Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil

Escola de Minas

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE CORPOS MOEDORES EM DIFERENTES MEIOS

YARA APARECIDA CARNEIRO

OURO PRETO, 2025

YARA APARECIDA CARNEIRO

RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE CORPOS MOEDORES EM DIFERENTES MEIOS

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheira Metalurgista.

Orientadora: Prof.ª Dr.ª Maria Aparecida Pinto

Coorientador: Mestrando Victor Cardoso Campideli

Ouro Preto, 2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C289r Carneiro, Yara Aparecida.
Resistência à corrosão de corpos moedores em diferentes meios. [manuscrito] / Yara Aparecida Carneiro. - 2025.
51 f.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Aparecida Pinto.
Coorientador: Me. Victor Cardoso Campideli.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Corrosão-Resistência. 2. Beneficiamento de minério. 3. Polarização. I. Pinto, Maria Aparecida. II. Campideli, Victor Cardoso. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 681.5

Bibliotecário(a) Responsável: Angela Maria Raimundo - SIAPE: 1.644.803

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALURGICA E DE MATERIAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

Yara Aparecida Carneiro

Resistência à corrosão de corpos moedores em diferentes meios

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Metalurgista

Aprovada em 5 de Junho de 2025

Membros da banca

Dr.ª Maria Aparecida Pinto - Orientadora - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto
Victor Cardoso Campideli - Coorientador - Rede Temática em Engenharia de Materiais
Dr.ª Nayara Aparecida Neres da Silva - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto
MsC. Jeilce Maria Abreu dos Santos - Rede Temática em Engenharia de Materiais

Maria Aparecida Pinto, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 23/07/2025

Documento assinado eletronicamente por **Maria Aparecida Pinto**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 23/07/2025, às 15:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 , informando o código verificador **0947790** e o código CRC **E8E6B52F**.

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: 3135591561 - www.ufop.br

AGRADECIMENTOS

“Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e os seus planos serão bem-sucedidos.” (Provérbios 16:3)

Em primeiro lugar agradeço à Deus e à minha mãezinha, Nossa Senhora Aparecida, por me concederem força, sabedoria e serenidade para concluir mais essa etapa na minha vida.

À minha família, minha base, sou eternamente grata pelo apoio incondicional, pelo incentivo constante e por sempre acreditarem em mim, mesmo nos momentos mais desafiadores.

Ao Ataíde Dias, meu amor e companheiro de jornada, sou imensamente grata por estar ao meu lado em cada passo, pelas noites de estudo e por enfrentarmos juntos todos os desafios. Seu apoio foi minha força.

Especialmente, à minha orientadora, Maria Aparecida Pinto, por compartilhar seu conhecimento com tanta generosidade, pela orientação cuidadosa e por toda paciência durante o desenvolvimento e escrita desse trabalho.

Agradeço, ainda, ao meu coorientador, Victor Campideli, pela disponibilidade e contribuições técnicas e por compartilhar seus conhecimentos comigo.

Aos amigos que fiz na faculdade, aos professores e a todos do DEMET que contribuíram de alguma forma para minha formação.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Ouro Preto e à centenária Escola de Minas, por terem sido o cenário dessa trajetória tão especial e por proporcionarem uma formação acadêmica de excelência. É uma honra ser mais uma aluna a concluir sua jornada na Gloriosa Escola de Minas.

A todos vocês, meu sincero muito obrigada.

RESUMO

A etapa de moagem no beneficiamento mineral se destaca pelo alto consumo energético e pela intensa degradação dos corpos moedores, podendo representar até 50% dos custos de cominuição. Para mitigar esses impactos, ligas de ferro fundido branco de alto cromo têm sido amplamente empregadas, devido à sua elevada dureza e resistência ao desgaste abrasivo e corrosivo. Este trabalho teve como objetivo avaliar a resistência à corrosão de corpos moedores de ferro fundido branco de alto cromo em dois meios distintos: uma solução padrão de NaCl 3,5% e uma polpa de minério de ferro com pH característico. As amostras foram caracterizadas por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura, análise química e ensaios de dureza. A resistência à corrosão foi avaliada por meio de polarização potenciodinâmica. Os resultados indicaram que a solução de NaCl 3,5% promoveu maior taxa de corrosão, enquanto a polpa de minério apresentou comportamento menos agressivo. Conclui-se que o meio corrosivo exerce influência significativa na durabilidade dos corpos moedores, destacando a importância de análises eletroquímicas para a seleção adequada de materiais em ambientes industriais.

Palavras-chave: Corrosão. Corpo moedor. Polarização Potenciodinâmica. pH da polpa. Desgaste.

ABSTRACT

The grinding stage in mineral processing is known for its high energy consumption and the significant wear of grinding balls, which can account for up to 50% of comminution costs. To reduce these effects, high-chromium white cast irons have been widely used due to their high hardness and resistance to both abrasive and corrosive wear. This study aims to evaluate the corrosion resistance of grinding balls made of high chromium white cast iron in two distinct media: a standard 3.5% NaCl solution and iron ore slurry with its characteristic pH. The samples were characterized by optical microscopy, scanning electron microscopy, chemical analysis, and hardness testing. Corrosion resistance was evaluated using the potentiodynamic polarization techniques. The results showed that the NaCl solution promoted a higher corrosion rate, whereas the iron ore slurry presented less aggressive behavior. It is concluded that the corrosive medium has a significant influence on the durability of grinding balls, highlighting the importance of electrochemical analysis for appropriate material selection in industrial environments.

Keywords: Corrosion. Grinding balls. Potentiodynamic polarization. slurry pH. Wear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3. 1 - Moagem em regime de catarata 14
Figura 3. 2 - Moagem em regime de cascata 15
Figura 3. 3 - Diagrama metaestável C-Cr-Fe 18
Figura 3. 4 - Superfície do corpo moedor riscada por partícula de quartzo..... 20
Figura 3. 5 - Esquema da pilha de corrosão..... 23
Figura 3. 6 - Gráfico da extrapolação de Tafel 24
Figura 3. 7 - Arranjo experimental do ensaio potenciodinâmico 24
Figura 3. 8 - Formas de corrosão 25
Figura 3. 9 - Velocidade de corrosão em função da perda de massa pelo tempo 27
Figura 4. 1 - Corpo moedor com extremidades seccionadas 31
Figura 4. 2 - Célula eletroquímica 32
Figura 4. 3 - Imagem do potenciostato AutoLab..... 32
Figura 4. 4 - Amostra de corpo moedor na célula eletroquímica 33
Figura 5. 1 - Mapa de composição do corpo moedor: a) Região da amostra submetida à análise por EDS; b) Espectro de soma de mapas; c) Elementos distribuídos na matriz 35
Figura 5. 2 - Microestrutura da amostra com um aumento de 500x 36
Figura 5. 3 - Curvas de potencial de circuito aberto 38
Figura 5. 4 - Curvas de Polarização Potenciodinâmica..... 38
Figura 5. 5 - Superfície de corrosão das amostras em solução de NaCl 3,5% 40
Figura 5. 6 - Superfície de corrosão das amostras em polpa do minério 40
Figura 5. 7 - Imagens por microscopia eletrônica da superfície de corrosão em meio de NaCl 3.5% (a); detalhe da região destacada na área verde (b)..... 41
Figura 5. 8 - Imagens por microscopia eletrônica da superfície de corrosão da amostra em polpa de minério (a) elétrons secundários; (b) elétrons retroespalhados..... 42

