

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas –
Mestrado Profissional

Dissertação de Mestrado Profissional

AVALIAÇÃO DOS MECANISMOS DA CORROSÃO INTERNA NO
MINERODUTO DO PROJETO
MINAS RIO E DE FORMAS DE SUA MENSURAÇÃO

Autora: Lorena Miranda Santos Hudson

Orientador: Dr. Professor Paulo Roberto Gomes Brandão

Coorientadora: Dra. Professora Vanessa de Freitas Cunha Lins

Junho de 2023

Lorena Miranda Santos Hudson

**AVALIAÇÃO DOS MECANISMOS DA CORROSÃO INTERNA NO
MINERODUTO DO PROJETO
MINAS RIO E DE FORMAS DE SUA MENSURAÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, Mestrado Profissional, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Orientador: Dr. Professor Paulo Roberto Gomes Brandão

Coorientadora: Dra. Professora Vanessa de Freitas Cunha Lins

Belo Horizonte

2023

Hudson, Lorena Miranda Santos.

H885a Avaliação dos mecanismos da corrosão interna no mineroduto do Projeto Minas Rio e de formas de sua mensuração [recurso eletrônico] / Lorena Miranda Santos Hudson. – 2023.

1 recurso online (80 f.: il., color.): pdf.

Orientador: Paulo Roberto Gomes Brandão.
Coorientadora: Vanessa de Freitas Cunha Lins.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 6-24.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses. 3. Ferro - Teses. 4. Aço - Teses. 5. Corrosão - Teses. 6. Mineração - Teses. 7. Minerodutos - Teses. 8. Análise metalúrgica - Teses. 9. Instrumentação - Teses. I. Brandão, Paulo Roberto Gomes. II. Lins, Vanessa de Freitas Cunha. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 622(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica,
Materiais e de Minas da UFMG - Mestrado Profissional

UFMG

***AValiação DOS MECANISMOS DA CORROSÃO INTERNA
NO MINERODUTO DO PROJETO MINAS RIO E DE
FORMAS DE SUA MENSURAÇÃO***

LORENA MIRANDA SANTOS HUDSON

Dissertação de mestrado submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Aprovada em 22 de junho de 2023.

Por:

Prof. Dr. Paulo Roberto Gomes Brandão (UFMG)
Orientador

Prof. Dr. Raul Zanoni Lopes Cancado (UFMG)

Prof.ª Dr.ª Vanessa de Freitas Cunha Lins (UFMG)

Prof.ª Dr.ª Rosa Maria Rabelo Junqueira (UFMG)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me concedido saúde e discernimento para realização dessa pesquisa.

Aos meus pais, Solange e César, por serem sempre exemplos de força e perseverança.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Roberto G. Brandão, pelo incentivo, dedicação, ensinamentos e contribuição imensurável ao meu conhecimento.

À minha coorientadora, Profa. Dra. Vanessa de Freitas Cunha Lins, que com muita sabedoria me guiou nas técnicas mais apropriadas para este trabalho.

Meu muito obrigada à profa. Dra. Rosa Maria Rabelo Junqueira pelas valiosas contribuições à dissertação.

À Empresa Anglo American Minério de Ferro Brasil pela oportunidade por viabilizarem, apoio, confiança e fomento no desenvolvimento de seus colaboradores.

Meu muito obrigada a todos que de alguma forma contribuíram para realização desse estudo.

Agradeço a todos os professores e colaboradores envolvidos no Curso de Mestrado Profissional dos Departamentos de Engenharia de Minas (DEMIN-UFMG) e de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET-UFMG).

É muito grande a minha gratidão a vocês!

RESUMO

Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração, a atividade de extração de minério é um dos setores básicos da economia brasileira e atrai muitos investimentos, tendo capacidade para fornecer produtos para diversos tipos de indústria como siderúrgicas, petroquímicas e metalúrgicas. Em função do potencial dessa atividade, é importante que se tenha uma preocupação com um meio de transporte desse produto, os chamados minerodutos, que são utilizados muitas vezes para transportar minério de ferro. Nesse contexto, a corrosão desempenha um papel crucial em relação à vida útil do duto, podendo comprometer a integridade mecânica do sistema com a possível perda de espessura da parede do sistema e formação de trincas. Para monitorar o avanço do processo de corrosão no mineroduto e considerando que atualmente não há métodos integralmente fundamentados, para quantificação da taxa de corrosão foram realizados testes eletroquímicos com polpa e água de processos e análises dos cupons instalados em campo. O produto de corrosão encontrado nas superfícies dos cupons e o material coletado pela passagem do PIG de limpeza foram caracterizados usando-se análises químicas, granulométricas e difração de raios-X (DRX). Verificou-se que alguns cupons apresentaram corrosão intensa na superfície VERSO, o que não era esperado, sendo os resultados inconsistentes. Notou-se a antecipação da quebra da camada passiva dos aços imersos nas águas sobrenadantes das polpas coletadas em alguns pontos. Essa antecipação está relacionada com a maior susceptibilidade à corrosão localizada. Foram identificados alguns produtos de corrosão comuns do aço carbono, como hematita, goethita e magnetita e suas respectivas variações.

Palavra-chave: Mineroduto, corrosão, métodos de instrumentação, análises.

ABSTRACT

According to the Brazilian Institute of Mining, the activity of ore extraction is one of the basic sectors of the Brazilian economy and attracts a lot of investment. Mining has the capacity to supply products to various types of industries such as steel, petrochemicals, and metallurgy. Due to the role that mining plays in the economy, it is important to worry about the forms of transport for these products. One of the important forms of transport used for mining products is the pipeline, which in many cases is used to transport iron ore. In this context, the life span of the pipeline is influenced by corrosion, which can compromise the mechanical integrity of the system with a possible loss of wall thickness and formation of cracks. To monitor the advancement of the corrosion process in the pipeline and considering that there are no methods which are completely fundamental, to quantify the corrosion rate electrochemical tests were conducted with pulp and process water and analysis of coupons installed along field. The product of corrosion found on the surface of the coupons and the material collected during the passage of the cleaning PIG was characterized using chemical analysis, granulometric analysis and X-Ray Diffraction (XRD). It was verified that some coupons had intensive corrosion on the surface verses, what was not expected, the results being inconsistent. It was noticed the anticipation of the breakdown of the passive layer of the steels immersed in the supernatant waters of the pulps collected in some points. This anticipation is related to the greater susceptibility to localized corrosion. Some common corrosion products of carbon steel were identified, such as hematite, goethite, magnetite and their respective variations.

Keyword: Slurry pipeline, corrosion, instrumentation methods, analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Trajeto do mineroduto Minas-Rio (Google Mapas,2022).....	22
Figura 2.2 – Corrosão uniforme em chapa de aço carbono (GENTIL, 2007).	24
Figura 2.3 – (A) Corrosão devido à célula de aeração diferencial, sob um depósito (B). Corrosão em uma célula de aeração diferencial induzida (Herro e Port,1993).	26
Figura 2.4 – Parte interna de um trecho de tubulação, evidenciando a deterioração por erosão (GENTIL, 2007).	27
Figura 2.5 – Diagrama de Pourbaix para o ferro a 25°C (MCCAFFERTY,2010) - modificado	32
Figura 3.6 – Alíquota de polpa para análises laboratoriais.	40
Figura 3.7 – Segmento tubo.	41
Figura 3.8 – Eletrodo de trabalho pronto para o ensaio.	42
Figura 3.9 – Célula de ensaio descrita na norma ASTM G5 (2014)	43
Figura 3.10 – Representação do local de instalação do cupom de massa.	44
Figura 3.11 – Tanques de homogeneização localizados em EB1	45
Figura 3.12 – Cupom de campo - Frente (face voltada para o interior do duto) e Verso (face rente a parede do duto).....	45
Figura 3.13 – Área existente sob o suporte de fixação do cupom de perda de massa. ...	47
Figura 3.14 – PIG de limpeza.	48
Figura 4.15 – Valores dos potenciais de circuito aberto (PCA) medidos em função do tempo.	52
Figura 4.16 – Curvas de polarização potenciodinâmicas anódicas	53

Figura 4.17 – Taxa de corrosão calculadas a partir dos valores de Rp medidos nas amostras de água e sobrenadante da polpa	55
Figura 4.18 – Condição da superfície frente do cupom instalado no final do mineroduto Jr (A: Imagem de lupa. B: Imagem e perfil por microscopia confocal).	58
Figura 4.19 – Avaliação por microscopia confocal da frente do cupom início do mineroduto Jr.	59
Figura 4.20 – Avaliação por microscopia confocal da frente do cupom Sucção EB1....	60
Figura 4.21 – Avaliação por microscopia confocal da frente do cupom Descarga EB1.	61
Figura 4.22 – Avaliação por microscopia confocal da frente do cupom Sucção EB2....	62
Figura 4.23 – Avaliação por microscopia confocal da frente do cupom Descarga EB2.	63
Figura 4.24 – Avaliação por microscopia confocal da frente do cupom ET Saída.	64
Figura 4.25 - Avaliação por microscopia confocal da frente do cupom ET Chegada. ...	65
Figura 4.26 – Profundidade máxima de ataque localizado na superfície de frente dos cupons instalados no mineroduto apresentaram este tipo de ataque.....	66
Figura 4.27 – Difratoograma de raios X retirado do cupom de campo instalado no início do mineroduto Jr.	67
Figura 4.28 – Difratoograma de raios X retirado do cupom de campo instalado no final do mineroduto Jr.	67
Figura 4.29 – Difratoograma de raios X retirado do cupom de campo instalado EB1 Sucção.....	68
Figura 4.30 – Difratoograma de raios X retirado do cupom de campo instalado EB1 Descarga.....	68
Figura 4.31 – Difratoograma de raios X retirado do cupom de campo instalado EB2 Descarga.....	69

Figura 4.32 – Difratoograma de raios X retirado do cupom de campo instalado EV Entrada.	69
Figura 4.33 – Difratoograma de raios X retirado do cupom de campo instalado ET saída.	70
Figura 4.34 – Valores de taxa de corrosão.....	74
Figura 4.35 – Espectro de EDS do resíduo sólido coletado na passagem do PIG.....	77
Figura 4.36 – Resultados qualitativos (%) da análise de EDS.....	77
Figura 4.37 – Difratoograma de raio X do material coletado pela passagem do PIG de limpeza (resíduos sólidos).	78

LISTA DE TABELAS

Tabela I – Análise química das diferentes qualidades de água (MATTIOLI,2016).....	29
Tabela II – Pontos de amostras e natureza dos fluidos analisados.	40
Tabela III – valores de condutividade, pH e temperatura medidos no laboratório externo no dia do recebimento nas amostras.	49
Tabela IV – Resultados das análises químicas. Valores em mg/L (resultados expressos em média ± incerteza).....	50
Tabela V – Densidade de corrente de corrosão e taxa de corrosão calculadas a partir dos valores de Rp medidos nas amostras de água e sobrenadante da polpa.	54
Tabela VI – Aspecto visual dos cupons instalados no mineroduto	56
Tabela VII – Resultados da análise de difração de raios X das amostras retiradas da superfície dos cupons de corrosão.	70
Tabela VIII – Características dos cupons instalados no mineroduto e valores de taxa de corrosão determinados por perda de massa.	73
Tabela IX – Resultado da análise química global.....	75
Tabela X – % passante nas respectivas malhas do material coletado pela passagem do PIG.	76
Tabela XI – % passante nas respectivas malhas do material bombeado.	76
Tabela XII – Resultados da análise de difração de raios X dos resíduos secos da amostra do material coletado pela passagem do PIG de limpeza.....	78

LISTA DE NOTAÇÕES

Carbonato de cálcio (CaCO_3)

Calcita (CaCO_3)

Magnetita (Fe_3O_4)

Goethita ($\alpha \text{FeO}(\text{OH})$)

Maghemita ($\gamma \text{Fe}_2\text{O}_3$)

Akaganeíta ($\beta \text{FeO}(\text{OH})$)

Quartzo (SiO_2)

Caulinita 1A ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)

Hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)

Difratometria de raios X (DRX)

PIG (Pipeline Inspection Gauge)

Potencial do circuito aberto (PCA)

Estação de bombas 1 (EB1)

Estação de bombas 2 (EB2)

LETRAS GREGAS

Coeficientes anódicos (β_a)

Coeficientes catódicos (β_c)

Diferença de fase (Φ)

Sobretensão (η)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1	Relevância do tema.....	18
1.2	Objetivos.....	19
1.2.1	Objetivo geral	19
1.2.2	Objetivos específicos	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1	Processo de bombeamento de polpa na Anglo American minério de ferro... 21	
2.2	Fundamentos de corrosão	22
2.2.1	Corrosão uniforme	24
2.2.2	Corrosão localizada.....	24
2.2.3	Corrosão sob depósito ou corrosão por aeração diferencial	25
2.2.4	Corrosão -Erosão	26
2.3	Parâmetros que afetam a cinética do processo corrosivo	28
2.4	Controle do processo corrosivo	30
2.4.1	Efeito do pH.....	31
2.5	Técnicas para avaliar a corrosão	33
2.5.1	Polarização anódica e catódica	35
2.5.2	Resistência à polarização linear (RPL).....	36
2.6	Análise Granulométrica	38
2.6.1	Peneiramento	38
2.7	Princípios básicos da microscopia confocal	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
3.1	Análises físico-químicas	40
3.2	Aplicação de técnicas de predição da corrosão	41
3.2.1	Ensaio eletroquímico	41

3.2.2	Ensaio gravimétrico (ou de perda de massa) e análise da morfologia de corrosão de cupons de perda de massa.....	44
3.2.2.1	Análise de difração de raios X dos produtos de corrosão.....	46
3.3	Caracterização mineralógica.....	48
3.3.1	Análise granulométrica por peneiramento.....	48
3.3.2	Análise de difração de raios X (DRX) dos resíduos sólidos.....	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1	Avaliação físico-química	49
4.2	Ensaio eletroquímico	51
4.3	Cupons de perda de massa	55
4.3.1	Avaliação visual e por microscopia	55
4.3.2	Avaliação da análise de difração de raios X dos produtos de corrosão	66
4.3.3	Determinação da taxa de corrosão generalizada.....	73
4.4	Análises do material coletado pela passagem do PIG de limpeza.....	74
4.4.1	Análise química global	75
4.4.2	Análise granulométrica	76
4.4.3	Caracterização mineralógica dos resíduos sólidos.....	76
5	CONCLUSÕES	80
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	82
7	REFERÊNCIAS	83

1. INTRODUÇÃO

Dutos são soluções de engenharia formados pela união de tubos por longos comprimentos, que servem ao transporte de fluidos e eventualmente particulados, mantendo-os contidos contra qualquer perda ou contaminação indesejada. Assim, aproveita-se a energia disponível em uma extremidade para assegurar uma vazão com a menor perda de energia possível, algumas vezes por imensas distâncias e com características de baixo custo, construção fácil e boa eficiência. Os minerodutos fazem parte de um grupo especial de dutos empregados na indústria extrativista, em que sólidos minerais são conduzidos em suspensão em um líquido que funciona como veículo de transporte. Este líquido normalmente é a água. O sólido granulado pode ser constituído também pelos mais diversos materiais: carvão, minério de ferro, minério de cobre, concentrados de cobre, ferro ou fosfato, calcário, rejeitos de beneficiamento, lascas de madeira, bagaço de cana, etc, como afirmam Luz et al. (2010).

Segundo Nascimento (2010), a utilização de dutos para o escoamento de minérios tem crescido nos países produtores desse tipo de insumo, como é o caso do Brasil. Para Santos (2001), o baixo custo e a segurança operacional proporcionada no transporte desse fluido são os principais fatores responsáveis por esse crescimento. No entanto, a eficiência econômica desse tipo de solução é fortemente condicionada pelos custos de implementação, de operação e de gerenciamento de integridade, que devem ser minimizados por meio de técnicas de engenharia e da adequada tomada de decisões.

A certeza de que um duto esteja operando com alto grau de segurança e confiabilidade envolve vários aspectos e informações das áreas de projetos, inspeção e manutenção. Para Souza (2003), o gerenciamento da integridade tem um encargo relevante no sentido de sistematizar as informações disponíveis nessas áreas, identificar ameaças, implementar medidas profiláticas e planos de reação, observando os vários mecanismos e modos de falha, inclusive os relacionados à corrosão.

A inspeção e a manutenção dos minerodutos são tarefas operacionais dentro do processo

de integridade da instalação, que estão relacionados, inicialmente, à avaliação qualitativa e quantitativa de agressores e seus efeitos como, por exemplo, a corrosão externa. Este fenômeno está relacionado ao contato com o solo. Para Rodrigues et al. (2008), a corrosão na interface entre solo e ar e a corrosão interna são alguns dos responsáveis pelo processo de erosão e ataque químico do fluido.

A operação sob ambiente corrosivo é nociva para a integridade da estrutura de dutos, portanto, a adoção de proteção anticorrosiva ou de práticas que retardam a taxa de corrosão é fator importante a ser considerado e estudado até mesmo para evitar danos fatais. Gentil (2007) relata graves problemas industriais ocasionados pela corrosão em dutos. Um exemplo foi o grave acidente ocorrido em Guadalajara (México) na década de 90. A tubulação que transportava gasolina foi corroída por correntes de fuga causando perfurações ao longo do gasoduto e conseqüentemente permitindo que o fluido vazasse para o solo e atingisse a tubulação de esgoto. Ocorreram várias explosões na tubulação de esgoto contaminado com gasolina que deixou centenas de vítimas fatais.

É notório que a corrosão é indesejada por razões econômicas e técnicas, que são as diversas faces da perda de integridade que este processo pode representar. Diversos acidentes advêm de falhas estruturais que decorrem de perda de espessura, formação de pites e crescimento de trincas, em processos ligados diretamente à corrosão. Portanto, é de extrema importância evitar ou retardar o início de tal fenômeno.

Em 2015, um estudo realizado pela empresa norte americana, CCTechnologies, mostrou que o Brasil perde entre 1% a 5% do PIB anual com prejuízos causados pelo fenômeno corrosivo. Esse valor corresponde aproximadamente R\$236 bilhões. Essas informações foram reportadas em *Grandes Construções: Aço na Construção* (2017). Alguns autores, como Brusamarello et al. (2002), mostram que países industrializados como os EUA sofrem prejuízos aproximados de 300 bilhões de dólares anuais.

Devido à grande extensão de tubulações destinadas ao transporte de minérios e às limitações de técnicas de inspeção, há dificuldade em identificar os locais onde a corrosão interna determina a ocorrência de frequentes falhas não previstas. Assim, torna-se

necessário, segundo *Grandes Construções: Aço na Construção (2017)*, estudos para quantificar a taxa de corrosão interna em dutos, inferir as locações mais susceptíveis e determinar a necessidade de medidas preventivas ou corretivas adicionais. De fato, as técnicas de avaliação quantitativa da corrosão permitem a identificação de fatores contribuintes e, a partir do reconhecimento dos pontos da instalação onde eles estão agravados, é estabelecido o direcionamento adequado dos esforços de inspeção, mitigação da corrosão e manutenção corretiva.

Desde que os processos de corrosão decorrem de uma interação complexa de fenômenos físicos, químicos e eletroquímicos, a capacidade de previsão a partir de métodos puramente analíticos ou numéricos são inerentemente limitadas, por isso a experimentação se mostra indispensável no trabalho do pesquisador mobilizado para explicar e quantificar esses mecanismos de degradação. Bons experimentos em corrosão são resultado de um planejamento cuidadoso, no sentido de identificar isoladamente os mecanismos contribuintes (iniciadores, agravadores, catalisadores, etc) e os mecanismos mitigadores (bloqueadores, redutores, competidores, etc) e determinar, para todos eles, as forças relativas, suas dependências e interações.

Nesse sentido, o início da pesquisa documentada até agora visou examinar os fundamentos teóricos do processo corrosivo de minerodutos, e dos métodos de estimativa que são convencionais, construir hipóteses a serem confirmadas ou desconstruídas pelos testes, ponderando entre as recomendações de projeto de experimento que demandam que a amostragem seja aumentada e as limitações de tempo e investimento que empurram amostragem na direção contrária, foi proposto um conjunto de ensaios e análises que são viáveis e suficientes ao entendimento dos fenômenos envolvidos na corrosão interna de minerodutos.

1.1 Relevância do tema

A ocorrência da corrosão é um processo inevitável, porém, é importante a mitigação e monitoramento desse fenômeno para evitar perdas indiretas e diretas, seja pela substituição e/ou necessidade maior de manutenção nos equipamentos. No caso do

mineroduto, a corrosão pode gerar graves problemas, como obstrução da parede interna do duto, comprometimento de sua vida útil e danificar a integridade mecânica a ponto de correr o risco de parar a produção, já que o processo corrosivo pode ocasionar trincas e até perfurar o duto.

Nesse contexto é de grande valia destacar também os inúmeros desastres ambientais ocasionados pelo processo de corrosão, como foi o incidente ocorrido na Baía de Guanabara. Em janeiro do ano 2000, um oleoduto procedente da Refinaria de Duque de Caxias se rompeu, devido à corrosão, gerando um vazamento de 1300 m³ de produto naquela região. E como as principais consequências estão a contaminação de manguezais e marés e mortes de inúmeras aves aquáticas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa visa a compreensão dos processos corrosivos e dos fatores contribuintes à sua agressividade, no contexto das especificidades do mineroduto do projeto Minas-Rio, usando-se técnicas de sua mensuração dentro de um programa interno que abrange o gerenciamento de questões relacionadas à integridade do mineroduto e aos riscos ambientais.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos dessa pesquisa são:

- Identificar a taxa de corrosão interna de um mineroduto mediante as técnicas eletroquímicas e ensaios gravimétricos.
- Para identificação do tipo de corrosão ao longo do mineroduto, realizar análises morfológicas e de fases nas superfícies dos cupons de perda de massa usando-se microscópio confocal e difratômetro de raios X.

- Caracterizar o material coletado pela passagem do PIG de limpeza por análises químicas, granulométricas e por DRX.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O levantamento do estado da arte é parte relevante da pesquisa e foi cumprida dentro dos tópicos descritos nas próximas seções.

2.1 Processo de bombeamento de polpa na Anglo American minério de ferro

No Brasil, o mineroduto Minas-Rio é um empreendimento de exportação de minério de ferro totalmente integrado, abrangendo mina, usina de beneficiamento, mineroduto e terminal dedicado no Porto de Açu (RJ). O transporte desse minério é feito através desse duto que atravessa os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro.

