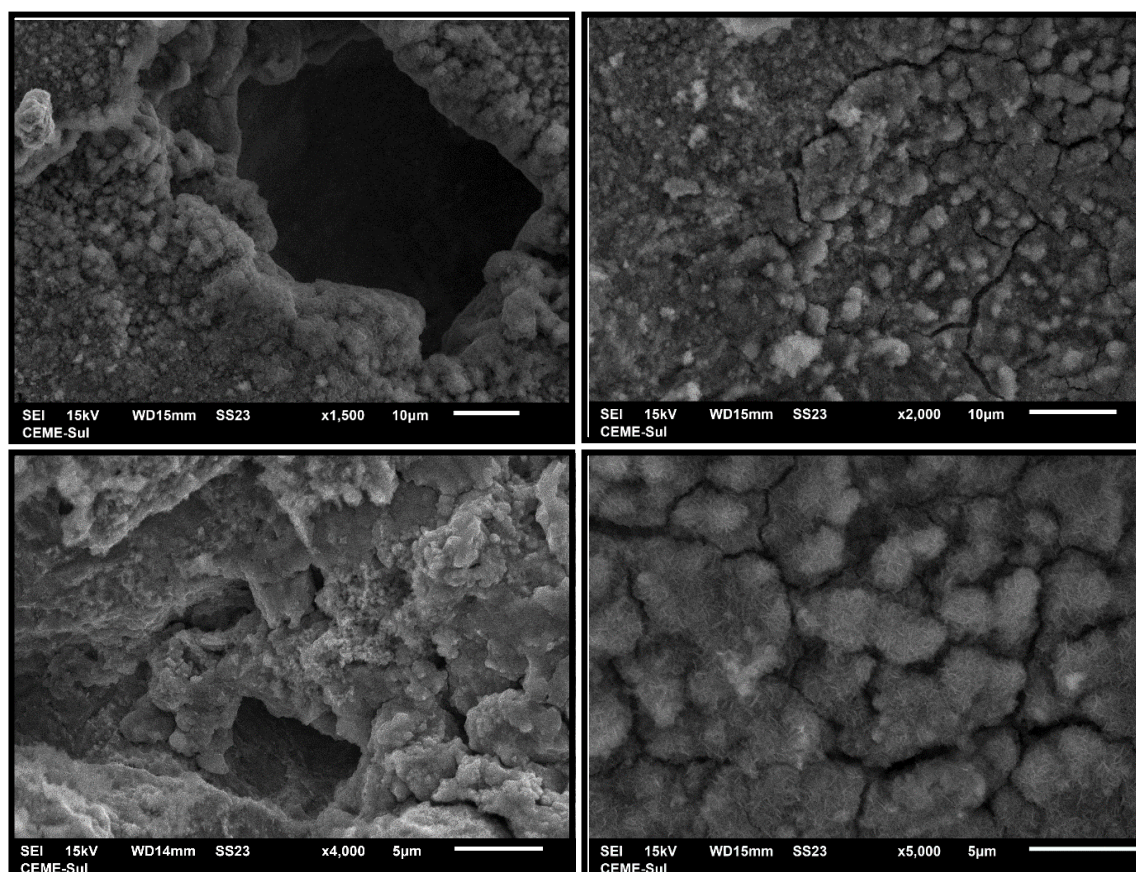


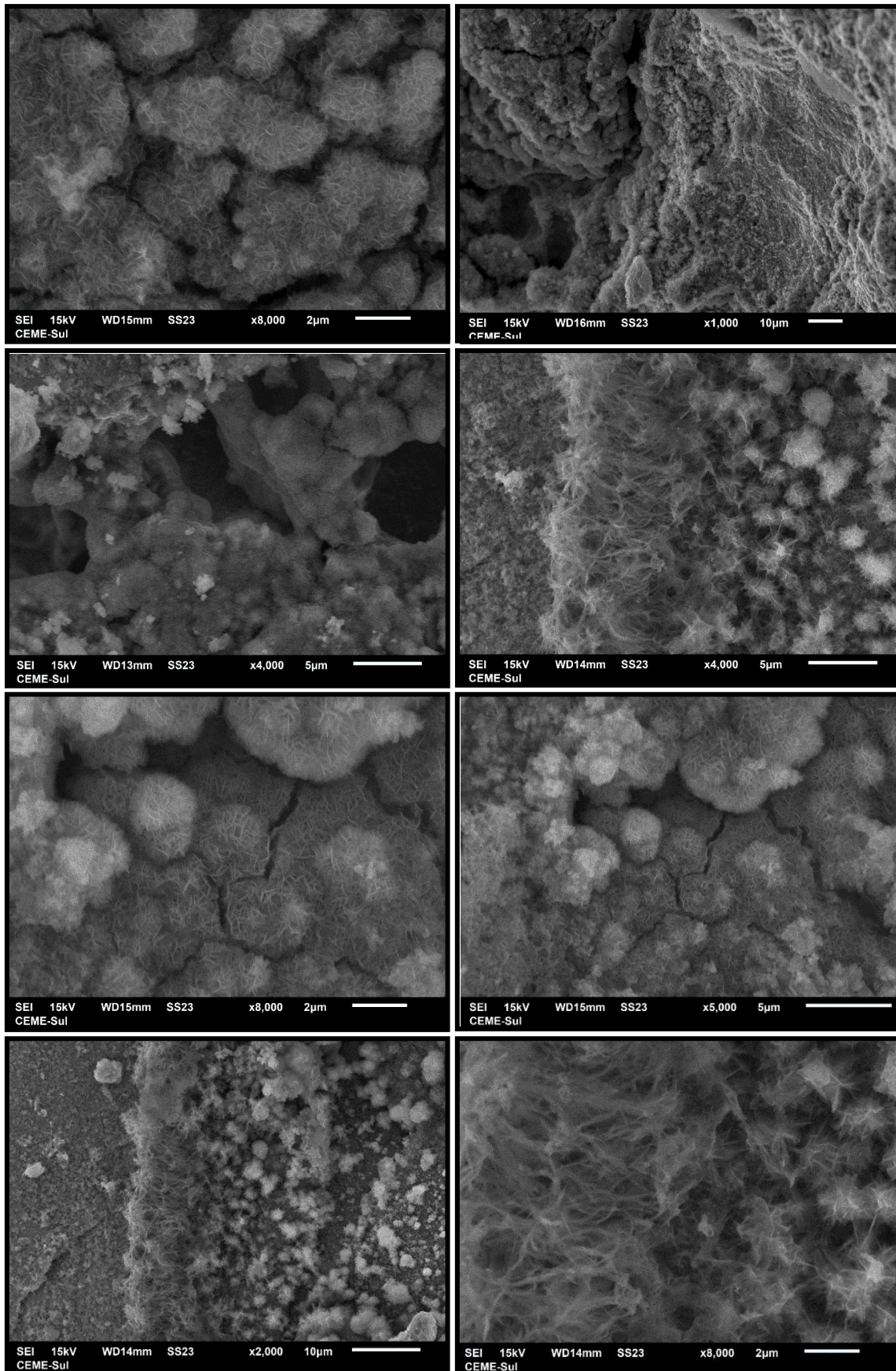
Fonte: Próprio autor

Na Figura 58, pode-se observar a evidência visual da corrosão superficial em amostras sujeitas e não sujeitas ao ensaio de imersão em NaCl. É notável uma maior incidência de corrosão nas amostras submetidas ao ensaio de corrosão, o que está em concordância com os resultados obtidos nos ensaios eletroquímicos.

AUMENTO NAS CORROSÕES

Figura 51 - Aumento em focos de corrosão

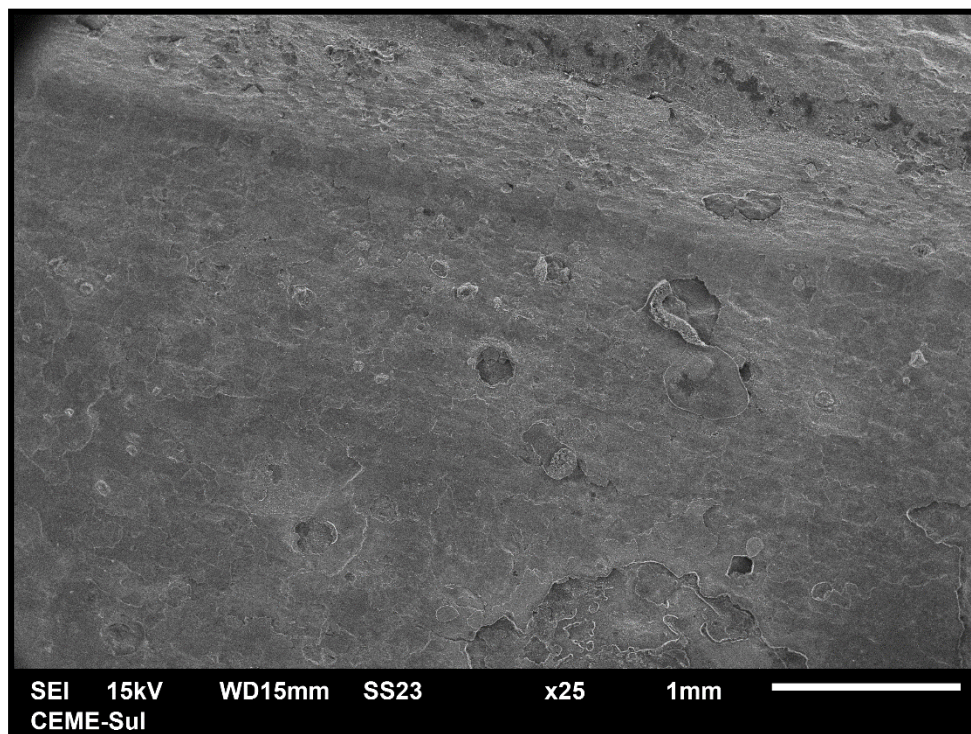




Fonte: Próprio autor

Na imagem abaixo, com uma aproximação de 25 vezes, é possível verificar um foco de corrosão específico.

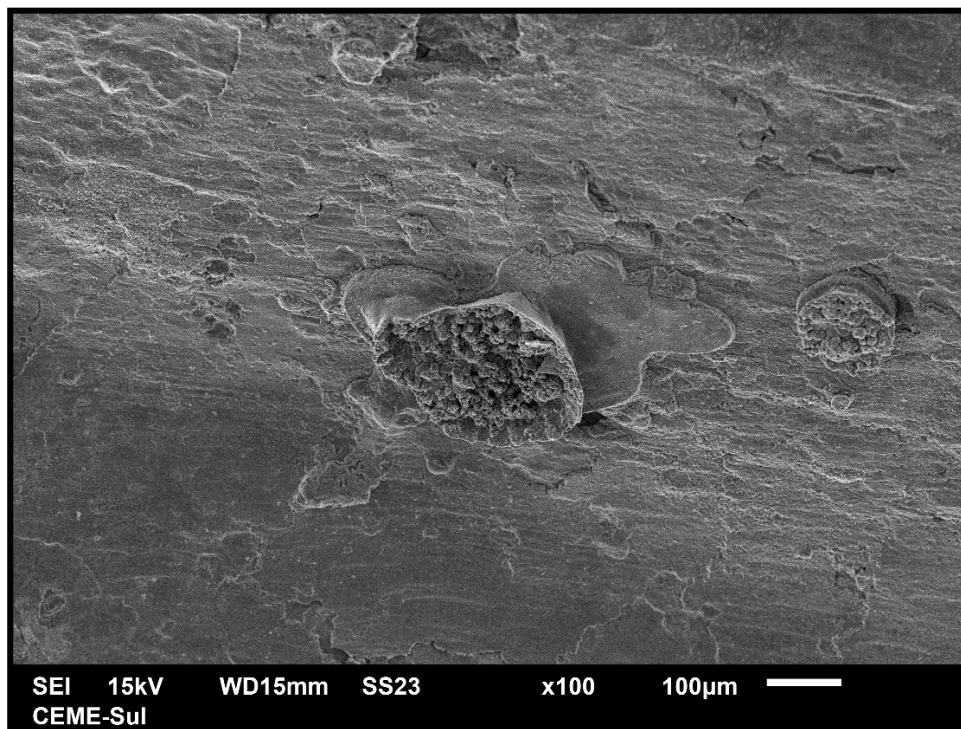
Figura 52 - Foco de corrosão 25x



Fonte: Próprio autor

A imagem abaixo trata-se da mesma região acima observada, porém, agora com uma aproximação de 100x.

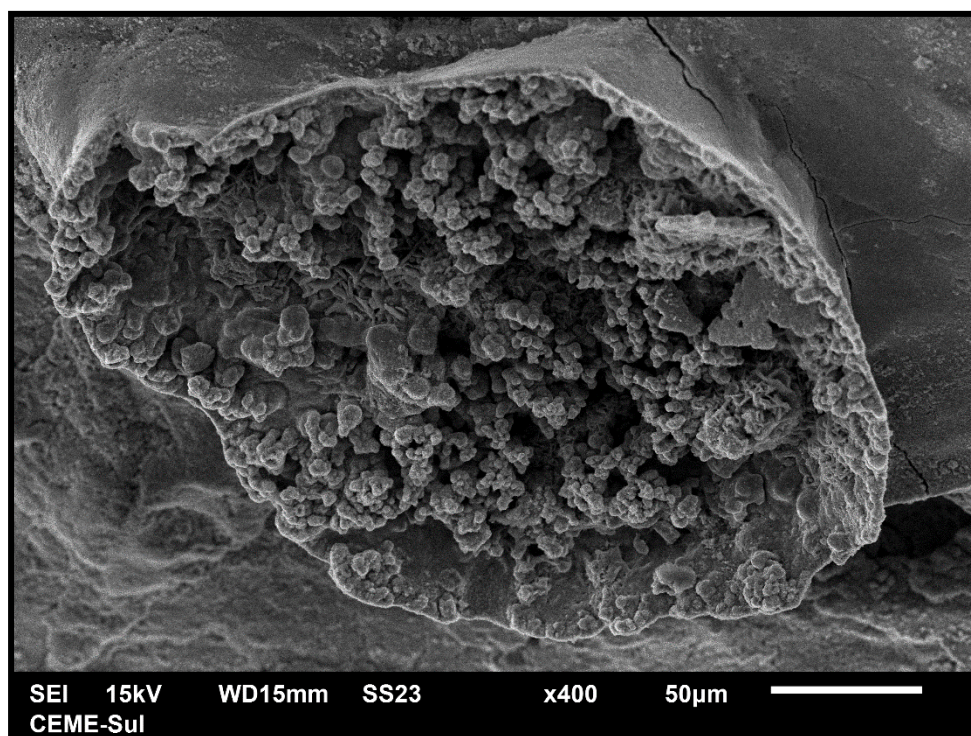
Figura 53 - Foco de corrosão 100x



Fonte: Próprio autor

A mesma imagem supracitada demonstra os “focos de corrosão” em uma aproximação de 400x:

Figura 54 - Foco de corrosão 400x



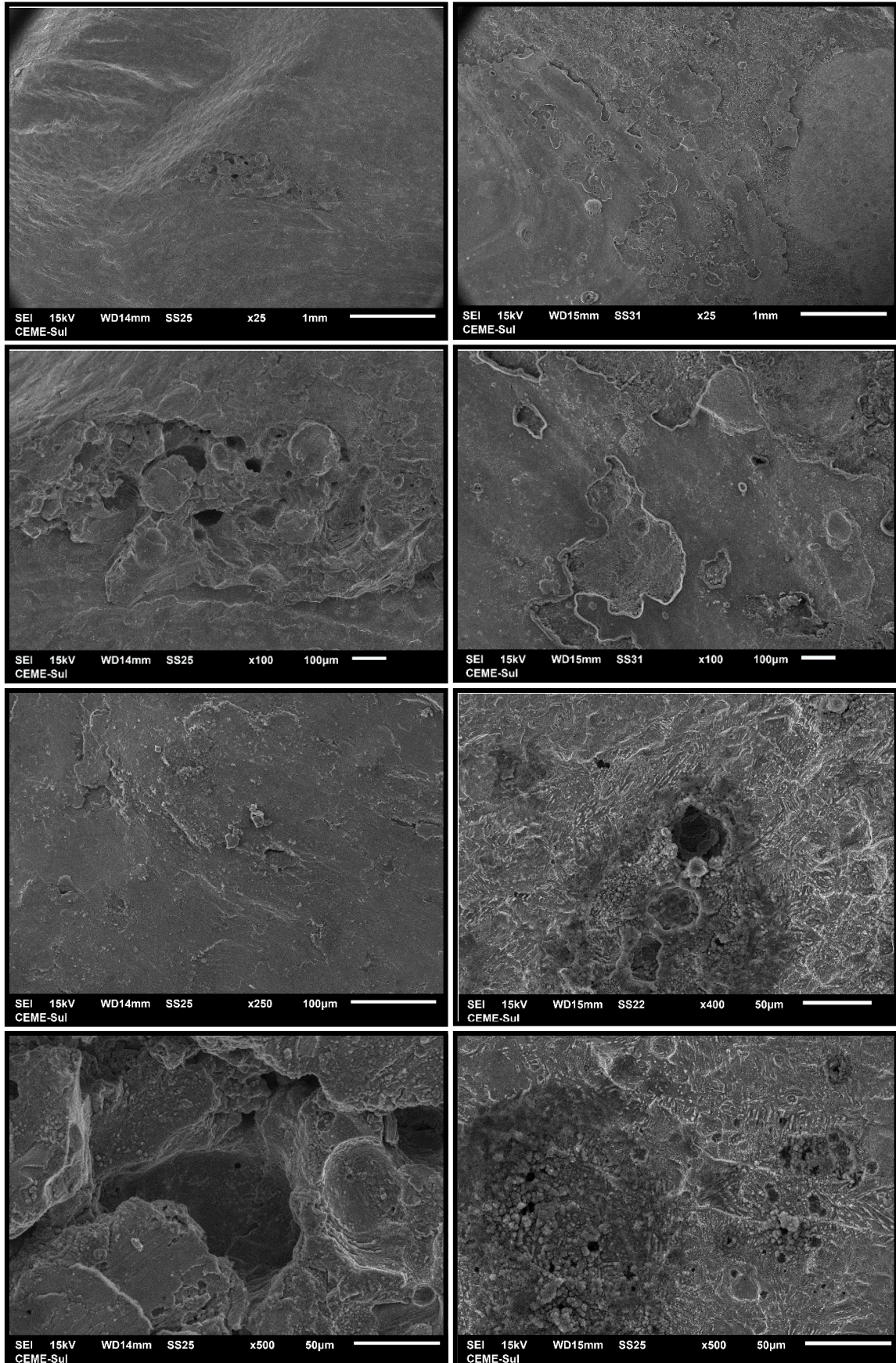
Fonte: Próprio autor

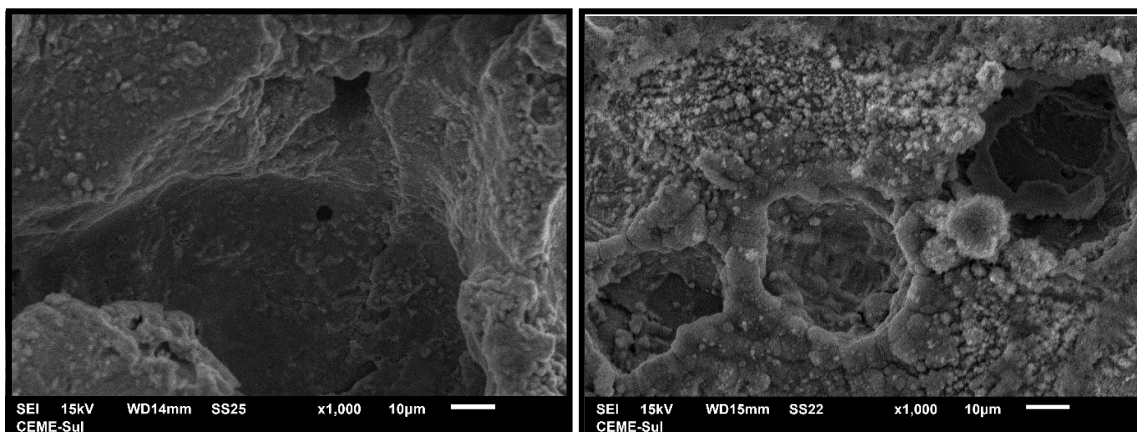
Observou-se que a região de solda e a zona afetada pelo calor apresentaram uma maior quantidade de porosidade em comparação com outras áreas. Essa porosidade pode ser atribuída ao processo metalúrgico utilizado durante a soldagem. É provável que o uso de eletrodos revestidos tenha contribuído para a formação de bolhas durante a técnica de soldagem. A presença de bolhas e porosidade na solda pode comprometer a integridade estrutural e a resistência à corrosão do material soldado.

METAL DE SOLDA
AMOSTRA NÃO CORROÍDA

AMOSTRA CORROÍDA

Figura 55 - Comparativo: Amostra corroída e não corroída

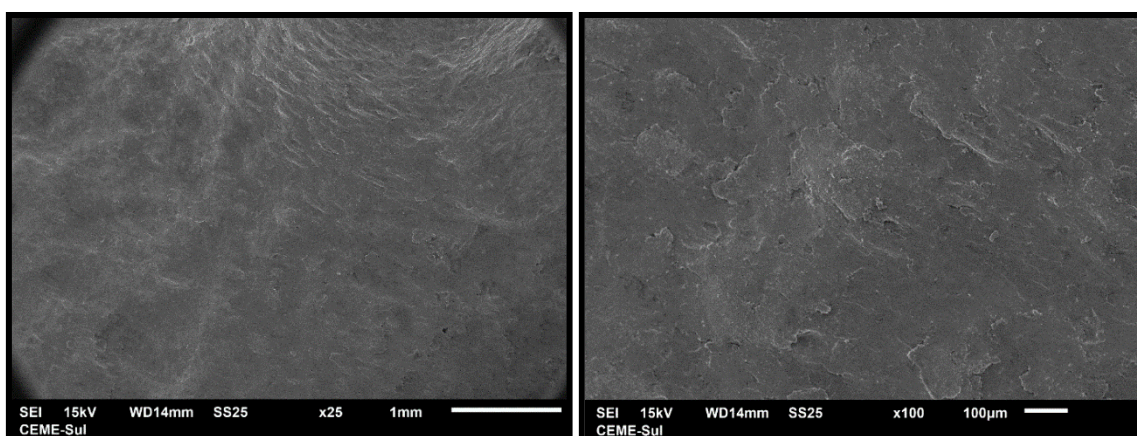




Fonte: Próprio autor

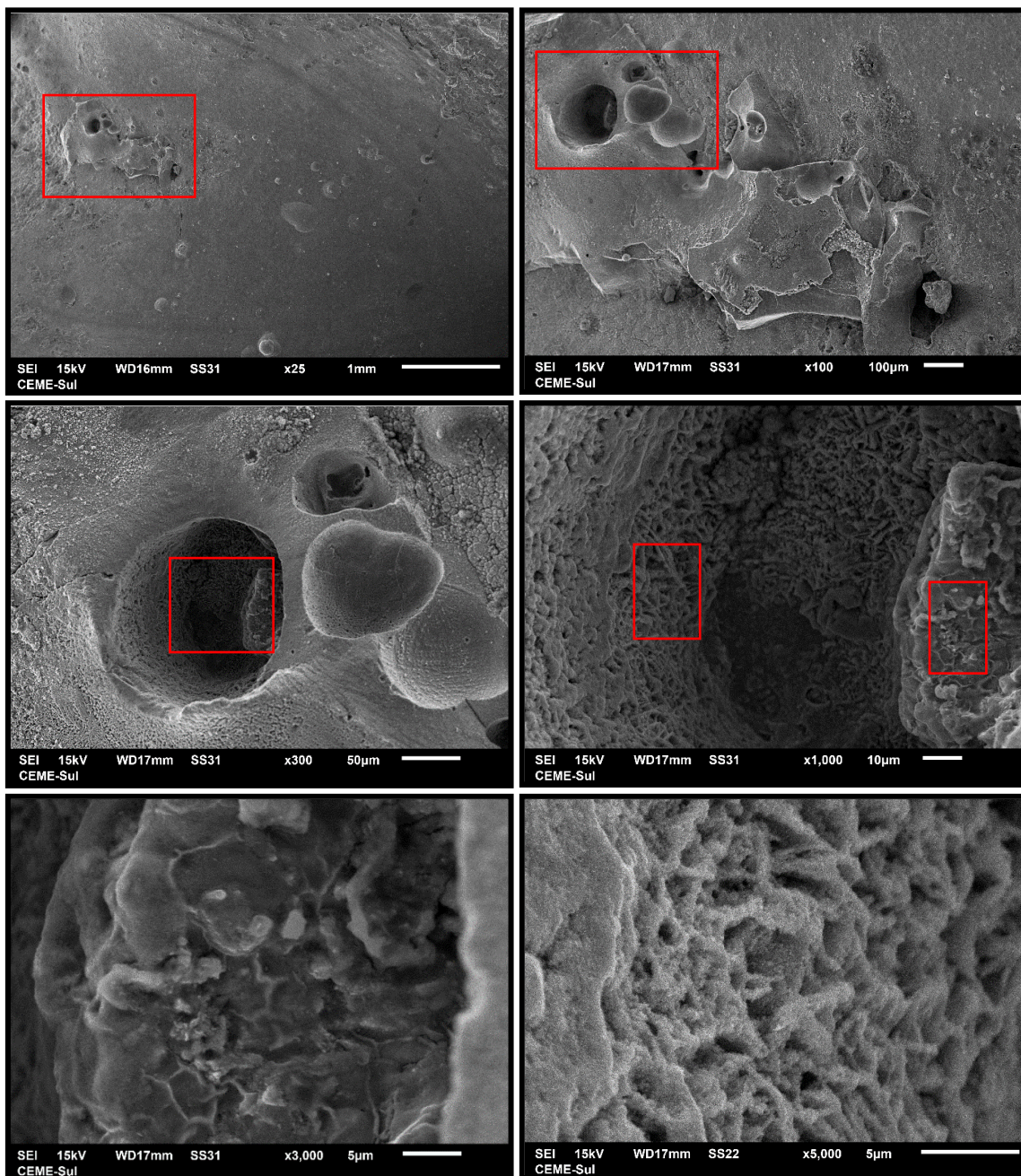
A análise comparativa entre as imagens das superfícies não corroídas e corroídas revela a diferença entre o cenário antes e depois da ocorrência da corrosão por pites. As áreas não corroídas apresentam uma aparência uniforme e regular, sem sinais visíveis de corrosão. Por outro lado, as áreas corroídas exibem pequenas cavidades ou depressões, indicativas da corrosão por pites. Essas regiões corroídas apresentam uma aparência irregular e desigual, com tamanhos, profundidades e distribuições variáveis. Essa comparação visual é essencial para compreender a extensão e o impacto da corrosão por pites na superfície do material.

Figura 56 - Amostra não corroída



Fonte: Próprio autor

Figura 57 - Corrosão localizada pite



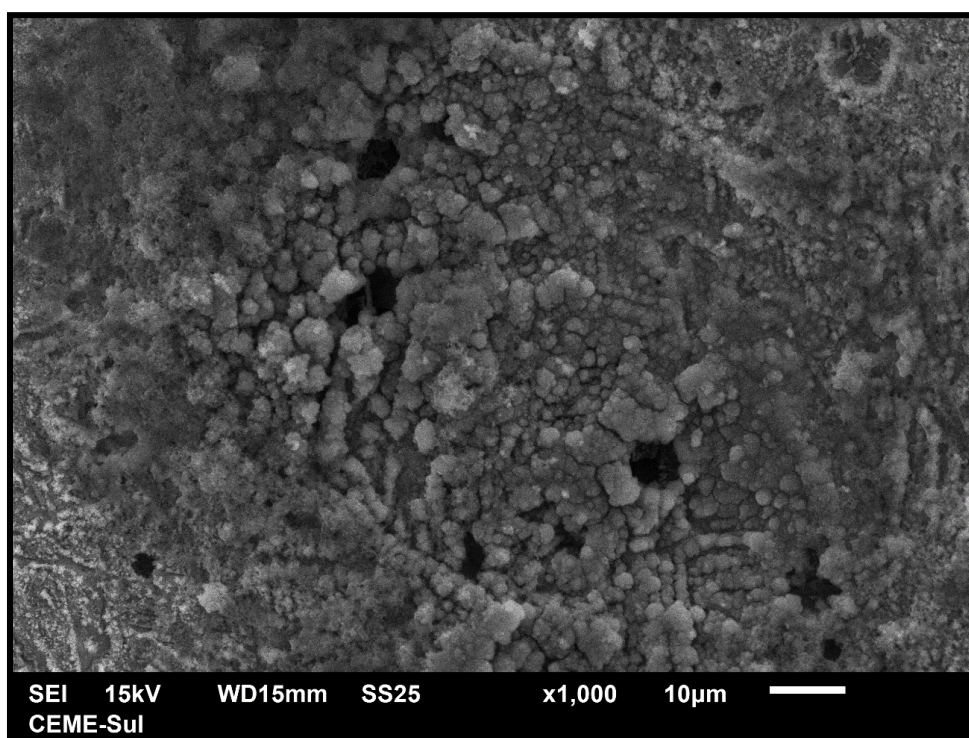
Fonte: Próprio autor

De acordo com Bautista *et al.* (2019) a morfologia dos pites desempenha um papel fundamental na influência do comportamento de tração e fadiga dos vergalhões. Isso é crucial, pois está diretamente relacionado a probabilidade de ocorrência de patologias perigosas ou falhas em estruturas durante o serviço. Apesar de afetarem áreas pequenas do material, os pites podem causar perfurações e se tornarem pontos de concentração de tensão, aumentando, assim, o risco de falha do material.