LISTA DE TABELAS

Tabela 5. 1 - Composição química global das amostras (% em peso)..... 34

Tabela 5. 2 – Comparação entre a composição química do corpo moedor de acordo com a norma ASDTM A532 (2019) e a análise química semiquantitativa do corpo moedor via EDS 35

Tabela 5. 3 - Valores de dureza HRC das amostras 37

Tabela 5. 4 - Composição química do minério (% em peso) 37

Tabela 5. 5 - Parâmetros Eletroquímicos do ensaio de polarização linear..... 39

LISTA DE SIGLAS

ASTM – American Society for Testing and Materials

CP – Carboneto M_7C_3 primário

CE – Contraeletrodo de platina

CS – Carboneto M_7C_3 secundário

DEMET – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

E_{corr} – Potencial de corrosão

EDS – Espectroscopia por dispersão de energia

ER – Eletrodo de referência

ET – Eletrodo de trabalho

FFBAC – Ferro Fundido Branco de Alto Cromo

i_{corr} – Densidade de corrente de corrosão

M – Matriz

MES - Manufacturing Execution System

MEV – Microscopia eletrônica de Varredura

MO – Microscopia óptica

OCP – Potencial de circuito aberto

REDEMAT – Rede Temática em Engenharia de Materiais

SCE – Eletrodo de referência de calomelano saturado

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11
2 OBJETIVOS 13
2.1 Objetivo Geral 13
2.2 Objetivos Específicos 13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 14
3.1 Moagem 14
3.2 Corpo Moedor 15
3.3 Ferro Fundido Branco de Alto Cromo 16
3.4 Desgastes em corpos moedores 19
3.5 Corrosão 21
3.5.1 Mecanismos eletroquímicos 22
3.5.2 Pilhas eletroquímicas 22
3.5.3 Ensaios de polarização 23
3.5.4 Formas de corrosão 25
3.5.5 Velocidade de corrosão 26
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 30
4.1 Análise Química dos Corpos Moedores 30
4.2 Microestrutura dos corpos moedores 30
4.3 Composição do Minério 30
4.4 Composição dos Meios Eletroquímicos 30
4.4.1 Ensaios Eletroquímicos 31
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 34
5.1 Análise Química - Mapa de Composição 34
5.1.1 Mapa de composição 34
5.2 Análise Microestrutural 36

5.3 Dureza 36
5.4 Composição do Minério 37
5.5 Ensaio Eletroquímico 37
5.6 Análise da Superfície de Corrosão 39
6 CONCLUSÕES 43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 44

1 INTRODUÇÃO

Segundo Luz, Sampaio e França (2010), a moagem representa o estágio final na fragmentação de materiais sólidos, na qual as partículas são reduzidas por meio de impacto, compressão, abrasão e atrito até atingirem uma granulometria que permita a liberação eficaz do mineral de interesse. Essa etapa é crucial para viabilizar os procedimentos subsequentes ao beneficiamento mineral.

Por sua importância operacional, a moagem também se destaca como uma das etapas mais onerosas do processo de beneficiamento. Trata-se de uma etapa caracterizada pelo considerável consumo de energia. Outro item de custo significativo na moagem é o de corpos moedores em função do desgaste abrasivo-corrosivo, que pode chegar a até 50% dos custos referentes à cominuição e a 25% dos custos de operação de uma usina de beneficiamento mineral (Luz, Sampaio, França, 2010; Massola, 2015).

Nesse cenário, torna-se evidente a necessidade de buscar soluções que aumentem a eficiência do processo. Wei e Craig (2008) ressaltam que a redução do consumo energético e a otimização do uso dos corpos moedores são metas centrais no beneficiamento mineral, pois contribuem não apenas para a viabilidade econômica, mas também para práticas mais sustentáveis, com menor desperdício de recursos.

A eficiência dos corpos moedores está diretamente relacionada às suas propriedades mecânicas, entre as quais a dureza assume papel de destaque. Materiais com elevada dureza, como os ferros fundidos brancos, mostram-se mais resistentes aos efeitos da abrasão, impactos e compressões típicos do ambiente de moagem, conforme descrito por Afonso (2012).

Contudo, a resistência mecânica por si só não é suficiente para garantir o desempenho prolongado dos corpos moedores. Em ambientes corrosivos, como os encontrados em muitos processos industriais, a resistência à corrosão também torna-se um fator determinante. De acordo com Panossian (1993), prever a durabilidade de um material frente à corrosão é um desafio, pois

depende tanto da composição do meio quanto das condições operacionais envolvidas.

Diante disso, este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo caracterizar microestruturalmente e avaliar a resistência à corrosão de corpos moedores em diferentes meios.

2 OBJETIVOS

Para a execução deste trabalho, foram estabelecidos os seguintes objetivos:

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a resistência à corrosão de corpos moedores fabricados em ferro fundido branco de alto cromo em dois meios distintos.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o corpo moedor quanto à microestrutura e às propriedades mecânicas, por meio de técnicas de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura e ensaios de dureza;
- Determinar a composição química elementar do corpo moedor por meio, relacionando-a ao seu comportamento frente à corrosão;
- Avaliar o comportamento em corrosão do corpo moedor em dois meios distintos — solução padrão de NaCl 3,5% e líquido da polpa de minério de ferro com pH característico desse meio.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

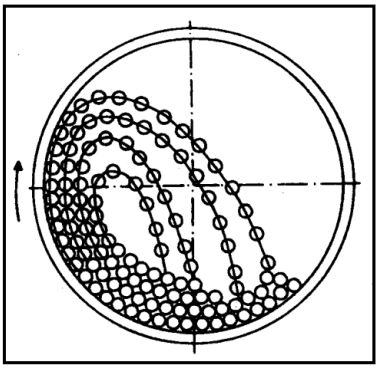
Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura abordando os principais pontos relativos aos corpos moedores e seu comportamento em corrosão.

3.1 Moagem

A moagem é a etapa final do processo de fragmentação, em que as partículas são reduzidas de tamanho por meio de impacto, compressão, abrasão e atrito, até atingirem uma granulometria adequada para a liberação do mineral de interesse, visando os processos de concentração subsequentes (Figueira, Luz; Almeida, 2010).

O funcionamento do moinho está diretamente vinculado à sua velocidade de rotação e ao nível de enchimento. De acordo com Chaves e Peres (2012), dois regimes principais de operação são conhecidos: catarata e cascata. No regime de catarata (Figura 3.1), o moinho gira em alta velocidade, projetando os corpos moedores a alturas elevadas, promovendo fragmentação por impacto. Esse regime favorece o uso de bolas de maior diâmetro e baixo enchimento, sendo mais indicado para partículas grossas.

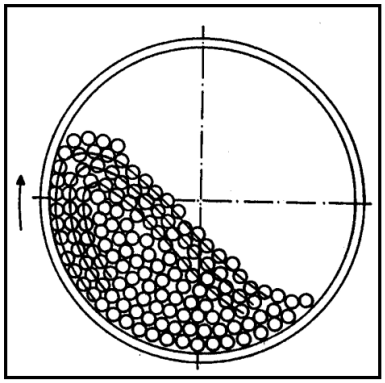
Figura 3. 1 - Moagem em regime de catarata



Fonte: (Figueira, Luz; Almeida, 2010)

No regime de cascata (Figura 3.2), a rotação é mais lenta e o enchimento mais elevado, o que leva os corpos moedores a rolarem sobre si mesmos. O desgaste se dá, então, principalmente por abrasão e atrito, favorecendo a produção de partículas mais finas (Wills, Napier-Munn, 2006; Chaves; Peres, 2012).