A extração e o beneficiamento acontecem em Conceição do Mato Dentro e Alvorada de Minas (MG). Do interior mineiro até o Porto do Açu, o minério de ferro é transportado por um mineroduto de 529 km que passa por 33 municípios até chegar a São João da Barra (RJ). Pelo terminal do Porto de Açu, no qual a Anglo American possui 50% de participação, o minério de ferro do Minas-Rio passa pelo processo de filtragem e segue para o mercado mundial.

O processo de lavra e beneficiamento se inicia na extração do minério de ferro nas rochas e posteriormente é encaminhado para a planta de beneficiamento, onde seu tamanho é reduzido, classificado e concentrado de acordo com as demandas dos clientes externos. E através do mineroduto, a polpa é transportada até chegar no Porto do Açu. A **Figura 2.1** mostra o trajeto do mineroduto Minas-Rio:

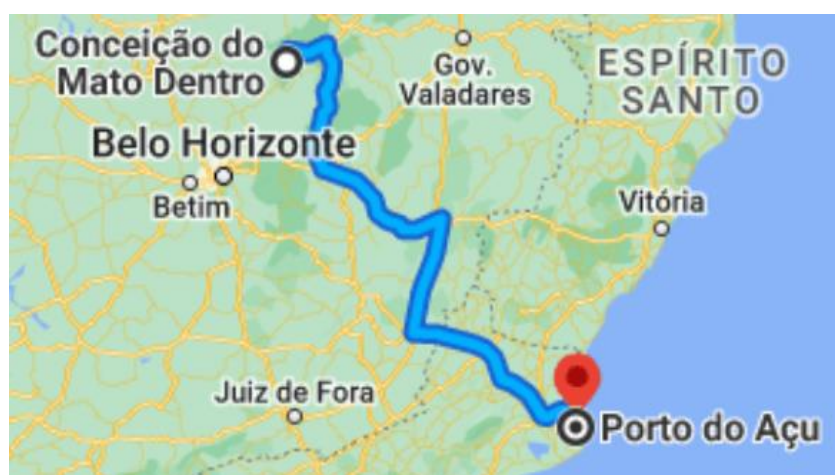


Figura 2.1 - Trajeto do mineroduto Minas-Rio (Google Mapas,2022).

2.2 Fundamentos de corrosão

O fluido que circula no mineroduto, segundo Macintyre (1997), denomina-se polpa ou lama. É uma mistura homogênea com aproximadamente 55% a 65% de pó na água do minério finamente pulverizado.

Os problemas relacionados a corrosão são mais frequentes do que se imagina, pois ela está presente em diferentes ambientes e tipos de atividades industriais. E inúmeras vezes, a corrosão pode estar relacionada com a questão de segurança, como falhas inesperadas e bruscas em equipamentos em operação, afirma o IPT (2018).

Segundo a ASME B 31.4 (2012), quando os dutos estão em operação, deve-se ter alguns cuidados para controlar o processo corrosivo. Alguns desses cuidados e recomendações direcionadas para as instituições responsáveis por esse tipo de atividade são:

- Existência de um programa de controle de corrosão interna que inclua: reparos no duto, realização de inspeções, análise do fluido que é transportado pelo duto com intuito de determinar os tipos e as concentrações de agentes corrosivos.
- Manter um histórico da condição interna do duto como vazamentos, danos na parede interna, além dos reparos provocados pela corrosão.

- Quando for verificada a presença de corrosão interna que possa afetar a segurança das pessoas, recomenda-se a aplicação de tratamento químico de maneira que proteja as partes afetadas do duto e remoção dos agentes corrosivos.

Para Ferreira et al. (2000), um dos efeitos do processo corrosivo é a redução da espessura das paredes de equipamentos e de dutos. Pode ocorrer, ainda, o aparecimento de ataque localizado, e a formação de grande quantidade de resíduo sólido no interior dos dutos.

A corrosão pode ser definida, segundo Gentil (2007), como um processo destrutivo, presente na maioria das vezes em materiais metálicos, que é ocasionado por uma reação química ou eletroquímica, e pode estar ou não aliada a esforços mecânicos. De acordo com Jones (2001), a corrosão é um processo inverso da metalurgia extrativa, em que o material tende a retornar à sua forma primitiva à medida que sofre oxidação oriundo do processo de corrosão.

Existem alguns modos de inspecionar a localização da corrosão, seja na parede externa do duto ou na parede interna. A corrosão externa, segundo Rodrigues et al. (2008), advém de danos relacionados à agressividade do solo. Já a corrosão interna é desencadeada pelo escoamento do fluido transportado.

O processo corrosivo pode ser classificado quanto ao meio e quanto a sua morfologia. Quanto ao mecanismo, considera-se corrosão química, eletroquímica e eletrolítica, afirma Gomes (2005). Para Xavier (2017), a primeira acontece com a ausência do eletrólito, não há transferência de elétrons de uma região para outra e o contato entre o material e o reagente corrosivo é de forma direta. Já nos dutos, ocorre a corrosão eletroquímica, onde existe a passagem de elétrons de uma área para outra na presença de uma solução. Há reações anódicas (oxidação) e catódicas (redução) ao mesmo tempo é considerado por Gentil (2007) um processo espontâneo. Gentil (2007) também define a corrosão eletrolítica ou corrosão por eletrólise quando a corrente elétrica de interferência (ou corrente de fuga) abandona seu circuito normal para fluir pelo solo ou pela água. Em relação ao tipo e a morfologia, os tipos de corrosão que são relevantes à operação de

minerodutos são: Corrosão uniforme, corrosão localizada corrosão-erosão, corrosão sob depósito e corrosão microbiológica.

2.2.1 Corrosão uniforme

A corrosão uniforme é o tipo muito comum de corrosão e ocorre de maneira homogênea em toda a superfície metálica, o que provoca redução de espessura da parede do duto, quando este está em operação. De acordo com Gentil (2007), um dos efeitos desse fenômeno é que a resistência do material diminui e sua vida útil também, aumentando o risco de falhas. A **Figura 2.2** exemplifica um duto de corrosão uniforme:

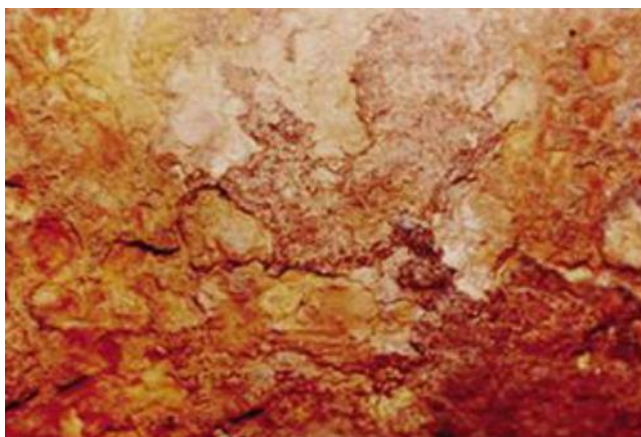


Figura 2.2 - Corrosão uniforme em chapa de aço carbono (GENTIL, 2007).

2.2.2 Corrosão localizada

A NACE (1984) descreve a corrosão localizada quando ocorre um ataque concentrado em determinadas partes do material. Esse fenômeno ocorre em condições em que a maior parte da superfície não está atacada. Segundo Gentil (2007), a forma mais comum da corrosão localizada é a corrosão por pite.

Para Gentil (2007), a corrosão por pite tem como característica cavidades com fundo com formato anguloso e profundidade normalmente maior que o seu diâmetro. Esse fenômeno é responsável por diversas falhas operacionais e muitas vezes são falhas inesperadas. Nesse contexto, de acordo com Frankel et al., (2021), é comum ocorrer a ruptura do filme

de passivação na superfície do material metálico em que o meio de contato é considerado agressivo, poderá ocorrer a rápida dissolução do material subjacente, levando a formação de pites naquele local.

2.2.3 Corrosão sob depósito ou corrosão por aeração diferencial

Uma das formas que a corrosão também pode se manifestar é a chamada corrosão sob depósito. Segundo Herro e Port (1993), a formação de depósitos cria um ambiente propício para ocorrência da corrosão de maneira indireta e/ou direta que poderá potencializar os efeitos deletérios do processo corrosivo.

Essa forma de corrosão pode ter aspecto de cratera ou fenda e, se nestas áreas estiverem soluções agressivas ao metal, a corrosão provocará perda de massa localizada segundo Herro e Port (1993). As regiões sob depósitos, em que existem diferenças entre áreas mais aeradas e áreas menos aeradas, estabelecem a formação de uma célula eletroquímica com as superfícies que estão sob depósitos tendendo a atuar como anodo e as que estão sem depósito como catodo, como mostra a **Figura 2.3**:

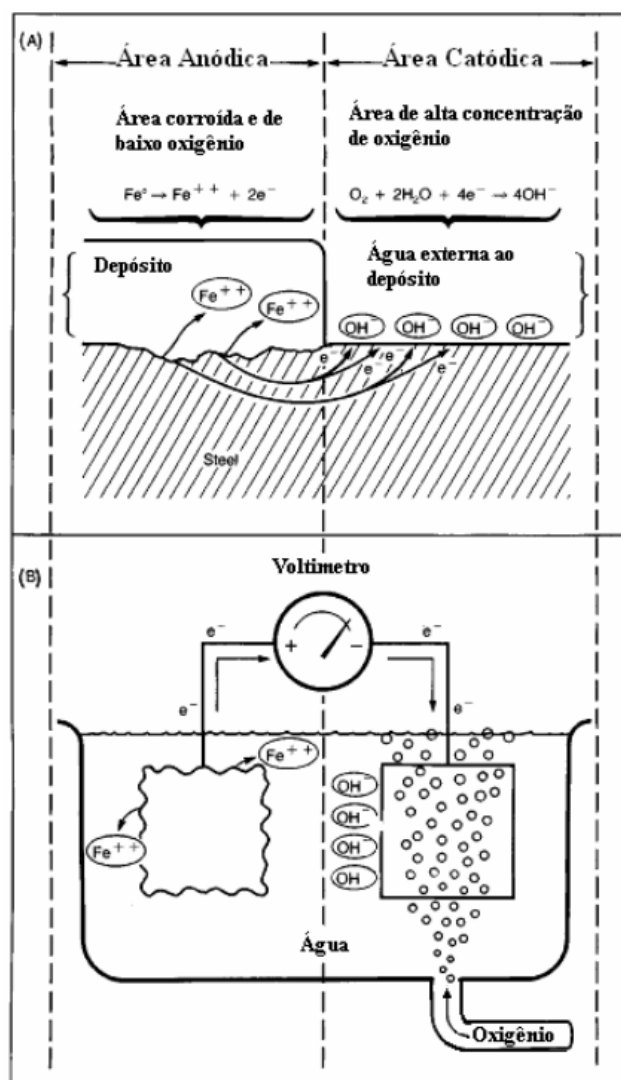


Figura 2.3 - (A) Corrosão devido à célula de aeração diferencial, sob um depósito (B).
Corrosão em uma célula de aeração diferencial induzida (Herro e Port,1993).

Rashid (2007) afirma que a concentração de oxigênio diminui ao longo da ocorrência do processo corrosivo e ocorre a formação de hidróxidos metálicos e de óxidos. Considerando esse cenário, estudos realizados por McCafferty (2010) apontaram que os valores de taxa de corrosão aumentam com o aumento da concentração de oxigênio no meio. Mas o oxigênio pode ser benéfico se o metal passivar, já que favorece a formação da camada passiva.

2.2.4 Corrosão -Erosão

Quando um material falha de forma rápida, como um mineroduto, um dos motivos considerado por Gentil (2007) é o surgimento de pequenas regiões anódicas em contato com grandes extensões catódicas ocasionada pelo processo de corrosão-erosão, visto que esse tem o poder de danificar as camadas superficiais de proteção.

Segundo Efirid et al., (1993) enquanto a erosão é considerada um fenômeno mecânico de remoção ou estragos no metal, o processo de corrosão-erosão é um processo químico e físico, e é definido como o aumento da taxa de corrosão proveniente do choque entre as partículas do fluido em movimento e a parede do mineroduto. Segundo a norma ASTM G40 (1993), o processo corrosão-erosão abrange ações que incluem a erosão na presença do meio corrosivo.

Alguns autores, como Postlethwaite (2000), apontam que esse fenômeno é consequência de forças mecânicas (fluxo turbulento, tensão de cisalhamento flutuante, impactos de pressão, etc). A **Figura 2.4** representa um caso de corrosão com erosão:



Figura 2.4- Parte interna de um trecho de tubulação, evidenciando a deterioração por erosão (GENTIL, 2007).

Esse fenômeno envolve mecanismos relacionados a perda de material que é a erosão mecânica e a corrosão eletroquímica. O primeiro mecanismo está associado a deformação plástica e a perda de materiais na superfície do metal oriunda de diversas forças mecânicas. Enquanto a corrosão eletroquímica trata-se do material que está sendo dissolvido no fluido. Segunda a norma ASTM G119 (2006), corrosão eletroquímica é a

corrosão sob condições isentas de erosão e a erosão mecânica é a erosão em um ambiente inerte.

A perda de massa resultante do processo corrosão-erosão normalmente é superior à soma das perdas obtidas se estivesse ocorrido separadamente a erosão e a corrosão. Esta diferença é considerada como efeito de sinergia dos dois processos ASTM G40 (1993). Assim sendo, a taxa total de perda de material (w) é o somatório das taxas de perda de material provocada pela erosão (e) e corrosão (c):

$$w = e + C \quad (2.1)$$

De acordo com Watson et al., (1995), o sinergismo pode ter consequências indesejáveis e gerar prejuízos. Para Stack (2005) e Madson (1988), inúmeras vezes a parcela de perda de material é tão grande, que quando é feita a avaliação da vida útil do produto é de extrema importância levar em consideração esse efeito.

Para autores como Christodoulou et al., (1997), Pugsley et al., (1999) e Huang et al., (1998), o processo de corrosão-erosão compreende diversos fatores, como características metalúrgicas do material, a hidrodinâmica de fluido e campo de fluxo, as características de erosão, a temperatura e a corrosividade dos meios.

Para impossibilitar ou retardar a ocorrência do fenômeno de corrosão-erosão, algumas medidas devem ser tomadas segundo a ASME B 31.4 (2012):

- Mudança do projeto ou da configuração de escoamento do duto, visto que grandes modificações na direção do fluxo devem ser evitadas quando se trata de minerodutos.
- Controle da granulometria das partículas no fluido da tubulação.

2.3 Parâmetros que afetam a cinética do processo corrosivo

Como reportado no início desse capítulo, a polpa transportada constitui-se de uma mistura

Água de selagem - Mariana	244	255	20,0	69,0	<0,5	0	95,7
Água de processo - Mariana	523	526	29,1	122	<0,5	21,6	163
Água de polpa - Mariana	733	1186	31,3	105	<0,5	461	<5
Água de selagem - Matipó	51	80	4,7	<5	0,856	0	20,1
Água da barragem - Matipó	161	182	8,4	41,8	1,00	0	74,00
Água de polpa - Matipó	278	2471	30,5	113	<0,5	305	146
Água da polpa - Ubu	1230	2100	32,8	124	<0,5	302	<5

A partir das análises apresentadas na **Tabela I**, foi possível perceber que a água da polpa de Ubu apresenta maior teor de cloretos e sulfatos quando comparada às outras amostras. Szklarska-Smialowska (1999) explica que a presença de íons cloretos favorece a quebra do filme de passivação, ocasionando o surgimento da corrosão por pite. Esse fato se deve a incorporação de tais íons no filme passivo, reduzindo o pH daquele ambiente e acelerando as reações anódicas. De acordo com Herro e Port (1993), a elevada concentração de cloreto, sulfato e outros ânions agressivos estimulam o crescimento de tubérculos.

Para Liu (2014), a formação de tubérculos pode causar a corrosão microbiológica. Mas vale ressaltar que, segundo Ray et al., (2010), nem sempre a presença de tubérculos no metal é suficiente para afirmar que o metal está sofrendo corrosão microbiológica.

2.4 Controle do processo corrosivo

2.4.1 Efeito do pH

O ambiente terrestre é naturalmente oxidativo devido à presença de oxigênio (O_2) e água (H_2O). Portanto, os metais tendem a sofrer oxidação quando em contato com essas substâncias. Conforme, Maia et al., (2005) à medida que substâncias ácidas estão presentes na água, a velocidade de oxidação dos metais tende a aumentar.

De acordo com a pesquisa realizada por Zupanovich (2002), os agentes redutores de oxigênio, além de remover o oxigênio dissolvido no meio, eles também têm a capacidade de formar barreira de proteção nas superfícies metálicas. Ele afirma que a eficiência da reação de remoção de oxigênio dissolvido na água está diretamente relacionada com o tempo, temperatura, concentração e pH presente no sistema.

Dependendo do valor de pH e das concentrações de gás oxigênio no meio, Mainier (2006) afirma que é fácil perceber a ocorrência do fenômeno de corrosão e as diferentes tonalidades do produto corrosivo. O autor pontua que a corrosão pode ser retardada por meio do controle dos valores de pH e desaeração do meio e o controle de pH visa favorecer a passivação dos metais, o que ocorre com o pH básico.

Gentil (2007) reporta o uso do Diagrama de Pourbaix ou também chamado Diagrama Potencial versus pH. A partir desse diagrama é possível relacionar valores de potencial e pH, e assim prever as condições sob as quais os metais podem sofrer corrosão, passivação ou estão na zona de imunidade.

De acordo com Gentil (2007), trata-se de uma representação gráfica, sob pressão de 1 atm e temperatura de $25^\circ C$, que representa os inúmeros equilíbrios químicos e eletroquímicos que podem existir entre o metal e o eletrólito líquido, para as possíveis reações que irão ocorrer entre o metal e a água, para valores usuais de pH e diferentes valores do potencial de eletrodo padrão de hidrogênio e pH. A **Figura 2.5** representa o Diagrama de Pourbaix para o ferro que foi construído a partir do conjunto de reações de equilíbrio:

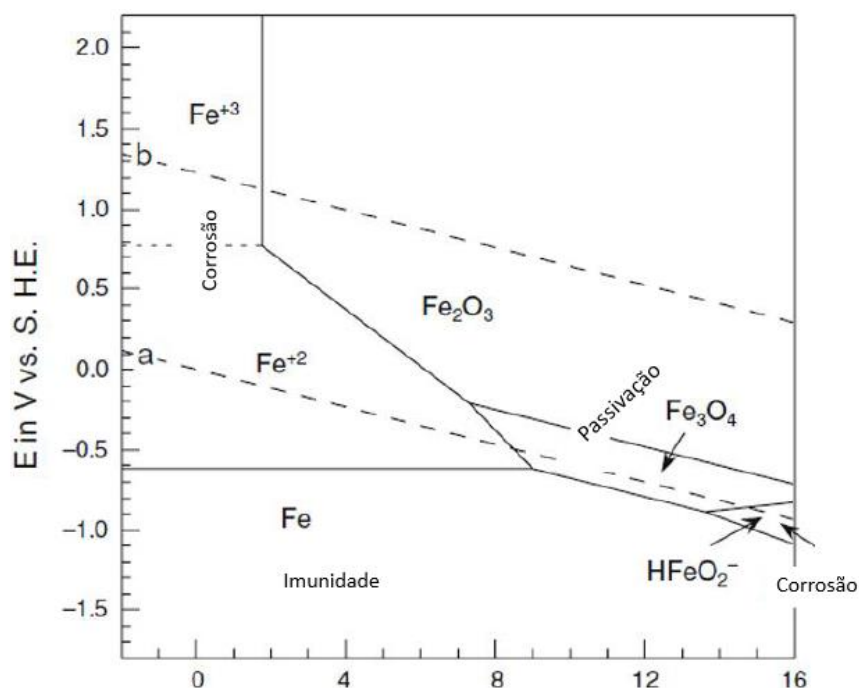
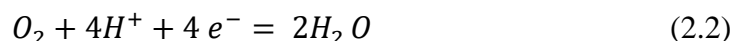


Figura 2.5 - Diagrama de Pourbaix para o ferro a 25°C (MCCAFFERTY,2010) - modificado

Para McCafferty (2010), o diagrama de Pourbaix indica que o ferro pode sofrer corrosão em soluções neutras ou ácidas em dois estados de oxidação (Fe^{2+} ou Fe^{3+}) e que as formações de filmes de Fe_2O_3 faz com que o ferro consiga atingir seu estado de passividade. De acordo com Gentil (2007), nessa determinada situação, o oxigênio provoca a passivação do ferro, gerando a formação de um filme de óxido que será frequentemente protetor em soluções isentas de íons cloreto. No entanto, para valores de pH inferiores até próximo de 8, o aumento do potencial do ferro causado pela presença do oxigênio será insuficiente para provocar a passivação do metal, afirma Gentil (2007).

Para Maia et al., (2005) um meio com pH mais baixo e maior concentração de íons H^+ , proporciona a aceleração do processo de oxidação no material em questão. Em um ambiente ácido, o processo predominante de oxidação pode ser explicado da seguinte forma:

- Redução do O_2 por ação dos íons hidrogênio:



- Oxidação dos íons metálicos:



Então, quanto mais ácido for o meio, maior a diferença entre a concentração de íons H^+ em relação aos íons OH^- (meio ácido: $[H^+] > [OH^-]$).

De acordo com Maia et al., (2015), em soluções com concentração maiores de íons H^+ (valores de pH abaixo de 4), ocorre redução destes ($2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$) e consequente oxidação do ferro. No entanto, quando as soluções são menos concentradas e com a presença de oxigênio, ocorre preferencialmente processo redutivo demonstrado na equação (2.2). Assim, a velocidade de corrosão diminui entre valores de pH 4 e 7, pois esta depende somente da rapidez com que o oxigênio difunde para a superfície metálica.

Durante seus experimentos, Laleh et al., (2022), notaram que em tubulações horizontais parcialmente cheias, o aumento do pH do meio e a dição de inibidor de corrosão contribuem significativamente para redução da taxa de corrosão. Esse fenômeno está relacionado com a predisposição dos metais de formar um filme passivador na sua superfície. De acordo com os estudos apresentados por Dugstad (1992), o filme de passivação proveniente do processo de corrosão possui grande influência na taxa de corrosão do aço carbono e seu acúmulo no meio pode resultar em alterações na natureza química e na superfície do aço.