ASPECTOS GERAIS CORROSÃO

Ao analisar as imagens obtidas através do MEV, é possível observar as características morfológicas da corrosão. Nas imagens a seguir, é possível analisar a morfologia da corrosão na superfície do vergalhão e a presença de pites que se apresentam como pequenas cavidades irregulares que indicam uma corrosão localizada. A configuração como os pites se apresenta na estrutura metálica podem fornecer informações sobre o mecanismo da corrosão e a gravidade da manifestação patológica.

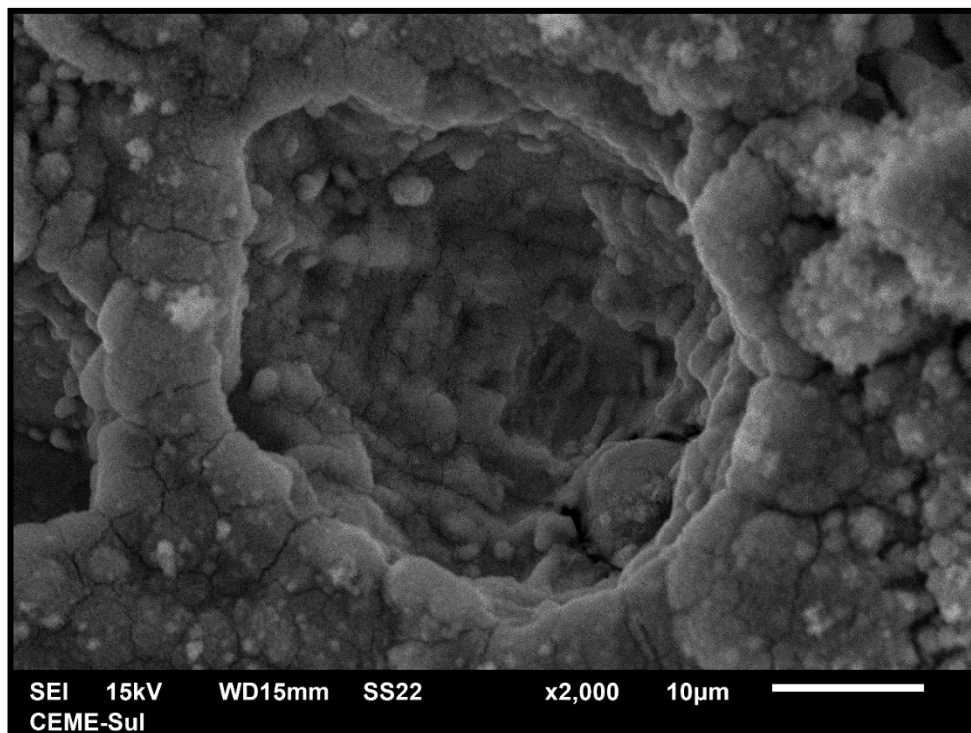
Figura 58 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) - 1.000x amostra corroída



Fonte: Próprio autor

Ainda através do MEV é possível observar a profundidade do pite corrosão, o que se torna útil para mensurar o grau de deterioração do vergalhão.

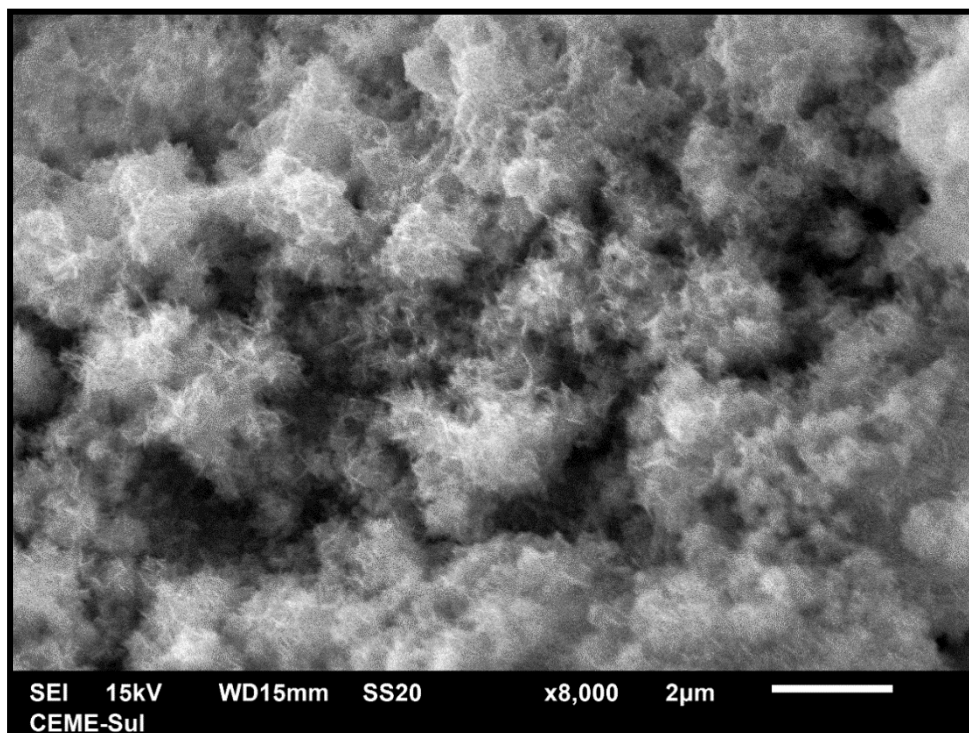
Figura 59 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) - 2.000x amostra corroída



Fonte: Próprio autor

O MEV permite observar a topografia da superfície, e assim revelar detalhes da morfologia dos produtos de corrosão.

Figura 60 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) corrosão - 8.000x amostra corroída

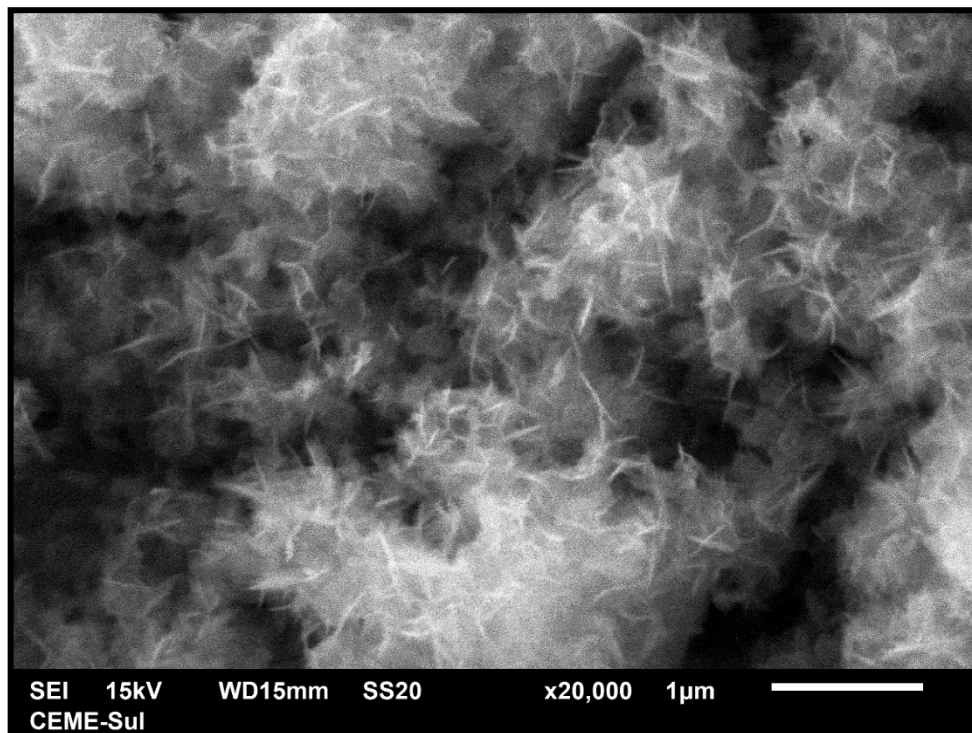


Fonte: Próprio autor

Durante a análise, foi observada a formação de uma morfologia nos produtos de corrosão que apresenta semelhanças com espinhos. Será apresentada como sugestão para trabalhos futuros, realizar uma investigação mais aprofundada para verificar, quantificar e caracterizar esses produtos de corrosão.

Embora a identificação e qualificação dos diferentes tipos de produtos de corrosão não tenham sido o foco principal deste estudo, essas análises podem fornecer informações valiosas para pesquisas posteriores.

Figura 61 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) corrosão - 20.000x

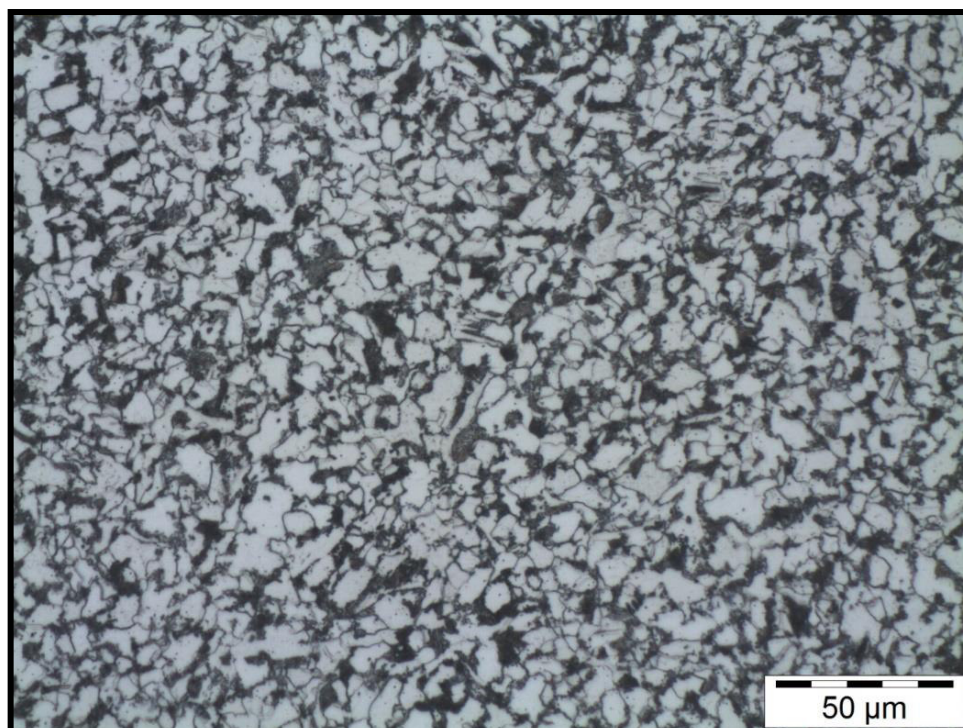


Fonte: Próprio autor

MICROSCÓPIO ÓPTICO

Foi utilizado o microscópio ótico Olympus GX51 para observação das amostras, conforme as escalas especificadas em cada imagem abaixo:

Figura 62 - Metal de Base 500x

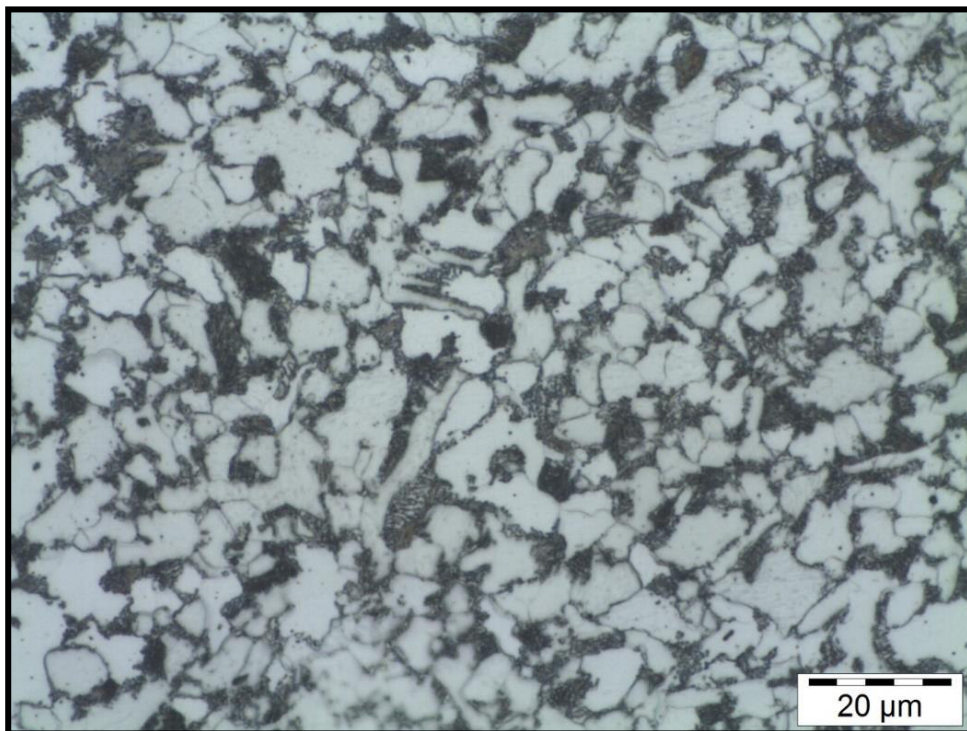


Fonte: Próprio autor

Utilizando o software ImageJ.js, foi realizado um cálculo preciso da fração de ferrita presente na amostra, conforme delimitada na imagem fornecida, resultando em um teor de 87,64%. A presença da ferrita no aço confere propriedades importantes, como maleabilidade e ductibilidade.

Por outro lado, a perlita desempenha um papel fundamental no aço, proporcionando características como resistência mecânica e dureza.

