

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

THALITA ALMEIDA DE LIMA

**AVALIAÇÃO DOS RISCOS OPERACIONAIS DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL
EM VIGAS DE A36 AFETADAS POR CORROSÃO EM ATMOSFERA MARINHA**

BELO HORIZONTE

2022

THALITA ALMEIDA DE LIMA

AVALIAÇÃO DOS RISCOS OPERACIONAIS DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL EM
VIGAS DE A36 AFETADAS POR CORROSÃO EM ATMOSFERA MARINHA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
no Curso de Graduação em Engenharia de
Materiais do Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Wellington Lopes

Coorientadores: Ariadna Moreira

Marcos Estevão Assumpção

BELO HORIZONTE

2022

THALITA ALMEIDA DE LIMA

**AVALIAÇÃO DOS RISCOS OPERACIONAIS DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL
EM VIGAS DE A36 AFETADAS POR CORROSÃO EM ATMOSFERA MARINHA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
no Curso de Graduação em Engenharia de
Materiais do Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Materiais

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wellington Lopes– Orientador

Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Prof. Dr. Marcello Rosa Dumont

RESUMO

Dentre os materiais mais importantes para o desenvolvimento humano, estão os materiais metálicos, porém existem diversos problemas que podem custar a sua aplicabilidade, sendo um deles, a corrosão, a qual é definida como a deterioração de um material metálico por ação química ou eletroquímica do meio associada ou não a esforços mecânicos. A ocorrência de falhas estruturais caracterizadas pela corrosão leva ao comprometimento da integridade estrutural de equipamentos metálicos na indústria. Neste trabalho, avaliou-se a presença de corrosão em vigas metálicas de um espessador de polpas localizado em uma região costeira. A atmosfera marinha é carregada de partículas que podem proporcionar a corrosão por aeração diferencial em superfícies metálicas e, para avaliar esse risco, é preciso fazer uma boa gestão de riscos a qual determina planos de ação que evitem ou mitiguem um evento indesejado. Neste trabalho, usou-se uma metodologia chamada Gerenciamento de Riscos Operacionais (ORM), que é dividida em quatro camadas as quais proporcionam uma melhor abordagem dos riscos envolvidos, sendo que neste trabalho, foram abordadas as duas primeiras camadas, com foco nas ferramentas *Baseline WRAC* (Workplace Risk Assessment Control) e *Bowtie* (gravata-borboleta). Para tal, amostras de aço ASTM A36 com partes corroídas e íntegras foram retiradas do espessador e analisadas. Os resultados obtidos por microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva apresentaram uma acentuada corrosão na forma de pites, porém com uma baixa penetração. Os ensaios de tração e de dureza mostraram que as propriedades mecânicas obtidas entre as regiões oxidadas e não oxidadas não exibiram diferenças significativas. O ensaio de espectroscopia óptica mostrou a presença de particulados na atmosfera que indicam a presença de matéria orgânica e microorganismos que podem afetar características estruturais e químicas da superfície. Como resultado da metodologia ORM, a revisão da *Baseline WRAC* foi feita e o *Bowtie* foi atualizado de modo a determinar quais controles devem ser observados durante as inspeções para evitar falhas estruturais. Como resultado desse estudo, percebe-se que com a frequência de inspeção anual, o tempo de vida útil das vigas do pode ser prolongado por, pelo menos, 10 anos.

Palavras chave: ORM. Gestão de riscos. Corrosão. Mineração.

ABSTRACT

Among the most important materials for human development are metallic materials, but there are several problems that can cost their applicability, one of them being corrosion, which is defined as the deterioration of a metallic material by chemical or electrochemical action of the environment associated or not with mechanical stress. The occurrence of structural failures characterized by corrosion leads to the compromise of the structural integrity of metallic equipment in industry. In this work, we evaluated the presence of corrosion in metallic beams of a pulp thickener located in a coastal region. The marine atmosphere is loaded with particles that can cause corrosion by differential aeration on metallic surfaces. To evaluate this risk, it is necessary to have a good risk management, which determines action plans to avoid or mitigate an undesired event. In this work, a methodology called Operational Risk Management (ORM) was used, which is divided into four layers that provide a better approach to the risks involved. In this work, the first two layers were approached, focusing on the Baseline WRAC (Workplace Risk Assessment Control) and Bowtie (bowtie) tools. For this purpose, ASTM A36 steel samples with corroded and intact parts were taken from the thickener and analyzed. The results obtained by scanning electron microscopy and energy dispersive spectroscopy show a marked generalized corrosion, but with low penetration. The tensile and hardness tests showed that the mechanical properties obtained between the oxidized and non-oxidized regions did not exhibit significant differences. The optical spectroscopy test showed the presence of particulates in the atmosphere that indicate the presence of organic matter and microorganisms that can affect structural and chemical characteristics of the surface. As a result of the ORM methodology, the WRAC Baseline was revised and Bowtie was updated to determine which controls should be observed during inspections to avoid structural failures. As a result of this study, it can be seen that with annual inspection frequency, the service life of the beams can be extended by at least 10 years.

Keywords: ORM. Risk management. Corrosion. Mining.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me fortalecido durante todo o meu curso de graduação e me capacitado durante a realização deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, Maria e Juarez, e minha irmã e cunhado, Jessica e Gilberto, e ao meu marido, Carlos, pelo amor, cuidado e força que me dão para que eu possa alcançar meus sonhos e superar minhas dificuldades.

Também agradeço ao meu professor orientador Wellington Lopes pelo suporte, dedicação e por se dispor a me auxiliar na elaboração deste trabalho de modo solícito e atencioso. Ao CEFET-MG, colegas do curso e professores do departamento de Engenharia de Materiais, que caminharam comigo e contribuíram para minha trajetória acadêmica e profissional, em especial à Thais Moreira que foi um apoio muito especial nessa trajetória.

Agradeço à empresa Anglo American Minério de Ferro Brasil pelo fornecimento dos corpos de prova e pelo investimento neste projeto, e aos meus coorientadores Ariadna Moreira e Marcos Assumpção pelo apoio e suporte.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Fluxograma característico do beneficiamento de minério da Anglo American...	19
Figura 3.2 – Visão aérea do km 41 do mineroduto no trecho Minas–Rio da Anglo American	20
Figura 3.3 – Operação de Filtragem da Anglo American.....	20
Figura 3.4 – Espessador da Anglo American	21
Figura 3.5 – Modelo de <i>Baseline</i> WRAC	25
Figura 3.6 – Modelo genérico de Matriz de Riscos 5x5.....	25
Figura 3.7 – Modelo genérico de <i>Bowtie</i>	27
Figura 3.8 – Local onde a corrosão foi observada no espessador de minério de ferro.....	28
Figura 4.1 – Fluxograma do procedimento experimental.....	33
Figura 4.2 – Vigas do espessador de polpas contendo pontos de corrosão	35
Figura 4.3 – Fluxo de revisão de <i>Baseline</i> WRAC	36
Figura 4.4 – Amostras de tamanho 15x15mm.....	36
Figura 4.5 – Corte feito na amostra para os ensaios de microdureza e microscopia.....	39
Figura 4.6 – Vista superior do corte	39
Figura 4.7 – Divisão das amostras.....	40
Figura 4.8 – Locais de análise na amostra A.....	41
Figura 4.9 – Locais de análise na amostra B	41
Figura 4.10– Locais de análise na amostra C	42
Figura 4.11– Locais de análise na amostra D.....	42
Figura 4.12 – Topo da amostra usada.....	43
Figura 4.13 – Perfil da amostra usada	43
Figura 5.1 – Amostras retiradas da viga de sustentação do espessador de polpas e os ensaios associados a cada região	44
Figura 5.2 – Condição visual de uma das amostras retirada da viga do espessador	45
Figura 5.3 – Última versão da <i>Baseline</i> WRAC para corrosão no espessador	55
Figura 5.4 – Linha do risco de corrosão nas estruturas do espessador da <i>Baseline</i> WRAC após a revisão.....	46
Figura 5.5 – Controles relacionados à corrosão de estruturas inseridos no <i>Bowtie</i>	48
Figura 5.6 – Amostras em imersão na água do mar	51
Figura 5.7 – Diferença de massa inicial x massa final das amostras em imersão	53
Figura 5.8 – Faces de menor área dos corpos de prova após o período de imersão.....	54

Figura 5.9 – Faces de maior área dos corpos de prova após o período de imersão.....	54
Figura 5.10 – Água do mar analisada ao final do ensaio de perda de massa do aço imerso ...	56
Figura 5.11 – Locais de análise na amostra A	57
Figura 5.12 – Microestrutura obtida na região central da amostra A	57
Figura 5.13 – Microestrutura obtida na região próxima à superfície da amostra A	58
Figura 5.14 – Locais de análise na amostra B	58
Figura 5.15 – Microestrutura obtida na região central da amostra B	59
Figura 5.16 – Microestrutura obtida nas regiões próximas à superfície da amostra B.....	59
Figura 5.17 – Locais de análise na amostra C	60
Figura 5.18 – Microestrutura obtida na região central da amostra C	60
Figura 5.19 – Microestrutura obtida na região próxima à superfície da amostra C	61
Figura 5.20 – Locais de análise na amostra D.....	61
Figura 5.21 – Microestrutura obtida na região central da amostra D	62
Figura 5.22 – Microestrutura obtida na região próxima à superfície da amostra D	62
Figura 5.23 – Região das amostras do ensaio de microdureza Vickers	63
Figura 5.24 – Imagem obtida do MEV da região 1 do topo da amostra	65
Figura 5.25 – Gráfico comparativo do percentual de elementos das áreas 1 e 2.....	66
Figura 5.26 – Gráfico comparativo do percentual de óxidos das áreas 1 e 2	66
Figura 5.27 – Imagem obtida do MEV da região 2 do topo da amostra	67
Figura 5.28 – Gráfico comparativo do percentual de elementos das áreas 1 a 5.....	67
Figura 5.29 – Gráfico comparativo do percentual de óxidos das áreas 1 a 5	68
Figura 5.30 – Imagem obtida do MEV da região 3 do topo da amostra	68
Figura 5.31 – Gráfico comparativo do percentual de elementos das áreas 1 a 6.....	69
Figura 5.32 – Imagem obtida do MEV da região 4 do perfil da amostra	70
Figura 5.34 – Gráfico comparativo do percentual de elementos das áreas 1 a 6.....	70
Figura 5.35 – Gráfico comparativo do percentual de óxidos das áreas 1 a 6	71
Figura 5.36 – Imagem obtida do MEV de óxido no perfil da amostra	72
Figura 5.37 – Pontos de pite com maior profundidade	72
Figura 5.38 – Pontos de medição da largura do pite	73

Figura 5.39 – Variações na forma da seção transversal dos poços de pite..... 73

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1- Concentração padrão dos elementos químicos do aço A36	34
Tabela 4.2- Cronograma de revisão da Baseline	36
Tabela 5.1- Parâmetros das amostras do ensaio de tração	49
Tabela 5.2- Identificação das amostras usadas no ensaio de tração	49
Tabela 5.3- Resultados do ensaio de tração	50
Tabela 5.4- Composição química do aço A36 retirado do espessador	50
Tabela 5.5- Posições das amostras correspondentes a cada tubo de ensaio	52
Tabela 5.6- Condições finais das amostras correspondentes a cada tubo de ensaio	52
Tabela 5.7- Resultados da análise de FRX da água do mar	55
Tabela 5.8- Resultados da análise de FRX da água do bebedouro	55
Tabela 5.9- Resultados da análise de FRX da água do mar após o ensaio de imersão	56
Tabela 5.10- Resultados da amostra A	63
Tabela 5.11- Resultados da amostra B	64
Tabela 5.12- Resultados da amostra C	64
Tabela 5.13- Resultados da amostra D	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ORM	Operational Risk Management
WRAC	Workplace Risk Assessment Control
PUE	Eventos indesejados prioritários
TPC	Taxa de penetração da corrosão
W	Perda de peso da amostra
t	Tempo de exposição ao ambiente corrosivo
A	Área exposta da amostra
ρ	Massa específica da amostra
K	Constante
M	Metal hipotético
n	Número de elétrons de valência
e^-	Elétron
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
EDS	Espectroscopia por energia dispersiva
FRX	Fluorescência de raio x
ASTM	American Society for Testing and Materials
HV	Dureza Vickers
LE	Límite de escoamento;
LRT	Límite de Resistência à Tração;
F _{máx}	Força Máxima
L _f	Comprimento final
A _f	Área final
ISO	International Organization for Standardization

LISTA DE SÍMBOLOS

Fe	Ferro
AL ₂ O ₃	Óxido de alumínio
WO ₃	Óxido de tungstênio
N	Nitrogênio
CO ₂	Dióxido de carbono
Mn	Manganês
Cu	Cobre
P	Fósforo
Si	Silício
S	Enxofre
Cr	Cromo
Mb	Molibdênio
Cl	Cloro
Na	Sódio
K	Potássio
Br	Bromo
Na ₂ O	Óxido de sódio
MgO	Óxido de magnésio
SiO ₂	Dióxido de silício
SO ₂	Dióxido de enxofre
SO ₃	Trióxido de enxofre
CaO	Óxido de cálcio
TiO ₂	Dióxido de titânio
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro III

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo geral	16
2.2 Objetivos específicos	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 Minério de Ferro	17
3.2 Processo de mineração	18
3.2.1 <i>Filtragem e espessamento de polpa de minério</i>	19
3.3 Riscos Operacionais	21
3.4 Gestão de riscos operacionais associados à Integridade Estrutural	22
3.4.1 <i>Operational Risk Management (ORM)</i>	24
3.4.2 <i>Ferramentas de ORM</i>	24
3.4.2.1 <i>Baseline (WRAC)</i>	24
3.4.2.2 <i>Bowtie</i>	26
3.5 Corrosão metálica	28
3.5.1 <i>Tipos de corrosão</i>	30
3.5.2 <i>Corrosão em atmosfera marinha</i>	31
3.5.3 <i>Métodos usuais de combate e prevenção à corrosão</i>	32
4 MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1 Material	33
4.1.2 <i>Corpos de prova</i>	34
4.2 Métodos	35
4.2.1 <i>Revisão da Baseline</i>	35
4.2.2 <i>Caracterização dos materiais</i>	36
4.2.2.1 <i>Ensaio de tração</i>	36
4.2.2.2 <i>Análise química por Espectroscopia de Emissão óptica</i>	37
4.2.2.3 <i>Análise de Corrosão por Perda de Massa</i>	37

4.2.2.4 Fluorescência de raios X	38
4.2.2.5 Metalografia	38
4.2.2.6 Microdureza Vickers.....	40
4.2.2.7 Microscopia eletrônica de varredura com Espectroscopia por energia dispersiva ...	43
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5.1 Revisão da <i>Baseline</i>	45
5.2 Ensaio de tração.....	49
5.3 Análise química por Espectroscopia de Emissão óptica	50
5.4 Análise de Corrosão por Perda de Massa	51
5.5 Fluorescência de raios X	55
5.6 Metalografia.....	56
5.7 Microdureza Vickers.....	63
5.8 Microscopia eletrônica de varredura com Espectroscopia por energia dispersiva....	65
6 CONCLUSÕES.....	74
REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da espécie humana e da tecnologia criada ao longo do tempo está diretamente ligado aos materiais descobertos na natureza e produzidos pelo ser humano. Isto é configurado de modo tão significativo que as diferentes eras da humanidade são nomeadas de acordo com o material que foi mais importante em cada uma delas, como a Idade da Pedra, Idade do Ferro, Idade do Bronze, dentre outras (NAVARRO, 2006).

Vê-se que essa estreita relação entre o desenvolvimento tecnológico e os materiais fez com que diversos estudos fossem direcionados para esse tema, de modo a evoluir a produção de materiais para que tornassem cada vez mais resistentes, eficientes, duráveis e acessíveis (NAVARRO, 2006).

Dentre os materiais mais importantes para o desenvolvimento humano, estão os materiais metálicos ferrosos. Desde quando o ser humano passou a compreender e trabalhar com os metais, ele lida com problemas que podem custar a sua aplicabilidade, sendo um deles, a corrosão, visto que, de modo geral, aços apresentam baixa resistência à corrosão em meios naturais caso não possuam revestimentos (FRAUCHES-SANTOS, 2013).

Define-se a corrosão como a deterioração de um material, normalmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio associada ou não a esforços mecânicos (ENEMET, 2019). Este mecanismo de deterioração resulta em transtornos significativos para diversas atividades, gerando danos materiais, humanos e financeiros (FRAUCHES-SANTOS, 2013).

Fraturas repentinas de equipamentos e estruturas podem ocorrer caso estes estejam sob ação corrosiva, podendo resultar em falhas e acidentes de forma direta, assim como contribuir para a ocorrência de outros mecanismos, como a fadiga (XXI CONEMI, 2021).

É possível perceber como a corrosão pode afetar drasticamente a aplicação efetiva de aços de função estrutural, que são altamente usados em variadas condições ao redor do mundo, inclusive em meios de alta corrosividade, como atmosfera marítima e industrial (XXI CONEMI, 2021). A ocorrência de falhas estruturais caracterizadas pela corrosão leva ao comprometimento da integridade estrutural do equipamento ou estrutura.

A indústria de mineração é uma das que são fortemente afetadas pelo problema de corrosão em seus equipamentos e estruturas. O processo de beneficiamento de minério de ferro exige condições estruturais adequadas de seus equipamentos para que consiga operar de forma segura e eficiente, atenuando a ocorrência de riscos operacionais que possam paralisar a operação.

Uma das formas de avaliar a integridade de um equipamento de modo a prevenir a ocorrência de uma fatalidade e detectar os riscos associados à determinadas atividades, é aplicando uma boa gestão de riscos operacionais que é feita através do uso de ferramentas que permitem que situações críticas sejam controladas e mitigadas (GALANTE, 2015).

O presente trabalho busca avaliar o risco perda de integridade estrutural nas vigas de aço A36 do espessador de polpa de minério de ferro em decorrência da presença de corrosão, o qual é localizado em uma região costeira, além de determinar características mecânicas e químicas da estrutura metálica de modo a compreender as condições do equipamento e promover planos de ação baseados em gestão de riscos que evitem a ocorrência de falhas de integridade estrutural as quais possam levar uma parada operacional ou fatalidades envolvendo pessoas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar e caracterizar a ocorrência de corrosão em vigas de aço A36 de um espessador de polpas de minério de ferro da através das ferramentas de gestão de riscos operacionais e de análises mecânicas, químicas e de resistência à corrosão na estrutura.

2.2. Objetivos específicos

- Avaliar o risco de perda de integridade estrutural do espessador de polpas em decorrência da presença de corrosão por meio da gestão de riscos operacionais.
- Detalhar os fatores favoráveis à ocorrência de corrosão nas vigas do equipamento.
- Determinar quais os tipos de corrosão estão presentes nas vigas.
- Propor estratégias que controlem a ocorrência da corrosão nas vigas via gestão de riscos.
- Determinar, de forma preventiva, as possíveis causas e consequências que o risco de falha estrutural acarretaria para a empresa em caso de acidentes.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Minério de Ferro

De forma geral, uma substância mineral consiste em um corpo inorgânico sólido/cristalino com composição química e propriedades físicas definidas, encontrada, normalmente, na crosta terrestre, enquanto minério consiste em toda rocha constituída de um ou mais minerais, que podem ser aproveitados economicamente (DA LUZ; LINS, 2010).

O ferro é um dos elementos químicos mais usados na indústria mundial, sendo o minério de ferro o mineral mais extraído em volume da crosta do planeta. As principais reservas mundiais estão localizadas no Brasil, Austrália, China, Índia, Ucrânia, Rússia, Estados Unidos, Canadá e África do Sul (PEREIRA, 2012). O Brasil é um país que se destaca no mercado mundial, visto que possui reservas abundantes e com minérios de alto teor de Fe, sendo estas concentradas nas regiões do Quadrilátero Ferrífero, da Província Mineral de Carajás e a região de Corumbá (BNDES, 2014). O alto teor de Fe é encontrado nos minérios Hematita, predominantemente no Pará, e de Itabirito, em Minas Gerais (PEREIRA, 2012).

A extração do minério de ferro constitui uma das atividades minerais mais importantes do país, desde a definição das jazidas minerais até, por fim, a comercialização dos produtos derivados do processamento do minério de ferro (PEREIRA, 2012). A demanda de minério de ferro é altamente voltada para a produção de aço e ferro fundido, representando mais de 90% do mercado, enquanto outras aplicações são nas indústrias de ferro-ligas e cimento (BNDES, 2014).

Com tamanha demanda, o minério de ferro é indispensável no cotidiano das pessoas e indústrias, presente em diversos produtos, como ferramentas, máquinas, veículos, cabos de transmissão elétrica, elemento fundamental na construção civil, entre outras aplicações (PEREIRA, 2012).