2.5 Técnicas para avaliar a corrosão

Os ensaios de corrosão são uma ferramenta relevante para selecionar materiais adequados para aplicações em processos industriais, confecção de equipamentos e engenharia. Os principais objetivos para a realização de ensaios de corrosão de acordo com Fontana (1978) e ASM (2003) são:

- Avaliação ou seleção de materiais para um meio específico ou aplicação definida;
- Determinar o tempo de vida em serviço de um produto ou estrutura;
- Avaliação de materiais para determinação das condições que são susceptíveis a corrosão;
- Determinação do meio mais econômico para reduzir o fenômeno de corrosão.

- Avaliação de métodos de prevenção;

- Estudo dos mecanismos de corrosão;

- Controle da resistência dos materiais à corrosão e do grau de agressividade do meio.

Para Gentil (2007), nos testes em laboratório são utilizados corpos de provas, que muitas vezes estão totalmente imersos em soluções, nas quais as condições simuladas são próximas às condições reais. Idealmente, tais testes devem ser capazes de identificar separadamente a influência dos efeitos de fatores frente à corrosão.

De acordo com Sheir (2000) os ensaios em escala de laboratório podem ser subdivididos em quatro categorias: Testes de imersão, testes a alta temperatura e alta pressão, teste em sistemas fechados e testes eletroquímicos, representando diferentes conjuntos de condições de processos acelerados de corrosão.

Roberge (1999) considera que as técnicas eletroquímicas são usadas em estudos de fenômenos e monitoramento da corrosão em laboratório que podem avaliar quantitativamente a cinética de corrosão. Segundo a ASM (1992) inúmeras formas de corrosão são estudadas por técnicas eletroquímicas, como corrosão uniforme, localizada, galvânica, corrosão sob tensão e fragilização por hidrogênio. Bauer (1995), Hass (2013) e Selvakumar (2013), citam alguns ensaios que podem ser realizados de acordo com algumas técnicas eletroquímicas, como os ensaios de polarização anódica e catódica,

resistência a polarização linear e espectroscopia de impedância eletroquímica.

2.5.1 Polarização anódica e catódica

Segundo Cardoso et al., (2012), a polarização consiste em aplicar sobrepotenciais positivos ou negativos a partir do potencial de equilíbrio e registrar como resposta as correntes anódicas (ou catódicas) que atravessam a interface do metal/meio. Para Gentil (2007), os fenômenos de polarização promovem a aproximação dos potenciais das áreas anódicas e catódicas e produzem aumento na resistência ôhmica do circuito, ocasionando uma limitação na velocidade do processo corrosivo. A polarização pode acontecer pela presença de meio oxidante, diferenças de concentração iônica, diferença de temperatura e aeração e pela presença de uma fonte externa.

Conforme as convenções da União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC) quando o valor de potencial se desloca em direção dos potenciais de valores mais positivos, obtém-se a curva anódica da curva, devido a processos de oxidação. Se os valores de potenciais forem no sentido dos potenciais mais negativos, tem-se a curva catódica que está relacionada aos processos de redução.

Para Wolynech (2003), os ensaios eletroquímicos de polarização anódica e catódica permitem determinar o comportamento anódico/catódico dos materiais através das curvas de polarização. Eles são utilizados para a medida quantitativa de diversos parâmetros eletroquímicos de corrosão como taxa de corrosão, inclinações de Tafel e outros. O objetivo deste tipo de teste laboratorial é verificar a agressividade das soluções e seu efeito sobre os metais através das correntes resultantes, da faixa de passivação e da incidência de corrosão localizada na forma de pites, afirma ASTM G31-72 (1999).

O processo de polarização, segundo Gomes (2005), consiste em partir de um potencial inicial (E_i), alterar o potencial do eletrodo com velocidade de varredura (v) constante até um potencial final (E_f). A curva de polarização anódica é construída usando varreduras que seguem de potenciais com valores positivos para valores negativos. A partir da curva de polarização anódica, é possível determinar potencial de passivação primário (E_{pp}),

densidade de corrente crítica (i_{crit}) para passivação, potencial de pite (E_{pit}) e potencial de proteção (E_{prot}). As curvas de polarização catódicas fornecem a inclinação de Tafel catódica (β_c), a densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) e a densidade de corrente de difusão limite (i_{lim}) para o processo de redução catódica.

Gomes (2005), afirma também que a variação da velocidade de varredura e dos potenciais iniciais e finais, é possível determinar processos de oxidação, redução e de adsorção/dessorção. E ainda verificar se tais processos ocorrem em uma ou várias etapas e se correspondem a um processo reversível ou irreversível.

2.5.2 Resistência à polarização linear (RPL)

As principais técnicas derivadas das curvas de polarização experimentais usadas para obter a taxa de corrosão e outros parâmetros dos metais segundo Wolyneć (2003) são:

- Extrapolação das retas de Tafel.
- Resistência à polarização.

A utilização do método de extrapolação da reta de Tafel define o comportamento anódico/catódico dos materiais por curvas de polarização obtidas pelos gráficos potencial (E) versus densidade de corrente (A/m^2). A partir dos declives de Tafel, os coeficientes anódicos (β_a) e catódicos (β_c), obtidos pela curva de polarização, possibilitam a determinação da densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) e valor de resistência à polarização. De acordo com Wolyneć (2003), com base na equação de Stern-Geary, são encontrados valores de corrente de corrosão (i_{corr}) a partir dos valores de resistência à polarização (R_p), segundo a equação:

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (2.5)$$

Para Wolyneć (2003), o método de Stern-Geary é fundamentado no método de

polarização linear para quantificar a taxa de corrosão. A constante B é encontrada a partir das inclinações de Tafel, β_a e β_c , segundo a equação abaixo:

$$B = \frac{\beta_a \beta_c}{2,303 (\beta_a + \beta_c)} \quad (2.6)$$

De acordo com Wolynech (2003), para avaliar a taxa de corrosão generalizada, a metodologia de Tafel é amplamente aceita, mesmo não sendo normalizada. A equação abaixo é definida como sendo a equação de Tafel:

$$\eta = b \log \frac{|i|}{i_0} \quad (2.7)$$

Onde,

- η = sobretensão;
- b = Declive de Tafel;
- i = Densidade de corrente;
- i_0 = Densidade de corrente de troca.

Oliveira et al. (1995) definem que a densidade de corrente de troca (i_0) se dá quando a velocidade da reação de oxidação tem o mesmo valor em módulo que a velocidade da reação de redução. Este valor que corresponde à situação em que o eletrodo está em equilíbrio é nomeado como corrente de troca.

Normalizado pela ASTM G59-97 (2009), o método da resistência à polarização linear consiste na aplicação de pequenas variações de potencial ao redor do potencial de corrosão do material em um determinado meio, obtendo assim correntes mais lineares possíveis como respostas. O objetivo da técnica é medir a resistência à oxidação de um dado material. De acordo Wolynech (2003), com a resistência à polarização linear é um método consideravelmente rápido e não destrutivo que está associado com a taxa de

corrosão uniforme para materiais no potencial de corrosão (E_{corr}) ou próximo dele.

Inúmeros estudos mostram a importância da técnica de polarização para as conclusões de diversas pesquisas. No estudo apresentado por Teixeira (2015), em que o objetivo era investigar a ação inibidora do extrato aquoso do chá branco na corrosão do aço-carbono 1020 em solução de HCl 1 mol/L, foi possível identificar a eficiência de inibição da corrosão a partir das densidades de corrente de corrosão obtidas das curvas de polarização potenciodinâmica através do método da extrapolação de Tafel.

2.6 Análise Granulométrica

2.6.1 Peneiramento

O peneiramento é um método aplicado em diversas indústrias para tratamento de mineral e muito utilizado nas áreas de deslamagem, britagem, na concentração, desaguamento, etc. Trata-se de método de separação por tamanho, compreendendo duas ou mais classes, possuindo um limite superior e inferior (Correia, 2010). De acordo com Galery et al., (2012), trata-se de uma operação unitária do processo de beneficiamento, que consiste na separação de partículas de diferentes tamanhos e formas por meio de uma superfície com aberturas geométricas de formas distintas, resultando em material retido (oversize) e material passante (undersize). Esse autor explica que a classificação por tamanho é realizada por barreira mecânica, como grelhas, peneiras vibratórias, peneiras DSM, dentre outros equipamentos.

De acordo com Wills et al., (2006), existem duas maneiras de realizar o peneiramento: A seco e a úmido. No primeiro procedimento, a amostra a ser analisada possui apenas a umidade natural e é aplicado em materiais de granulometria menor que 5 mm. Já o peneiramento a úmido é utilizado quando a amostra possui uma granulometria menor que 0,025 mm. Segundo Sampaio e Silva (2007), em laboratório, o peneiramento é realizado a úmido e a alimentação do minério é feita, segundo uma polpa, minério e água.

2.7 Princípios básicos da microscopia confocal

De acordo com Mansur et al., (2009), um dos métodos de caracterização bastante utilizado em diversas vertentes de pesquisas e uma das mais antigas é a microscopia ótica confocal. Segundo o Laboratório Nacional de Nanotecnologia (LNNano), essa técnica possibilita fazer o imageamento e medidas de topologia com alta profundidade de foco.

O microscópio confocal utiliza como fonte de luz várias linhas de lasers que se movem através de um scanner de modo a focalizar a amostra linha por linha. Após a excitação pelo laser, a amostra emite fluorescência em outro comprimento de onda, que é então lido pelos diferentes detectores. O equipamento também correlaciona a microscopia ótica convencional e a laser para obter imagens com alta resolução espacial. Tais imagens são constituídas basicamente pela luz refletida pela amostra. E através de uma eletrônica embarcada é possível definir o ponto mais alto e o ponto mais baixo (eixo-Z) da região de interesse e fatiar as imagens de modo que sejam adquiridas imagens da mesma área, mas com pontos diferentes no eixo-Z. Ao final da medida, as imagens são combinadas de tal maneira que é possível efetuar a reconstrução tridimensional (3D) (Laboratório Nacional de Nanotecnologia (LNNano), 2023).

Para o Centro de Microscopia Eletrônica (CME), 2023, uma das vantagens do microscópio confocal é captar apenas a porção do espécime situada no ponto focal de lente mais próxima deste. Esta meta é atingida através da associação de um orifício de abertura ou pinhole, que elimina a luz proveniente de objetos que estejam fora do plano focal. A imagem é então construída ponto a ponto por um software acoplado ao microscópio. Outra grande vantagem do microscópio confocal é a capacidade de realizar seccionamento óptico. Com a obtenção destas imagens bidimensionais muito definidas, é possível obter secções virtuais de toda a espessura do tecido e criar imagens tridimensionais através da junção das primeiras.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados nesse estudo foram os produtos de corrosão arrastados na passagem de PIG de limpeza, cupons de massa instalados ao longo do mineroduto, corpos

de provas confeccionados com o aço carbono API 5L X70 e amostras de polpa e água usadas no processo de tratamento de minério.

A metodologia aplicada para a parte experimental deste estudo é apresentada a seguir.

3.1 Análises físico-químicas

Após a coleta, as amostras foram enviadas para laboratório especializado para que fossem caracterizadas e avaliadas. Nos pontos em que foram coletadas amostras da polpa que estava sendo bombeada, o material analisado foi o sobrenadante desse fluido, conforme apontado na **Figura 3.6**:

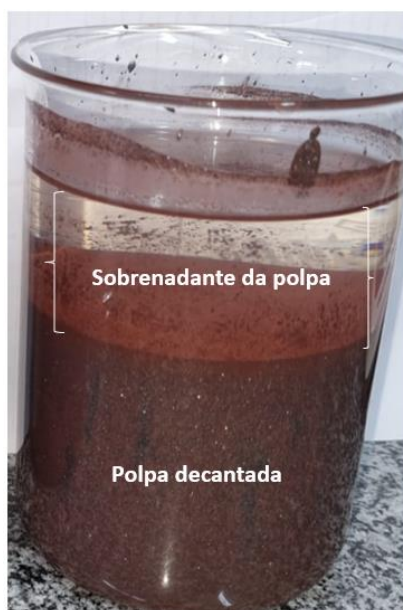


Figura 3.6 - Alíquota de polpa para análises laboratoriais.

A seguir, na **Tabela II**, estão identificados os pontos de amostragem e a natureza do fluido coletado:

Tabela II - Pontos de amostras e natureza dos fluidos analisados.

Amostra	Natureza do fluido coletado
Reservatório EB1	Água
Sucção EB1	Sobrenadante da polpa

Barragem EB2	Água
Sucção EB2	Sobrenadante da polpa
Estação terminal (ET)	Sobrenadante da polpa

3.2 Aplicação de técnicas de predição da corrosão

3.2.1 Ensaios eletroquímicos

A fim de investigar as propriedades do aço carbono API 5L X70, foram coletadas amostras de polpa e água de processo (vide **Tabela II**) para realização em duplicata de medidas eletroquímicas de polarização anódica, OCP e LPR.

Para a constituição dos eletrodos de trabalho utilizados nos ensaios eletroquímicos, segmentos de tubos retirados de campo (vide **Figura 3.7**) foram cortados em laboratório e embutidos em resina termofixa para a constituição dos eletrodos de trabalho. Em seguida, lixou-se até a grana 600 mesh. A delimitação da área exposta do eletrodo de trabalho em 33 mm² foi feita com o uso de fita adesiva para galvanoplastia (modelo 470, marca 3M), como mostra a **Figura 3.8**:



Figura 3.7 - Segmento tubo.

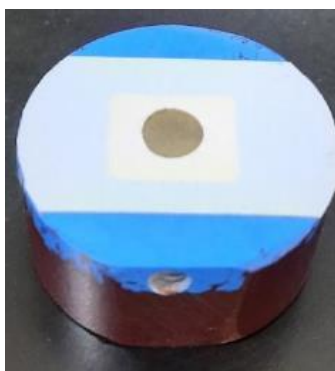


Figura 3.8 - Eletrodo de trabalho pronto para o ensaio.

Os ensaios eletroquímicos foram realizados com amostras *in natura* de águas coletadas no reservatório EB1 e Barragem EB2. Já os ensaios com amostras de polpa coletadas em Sucção EB1, Sucção EB2 e Estação Terminal, foram realizados com o sobrenadante da polpa. Para retirar resíduos de minério remanescentes nas amostras do sobrenadante da polpa, os materiais foram filtrados a vácuo utilizando papel filtro faixa azul com taxa de fluxo lento.

Amostras de água de processos e sobrenadante da polpa foram transferidas para uma célula de ensaio descrita na norma ASTM G5 (2014) com contra-eletrodos de grafita de alta pureza e eletrodo de referência $\text{Hg}|\text{Hg}_2\text{SO}_4|\text{K}_2\text{SO}_4$ sat. ($E = 650$ mV versus eletrodo normal de hidrogênio - ENH). Durante os testes eletroquímicos, a célula de ensaio foi posicionada dentro de uma gaiola de Faraday para garantir que não haja nenhuma interferência eletromagnética externa. Em seguida, para iniciar as medições eletroquímicas, os eletrodos foram conectados a um potenciostato Biologic Multichannel VMP3. Na **Figura 3.9** é mostrado a célula de ensaio com eletrodos. De acordo com Moreto (2012), por meio da utilização do potenciostato é possível monitorar de forma correta o potencial do eletrodo, bem como atribuir ao mesmo o potencial desejado, para obter curvas de polarização que apresenta a relação entre o potencial do eletrodo e a correspondente corrente medida no potenciostato.

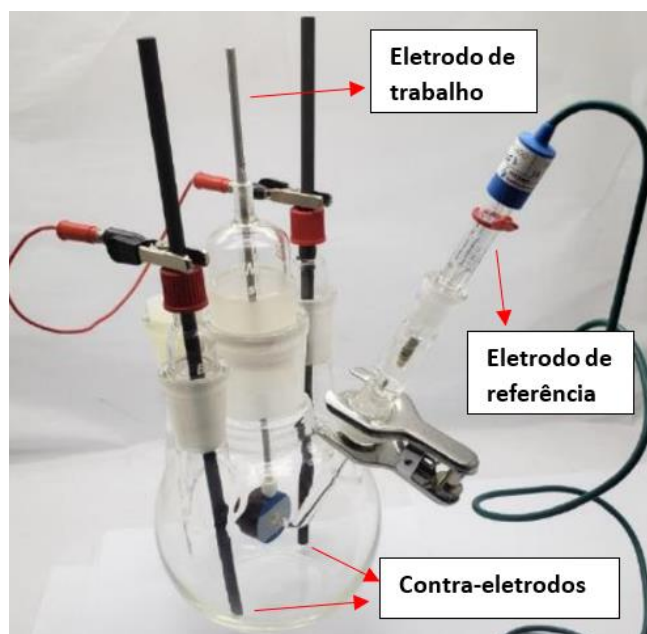


Figura 3.9- Célula de ensaio descrita na norma ASTM G5 (2014)

Para verificação do potencial do eletrodo de trabalho em relação ao eletrodo de referência no meio em que está inserido, seja polpa ou água de processos, foram realizados monitoramentos do potencial do circuito aberto (PCA) em um período de 3 h. Após 1 hora de ensaio foi traçada a primeira curva de polarização linear com tensões de ± 10 mV em relação ao PCA e com velocidade de varredura de 0,5 mV/s. A partir dessa curva foi extraído o R_p . Ao longo das 2 h restantes de ensaio e afim de obter maior estabilidade entre a superfície do eletrodo de trabalho e o meio em questão, a cada 30 minutos foram traçadas novas curvas de polarização linear e extraídos novos valores de R_p que foram utilizados para o cálculo da taxa de corrosão.

Finalizado o ensaio de PCA, curvas de polarização potenciodinâmicas anódica foram traçadas a partir de uma aplicação de potencial de 30 mV abaixo do PCA obtido. Foi aplicado uma tensão máxima de +700 mV em relação ao eletrodo de referência com velocidade de varredura de 0,5 mV/s.

Na condução dos ensaios e visualização dos gráficos, foi utilizado o software de controle EC-Lab versão 11.26. Os dados obtidos foram transportados para uma planilha Excel para o tratamento de dados.

3.2.2 Ensaios gravimétricos (ou de perda de massa) e análise da morfologia de corrosão de cupons de perda de massa

A quantificação da taxa de corrosão nos ensaios gravimétricos se deu pelas avaliações dos cupons de perda de massa (ou campo) encontrados no interior do mineroduto. Eles são instalados na chamada geratriz superior do duto (ou posição 0°) como representado na **Figura 3.10**:

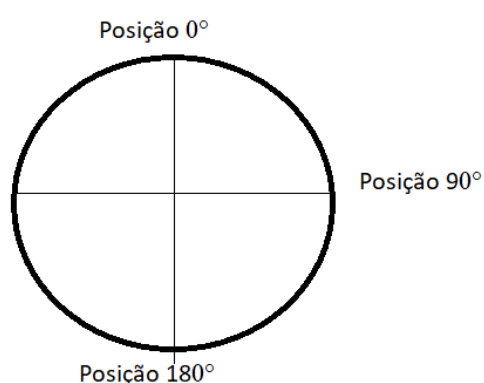


Figura 3.10 -Representação do local de instalação do cupom de massa.

Para maior controle de corrosão, ao longo do mineroduto Minas Rio foram instalados cupons de campo em 9 pontos:

- Início do mineroduto Jr*.
- final do mineroduto Jr*.
- Sucção EB1(sucção da estação de bombas 1).
- Descarga EB1(descarga da estação de bombas 1).
- Sucção EB2 (sucção da estação de bombas 2).
- Descarga EB2 (descarga da estação de bombas 2).
- EV Entrada (Estação de válvulas entrada)
- ET saída (saída da estação terminal).
- ET entrada (entrada da estação terminal).

* A polpa formada na usina de beneficiamento é transferida para os tanques de

homogeneização localizados na estação de bombas 1 (EB1), conforme destacado na **Figura 3.11**, através de um mineroduto de aproximadamente 5 km denominado mineroduto Jr:



Figura 3.11 - Tanques de homogeneização localizados em EB1.

Depois de 96 dias de instalação, os cupons foram removidos e submetidos à avaliação visual e a registros fotográficos das duas faces (frente e verso), de forma a registrar seu aspecto superficial, conforme mostra a **Figura 3.12**:

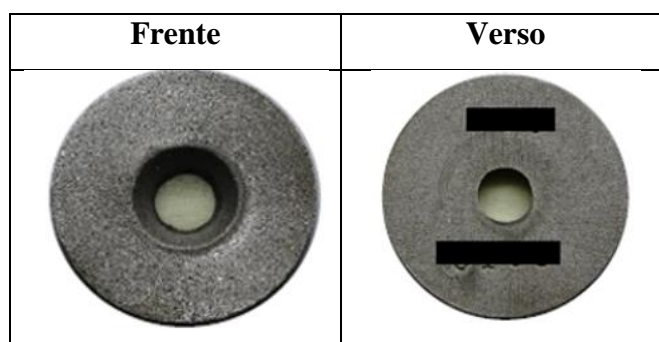


Figura 3.12 - Cupom de campo - Frente (face voltada para o interior do duto) e Verso (face rente a parede do duto).

Em seguida, os produtos de corrosão foram raspados cuidadosamente para serem

analisados por difração de raios X (DRX) e espectroscopia de dispersão de energia (EDS). Por fim, as taxas de corrosão foram calculadas através da perda de massa.

Após a remoção dos produtos de corrosão remanescentes por decapagem, nova avaliação visual foi feita com auxílio de uma lupa, de forma a identificar o tipo de corrosão ocorrido. Nos casos em que se verificou a ocorrência de corrosão localizada, os cupons foram submetidos à avaliação em microscópio confocal para a determinação da profundidade máxima dessa corrosão.

3.2.2.1 Análise de difração de raios X dos produtos de corrosão

Os produtos de corrosão, quando presentes em quantidade suficiente, foram coletados dos cupons e analisados pelos métodos EDS e DRX. O primeiro método permitiu a identificação e quantificação química dos produtos de corrosão. A partir dessas microanálises, foi possível orientar a identificação dos padrões de difratometria de raios X.

As análises foram realizadas com o difratômetro modelo D2 Phaser da marca Bruker e com o detetor EDS modelo Sirius, da marca Greshan. O difratômetro utiliza como base de dados o PDF (Powder Diffraction File) -2 2015 do ICDD (International Centre for Diffraction Data Newtown Square, PA, Estados Unidos).