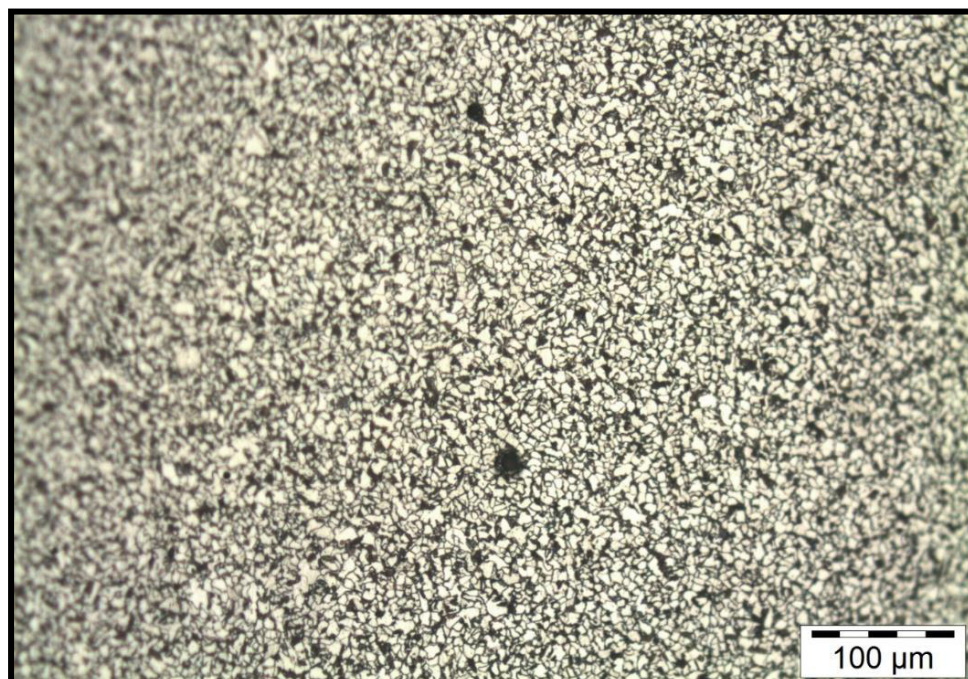
Figura 63 - Metal de Base 1000x



Fonte: Próprio autor

Na imagem acima podemos observar um teor de 55,27% de ferrita (verificado no software ImageJ.js) na imagem demonstrada.

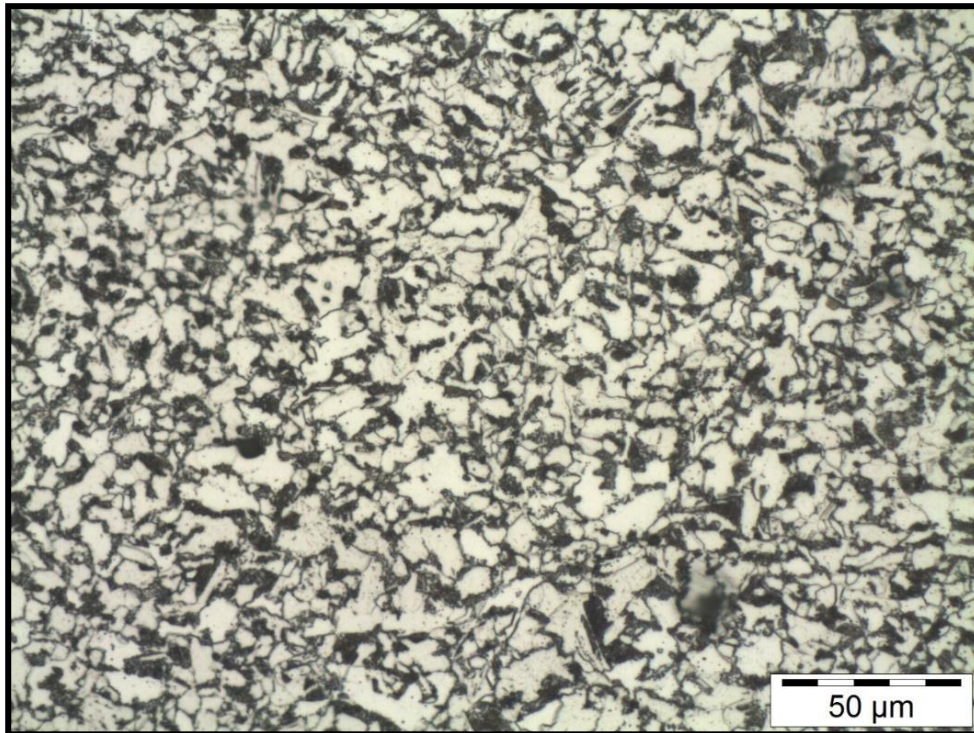
Figura 64 - Metal de Base 200x



Fonte: Próprio autor

Na imagem acima podemos observar um teor de 88,15% de ferrita (verificado no software ImageJ.js) na imagem demonstrada.

Figura 65 - Metal de Base 500x



Fonte: Próprio autor

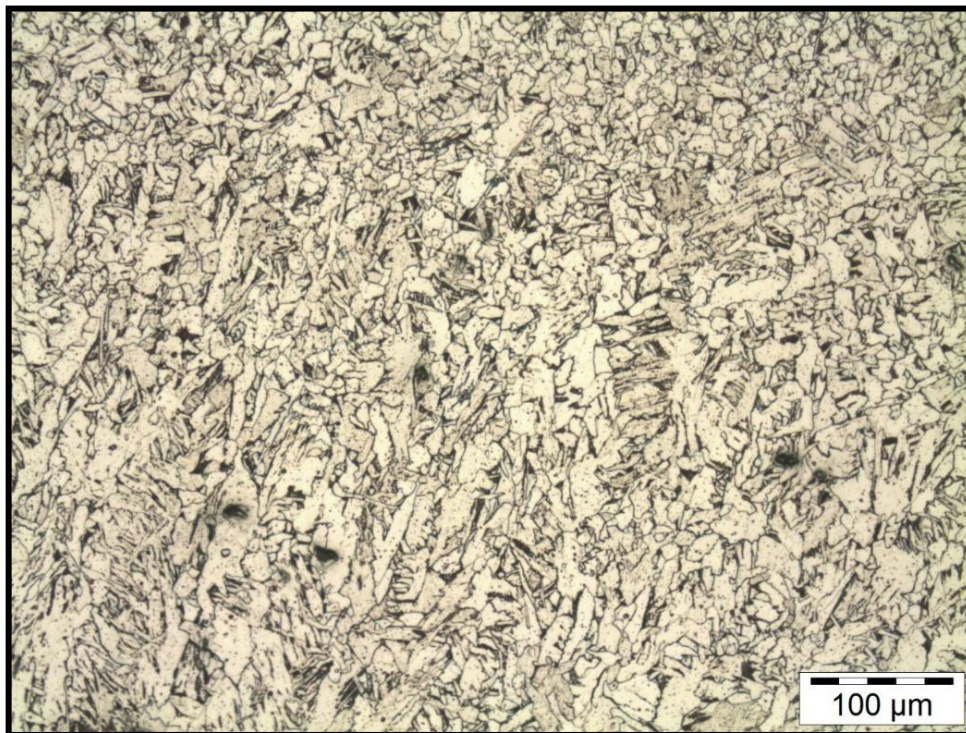
Na imagem acima podemos observar um teor de 84,72% de ferrita (verificado no software ImageJ.js) na imagem demonstrada.

A perlita é caracterizada por sua microestrutura bifásica, composta em média por 88% de ferrita e 12% de cementita. A cementita, um carboneto presente na perlita, possui alta dureza, o que limita o movimento de discordâncias e, conseqüentemente, aumenta a resistência mecânica do aço.

METAL DE SOLDA (metal de adição):

Por meio da análise realizada foi possível observar a presença de estruturas dendríticas, granulação grosseira e irregular no metal de solda. Além disso, é possível verificar a presença de ferrita em formato circular, um elemento importante para conferir resistência ao dobramento e tenacidade ao metal de solda.

Figura 66 - Metal de solda 200x

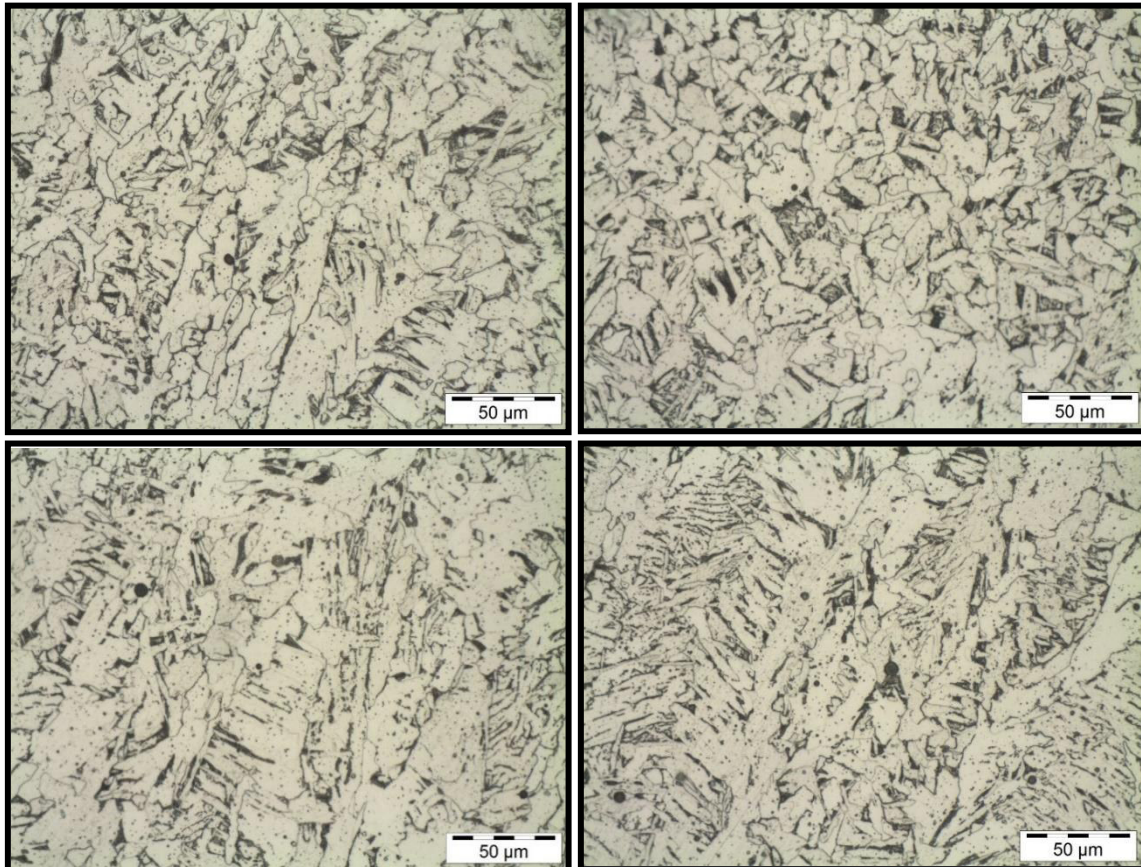


Fonte: Próprio autor

A microestrutura desempenha um papel crucial na influência das propriedades mecânicas de um material. Uma granulação mais fina pode dificultar o movimento das discordâncias, resultando em um aumento da resistência mecânica.

No entanto, é importante observar que a região de fronteira entre os grãos, especialmente em materiais com granulação mais fina, pode ser considerada uma região anódica em comparação com outras regiões do mesmo material. Portanto, é essencial encontrar um equilíbrio adequado entre o movimento das discordâncias para garantir uma resistência mecânica adequada, ao mesmo tempo em que se evita a propagação de regiões anódicas que possam comprometer a integridade do material.

Figura 67 - Metal de solda 500x



No metal de solda, foi observado que a microestrutura apresenta diferenças significativas em relação ao metal de adição. Isso ocorre devido ao processo de solidificação do metal de solda, no qual a granulometria se torna mais grosseira devido à ausência de laminação prévia e à presença do material no estado bruto de fusão. Além disso, os grãos no metal de solda são alinhados de acordo com o processo de deposição do eletrodo, seguindo a direção em que o eletrodo foi depositado.

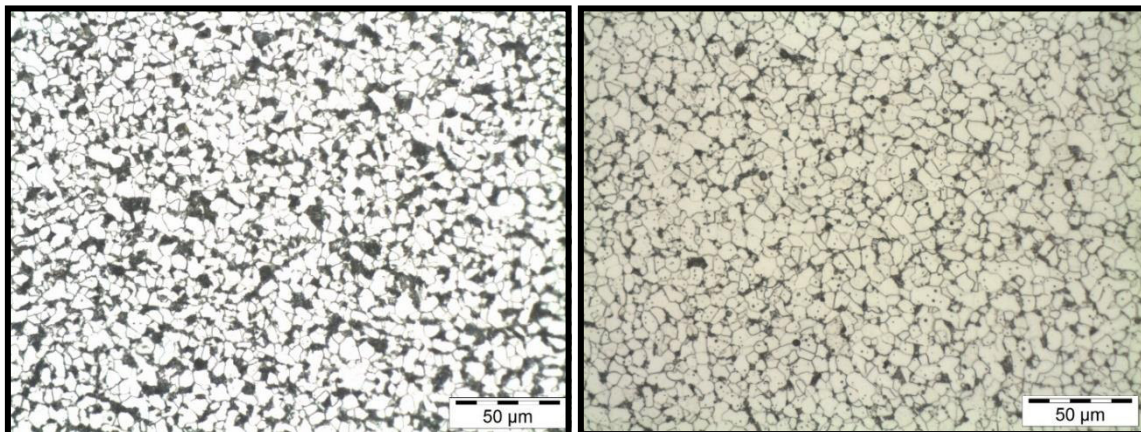
ZONA TERMICAMENTE AFETADA (ZTA)

Na Zona Termicamente Afetada (ZTA), foi possível verificar que os grãos presentes apresentam um tamanho menor em comparação aos grãos da metal base. Essa redução no tamanho dos grãos é atribuída ao fenômeno da recristalização, no qual os grãos tentam crescer com o aporte térmico aplicado, mas acabam sofrendo fraturas, resultando em uma diminuição no seu tamanho.

Além disso, foi observado que devido a difusão do metal de adição adicionado durante o processo de soldagem, ocorreu uma redução no teor de carbono na ZTA. Essa difusão pode influenciar na distribuição dos elementos químicos e na estrutura dos grãos presentes na região termicamente afetada.