Características como granulometria e propriedades físico-químicas correspondentes aos teores de ferro e outros elementos presentes no minério, são fundamentais para a comercialização do minério de ferro (PEREIRA, 2012).

A alta demanda de minério de ferro por parte da China, que gerou uma grande influência para o crescimento mundial na última década, foi um acelerador para o mercado de mineração, tornando o minério de ferro uma *commodity* altamente lucrativa e atrativa para investimentos. Estima-se que o consumo de produtos de aço chegou a crescer a taxas maiores que 10% antes da crise de 2008, enquanto a produção de aço bruto mundial cresceu à uma taxa média de 5%

entre 2000 e 2012, impulsionada por previsões do crescimento da demanda, criando um excedente considerável (BNDES, 2014).

Como resultado da urbanização, dos maiores níveis de escolaridade e do poder aquisitivo, a população busca cada vez mais por produtos que elevem sua qualidade de vida, como geladeiras, veículos de transporte próprios, celulares, dentre outros. Somente na China, as 20 maiores cidades concentram cerca de 110 milhões de habitantes e, prevê-se que, até 2025, o país contará com 22 cidades com mais de 10 milhões de habitantes, sendo 15 delas com mais de 25 milhões de habitantes. Este crescimento intensificará ainda mais o consumo de produtos provenientes do ferro extraído pelas indústrias de mineração (PEREIRA, 2012).

3.2 Processo de mineração

Para a produção dos inúmeros produtos baseados no uso de aço e outras ligas ferrosas, o processamento do minério de ferro extraído da natureza é essencial. Isto ocorre, pois, os minérios não são extraídos na forma a ser consumida ou processada na indústria, tanto pelo tamanho granulométrico da rocha quanto pela composição química (VALE, 2014).

A adequação dos minerais extraídos é realizada por meio do beneficiamento de minérios, uma etapa de tratamento que ocorre por meio de um conjunto de operações sequenciais, para que estes se enquadrem aos parâmetros necessários na indústria, em especial a siderúrgica. Para tal, é preciso adequar a granulometria e concentrar ou purificar minérios por meios físicos ou físico-químicos sem alterar sua composição química (CURI, 2014). O processo geral do beneficiamento de minério feito na mineradora Anglo American Brasil é explicitado no fluxograma mostrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Fluxograma característico do beneficiamento de minério da Anglo American



Fonte: AA, 2022.

Na Anglo American, a operação de minério de ferro no Brasil é chamada de Minas-Rio e está localizada entre os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro. É uma operação integrada, com mina, usina de beneficiamento, mineroduto e terminal no Porto de Açu. O minério é transportado da mina e da usina de beneficiamento, em Conceição do Mato Dentro e Alvorada de Minas (MG), até o porto, em São João da Barra (RJ), ao longo de um mineroduto de 529 quilômetros, que atravessa 33 municípios mineiros e fluminenses (ORNELAS; FERREIRA; SOUZA; FREITAS, 2019).

3.2.1 Filtragem e espessamento de polpa de minério

Após as etapas básicas de lavra, britagem, peneiramento, classificação e formação do concentrado, uma das etapas mais importantes do beneficiamento de minério consiste no espessamento da polpa.

Na indústria de mineração, essa polpa é formada para se adequar ao sistema de transporte de suspensões: os minerodutos, os quais são formados por grandes tubulações que podem percorrer centenas de quilômetros carregando a polpa mineral formada por água e minério moído, além de serem um meio de transporte de baixo custo operacional, confiável, seguro e que apresenta um menor impacto ambiental se comparado a outros meios. O

mineroduto, mostrado na Figura 3.2, pode transportar a suspensão usando força gravitacional ou bombeamento (LARA, 2011).

Figura 3.2 – Visão aérea do km 41 do mineroduto no trecho Minas-Rio da Anglo American



Fonte: Arquivo interno.

A polpa transportada segue para o processo de espessamento, que consiste em uma etapa de separação sólido-líquido por meio da ação gravitacional ou bombeamento, a qual busca recuperar a água do transporte para reutilização no processo, adequar a concentração de sólidos para as etapas posteriores do beneficiamento e reduzir a umidade do minério para transporte (SOUSA, 2012).

Na Anglo American Brasil, esse processo ocorre na planta da Filtragem, no Porto do Açu- Rio de Janeiro, cuja operação é mostrada na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Operação de Filtragem da Anglo American



Fonte: Arquivo Interno.

Normalmente, em processos hidrometalúrgicos, combina-se duas operações de separação sólido-líquido: o espessamento e a filtração. Esta combinação favorece a formação de uma polpa espessa por meio de uma remoção significativa de água do concentrado, podendo chegar a algo em torno de 55% a 60% de sólido. Essa mistura é filtrada e tem ainda mais água retirada, podendo alcançar uma concentração de até 90% de sólido OLIVEIRA, 2004). Na Anglo American, os espessadores recebem a polpa de minério com percentual de sólidos abaixo de 72%.

A operação do espessamento é realizada por equipamentos chamados espessadores (Figura 3.4, indicados pelo círculo vermelho), os quais consistem em tanques cilíndricos abertos, cuja suspensão sólida-líquida entra na parte superior, enquanto o fundo do equipamento, normalmente de formato cônico, realiza a retirada da polpa espessa (SOUSA, 2012).

Figura 3.4 – Espessador da Anglo American



Fonte: Arquivo interno.

O espessamento é um método de retirada de água bastante comum devido à simplicidade de funcionamento e custos relativamente baixos. Os espessadores consistem em reservatórios onde a suspensão transportada pelo mineroduto é armazenada até que ocorra a sedimentação das partículas sólidas no fundo do tanque (OLIVEIRA, 2004).

3.3 Riscos Operacionais

De modo geral, riscos são entendidos como:

O risco é um componente integral de todas as transações futuras. Hoje, conhecer suas implicações e formas de gestão, não é mais um papel solitário de especialistas. Desde

os empregados mais simples até os investidores, é importante que todos os participantes da empresa compreendam suas múltiplas dimensões, a fim de obter vantagens competitivas (CROUHY, GALAY e MARK, 2008).

A sociedade atual é organizada em torno da mensuração e prevenção de riscos em potencial com foco em melhorias para o futuro (KANASHIRO, 2008). Qualquer organização, independentemente do serviço prestado ou produto oferecido, apresenta em seu escopo margens que expõe o negócio a algum tipo de risco que resulte em eventos indesejados, desde perda lucrativa até desastres envolvendo vidas (WEBER e DIEHL, 2014).

Com o intuito de evitar situações inoportunas, gestores e líderes buscam antecipar acontecimentos de modo a minimizar seus impactos, como os riscos envolvidos no negócio. Segundo a ISO 31000/2009, um risco é caracterizado pelo efeito da incerteza sobre os objetivos, sendo expresso como a combinação da consequência de um evento e a probabilidade de ocorrência, e também pode ser determinado como um fator indesejável que dificulta a execução de uma tarefa (KANASHIRO, 2008).

Considera-se que os riscos operacionais são voltados para perdas que ocorrem em operações ou centro de processos, apesar de que essa definição não aborde todos os riscos operacionais confrontados por instituições e organizações financeiras (TRAPP e CORRAR, 2005).

Os riscos operacionais são fatores muito importantes a serem observados pelas organizações, visto que eles incluem perdas e situações inesperadas que ocorrem em decorrência de operações incorretas, sistemas falhos, eventos externos à organização e/ou controles críticos ausentes ou falhos. Estes fatores promovem eventos indesejados com impactos significativos para os objetivos da empresa, podendo causar paradas nas operações (WEBER e DIEHL, 2014).

A execução do modelo de negócios e o alcance dos objetivos da empresa podem ser ineficientes quando expostos a riscos operacionais, afetando desempenho, custo e satisfação dos clientes (TRAPP e CORRAR, 2005).

3.4 Gestão de riscos operacionais associados à Integridade Estrutural

Ao considerar-se os riscos envolvidos no negócio ou projeto, os melhores investimentos a serem feitos durante a tomada de decisões são baseados em uma boa gestão de riscos, sendo

que esta determina os melhores planos de ação possíveis para evitar ou mitigar quaisquer situações inesperadas e indesejadas (WEBER e DIEHL, 2014).

Por meio de estudos e pesquisas, chegou-se à conclusão de que controles internos de processos e operações do mundo corporativo são mais eficientes em seus objetivos, quando os riscos envolvidos no negócio são conhecidos e mapeados (ASSI, 2021).

Quando um componente estrutural não funciona mais da forma como foi projetado, significa que ele sofreu uma falha. Desde as primeiras construções de engenharia humana, a necessidade de se evitar a ocorrência de falhas em segmentos mecânicos já havia surgido, como por exemplo, para a construção de pontes, veículos, armas, dentre outros. Para tal, a escolha do material e da forma estrutural são essenciais (PASTOUKHOV, 1995).

A ausência, desconhecimento ou má aplicação da gestão de riscos associada à integridade física de estruturas e equipamentos, pode levar a sérias consequências catastróficas. Segundo o (VII CIMATECH, 2020), um incidente catastrófico envolvendo uma aeronave monomotor modelo AB115, na qual havia um tripulante e um passageiro, ocorreu em decorrência de ação corrosiva no eixo da aeronave. Durante o voo, o piloto perdeu a sustentação da aeronave, o que levou a realização de um pouso violento, no qual ocorreu o desprendimento da roda do trem de pouso. Em decorrência desse desprendimento, ocorreu o choque da hélice e da ponta da asa direita na pista de pouso. Após análise detalhada, detectou-se que ocorreu uma falha estrutural no eixo da roda devido à presença de corrosão na solda, a qual formou pontos de concentração de tensões, levando à fratura do eixo após ser exposto a um esforço.

Em 2018, a ponte do terminal marítimo Madre de Deus, na Bahia, desabou em decorrência da oxidação dos grampos que prendiam as extremidades da ponte. Como a região de maresia provoca uma elevada oxidação das peças metálicas da ponte, é preciso que a manutenção periódica seja feita regularmente (SILVA, 2018).

Um incidente que ocorreu há mais de 50 anos ainda é, até os dias de hoje, referência para exemplificar uma das consequências causadas pela corrosão em estruturas: o colapso da ponte Silver Bridge (Ohio, Estados Unidos), em 1967, que causou a morte de 46 pessoas. O desgaste provocado pelo rolamento das barras de sustentação da ponte favoreceu a ocorrência de corrosão interna, por diferença de potencial, levando ao colapso da estrutura e à fatalidade.

Vê-se, portanto, a importância da gestão de riscos para integridade estrutural de equipamentos e estruturas mecânicas que podem sofrer processo corrosivo e levar a uma falha estrutural, podendo comprometer a continuidade de uma operação industrial ou até mesmo, levar a um incidente fatal com vítimas.

3.4.1 Operational Risk Management (ORM)

Um dos significados do gerenciamento de riscos está em caracterizá-lo como um processo de tomada de decisões que aborda, de forma estruturada e organizada, metodologias e planejamentos organizacionais, normalmente subconscientes, com o intuito de abolir, suprimir ou minimizar os efeitos e a probabilidade de ocorrência de um risco (PEDOTE, 2002).

Na Anglo American, o gerenciamento de riscos é feito através de um sistema chamado Gerenciamento de Riscos Operacionais (ORM), que é dividido em quatro camadas as quais proporcionam uma melhor abordagem dos riscos envolvidos, sendo: 1) Entendimento dos eventos indesejados prioritários (PUE's) obtidos por meio da análise e avaliação de riscos *Baseline*; 2) Avaliação de riscos com foco em um evento indesejado específico através da metodologia *Bowtie*, que identifica as causas, consequências e controles associados; 3) Gerenciamento de risco da tarefa e; 4) Gerenciamento de riscos individual contínuo, desde a liderança ao operador (ORNELAS; FERREIRA; SOUZA; FREITAS, 2019).

3.4.2 Ferramentas de ORM

Diversas ferramentas foram criadas como o resultado de buscas de metodologias, por parte de organizações de todos os setores, que auxiliassem na compreensão e controle de riscos associados a um negócio, além de possibilitarem a avaliação desses riscos de forma sistemática (A. DE, 2016).

Para que os riscos sejam classificados e pontuados, usam-se ferramentas de análise e avaliação que possibilitam a comparação e contraste de diversos riscos entre si (GALANTE, 2015).

3.4.2.1 *Baseline* WRAC

A metodologia WRAC, representada na Figura 3.5, consiste em uma ferramenta de análise de riscos voltada para a indústria de mineração, fazendo parte da 1ª camada do ORM. Através dela, faz-se o mapeamento de processos, identificação e classificação de riscos por meio de um *Brainstorming* direcionado pela equipe de riscos com os colaboradores da área analisada (LEINFELDER, 2016).

Figura 3.5 – Modelo de *Baseline* WRAC

Ref no.	Area de Processo	Etapa da Operação	Classificação Perigo/ Risco/ Aspecto	Descrição Perigo/ Risco/ Aspecto	Descrição do Evento Indesejado	(S)	(H)	(E)	(C)	(L & R)	(M)	(R)	Risco Crítico/ PUE (S, N)	Probabilidade do Risco Crítico/PUE pós controles (Para controle ver Bow Tie)	Classificação do Risco Crítico/ PUE

Fonte: AA, 2022.

As colunas (S), (H), (E), (C), (L & R), (M) e (R) correspondem aos tipos de consequência que podem ocorrer caso o evento indesejado ocorra, sendo S: Segurança-relacionado à lesões às pessoas, H: Saúde - adoecimento de pessoas E: Impacto ambiental – Considerando flora, fauna, solo, água e ar C: Comunidade – Considerando físico, social, cultura e econômico L: Legal – Compreende questões legais e regulatórias M: Perdas e Danos Materiais / Interrupção do Negócio - Considerando perda ou ganho de material, financeiro, impacto no resultado e andamento dos processos, qualidade de produtos, contratos com clientes. R: Reputacional – Considera imagem da Empresa perante à sociedade e clientes.

De forma complementar à planilha WRAC, usa-se uma matriz de riscos 5x5, Figura 3.6, que tem o objetivo de priorizar os eventos indesejados identificados (GALANTE, 2015). O fato de ser preliminar, determina que esta análise é empregada antes da execução de uma atividade, sendo o passo inicial a ser tomado com relação ao risco ou perigo em questão (MAIA, 2014).

Figura 3.6 – Modelo genérico de Matriz de Riscos 5x5

Nível de Risco do Evento Indesejado / Prioridade*					
Consequência	1 (Menor)	2 (Baixa)	3 (Moderada)	4 (Alta)	5 (Maior)
5 (Quase Certo)	11 (Médio)	16 (Significante)	20 (Significante)	23 (Alto)	25 (Alto)
4 (Provável)	7 (Médio)	12 (Médio)	17 (Significante)	21 (Alto)	24 (Alto)
3 (Possível)	4 (Baixo)	8 (Médio)	13 (Significante)	18 (Significante)	22 (Alto)
2 (Improvável)	2 (Baixo)	5 (Baixo)	9 (Médio)	14 (Significante)	19 (Significante)
1 (Raro)	1 (Baixo)	3 (Baixo)	6 (Médio)	10 (Médio)	15 (Significante)

Fonte: AA, 2022.

Por meio da matriz, interpola-se um valor numérico para cada risco levando em conta as variáveis de frequência, severidade e cenário, além de ponderar o impacto das consequências da ocorrência do incidente em potencial. Com esse valor, é possível comparar riscos entre si,

definir uma melhor tomada de decisões e classificar o valor do risco e sua priorização em relação a outras atividades (MAIA, 2014).

Eventos indesejados prioritários (PUE) são os riscos que possuem a consequência classificada como 4 ou 5 na matriz de riscos em uma ou mais variáveis do ORM, sendo estas: segurança, saúde, meio ambiente, financeiro, social, legal & regulatório, perdas materiais e reputacional (AA, 2015).

3.4.2.2 *Bowtie*

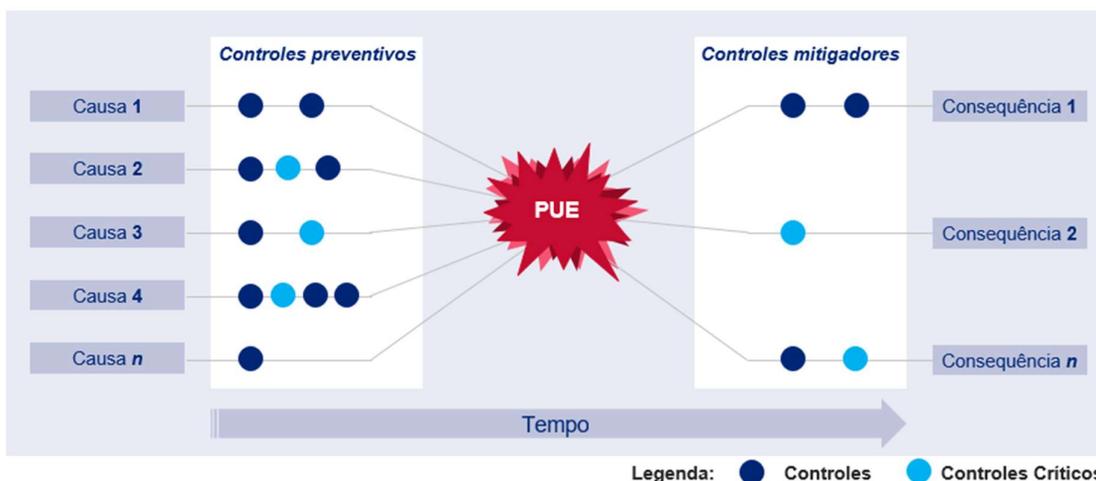
A análise *Bowtie*, ou gravata-borboleta, consiste em uma forma simplificada de apresentar os caminhos de um risco a partir de suas possíveis causas até suas consequências, e é uma evolução do diagrama causa-consequência e do diagrama de barreira (LEME, 2017). É uma ferramenta usada na 2ª camada do ORM.

Seu objetivo é facilitar a visualização de quais barreiras preventivas podem ser aplicadas de modo a evitar que uma causa leve a ocorrência de um evento indesejado ou que, caso esse evento ocorra, suas consequências possam ser atenuadas através de barreiras mitigatórias. A vantagem do uso desta ferramenta, consiste na possibilidade de observação de variadas causas e controles preventivos, além de desdobrar a lógica do desencadeamento de um evento e suas consequências (XXVISIMPEP, 2019).

A ferramenta *Bowtie* é uma das metodologias mais usadas em indústrias cujas operações são de alto risco potencial, como as indústrias petrolífera, de mineração e aviação. Apesar de variações em sua definição, esse método possui um formato característico, que consiste em um diagrama que se assemelha a uma gravata borboleta, como mostrado na Figura 3.7.

No canto mais à esquerda estão as causas que levariam a um possível evento indesejado, seguidas por diversos controles preventivos cujo objetivo é evitar que estas causas provoquem o evento indesejado, o qual está localizado no centro do diagrama e define o momento em que há perda de controle da situação (A. DE, 2016). O lado direito apresenta controles mitigadores para caso o incidente ocorra, os quais atuam de modo a minimizar os impactos gerados pela ocorrência do evento indesejado em questão. As barreiras de segurança, ou controles críticos, buscam evitar a ocorrência do evento crítico e suas consequências. Desse modo, é possível identificar potenciais soluções para o risco determinado (LEME, 2017).

Figura 3.7 – Modelo genérico de *Bowtie*



Fonte: AA, 2022.

Um controle crítico é um controle que, se removido ou ausente, aumenta significativamente a probabilidade de ocorrência ou a magnitude da consequência de um PUE. Ele deve ser monitorado periodicamente pelos responsáveis e reportados no sistema de gerenciamento de riscos usado na empresa (AA, 2022).

Essa distribuição e posicionamento das ocorrências no diagrama, indicam que o evento principal, ou evento indesejado, é fruto de diversos possíveis cenários que podem culminar em um ponto catastrófico caso não sejam controlados. Exemplos de eventos críticos seriam “Perda de contenção” em petróleo e gás e “Perda de Integridade estrutural” na mineração (A. DE, 2016).

Através da aplicação da gestão de riscos em integridade estrutural e do uso das ferramentas de ORM, é possível determinar os riscos em potencial associados a essa área. Neste trabalho, serão abordadas as ameaças de corrosão metálica na estrutura do espessador de polpa de minério de ferro na planta da filtragem da Anglo American Minério de Ferro Brasil localizada no município de São João da Barra, Rio de Janeiro, apresentado na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Local onde a corrosão foi observada no espessador de minério de ferro



Fonte: AA, 2021.