Figura 3. 2 - Moagem em regime de cascata



Fonte: (Figueira, Luz; Almeida, 2010)

Segundo Figueira, Luz e Almeida (2010), a operação de moagem pode ser realizada tanto em condições secas quanto úmidas, dependendo das etapas subsequentes e das características do material a ser processado. No caso da moagem úmida, a adição de água pode ocasionar alterações tanto químicas quanto físicas nos materiais envolvidos. Contudo, a moagem sob essas condições oferece vantagens, como a redução do desgaste do revestimento e dos corpos moedores.

3.2 Corpo Moedor

Um dos principais desafios na operação dos moinhos de bolas é o controle da distribuição dos tamanhos dos corpos moedores, que é influenciado pela taxa de desgaste e pela velocidade de reposição, uma vez que a deterioração dessas esferas exige substituições regulares (Aldrich, 2013; Massola, 2015).

Os corpos moedores representam uma parcela significativa dos custos na produção mineral, podendo corresponder entre 40% e 45% do custo total de cominuição. Esse custo está diretamente relacionado ao valor de aquisição e à capacidade dos corpos moedores de resistir ao desgaste durante o processo de moagem. Para garantir eficiência e evitar falhas críticas, busca-se utilizar materiais que combinem alta dureza e boa absorção de impactos, minimizando rupturas (Moema *et al*., 2009; Aldrich, 2013; Cirilo, 2022).

Para reduzir o consumo dos corpos moedores, é fundamental compreender os mecanismos de desgaste presentes na moagem (Massola, 2015). A eficácia e durabilidade desses corpos são significativamente afetadas

por fatores como a presença de minerais duros, sendo o quartzo um exemplo, que, devido à sua alta dureza e fratura concoidal, pode acelerar o desgaste e aumentar os custos operacionais pela necessidade de substituições frequentes (Siriani, 1973). A degradação ocorre por meio de processos interligados de abrasão, impacto e corrosão (Vargas *et al*., 2019), o que reforça a importância de estudos que possam prever o consumo dos corpos moedores por meio da análise desses mecanismos.

Para assegurar a integridade dos corpos moedores ao longo da vida útil, especialmente em ambientes agressivos, é essencial que possuam características específicas. Entre as principais destacam-se: alta dureza para minimizar o desgaste abrasivo; ductilidade para suportar impactos durante a fragmentação do minério; e resistência à corrosão, fundamental devido às condições úmidas da moagem (Cândido, 2024).

Com o objetivo de melhorar a eficiência energética e operacional da moagem, novos materiais vêm sendo desenvolvidos para resistir aos desgastes inerentes ao processo. A qualidade desses materiais está fortemente ligada à sua composição química e aos tratamentos térmicos aplicados (Farah, 1997). Destacam-se os ferros fundidos brancos de alto cromo, considerados os mais adequados para a fabricação de corpos moedores, em função da sua resistência superior ao desgaste abrasivo e corrosivo, além de apresentarem desempenho superior comparado aos corpos moedores de aço fundido ou forjado (Cassola, Moraes, Albertin, 2006; Moutinho, Guastala, Novais, 2017).

3.3 Ferro Fundido Branco de Alto Cromo

Conforme especificado na norma ASTM A532 (2019), os ferros fundidos brancos podem ser categorizados em três classes: a Classe I, caracterizada pelo teor de níquel-cromo; a Classe II, pelo teor de cromo-molibdênio; e a Classe III, pelo alto teor de cromo.

Durante a produção, esses ferros fundidos podem ser ajustados para se aumentar sua dureza e resistência ao desgaste, apresentando microestruturas perlítica, austenítica, martensítica ou combinações dessas. As microestruturas com predominância de martensita conferem a maior resistência ao desgaste,

enquanto as austeníticas, embora menos duras, são indicadas para certas aplicações específicas. Já as perlíticas possuem resistência relativamente baixa à abrasão, não sendo recomendadas para ambientes de desgaste intenso (Davis, 1996; Laird, Gundlach; Röhrig, 2000).

De acordo com Lui, Shen e Gao (1993), os ferros fundidos brancos de alto teor de cromo são os materiais mais eficazes para aplicações que demandam elevada dureza e resistência tanto à abrasão quanto à corrosão.

Davis (1996) destaca que, nos ferros fundidos brancos com alta resistência ao desgaste abrasivo, a presença de cromo desempenha papel fundamental ao favorecer a formação de uma elevada proporção de carbonetos. A adição de cromo promove a formação de carbonetos em detrimento da grafitização durante a solidificação. Além disso, o cromo aumenta a resistência à corrosão e estabiliza a microestrutura, o que é especialmente relevante para aplicações em altas temperaturas.

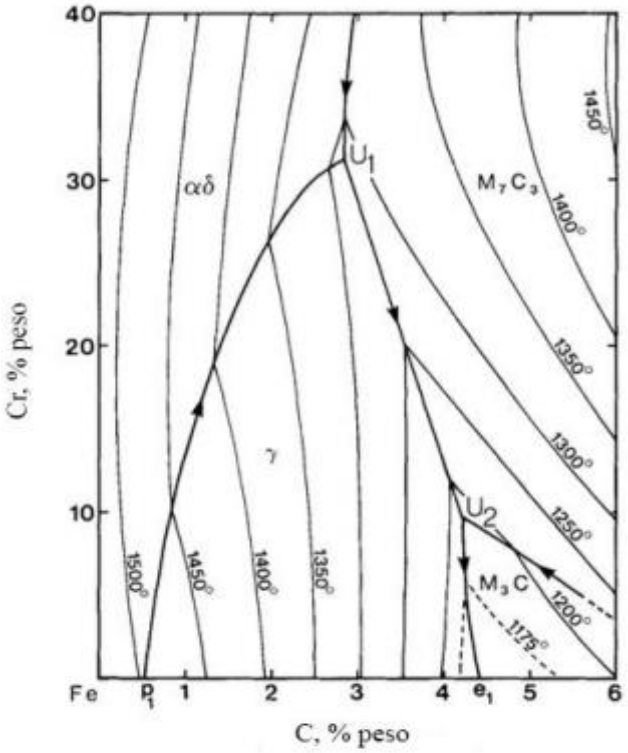
O teor específico de cromo influencia diretamente os tipos de carbonetos formados e, consequentemente, as propriedades do material. Quando o teor de cromo ultrapassa 10%, ocorre a formação dos carbonetos eutéticos do tipo M_7C_3, em substituição aos carbonetos do tipo M_3C, comuns em ferros fundidos com menor teor desse elemento. Essa alteração estrutural resulta na dispersão dos carbonetos M_7C_3 em uma matriz austenítica, o que confere maior dureza e resistência ao desgaste abrasivo em comparação às ligas que apresentam principalmente carbonetos M_3C (Davis, 1996).

Os ferros fundidos branco de alto cromo (FFBAC) pertencem ao sistema ternário C-Cr-Fe, contendo aproximadamente de 1,8% a 3,6% de carbono e de 11% a 30% de cromo. Durante a fabricação, elementos como cobre, níquel, molibdênio e manganês são adicionados para melhorar as propriedades do material. Além disso, os processos de solidificação e tratamentos térmicos são fundamentais para modificar a microestrutura, impactando diretamente o desempenho e a qualidade dos corpos moedores (Tabrett, Sare; Ghomashchi, 1996).