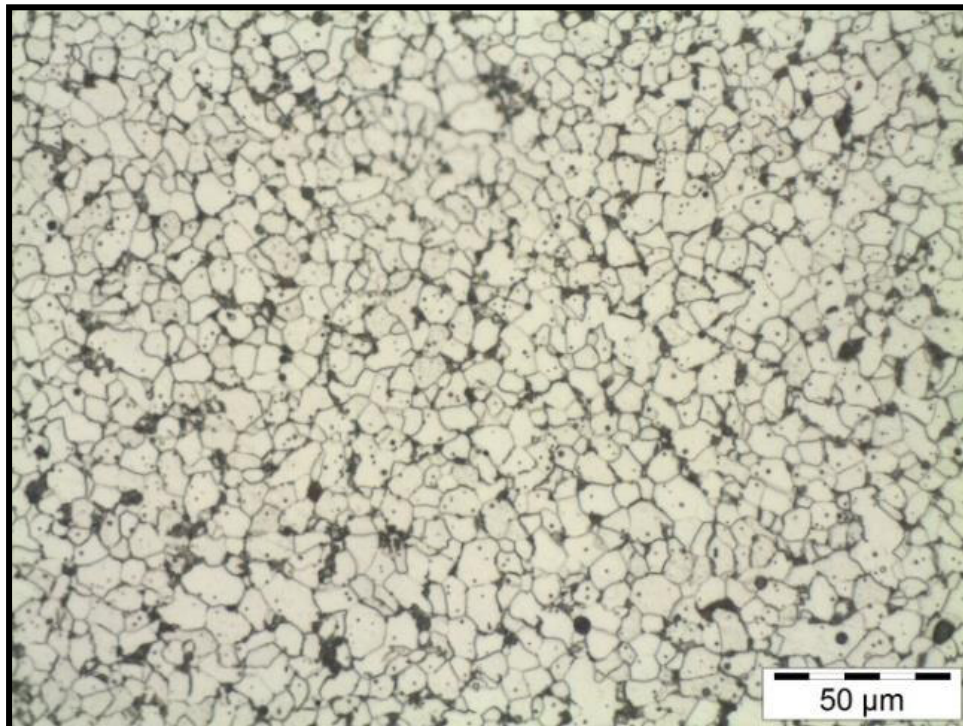
Na análise da ZTA, também foi possível observar que os grãos apresentam uma configuração equiaxial, ou seja, possuem uma forma aproximadamente esférica ou equidimensional, indicando um padrão de crescimento isotrópico na região.

Figura 68 - Zona termicamente afetada (ZTA) 500x



Fonte: Próprio autor

Figura 69 - Zona termicamente afetada (ZTA) 500x



Fonte: Próprio autor

Na figura 69 foram realizado cálculos para encontrar o tamanho diâmetro do grão na Zona Termicamente Afetada (ZTA) pelo processo de soldagem, sendo o diâmetro médio do grão $1,733 \times 10^{-4}$ in, e o tamanho de grão ASTM sendo 12,35 in.

Já na figura 73, que apresenta os grãos do Metal de Base, foi encontrado o diâmetro médio de grão sendo $2,375 \times 10^{-4}$ in, já o grão ASTM: 11,44 in

É possível notar uma redução no tamanho de grão na Zona Afetada pelo Calor (ZAC), o que é esperado devido ao aporte térmico durante o processo de soldagem.

4.3 PERDA DE MASSA

Inicialmente cada amostra foi pesada 3 vezes para realizar a média do peso de cada amostra. A balança utilizada para medição foi a Balança Analítica Shimadzu ATY224R. Após o ensaio de imersão, as amostras foram submetidas a um processo de limpeza de acordo com a norma ASTM G1. Para essa limpeza, utilizou-se ácido clorídrico PA 37% em uma concentração de 50%, ou seja, uma solução composta por 500 ml de ácido clorídrico e 500 ml de água. Além disso, foi adicionado um inibidor de corrosão à solução para evitar danos adicionais às amostras durante o processo de limpeza.

Com auxílio de uma balança de precisão foi preparado 35g de cloreto de sódio. Utilizou-se um balão volumétrico de 1000 ml e um Becker de 250 ml para realizar a mistura. Após a finalização das limpezas, as peças foram imersas em uma mistura de 1 litro de água destilada com 3,5% de Cloreto de Sódio. As peças ficaram imersas por 3 meses, sendo que a cada mês eram retiradas amostras para avaliação da perda de massa.

Durante o ensaio de imersão, através da análise visual das amostras, constatou-se que aquelas amarradas com arame recozido apresentaram um comportamento de corrosão mais pronunciado, caracterizado por um padrão uniforme de corrosão e sinais de corrosão por frestas. Por outro lado, os vergalhões soldados demonstraram uma menor quantidade de produtos de corrosão em comparação ao arame recozido, sendo observadas apenas algumas corrosões do tipo pits.

O arame recozido utilizado, foi produzido pela Gerdau e é fabricado em conformidade com a norma ABNT NBR 5589, apresentando uma resistência à tração de até 40 kgf/mm². Especificamente, foi empregado o arame recozido de calibre número 18, com um diâmetro nominal de 1,25 mm e uma massa nominal de 0,01 kg/m.

No contexto dos vergalhões utilizados na construção civil, é importante destacar que eles são compostos por diversos elementos químicos, além do ferro (Fe). Entre esses elementos, encontram-se carbono (C), silício (Si), fósforo (P), enxofre (S), manganês (Mn) e outros. Cada um desses elementos químicos apresenta diferentes potenciais de redução, o que resulta na formação de micropilhas eletroquímicas dentro do próprio vergalhão.

O arame recozido é caracterizado por possuir um teor de carbono reduzido em sua composição, uma vez que sua aplicação requer maior maleabilidade em conformidade com as normas estabelecidas pela NBR 5589. No entanto, é importante ressaltar que o carbono não é um fator determinante no processo de corrosão, uma vez que sua presença não é um requisito essencial para a ocorrência desse fenômeno corrosivo (MERÇON, 2017).

A interação entre o vergalhão e o arame recozido pode ser influenciada principalmente pelo tamanho de grão, sendo a corrosão predominante do tipo fresta (OSÓRIO et al., 2002). Essa constatação evidencia uma importante influência da corrosão nos vergalhões amarrados por arame recozido, o que se torna um ponto fundamental a se considerar na forma como unir os vergalhões.

Nas imagens a seguir é possível observar, parcialmente, os vergalhões amarrados e soldados após a imersão em NaCl. No apêndice A, é possível observar outras amostras dos vergalhões ensaiados.

Figura 70 - Amostras soldadas



Fonte: Próprio Autor.

Figura 71 - Amostras amarradas



Fonte: Próprio Autor

Figura 72 - Amostras corroídas após 3 meses de imersão em NaCl



Fonte: Próprio Autor.

Após um período de imersão de 3 meses, foi observada uma maior ocorrência de produtos de corrosão uniforme no vergalhão amarrado. Essa corrosão pode ter sido ocasionada pela presença de frestas ou pela formação de um possível par galvânico entre o vergalhão e o arame recozido utilizado na amarração.

A média do peso de cada amostra segue o quadro a seguir:

LEGENDA:

- **PMA** = Perda de massa, amostra amarrada
- **PMS** = Perda de massa, amostra soldada
- **P1** = Perda de massa em 1 mês
- **P2** = Perda de massa em 2 meses
- **P3** = Perda de massa em 3 meses
- **A, B, C, D** = Representam as quadruplicatas de cada mês

Tabela 19 - Pesagem antes da perda de massa

ANTES DA PERDA DE MASSA (g)											
AMARRADAS	AMOSTRA	P1	P2	P3	PM	SOLDADAS	AMOSTRA	P1	P2	P3	PM
	PMA1A	115,2871	115,2869	115,287	115,287		PMS1A	117,3852	117,3858	117,3859	117,3856
	PMA1B	113,0376	113,0372	112,1377	112,7375		PMS1B	113,097	113,0976	113,0978	113,0975
	PMA1C	116,2163	116,2166	116,2169	116,2166		PMS1C	101,5338	101,534	101,5343	101,534
	PMA1D	113,9016	113,9018	113,9021	113,9018		PMS1D	109,9692	109,9699	109,9698	109,9696
	PMA2A	114,2771	114,2772	114,2774	114,2772		PMS2A	103,5008	103,5039	103,5049	103,5032
	PMA2B	116,4616	116,4622	116,4619	116,4619		PMS2B	114,3953	114,3968	114,3964	114,3962
	PMA2C	114,1012	114,1013	114,1015	114,1013		PMS2C	112,052	112,0531	112,0536	112,0529
	PMA2D	113,0552	113,056	113,0558	113,0557		PMS2D	115,942	115,9947	115,9664	115,9677
	PMA3A	118,2313	118,231	118,2311	118,2311		PMS3A	110,4693	110,4709	110,4716	110,4706
	PMA3B	129,3517	129,3515	129,3521	129,3518		PMS3B	108,1381	108,0563	108,0229	108,0724
	PMA3C	126,3764	126,3766	126,3768	126,3766		PMS3C	110,4204	110,4462	110,4231	110,4299
	PMA3D	127,5534	127,5535	127,5533	127,5534		PMS3D	124,9806	124,981	124,9809	124,9808

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 20 - Pesagem após perda de massa

APÓS A PERDA DE MASSA (g)											
AMARRADAS	AMOSTRA	P1	P2	P3	PM	SOLDADAS	AMOSTRA	P1	P2	P3	PM
	PMA1A	113,836	113,8361	113,836	113,836		PMS1A	116,426	116,4262	116,4257	116,426
	PMA1B	111,2492	111,2497	111,2491	111,2493		PMS1B	112,2093	112,2093	112,2094	112,2093
	PMA1C	114,7435	114,7438	114,7438	114,7437		PMS1C	100,6585	100,6586	100,6585	100,6585
	PMA1D	112,4537	112,4539	112,4541	112,4539		PMS1D	109,8503	109,8504	109,85	109,8502
	PMA2A	112,4047	112,4047	112,4048	112,4047		PMS2A	102,3514	102,3513	102,3514	102,3514
	PMA2B	114,5344	114,5342	114,5345	114,5344		PMS2B	113,2615	113,2615	113,2616	113,2615
	PMA2C	112,3818	112,3823	112,3822	112,3821		PMS2C	110,8953	110,895	110,8951	110,8951
	PMA2D	111,1504	111,1505	111,1507	111,1505		PMS2D	114,822	114,8224	114,8219	114,8221
	PMA3A	115,9091	115,9074	115,9073	115,9079		PMS3A	108,9671	108,9672	108,9668	108,967
	PMA3B	126,9083	126,9091	126,9094	126,9089		PMS3B	106,3039	106,304	106,3045	106,3041
	PMA3C	123,9486	123,9485	123,9483	123,9485		PMS3C	108,5912	108,5912	108,5913	108,5912
	PMA3D	125,1023	125,1021	125,1026	125,1023		PMS3D	123,2213	123,2208	123,2211	123,2211

Fonte: Próprio Autor.

A perda de massa das amostras foi mínima, situando-se na faixa de 1 a 2 gramas. Portanto, não houve uma redução significativa nas dimensões das amostras. A perda de massas corresponde aos pites que foram removidos durante o processo de limpeza.

Tabela 21 - Tabela de perda de massa

PERDA DE MASSA (g)			
PMA1A	1,450967	PMS1A	0,959667
PMA1B	1,488167	PMS1B	0,888133
PMA1C	1,4729	PMS1C	0,8755
PMA1D	1,447933	PMS1D	0,1194
PMA2A	1,8725	PMS2A	1,151833
PMA2B	1,927533	PMS2B	1,134633
PMA2C	1,719233	PMS2C	1,157767
PMA2D	1,905133	PMS2D	1,1456
PMA3A	2,3232	PMS3A	1,503567
PMA3B	2,442833	PMS3B	1,7683
PMA3C	2,428133	PMS3C	1,838667
PMA3D	2,451056	PMS3D	1,759767

Fonte: Próprio Autor.

Através do ensaio de perda de massa foi possível observar que as amostras soldadas apresentaram menor ocorrência de perda de massa. A diferença na perda de massa entre o vergalhão Thermex soldado e o vergalhão não soldado pode ser atribuída a diferentes fatores, como a presença de uma junta soldada e a possível formação de uma camada protetora durante o processo de soldagem.

De acordo com Dias (2018), o aquecimento localizado de um material pode alterar sua microestrutura, afetando suas propriedades mecânicas e a resistência à corrosão. Isso inclui o aumento do tamanho de grão, a geração de tensões residuais e a variação na composição de fases. Essas alterações podem comprometer a resistência, a durabilidade e a resistência à corrosão do material. Ocorre que, no estudo realizado, a conexão contínua entre os vergalhões, pode ter contribuído positivamente para evitar a entrada de água e agentes corrosivos na interface da junta. Isso pode resultar em uma menor exposição do aço à

corrosão, o que pode ter reduzido a perda de massa ao longo do tempo do ensaio realizado.

Durante o processo de soldagem, pode ocorrer a formação de uma camada protetora na região da junta de solda. Essa camada pode ser composta por elementos de liga presentes no metal de adição utilizado na soldagem (eletrodo 6013), bem como pela modificação microestrutural resultante do processo térmico. Essa camada protetora pode melhorar a resistência à corrosão do vergalhão soldado, atuando como uma barreira adicional contra a penetração de agentes corrosivos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação teve como objetivo principal experienciar e analisar os efeitos da corrosão em vergalhões soldáveis expostos ao ambiente marinho. Para alcançar esse objetivo, foram estabelecidos uma série de objetivos específicos que nortearam a pesquisa.

O estudo procurou identificar os principais tipos e fatores que provocam a corrosão em vergalhões thermex, bem como analisar os processos corrosivos. Através dessa investigação, verificou-se através do MEV que a corrosão por pites se destacou e com menor incidência a corrosão por frestas, uma vez que no verso da junta soldada inevitavelmente forma-se uma fresta, sendo este um ponto frágil da composição. Por um outro lado, através da técnica de polarização, constatou-se que a união do metal base com o eletrodo 6013 não forma par galvânico, uma vez que seus potenciais ficaram muito próximos.

Com base na análise realizada, conclui-se que o processo de soldagem nos vergalhões utilizando o eletrodo 6013 não afeta a resistividade à corrosão, uma vez que não há a incidência de par galvânico. Portanto, as propostas técnicas de controle e prevenção da corrosão em estruturas de concreto armado com vergalhão soldado em ambientes litorâneos envolvem a implementação de projetos adequados e a contratação de mão de obra capacitada.

Um projeto adequado em conformidade com as normas aplicáveis, especialmente a NBR 6118, é essencial para garantir bom resultado de soldagem entre os vergalhões, além de manter o cobrimento de concreto adequado em conformidade com a NBR 6118, minimizando assim o acesso dos íons de cloreto à estrutura.

Além disso, é fundamental contar com mão de obra capacitada para realizar a soldagem dos vergalhões. A execução correta desse processo requer profissionais qualificados e treinados, a fim de garantir uma união adequada

entre os vergalhões e evitar falhas que possam facilitar o acesso dos íons de cloreto a estrutura.