3.5 Corrosão metálica

De modo geral, o mecanismo de corrosão pode ser definido como a deterioração de um material por ação química ou eletroquímica do meio em que está inserido, aliada ou não a esforços mecânicos. Consiste em um processo que ocorre de forma espontânea e afeta os materiais, geralmente metálicos, de maneira a alterar suas propriedades físicas e químicas e, conseqüentemente, sua aplicabilidade para determinados fins (FRAUCHES-SANTOS, 2013).

No geral, a corrosão também pode ser definida como qualquer processo eletroquímico que promove a degradação e a perda de propriedades físico-químicas ou mecânicas de um metal (OLIVEIRA, 2012).

Corrosão consiste no ataque destrutivo de um metal que, normalmente, surge na superfície do material. Este mecanismo não causa apenas perdas materiais, mas também econômicas (por meio da prevenção da corrosão e manutenção/substituição de peças e produtos afetados diretamente ou contaminados como resultado das reações de corrosão) (CALLISTER, 2008).

Pode-se medir a taxa de corrosão de um material por meio da taxa de penetração da corrosão (TPC) em sua superfície, representando a perda de espessura do material original que ocorreu durante o tempo de exposição (CALLISTER, 2008). A expressão exibida na equação (1) caracteriza o cálculo para determinar a taxa de corrosão:

$$TPC = \frac{KW}{\rho At} \quad (1)$$

Onde:

W: perda de peso da amostra;

t: tempo de exposição ao ambiente corrosivo em horas;

A: área exposta da amostra;

ρ : massa específica da amostra;

K: constante (depende do sistema de unidades usado).

Para metais, normalmente o processo corrosivo é eletroquímico, logo, ocorre a transferência de elétrons de uma espécie química para outra por meio de reações químicas (CALLISTER, 2008). A reação geral de oxidação para um metal “M” está explicitada na equação (2), na qual, o metal M passa pela reação e se torna um íon carregado positivamente, perdendo seus elétrons de valência.



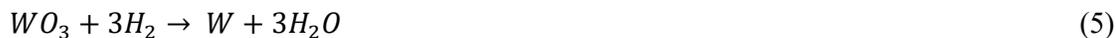
Onde:

M: Metal hipotético;

n: (número de elétrons de valência);

e^{-} : elétron.

O termo oxidação representa o acréscimo de oxigênio por uma substância e a redução é a retirada de oxigênio de uma substância (GENTIL, 2017). As equações (3), (4) e (5), mostram as reações de oxidação do ferro, alumínio e de redução do tungstênio, respectivamente:



É possível associar que, quanto mais desenvolvido tecnologicamente é um país, mais elevado o seu gasto com prevenção ou manutenção da corrosão. É estimado que cerca de 2,5 trilhões de dólares sejam gastos anualmente devido à corrosão de materiais, enquanto que esta estimativa é reduzida em até 35% ao adotar métodos adequados de combate à corrosão (KOCH, 2016).

O mecanismo de corrosão é prejudicial para diversas atividades, incluindo operações industriais, pois gera um grande impacto negativo na manutenção e na integridade de componentes e estruturas mecânicas. Segmentos muito afetados por esse mecanismo de degradação são as indústrias química e petrolífera, meios de transportes (aéreo, ferroviário, marítimo, rodoviário, dentre outros), sistemas de telecomunicação e, até mesmo, instalações artísticas (esculturas e monumentos expostos a um meio corrosivo) (FRAUCHES-SANTOS, 2013). A ocorrência de corrosão em um material pode levar à formação de concentradores de tensões, os quais propiciam a propagação e formação de trincas (VII CIMATECH, 2020).

A corrosão acarreta consequências diretas como: reposição da peça ou equipamento corroído; paralisação da operação do equipamento por falhas estruturais ou para manutenção; necessidade do uso de manutenção preventiva (pintura, uso de inibidores, revestimentos, dentre outros); contaminação de produtos e perda de eficiência do equipamento (GENTIL, 2017).

3.5.1 Tipos de corrosão

Diferentes fatores influenciam na ocorrência da corrosão, que pode se apresentar em diferentes formas, sendo caracterizada, por exemplo, pela aparência e forma de ataque corrosivo.

A morfologia da corrosão pode ser classificada como: “uniforme, por placas, alveolar, puntiforme, filiforme, por esfoliação, grafítica, dezincificação, ao redor do cordão de solda e empolamento por hidrogênio”. Os principais mecanismos de ocorrência variam entre: aeração diferencial, eletrolítico, galvânico, associado a solicitações mecânicas (sob tensão, fadiga, atrito, dentre outros) e fragilização por hidrogênio (GENTIL, 2017).

O meio corrosivo também possui um impacto muito grande na presença e na taxa de corrosão de um material, e variam entre meios de corrosão: atmosférica, pelo solo, induzida por microrganismos, pela água do mar, por sais fundidos, dentre outros. Contaminantes dissolvidos no meio, como os gases O_2 , N_2 , CO_2 , dentre outros, os sais $NaCl$, $FeCl_3$, dentre outros, matéria orgânica e sólidos em suspensão influenciam fortemente na ação corrosiva no material (GASPARONI, 2020).

Além disso, a localização do ataque também se diferencia por: pite (forma localizada de ataque corrosivo, caracterizado pela formação de pequenos buracos), uniforme (corrosão eletroquímica equivalente à toda a superfície exposta, como a ferrugem generalizada no aço e ferro), intergranular (ocorre ao longo dos contornos de grãos, especialmente na solda de aços inoxidáveis), transgranular (ocorre internamente aos grãos), em frestas (ocorre quando a

solução eletrolítica fica estagnada em um ponto criando um excesso de oxigênio dissolvido localmente), por lixívia seletiva (ocorre quando um constituinte é removido como consequência do processo de corrosão, como a remoção de zinco do latão) e erosão-corrosão (surge por meio da ação combinada de ataque químico e abrasão mecânica devido ao movimento de um fluido) (GENTIL, 2017; CALLISTER, 2008).

3.5.2 Corrosão em atmosfera marinha

O ambiente atmosférico é um grande colaborador para a ocorrência do mecanismo de corrosão, especialmente sobre estruturas metálicas, o qual depende de diversos fatores, como: umidade relativa do ar, presença de substâncias poluentes em suspensão, temperatura, tempo de exposição ao eletrólito, além de fatores, como: direção dos ventos, variações cíclicas de temperatura, chuvas e radiação (GENTIL, 2017).

Diferentes condições atmosféricas podem reduzir ou acelerar a velocidade de oxidação. Em atmosfera com umidade relativa próxima de 100%, o processo de corrosão é acentuado e a superfície do material fica molhada junto ao eletrólito, como a chuva e névoa salina depositadas (GENTIL, 2017 e GASPARONI, 2020).

Atmosferas úmidas de água do mar promovem ambientes altamente corrosivos para a superfície de materiais metálicos. A água do mar apresenta cerca de 3,5% de sais dissolvidos, em sua maioria cloreto de sódio e materiais orgânicos diluídos, o que contribui para a ocorrência da corrosão em equipamentos e materiais expostos ao ambiente (CALLISTER, 2008).

Como a atmosfera marinha é carregada de partículas sólidas, a deposição destas na superfície metálica de equipamentos e estruturas em regiões de maresia, pode proporcionar a corrosão por aeração diferencial, que é ser acentuada por fatores climáticos, como direção dos ventos carregados de poluentes e sais ou, pode ser levemente reduzida, por chuvas frequentes, que retiram os resíduos salinos da superfície. Em 1 quilograma de água do mar há em média, 35 g de sais dissolvidos, o que corresponde a 96,5% de água pura e 3,5% de sais dissolvidos. Em média, considera-se que a composição química do mar consista em 1,92% Cl, 1,07% Na, 0,26% S, 0,12% Mn, 0,04% Ca e 0,03% K (SCHMIEGELOW, 2004).

De modo geral, regiões costeiras tropicais são consideradas mais corrosivas do que atmosferas marinhas árticas, desse modo, a posição geográfica também influencia na taxa de corrosão de uma estrutura (GENTIL, 2017).

Em regiões localizadas sob a água marinha ou próximas à orla marítima, a agressividade do meio é alta devido à umidade relativa do ar, aos cloretos de sódio e magnésio dissolvidos,

os quais consistem em sais higroscópicos (absorvem água), tendendo à formação de uma película líquida sobre a superfície metálica, criando um ambiente que é extremamente agressivo e favorece a velocidade de corrosão (SILVA, 2020).

3.5.3 Métodos usuais de combate e prevenção à corrosão

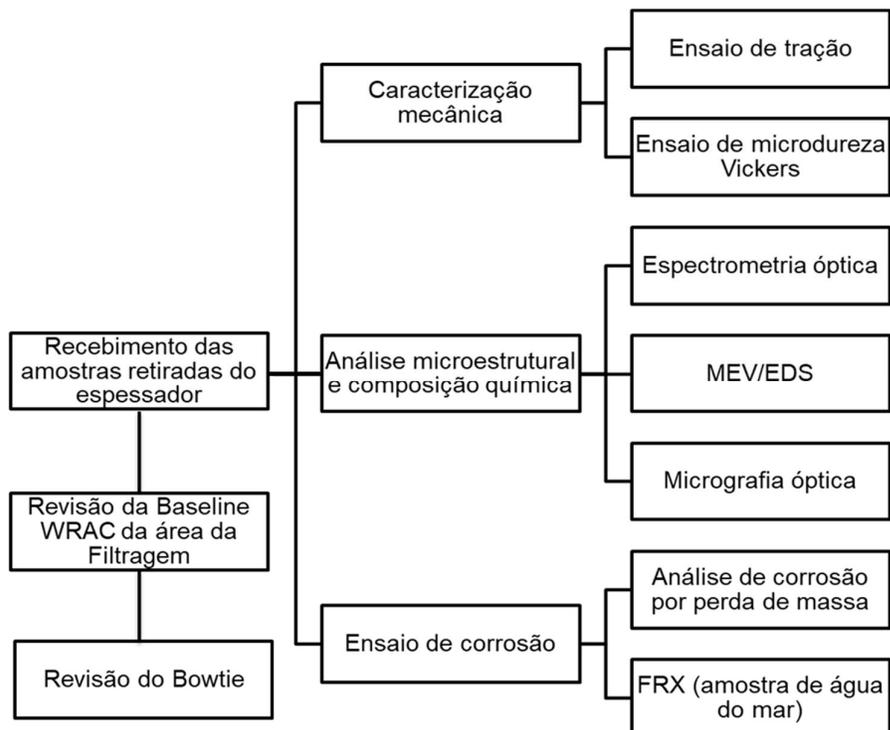
Os métodos mais comuns para combate à corrosão industrial são por meio de: uso de inibidores de corrosão no eletrólito ou no revestimento, substituição dos materiais empregados na estrutura ou equipamento por materiais mais resistentes à corrosão, uso de revestimentos orgânicos ou inorgânicos na superfície metálica, proteção catódica e proteção anódica, diminuição ou eliminação da umidade do ambiente, dentre outros menos comuns (GALANTE, 2015).

De forma preventiva, uma boa seleção de materiais após a caracterização e reconhecimento de um ambiente corrosivo, também é uma forma de prevenir a corrosão de materiais. Nesse caso, o uso de barreiras físicas, como revestimentos e filmes é comumente aplicado. O revestimento deve apresentar um alto grau de adesão à superfície, deve ser não reativo ao ambiente corrosivo e ser resistente aos danos mecânicos aos quais o material é exposto. Tanto metais, quanto cerâmicas e polímeros são usados como revestimentos para metais, sendo as tintas poliméricas uma alternativa comumente usada (CALLISTER, 2008).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 4.1 contém os procedimentos adotados.

Figura 4.1 – Fluxograma do procedimento experimental



Fonte: Próprio autor.

4.1 Material

Para realizar a análise de corrosão por perda de massa, foi coletado cerca de 1L de água do mar da praia de Jericoacoara localizada no município de Jijoca de Jericoacoara, no estado do Ceará, Nordeste brasileiro, no dia 26 de outubro de 2022 em torno de 13:00 horas (horário de Brasília) e foi mantida sob refrigeração a cerca de 6°C.

As amostras metálicas foram retiradas de vigas de sustentação do espessador de polpas que apresentam corrosão parcial, Figura 4.2.

Figura 4.2 – Vigas do espessador de polpas contendo pontos de corrosão



Fonte: AA, 2021.

O aço estrutural usado pela empresa é o aço viga A36, o qual passou pelo processo de laminação à quente e resfriamento. A composição química típica do aço A36 é apresentada na Tabela 4.1, a qual será comparada com a composição da amostra real usada.

Tabela 4.1 – Concentração padrão dos elementos químicos do aço A36

Elemento químico	Concentração máxima (%)
Carbono	0,26
Silício	0,40
Fósforo	0,04
Enxofre	0,05

Fonte: Adaptado de LUZ, 2017.

4.1.2 Corpos de prova

Para a realização deste trabalho foram usados:

- 06 (seis) corpos de prova para o ensaio de tração, sendo 3 apresentando níveis intermediários de corrosão e 3 sem corrosão aparente.
- 01 corpo de prova para a análise química por espectrometria óptica;
- 04 (quatro) corpos de prova para a análise de corrosão por perda de massa;
- 04 (quatro) corpos de prova para o ensaio de dureza Vickers;

- 01 corpo de prova para o ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com espectroscopia por energia dispersiva (EDS).
- 04 (quatro) corpos de prova para caracterização micrográfica;
- Amostra de água do mar para realização do ensaio de fluorescência de raio X (FRX).

4.2 Métodos

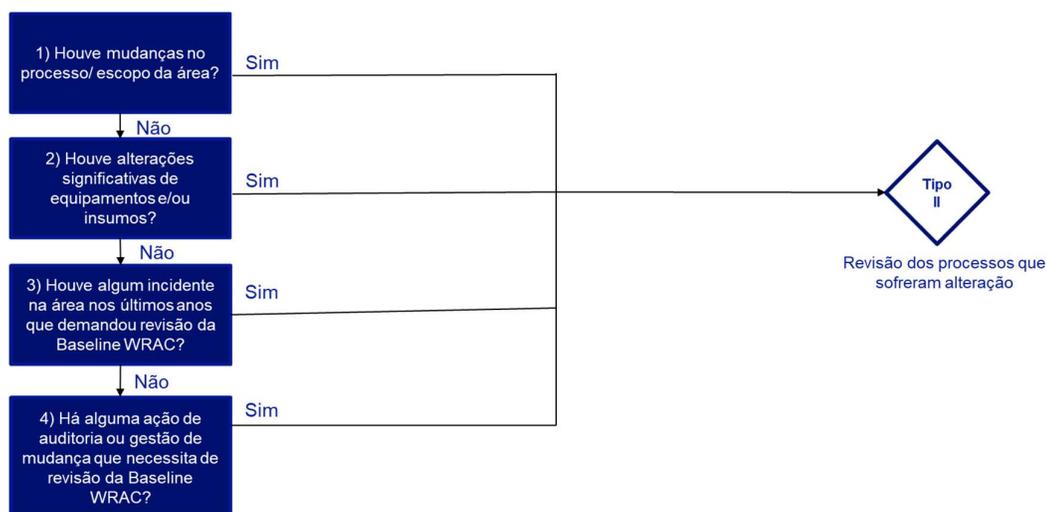
Para este projeto, leva-se em conta que a presença de pontos de corrosão em equipamentos e estruturas metálicas no ambiente industrial da mineração consiste em um fator que colabora para a existência de riscos operacionais capazes de parar uma ou várias etapas do processo de beneficiamento do minério, com foco na etapa do espessamento, e com potencial de gerar fatalidades.

4.2.1 Revisão da *Baseline*

O primeiro passo para avaliar um risco associado a um evento indesejado na Anglo American, iniciou-se a partir da montagem ou revisão da *Baseline* WRAC da área analisada.

A revisão da *Baseline* WRAC da área de filtragem foi iniciada a partir da identificação de fatores que causam alterações significativas em estruturas e processos, e precisam ser atualizadas na *Baseline* vigente, conforme a segunda e a quarta perguntas apresentadas no fluxo mostrado na Figura 4.3. No caso do espessador de polpas, notou-se a ocorrência de corrosão acentuada nas vigas de sustentação.

Figura 4.3 – Fluxo de revisão de *Baseline* WRAC



Fonte: Adaptado de AA, 2022.

A partir da solicitação de revisão do documento, fez-se um *workshop* guiado pela equipe de riscos juntamente com os coordenadores e supervisores da área da filtragem, para revisar o perigo associado ao risco de corrosão. As ideias e conclusões foram registradas no documento.

Após a identificação do perigo associado por meio da discussão com a equipe em um fluxo livre de ideias, foram listadas as condições perigosas, os eventos indesejados e a lista de eventos indesejados prioritários (PUE).

O cronograma apresentado na Tabela 4.2 apresenta o fluxo do processo de revisão da *Baseline* WRAC da área de filtragem, o qual foi iniciado na primeira semana de novembro.

Tabela 4.2 – Cronograma de revisão da *Baseline*

Atividade	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
Solicitação de revisão da <i>Baseline</i>	X			
<i>Workshop</i> com a equipe da área		X		
Revisão do <i>Bowtie</i>			X	X

Fonte: Próprio autor.

4.2.2 Caracterização dos materiais

4.2.2.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração foi realizado em uma máquina universal de ensaios mecânicos Biopdi, coluna dupla de bancada - 150 KN, e em um ambiente com a média de temperatura de

22 ± 3 °C, medida com o termohigrômetro. A velocidade de ensaio adotada foi de 1,75 mm/min.

Primeiramente, cortou-se à 3 (três) corpos de prova em cada área confeccionados segundo a ASTM A370:2021, os quais foram medidos com um paquímetro digital ABSOLUTE, Mitutoyo, resolução 0,01 mm.

Os produtos de corrosão não foram retirados dos corpos de prova.

4.2.2.2 Análise química por Espectroscopia de Emissão óptica

A análise química por espectroscopia de emissão óptica foi realizada em um espectrômetro de emissão óptica SPECTROMAXx, identificação 159239, calibrado pelo fabricante, em um ambiente com temperatura máxima de 28°C, segundo às normas ASTM E 415:2017, ASTM E 1086:2014 e ASTM A 751:2014.

4.2.2.3 Análise de Corrosão por Perda de Massa

Para a análise de corrosão por perda de massa, foram cortadas à frio seis amostras com seção transversal quadrada de lado igual a 15 mm, mostradas na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Amostras de tamanho 15x15mm



Fonte: Próprio autor.

Foram escolhidas 4 (quatro) dessas amostras com uma superfície mais lisa, as quais foram lixadas para retirar excesso de rebarba e enxaguadas em água corrente da torneira.

Após esse processo, cada amostra foi pesada em uma balança de precisão Marte AUW220D, sensibilidade de 0,1 mg / 0,01 mg, para determinação da massa inicial, e colocada em um tubo de ensaio contendo 50 mL da água de mar recolhida.

Além disso, os tubos foram armazenados na geladeira da marca Consul Bem-estar, com capacidade de 330 L, no dia 01 de novembro de 2022, às 12h, em temperatura de 7°C, por 29 dias.

Após esse período de tempo, cada corpo de prova foi retirado dos tubos com o auxílio de uma pinça, lavados em água corrente, esfregados para retirar produtos de corrosão da superfície e secos com álcool e um secador. Em seguida, pesou-se a massa final de cada um deles.

A água remanescente foi armazenada para o ensaio de fluorescência de raios X.

4.2.2.4 Fluorescência de raios X

Foi realizada, em duplicata, uma análise por fluorescência de raios X (FRX) na máquina FRX – Ray Ny EDX-720 SHIMADZU de tensão máxima equivalente a 50 kV, da amostra de água de mar recolhida. Para efeito de comparação, também foi feita a análise da água de um bebedouro da instituição.

Após a realização da análise de perda de massa do aço, a água remanescente também foi submetida a uma análise por FRX, para comparação com a água sem o produto de corrosão.

4.2.2.5 Metalografia

Para a análise da microscopia do material foi feito um corte transversal na amostra recebida, conforme apresentado Figura 4.5.

Na Figura 4.6 é mostrada a vista superior do corte feito. A microscopia foi analisada nas amostras A, B, C e D, mostradas na Figura 4.7.

As amostras foram embutidas a frio, lixadas com lixas de granulometria 80, 180, 240, 320, 400, 600 e 1200 mesh e polidas em pasta de alumina.

Após o polimento, as amostras foram atacadas com solução de Nital 3%. Após o ataque, as mesmas foram levadas ao microscópio óptico Confocal Olympus modelo DCM 3D. para a realização do ensaio, o qual foi realizado com uma ampliação de 50x, 100x e 200x na zona.