3.2.2.2 Determinação da taxa de corrosão dos cupons de perda de massa

As áreas, a massa inicial, a data da instalação e retirada dos cupons foram informadas pela empresa responsável pela instalação e remoção/substituição dos cupons. Os cupons foram decapados em solução de Clark. Essa solução foi preparada a partir de solução de ácido clorídrico 1 L (HCl) contendo 20,00 e 50,00 g de cloreto de antimônio III, $SbCl_3$ e cloreto estano III, $SnCl_2$, respectivamente, conforme estabelecido pela norma ASTM G1 (2017). Após esse procedimento, as taxas de corrosão foram calculadas de acordo com a norma NACE RP0775 (2005):

$$TC = \frac{K \cdot \Delta m}{A \cdot t \cdot D} \quad (3.1)$$

Em que:

TC = taxa de corrosão ($\mu\text{m}/\text{ano}$);

K = constante com valor $8,76 \times 10^7$;

Δm = diferença de massa (g);

A = área exposta do cupom (cm^2);

t = tempo de exposição (h);

D = massa específica, que para o aço-carbono é de $7,86 \text{ g}/\text{cm}^3$ (dados fornecidos pela ASTM G1 (2017))

As massas dos cupons foram determinadas com balança analítica (BAL-08), marca Mettler Toledo, modelo XS 204 com resolução de 0,1 mg. Suas dimensões foram medidas e as respectivas áreas calculadas ao final das decapagens com o auxílio de um paquímetro digital (PAQ-04), marca Mitutoyo, modelo 500-171-20B com resolução de 0,01 mm. A área de cada cupom, utilizada no cálculo da perda de massa, foi determinada desconsiderando a área existente sob os suportes de fixação dos cupons, localizado no verso dos cupons, como destacado em destacado na **Figura 3.13**:



Figura 3.13- Área existente sob o suporte de fixação do cupom de perda de massa.

3.2.2.3 Determinação da profundidade da corrosão localizada

Para a avaliação da profundidade da corrosão localizada, utilizou-se como base a norma ASTM G46 (2021). Foi feita primeiramente uma avaliação geral das regiões com corrosão localizada do cupom com microscópio confocal da marca Zeiss e modelo CSM

700, tendo sido identificada a região com maior profundidade de ataque. Em seguida, a profundidade dessa região foi medida por método não destrutivo, utilizando o mesmo microscópio que automaticamente controla o foco e possibilita a medição da profundidade da referida região.

3.3 Caracterização mineralógica

Para as análises de caracterização química e mineralógica foram usados materiais arrastados pela passagem do PIG de limpeza. Abaixo, na **Figura 3.14**, encontra-se o PIG de limpeza em questão:



Figura 3.14 - PIG de limpeza.

Para melhor entendimento dos resultados dos testes mencionados anteriormente e identificação do material, foram realizadas análises químicas e granulométricas. Também foi aplicada a técnica de DRX.

3.3.1 Análise granulométrica por peneiramento

Na técnica de granulometria por peneiramento, foi definido o tamanho das partículas, a partir da distribuição granulométrica determinada em termos de porcentagem de massa retida nas peneiras escolhidas.

O peneiramento foi realizado em um peneirador suspenso, com adição de água, para garantir a eficiência do ensaio e finalizado quando a água do passante da última peneira estava totalmente limpa. Em seguida, o passante foi filtrado em filtro do tipo prensa e a amostra foi levada para uma estufa com temperatura de 105°C, bem como as frações retidas nas peneiras superiores.

As malhas utilizadas nesse procedimento foram: 300µm, 150µm, 74µm e 44µm.

3.3.2 Análise de difração de raios X (DRX) dos resíduos sólidos

O material coletado pela passagem do PIG foi enviado para o laboratório e posteriormente filtrado. Após passar pelo processo de filtração, a parte sólida foi submetida a um processo de secagem em mufla a 100 °C. Os resíduos secos foram analisados por DRX e EDS. O difratômetro de raios X utilizado foi o mesmo usado na análise dos produtos de corrosão encontrados nos cupons de campo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Avaliação físico-química

Ao longo do processo de beneficiamento do minério, utiliza-se o hidróxido de cálcio para aumentar o pH da polpa e, conseqüentemente, são esperados maiores valores de condutividade. Tais indícios puderam ser confirmados após as medições de condutividade, pH e temperatura, como apresentado na **Tabela III**:

Tabela III - valores de condutividade, pH e temperatura medidos no laboratório externo no dia do recebimento nas amostras.

Amostra	Natureza do fluido coletado	Condutividade (µS/cm)	pH	Temperatura (°C)

Reservatório EB1	Água	37,9	8,3	23,3
Sucção EB1	Sobrenadante da polpa	892	12,1	23,1
Barragem EB2	Água	481	10,6	23,1
Sucção EB2	Sobrenadante da polpa	873	11,8	23,1
Estação terminal (ET)	Sobrenadante da polpa	953	11,8	23,1

A seguir, na **Tabela IV**, encontram-se os resultados das análises químicas:

Tabela IV - Resultados das análises químicas. Valores em mg/L (resultados expressos em média \pm incerteza).

Amostra	Natureza do fluido coletado	Cloretos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Ferro dissolvido (mg/L)	Sólidos totais dissolvidos (mg/L)
Reservatório EB1	Água	<5	< 0,8986	0,31 \pm 0,03	400 \pm 18
Sucção EB1	Sobrenadante da polpa	<5	58,8 \pm 2,5	< 0,005	650 \pm 29

Barragem EB2	Água	$5,2 \pm 0,3$	$37,7 \pm 1,6$	$0,160 \pm 0,014$	326 ± 14
Sucção EB2	Sobrenadante da polpa	$39,2 \pm 2,5$	$64,4 \pm 2,8$	$< 0,025$	680 ± 30
Estação terminal (ET)	Sobrenadante da polpa	< 5	$76,1 \pm 3,3$	$< 0,025$	668 ± 29

Em relação aos teores de cloreto e de sulfatos encontrados nas amostras, nota-se que os maiores valores foram obtidos nas águas sobrenadantes de polpa (amostras Sucção EB1, Sucção EB2 e Estação Terminal). O teor de ferro dissolvido, por sua vez, está presente em maior quantidade na água do Reservatório EB1. Para Gentil (2007), a detecção de íons cloreto juntamente com a presença de sulfatos tendem a aumentar a condutividade da água, seja ela do sobrenadante da polpa e do reservatório EB1 ou Barragem EB2. Isso corrobora para o aumento da taxa de corrosão. Herro et al., (1993) afirmam que bactérias redutoras de sulfato e bactérias produtoras de ácidos provavelmente aceleram o crescimento de tubérculos. Além disso, o sulfato serve de alimento para o crescimento de bactérias redutoras de sulfato e, portanto, uma análise microbiológica dos fluidos bombeados torna-se necessária.

4.2 Ensaio eletroquímicos

Os valores do PCA medidos em função do tempo (h) nas amostras de águas de processo (Reservatório EB1 e Barragem EB2) e sobrenadante da polpa (Sucção EB1, Sucção EB2 e Estação Terminal) estão representados na **Figura 4.15**:

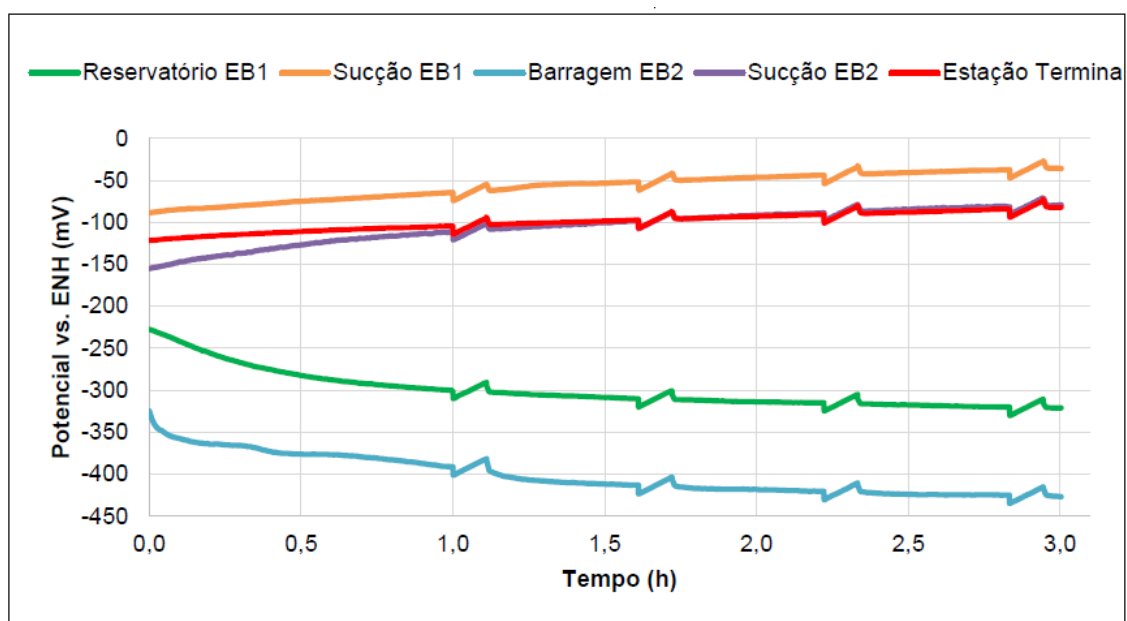


Figura 4.15 – Valores dos potenciais de circuito aberto (PCA) medidos em função do tempo.

Foi observado que os valores de PCA (ou também chamado de potencial de circuito aberto) das amostras de Sucção EB1, Sucção EB2 e Estação Terminal são muito semelhantes, iniciando em valores mais negativos e aumentando para valores entre -35 mV e -85 mV vs. ENH. A elevação gradual do potencial ao longo do tempo sugere que a superfície metálica do eletrodo de trabalho está sendo coberta com produtos de corrosão. O que é coerente com os valores elevados de pH dos meios, isto é, valores mais altos de pH favorece a passivação do aço.

O comportamento do PCA das amostras Reservatório EB1 e Barragem EB2 teve início entre -230 mV e -325 mV vs. ENH e alcançou valores entre -320 mV e -430 mV vs. ENH. Ao final de 3 h de monitoramento notou-se que a superfície metálica estava sofrendo corrosão, o que já era esperado devido aos valores mais baixos dos pHs das amostras.

Na **Figura 4.16**, são apresentadas as curvas de polarização potenciodinâmicas anódicas obtidas para as amostras de águas e as amostras de sobrenadantes da polpa:

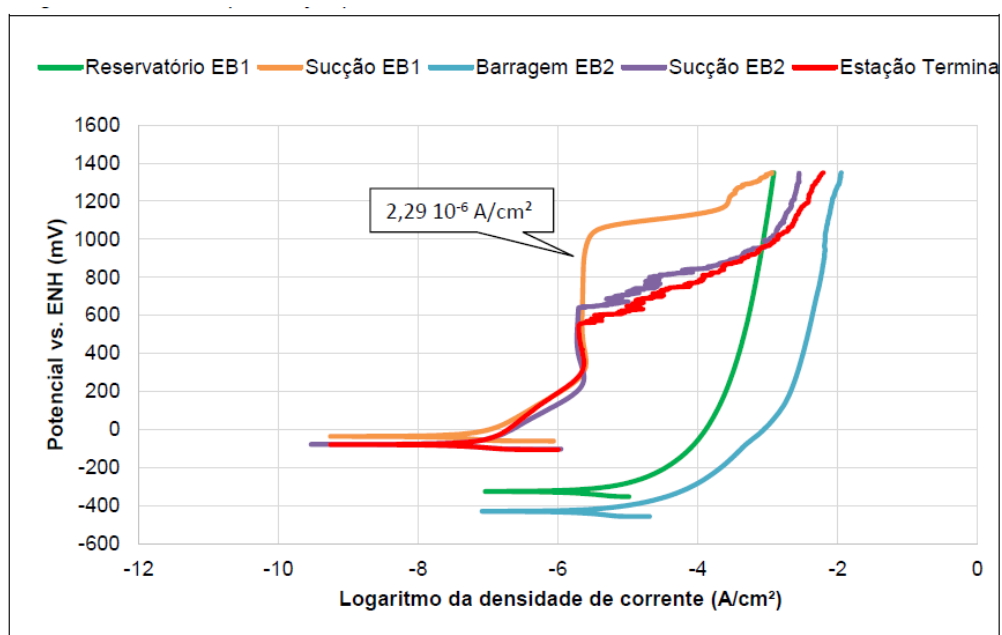


Figura 4.16- Curvas de polarização potenciodinâmicas anódicas

As curvas das amostras de Sucção EB1, Sucção EB2 e Estação Terminal mostradas no gráfico acima (vide **Figura 4.16**) apresentaram o mesmo comportamento com densidade de corrente de passivação no valor aproximado de $2,29 \mu\text{A/cm}^2$. Esse valor equivale a uma taxa de corrosão máxima de $0,027 \text{ mm/ano}$. As curvas das amostras Reservatório EB1 e Barragem EB2, no entanto, apresentam comportamento correspondente a processo de corrosão ativa, sendo coerente com o valor PCA observado anteriormente. O aço no meio de sucção EB1 apresentou maior potencial de transpassivação, indicando um melhor comportamento frente a corrosão neste meio. Notou-se a antecipação da quebra da camada passiva das águas sobrenadantes das polpas coletadas em Sucção EB2 e na Estação Terminal. Essa antecipação está relacionada com a maior susceptibilidade à corrosão localizada muito provavelmente esse fato está associado com a presença de BRS (bactérias redutoras de sulfato) nesses pontos. Tais bactérias podem ter sido responsáveis pela quebra do filme de passivação percebida durante os ensaios. Para verificar as razões desse comportamento, outras amostras foram coletadas e estão sendo analisadas e novos ensaios estão sendo realizados, porém não foram finalizadas até o momento do término desse estudo.

A partir da inclinação das curvas de polarização potenciodinâmicas anódicas foi possível determinar os valores de R_p no trecho de curvas de polarização de ± 10 mV em relação ao PCA. Esses valores foram utilizados para o cálculo da densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) e estimativa da taxa de corrosão. Os valores obtidos polarização linear está indicados na **Tabela V**:

Tabela V - Densidade de corrente de corrosão e taxa de corrosão calculadas a partir dos valores de R_p medidos nas amostras de água e sobrenadante da polpa.

Amostra	R_p ($\Omega.cm^2$)	i_{corr} (10^{-6} A/cm²)	Taxa de corrosão (mm/ano)
Reservatório EB1	4.516	5,67	0,066
Sucção EB1	263.717	0,10	0,001
Barragem EB2	3.661	6,99	0,081
Sucção EB2	231.304	0,11	0,001
Estação terminal (ET)	228.675	0,11	0,001

Para melhor visualização dos dados da **Tabela V**, traçou-se um gráfico com os valores das taxas de corrosão dos respectivos pontos em que as amostras foram coletadas que são apresentados na **Figura 4.17**:

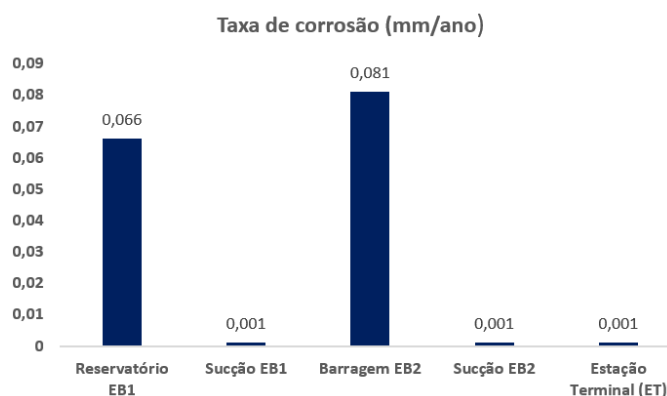


Figura 4.17 - Taxa de corrosão calculadas a partir dos valores de Rp medidos nas amostras de água e sobrenadante da polpa




Observa-se que os maiores valores de taxa de corrosão foram decorrentes das amostras Reservatório EB1 e Barragem EB2. Este resultado está coerente com os valores do potencial de corrosão e com as maiores densidades de corrente anódica da **Figura 4.16**. Estes meios apresentaram as maiores concentrações de ferro dissolvido de acordo com a **Tabela IV**. Estes valores mais elevados das taxas de corrosão estão de acordo com o verificado por Carvalho (2004), em que foi constatado que durante os ensaios de perda de massa em pH 5,0 a taxa de corrosão obtida foi de 0,521 mm/ano para o ferro e para a liga Fe-3Cr de 0,395 mm/ano. Já nos ensaios em que o meio apresentava pH de 6,0 os valores de corrosão foram menores, sendo 0,354 mm/ano para o ferro e 0,342 mm/ano para a liga Fe-3Cr. De acordo com Abdel-Gaber et al., (2003), a dissolução do ferro em aço carbono é motivada através da reação catalítica entre o ferro e os ânions de ácidos inorgânicos adsorvidos sobre a superfície, explicando assim uma maior taxa de corrosão na presença da bactéria ao promover a quantidade de íons inorgânicos a partir do metabolismo bacteriano. Diversos autores, como Geesey et., (1992) e Jigletsova et al., (2003), afirmam que a dissolução do ferro e outras reações de deterioração do aço são responsáveis pela formação de óxidos e/ou hidróxidos de ferro. E este processo é proveniente do acúmulo de material biológico sobre a superfície do aço.

4.3 Cupons de perda de massa

4.3.1 Avaliação visual e por microscopia

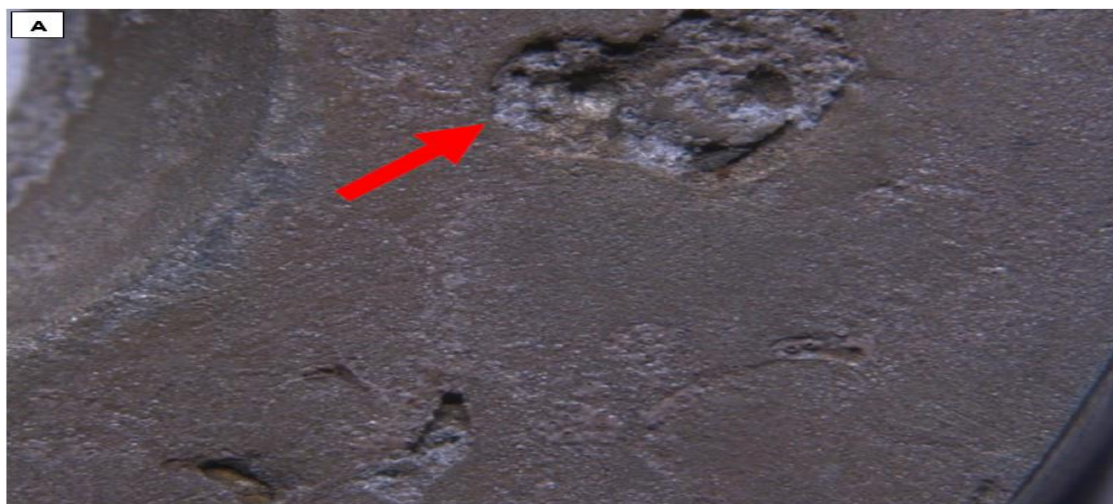
Por meio de registros fotográficos, as duas superfícies dos cupons foram fotografadas assim que foram retirados dos seus respectivos pontos de instalação e após a etapa da decapagem. Em busca de facilitar a descrição, a superfície do cupom que está em contato com o fluido foi chamada de Frente e a superfície em contato com o suporte de instalação foi chamada de Verso. A **Tabela VI** mostra os aspectos visuais dos cupons em seus pontos de instalação:

Tabela VI - Aspecto visual dos cupons instalados no mineroduto

Cupom	Antes da decapagem		Após a decapagem	
	Frente	Verso	Frente	Verso
Início mineroduto Jr.				
Final do mineroduto Jr.				
Sução EB1				
Descarga EB1				
Sução EB2				
Descarga EB2				
EV Entrada				
ET Saída				
ET Entrada				

De acordo com os registros fotográficos apresentados na **Tabela VI**, pode-se observar que os cupons instalados no início do mineroduto Jr, final do mineroduto Jr., Sucção EB1, Descarga EB1, Descarga EB2 e ET saída apresentaram um severo ataque corrosivo na superfície verso com acúmulo de material maior que o esperado. Fato esse indicou que durante o período de instalação houve falta de contato entre tais cupons com os respectivos suportes de instalação ocasionando elevadas taxas de corrosão. O que não corresponde com a condição da superfície interna do mineroduto.