Outra medida importante é o monitoramento e manutenções corretivas do cobrimento do concreto sobre os vergalhões. Esse cobrimento de concreto é crucial para proteger os vergalhões da exposição direta aos agentes corrosivos presentes no ambiente marinho. Portanto, é necessário adotar práticas que garantam a manutenção corretiva desse cobrimento ao longo da vida útil da estrutura, evitando a deterioração prematura dos vergalhões.

Além disso, é crucial controlar o acesso dos íons de cloreto à estrutura. Isso pode ser alcançado através da implementação de barreiras, tais como revestimentos protetores e adequada impermeabilização, juntamente com a adoção de práticas construtivas que previnam a penetração de água marinha nos elementos estruturais. Essas práticas são de extrema importância para minimizar a entrada de íons de cloreto na estrutura. Por exemplo, o uso de aditivos impermeabilizantes que não alterem o pH do concreto pode ser uma medida eficaz. A entrada desses íons é uma das principais causas do processo corrosivo em áreas costeiras.

Por fim, manter o pH do concreto estável é outro aspecto importante. Um pH adequado (entre 12 e 14) é quimicamente favorável para retardar os efeitos da corrosão. Portanto, é necessário adotar práticas que assegurem a estabilidade do pH, como evitar a carbonatação do concreto e controlar a penetração de substâncias ácidas ou alcalinas na estrutura.

A implementação dessas medidas técnicas contribuirá para a prevenção da corrosão e para a prolongação da vida útil das estruturas de concreto armado com armaduras soldadas expostas a ambientes litorâneos.

Outro ponto importante abordado no estudo foi a avaliação da inicialização do processo corrosivo induzido por cloretos. Foi investigado o papel dos íons cloreto na corrosão e examinados os fatores que influenciam a taxa de corrosão na presença desses íons. Essa pesquisa proporcionou uma compreensão mais

aprofundada dos mecanismos de iniciação da corrosão e sua relação com a presença de cloretos.

Além disso, foi realizada uma avaliação da previsão da vida útil de vergalhões submetidos ao processo de soldagem em relação a penetração de cloretos em ambientes litorâneos. Utilizando técnicas de modelagem e ensaios acelerados, foi estimada a vida útil das estruturas levando em consideração a taxa de penetração de cloretos e as condições de exposição ao ambiente marinho.

Por fim, foi feita uma comparação da microestrutura formada após a corrosão do vergalhão Thermex, analisando o comportamento das microestruturas do vergalhão em relação a corrosão. Através de técnicas de microscopia e análise de superfície, foram investigadas as mudanças no vergalhão ocorridas após a corrosão, identificando os principais mecanismos de degradação e sua relação com a resistência a corrosão do material. Além de avaliar a perda de massa através da pesagem das amostras antes e depois do ensaio de imersão em NaCl.

Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que a corrosão é um problema significativo em vergalhões de modo geral e consequentemente nas estruturas de concreto armado expostas ao ambiente marinho. Os vergalhões soldáveis, como o Thermex, também são suscetíveis à corrosão, embora em diferentes graus. A presença de cloretos desempenha um papel fundamental na iniciação e aceleração do processo corrosivo.

Para mitigar os efeitos da corrosão, é essencial adotar medidas de controle e prevenção adequadas, como revestimentos protetores na peça de concreto, projetos robustos e mão de obra capacitada. Além disso, a monitorização regular da corrosão e a realização de manutenção preventiva são fundamentais para garantir a durabilidade das estruturas.

Os resultados dessa pesquisa contribuem para o avanço do conhecimento na área da corrosão em vergalhão Thermex expostos ao ambiente marinho e

fornece subsídios para o desenvolvimento de diretrizes e práticas de engenharia que visam aumentar a vida útil das estruturas e garantir a segurança e confiabilidade das construções costeiras.

Por fim, foi constatado que o processo de soldagem realizado no vergalhão GG50 Thermex não apresenta contribuição significativa para a ocorrência de corrosão nas armaduras.

6. CONCLUSÃO

O objetivo desta pesquisa foi investigar os efeitos e processos corrosivos em vergalhões soldáveis expostos a um ambiente marinho. Foram identificados dois principais tipos de corrosão: corrosão por pites e corrosão por frestas.

No caso específico do vergalhão Thermex em um ambiente costeiro, constatou-se que a corrosão por pites é o processo corrosivo predominante, enquanto a corrosão por frestas ocorre com menor incidência. Além disso, observou-se que a união entre o metal base e o eletrodo utilizado na soldagem não resulta em um par galvânico significativo.

Propõe-se o uso de revestimentos protetores na peça de concreto para que os íons de cloreto não penetrem e assim não alterem o pH da estrutura, e consequentemente, afetem a armadura soldada, uma vez que a presença de cloretos desempenha um papel importante no processo corrosivo; projetos adequados para prevenir a corrosão em estruturas de concreto armado em ambientes litorâneos e mão de obra capacitada.

Esta pesquisa também contribuiu para a compreensão dos mecanismos de iniciação da corrosão induzida por cloretos e para a avaliação da vida útil das estruturas em relação à penetração de cloretos. Os resultados destacam a necessidade de medidas de controle, prevenção e monitoramento da corrosão, visando aumentar a durabilidade e a segurança das estruturas em ambientes marinhos.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta pesquisa proporcionou informações valiosas sobre os efeitos da corrosão em vergalhões soldáveis expostos ao ambiente marinho, focando em tipos específicos de corrosão, como pites e frestas. Visando aprimorar ainda mais o conhecimento nessa área, seguem sugestões para trabalhos futuros:

a) Estudo de Longo Prazo:

Propondo uma extensão do período de exposição das amostras para um ano, para permitir uma análise mais abrangente da taxa de corrosão ao longo do tempo. Realizando análises periódicas para identificar variações sazonais e entender a evolução da corrosão.

b) Ensaio de Névoa Salina:

Realizando ensaio de Névoa Salina afim de explorar diferentes condições de corrosão. Para obter uma compreensão mais abrangente da resistência à corrosão do material em estudo, recomenda-se realizar ensaios de névoa salina com concentração de 5% de cloreto de sódio (NaCl). Isso ajudará a identificar o desempenho do material em uma variedade de ambientes corrosivos.

c) Exposição em condições reais:

Embora os ensaios de imersão em NaCl e névoa salina sejam úteis para avaliar a resistência à corrosão em ambiente controlado, é interessante considerar a exposição do material em condições reais. Recomenda-se realizar estudos de campo ou analisar materiais que estiveram em serviço por um período conhecido em ambiente costeiro, a fim de validar os resultados obtidos em ensaios de laboratório.

d) Avaliação da Taxa de Corrosão real:

Implementando técnicas avançadas de modelagem por malha de elementos finitos para determinar com precisão a área superficial das amostras. É fundamental determinar a área da amostra para determinar a taxa de corrosão através do ensaio de perda de massa. Dessa forma, comparando esses dados com as previsões obtidas através dos declives de Tafel. Identificando possíveis

discrepâncias e investigando os fatores que podem influenciar nas diferenças entre os dados modelados e os dados observados.

e) Investigação de Materiais Protetores:

Explorando a eficácia de diferentes revestimentos protetores e inibidores de corrosão na prevenção da deterioração dos vergalhões. Aplicando esses materiais nas amostras para avaliar sua eficácia em um contexto marinho. Essas sugestões visam enriquecer e expandir os resultados obtidos nesta pesquisa, contribuindo para uma compreensão mais abrangente dos efeitos da corrosão em ambientes marinhos e proporcionando subsídios para práticas mais eficientes de controle e prevenção.

f) Análise detalhada produtos de corrosão:

Recomenda-se conduzir uma investigação mais detalhada com o objetivo de verificar, quantificar e caracterizar os produtos de corrosão. Embora a identificação e a classificação dos diferentes tipos de produtos de corrosão não tenham sido o foco principal deste estudo, tais análises podem fornecer informações valiosas para pesquisas futuras.

g) Ensaio mecânicos:

Realizando ensaios mecânicos para avaliar as alterações na soldagem do vergalhão Thermex em relação as propriedades mecânicas. Isso envolveria a realização de ensaio de microdureza em amostras soldadas e não soldadas do vergalhão, ensaio de fadiga, ensaio de dobramento e ensaio Charpy.

Os ensaios mecânicos forneceriam informações valiosas sobre o comportamento do vergalhão Thermex após a soldagem, permitindo uma melhor compreensão de suas propriedades mecânicas em ambientes costeiros e contribuindo para a validação de sua aplicabilidade em estruturas sujeitas a esforços mecânicos.

7. REFERÊNCIAS

ALKHAWALDEH, Ayah; AL-ROUSAN, Rajai. **Behavior of RC beams with different bond strength**. Magazine of Civil Engineering, v. 107, n. 7. Percentil Scopus: 81%, p. 10702-10702, 2021.

ANDRADE, C.; ALONSO, C. **Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method**. Magazine: Materials and Structures, v. 37, n. 9, p. 623–643, 2004.

APPLETON, Júlio. Livro: **Construções em betão–Nota histórica sobre a sua evolução**. Lisboa: Instituto Superior Técnico, (Figura 1), p. 1-18, 2005.

ARAUJO, M. E. da S.; DIAS, A. K. C.; SANTOS, H. M.; SIMÕES, R. K.; CIRILO, M. P.; SPINOLA, T. P.; ANÍCIO, L. D.; ANDRADE, T. K. P. de; OLIVEIRA, T. M. **ELETROQUÍMICA**. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, [S.l.], v.7, n.10, p.1478–1483, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **projeto de estruturas de concreto**: procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

Balmer Tradição em Solda. **Eletrodo revestido E6013**. 2024. disponível em: <https://www.balmer.com.br/eletrodo-revestido-e-6013-3-25-mm>. acesso em 25/02/2024.

BARBOZA, Lucas da Silva; ALMEIDA FILHO, Fernando Menezes de. **Concreto autoadensável com baixo consumo de cimento: impacto da redução do consumo de cimento na resistência à compressão**. Revista Matéria (Rio de Janeiro), v. 23, Percentil Scopus: 14%, 2018.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. Artigo: **Fundamentos do concreto armado**. Bauru: Unesp, 2006.

BATISTA, Arildo. Artigo: **Desenvolvimento de vergalhões soldáveis e armaduras soldadas**. Piracicaba/SP, 2007.

BAUTISTA, A.; POMARES, J. C.; GONZÁLEZ, M. N.; VELASCO, F. **Influence of the microstructure of tmt reinforcing bars on their corrosion behavior in concrete with chlorides**. Revista Construction and Building Materials, Elsevier, 2019.

BECKER, Daniela. Livro: **Classificação dos Materiais**. São Paulo, SP. 2019.

BEJO, Felipe Govoni et al. **Estudo comparativo das propriedades mecânicas dos aços SAE 1045 e SAE 1020, em diferentes condições metalúrgicas, através dos ensaios de tração unidirecional e flexão em três pontos**. Revista: Matéria (Rio de Janeiro), v. 26, 2021.

BRICEÑO-MENA, J. A.; BALANCÁN-ZAPATA, M. G.; CASTRO-BORGES, P. **Qualidade do processo de passivação em concreto armado: efeitos da periodicidade de polarização e parâmetros de consolidação de passivação no processamento de dados**. Revista ALCONPAT, v. 10, n. 2, p. 243-258, 2020.

BROOMFIELD, J. P. Book: **Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair**. 2nd. ed. New York: Taylor & Francis, 2007

CASCUDO, OSWALDO. Livro: **O controle da corrosão de armaduras em concreto – inspeção e técnicas eletroquímicas**. Goiânia, GO: Editora UFG, 1997.

CHIAVERINI, Vicente. Livro: **Aços e ferros fundidos**. Abm, 1977.

DE ANDRADE, Priscyla Lima; RIBEIRO, Iara Margolis. Livro: **ciência e engenharia de materiais**. Rio de Janeiro, 2021.

DE ARAUJO, Adriana; PANOSSIAN, Zehbour. **Comportamento eletroquímico do açocarbono em concreto: potencial de eletrodo e densidade de corrente elétrica**. Revista Técnica Educação. 2017.

DE FREITAS, Denise Souza. **Avaliação da integração e reabilitação de dutos**. Instituto Nacional de Tecnologia, 2017. Disponível em: <http://sulgas.usuarios.rdc.puc-rio.br/Corrosao_Fundamentos.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2022.

DIAS, Felipe Rodrigues. **Caracterização da junta soldada de aço SAE 1020 com tratamento térmico pós soldagem**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

DIETRICH, Yustane Paula; TELES, Cláudia Rodrigues; VIEIRA, Geilma Lima. **Desempenho mecânico e análise da corrosão das armaduras em concretos produzidos com adição de resíduos de rochas ornamentais**. Revista Matéria (Rio de Janeiro), v. 22. Percentil Scopus: 20%. 2017.

DINO, Anderson. **Pilha de Daniell. Aulas de química**. Disponível em: <<http://www aulasdequimica.com.br/blog/infografico-pilha-de-daniell/>>. Acesso em: 08 de julho de 2022.

DUART, Marcelo Adriano et al. **Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinza de casca de arroz residual sem beneficiamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria/RS, 2008.

FERRAZ, Henrique. **O aço na construção civil**. Revista eletrônica de ciências. São Paulo, n. 22, 2003.

FORTES, LYTTELTON REBELO. **Corrosão na armadura do concreto armado e sua avaliação pela técnica do potencial de eletrodo**, dissertação de mestrado UFCE. Fortaleza, 1995.

FRAUCHES-SANTOS, Cristiane et al. **A corrosão e os agentes anticorrosivos**. Revista virtual de química, v. 6, n. 2, Percentil Scopus: 27%, p. 295, 2014.

GODINHO, Jayson Pereira et al. Artigo: **Influência do formato dos corpos de prova e da idade de cura nas leituras de velocidade de ultrassom, resistividade elétrica e resistência à compressão axial**. Anais do, v. 3, p. 116-129. 2018.

GOLDENBERG, Lucas. **MEV do concreto-agregado, pasta e zona de interface**. Researchgate. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-MEV-do-concreto-agregado-pasta-e-zona-de-interface_fig2_322317441>. acesso em: 11 de jul. de 2022.

HELENE, PAULO R.L. Livro: **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: Editora Pini – Instituto de pesquisas Tecnológicas IPT, 1986.

HELENE, Paulo RL. **Vida útil das estruturas de concreto**. In: IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções. Anais. Porto Alegre, RS. 1997.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. **Concreto de cimento Portland. Isaia, Geraldo Cechella**. Livro Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 905-944, 2007.