Figura 4.5 – Corte feito na amostra para os ensaios de microdureza e microscopia

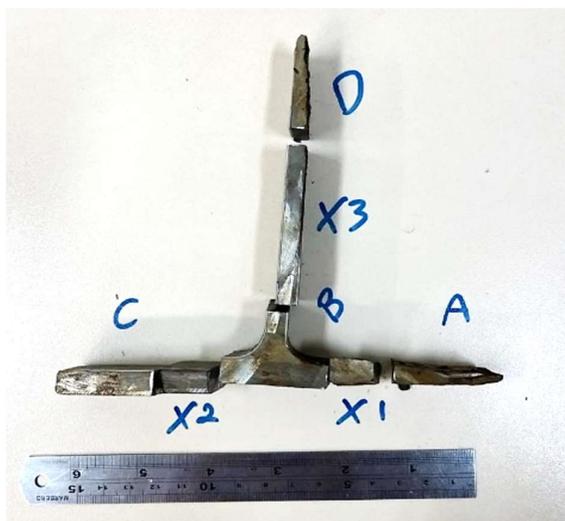


Fonte: Próprio autor.

Figura 4.6 – Vista superior do corte



Fonte: Autor Próprio

Figura 4.7 – Divisão das amostras

Fonte: Próprio autor.

4.2.2.6 Microdureza Vickers

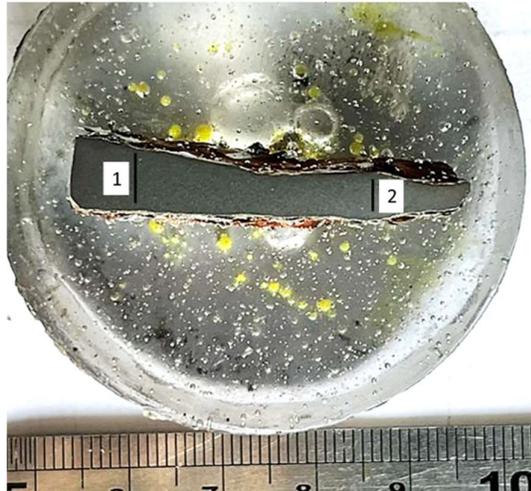
Para o ensaio de microdureza foram usadas as mesmas amostras A, B, C e D de metalografia apresentadas anteriormente na Figura 4.7 em um microdurômetro FM 700 – “Future Tech”.

As leituras foram realizadas a cada 1mm uma da outra, com uma pré-carga de 0,2HV (1,961N) e duração de 10 segundos. A primeira leitura foi realizada a 1mm de uma das superfícies de cada amostra.

Na Figura 4.8 estão demonstradas as regiões onde foram feitas as análises de dureza na amostra A. Na região 1 foram feitos 5 testes a 1mm, 2mm, 3mm, 4mm e 5mm de distância da superfície. Na região 2 foram feitos 4 testes a 1mm, 2mm, 3mm e 4mm de distância da superfície.

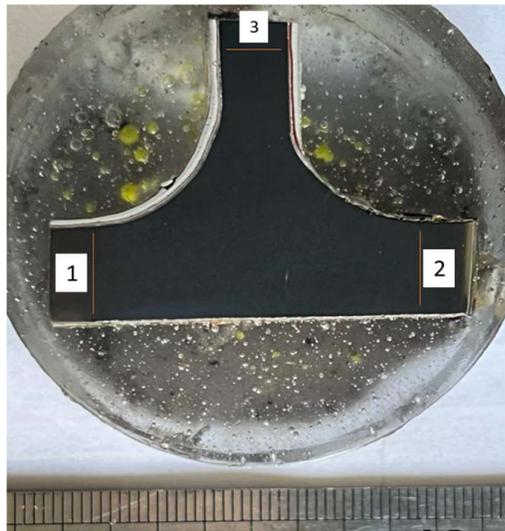
Na Figura 4.9 estão demonstradas as regiões onde foram feitas as análises de dureza na amostra B. Na região 1 foram feitos 5 testes a 1mm, 2mm, 3mm, 4mm e 5mm de distância da superfície. Na região 2 foram feitos 4 testes a 1mm, 2mm, 3mm e 4mm de distância da superfície. Na região 3 foram feitos 3 testes a 1mm, 2mm e 3 mm de distância da superfície.

Figura 4.8 – Locais de análise na amostra A



Fonte: Próprio autor.

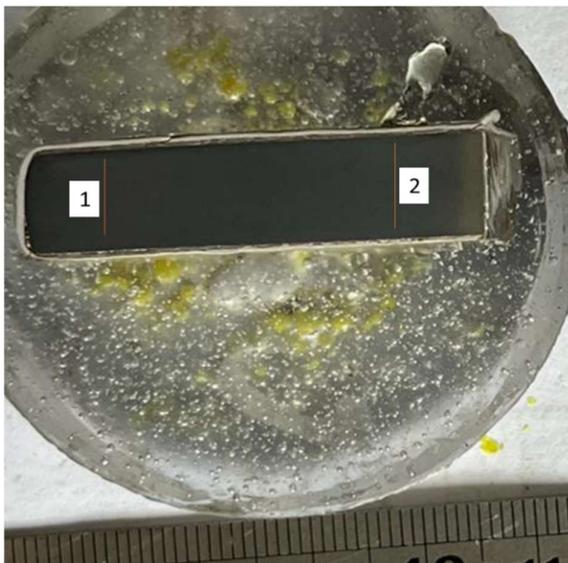
Figura 4.9 – Locais de análise na amostra B



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 4.10 estão demonstradas as regiões onde foram feitas as análises de dureza na amostra C. Na região 1 e 2 foram feitos 5 testes a 1mm, 2mm, 3mm, 4mm e 5mm de distância da superfície.

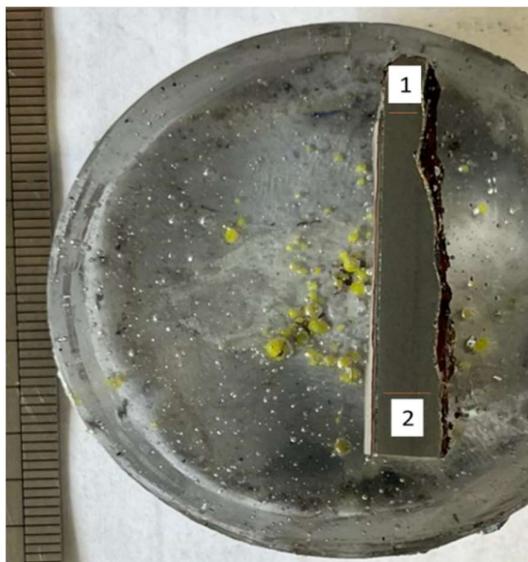
Figura 4.10 – Locais de análise na amostra C



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 4.11 estão demonstradas as regiões onde foram feitas as análises de dureza na amostra D. Na região 1 foram feitos 3 testes a 1mm, 2mm e 3mm de distância da superfície. Na região 2 foram feitos 4 testes a 1mm, 2mm, 3mm e 4mm de distância.

Figura 4.11 – Locais de análise na amostra D



Fonte: Próprio autor.

4.2.2.7 Microscopia eletrônica de varredura com Espectroscopia por energia dispersiva

O ensaio foi feito no microscópio eletrônico por varredura – JEOL – JSM-6510LV, com imagens obtidas por meio de elétrons secundários. As amostras foram cortadas em uma região com alto índice de corrosão.

Foram analisados o topo e o perfil de uma mesma amostra para nível de comparação, mostrados na Figura 4.12 e Figura 4.13, respectivamente. A partir das imagens de MEV obtidas, foi determinado o tipo de corrosão, o tamanho médio e a classificação.

Foram realizadas imagens e análises químicas semiquantitativas por espectrometria por dispersão de energia (EDS) através da microsonda EDS Thermo Scientific UltraDry, em 3 (três) regiões no topo e 1 (uma) região no perfil.

Figura 4.12 – Topo da amostra usada



Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.13 – Perfil da amostra usada



Fonte: Próprio Autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram retiradas duas amostras das vigas de sustentação do espessador de polpas, mostradas na Figura 5.1, juntamente com a área de cada ensaio, usadas para a fabricação de 20 (vinte) corpos de prova, os quais não tiveram seus produtos de corrosão removidos para realização dos ensaios. Na Figura 5.2 é apresentada uma das amostras e sua condição estrutural.

Figura 5.1 – Amostras retiradas da viga de sustentação do espessador de polpas e os ensaios associados a cada região



Fonte: Próprio autor.

**Figura 5.2 – Condição visual de uma das amostras retirada da viga do espessador
(medidas em mm)**



Fonte: Próprio autor.

5.1 Revisão da *Baseline*

A última versão da *Baseline* WRAC da Filtragem, considerava uma classificação de risco 14 para o evento indesejado de “Perda de Integridade Estrutural (espessador)” na estrutura do espessador, ou seja, classificação de consequência (4 - maior) e probabilidade (2 - improvável), conforme a matriz de riscos 5x5. Além disso, eram considerados impactos em Segurança (S); Meio ambiente (E); Legal & Regulatório (L & R); Material (M) e Reputacional (R). A Figura 5.3 mostra a linha do risco de corrosão da *Baseline* vigente.

Figura 5.3 – Última versão da *Baseline* WRAC para corrosão no espessador

Area de Processo	Etapa da Operação	Classificação Perigo/ Risco/ Aspecto	Descrição Perigo/ Risco/ Aspecto	Descrição do Evento Indesejado	(S)	(H)	(E)	(C)	(L & R)	(M)	(R)	Risco Crítico/ PUE (S, N)	Probabilidade do Risco Crítico/PUE pós controles (Para controle ver Bow Tie)	Classificação do Risco Crítico/PUE
2 - Recebimento de Polpa	Alimentação e Operação do espessador	Gravitacional (Objetos)	Corrosão nas estruturas da área do espessador e/ou sobrecarga	Perda de integridade estrutural (espessador)	4: Alto	N/A	3: Médio	N/A	1: Mínimo	5: Máximo	2: Baixo	Sim	2: Improvável	19(S)

Fonte: *Baseline* WRAC, 2022.

Após o processo de revisão da *Baseline*, foi determinado que a ocorrência do evento indesejado de “Perda de Integridade Estrutural (espessador)” associado ao risco de corrosão nas

estruturas do espessador deve apresentar: classificação “5: máxima” em segurança (S) e probabilidade de ocorrência “3: Possível”, conforme apresentado na Figura 5.4. Desse modo, a classificação do risco do PUE foi 22, que segundo a matriz de riscos 5x5 corresponde a um evento indesejado de classificação 5 e probabilidade 3. Desse modo, a classificação do risco saiu do patamar “significativo” - laranja, e passou para o “alto” - vermelho.

A escolha pela mudança da classificação de segurança se deu pela robustez do equipamento (o peso do espessador com a polpa é de aproximadamente 22 mil toneladas), visto que foi identificado que podem ter mais de uma pessoa trabalhando no local ao mesmo tempo, de modo que um colapso pode gerar mais de uma vítima fatal. Enquanto a escolha pela mudança da classificação da probabilidade de ocorrência se deu pela comprovação de que, se não bem controlado, o evento indesejado poderia acontecer dentro da janela de 5 a 10 anos.

Figura 5.4 – Linha do risco de corrosão nas estruturas do espessador da *Baseline* WRAC após a revisão

Area de Processo	Etapa da Operação	Classificação Perigo/ Risco/ Aspecto	Descrição Perigo/ Risco/ Aspecto	Descrição do Evento Indesejado	(S)	(H)	(E)	(C)	(L & R)	(M)	(R)	Risco Crítico/PUE (S, N)	Probabilidade de do Risco Crítico/PUE pós controles (Para controle ver Bow Tie)	Classificação do Risco Crítico/PUE
2 - Recebimento de Polpa	Alimentação e Operação do espessador	Gravitacional (Objetos)	Corrosão nas estruturas da área do espessador e/ou sobrecarga	Perda de integridade estrutural (espessador)	5: Máximo	N/A	3: Médio	N/A	1: Mínimo	5: Máximo	2: Baixo	Sim	3: Possível	22 (H)

Fonte: *Baseline* WRAC, 2022.

A partir dos passos executados no processo de revisão da *Baseline* WRAC de Integridade Estrutural na área da Filtragem, foi revisado, também, o *Bowtie* de Perda de Integridade Estrutural. Neste *Bowtie* há 3 (três) causas que podem levar ao evento indesejado, sendo estas:

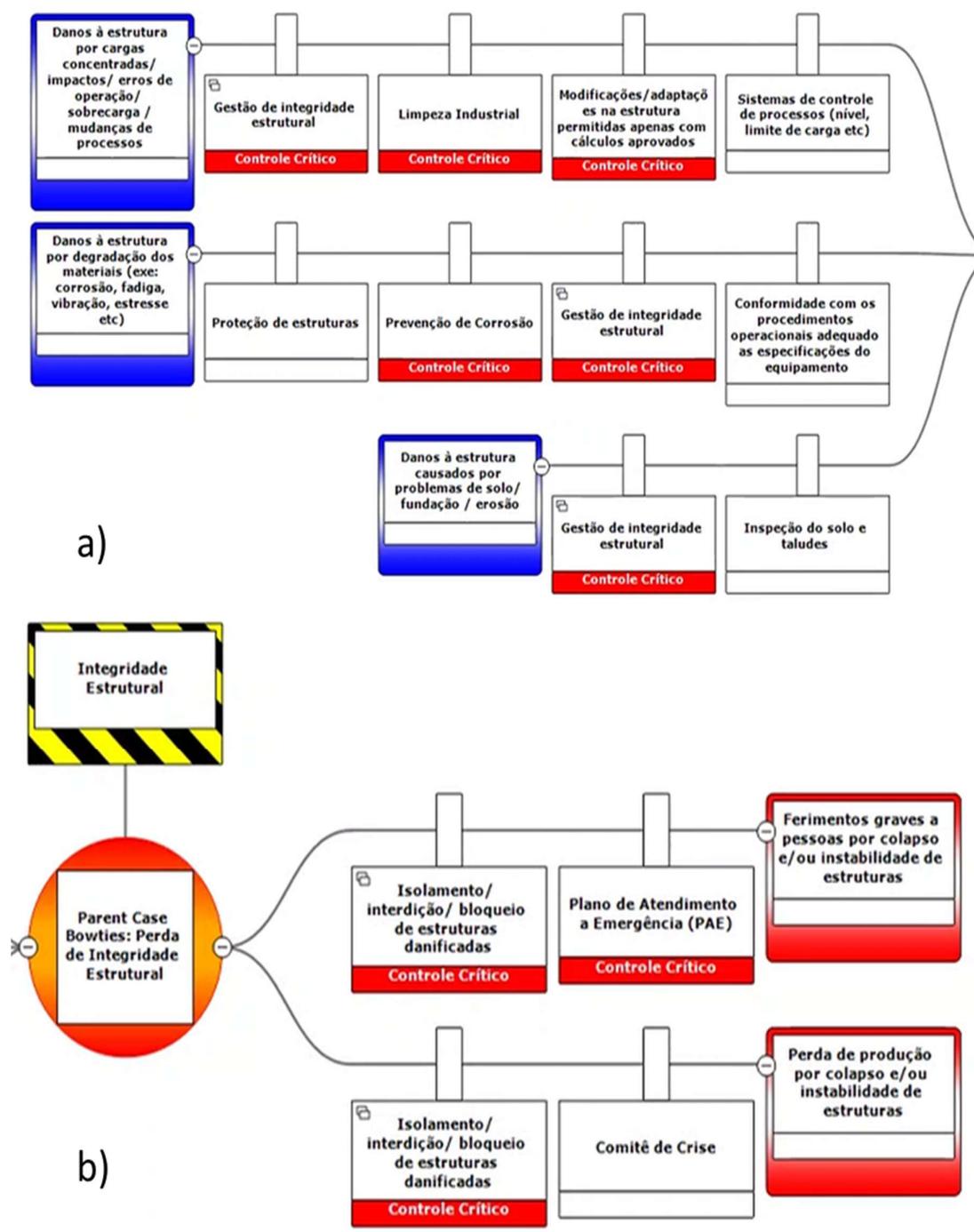
- 1) Danos à estrutura por cargas concentradas/ impactos/ erros de operação/ sobrecarga / mudanças de processos;
- 2) Danos à estrutura por degradação dos materiais (exe: corrosão, fadiga, vibração, estresse etc);
- 3) Danos à estrutura causados por problemas de solo/ fundação / erosão.

O foco deste trabalho está na segunda causa, onde foi inserido um novo controle crítico: Gestão de integridade estrutural. O objetivo desse controle é de garantir um maior acompanhamento por parte dos times de investigações e dos responsáveis pela gestão da

integridade estrutural dos equipamentos da filtragem, de modo a realizar uma gestão de qualidade, envolvendo um time completo de engenheiros de riscos e periodicamente.

Na Figura 5.5 é mostrada a inclusão deste controle no lado esquerdo do *Bowtie*, que está localizado na linha central da figura relacionado a causa de Danos à estrutura por degradação dos materiais (exe: corrosão, fadiga, vibração, estresse etc).

Figura 5.5 – Controles relacionados à corrosão de estruturas inseridos no *Bowtie*



- a) Lado esquerdo do *Bowtie*;
 - b) Lado direito do *Bowtie*;
- Fonte: Adaptado de *Bowtie* XP, 2022.

5.2 Ensaio de tração

Os 06 (seis) corpos de prova totais foram analisados de acordo com a região da amostra, cujos parâmetros iniciais estão na Tabela 5.1, sendo metade deles considerados como “região com níveis intermediários de corrosão” e a outra metade como “região sem corrosão”, como mostrado na Tabela 5.2.

Tabela 5.1 – Parâmetros das amostras do ensaio de tração

Id. Amostra	Espessura média inicial (mm)	Largura média inicial (mm)	Comprimento inicial (mm)	Área inicial (mm²)
15199	5,04	6,26	24,99	31,53
15200	5,01	6,27	24,99	31,43
15201	5,03	6,27	25,00	31,56
15202	7,56	6,28	25,05	47,45
15203	7,66	6,28	25,38	47,43
15204	7,54	6,26	25,02	47,25

Fonte: Próprio autor.

Tabela 5.2 – Identificação das amostras usadas no ensaio de tração

Id. Amostra	Identificação da região
15199	Região com níveis intermediários de corrosão
15200	Região com níveis intermediários de corrosão
15201	Região com níveis intermediários de corrosão
15202	Região sem corrosão
15203	Região sem corrosão
15204	Região sem corrosão

Fonte: Próprio autor.

Os resultados obtidos no ensaio de tração se encontram na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Resultados do ensaio de tração

Id. Amostras	LE (MPa)	LRT (MPa)	Fmáx KN	Lf (mm)	Af (mm²)
15199	404	545	17,17	35,50	10,94
15200	432	549	17,27	33,89	14,01
15201	427	543	17,15	34,83	11,64
15202	392	546	25,89	35,79	16,75
15203	404	538	25,50	35,51	18,45
15204	392	547	25,87	35,44	17,48

Legenda: LE: Limite de escoamento; LRT: Limite de Resistência à Tração; Fmáx: Força Máxima; Lf: Comprimento final; Af: Área final.

Fonte: Próprio autor.

Através dos valores obtidos de LE, LRT e LF, é possível perceber que a resistência mecânica e alongamento das peças não variaram muito entre as regiões com níveis intermediários de corrosão e nas regiões sem corrosão.

O gradiente de valores obtidos na área final das duas regiões pode ser explicado em decorrência do fato de que as amostras com níveis intermediários de corrosão apresentaram menor espessura inicial.

Segundo a ASTM A36, o LE do aço A36 deve ser no mínimo 250 MPa, o valor de LRT deve estar entre 400 e 550 MPa. Dessa forma, todas as amostras estão no padrão estipulado pela norma e a corrosão não afetou as propriedades mecânicas, possivelmente pela presença de elementos como o cromo, que eleva os valores de LE e LRT.

5.3 Análise química por Espectroscopia de Emissão óptica

Os resultados estão apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4– Composição química do aço A36 retirado do espessador (Continua)

Elemento	Concentração (%)
C	0,1683
Si	0,1664
Mn	1,0587
P	0,0301
S	0,0164

Tabela 5.4– Composição química do aço A36 retirado do espessador (Conclusão)

Cr	0,304
Mb	0,0049

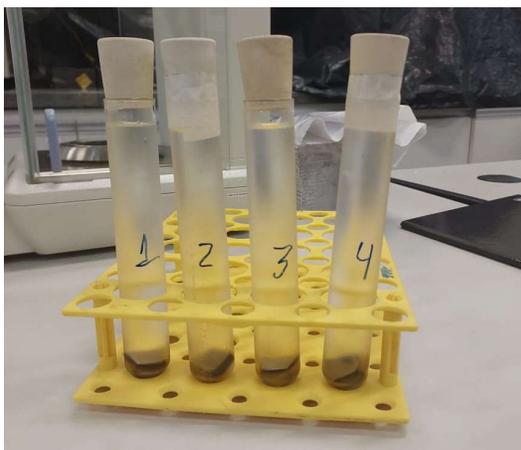
Fonte: Próprio autor.