Com o auxílio de uma lupa, as superfícies frente dos seguintes cupons foram analisados: Início do mineroduto Jr, final do mineroduto Jr., Sucção EB1, Descarga EB1, Sucção EB2, Descarga EB2, ET saída e ET entrada. Após tal análise foram identificados alguns pontos com ataques localizados com formas variadas, sendo alguns com formato de pite. A seguir, a **Figura 4.18** mostra a imagem do ataque localizado identificado na superfície frente do cupom instalado no final do mineroduto Jr na região A e na região B, e foi mensurada a profundidade do mesmo com o auxílio de um microscópio confocal:



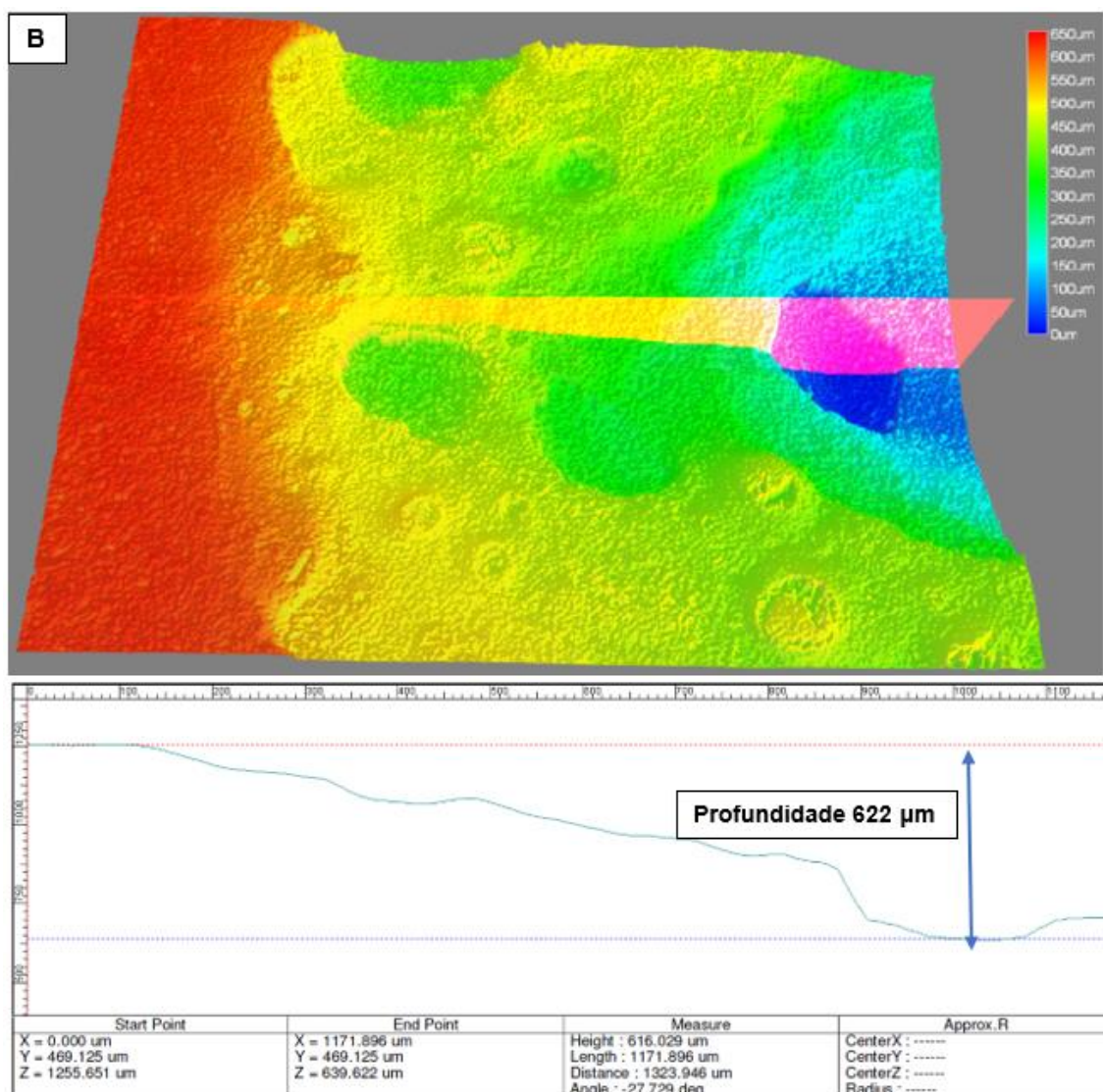


Figura 4.18 - Condição da superfície frente do cupom instalado no final do mineroduto Jr (A: Imagem de lupa. B: Imagem e perfil por microscopia confocal).

A profundidade máxima de cada região dos cupons que apresentava ataque localizado foi medida com microscópio confocal. Assim foi possível verificar a diversidade da morfologia dos ataques localizados. Os resultados dessas análises estão apresentados nas **Figura 4.19, Figura 4.20, Figura 4.21, Figura 4.22, Figura 4.23, Figura 4.24 e Figura 4.25:**

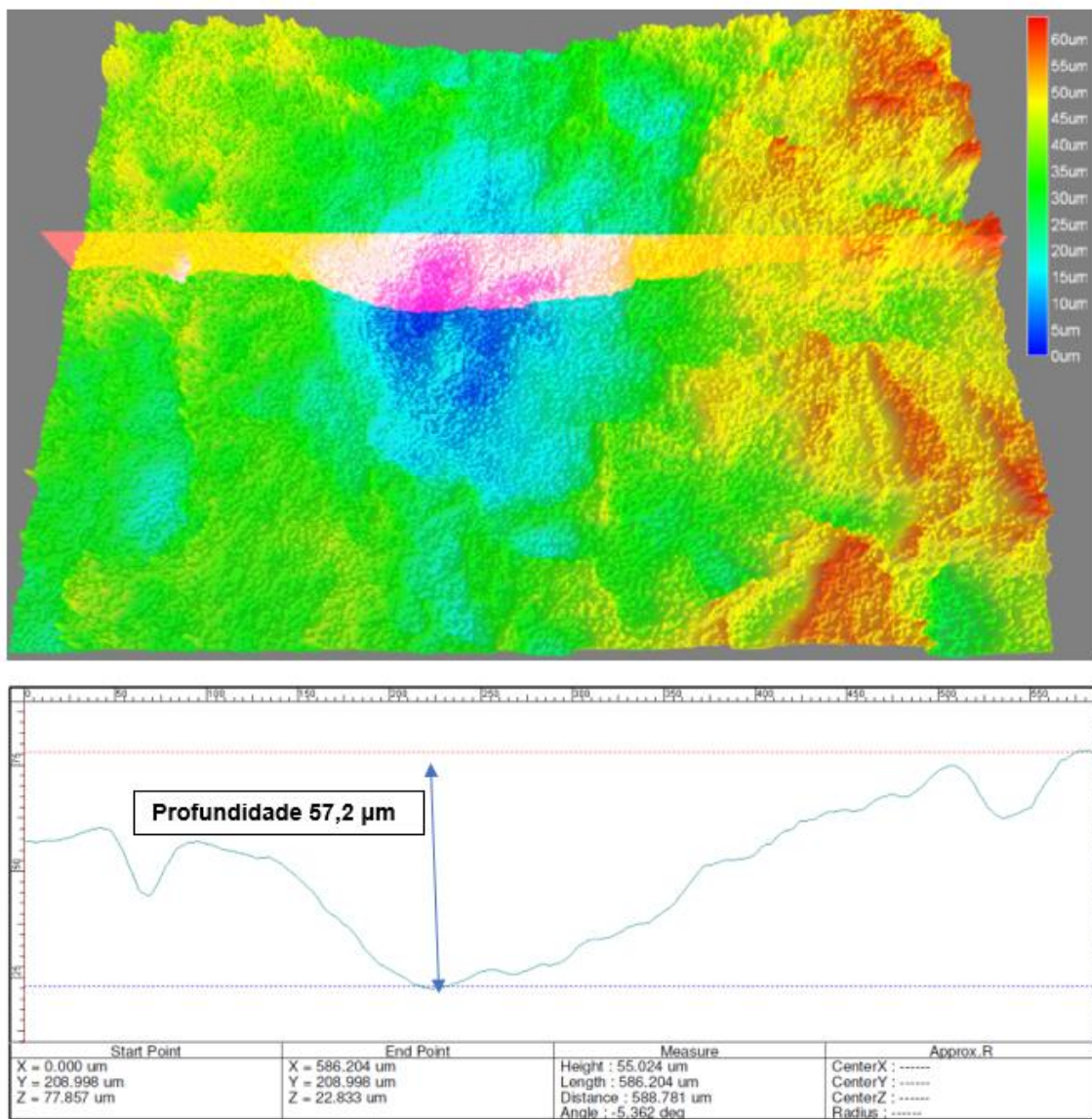


Figura 4.19 - Avaliação por microscopia confocal da frente do cupom início do mineroduto

Jr.

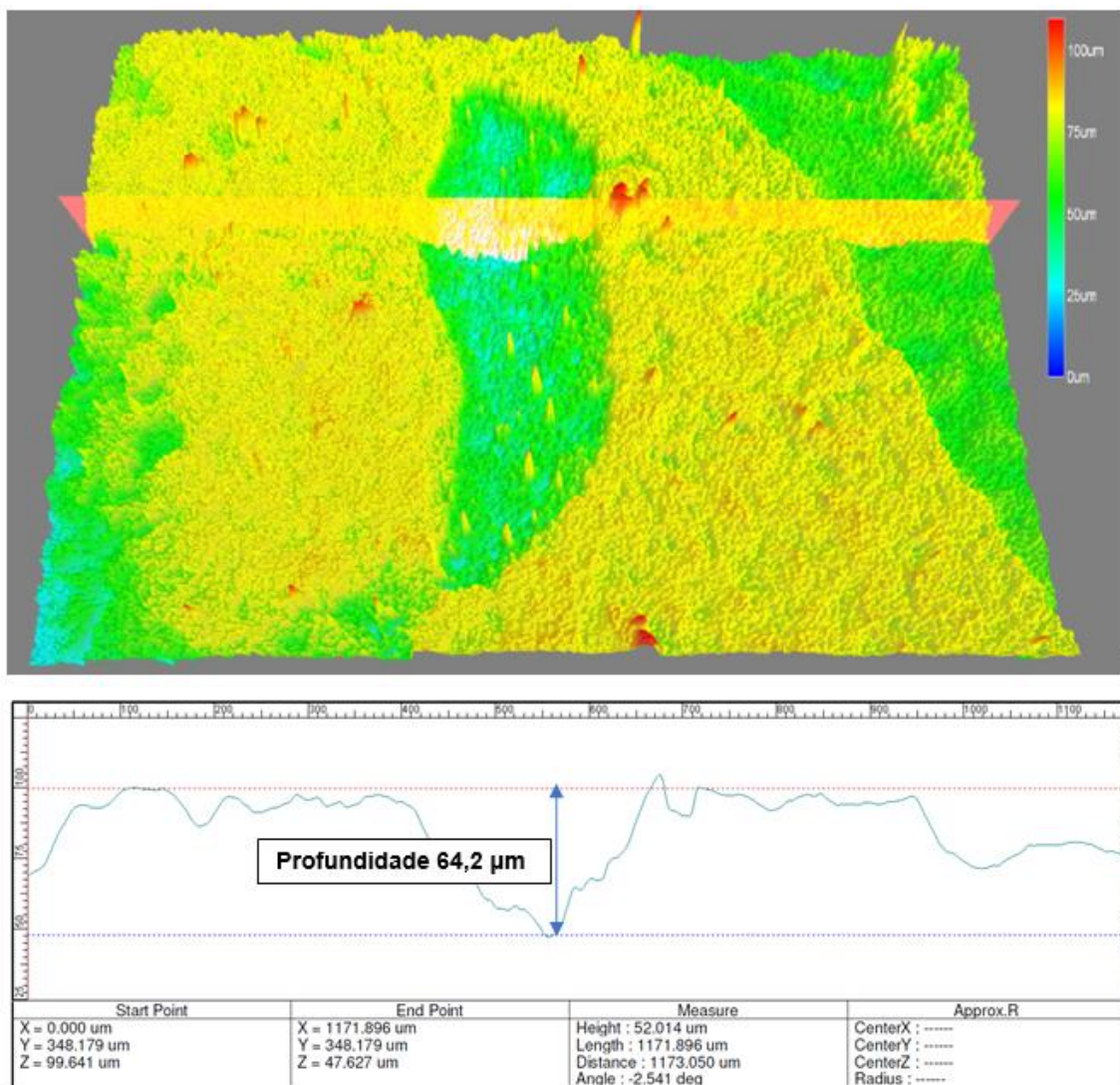


Figura 4.20-Avaliação por microscopia confocal da frente do cupom Sucção EB1.

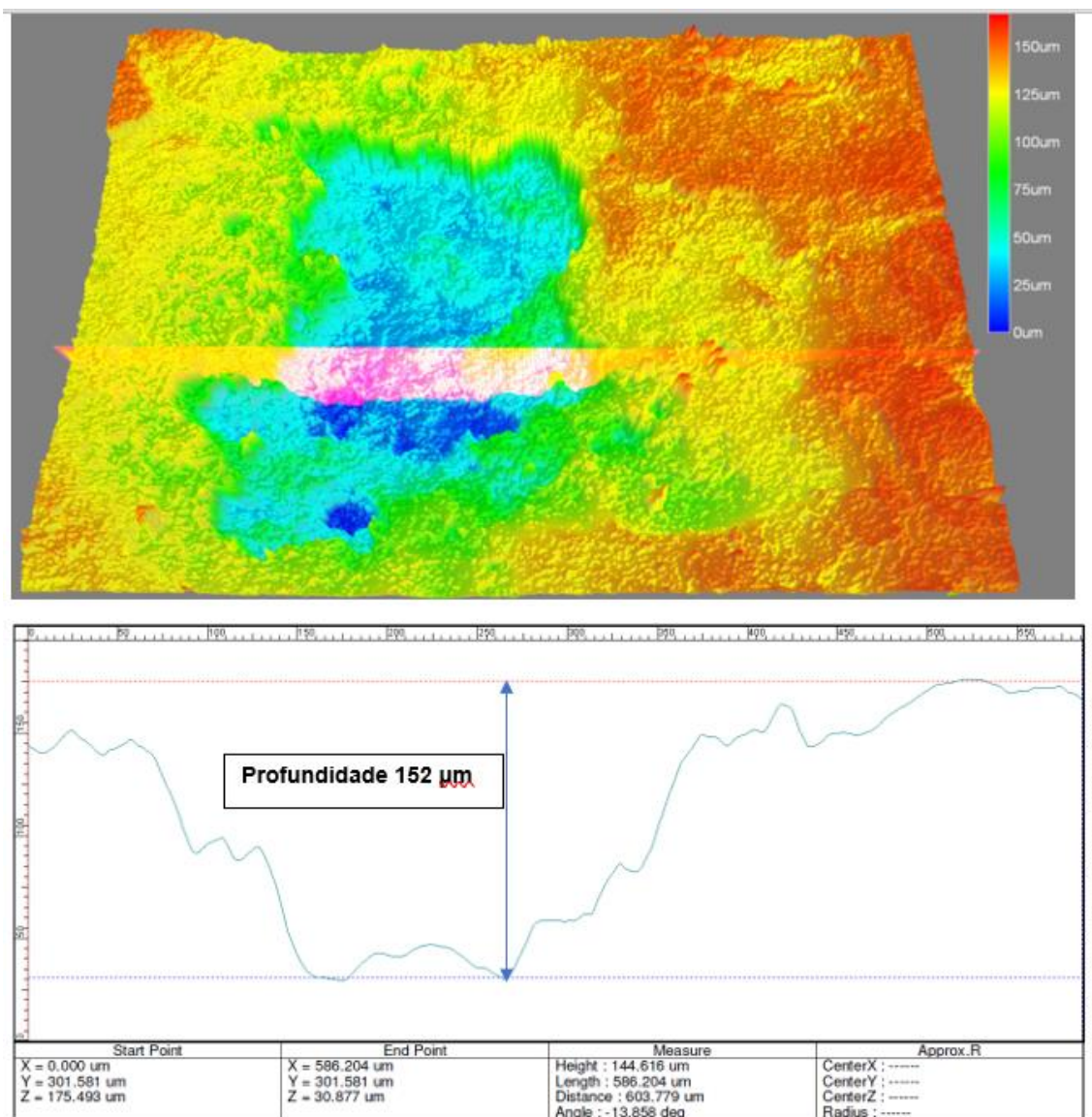


Figura 4.21 -Avaliação por microscopia confocal da frente do cupom Descarga EB1.

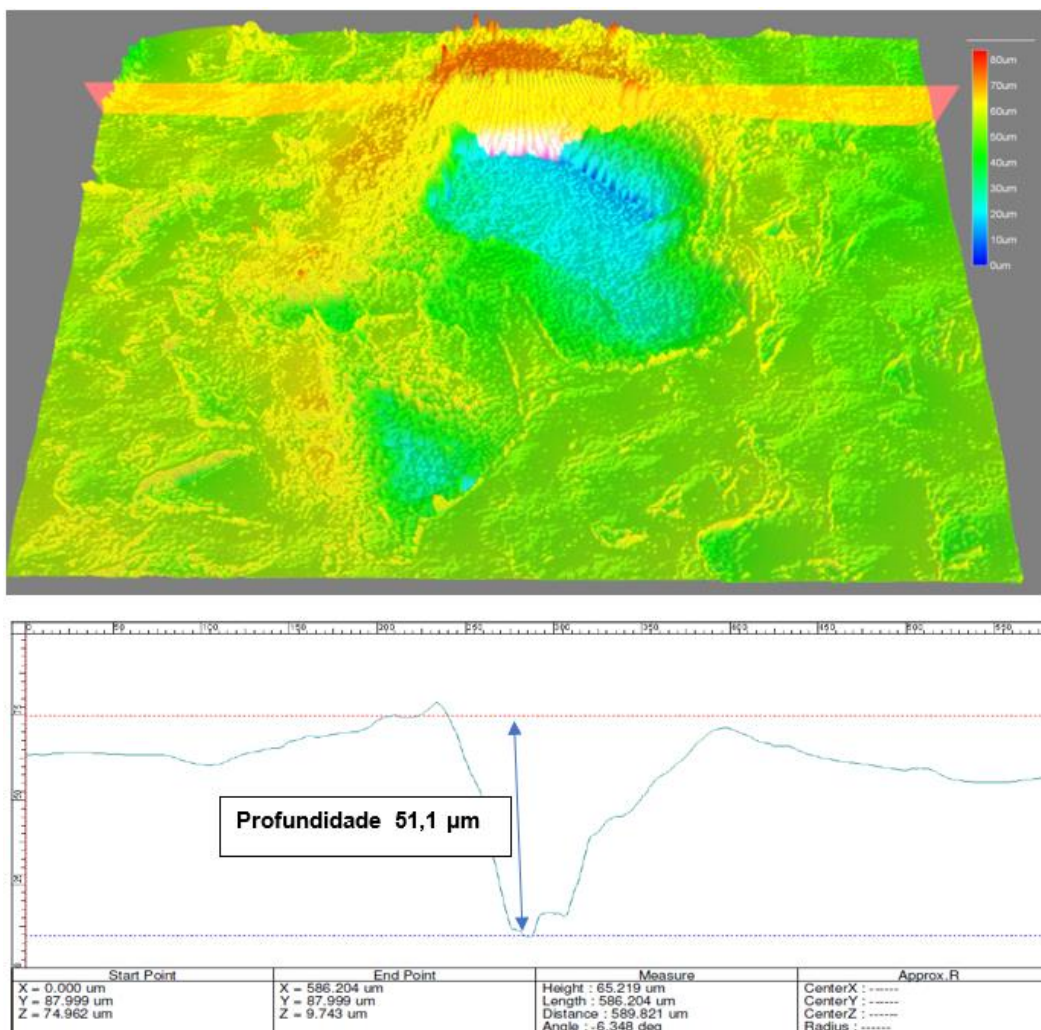


Figura 4.22-Avaliação por microscopia confocal da frente do cupom Sucção EB2.

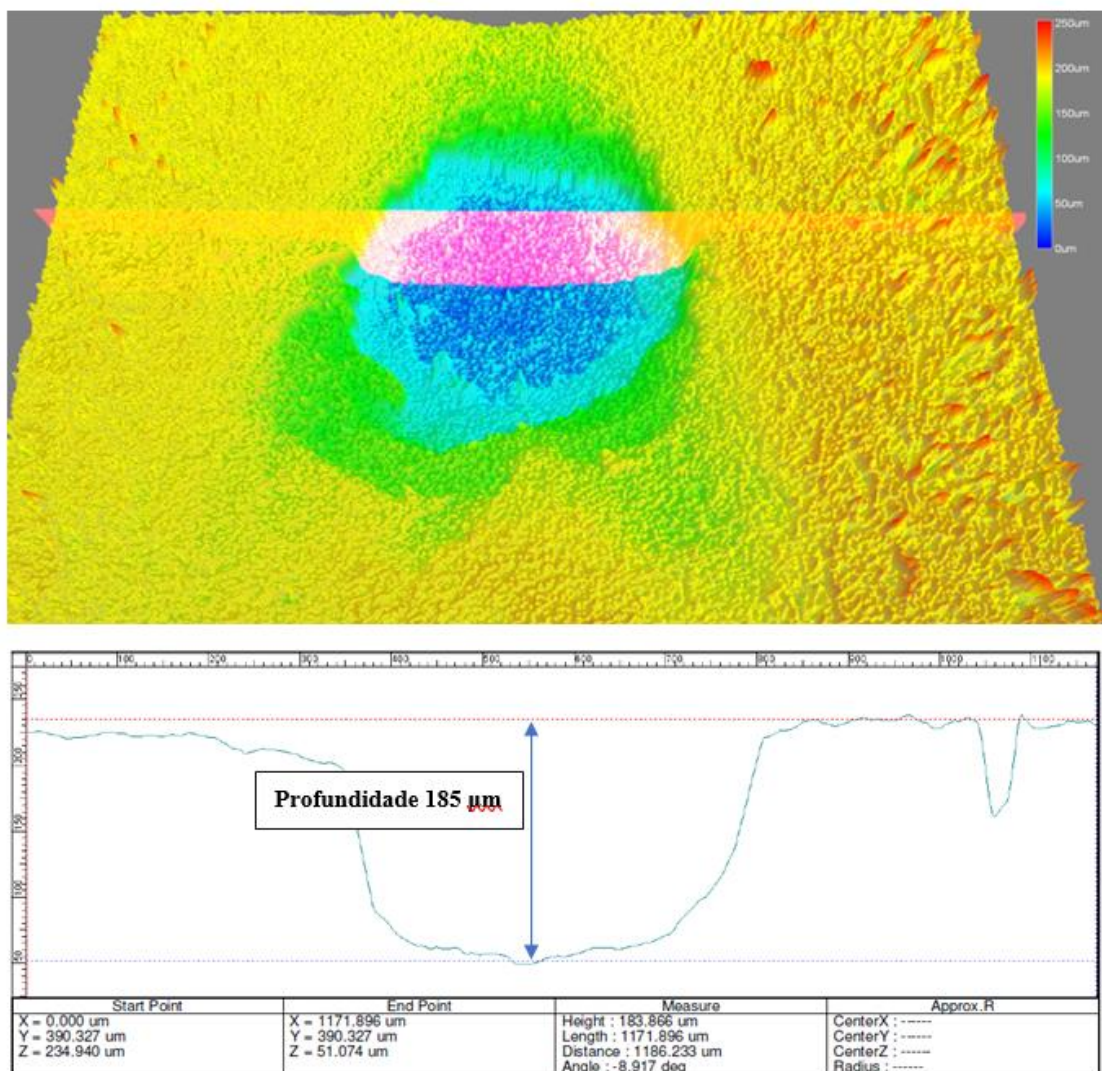


Figura 4.23 - Avaliação por microscopia confocal da frente do cupom Descarga EB2.