KAEFER, Luís Fernando. Livro: **A evolução do concreto armado**. São Paulo, v. 43, 1998.

MAURICE, Vincent; MARCUS, Philippe. **Progress in corrosion science at atomic and nanometric scales**. Revista Progress in Materials Science, v. 95, Percentil Scopus: 99%, p. 132-171, 2018.

MEDEIROS, Arthur et al. **Aplicação do ultra-som na estimativa da profundidade de fendas superficiais e na avaliação da eficácia de injeções em elementos de concreto armado**. Dissertação. 2007.

MEDEIROS, Marcelo HF et al. **Potencial de corrosão: influência da umidade, relação água/cimento, teor de cloretos e cobrimento**. Revista: IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 10, p. 864-885, 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Livro **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MEIRA, Gibson Rocha; PADARATZ, Ivo José; BORBA JÚNIOR, J. C. Artigo: **Carbonatação natural de concretos: resultados de cerca de quatro anos de monitoramento**. 11° ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2006.

MEIRA, Gibson. **Corrosão de armaduras em estrutura de concreto**. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/61340079-Corrosao-de-armaduras-em-estruturas-de-concreto.html>>. Acesso em: 11 de jul. de 2022.

MENDOZA, Antônio R.; CORVO, Francisco. **Corrosão atmosférica externa e interna de aço carbono**. Revista: Corrosion Science , v. 41, n. 1, pág. 75-86, Percentil Scopus: 92%, 1999.

MERÇON, Fábio; GUIMARÃES, Pedro Ivo Canesso; MAINIER, Fernando Benedito. Livro: **Corrosão eletroquímica**. 2017.

MITTAL, ARCELOR. **Manual do Processo de Fabricação de CA50S, CA25 e CA60 Nervurado**. 2016. Disponível em: <<http://longos.arcelormittal.com/pdf/produtos/construcao-civil/outros/manualfabricacao-ca-50-ca-60.pdf>> Acesso em, v. 21, 2016.

MORCILLO, Manuel et al. **Corrosão grande marina de aço carbono**. Revista de Metalurgia, v. 51, n. 2. Percentil Scopus: 39% 2015.

MOTTA, Valter T. Livro **Bioquímica clínica: princípios e interpretações**. Editora: Médica Massau, v. 9. pág. 167, 2000.

NEVILLE, Adam M. Livro **Propriedades do concreto-5ª Edição**. Bookman Editora, pág. 536, 2015.

OLIVEIRA, Fábio. Monografia: **Técnicas eletroquímicas de mitigação e terapia da corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado**. João Pessoa, PB. 2019.

OSÓRIO, Wislei Riuper et al. Artigo: **Efeito das diferentes morfologias estruturais e tamanho de grão na resistência à corrosão em amostras de alumínio e zinco puros**. In: 6º Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos. 2002.

PFEIL, Walter – Livro: **Estruturas de aço: Dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008**. 3ª Edição. Reimpressão. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

Processo de corrosão faz com que 30% da produção mundial de ferro e aço seja desperdiçada. IBRAM, 2020. Disponível em: <<https://ibram.org.br/noticia/processo-de-corrosao-faz-com-que-30-da-producao-mundial-de-ferro-e-aco-seja-desperdicada/>>. Acesso em: 12/05/2022 às 10:08.

RAMOS, David Henrique. **Avaliação de ensaios não destrutivos aplicados ao concreto armado**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2019.

RIBEIRO, Daniel Veras; SOUZA, Carlos Alberto Caldas; ABRANTES, J. C. C. **Uso da Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) para monitoramento da corrosão em concreto armado**. Revista Ibracon de estruturas e materiais, v. 8, p. 529-546, 2015.

RIBEIRO, P. H. L. C. et al. **Realcalinização de concretos carbonatados– influência de características do material**. Artigo. Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação das Construções - CINPAR. Córdoba, Argentina, p. 18, 2010.

ROCHA, Joaquin Humberto Aquino; PÓVOAS, Yêda Vieira. **Deteção de corrosão em concreto armado com termografia infravermelha e ultrassom**. Revista Ambiente Construído, v. 19, p. 53-68, 2019.

ROSSIGNOLO, João A.; AGNESINI, Marcos VC. **Propriedades mecânicas do concreto agregado leve modificado com polímero**. Revista: Pesquisa de Cimento e Concreto, v. 32, n. 3, pág. 329-334, Percentil Scopus: 99%. 2002.

SATO, Neide Matiko Nakata; AGOPYAN, Vahan. **Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos**. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

SCHWERTNER, Anderson; WILLE, Jackson; VERTUAN, Rodolfo. Artigo: **Pilhas eletroquímicas: uma abordagem didática com modelagem matemática**. In: Conferência Nacional Sobre Modelagem na Educação Matemática. Maringá, 2017.

SILVA, Hébori Cristine; MELO, Felipe Pereira. Artigo: **CARBONATAÇÃO DO CONCRETO: Análise comparativa da profundidade de carbonatação em concretos com agregados convencionais e reciclados**, 2020.

SILVA, Marcos VF et al. **Corrosão do aço-carbono: uma abordagem do cotidiano no ensino de química**. Revista: Química Nova, v. 38, p. 293-296, 2015.

SILVA, PAULO FERNANDO A. Livro: **Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana**. 1º ed. São Paulo: Editora Pini – Serrana, 1995.

SILVA, SARAH SANTOS E. **Diagnóstico de Estruturas de Concreto em Ambientes Marinhos: estudo de caso de uma plataforma de pesca**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, 2015.

SOUZA, Vitória Lima de. Monografia: **Efeito do tratamento térmico via laminação a quente na resistência à corrosão do vergalhão CA**. Fortaleza/CA, 2021.

TAVARES, Lisiane Morfeo. **Estudo do processo de corrosão por íons cloreto no concreto armado utilizando armaduras comuns e galvanizadas**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2006.

TROCONIS DE RINCÓN, O. et al. **Durabilidade do concreto armado em ambientes marinhos Projeto DURACON: exposição de longa duração**. Revista Engenharia de Corrosão, v. 72, n. 6, pág. 824-833, 2016.

WARTHA, Edson José; DE GUZZI FILHO, Neurivaldo José; DE JESUS, Raildo Mota. **O experimento da gota salina e os níveis de representação em química**. Revista Educación Química, v. 23, n. 1, Percentil Scopus: 22%, p. 55-61, 2012.

WOLYNEC, Stephan. Livro: **Técnicas eletroquímicas em corrosão Vol. 49**. Edusp, 2003.

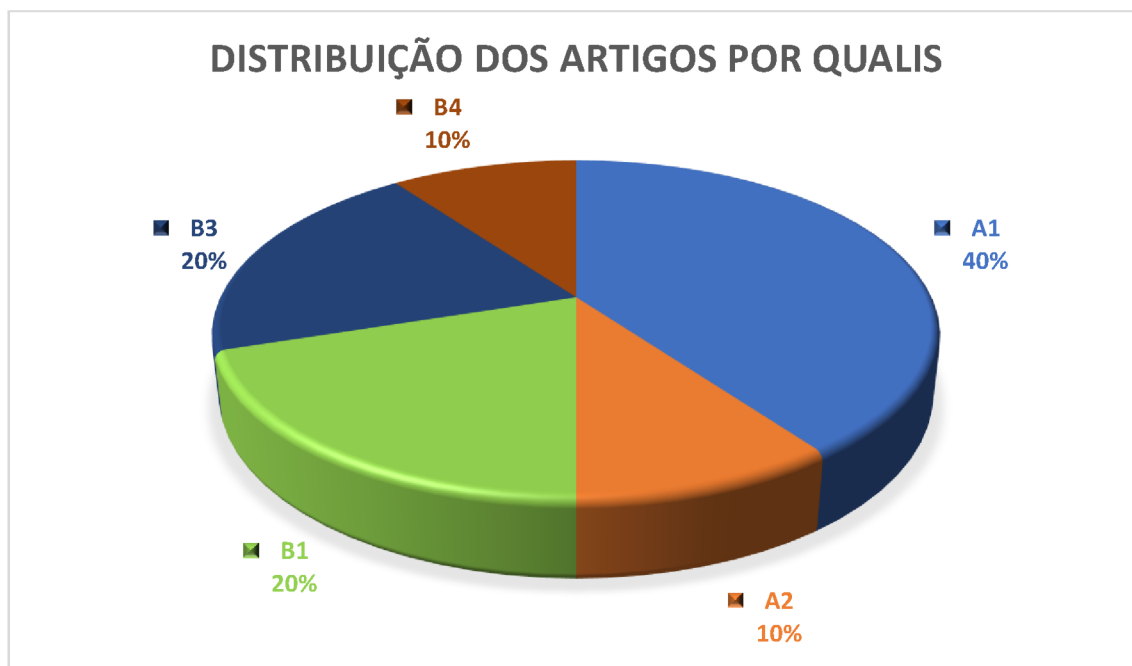
WOSNIACK, Laís Mariana et al. **Resistividade elétrica do concreto pelo ensaio de migração de cloretos: comparação com o método dos quatro eletrodos**. Revista: Ambiente Construído, v. 21, p. 321-340, 2021

ZEEMANN, Annelise. **Corrosão em juntas soldadas**. Revista: Infosolda. Rio de Janeiro/RJ, 2003.