É possível notar que as composições obtidas estão ligeiramente diferentes de composições encontradas na literatura, como de acordo com os resultados obtidos por (VIKAS; RAHUL; REDDY; RAMANA; MORAMPUDI; PRASAD, 2022), cuja composição química do aço A36 encontrada é de 0,27% C, 0,21% Cu, 1,03% Mn, 0,04% P, 0,028% Si e 0,5% S.

5.4 Análise de Corrosão por Perda de Massa

O ensaio de análise de corrosão por perda de massa foi realizado para averiguar o comportamento do aço ao ser exposto imerso em uma solução de água do mar em uma tentativa de aproximar ao ambiente real do material em uso, apesar de, na realidade o aço não ficar em contato direto com água, sendo exposto apenas à maresia, e ser revestido com pintura.

A Figura 5.6 apresenta as amostras em imersão nos tubos de ensaio.

Figura 5.6 – Amostras em imersão na água do mar

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 5.5 apresenta a divisão de cada tubo de ensaio com suas amostras e massas correspondentes.

Tabela 5.5 – Posições das amostras correspondentes a cada tubo de ensaio

Nº Tubo	Posição da amostra
Tubo 1	Amostra com face maior para baixo
Tubo 2	Amostra com face menor para baixo
Tubo 3	Amostra com face maior para baixo
Tubo 4	Amostra com face menor para baixo

Fonte: Próprio autor.

Os corpos de prova de aço foram pesados ao final do período de 29 dias de imersão na água do mar. A Tabela 5.6 mostra os resultados obtidos com um desvio de 0,00003g.

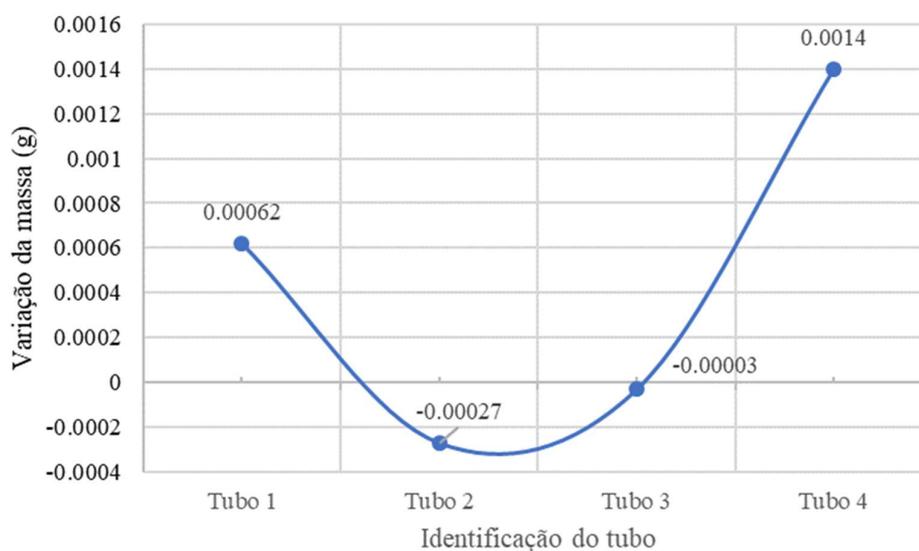
Tabela 5.6 – Condições finais das amostras correspondentes a cada tubo de ensaio

Nº Tubo	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Média (g)	Diferença de massa (g)
Tubo 1	10,44534	10,44472	10,44503	0.00062
Tubo 2	11,07969	11,07996	11,07983	-0.00027
Tubo 3	10,93881	10,93884	10,93883	-0.00003
Tubo 4	11,29343	11,29203	11,29273	0.0014

Fonte: Próprio autor.

É possível notar que os tubos 1 e 4 apresentaram uma redução de massa inicial, enquanto os tubos 2 e 3 tiveram um aumento de massa. A redução de massa pode ser explicada pela própria formação de produtos de corrosão e precipitados que levam a redução de massa inicial, enquanto a elevação pode ser explicada pela característica do próprio material em apresentar um difícil desprendimento da camada de óxido, o que eleva a massa inicial.

A Figura 5.7 apresenta um gráfico comparativo da diferença de massas inicial e final de cada análise.

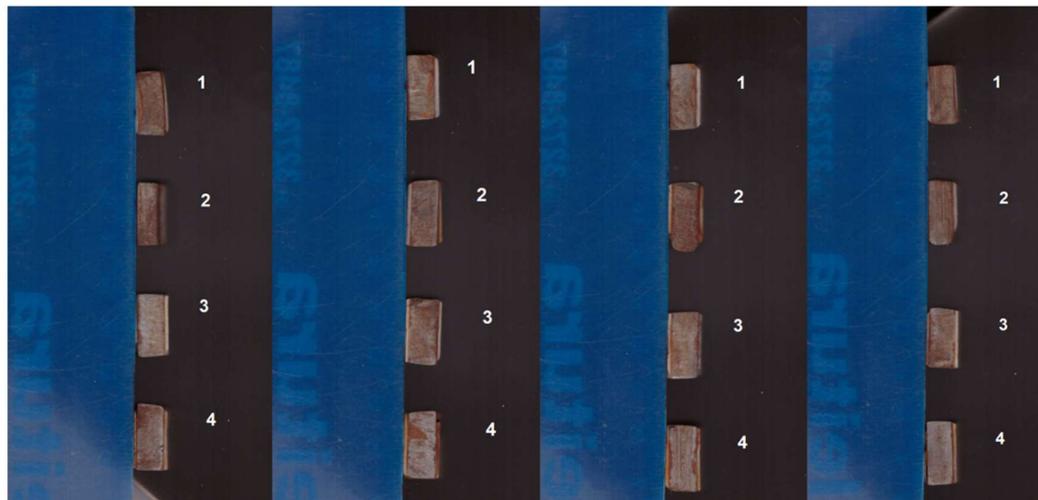
Figura 5.7 – Diferença de massa inicial x massa final das amostras em imersão

Fonte: Próprio autor.

Os 4 (quatro) tubos estavam com os corpos de prova nas mesmas condições, visto que, ao longo do tempo de imersão, as faces determinadas na Tabela 4.5 não foram mantidas pelo fato de que as amostras escorregavam na parede interna dos tubos. Portanto, o ensaio foi feito em quadruplicata.

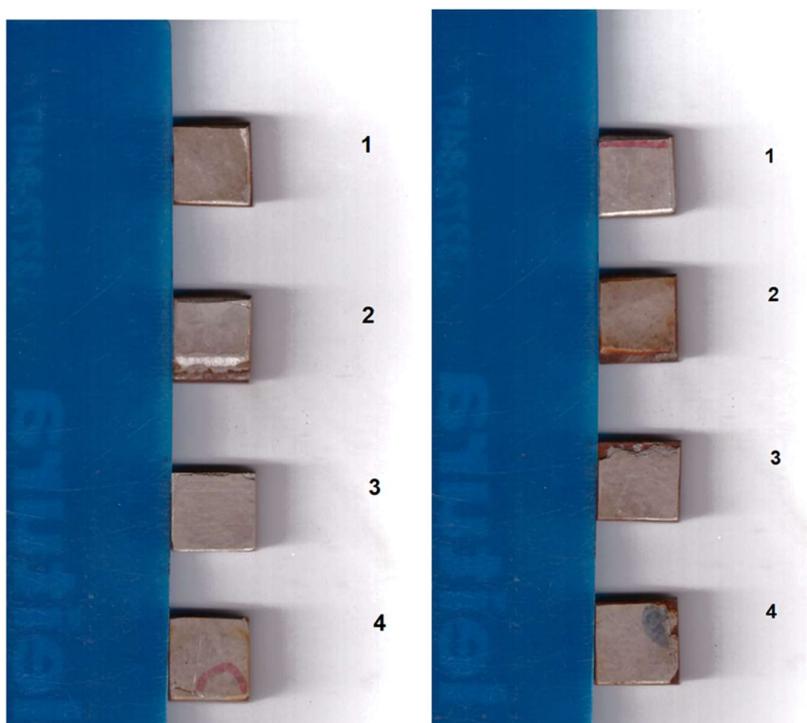
As Figuras 5.8 e 5.9 mostram os corpos de prova após o período de imersão. As 4 (quatro) faces de menor área das amostras apresentaram corrosão, como já era esperado, devido à exposição ao ambiente corrosivo de água do mar. As 2 (duas) faces de maior área, também apresentaram corrosão, porém nos pontos em que se notaram trincas e descascamento do revestimento.

Figura 5.8 – Faces de menor área dos corpos de prova após o período de imersão



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.9 – Faces de maior área dos corpos de prova após o período de imersão



Fonte: Próprio autor.

5.5 Fluorescência de raios X

Os elementos químicos constituintes da água do mar recolhida sem produtos de corrosão estão apresentados na Tabela 5.7, enquanto os resultados obtidos da água do bebedouro do CEFET-MG estão na Tabela 5.8.

É possível comparar que, como já era esperado, a água do mar analisada apresenta diversos sais e íons dissolvidos, sendo o elemento cloro o de maior concentração. Já a água do bebedouro não contém elementos dissolvidos, sendo totalmente potável.

Tabela 5.7 – Resultados da análise de FRX da água do mar

Elemento	Ensaio 1	Ensaio 2
	Concentração (%)	
Cl	2,10	1,888
S	< 1,0	< 1,0
Ca	< 1,0	< 1,0
K	< 1,0	< 1,0
Br	< 1,0	< 1,0
Cu	< 1,0	< 1,0
H ₂ O	97,757	97,957

Fonte: Próprio autor.

Tabela 5.8 – Resultados da análise de FRX da água do bebedouro

Elemento	Concentração (%)
H ₂ O	100

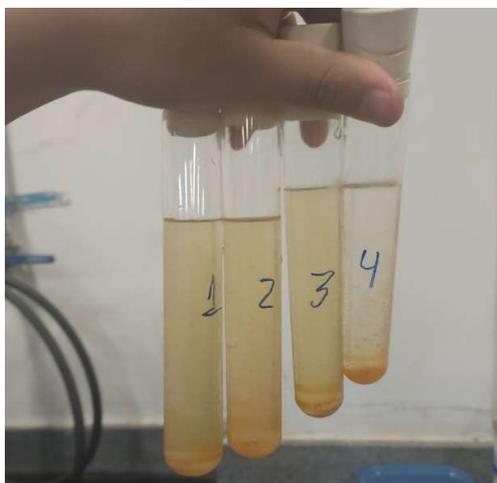
Fonte: Próprio autor.

O ensaio também foi feito na água do mar após a realização da análise de perda de massa do aço, ou seja, contendo produtos de corrosão, estão apresentados na Tabela 5.9, sendo possível notar a presença de óxidos esperados, como óxido de ferro. A água analisada é mostrada na Figura 5.10, sendo possível notar uma coloração amarelada acentuada, reforçando a ocorrência de corrosão das amostras imersas e a presença de precipitados.

Tabela 5.9 – Resultados da análise de FRX da água do mar após o ensaio de imersão

Óxidos encontrados	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3	Tubo 4
	Concentração (%)			
Cl	0.015	0.013	0.015	0.015
Fe ₂ O ₃	0.005	0.014	0.005	0.006
SO ₃	0.002	0.001	0.002	0.002
Br	0.001	0.001	0.001	0.001
CaO	0.001	0.001	0.001	0.001
H	99.976	99.970	99.977	99.976

Fonte: Próprio autor.

Figura 5.10 – Água do mar analisada ao final do ensaio de perda de massa do aço imerso

Fonte: Próprio autor.

5.6 Metalografia

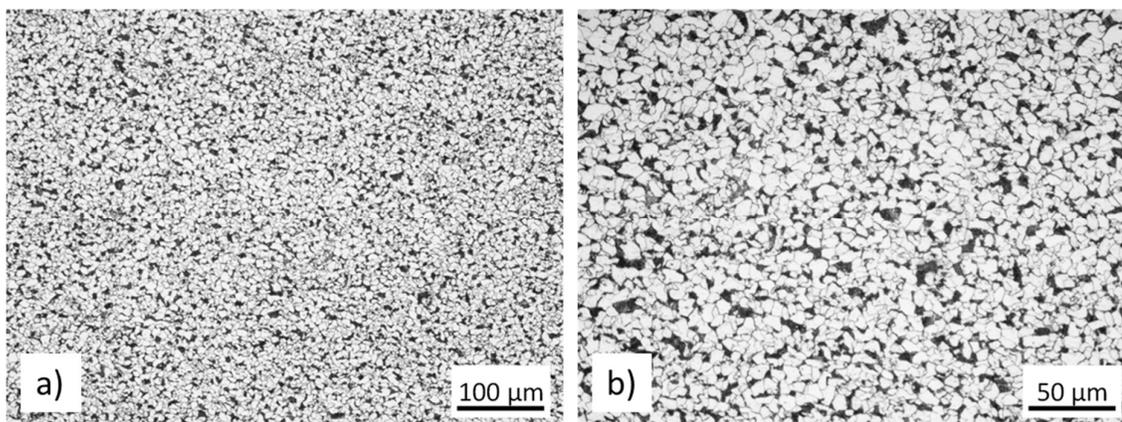
A amostra A foi analisada na região central do corte e também próxima à superfície corroída, marcadas nos retângulos na Figura 5.11. Os resultados obtidos da região central estão na Figura 5.12, e da região próxima à superfície estão na Figura 5.13.

Figura 5.11 – Locais de análise na amostra A



Fonte: Relatório de Micrografia CIT SENAI, 2022.

Figura 5.12 – Microestrutura obtida na região central da amostra A

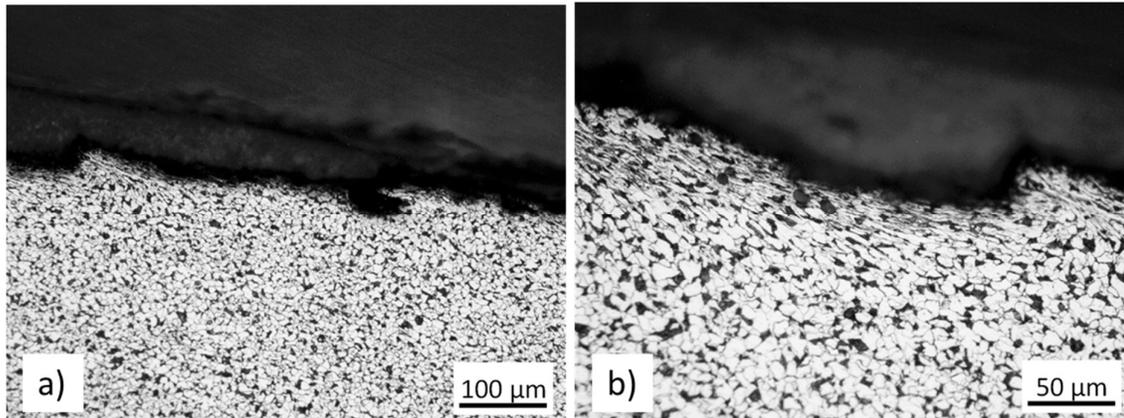


a) Ampliação de 100x

b) Ampliação de 200x

Fonte: Relatório de Micrografia CIT SENAI, 2022.

Figura 5.13 – Microestrutura obtida na região próxima à superfície da amostra A



a) Ampliação de 100x

b) Ampliação de 200x

Fonte: Relatório de Micrografia CIT SENAI, 2022.

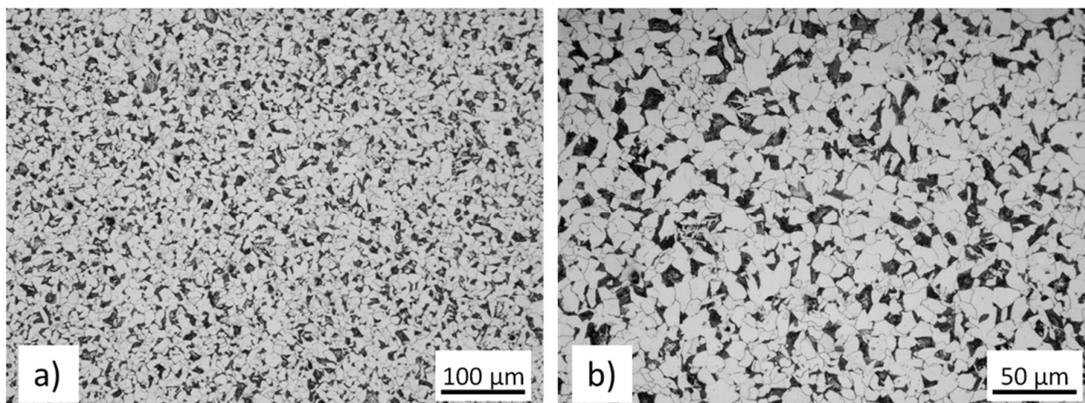
A amostra B foi analisada na região central do corte e também próxima à superfície corroída nos dois pontos de intercessão da peça, marcadas nos retângulos na Figura 5.14. Os resultados obtidos da região central estão na Figura 5.15, e das regiões próximas à superfície estão na Figura 5.16.

Figura 5.14 – Locais de análise na amostra B



Fonte: Relatório de Micrografia CIT SENAI, 2022.

Figura 5.15 – Microestrutura obtida na região central da amostra B

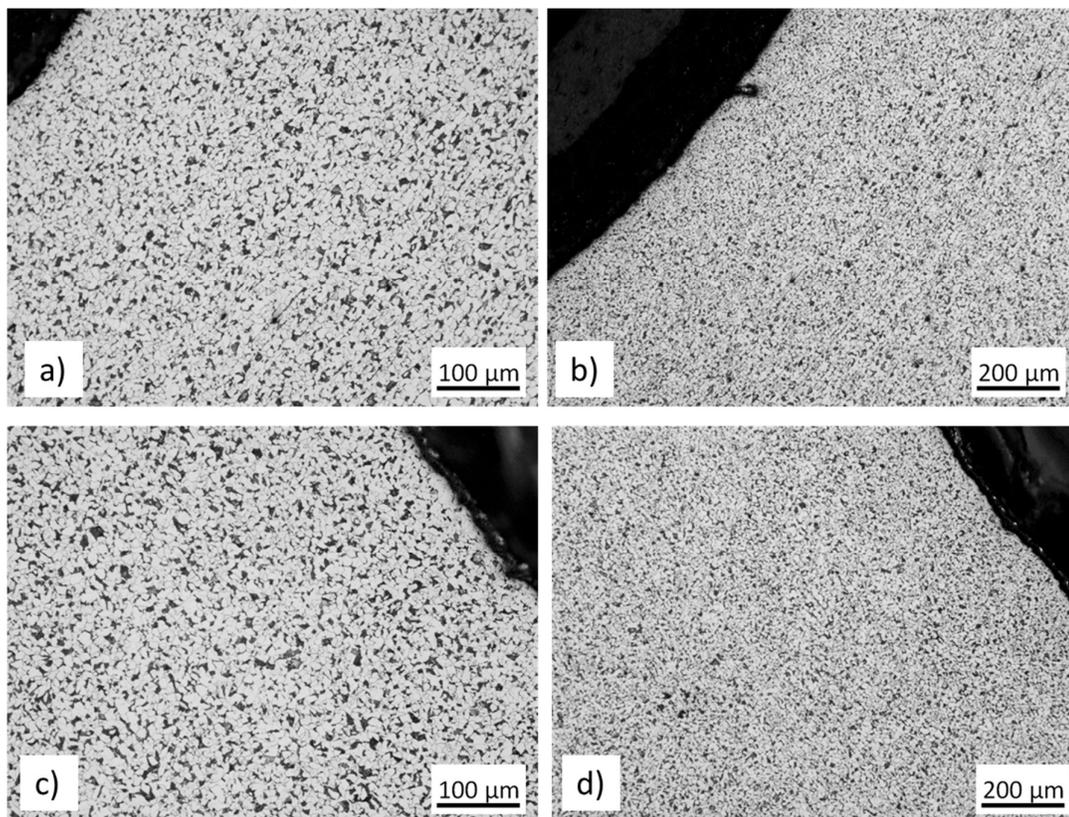


a) Ampliação de 100x

b) Ampliação de 200x

Fonte: Relatório de Micrografia CIT SENAI, 2022.

Figura 5.16 – Microestrutura obtida nas regiões próximas à superfície da amostra B



a) Ampliação de 100x no lado esquerdo da amostra

b) Ampliação de 50x no lado esquerdo da amostra

c) Ampliação de 100x no lado direito da amostra

d) Ampliação de 50x no lado direito da amostra

Fonte: Relatório de Micrografia CIT SENAI, 2022.