Durante a solidificação dos FFBAC, observa-se uma região rica em ferro no diagrama ternário Fe-C-Cr, ilustrado na Figura 3.3. Na superfície líquida metaestável desse sistema, formam-se fases distintas como γ (austenita), δ (ferrita) e os carbonetos M_3C e M_7C_3 (Laird, Gundlach; Röhrig, 2000).

Conforme citado anteriormente, os FFBAC são indicados para operações que exigem alta dureza e resistência à abrasão devido ao seu elevado teor de carbonetos primários e/ou eutéticos do tipo M_7C_3, dispersos em matrizes austeníticas ou martensíticas (Santos, Guastala; Novais, 2017).

Figura 3. 3 - Diagrama metaestável C-Cr-Fe



Fonte: (Thorpe; Chicco, 1985)

Os ferros fundidos brancos de alto cromo são frequentemente destacados como os materiais ideais para a fabricação de corpos moedores, graças à sua capacidade de resistir tanto ao desgaste abrasivo quanto ao corrosivo. Eles apresentam desempenho superior aos corpos moedores de aço fundido ou forjado (Cassola, Moraes; Albertin, 2006; Santos, Guastala; Novais, 2017). As propriedades de resistência ao desgaste e estabilidade em ambientes corrosivos, essenciais para o tratamento de minérios, reforçam a relevância dos

ferros fundidos brancos com alto teor de cromo para essas aplicações (Liu, Shen; Gao, 1993; Filipovic, 2014).

3.4 Desgastes em Corpos Moedores

Lacerda *et al*. (2002, *apud* Detognni, 2010) define o desgaste como a perda de material na superfície de um sólido devido ao contato e movimento relativo com outro corpo, que pode ser sólido, líquido ou gasoso. A resistência ao desgaste é considerada parte de um sistema tribológico, no qual diversos parâmetros, como características de projeto, condições operacionais e propriedades dos materiais, influenciam a taxa de desgaste (Detognni, 2010).

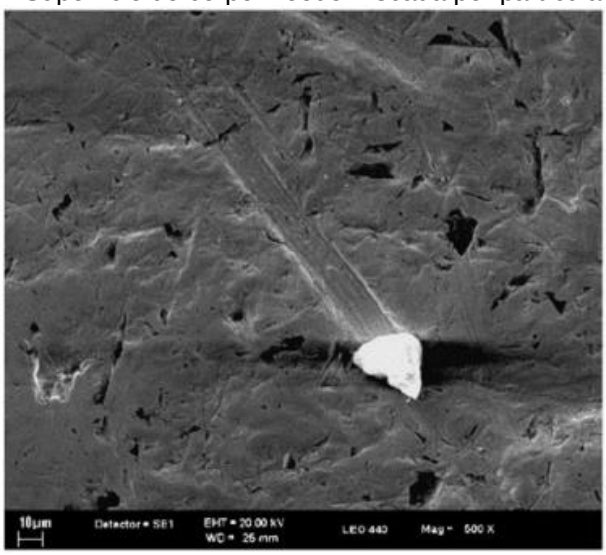
Detognni (2010) classifica os tipos de desgaste em diferentes categorias:

- Desgaste por abrasão: ocorre devido à ação de partículas abrasivas sob tensão, que provocam o desgaste da superfície;
- Desgaste por erosão: resulta de choques entre a superfície e partículas sólidas ou líquidas, causando perda de material;
- Desgaste por cavitação: ocorre pela formação e subsequente implosão de bolhas gasosas na interface entre o metal e o líquido, devido a variações de pressão;
- Desgaste por fricção: acontece quando superfícies ásperas deslizam entre si, gerando atrito e desgaste;
- Desgaste corrosivo: envolve reações químicas que ocorrem na superfície do material, em conjunto com mecanismos de desgaste;
- Desgaste por impacto: é causado por cargas aplicadas por meio de choques repetidos na superfície do material.

Albertin e Moraes (2007) descrevem o mecanismo de desgaste como a ação de uma partícula suficientemente dura que ataca uma superfície em um ângulo favorável, conseguindo atuar como uma ferramenta de corte, retirando pequenas lascas (microcorte). Esse efeito está representado na Figura 3.4, a qual ilustra uma partícula de quartzo em contato com a superfície de uma bola de moinho fabricada em ferro fundido branco de alto cromo. Durante esse processo, ocorre uma significativa deformação plástica, com acumulação de material deslocado ao longo do sulco e lateralmente, além de deformação abaixo

da superfície. Assim, passagens sucessivas de grãos abrasivos repetem ciclicamente esses deslocamentos, levando à remoção do material por fadiga de baixo ciclo, configurando um modelo da interação entre os grãos de quartzo e o material constituinte dos corpos moedores.

Figura 3. 4 - Superfície do corpo moedor riscada por partícula de quartzo



Fonte: (Albertin; Moraes, 2007)

No setor de mineração, o desgaste abrasivo recebe grande atenção. Contudo, a presença de íons na polpa de minério também provoca desgaste corrosivo. Esse fenômeno, em combinação com o desgaste abrasivo, gera um efeito sinérgico, aumentando significativamente a taxa de desgaste (Roveri; Chaves, 2011).

Bond (1964) estimou que o desgaste dos corpos moedores durante a moagem a úmido é aproximadamente sete vezes maior em comparação com a moagem a seco. Isso ocorre porque a moagem a úmido apresenta todas as condições propícias para um processo corrosivo ativo: grande área superficial dos corpos moedores, área específica ainda maior do minério sendo triturado, um potencial de corrosão em circuito aberto em que as partículas minerais mais nobres atuam como cátodo, enquanto os corpos moedores funcionam como ânodo. Além disso, a abrasão constante elimina qualquer filme protetor que possa se formar na superfície dos corpos moedores (Gangopadhyay; Moore, 1985; Roveri; Chaves, 2011).

Tao, Cheng e Parekh (2005) afirmam que condições ácidas durante a moagem intensificam a corrosão. Esse aspecto é particularmente relevante no contexto brasileiro, como citado por Roveri e Chaves (2011) que observaram que as águas no Brasil, especialmente nas regiões da Amazônia e do Quadrilátero Ferrífero (MG) – dois dos maiores polos produtores de minério de ferro do país – tendem a apresentar caráter ácido.

O desgaste corrosivo, por sua vez, é definido como a perda de material metálico causada por reações químicas e eletroquímicas com o ambiente, como a polpa mineral e o oxigênio, conforme descrito por Natarajan (1996). De acordo com a norma ASTM G40 (2022a) o desgaste corrosivo é definido como a perda de material em que a interação química ou eletroquímica com o meio é um fator determinante.

Durante a operação de moagem, tanto os corpos moedores quanto as superfícies dos minerais em processamento estão em constante exposição, o que permite a ocorrência de interações eletroquímicas entre os corpos moedores e os minerais. À medida que o desgaste dos corpos moedores acontece, superfícies recentemente desgastadas são expostas à água, levando à formação de uma camada de óxido ou hidróxido que recobre essas superfícies. Esse processo contínuo contribui para a continuidade das reações eletroquímicas que ocorrem durante a moagem (Massola, 2015; Roveri; Chaves, 2011).