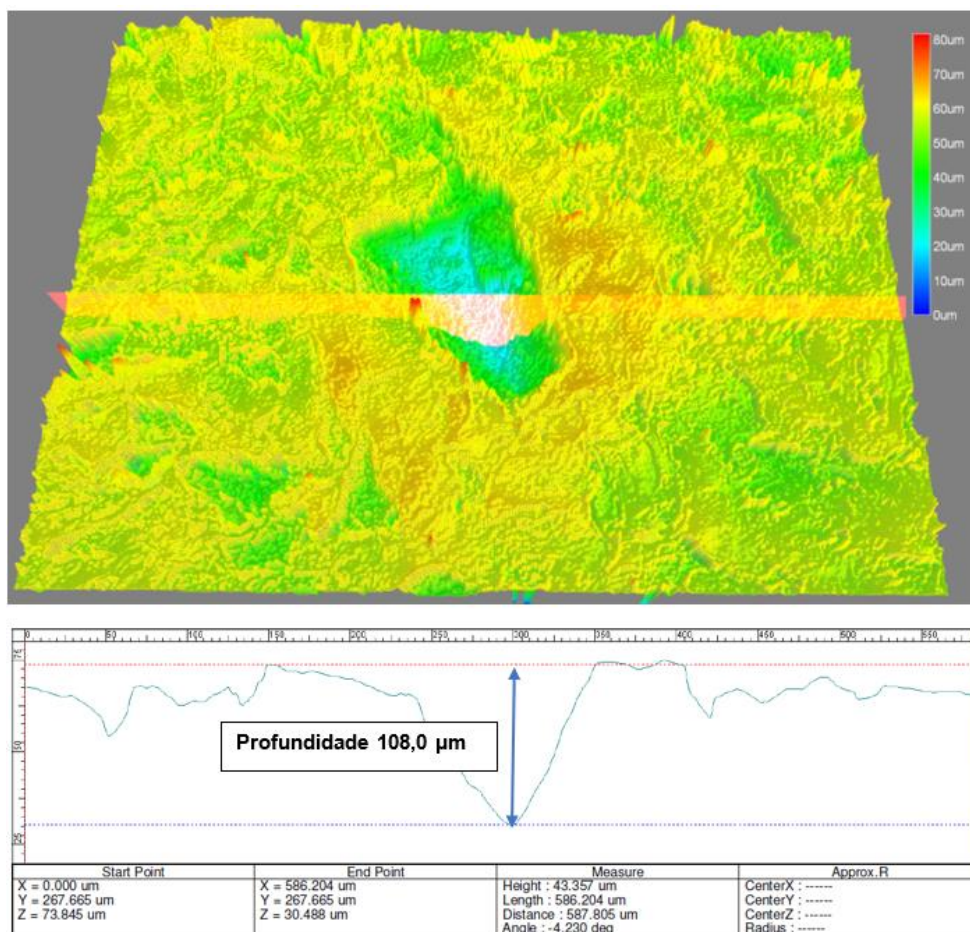


Figura 4.24- Avaliação por microscopia confocal da frente do cupom ET Saída.

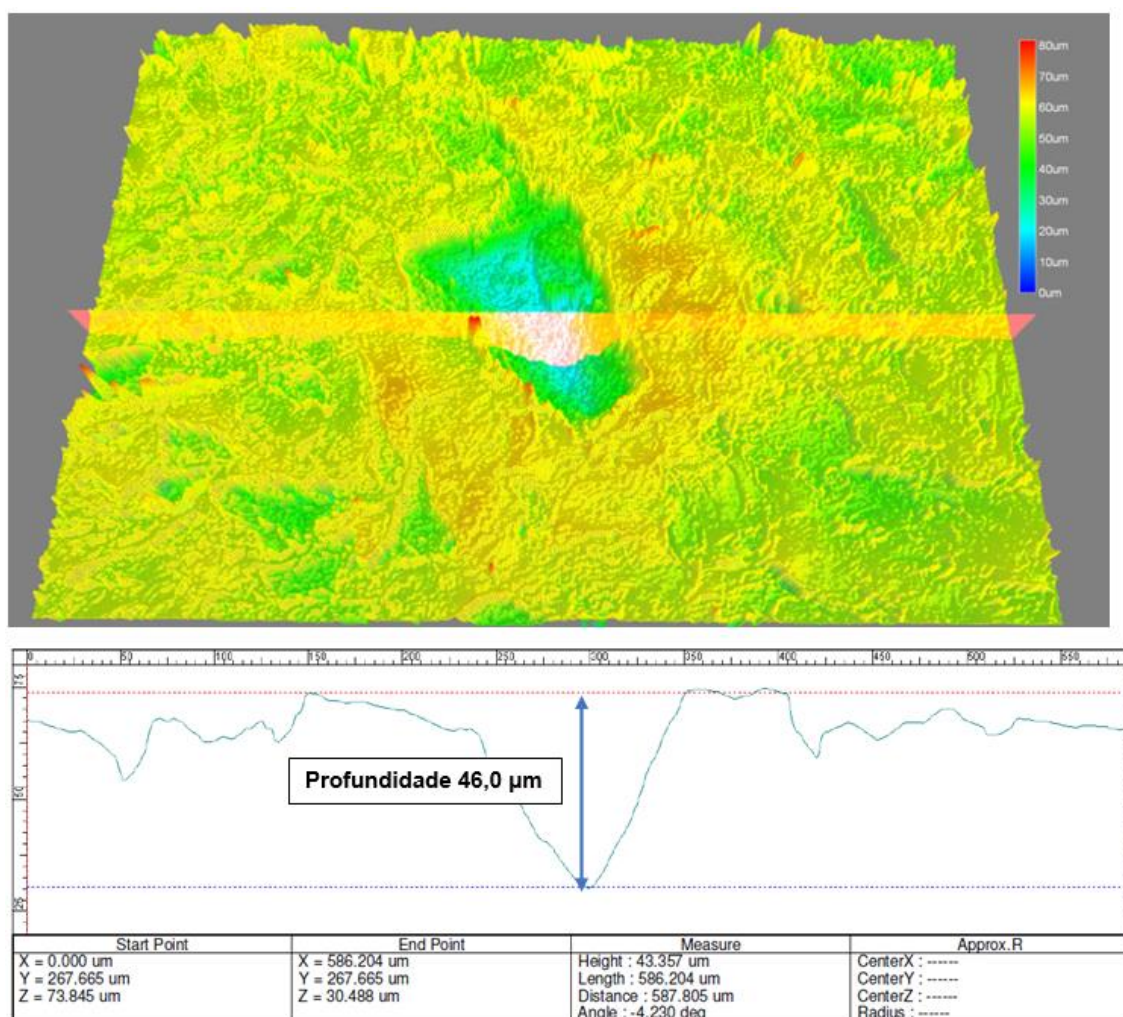


Figura 4.25 - Avaliação por microscopia confocal da frente do cupom ET Chegada.

Notou-se que o cupom instalado na Descarga EB2 apresentou um ataque tipo pite e o cupom instalado no final mineroduto Jr. apresentou a maior profundidade de ataque. Para melhor visualização e entendimento, a **Figura 4.26** apresenta os valores da profundidade máxima de ataque localizado nos respectivos cupons:

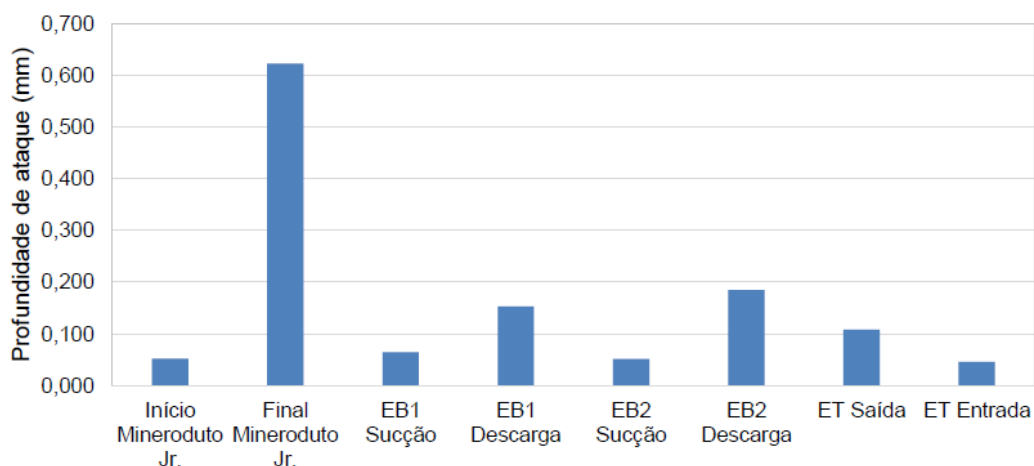


Figura 4.26 - Profundidade máxima de ataque localizado na superfície de frente dos cupons instalados no mineroduto apresentaram este tipo de ataque.

Vale ressaltar que apenas o cupom instalado na EV Entrada não apresentou ataque localizado. Com os dados disponíveis até o presente momento, não é possível apontar as reais razões da ocorrência do ataque localizado ser bem mais elevada no pondo final do mineroduto Jr. Mas algumas vertentes para futuros estudos já foram traçadas, como por exemplo, a influência do pH da água de flushing utilizada no processo de limpeza da tubulação e pretende-se também realizar algumas análises com um segmento de tubulação desse ponto.

4.3.2 Avaliação da análise de difração de raios X dos produtos de corrosão

Os produtos de corrosão encontrados nos cupons de campo foram retirados e submetidos a análises de DRX. A seguir, nas **Figura 4.27**, **Figura 4.28**, **Figura 4.29**, **Figura 4.30**, **Figura 4.31**, **Figura 4.32** e **Figura 4.33**, encontram-se os difratogramas dos produtos de corrosão extraídos dos cupons de campo:

Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)

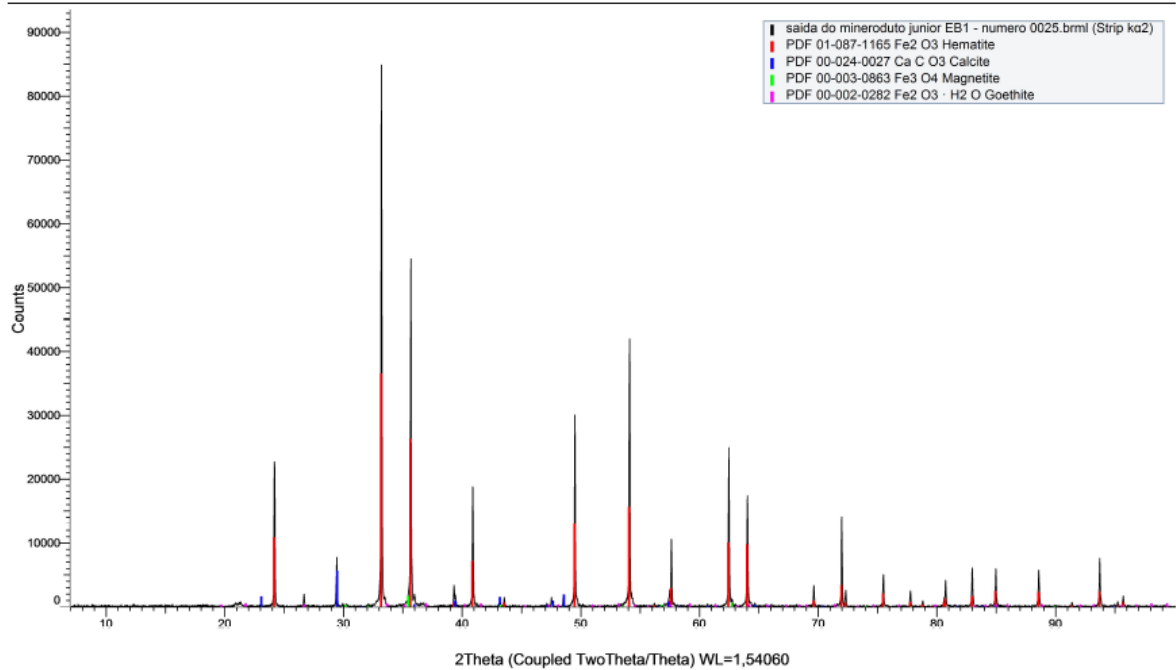


Figura 4.27 -Difratograma de raios X retirado do cupom de campo instalado no início do mineroduto Jr.

Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)

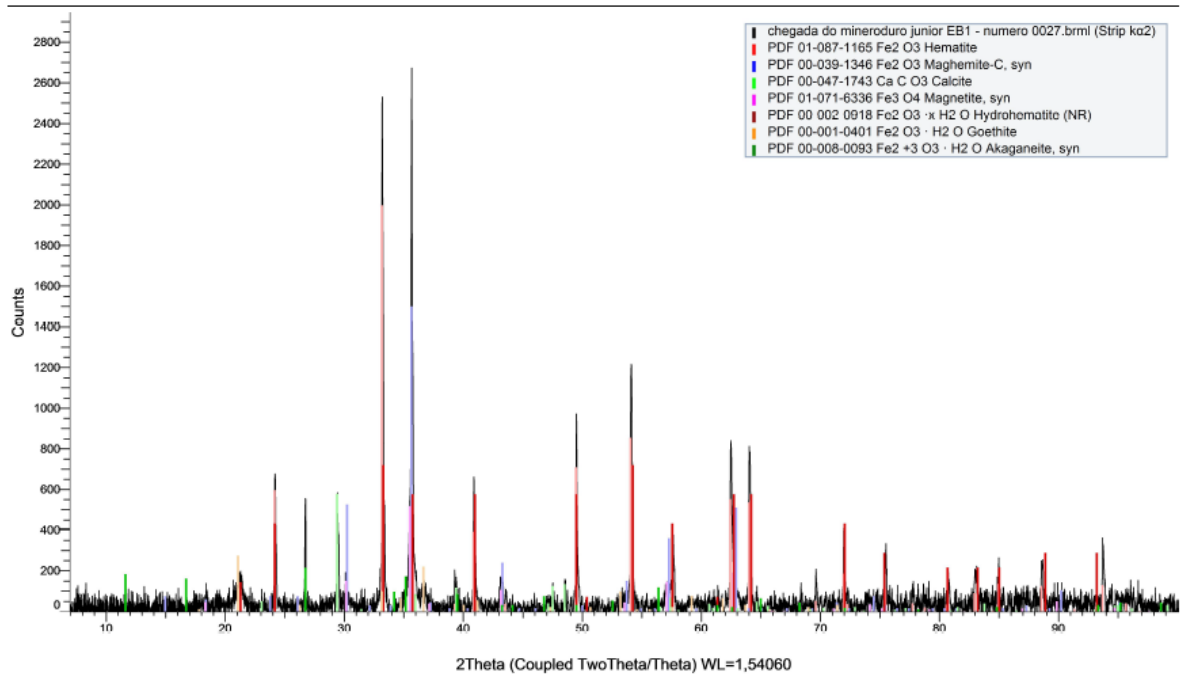
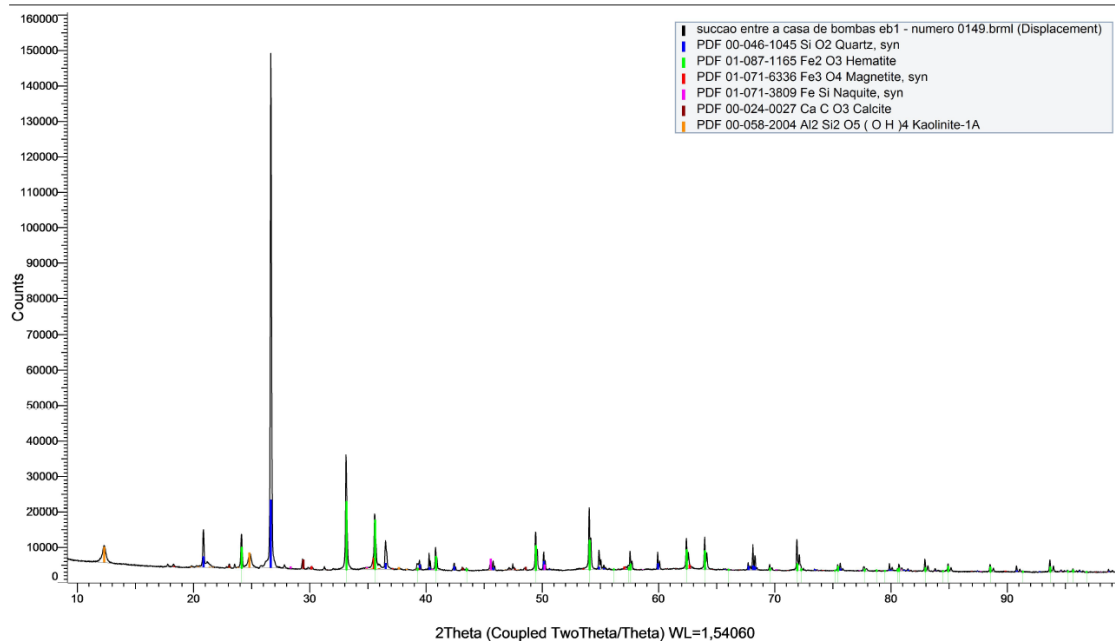
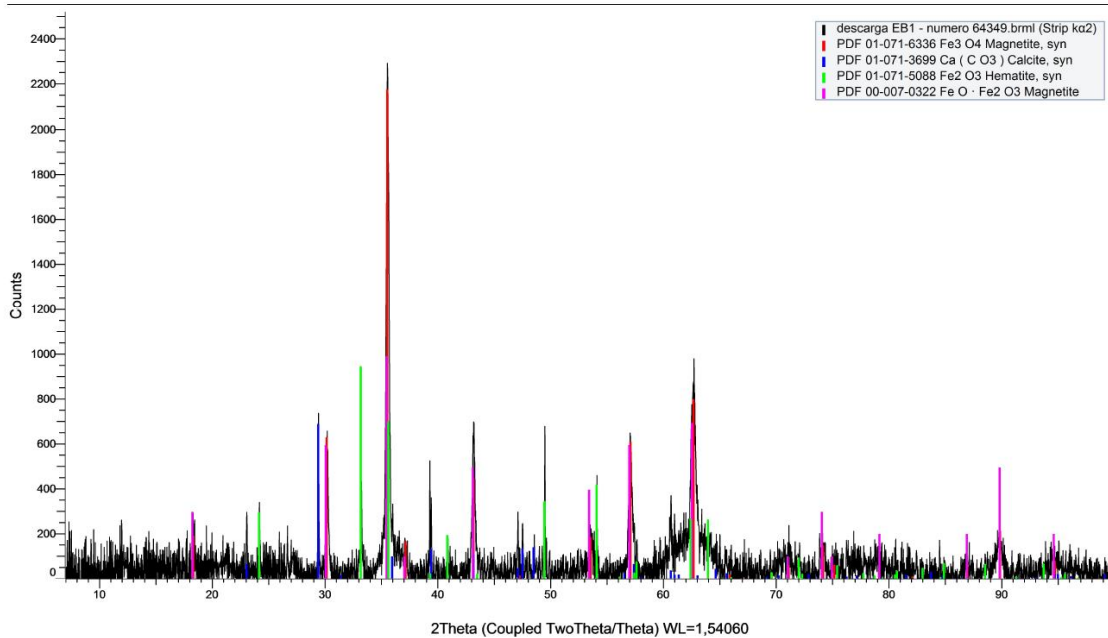


Figura 4.28-Difratograma de raios X retirado do cupom de campo instalado no final do mineroduto Jr.

Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)

**Figura 4.29 - Difratoograma de raios X retirado do cupom de campo instalado EB1 Sucção.**

Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)

**Figura 4.30 - Difratoograma de raios X retirado do cupom de campo instalado EB1 Descarga.**

Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)

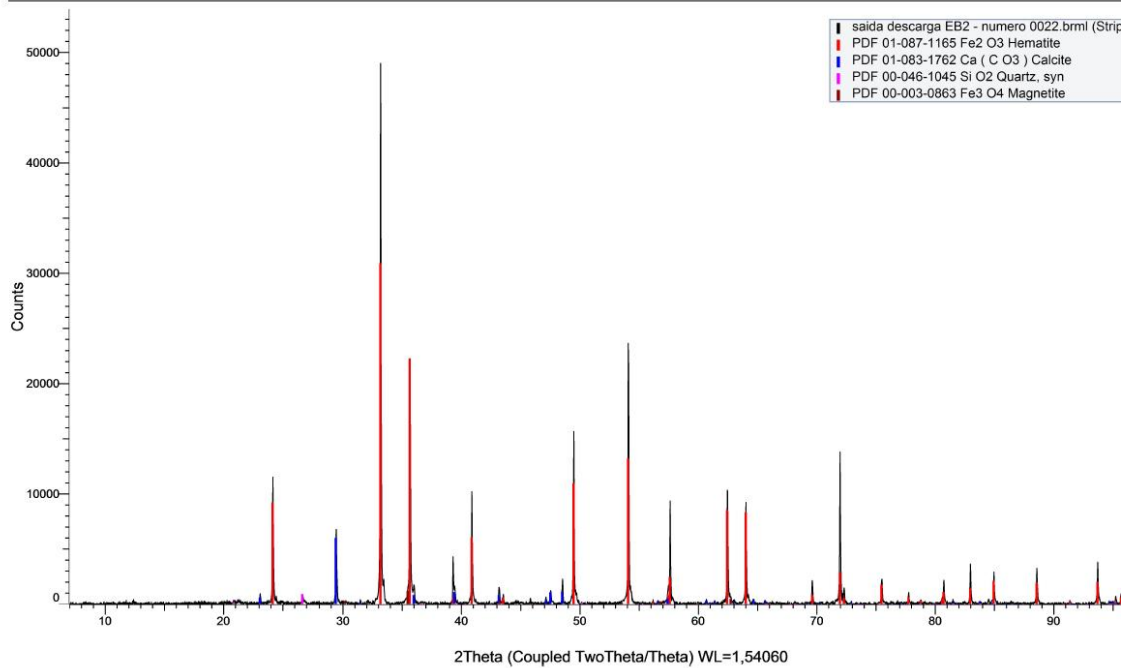


Figura 4.31 - Difratoograma de raios X retirado do cupom de campo instalado EB2 Descarga.

Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)

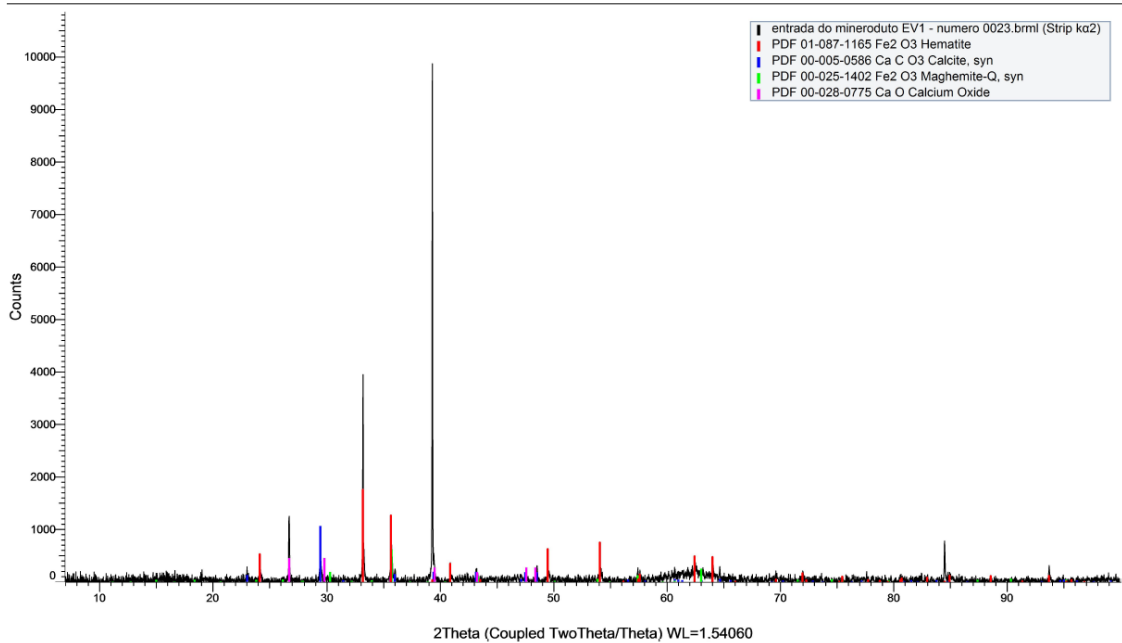


Figura 4.32 - Difratoograma de raios X retirado do cupom de campo instalado EV Entrada.

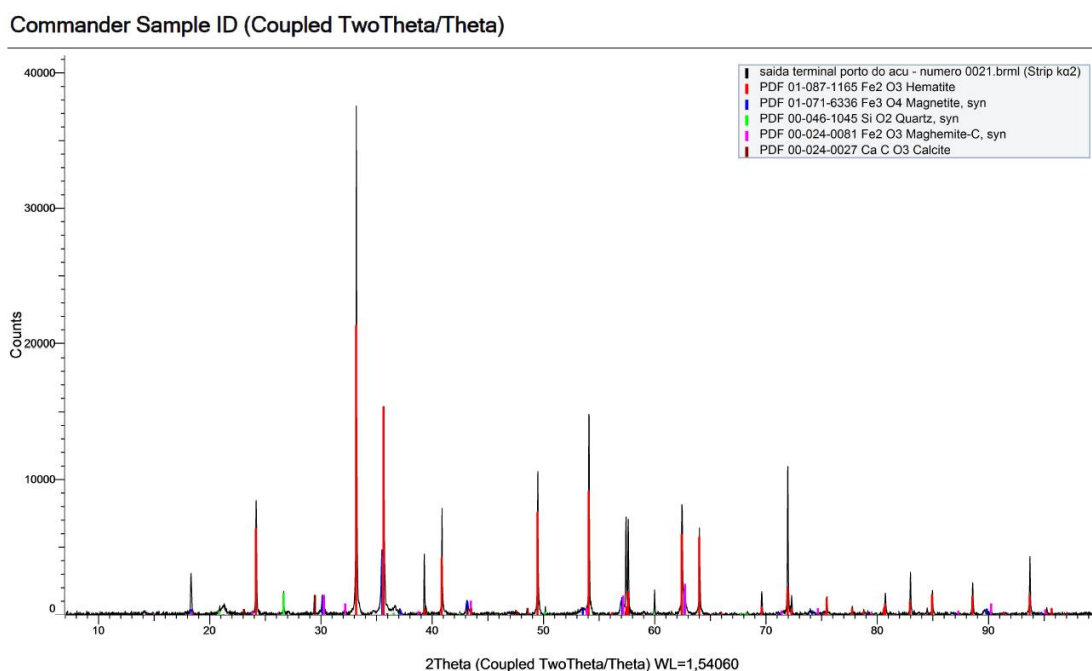


Figura 4.33 - Difratoograma de raios X retirado do cupom de campo instalado ET saída.

Os resultados das análises de DRX dos produtos de corrosão dos cupons estão apresentados abaixo na **Tabela VII**:

Tabela VII- Resultados da análise de difração de raios X das amostras retiradas da superfície dos cupons de corrosão.

Local de instalação	Resultado de difração de raios X
Início Mineroduto Jr.	Hematita (Fe ₂ O ₃) Calcita (CaCO ₃) Magnetita (Fe ₃ O ₄) Goethita (α-FeO(OH))
Final Mineroduto Jr.	Hematita (Fe ₂ O ₃) Maghemita (γFe ₂ O ₃) Calcita (CaCO ₃) Magnetita (Fe ₃ O ₄) Goethita (α-FeO(OH)) Akaganeíta (β-FeO(OH))

EB1 Sucção	Quartzo (SiO_2) Hematita (Fe_2O_3) Magnetita (Fe_3O_4) Calcita (CaCO_3) Caulinita 1A ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)
EB1 Descarga	Magnetita (Fe_3O_4) Calcita (CaCO_3) Hematita (Fe_2O_3)
EB2 Sucção	Não foi possível coletar amostra suficiente
EB2 Descarga	Hematita (Fe_2O_3) Calcita (CaCO_3) Quartzo (SiO_2) Magnetita (Fe_3O_4)
EV Entrada	Hematita (Fe_2O_3) Calcita (CaCO_3) Maghemita ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$)
ET Saída	Hematita (Fe_2O_3) Magnetita (Fe_3O_4) Quartzo (SiO_2) Calcita (CaCO_3)
ET Entrada	Não foi possível coletar amostra suficiente

A partir dos resultados de difração de raios X foi possível perceber que todos os produtos de corrosão analisados apresentaram hematita (Fe_2O_3) e a magnetita (Fe_3O_4) como fases preponderantes.

Panossian et al., (1993) explicam que na maioria das vezes, por conta de os produtos de corrosão não serem tão solúveis no meio, eles formam uma camada na superfície do metal composta de óxidos e/ou hidróxidos de ferro. Afirma-se também que existem duas

situações para o processo de corrosão do ferro, a corrosão sem interposição de uma barreira na interface metal/meio e a corrosão com a interposição de uma barreira na interface metal/meio. O produto de corrosão do ferro é totalmente solúvel no meio na primeira situação e a velocidade da taxa de corrosão dependerá da composição, microestrutura do aço e do meio de exposição. Nesse processo, as fases presentes possuem a capacidade de despolarizar as reações catódicas, isto é, facilitar a ocorrência de reações catódicas, determinam o aumento da taxa de corrosão. Já no segundo caso, a velocidade de corrosão do metal dependerá da eficiência protetiva da barreira formada pelos produtos de corrosão e não sofrem influência quanto a composição e microestrutura do aço. Há também a formação de hidróxido ferroso em que os íons hidroxila provenientes da reação catódica e os íons ferrosos da reação anódica reagem para formá-lo.

Segundo Hajj et al., (2013), no processo de corrosão aquosa, são formados alguns óxidos e oxi-hidróxidos de ferro (III), logo, a goethita, maghemita e hematita são susceptíveis a se formarem. Em ambientes com ausência de oxigênio, ocorre a maior formação de magnetita na superfície metálica. Em regiões com presença de oxigênio, os óxidos e oxi-hidróxidos de ferro, como por exemplo a goethita retardam o processo da oxidação do aço, visto que tais óxidos impedem o contato direto entre a superfície/meio com oxigênio dissolvido. Assim como Hajj (2013), Gentil (2007), afirma que produtos identificados como hematita, goethita, maghemita e variações desses, são produtos de corrosão comuns do aço-carbono e podem agir como camada protetora na superfície do metal.

Verifica-se a discordâncias entre os autores no que diz respeito a presença de goethita na camada de proteção. Alguns autores a caracterizam como barreira protetora, formando uma camada compacta e densa. A magnetita causa certa polêmica, pois alguns autores a caracterizam como protetora em alguns estudos e outros não. Entre os autores citados, a hematita não é caracterizada como protetora.

Foi verificada a presença da akaganeíta apenas no cupom que fora instalado no final do mineroduto Jr evidenciando a presença de cloretos no meio, afirma Bourdoiseau et al., (2008). Este resultado está associado ao fato de que a maior profundidade de pite foi

identificada justamente no final do mineroduto Jr. Ressalta-se que a ocorrência da akaganeíta não foi observada no produto de corrosão de nenhum outro cupom, o que pode indicar uma ocorrência isolada.

A presença de calcita e hidróxido de cálcio pode estar relacionada à utilização de hidróxido de cálcio no tratamento da polpa. Já a identificação do quartzo e caulinita, identificados nos padrões de amostras, podem estar relacionados à presença de resíduos do fluido transportado no mineroduto. Portanto, estes minerais são originados a partir do minério.

4.3.3 Determinação da taxa de corrosão generalizada

A determinação da taxa de corrosão generalizada nos cupons de campo foi baseada na norma ASTM G1 (2017) considerando área da superfície frente, da superfície verso (descontado a superfície protegida pelo anel de instalação) e a área lateral circunferencial. A **Tabela VIII** apresenta as características dos cupons instalados ao longo do mineroduto por um período de exposição de 96 dias e suas respectivas taxas de corrosão:

Tabela VIII - Características dos cupons instalados no mineroduto e valores de taxa de corrosão determinados por perda de massa.

Nº do cupom	Local de instalação	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Área (cm ²)	Taxa de corrosão (mm/ano)
1	Início do mineroduto Jr.	17,594	17,4223	15,22	0,048
2	Final do mineroduto Jr.	18,2529	17,9452	15,35	0,089
3	Sucção EB1	17,8843	17,7875	15,24	0,029
4	Descarga EB1	20,3592	20,192	14,73	0,049
5	Sucção EB2	17,8008	17,7838	15,13	0,005
6	Descarga EB2	17,5437	17,3475	15,12	0,06
7	Entrada EV	17,984	17,936	15,2	0,014
8	Saída ET	18,4298	18,3527	15,39	0,022
9	Entrada ET	17,4742	17,4615	15,14	0,004

Os dados dos cupons de número 1,2,3,4,6 e 8, referem-se aos cupons que apresentaram ataque intenso na superfície verso. Conforme já mencionado, as taxas de corrosão desses cupons não representam a situação real do mineroduto em estudo e, portanto, os resultados obtidos foram considerados não válidos. Isto é, os dados não são coerentes

com a realidade operacional. Os dados dos cupons de sucção EB2, Entrada EV e Entrada ET referem-se aos cupons sem corrosão intensa na superfície verso, portanto válidos.

Na **Figura 4.34** tem-se os valores da taxa de corrosão que foram apresentados na **Tabela VIII**:



Figura 4.34 - Valores de taxa de corrosão.

Diante dos dados trazidos na **Figura 4.34**, ficou claro a discrepância entre os valores da taxa de corrosão dos cupons que apresentaram um intenso ataque de corrosão com os demais. Isso indica que houve anomalia no procedimento de instalação de tais cupons.

A partir dos resultados verificados nos ensaios com os cupons de perda de massa, pode-se afirmar que os ensaios eletroquímicos realizados com amostras de fluidos coletadas no Reservatório EB1, Sucção EB1, Barragem EB2, Sucção EB2 e Estação terminal, mostraram-se coerentes como sendo representativos às condições de campo. Já que os dados obtidos foram coerentes com os resultados dos ensaios realizados com cupons de perda de massa que representam as reais condições operacionais. Ressalta-se que isso só ocorreu com os cupons que foram instalados corretamente.

4.4 Análises do material coletado pela passagem do PIG de limpeza

4.4.1 Análise química global

Para detectar a composição e concentração de elementos presentes no material, optou-se por aplicar a técnica não destrutiva de fluorescência de raios-X utilizando o equipamento de modelo AXIOS Fast (equipamento simultâneo) com tubo de potência máxima de 4,0kV e software Super-Q. O resultado da análise química global do material coletado pela passagem do PIG está apresentado na **Tabela IX**:

Tabela IX - Resultado da análise química global

Elemento	Concentração dos elementos %
Al ₂ O ₃	0,33
Ca	0,096
CaO	0,134
Fe	68,36
K ₂ O	< 0.100
Mg	< 0.01
MgO	0,009
Mn	0,019
Na ₂ O	< 0.10
P	0,016
SiO ₂	1,36
TiO ₂	0,058

De acordo com os resultados da análise química quantitativa efetuada pela espectrometria de fluorescência de raios X, foi observada a presença majoritária do ferro e do oxigênio, teores intermediários de silício, cálcio, e alumínio, seguindo para teores menores de magnésio, fósforo e titânio.

Rocha (1997) afirma que a presença do titânio identificada na análise, pode estar associada a contaminantes no minério lavrado. É sabido que o dióxido de titânio é um elemento constituinte do aço do mineroduto, logo, a amostra analisada pode ter sido coletada com alguma parte insignificante do metal que fora retirado pelo PIG durante o percurso.

4.4.2 Análise granulométrica

As amostras coletadas pelo PIG de limpeza foram enviadas ao laboratório para ser submetidas a técnica de peneiramento a úmido. A **Tabela X** representa a porcentagem de materiais passante das respectivas malhas:

Tabela X - % passante nas respectivas malhas do material coletado pela passagem do PIG.

Malhas (μm)	% Passante
300	100
150	98,87
74	90,46
44	27,91

Pelos resultados apresentados na **Tabela X**, percebe-se que se trata de um material mais grosseiro do que é bombeado. Já que a polpa transportada possui características granulométricas (% do material passante) maior do que a amostra em questão, como apresentado na

Tabela XI. Isto é, o material coletado pela passagem do PIG é mais grosseiro que o bombeado.

Tabela XI - % passante nas respectivas malhas do material bombeado.

Malhas (μm)	% Passante
300	100
150	99,695
74	98,08
44	81,725

4.4.3 Caracterização mineralógica dos resíduos sólidos

A partir da análise qualitativa, via espectro EDS, foi possível detectar os elementos químicos presentes no material coletado pela passagem do PIG e consequentemente, essa detecção foi utilizada para direcionar a identificação dos padrões de difratometria de raios X. Abaixo, na **Figura 4.35**, está apresentado o espectro EDS da amostra coletada pela

passagem do PIG. Na melhor visualização dos dados, o gráfico da **Figura 4.36** apresenta as porcentagens dos elementos químicos identificados na análise de EDS.

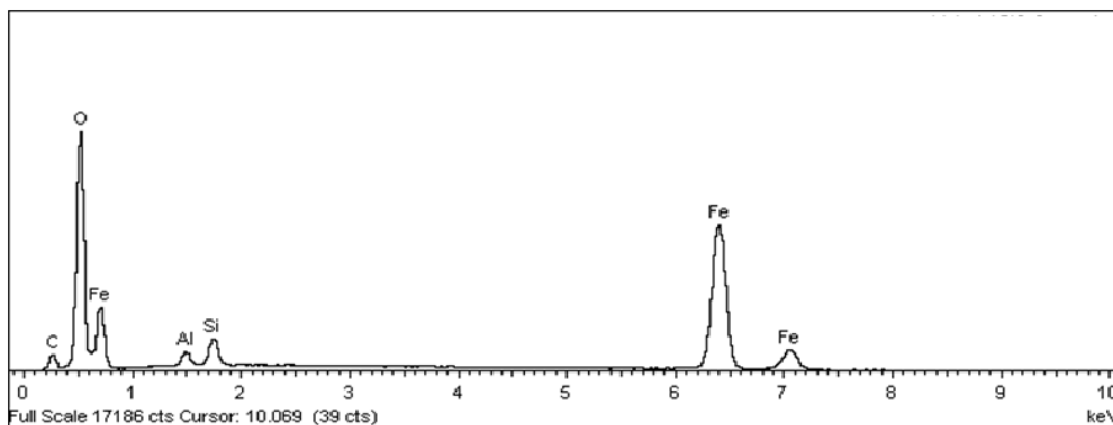


Figura 4.35 - Espectro de EDS do resíduo sólido coletado na passagem do PIG.

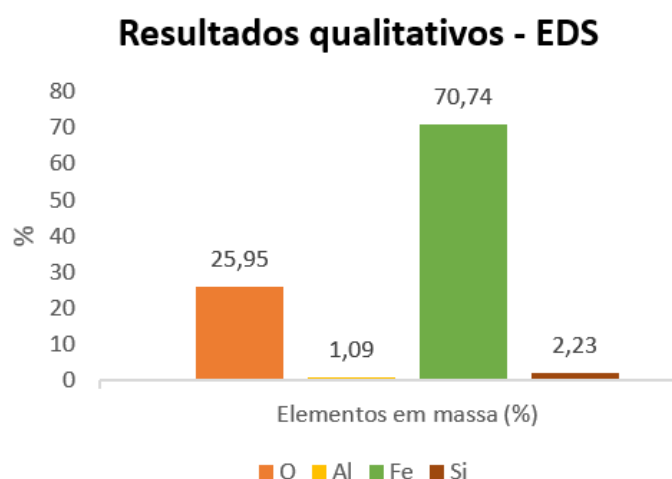


Figura 4.36 – Resultados qualitativos (%) da análise de EDS.

Como os óxidos de ferro são os principais componentes da polpa transportada, já era esperado que o ferro e o oxigênio fossem os elementos químicos detectados em maior quantidade. Rocha (1997), considera a possibilidade de a presença da alumina ser proveniente de impurezas do fluido transportado. Já o silício é oriundo do quartzo. Esse por sua vez é o principal elemento constituinte da ganga, afirmam Feitosa et al., (1993).

O difratograma de raio X do material coletado pela passagem do PIG encontra-se abaixo na **Figura 4.37**. E os resultados dessas análises estão apresentados na **Tabela XII**. A partir dessas análises, era esperado que a fase predominante presente no produto de corrosão fosse a magnetita (Fe_3O_4). Outras fases, inclusive as originárias do minério, também eram esperadas de serem detectadas, já que são elementos importantes para avaliar o fenômeno da corrosão.

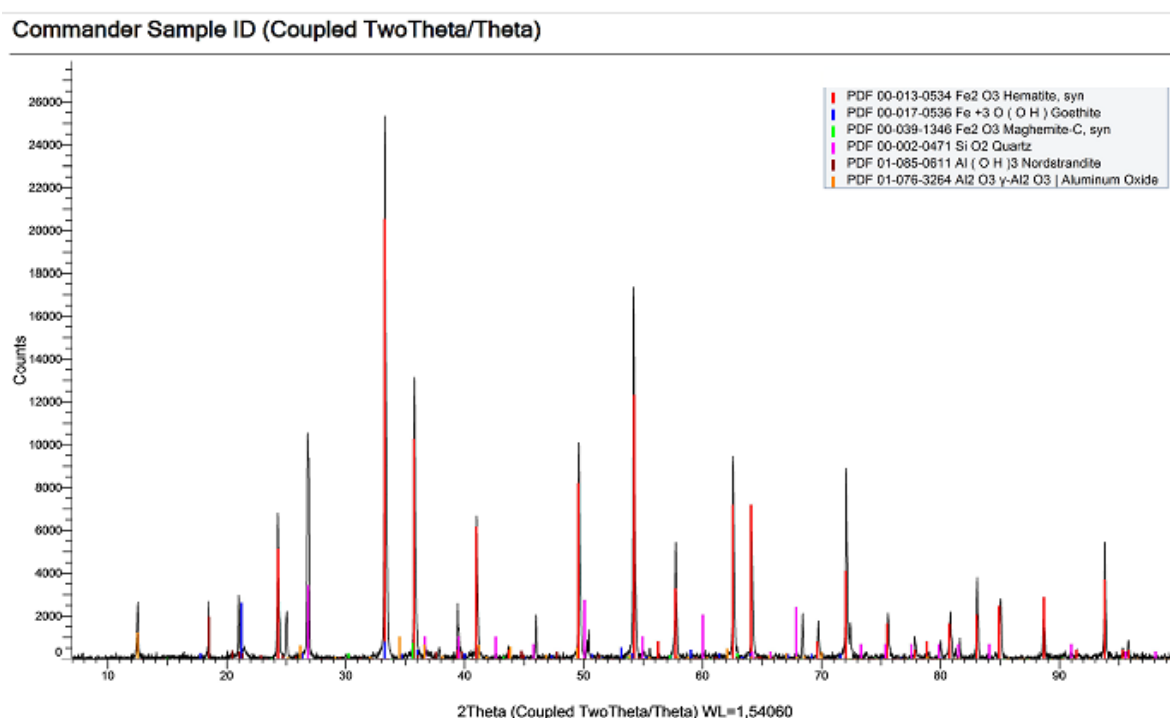


Figura 4.37 –Difratograma de raio X do material coletado pela passagem do PIG de limpeza (resíduos sólidos).

Tabela XII - Resultados da análise de difração de raios X dos resíduos secos da amostra do material coletado pela passagem do PIG de limpeza.

Resultados de difração de raios X
Hematita (Fe_2O_3)
Goethita ($\alpha \text{FeO}(\text{OH})$)
Maghemita ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$)
Quartzo (SiO_2)

Nordstrandita (Al (OH) ₃)

Algumas fases bastante conhecidas como produtos de corrosão do aço carbono (hematita, goethita e maghemita) foram identificadas, como mostrados na **Tabela XII**. Outras fases são oriundas dos minérios constituintes da polpa transportada, como quartzo e nordstrandita.