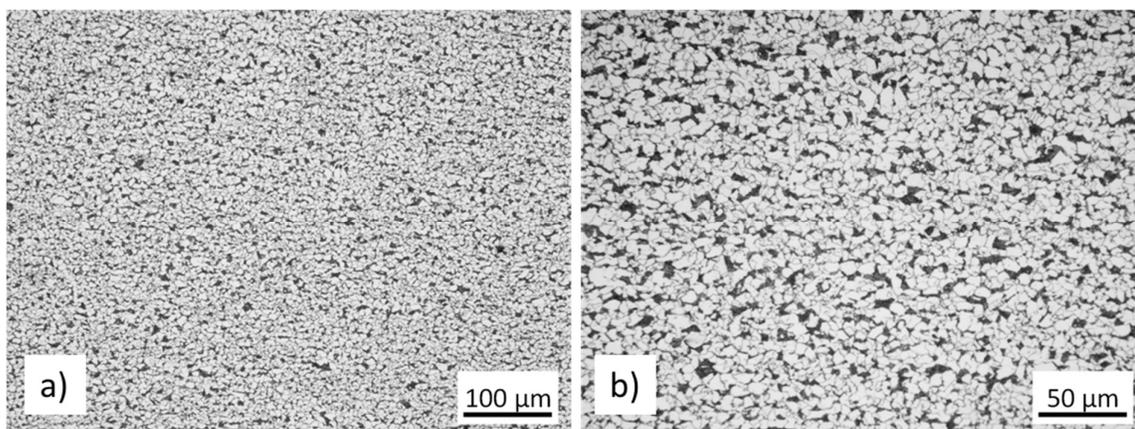
A amostra C foi analisada na região central do corte e também próxima à superfície corroída, marcadas nos retângulos na Figura 5.17. Os resultados obtidos da região central estão na Figura 5.18, e das regiões próximas à superfície estão na Figura 5.19.

Figura 5.17 – Locais de análise na amostra C



Fonte: Relatório de Micrografia CIT SENAI, 2022.

Figura 5.18 – Microestrutura obtida na região central da amostra C

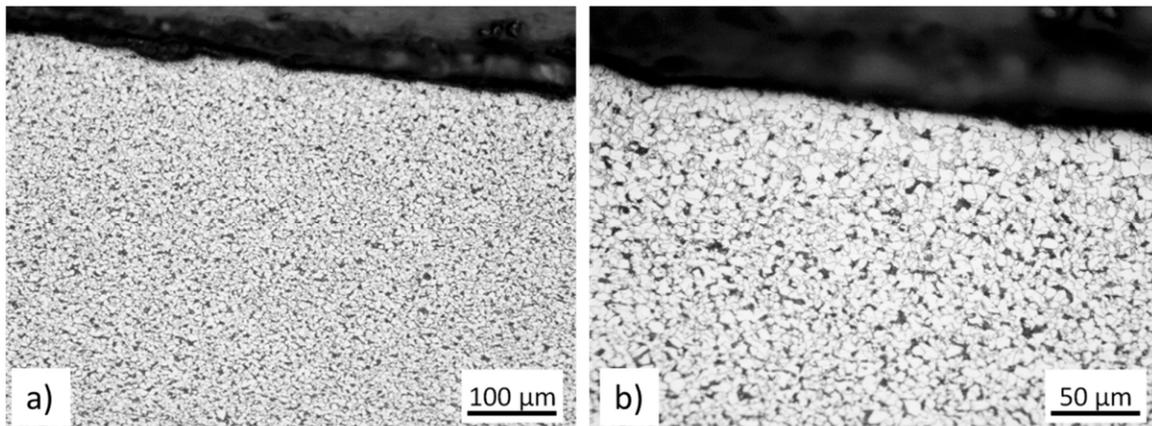


a) Ampliação de 100x

b) Ampliação de 200x

Fonte: Relatório de Micrografia CIT SENAI, 2022.

Figura 5.19 – Microestrutura obtida na região próxima à superfície da amostra C



a) Ampliação de 100x

b) Ampliação de 200x

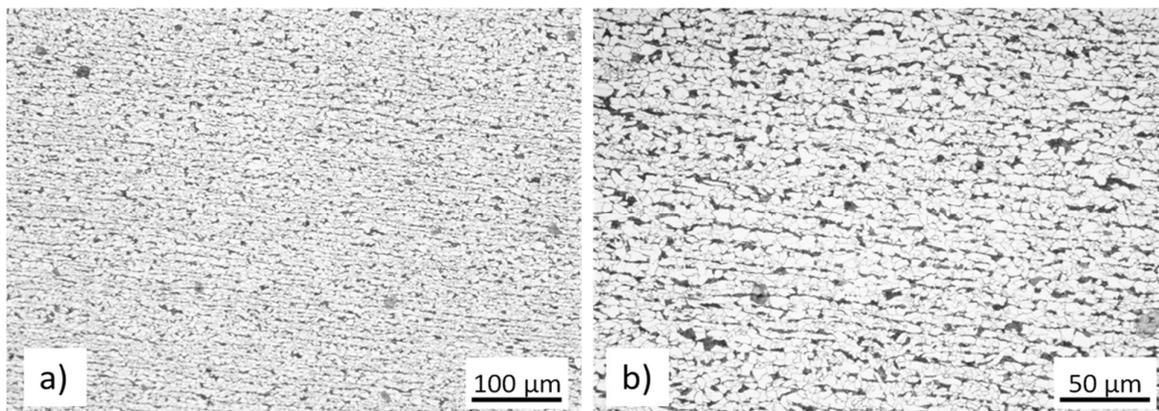
Fonte: Relatório de Micrografia CIT SENAI, 2022.

A amostra D foi analisada na região central do corte e também próxima à superfície corroída, marcadas nos retângulos na Figura 5.20. Os resultados obtidos da região central estão na Figura 5.21 e das regiões próximas à superfície estão na Figura 5.22.

Figura 5.20 – Locais de análise na amostra D



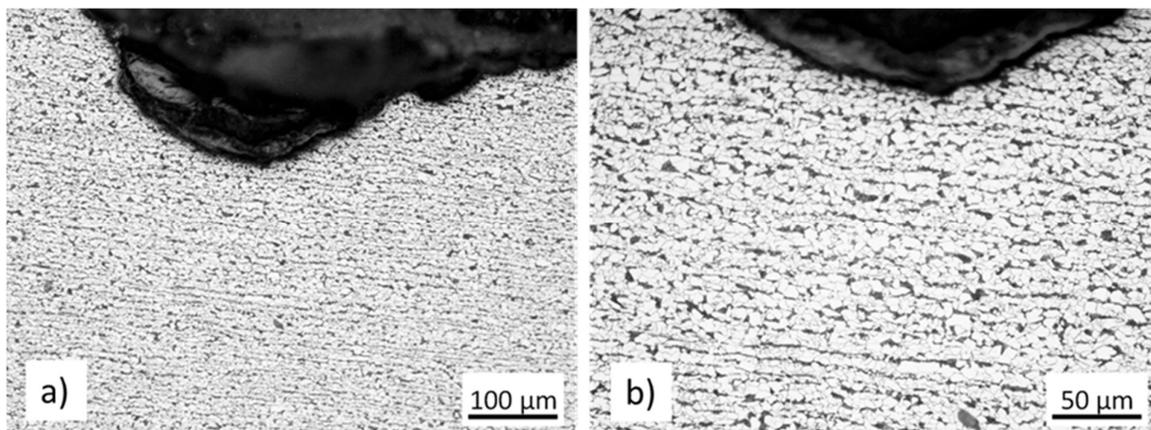
Fonte: Relatório de Micrografia CIT SENAI, 2022.

Figura 5.21 – Microestrutura obtida na região central da amostra D

a) Ampliação de 100x

b) Ampliação de 200x

Fonte: Relatório de Micrografia CIT SENAI, 2022.

Figura 5.22 – Microestrutura obtida na região próxima à superfície da amostra D

a) Ampliação de 100x

b) Ampliação de 200x

Fonte: Relatório de Micrografia CIT SENAI, 2022.

Em todos os pontos de análise é possível perceber a presença de perlita e ferrita equiaxial entre as amostras, tanto nas regiões centrais quanto próximas à superfície.

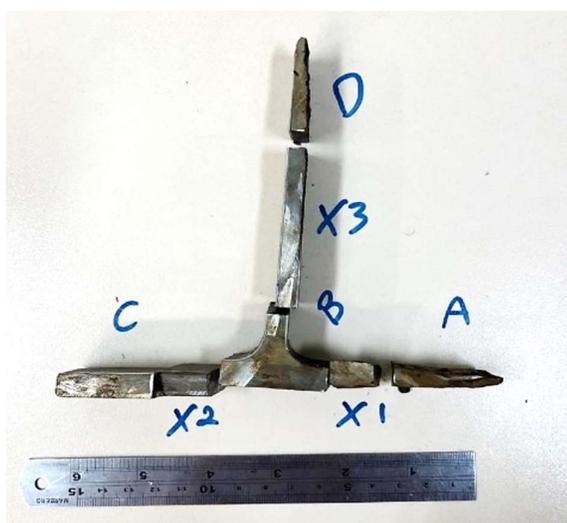
Nas amostras A, B e C não é possível perceber a ocorrência de deformação plástica nas regiões de análise, porém, nos resultados obtidos para as regiões da amostra D, nota-se um alinhamento dos grãos no sentido horizontal, o que indica a conformação mecânica da peça. Esse fator pode ser um dos indícios do porquê a área de onde a amostra D foi retirada, foi a que apresentou um maior ataque corrosivo se comparada às outras, tendo uma elevada redução de espessura, visto que a conformação mecânica afeta na resistência à corrosão do material, como

abordado por AMÉRICO, 2016. Além disso, a posição da viga em relação ao vento também pode ser um fator favorável a ocorrência de corrosão mais acentuada em determinadas regiões do que outras.

5.7 Microdureza Vickers

A Figura 5.23 mostra a região das amostras A, B, C e D usadas no ensaio de microdureza Vickers.

Figura 5.23 – Região das amostras do ensaio de microdureza Vickers



Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 5.10 são mostrados os resultados de microdureza Vickers obtidos nas duas regiões da amostra A.

Tabela 5.10 – Resultados da amostra A

Distância da superfície (mm)	Dureza (HV)		
	Região 1	Região 2	Média
1	179	171	175
2	173	205	189
3	178	170	174
4	190	201	195,5
5	186	-	186

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 5.11 são mostrados os resultados de microdureza Vickers obtidos nas duas regiões da amostra B.

Tabela 5.11 – Resultados da amostra B

Distância da superfície (mm)	Dureza (HV)			
	Região 1	Região 2	Região 3	Média
1	143	202	180	175
2	165	188	154	169
3	193	191	168	184
4	188	192	-	190
5	199	-	-	199

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 5.12 são mostrados os resultados de microdureza Vickers obtidos nas duas regiões da amostra B.

Tabela 5.12 – Resultados da amostra C

Distância da superfície (mm)	Dureza (HV)		
	Região 1	Região 2	Média
1	166	163	164,5
2	171	165	168
3	151	165	158
4	161	171	166
5	159	187	173

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 5.13 são mostrados os resultados de microdureza Vickers obtidos nas duas regiões da amostra B.

Tabela 5.13 – Resultados da amostra D

Distância da superfície (mm)	Dureza (HV)		
	Região 1	Região 2	Média
1	155	191	173
2	171	179	175
3	183	189	186
4	-	190	190

Fonte: Próprio autor.

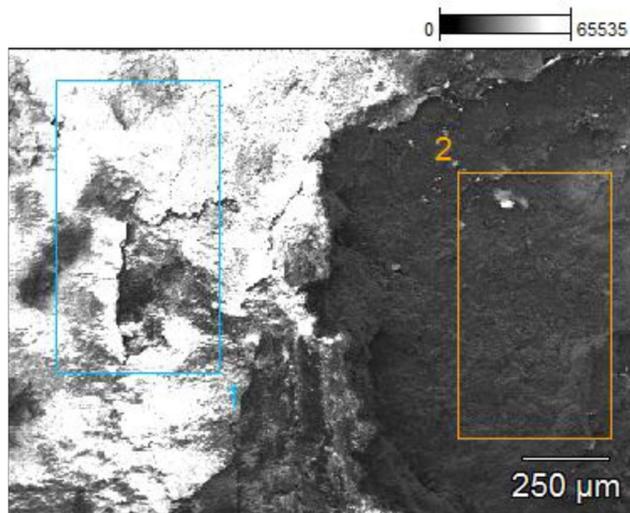
Os valores de microdureza mostram que tanto os resultados obtidos próximos à superfície quanto ao longo da espessura de todas as amostras estão próximos, o que indica que a corrosão não afetou as propriedades mecânicas, assim como observado no ensaio de tração.

5.8 Microscopia eletrônica de varredura com Espectroscopia por energia dispersiva

As análises de EDS são apenas de efeito qualitativo e o equipamento não detecta óxidos, logo, os valores citados correspondem a cálculos estequiométricos.

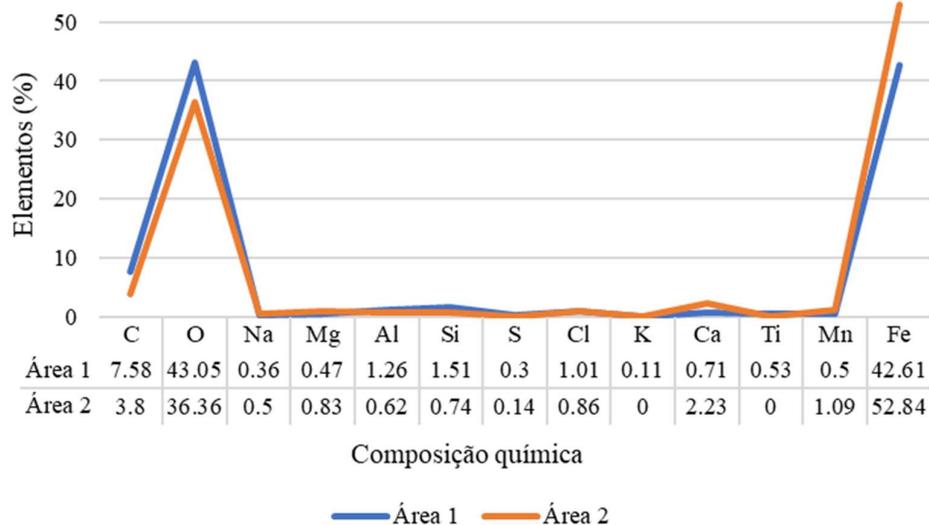
A Figura 5.24 mostra uma ampliação de 30x em uma região do topo da amostra, localizada no limite entre uma área com menor grau corrosivo- à esquerda, e uma área com maior profundidade de corrosão- à direita. Os retângulos azuis (área 1) e laranja (área 2) são as regiões de análise do EDS, cuja composição química e de óxidos detectadas são mostradas nas Figuras 5.25 e 5.26, respectivamente.

Figura 5.24 – Imagem obtida do MEV da região 1 do topo da amostra



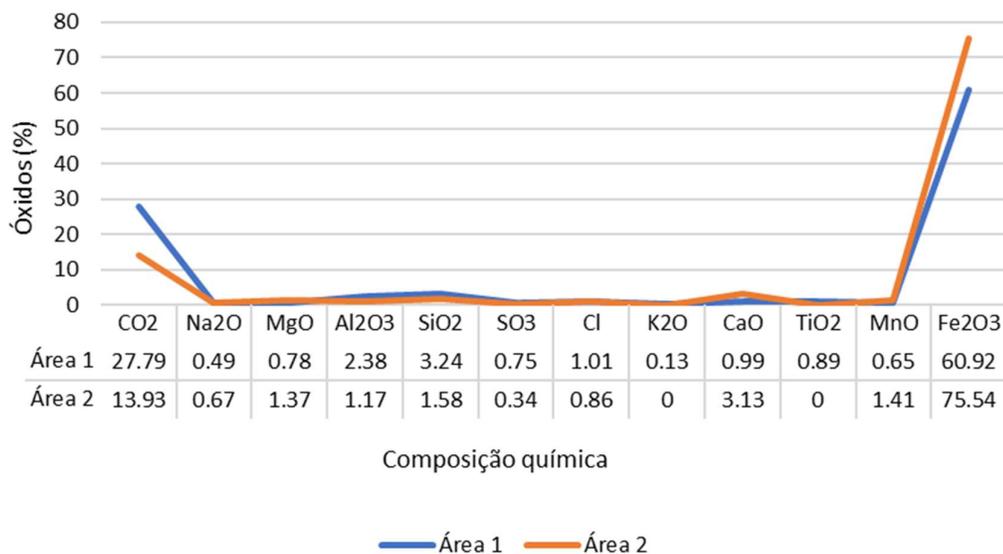
Fonte: Próprio autor.

Figura 5.25 – Gráfico comparativo do percentual de elementos das áreas 1 e 2



Fonte: Próprio autor.

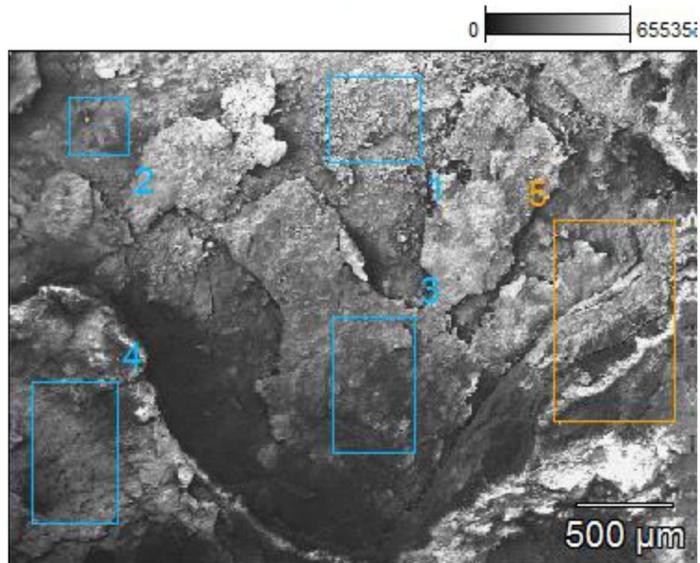
Figura 5.26 – Gráfico comparativo do percentual de óxidos das áreas 1 e 2



Fonte: Próprio autor.

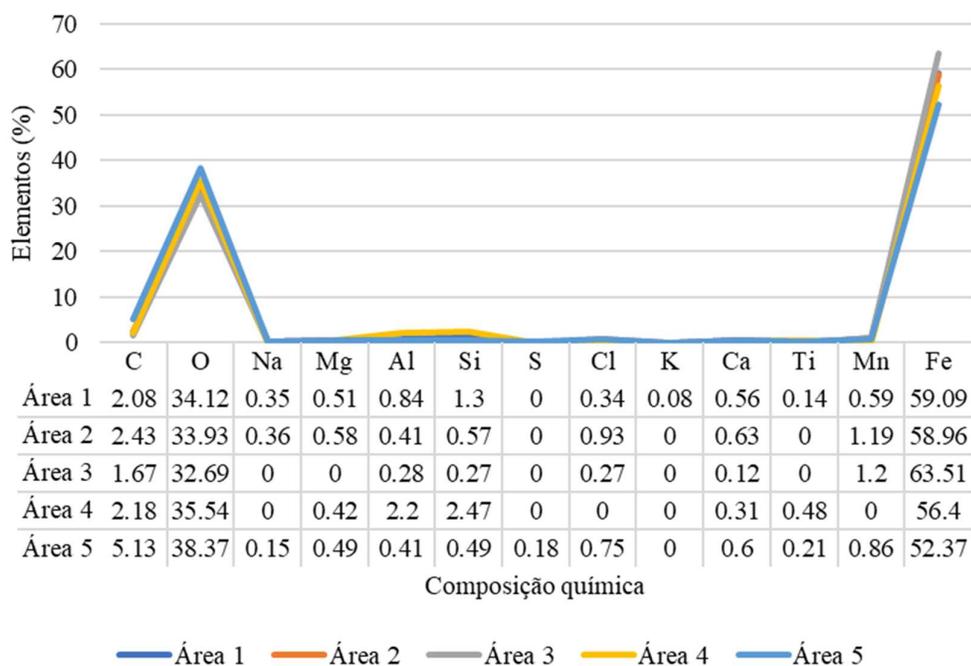
A Figura 5.27 mostra uma ampliação de 35x em um ponto de corrosão. Os retângulos azuis (áreas 1 a 4) e laranja (área 5) são as regiões de análise do EDS, cuja composição química e de óxidos detectadas são mostradas nas Figuras 5.28 e 5.29, respectivamente.