3.5 Corrosão

Gentil (2022) define corrosão como: “A deterioração dos materiais pela ação química, eletroquímica do meio, podendo ou não estar associada a esforços mecânicos”.

No caso dos materiais metálicos, a corrosão atua sobre a superfície do metal e estabelece logo uma relação entre o agente corrosivo, o meio em que atua e produto da corrosão, que também pode influir substancialmente no processo corrosivo. Essa reação consome o metal e leva até a destruição da peça, seja pela redução de suas dimensões seja pelas mudanças na sua estrutura, na composição química ou seu aspecto externo (Silva, 1981).

3.5.1 Mecanismos eletroquímicos

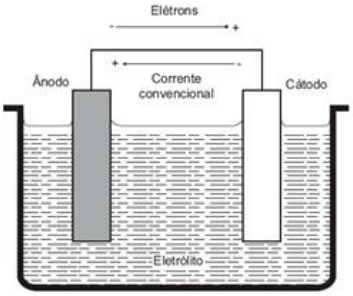
A corrosão metálica pode ocorrer por diversos mecanismos de natureza eletroquímica. Entre os ambientes, nos quais esse fenômeno é mais frequente, os meios aquosos se destacam, o que é compreensível, já que a maior parte dos processos corrosivos se desenvolve em condições ambientais nas quais a água atua como solvente predominante (Wolynec, 2013).

Uma reação eletroquímica é caracterizada pela passagem de corrente elétrica através de um meio condutor, cobrindo uma distância maior que a escala interatômica (Wolynec, 2013). A corrosão de metais envolve reações de oxidação e redução, nas quais há transferência de elétrons entre o metal e a solução que o envolve. Na oxidação, o metal cede elétrons, enquanto na redução, essas partículas são recebidas por outras espécies químicas. Quando essas reações ocorrem em uma célula eletroquímica, a oxidação acontece no ânodo, que é o eletrodo negativo, e a redução no cátodo, o eletrodo positivo. Essa combinação de reações caracteriza o processo de corrosão eletroquímica (Gentil, 2022).

3.5.2 Pilhas eletroquímicas

A corrosão eletroquímica geralmente ocorre com a formação de uma pilha de corrosão, estrutura composta por quatro elementos principais: a área anódica, na qual ocorrem reações de oxidação que levam à corrosão do metal; a área catódica, que permanece protegida e na qual se dão as reações de redução; o eletrólito, uma solução condutora que estabelece o contato iônico entre as regiões; e uma conexão elétrica entre os eletrodos, que permite o fluxo de elétrons necessário para o funcionamento da pilha (Figura 3.5). Essa pilha se forma devido à diferença de potencial elétrico entre as regiões anódica e catódica. Durante o processo, o metal na área anódica é convertido em íons, enquanto na região catódica, os íons do meio corrosivo são reduzidos a espécies menos reativas (Lima, 2007; McCafferty, 2010; Gentil, 2022). A interação entre essas regiões promove reações de oxidação, nas quais o metal passa da forma reduzida para a oxidada, conforme ilustrado na Figura 3.5 (Wolynec, 2013).

Figura 3. 5 - Esquema da pilha de corrosão



Fonte: (Gentil, 2022)

3.5.3 Ensaios de polarização

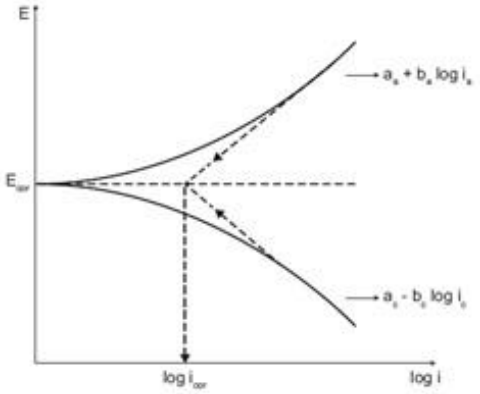
Os ensaios de polarização são métodos eletroquímicos amplamente empregados para investigar o comportamento corrosivo de materiais metálicos. Por meio da variação controlada do potencial aplicado a uma amostra, é possível determinar grandezas como o potencial de corrosão (E_{corr}) e a densidade de corrente de corrosão (i_{corr}), fundamentais para a caracterização do sistema corrosivo (Wolynec, 2013). No ponto de E_{corr}, as correntes anódica e catódica se equilibram, apresentando valores iguais e sentidos opostos. Como a corrente anódica não pode ser medida diretamente, utiliza-se a extrapolação das curvas de Tafel para estimá-la de forma indireta (Gentil, 2022).

A interpretação das curvas de Tafel fundamenta-se na sobreposição das reações anódica e catódica, que ocorrem simultaneamente durante o processo de corrosão. As curvas de polarização permitem identificar o potencial de corrosão e avaliar se o processo é controlado pela dissolução do metal (controle anódico) ou pela redução de espécies no meio (controle catódico). Esse comportamento caracteriza a chamada teoria do controle misto, segundo a qual a densidade de corrente de corrosão é determinada pela interseção entre as curvas anódica e catódica, refletindo o equilíbrio dinâmico entre as duas reações (Wolynec, 2013).

A densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) pode ser determinada graficamente a partir da interseção das retas extrapoladas dos trechos lineares das curvas anódica e catódica. Esse parâmetro está diretamente relacionado à taxa de corrosão ou velocidade de corrosão, que corresponde à quantidade de material metálico degradado por unidade de área ao longo do tempo. Em

condições ideais, os trechos utilizados para a extrapolação apresentam comportamento linear em uma faixa próxima ao E_{corr} (Wolynec, 2013), conforme mostrado na Figura 3.6.

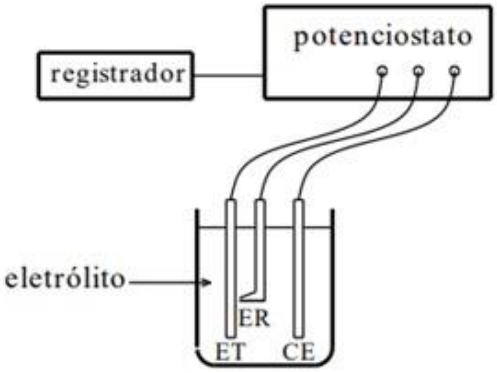
Figura 3. 6 - Gráfico da extrapolação de Tafel



Fonte: (Gentil, 2022)

A técnica de polarização potenciodinâmica é uma das mais utilizadas para esse tipo de análise. Nesse método, o potencial aplicado à amostra é a variável de controle, sendo manipulado por um potenciostato. A célula eletroquímica é composta por três eletrodos: o de trabalho (amostra metálica), o de referência e o contraeletrodo, todos imersos em um eletrólito condutor, como, por exemplo, uma solução de cloreto de sódio (Wolynec, 2013). Por meio da aplicação de potenciais em diferentes faixas, o potenciostato registra a resposta eletroquímica do sistema, gerando curvas de polarização que servem de base para a análise dos mecanismos corrosivos (Osório, 2004). A Figura 3.7 ilustra esse arranjo experimental, onde ET é o eletrodo de trabalho, ER é o eletrodo de referência e CE é o contraeletrodo (Wolynec, 2013).