5 CONCLUSÕES

Após a realização das análises e discussão dos resultados, as seguintes conclusões podem ser obtidas e posteriormente, colocadas em prática no mineroduto Minas- Rio:

- Os ensaios eletroquímicos mostraram-se adequados como sendo representativos às condições de campo, pois estão coerentes com os dados verificados nos ensaios realizados com cupons de perda de massa que foram instalados corretamente.
- O aço carbono em contato com as soluções do reservatório EB1 e barragem EB2 apresentaram maiores valores das taxas de corrosão.
- A partir da análise das curvas de polarização potenciodinâmica, o aço exposto a solução reservatório EB1 e barragem EB2 apresentava características de corrosão generalizada em que a corrente aumentava continuamente com o potencial. O aço carbono apresentou a maior taxa de corrosão no meio da barragem EB2.
- Já nos pontos de sucção EB1, sucção EB2 e estação terminal foi observado a passivação do aço com a mesma densidade de corrente passiva. Entretanto, o aço nos pontos de sucção EB2 e estação terminal apresentou menor potencial de pite em relação ao aço na sucção EB1. Nos meios de sucção EB2 e estação terminal, em que ocorreu a antecipação da quebra da camada passiva, foram detectadas maiores concentrações de sulfato em relação aos demais meios. Assim, o aço se mostrou mais resistente a corrosão no ponto de sucção EB1.
- Foi identificada a presença de akaganeíta como produto de corrosão do cupom instalado no final do mineroduto Jr.. Esse mineral é formado em meios com presença de cloretos. Também foi possível notar a maior taxa de corrosão no final do mineroduto Jr. quando comparado aos demais pontos, além da maior profundidade de ataque do aço.

- Notou-se que o cupom instalado na Descarga EB2 apresentou um ataque localizado tipo pite.
- Os maiores valores da taxa de corrosão foram obtidos nos cupons instalados no final do mineroduto Jr. e na descarga EB2.
- Com as análises de DRX dos produtos de corrosão presentes nos cupons de campo foi possível notar hematita (Fe_2O_3) e a magnetita (Fe_3O_4) como fases dominantes.
- O ferro foi o elemento identificado em maior quantidade nos produtos coletados na passagem do PIG.
- No material coletado pela passagem do PIG foi possível identificar a hematita, goethita e maghemita como principais produtos de corrosão do aço carbono.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com os resultados apresentados nessa pesquisa, torna-se necessária realização de análises microbiológicas dos fluidos bombeados. Recomenda-se a verificação dos suportes de instalação dos cupons de perda de massa e dos procedimentos de instalação de modo que se evite a infiltração dos fluidos na região de contato do cupom com o seu suporte.

Também se recomenda um estudo morfológico, por MEV com apoio de EDS, do material carregado pelo PIG de limpeza.

7 REFERÊNCIAS

ABDEL-GABER, A.M., KHALIL, M., ABOU EL-FETOUH, A. *The dissolution mechanism of steel in inorganic acids*, Anti-Corrosion Methods and Materials, v. 50, n. 6, pp. 442-447, 2003.

ASM, *Fundamentals, Testing, and Protection*, v.13,2003.

ASTM, *Standard Tests Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements*. G59, 2009.

ASTM, A. *Standard terminology relating to wear and erosion*. G40, 2013.

ASTM, *Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*. G1, 2017.

ASTM, *Standard Guide for Determining Synergism between Wear and Corrosion*. G 119-04, 2006.

ASTM, *Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals*. G31-72, 1999.

ASTM, *Standard Guide for Determining Synergism between Wear and Corrosion*. 1993.

ASTM, *Standard Guide for examination and evaluation of corrosion pitting*. G 46-94, 2005.

ASTM, *Standard reference test method for making potentiodynamic anodic polarization measurements*. G 5,2014.

ASTM, *Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion*. G46, 2021.

BARSOUKOV, E.; MACDONALD, J. R. *Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Applications*, 2nd ed. (Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2005), 2005.

BAUER, E., & HELENE, P. R. *Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas*. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

BLATT, W.; KOHLOEY, W.; LOTZ, U.; HEITZ, E. *The influence of hydrodynamics on erosion-corrosion in two-phase liquid-particle flow*. *Corrosion*, v. 45, n. 10, p. 793-804, 1989.

BOURDOISEAU, J.A.; JEANNIN, M.; SABOT, R.; RÉMAZEILLES, C.; REFAIT, P. *Characterisation of mackinawite by Raman spectroscopy: Effects of crystallisation, drying and oxidation*. *Corrosion Science*, v.50, p. 3247-3255, 2008.

BROCK, T., MADIGAN, M., MARTINHO, J., & PARKER, J. *Microbiologia de Brock*. 2010.

BRUSAMARELLO, V.J., HUDSON, J.L., SCULLY, J.R., LUNT, T., MIKHAILOV, A.S, "*Spatial interactions among localized corrosion sites*", *Journal of Electrochemical Society*", v. 149, n. 5, pp. B163 - B173, 2002.

CALLISTER, W. D. Jr. *Materials science and engineering; an introduction*. 4.ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., p.555, 1997.

CARDOSO, J. L., PANOSSIAN., Z., *Cinética eletroquímica: comparação de curvas de polarização teóricas com as curvas experimentais*, INTERCORR, Salvador (BA), 2012.

CARVALHO, D. S. *Estudo da corrosão do ferro e das ligas ferro-cromo em meio aquoso: Efeito do pH, CO₂ e de pequenas adições de aceta*, Rio de Janeiro, 2004

CASTELA, A. S, SIMÕES. A. M, “Assessment of Water Uptake in Coil Coatings by Capacitance Measurements”, *Progress in Organic Coatings* v. 46, pp 55- 61, 2003.

CAVANO, R. R. *Sulfites for Oxygen Control*. (EUA). Disponível em: <http://scrantonassociates.com/soc.pdf>. Acesso em: 18/11/2021.

CHRISTODOULOU, P.; DROTLEW, A.; GUTOWSKI, W. *The effect of carbon, chromium and silicon content on wear resistance of ferritic Fe-Cr-C cast alloys*. *Wear*, v. 211, n. 1, p. 129-133, 1997

CLARK, H. M. *The influence of the flow field in slurry erosion*. *Wear*, v. 152, n. 2, p. 223-240, 1992.

CORREIA, J.C.G. *Peneiramento e Classificação*. In: LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A. (ED). *Tratamento de Minérios Ed 5*. Cap. 6. Pp 197 a 297. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

DA NÓBREGA, A. C. V., BARBOSA, A. F. F., DA SILVA, D. R., PIMENTA, G. S., & PEIXOTO, D. G. *Estudo de caso-Corrosão interna em dutos transportadores de gás natural*, 2003.

DA SILVA OLIVEIRA, L. H. L., SILVA, J. M., DE SOUSA, A. R. F., DE ARAUJO CARDOSO FILHO, J. C., BESERRA, A. A. F., MEDEIROS, R. S. M., & AMARAL, R. D. S. M. *Avaliação da técnica de injeção de corrente no diagnóstico de corrosão em estruturas enterradas*. *Engevista*, 20(5), p - 661-670,2018.

DUGSTAD, A. “*The importance of FeCO₃ supersaturation on the CO₂ corrosion of carbon steels*”, *CORROSION* 92, Paper n. 14, Houston TX, NACE, 1992.

EFIRD, K. D., ET AL. *Correlation of Steel Corrosion in Pipe Flow with Jet Impingement and Rotating Cylinder Tests*, *Corrosion*, v. 19, n. 12, p. 992-1003, 1993.

FEITOSA, V. M. N., SILVA, J. P., RABELO, P. J. B., COELHO, L. H. *Estudos de caracterização mineralógica e suas implicações no processo na mina de Alegria*. In: Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 7º, 1993, Belo Horizonte. Anais do workshop geologia estrutural dos minérios de ferro. Belo Horizonte: FAPEMIG. p. 369-373,1993.

FERRAMENTA DE INSPEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE SUPERFÍCIE: MICROSCOPIA CONFOCAL A LASER. Laboratório Nacional de Nanotecnologia (LNNano). Campinas, SP. Disponível em: <https://lnnano.cnpem.br/instalacoes/micro-e-nanofabricacao/ferramentas-inspecao/microscopia-confocal-a-laser/>. Acesso em: 12/07/2023.

FERREIRA, P. A., FERREIRA, C. V. M., PEIXOTO, D. G., DA SILVA, E. D. C., & JUNIOR, H. A. S. *Experiência de Campo na Avaliação da Corrosão Interna de Oleodutos Terrestres: Estratégias e Técnicas Utilizadas*. In: 20º Congresso Brasileiro de Corrosão, ABRACO. Fortaleza, CE. 2000.

FONTANA, M.G.; GREENE, N.D. Corrosion Engineering., *New York. Materials Science and Engineering Series*, 1978.

FRANKEL, G. S., VIENNA, J. D., LIAN, J., GUO, X., GIN, S., KIM, S. H., ... & SCULLY, J. R. *Recent advances in corrosion science applicable to disposal of high-level nuclear waste*. Chemical Reviews, v.121, n. 20, p.12327-12383, 2021.

GALERY, R., VALADÃO, G.E.S., MONTENEGRO, L.C.M. *Introdução ao Tratamento de Minérios*, Cap 6, ed. 1, Belo Horizonte, Editora UFMG, 2012.

GEESEY, G.G., STUPY, M.W., BREMER, P.J., *The dynamics of biofilms*, International Biodeterioration & Biodegradation, v. 30, pp. 2-3, pp. 135-154, 1992.

GENTIL, V. *Corrosão*. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2007.

GOOGLE MAPAS. Disponível em: <http://mapas.google.com>. Acesso realizado em 22/04/2022.

GOMES, A. C.T. *Análise da Corrosão e da Erosão-Corrosão do Aço Carbono em meio com NaHCO₃ e CO₂*. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2005(Dissertação, Mestrado em Engenharia de Materiais e Processos).

GOUDA, V.K.; SAYED, S.M. *Corrosion inhibition of steel by sodium sulphite. Corrosion Science*, v.13, p 653-658, 1973.

GRANDES CONSTRUÇÕES: AÇO NA CONSTRUÇÃO. São Paulo: Sobratema, v. 79, maio 2017. Disponível em: http://www.grandesconstrucoes.com.br/Arquivos/Edicoes/GC_79.pdf... Acesso em: 12/12/2021.

GREENHAUS, J. H.; PARASURAMAN, S. *Vocational and organizational behavior, 1985: A review. Journal of vocational Behavior*, v. 29, n. 2, p. 115-176, 1986.

HAJJ, H. E., ABDELOUAS, A., MENDILI Y. E., KARAKURT, G., GRAMBOW, B., MARTIN, C. *Corrosion of carbon steel under sequential aerobic-anaerobic environmental conditions. Corrosion Science*, v.76, p.432-440, 2013.

HASS, F. *Avaliação da influência do número da acidez naftênica e da temperatura no comportamento corrosivo em aço AISI 316 utilizando técnica de Ruído Eletroquímico*. 2013.

HERRO, H. M., PORT, R. D. *The Nalco guide to cooling water system failure analysis*. New York: McGraw-Hill, p.420,1993.

HUANG, X.; WU, Y. *A high Cr-Mo alloy iron. Journal of materials engineering and performance*, v. 7, n. 4, p. 463-466, 1998.

INSTITUO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S/AIPT. *Avaliação técnica das condições de integridade e de gestão de riscos do mineroduto do sistema minas-rio - etapa 1*. Rio de Janeiro - Rj., 2018.

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY. The Gold Book: IUPAC *Compendium of Chemical Terminology*. Disponível em: <http://goldbook.iupac.org/>. Acesso em: nov. de 2021.

INSTRUMENTS, G. *Introduction to Electrochemical Impedance Spectroscopy*. Application Note: Warminster, PA, USA,2015.

JAIME, P., GOTTLIEB, P., BUTCHER, A., DOBBE, R. *The applicability of automated mineralogy on process planning, process optimisation, quality control, audit studies and trouble shooting, with emphasis on processing plants*. Proceedings of Procemin 2009 Conference, Santiago, Chile, 2009.

JIGLETSOVA, S.K., RODIM, V.B., KOBELEV, V.S., ALEKSANDROVA, N.V., RASULOVA, G.E., KHOLODENKO, V.P. *Studies of initial stages of biocorrosion of steel*, Applied Biochemistry Microbiology, v. 36, n. 6, pp. 550-554, 2000.

KLEIN, B.; HALLBOM, D. J. *Modifying the rheology of nickel laterite suspensions*. *Minerals Engineering*, v.15, p.745-749, 2002.

LALEH, MAJID; XU, YUNZE; TAN, Mike YJ. *A three-dimensional electrode array probe designed for visualising complex and dynamically changing internal pipeline corrosion*. *Corrosion Science*, v. 211, p. 110924, 2023

LINDFORS, F. *Hydrazine substitutes for use as oxygen scavengers in the secondary circuits of pressurized water reactors*. 2020.

LINS, V. D. F., LAGE, F. C., CASTRO, M. D. M. R., COSTA, C. G., & MATENCIO, T. *Strategies for corrosion inhibition of slurry pipelines prior to commissioning*. Rem: Revista Escola de Minas, 69, p 161–166,2016.

LIU, W. *High temperature MIC on an offshore pipeline and the strong arsenate-reduction function in the hyperthermophiles. Engineering Failure Analysis*, v.45, p.376-386, jul. 2014.

LU, B. T., LUO, J. L., MOHAMMADI, F., WANG, K., & WAN, X. M. *Correlation between repassivation kinetics and corrosion rate over a passive surface in flowing slurry. Electrochimica Acta*, 53(23), p.7022-7031, 2008.

LU, B., WANG, K., WAN, X., & LUO, J. *Degradations Of Mechanical Properties In Surface Layer And Erosion Resistance Of Carbon Steel In Slurries With Different Ph And Chemical Compositions*, in this Conference, 2008, Submitted to Corrosion, 2008.

LU, B. T.; LU, J. F.; LUO, J. L. *Erosion–corrosion of carbon steel in simulated tailing slurries. Corrosion Science*, v. 53, n. 3, p. 1000-1008, 2011.

LUZ, A. B. D., SAMPAIO, J. A., & FRANÇA, S. C. A. *Tratamento de minérios. CETEM/MCT*. 2010.

MACDONALD, J. R. *Impedance spectroscopy: Models, data fitting, and analysis. Solid state ionics*, v. 176, n. 25-28, p. 1961-1969, 2005.

MAIA, D.J.; GAZOTTI, W.A.; CANELA, M.C.; SIQUEIRA, A.E. *Chuva ácida: Um experimento para introduzir conceitos de equilíbrio químico e acidez no ensino médio. Química Nova na Escola*, n. 21, p. 44-46, 2005.

MAIA, DALTAMIR JUSTINO et al. *Experimento sobre a Influência do pH na Corrosão do Ferro. Química Nova na Escola, Sociedade Brasileira de Química (SBQ). São Paulo -sp*, v. 37, n. 1, p.71-75, 2015

MAINIER, F. B. *Material do curso Corrosão e Inibidores*. In: Instituto Brasileiro de Petróleo, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

MANSUR, H. S.; PEREIRA, M.; ORÉFICE, R. *Técnicas de caracterização de materiais. Biomateriais: Fundamentos e aplicações*. Rio de Janeiro: Cultura Médica. v. 1, p. 185-236, 2009.

MATTIOLI, G. G. *Avaliação da corrosão interna em minerodutos brasileiros para transporte de minério de ferro*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2016. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas).

MCCAFFERTY, E. *Introduction to Corrosion Science*. New York: Springer, 2010.

MICROSCOPIA CONFOCAL DE VARREDURA A LASER: Centro de Microscopia Eletrônica (CME), Instituto de Biociências - Câmpus de Botucatu, UNESP, São Paulo (SP): Disponível em: [https://www.ibb.unesp.br/#!/sobre-o-campus/administracao79/unidades auxiliares/centro-de-microscopia-eletronica---cme/parque-de-equipamentos/microscopio-confocal/](https://www.ibb.unesp.br/#!/sobre-o-campus/administracao79/unidades_auxiliares/centro-de-microscopia-eletronica---cme/parque-de-equipamentos/microscopio-confocal/). Acesso em: 12/07/2023.

MORETO, J. A. *Estudo da corrosão e corrosão-fadiga em ligas de Al e Al-Li de alta resistência para aplicação aeronáutica*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, 2012. 188p. (Tese, Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais).

MOURA, J.P. de; URTIGA FILHO, S.L. *Prevenção de corrosão em caldeiras*. 2011. Artigo em Hypertexto. Disponível em: http://www.infobibos.com/Artigos/2011_2/Caldeiras/Index.htm. Acesso em: 13/12/2021.

NACE STANDARD RP0775, *Preparation, Instalation, Analysis, and Interpretation of Corrosion Coupons in Oilfield Operations*, item nº 21017, ISBN 1- 57590-086-6, 2005.

NASCIMENTO, C. R. *Caracterização e determinação do comportamento de consolidação da polpa de bauxita*. Rem: Revista Escola de Minas, v. 63, p. 325-329, 2010.

NEVILLE, A.; HODGKIESS, T. *Study of effect of liquid corrosivity in liquid-solid impingement on cast iron and austenitic stainless steel. British corrosion journal*, v. 32, n. 3, p. 197-205, 1997.

NÓBREGA, A. C. V., BARBOSA, A. F. F., SILVA, D. R., PIMENTA, G. S., PEIXOTO, D. G. Estudo De Caso - *Corrosão Interna Em Dutos Transportadores De Gás Natural*. Rio de Janeiro: 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 2003.

PANOSSIAN, Zehbour; ALMEIDA, Neusvaldo Lira de; OHBA, Marli. *Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas*. São Paulo IPT, v.2,1993.

PILEGGI, R., TULUI, M., STOCCHI, D., & LIONETTI, S. *Tribo-corrosion behaviour of chromium carbidebased coatings deposited by HVOF. Surface and Coatings Technology*. v. 268, p. 247-251, 2015.

POSTLETHWAITE, J., & NESIC, S. *Erosion-Corrosion in Single and Multiphase Flow, Uhlig's Handbook*, 2nd Edition by W. Revie, John Wiley & Sons, Inc., p. 249-272,2000.

POULSON, B. *Electrochemical measurements in flowing solutions. Corrosion Science*, v. 23, n. 4, p. 391-430, 1983.

PRASAD, B. K. *Effects of alumina particle dispersion on the erosive–corrosive wear response of a zinc-based alloy under changing slurry conditions and distance. Wear*, v. 238, n. 2, p. 151-159, 2000.

PUGSLEY, V. A.; ALLEN, C. *Microstructure/property relationships in the cavitation erosion of tungsten carbide–cobalt. Wear*, v. 233, p. 93-103, 1999.

RAY, R. I., LEE, J. S., LITTLE, B. J., GERKE, T. L. *The anatomy of tubercles: a corrosion study in a fresh water estuary. Materials and Corrosion*, Weinheim, v.61, n.12, p.993-999, 2010.

RASHID, N., ALAVI-SOLTANI, S. e ASMATULU, R., *Crevice Corrosion Theory, Mechanisms and Prevention Methods*, 3rd Annual GRASP Symposium, Wichita State University, Kansas, United States of America, 2007.

REFAIT, P.; GROLLEAU, A.-M.; JEANNIN, M.; RÉMAZEILLES, C.; SABOT, R. *Corrosion of carbon steel in marine environments: Role of the corrosion product layer. Corros. Mater. Degrad.* 2020, 1, 198–218

ROBERGE, P. R. *Corrosion inhibitors. Handbook of corrosion engineering*, p. 833-862, 1999.

ROCHA, J. M. P. *Definição da tipologia e caracterização mineralógica e microestrutural dos itabiritos anfíbolíticos das Minas de Alegria da Samarco Mineração S.A. – Minas Gerais – Volume 1*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais. p.52 – 65 (2008).

RODRIGUES, J. R. P., FREIRE, C. M. A., BALLESTER, M., PROENÇA, M. B. *"Monitoramento (on-line) da Corrosão em Dutos por Impedância Eletroquímica"*. In: International Corrosion Meeting, 2nd, CD-ROM, Recife, Brasil, Maio 2008.

SANTOS, M. C. *Estudo do processo corrosivo na interface aço carbono/popa de bauxita*. Belém: Universidade Federal do Pará, 2011. (Tese, Dissertação de M. Sc., UFPA).

SAMPAIO, J. A., & SILVA, F. A. N. G. D. (2007). *Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais* Cap 2.P. 55 a 72. Rio de Janeiro: CETEM/MCT.2007

SELRAKUMAR, P.; ALANGE, B. B.; THANGAVELU, O. *Corrosion inhibition of stainless steel in acid medium-An overview. Research Journal of Chemical Science*, v. 3, n. 4, p. 87-90, 2013.

SHEIR, L.L.; JARMAN, R.A.; BURSTEIN, G.T. *Corrosion – In: Corrosion Control*, 2000, V.2 (b).

SOUZA, E. D. *Avaliação de inibidores de corrosão para sistemas de resfriamento industrial operando com elevado ciclo de concentração*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007. p.18-20. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais).

SOUZA, R. D. *Avaliação Estrutural de Dutos com Defeitos de Corrosão Reais*. Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2003. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica).

SPENGLER, E., FRAGATA, F. L., MARGARIT, I. C. P et al, “*Corrosion Protection of Low Toxicity Paints*”, *Progress in Organic Coatings* v. 30, pp 51-57, 1997.

STACK, M. M. *Bridging the gap between tribology and corrosion: from wear maps to Pourbaix diagrams*. *International Materials Reviews*, v. 50, n. 1, p. 1-17, 2005.

SZKLARSKA-SMIALOWSKA, Z. *Pitting corrosion of aluminum*. **Corrosion science**, v. 41, n. 9, p. 1743-1767, 1999.

TAMURA, H. *The role of rusts in corrosion and corrosion protection of iron and steel*. *Corrosion Science*, v.50, p.1872-1883, 2008.

TEIXEIRA, V. M.; DOS SANTOS, E. C.; REZENDE, M. J. C.; D’ELIA, E., *Estudo da Ação Inibidora do Extrato de Camellia sinensis na Corrosão do Aço-carbono 1020 em HCl 1 mol L⁻¹*, *Revista Virtual Química*, v.7, p.1790-1749, 2015.

VALENTINELLI, L., VOGELSANG, J., OCHS, H., & FEDRIZZI, L. *Evaluation of barrier coatings by cycling testing*. *Progress in organic coatings*, v. 45, pp 405- 413, 2002.

WANG, M. C., REN, S. Z., WANG, X. B., & LI, S. Z. *A study of sand slurry erosion of W-alloy white cast irons*. *Wear*, 160(2), p. 259-264, 1993.

WILLS, B.A; NAPIER MUNN, T.J. Classification. In.; *Mineral Processing Technology*. Capítulo 8. 7th ed. (SL): Butterworth-Heinemann, 2006.

WOLYNEC, S. *Técnicas Eletroquímicas em Corrosão*. São Paulo: EDUSP, 2003.

ZUPANOVICH, J. D. *Oxidation and degradation products of common oxygen scavengers*. *The Analyst: The Voice of the Water Treatment Industry*, Fall, 2002. p. 1-8.