Figura 5.27 – Imagem obtida do MEV da região 2 do topo da amostra



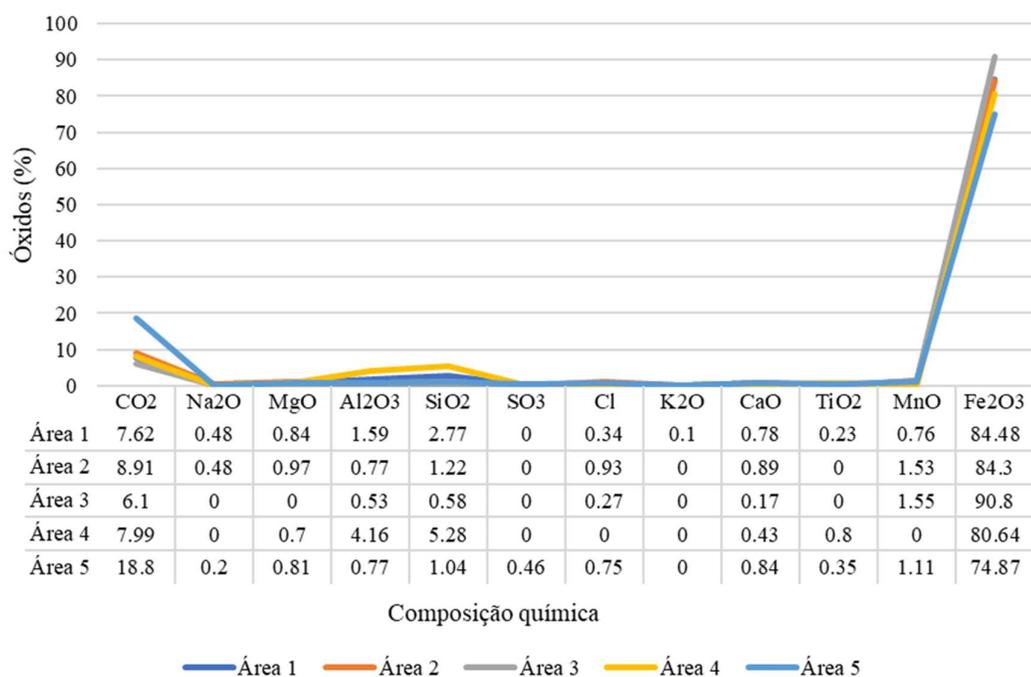
Fonte: Relatório de Microscopia Eletrônica de Varredura CIT SENAI, 2022.

Figura 5.28 – Gráfico comparativo do percentual de elementos das áreas 1 a 5



Fonte: Próprio autor.

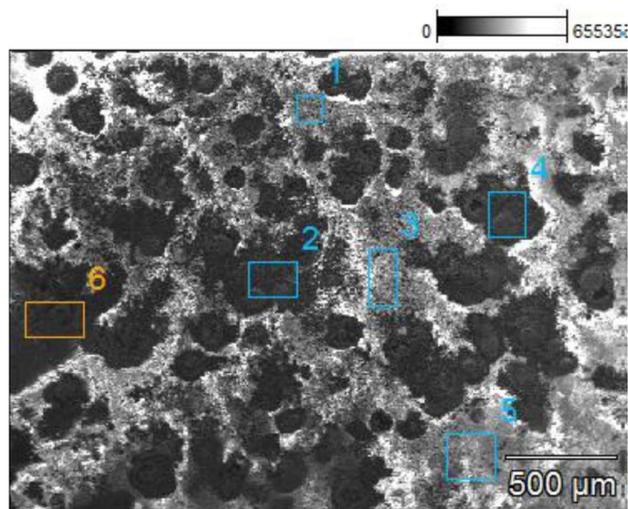
Figura 5.29 – Gráfico comparativo do percentual de óxidos das áreas 1 a 5



Fonte: Próprio autor.

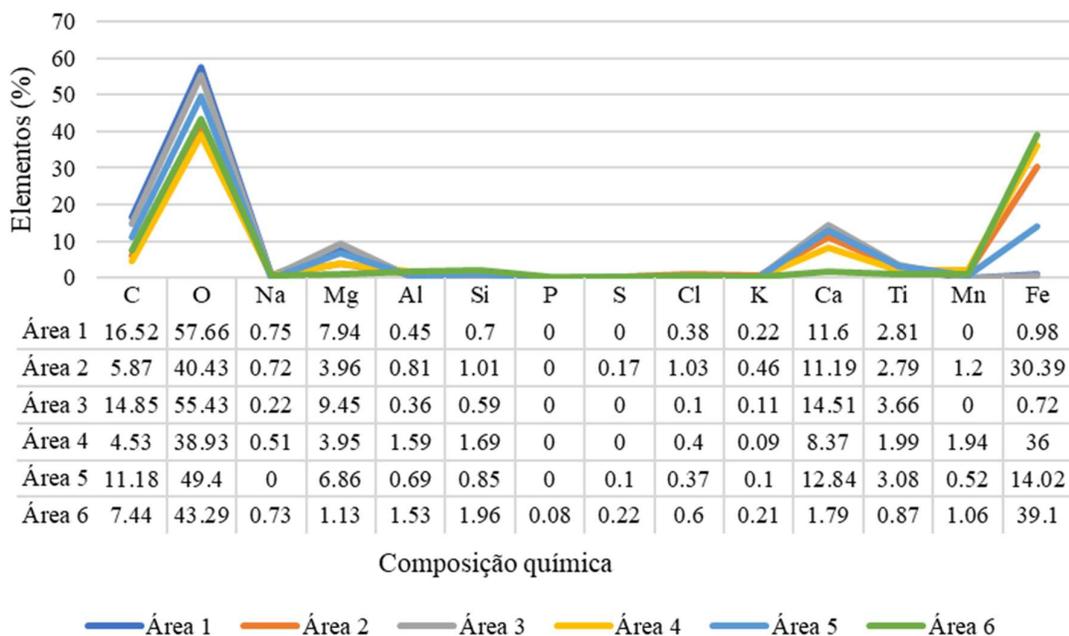
A Figura 5.30 mostra uma ampliação de 45x em uma região do topo coberta de pontos de corrosão com indicativo de pites. Os retângulos azuis (áreas 1 a 5) e laranja (área 6) são as regiões de análise do EDS, cuja composição química e de óxidos detectadas são mostradas nas Figuras 5.31 e 5.32, respectivamente.

Figura 5.30 – Imagem obtida do MEV da região 3 do topo da amostra



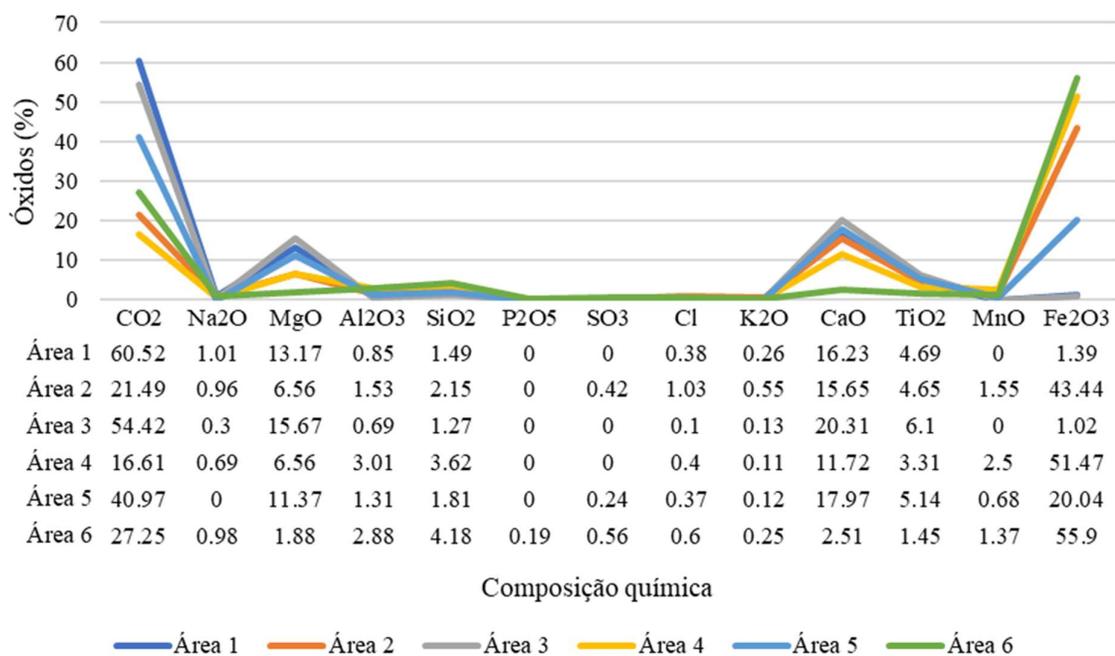
Fonte: Próprio autor.

Figura 5.31 – Gráfico comparativo do percentual de elementos das áreas 1 a 6



Fonte: Próprio autor.

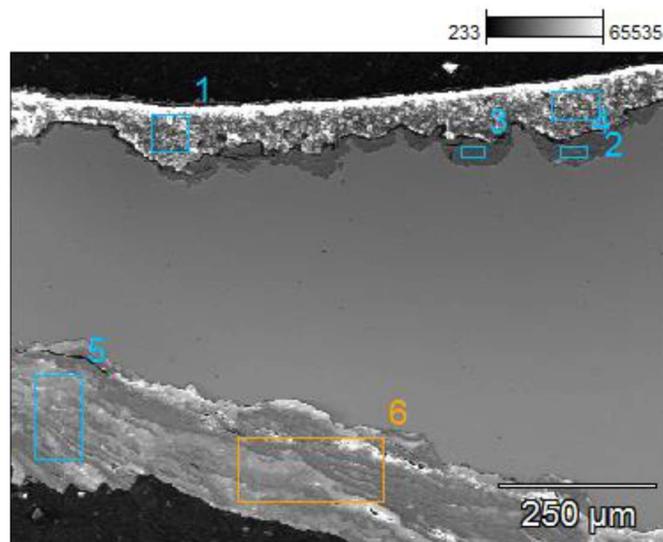
Figura 5.32 – Gráfico comparativo do percentual de óxidos das áreas 1 a 6



Fonte: Próprio autor.

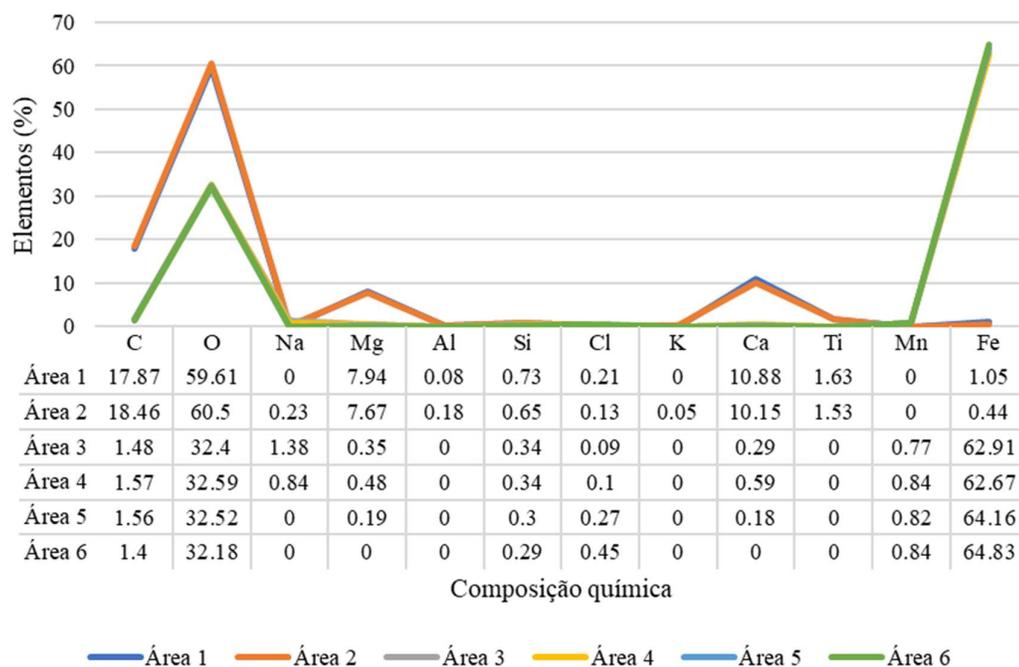
A Figura 5.33 mostra uma ampliação de 120x em ambas extremidades laterais do perfil do corpo de prova. Os retângulos azuis (áreas 1 a 5) e laranja (área 6) são as regiões de análise do EDS, cuja composição química e de óxidos detectadas são mostradas nas Figuras 5.34 e 5.35, respectivamente.

Figura 5.33 – Imagem obtida do MEV da região 4 do perfil da amostra



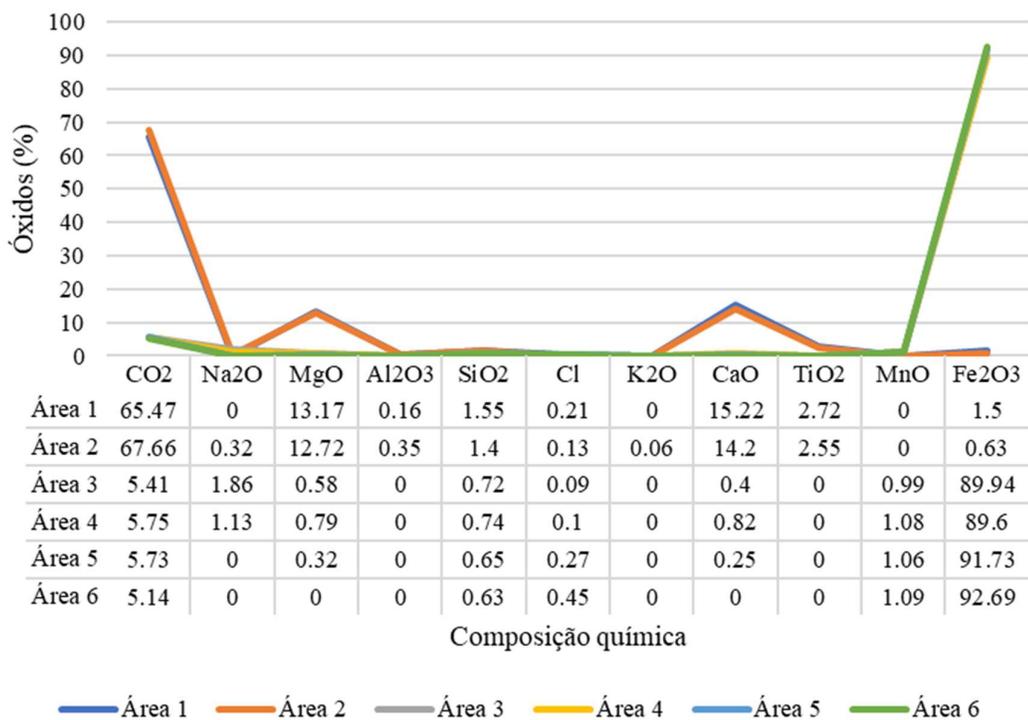
Fonte: Próprio autor.

Figura 5.34 – Gráfico comparativo do percentual de elementos das áreas 1 a 6



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.35 – Gráfico comparativo do percentual de óxidos das áreas 1 a 6

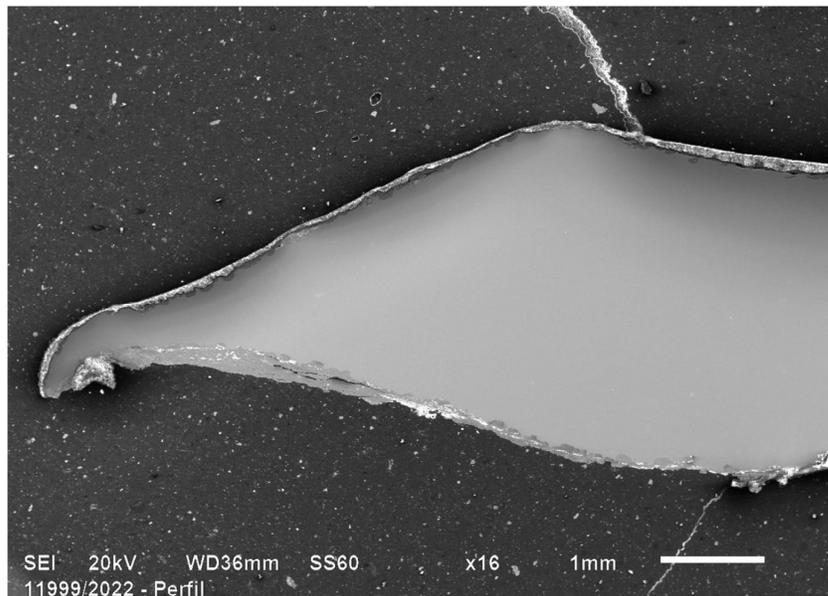


Fonte: Próprio autor.

De forma geral, percebe-se que os elementos O e Fe são predominantes nas análises de EDS, enquanto a formação do óxido Fe_2O_3 também é acentuada, indicando a presença de óxido proveniente de ação corrosiva em decorrência da presença constante de eletrólito no meio.

A partir das imagens de MEV do topo da amostra, é possível perceber indicativos de corrosão por pite a longo prazo. No entanto, apesar dos pontos de corrosão ocuparem uma extensa área superficial, na Figura 5.36 é possível perceber que a camada de óxido não apresenta uma penetração muito grande, se apresentando com cor mais clara nas extremidades do corpo de prova, o que é possível relacionar a camada de óxido como uma rede superficial que ocupa a área de forma generalizada, logo, o processo corrosivo se distribui por toda a superfície metálica (FONSECA; SILVA; SANTANA; PINTO, 2019).

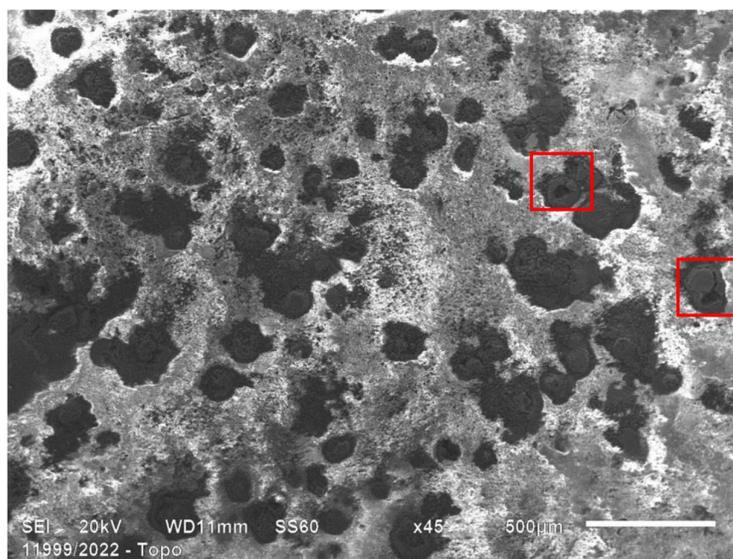
Figura 5.36 – Imagem obtida do MEV de óxido no perfil da amostra



Fonte: Relatório de Microscopia Eletrônica de Varredura CIT SENAI, 2022.

Nota-se que alguns pontos de pite começaram a apresentar maior profundidade de alcance, como mostrado na Figura 5.37, nas regiões dentro do contorno em vermelho, nas quais constam uma coloração mais escura devido à presença de “furos”.

Figura 5.37 – Pontos de pite com maior profundidade

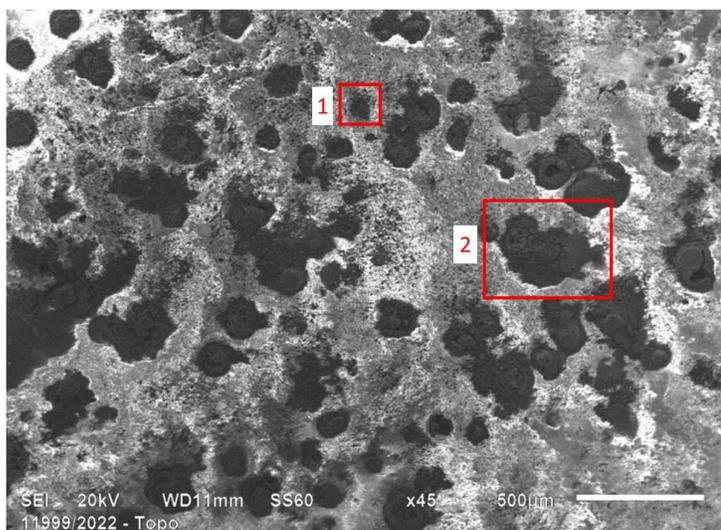


Fonte: Adaptado de Relatório de Microscopia Eletrônica de Varredura CIT SENAI, 2022.