Figura 3. 7 - Arranjo experimental do ensaio potenciodinâmico



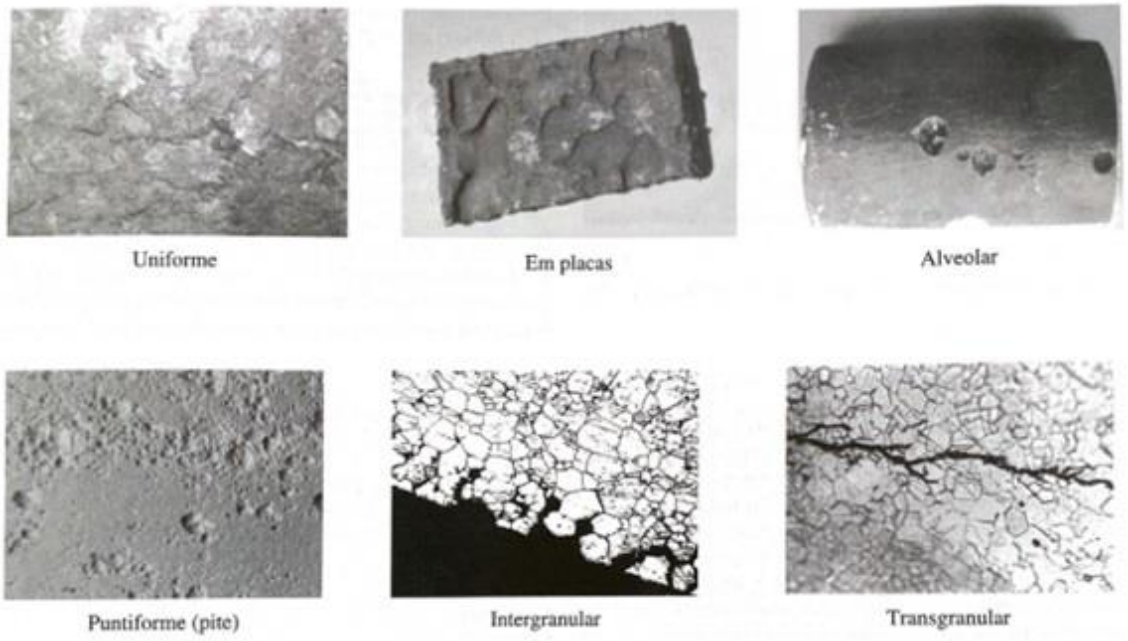
Fonte: (Wolynec, 2013)

A resposta do metal durante o ensaio depende de sua natureza química e do ambiente corrosivo. Segundo Mischler (2008), metais ativos tendem a se dissolver na solução, enquanto metais passivos formam uma película de óxido que atua como barreira protetora. Variações na composição do meio, como o tipo de eletrólito e o pH, podem influenciar significativamente o potencial de corrosão e, consequentemente, a taxa de degradação do material (Wolynec, 2013; Gentil, 2022).

3.5.4 Formas de corrosão

Os processos de corrosão ocorrem principalmente na superfície dos materiais e podem ser classificados com base em sua morfologia, causas ou mecanismos, fatores mecânicos, meio corrosivo e localização do ataque. Identificar o tipo específico de corrosão ajuda a compreender seu mecanismo e a aplicar medidas apropriadas de proteção. As diferentes formas de corrosão, como mostrado na Figura 3.8, são classificadas conforme suas morfologias (Gentil, 2022):

Figura 3. 8 - Formas de corrosão



Fonte: (Gentil, 2022)

- Corrosão uniforme ou generalizada: a corrosão ocorre de maneira uniforme em toda a extensão da superfície do material, gerando perda de espessura uniforme sem áreas preferenciais para o ataque corrosivo;

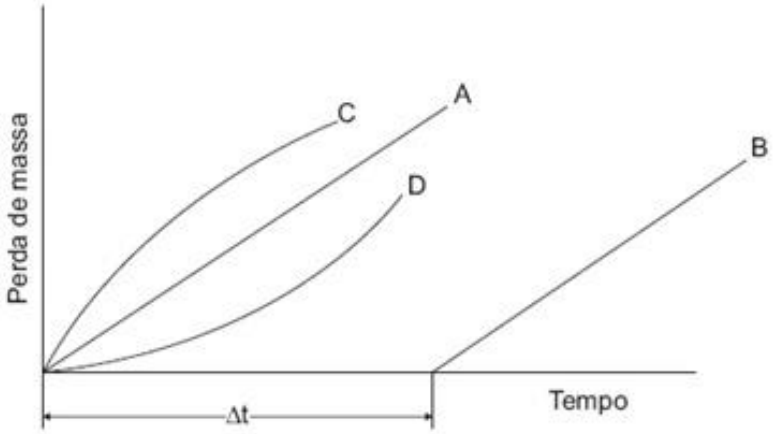
- Corrosão por placas: a corrosão afeta apenas algumas regiões específicas da superfície metálica, formando placas com escavações, sem afetar toda a extensão do metal;
- Corrosão alveolar: a corrosão cria sulcos ou escavações na superfície metálica, semelhantes a pequenos alvéolos, com fundo arredondado e geralmente com profundidade menor que o diâmetro;
- Corrosão puntiforme ou por pites: a corrosão ocorre em pequenas áreas localizadas na superfície metálica, gerando pontos de desgaste que podem penetrar até o interior do metal;
- Corrosão intergranular e transgranular: essas formas de corrosão diferem quanto à sua localização nos grãos da estrutura cristalina do metal. A corrosão intergranular ocorre entre os grãos, enquanto a transgranular atravessa os grãos. Ambas podem levar à corrosão sob tensão, na qual o material perde suas propriedades mecânicas e pode fraturar sob carga mecânica.

3.5.5 Velocidade de corrosão

Pode-se classificar a velocidade de corrosão em: velocidade média de corrosão e velocidade instantânea de corrosão. A partir da velocidade média de corrosão, pode-se estimar o tempo de vida útil de uma estrutura. Por meio da velocidade instantânea é possível verificar se há necessidade de alterar a concentração de um inibidor de corrosão, por exemplo (Ricardi, 2014).

A velocidade média de corrosão é determinada por meio da medida da diferença de peso do material metálico ou da concentração de íons metálicos na solução em intervalos específicos de tempo durante a exposição ao meio corrosivo (Gentil, 2022). De acordo com Gomes (2005), a velocidade de corrosão pode ser representada em função da perda de massa pelo tempo, conforme apresentado na Figura 3.9.

Figura 3. 9 - Velocidade de corrosão em função da perda de massa pelo tempo



Fonte: (Gentil, 2022)

- A curva A representa a velocidade de corrosão eletroquímica com perda de espessura uniforme, em que a área da superfície disponível para reação permanece constante. O produto de corrosão é inerte e a concentração do agente corrosivo é estável ao longo do tempo.
- A curva B é similar à curva A, porém apresenta um período de indução. Esse período está relacionado ao tempo necessário para que o agente corrosivo destrua partículas protetoras existentes antes que a corrosão se inicie efetivamente.
- A curva C surge quando o produto de corrosão é insolúvel e adere à superfície metálica, reduzindo, assim, a área disponível para reação ao longo do tempo.
- A curva D refere-se a uma situação em que o produto de corrosão é solúvel, resultando em um aumento significativo na velocidade de corrosão. Isso ocorre porque a área da superfície disponível para reação aumenta com o tempo.