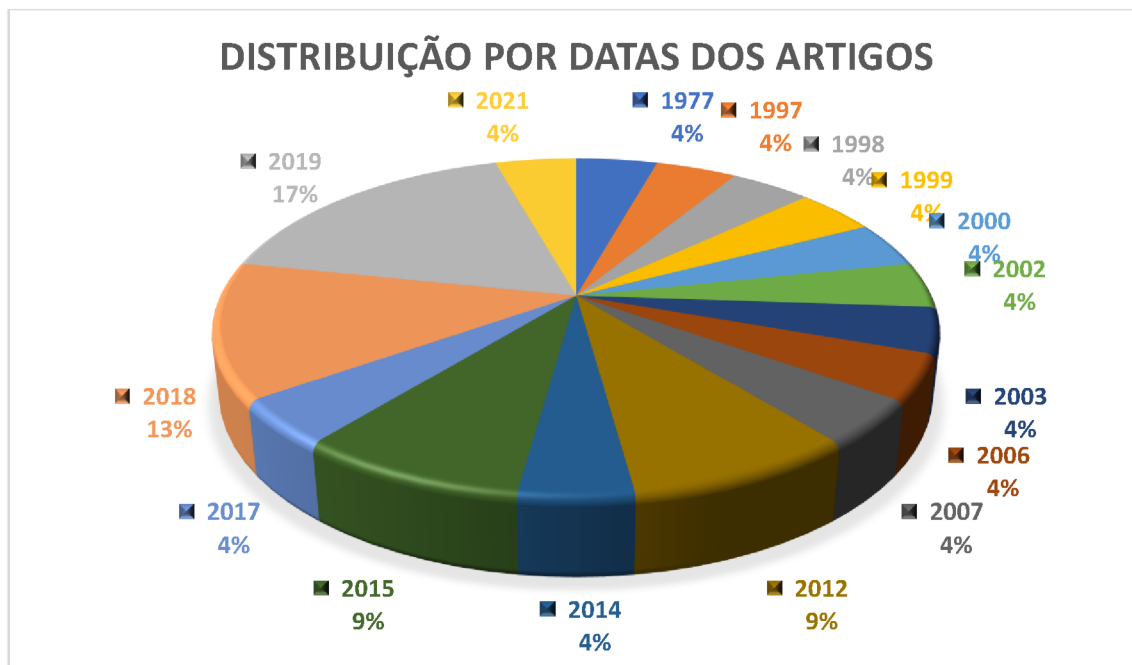
8. REFERÊNCIAS POR ESTRATO



9. REFERÊNCIAS POR QUALIS

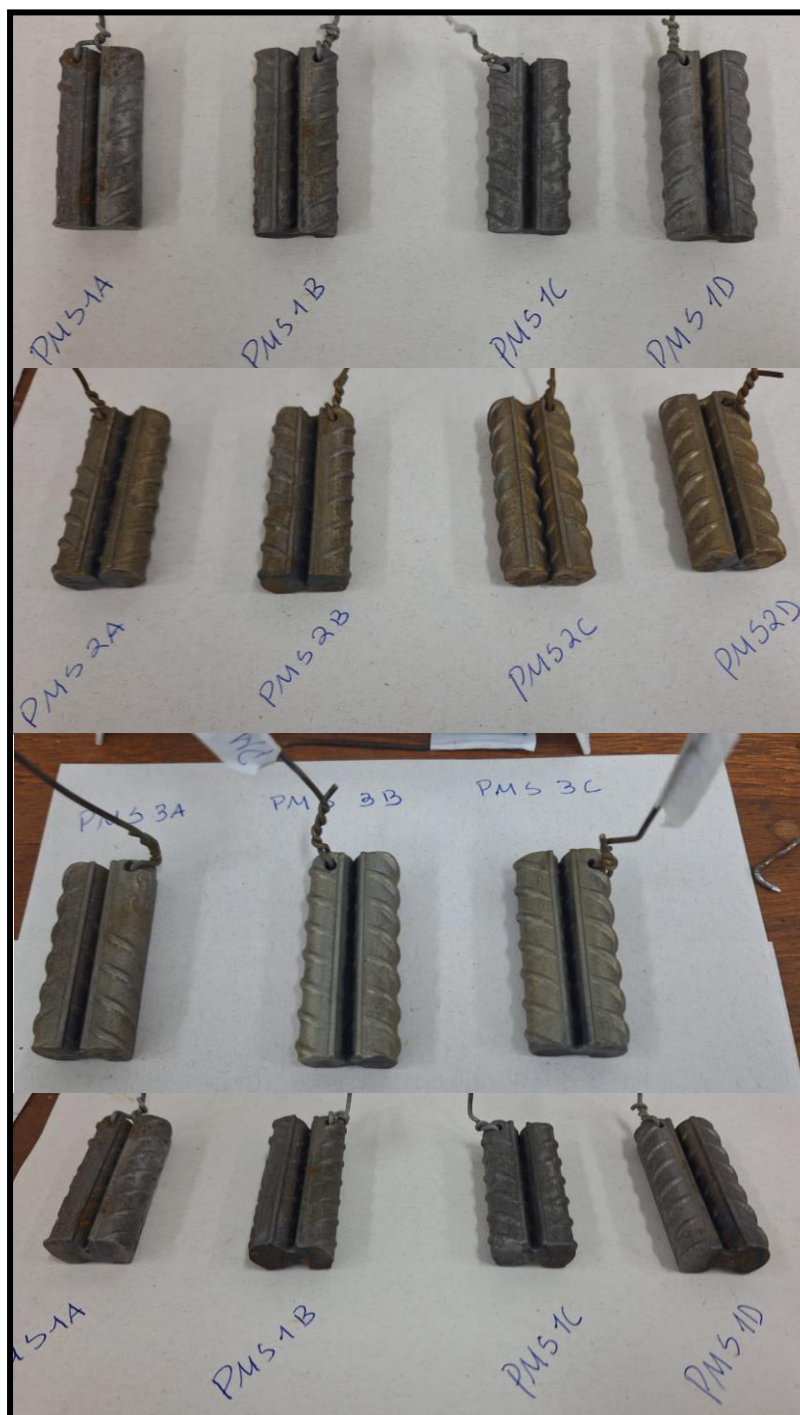


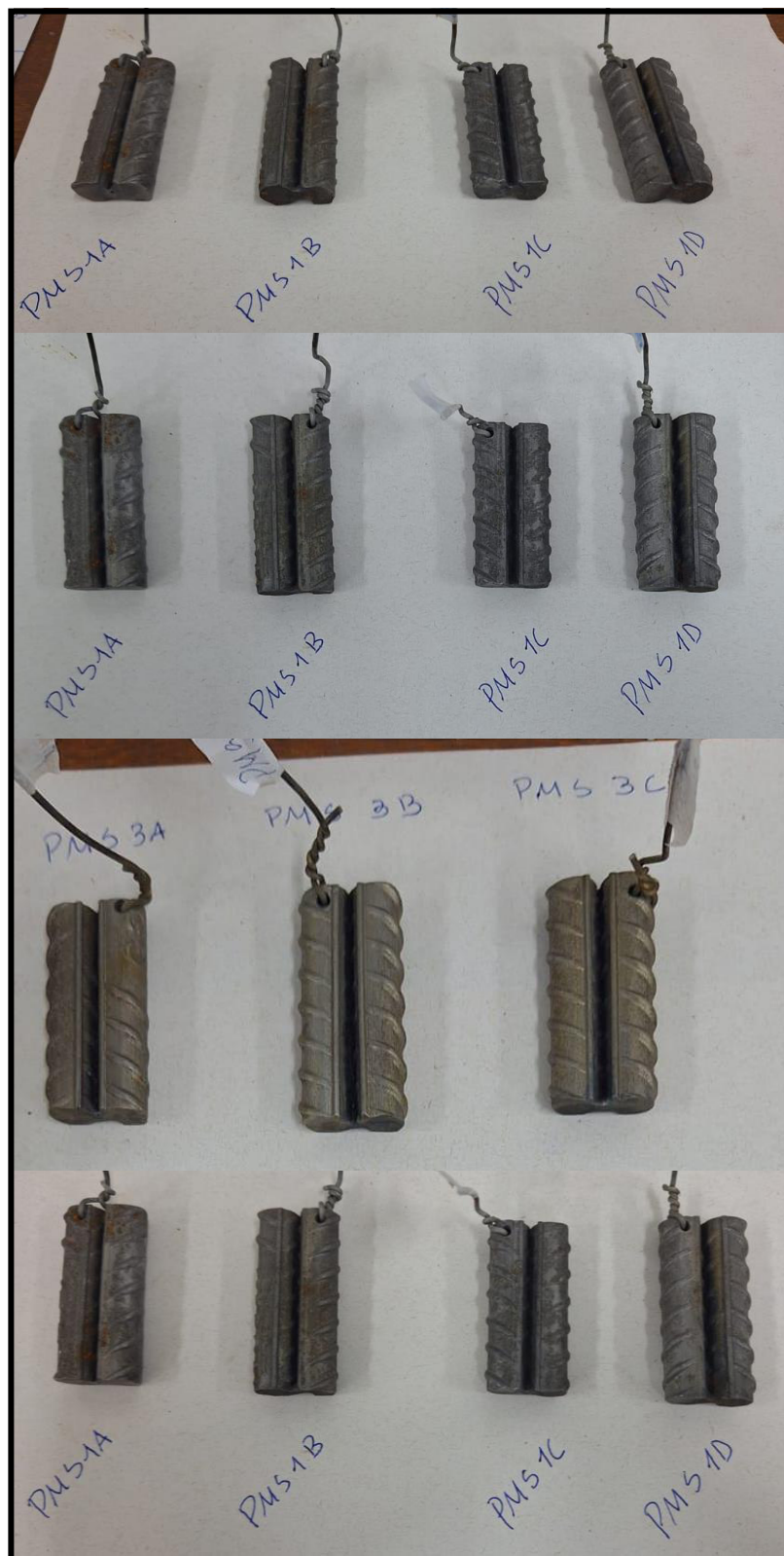
10. REFERÊNCIAS POR DATAS DOS ARTIGOS



11. APÊNDICE A - IMAGENS

Figura 73 - Vergalhões soldados e amarrados





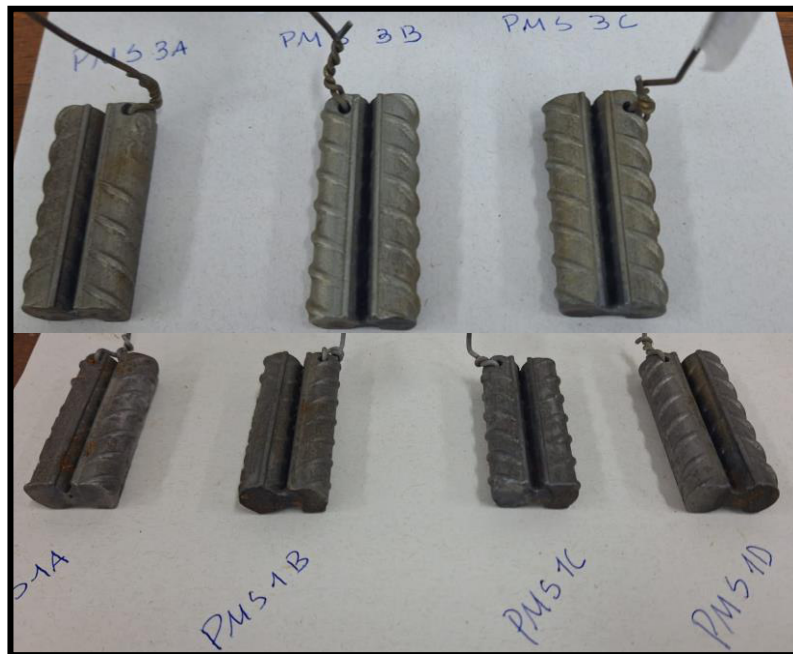


Figura 75 - Amostras amarradas



12. APÊNDICE B – DIAGRAMA DE NYQUIST

Figura 77 - Metal Base 1, 2 e 3

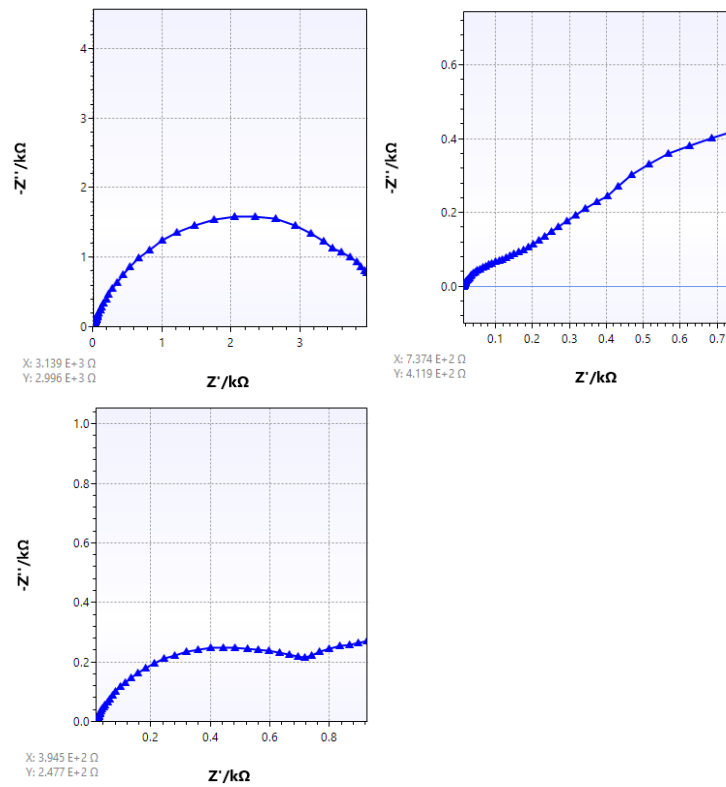
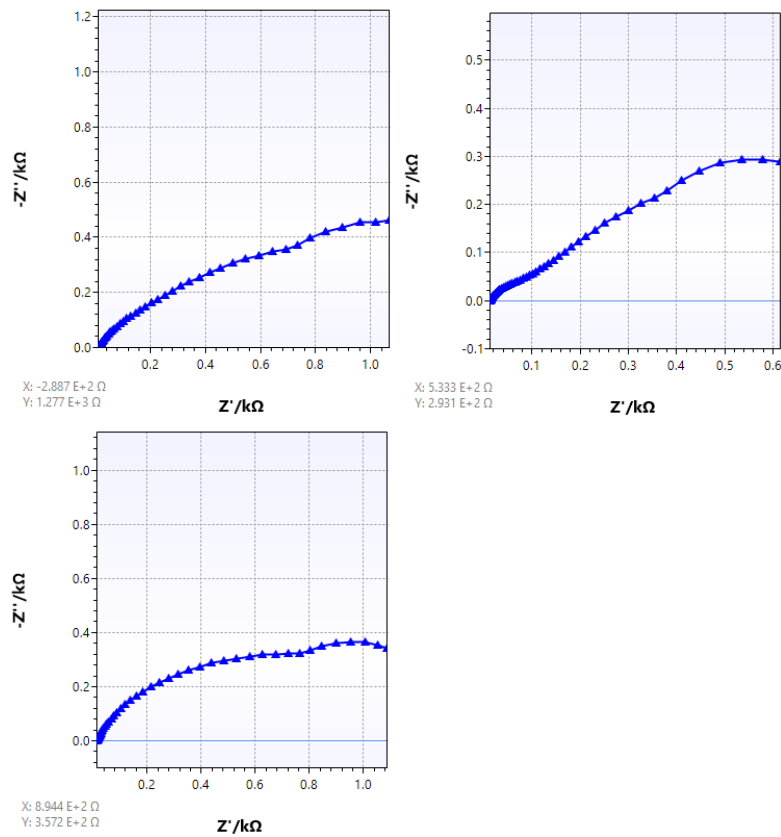


Figura 78 - Metal de Solda 1, 2 e 3



Fonte: Próprio Autor.

13. APÊNDICE C – CURVAS DE POLARIZAÇÃO

Figura 79 - Metal Base 1, 2 e 3

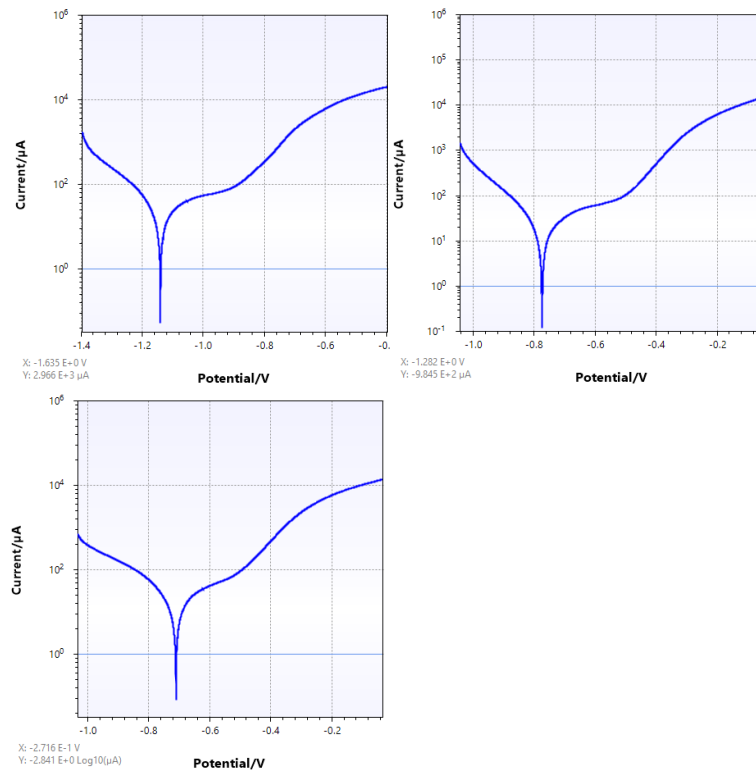
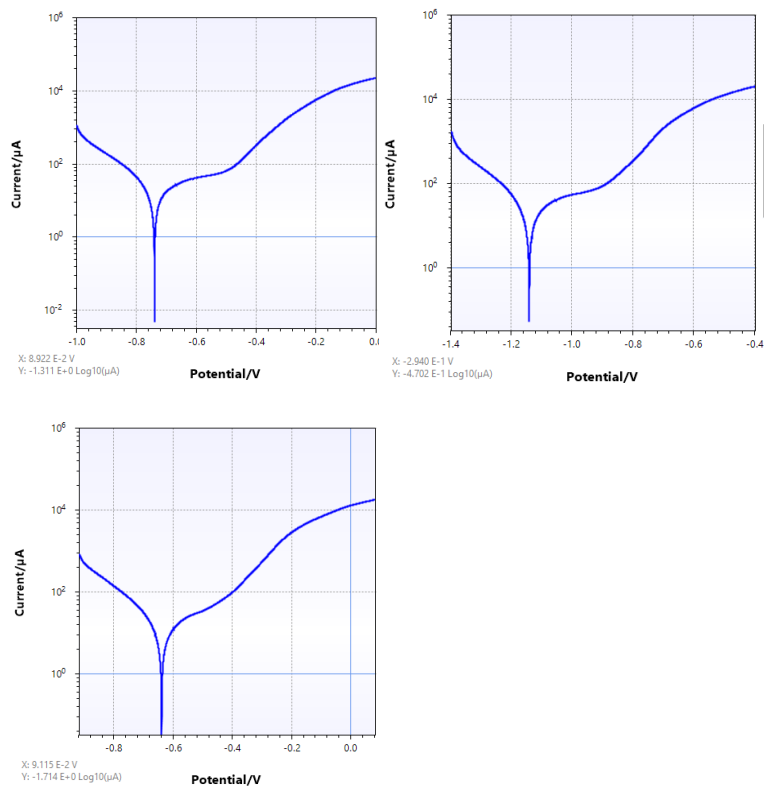


Figura 80 - Metal de Solda 1, 2 e 3



Fonte: Próprio Autor.