O tamanho de pite médio foi encontrado a partir da média da largura dos pontos 1 e 2, mostrados na Figura 5.38 considerados pequeno e grande, respectivamente. A inspeção visual

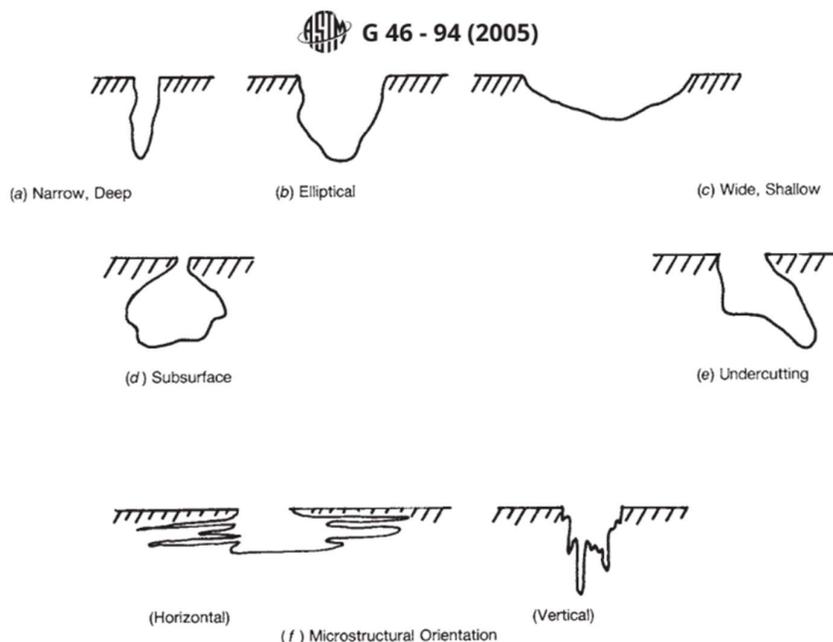
e classificação dos pites foi feita segundo a ASTM G 46-94 (2005), descrita na Figura 5.39. O ponto 1 apresentou largura de 0,35 mm e o ponto 2 apresentou largura de 1,7 mm, e os pites foram classificados como largos e rasos, o que justifica a camada de óxido ser como uma placa superficial, não atingindo grandes profundidades. Desse modo, a média da largura dos pontos foi de 1,03 mm.

Figura 5.38 – Pontos de medição da largura do pite



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.39 – Variações na forma da seção transversal dos poços de pite



Fonte: ASTM G 46-94, 2005.

6 CONCLUSÕES

Diante das análises feitas ao longo deste trabalho e dos objetivos traçados, pode-se concluir que, apesar dos resultados obtidos pelo MEV e EDS apresentarem corrosão uniforme, não há relação entre esse mecanismo e as características mecânicas do aço, cuja camada de óxido se comportou como uma placa superficial.

Os ensaios de tração e de dureza mostraram que propriedades mecânicas obtidas entre as regiões com ausência de oxidação e regiões com presença de oxidação não foram muito discrepantes, desse modo, o ataque corrosivo não foi tão agressivo em termos mecânicos.

Os resultados da análise micrográfica indicaram que o ataque corrosivo alcançou uma porção pequena do material, não atingindo a região que sofreu a maior quantidade de deformação plástica associada ao processo de laminação a quente que, pelo fato de ter sofrido maior quantidade prévia de deformação neste processo de conformação, tende a exibir a menor resistência à corrosão.

Apesar de as propriedades mecânicas não terem sido tão afetadas pela ação corrosiva do ambiente, vale ressaltar que os sais e os particulados presentes na atmosfera em que o espessador está inserido foram detectados nos ensaios de composição química das amostras. Isso indica que matéria orgânica e microorganismos também podem afetar características estruturais e químicas dos equipamentos expostos ao ambiente. Além disso, a plataforma do espessador, está localizada em uma região com ventos fortes que podem favorecer a ação da maresia e a permanência constante de camada de eletrólito na superfície metálica.

Segundo o manual do espessador (AA, 2012) utilizado para a instalação e manutenção do equipamento na Anglo American, a frequência de inspeção para detectar a presença de incrustações e pontos de corrosão é anual, sendo que a necessidade de pintura e/ou substituição da peça varia de acordo a severidade e extensão destas condições. Além disso, apesar das inspeções anuais, a estrutura metálica nunca havia sido trocada desde o início de seu uso em 2012, apenas lixada e pintada anualmente.

A revisão do evento indesejado prioritário de “Perda de Integridade Estrutural” identificado na *Baseline* WRAC relacionado à ocorrência de corrosão no espessador de polpas, foi voltada para a possibilidade de ocorrência de ferimentos graves a pessoas por colapso e/ou instabilidade de estruturas, além de perda de produção, cujos reparos corretivos podem parar o equipamento por cerca de 5 dias, caso o evento indesejado ocorra. Essa reavaliação foi importante, pois pela primeira vez foi feito um estudo voltado para as condições estruturais das vigas metálicas de sustentação desse equipamento, o que nos dá maior confiabilidade para

classificar a probabilidade de ocorrência do evento. Como resultado desse estudo, percebe-se que, com a frequência de inspeção determinada pelo manual do espessador, o tempo de vida útil das vigas do pode ser prolongado por, pelo menos, 10 anos. Porém, é preciso que os responsáveis realizem inspeções de rotina de acordo com o novo controle crítico “Gestão de Integridade estrutural” inserido na análise de *Bowtie* e reportem periodicamente no sistema.

Dessa forma, vê-se a importância da aplicação de uma boa metodologia de gestão de riscos em áreas industriais, pois consiste em uma maneira eficaz de detectar e avaliar riscos em potencial, além de levar à criação de planos de ação abrangentes e estratégicos para cada área.

REFERÊNCIAS

19º ENEMET - **Encontro Nacional De Estudantes De Engenharia Metalúrgica, De Materiais E De Minas**, 2019, São Paulo- Sp. Estudo Comparativo Sobre A Taxa De Oxidação De Aços Estruturais No Litoral E No Interior Do Estado De São Paulo [...]. [S. L.: S. N.], 2019.

AA. TS.704.001. (Disponível na intranet da Anglo American), 2015.

AA. **Ordem de Serviço 2111-ES-01 – Espessador**. (Disponível na intranet da Anglo American), 2021.

AA. **PRO.BRA.GIR.004**. (Disponível na intranet da Anglo American), 2022.

AA. **DF-MO-2100-24-1001/0001 (Manual do Espessador)**. (Disponível na intranet da Anglo American), 2012.

A. DE , Ruijter. **The Bowtie method: A review**. Safety Science, The Netherlands, v. 88, p. 211-218, 2016.

AMÉRICO, Renato. Efeito da conformação mecânica na resistência a corrosão dos aços NBR7008 ZC/Z275 e Galvalume® ASTM A792 CSB/AZM150. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, metalúrgica e de materiais). Escola de Engenharia- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/148741>. Acesso em: 17 nov. 2022.

ANDRADE, D. M. ; OLIVEIRA, R. P. ; THOMAZI, C. C. . **Integridade Estrutural em Plantas Industriais**. Faculdade Evangélica Goianésia. Goianésia 2017 (Técnica).

ARAUJO, A., PANOSSIAN, Z. e LOURENÇO, Z. **Proteção catódica de estruturas de concreto**. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais* [online]. 2013, v. 6, n. 2 [Acessado 1 Fevereiro 2022] , pp. 178-193. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1983-41952013000200002>>. Epub 17 Abr 2013. ISSN 1983-4195. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952013000200002>.

ASSI, Marcos. **Gestão de riscos com controles internos**. 2. ed. São Paulo: Saint Paul, 2021. ISBN 978-65-86407-25-9.

ASSIS, Sérgio Luiz De. **Estudo Comparativo De Ensaio Acelerados Para Simulação Da Corrosão Atmosférica**. Orientador: Ora. Isolda Costa. 2000. 99 P. Dissertação (Mestrado Em Ciências Na Área De Reatores Nucleares De Potência E Tecnologia Do Combustível Nuclear) - Instituto De Pesquisas Energéticas E Nucleares, São Paulo, 2000.

ASTM A36/A36M-19, **Standard Specification for Carbon Structural Steel**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005.

ASTM G46-94 (2005), **Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005.

Baseline WRAC. **Integridade Estrutural**. (Disponível na intranet da Anglo American), 2022.

BERTOLDI, Evandro. **ANÁLISE DE ENSAIOS DE DUREZA BRINEL E ROCKWELL EM CORPO DE PROVA**. Horizontina – RS. 4ª Semana Internacional de Engenharia e Economia FAHOR, 2014.

BITTENCOURT, R. P.; COSTA, D. A.; MOREIRA, A. G.; SOUZA, M. A. M.; EDUARDO, C. L. C.. **Gerenciamento de riscos operacionais aplicado aos recursos hídricos**. Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, v.12, n.8, p.498-511, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.008.0041>

BNDES SETORIAL. Brasília: BNDES. **Minério de Ferro**. 2014. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/?locale=pt_BR. Acesso em: 15/01/2022

Bowtie XP. (Disponível na intranet da Anglo American), 2022.

CALLISTER, Jr. William D. **Ciência E Engenharia De Materiais: Uma Introdução**. 7. Ed. Rev. [S. L.]: Anthares, 1940. 705 p. ISBN 978-85-216-1595-8.

COSTA, I. **Comportamento eletroquímico de aços doce e aços de baixa liga em elevados potenciais de polarização**. In: 10o. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIENCIA DOS MATERIAIS, 6-10 de dezembro, 1992, Aguas de Lindoia, SP. 1992. p. 511-513. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/14454>. Acesso em: 27 jan. 2022.

CROUHY, M.; GALAI, D.; MARK, R. **Fundamentos da Gestão de Risco**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2008.

CURI, Adilson. **Minas a céu aberto: planejamento de lavra**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

DA LUZ, Adão Benvindo; LINS, Fernando Antonio Freitas. **Introdução Ao Tratamento De Minérios: Conceito De Tratamento De Minérios**. In: INTRODUÇÃO ao Tratamento de Minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: [s. n.], 2010. cap. 1, p. 3-20.

SOUZA, Samuel Cristiano de. **Análise da percepção comportamental das equipes de manutenção de integridade estrutural como ferramenta para evitar acidentes no trabalho: Um estudo de caso**. Orientador: Sergio Luiz Braga Franca, D. Sc. 2016. 1-96 p. Dissertação (Mestrado Profissional De Sistemas De Gestão) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2016.9.

FRAUCHES-SANTOS, Cristiane. **A Corrosão e os Agentes Anticorrosivos**. Revista Virtual de Química, Seropédica-RJ, Brasil, v. 6, n. 2, p. 293-309, 20 dez. 2013.

FONSECA, Eduardo da Silva; SILVA, Krishna Alcantara; SANTANA, Ana Isabela de Carvalho; PINTO, Wilma Clemente Lima. Estudo do comportamento do aço a-36 em meios contendo íons cloreto e íons sulfatos. **Revista Univap**, São José dos Campos, v. 26, n. 51, p. 181 – 190, 2020.

GALANTE, Erick Braga Ferrão. **Princípios de Gestão de Riscos**. 1. ed. Curitiba: Appris, 2015. 155 p. ISBN 978-85-8192-667-4.

GASPARONI, Amanda Gaddi. **Corrosão de estruturas metálicas em águas e sua proteção**. 1. ed. [S. l.]: RBF editora, 2020. 52 p. ISBN 978-65-5889-051-5.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2017. 1192 p. ISBN 978-85-216-1779-2.

KANASHIRO, Marta. **Controle do risco: uma tarefa infundável**. ComCiência, Campinas, n. 104, 2008. Available from <http://comciencia.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1519-76542008000700003&lng=en&nrm=iso>. access on 29 Nov. 2021.

KOCH, G. H. **International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study**. Dublin: NACE International, 2016. Disponível em: . Acesso em: 01 set. 2021.

LARA, Ana Flávia Morais de. **Espessamento E Transporte De Pasta Mineral**. Orientador: George Eduardo Sales Valadão. 2011. 76 P. Dissertação (Curso De Especialização Em Engenharia De Recursos Minerais) - Universidade Federal De Minas Gerais, [S. L.], 2011.

LEME, Henrique Froufe Paes. **Gestão De Risco No Processo De Produção: Estudo De Caso Em Uma Editora Produtora De Material Didático**. Orientador: José Kimio Ando. 2017. 52 P. Trabalho De Conclusão De Curso (Graduação Em Engenharia De Produção) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/handle/1/4862>. Acesso em: 28 dez. 2021.

LEINFELDER, Robson Rodrigues. **Análise de riscos para redução dos riscos de segurança em uma pedreira paulista**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. doi:10.11606/D.3.2016.tde-07122016-102503. Acesso em: 2022-10-03.

LUZ, Gelson. **Aço ASTM A36 Propriedades Mecânicas e Composição Química**. Blog Materiais, [s. l], 2017. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/astm-a36-propriedades-mecanicas-e-composicao-quimica.html>. Acesso em: 25 de janeiro de 2022.

MACHADO, Damerson Marcon; SILVEIRA, Ingrid Machado. **Gerenciamento De Riscos Em Projetos: Um Estudo De Caso Em Uma Mineradora**. A Interface Essencial da Engenharia de Produção no Mundo Corporativo 4, Ponta Grossa– Paraná, v. 4, p. 1-14, 2019.

MAIA, André Luiz Marinho. **Análise Preliminar De Riscos Em Uma Obra De Construção Civil**. 2014. 14 p. Dissertação (Mestrado Em Engenharia Sanitária E Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Revista Tecnologia & Informação, 2014.

MENDONÇA, Fauzi. **Compreenda o que é corrosão e quais são os impactos dela na manutenção**. [S. l.], 3 jul. 2021. Disponível em: <https://www.revistamanutencao.com.br/o-que-e-corrosao-e-seus-impactos.html>. Acesso em: 13 jan. 2022.

NAVARRO, R.F. **A Evolução dos Materiais. Partel: da Pré-história ao Início da Era Moderna.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos, [S. l.], v. 1, 1 nov. 2006. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.1, 1 (2006) 01-11.

NOVAK, S. A Fracture Mechanics Study on Resistance of ASTM A36, A572, and A517 Grade F Structural Steels to Stress-Corrosion Crack Growth in Salt Water. **Fracture Mechanics: Fourteenth Symposium.** Monroeville, Pa., US. v. 2. P. 415-444, Ago. 2020. DOI: 10.1520/STP791B1983025. Disponível em: <https://www.astm.org/stp791b1983025.html>

OLIVEIRA, Antônio Roberto de. **Corrosão e tratamento de superfície.** Belém : IFPA ; Santa Maria : UFSM, 2012. 104p.

OLIVEIRA, L.M., LUZ, J. A. M., LACERDA, C. M. M. **Apostila de espessamento e filtragem** Ouro Preto: Departamento de Engenharia de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto. 2004. p. 16-46.

ORNELAS, B. F; FERREIRA, F. A; SOUZA, M. A; FREITAS, E. F. **Uso de tecnologia no gerenciamento de riscos operacionais para aumentar o nível de segurança psicológica dos empregados na indústria de mineração.** In: Abrisco, 2019, Rio de Janeiro.

PASTOUKHOV, Viktor A. **Introdução à mecânica da integridade estrutural.** São Paulo: UNESP, 1995. 194 p. ISBN 85-7139-080-0.

PEDOTE, Cristiane. **Análise e Gerenciamento de Risco: Gestão do Risco Operacional em Instituições Financeiras.** São Paulo: EAESP/FGV, 2002. 68 p. (Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação da EAESP/FGV, Área de Concentração: Finanças).

PEREIRA , Suzana de Ávila Cortes. **O Mercado de Minério de Ferro.** Orientador: Prof. Paulo Roberto de Magalhães Viana. 2012. 37 p. Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais) - Universidade Federal de Minas Gerais, [S. l.], 2012.

Relatório de Microscopia Eletrônica de Varredura CIT SENAI (2022)

Relatório de Micrografia CIT SENAI (2022)

ROVAI, Ricardo Leonaldo. **Modelo estruturado para gestão de riscos em projetos:** estudo de múltiplos casos. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Escola Politécnica,

University of São Paulo, São Paulo, 2005. doi:10.11606/T.3.2005.tde-01092006-180244.

Acesso em: 2021-11-29.

SCHMIEGELOW, João. **O Planeta azul: Uma introdução às ciências marinhas**. Rio de Janeiro. Interciência, 2004.

SCHNEIDER, ALINE LESSA DA SILVA. **A Importância Do Gerenciamento De Risco Em Projetos**. Orientador: Francisco Marcelo Marques Lima. 2014. 15 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós graduação em gestão empreendedora em projetos) - Centro universitário de Brasília, Brasília, 2014.

SILVA FILHO, L. F.; SILVA, G. P.; SANTOS, C. C.. **Estudo de caso: O efeito da corrosão em estruturas de concreto armado sob a ação da maresia na praia de Tibau/RN**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido.

SILVA, Yuri. **Corrosão causou acidente em terminal de Madre de Deus**. In: Portal A tarde. [S. l.], 15 jan. 2018. Disponível em: <<https://atarde.com.br/bahia/corrosao-causou-acidente-em-terminal-de-madre-de-deus-929799>>. Acesso em: 14 jan. 2022.

SOUSA, GALILEU GENESIS P. **Análise Preliminar de Riscos Ambientais para Atividades Relacionadas a Perfuração de um Poço de Petróleo Terrestre**. Revista Monografias Ambientais - REMOA: Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas - UFSM, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 3265-3277, 16 mar. 2014. DOI 10.5902/2236130813051. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/remoa/article/view/13051/pdf>. Acesso em: 20 dez. 2021.

SOUSA, Patrícia Andrade. **Espessamento de Polpas**. Orientador: Prof. George Eduardo Sales Valadão. 2012. 59 p. Monografia (Engenharia de Minas) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, [S. l.], 2012.

TRAPP, Adriana C. G.; CORRAR, Luiz J. **Avaliação e gerenciamento do risco operacional no Brasil: análise de caso de uma instituição financeira de grande porte**. Revista Contabilidade & Finanças [online]. 2005, v. 16, n. 37 [Acessado 30 novembro 2021], pp. 24-36. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1519-70772005000100002>>. Epub 09 Jun 2011. ISSN 1808-057X. <https://doi.org/10.1590/S1519-70772005000100002>.

VALE, Júlia Maria de Carvalho. **Estratégias de Controle no Processamento de Minério de Ferro**. Orientador: Sônia Denise Ferreira Rocha. 2014. 45 f. Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2014.

VIKAS, K. Sri Ram, RAHUL, REDDY, Ch. Kishore, RAMANA, V.S.N. Venkata, MORAMPUDI, Priyadarsini, PRASAD, Ch. **Effect of Grade 5 titanium interlayer on microstructure and pitting corrosion behaviour of AA1100/A36 explosion welds**. Materials Today: Proceedings, Volume 59, Part 3, 2022, p. 1659-1665, ISSN 2214-7853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.330>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322016674>.

VII CIMATECH, 2020, São José dos Campos - SP. **Análise De Acidentes Aéreos Brasileiros Motivados Por Corrosão No Período De 2015 A 2020** [...]. [S. l.: s. n.], 2020. v. 1. DOI 10.37619/issn2447-5378.v7i1.327.27-39. Disponível em: <https://publicacao.cimatech.com.br/index.php/cimatech/article/view/327>. Acesso em: 29 dez. 2021.

WEBER, Elson Luciano; DIEHL, Carlos Alberto. **Gestão De Riscos Operacionais: Um Estudo Bibliográfico Sobre Ferramentas De Auxílio**. Revista de Contabilidade do Mestrado em Ciências Contábeis da UERJ, Rio de Janeiro, v. 19, ed. 3, p. 41-58, 31 dez. 2014.

WOLFF, Ana Paula. **Caracterização De Rejeitos De Minério De Ferro De Minas Da Vale**. Orientador: Prof.Dr. Geraldo Magela da Costa. 2009. 90 f. Dissertação (Pós graduação em Engenharia mineral) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO, OURO PRETO, 2009.

XXI CONEMI, 2021, Belo Horizonte- MG. **AÇO ESTRUTURAL E CORROSÃO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA** [...]. [S. l.: s. n.], 2021.

XXVISIMPEP, 2019, Bauru- SP. **Gestão De Risco De Incêndio E Explosão Em Depósitos De Munição: Uma Abordagem Pela Análise Bow-Tie** [...]. [S. l.: s. n.], 2019. 15 p. Tema: Ergonomia e Segurança do Trabalho.