Gentil (2022), cita alguns fatores que influenciam na velocidade de corrosão:

- Efeito do oxigênio dissolvido: inicialmente, o aumento da concentração de oxigênio dissolvido acelera a corrosão do metal, uma vez que o oxigênio consome os elétrons produzidos na reação anódica. Contudo, existe uma

concentração crítica na qual a velocidade de corrosão diminui, sugerindo um processo de passivação do material causado pelo oxigênio;

- Efeito do pH: a corrosão tende a ser mais rápida em meios ácidos devido à capacidade de redução dos íons H^+ e à presença de oxigênio dissolvido. Em contrapartida, em meios alcalinos, a taxa de corrosão geralmente diminui porque o metal pode passivar na presença de álcalis e oxigênio dissolvido;

- Efeito da temperatura: o aumento da temperatura acelera a velocidade de corrosão devido ao aumento da condutividade do eletrólito e à maior velocidade de difusão dos íons no meio. No entanto, em alguns casos, o aumento da temperatura pode diminuir a taxa de corrosão, pois reduz a solubilidade do oxigênio na água;

- Efeito de sais dissolvidos: Os sais têm a capacidade de influenciar tanto no aumento quanto na redução da velocidade de corrosão. Eles podem acelerar o processo por meio de ação despolarizante e aumento da condutividade. Por outro lado, também podem reduzir a corrosão ao precipitar produtos coloidais de corrosão, diminuir a solubilidade do oxigênio e exercer uma ação inibidora ou passivadora.

Conforme abordado, o pH do meio é um dos fatores que mais influencia a corrosão de materiais metálicos. Sua variação pode alterar significativamente a taxa de corrosão, uma vez que afeta a natureza e a velocidade das reações químicas superficiais que levam à degradação do material. Assim, estudar como a resistência à corrosão dos corpos moedores se comporta em diferentes condições de pH é essencial para compreender seu desempenho em ambientes operacionais reais, visto que o pH do meio pode acelerar ou atenuar os mecanismos corrosivos (Tao; Chen; Parekh, 2005, Zhang; Han; Kawatra, 2020).

A resistência à corrosão é uma propriedade crucial para materiais utilizados em diversas aplicações industriais, como mineração, metalurgia, petroquímica e processamento químico. A deterioração provocada pela interação físico-química entre o material e o meio no qual está inserido pode

causar desgaste, alterações químicas ou modificações estruturais, tornando o material inadequado para uso (Sanches, 2009).

Dessa forma, os conceitos apresentados nesta revisão servem de base para a condução do procedimento experimental, a partir do qual foi avaliado o comportamento dos corpos moedores frente à corrosão em diferentes meios.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste trabalho corpos moedores produzidos em ferro fundido branco de alto cromo, com diâmetro de 25mm, doados por uma empresa de mineração, foram utilizados como amostras para análise do comportamento em corrosão.

4.1 Análise Química dos Corpos Moedores

A composição química das amostras foi determinada por espectrometria de emissão óptica, com ensaios realizados na VDL Siderúrgica Itabirito. Os resultados utilizados neste trabalho foram obtidos por Santos (2014), que analisou o mesmo material.

4.2 Microestrutura dos Corpos Moedores

As mesmas amostras utilizadas neste trabalho foram analisadas quanto à sua microestrutura no trabalho de Cirilo (2022), por meio das técnicas de microscopia óptica (MO), utilizando o equipamento Olympus BX53M, e de microscopia eletrônica de varredura (MEV), realizada no equipamento Hitachi SU3500. A partir da microscopia eletrônica de varredura foram obtidas imagens via detecção de elétrons retroespalhados e elétrons secundários.

A preparação metalográfica envolveu o embutimento das amostras em resina acrílica, passando pelo processo de lixamento, conforme o padrão para preparação metalográfica, e foram polidas com pasta de diamante de 1µm. O ataque químico empregado foi o reagente de Vilella (1g de ácido pícrico + 5mL de ácido clorídrico concentrado + 100mL de álcool etílico P.A.), com tempo de ataque de 30 segundos.

4.3 Composição do Minério

A composição química do minério utilizado foi obtida por meio do sistema *Manufacturing Execution System* (MES), fornecida pela empresa de mineração que cedeu o material.

4.4 Composição dos Meios Eletroquímicos

Para os ensaios, foram preparados dois meios distintos. O primeiro consistiu em uma solução de NaCl 3,5%, obtida pela dissolução de 35g de NaCl

em água destilada, completando o volume final de 1000mL. O segundo meio, na forma de polpa, foi preparado de forma análoga, misturando-se 35g de minério em água destilada e completando o volume final de 1000mL. O pH da polpa foi determinado utilizando um pHmetro digital da marca Mettler Toledo, garantindo a precisão na caracterização do meio.

4.4.1 Ensaios eletroquímicos

Para a realização dos ensaios eletroquímicos, por meio da técnica de polarização potenciodinâmica, com o objetivo de avaliar o comportamento em corrosão, foram utilizadas amostras de corpos moedores (bolas de moinho) fabricados em ferro fundido branco de alto cromo, com 25mm de diâmetro. As amostras foram previamente seccionadas para estabelecer superfícies planas e paralelas para que pudessem ser acopladas à célula eletrolítica, conforme apresentado na Figura 4.1.

Figura 4. 1 - Corpo moedor com extremidades seccionadas

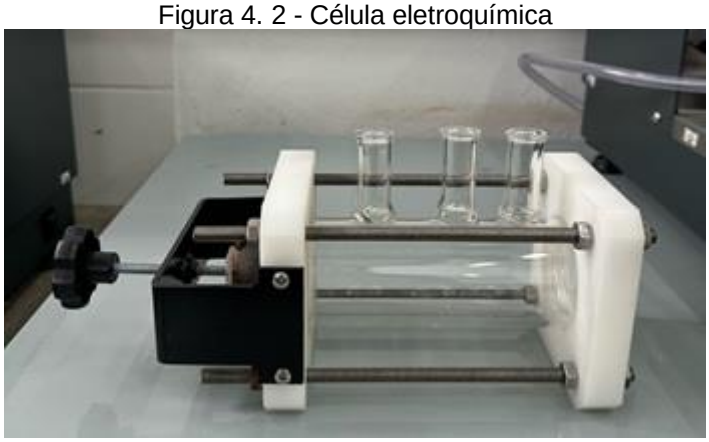
Fonte: Própria autora

As amostras foram preparadas por meio de lixamento sequencial utilizando lixas com granulações 80#, 120#, 180#, 240#, 320#, 400#, 600# e 800#. Após o lixamento, as amostras foram lavadas com água corrente e álcool, e secadas com o auxílio de um secador.

Os ensaios de polarização foram conduzidos em triplicata, utilizando-se uma célula eletroquímica de três eletrodos (Figura 4.2), composta por um eletrodo de referência de calomelano saturado (SCE), um contraeletrodo de platina (CE) e o eletrodo de trabalho, representado pela amostra do metal em estudo. As medidas foram realizadas após um período de estabilização do potencial de circuito aberto (OCP) de 1 hora. A varredura foi conduzida a uma

taxa constante de 1mV/s, no intervalo de -250mV em relação ao OCP até +1000mV ou até atingir uma densidade de corrente de 1mA/cm^2. Os valores de densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) e potencial de corrosão (E_{corr}) foram obtidos por meio da extrapolação das retas de Tafel.

Figura 4. 2 - Célula eletroquímica



Fonte: Própria autora

Foi utilizado o potenciostato modelo AutoLab (Figura 4.3), controlado pelo programa NOVA 2.1, responsável tanto pela execução dos ensaios quanto pela aquisição dos dados para geração das curvas de polarização.

Figura 4. 3 - Imagem do potenciostato AutoLab

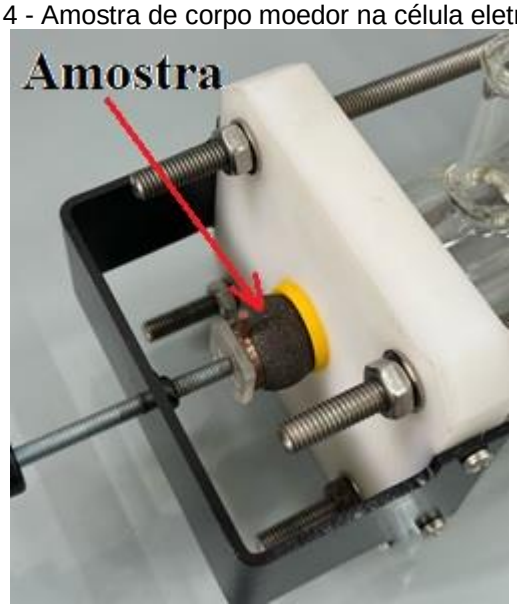
Fonte: Própria autora

Os ensaios foram realizados em dois meios diferentes, um com solução padrão de NaCl e um com polpa de minério, ambos com concentração de 3,5%.

As amostras dos corpos moedores, que foram empregadas como eletrodo de trabalho, foram acopladas à célula eletroquímica de modo que apenas uma área permanecesse exposta ao meio corrosivo, conforme ilustrado na Figura 4.4.

Essa configuração assegurou o controle da área de exposição durante os ensaios eletroquímicos, possibilitando a realização das análises posteriores.

Figura 4. 4 - Amostra de corpo moedor na célula eletroquímica



Fonte: Própria autora

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo reúne os resultados obtidos nos experimentos conduzidos neste estudo, acompanhados das respectivas análises, buscando estabelecer correlações com informações disponíveis na literatura.

5.1 Análise Química - Mapa de Composição

A análise química global dos corpos moedores, apresentada na Tabela 5.1, foi obtida do trabalho de Santos (2014), que utilizou o mesmo material empregado neste estudo. Verificou-se que a composição das amostras está de acordo com os limites estabelecidos pela norma ASTM A532 (2019).

Tabela 5. 1 - Composição química global das amostras (% em peso)

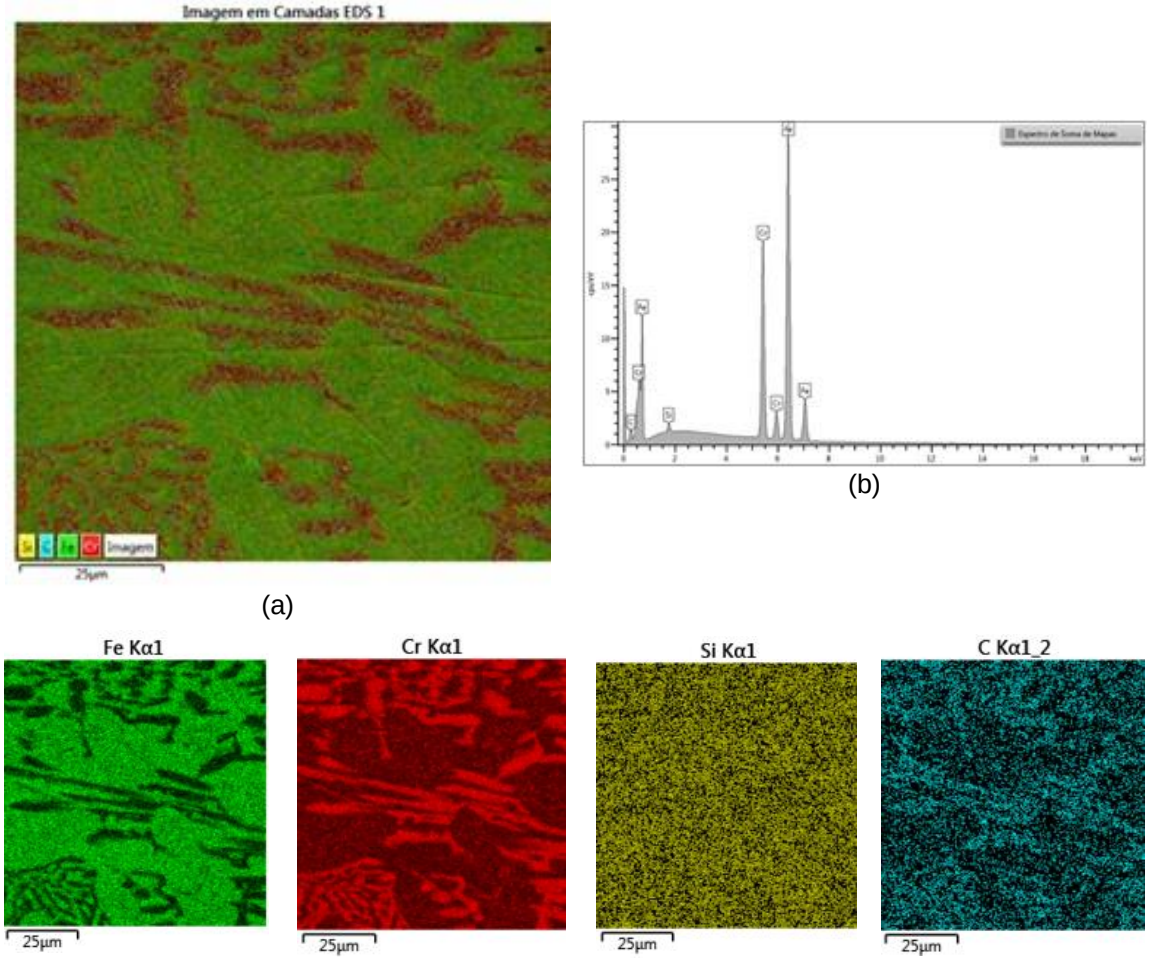
Análise	Fe	C	Cr	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Cu
1	72,100	2,950	23,400	0,447	0,528	0,035	0,011	0,024	0,328	0,050
2	72,700	2,660	23,100	0,458	0,529	0,031	0,009	0,025	0,319	0,050
3	72,500	2,730	23,300	0,463	0,518	0,034	0,008	0,022	0,317	0,048
Média	72,400	2,780	23,300	0,458	0,525	0,033	0,009	0,023	0,321	0,049
ASTM A532	Balanço	2,0 - 3,3	23,0 - 30,0	1,5 máx.	2,0 máx.	0,1 máx.	0,06 máx.	3,0 máx.	2,5 máx.	1,2 máx.

Fonte: (Santos, 2014; ASTM A532, 2019)

5.1.1 Mapa de composição

Cirilo (2022), analisando os mesmos corpos moedores, executou a análise qualitativa da composição, conduzida com o auxílio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada à espectroscopia por dispersão de energia (EDS), no Laboratório de Microscopia Eletrônica – NanoLab (DEMET – EM – REDEMAT - UFOP). Foram executados mapas de composição para identificar a distribuição dos principais elementos. A Figura 5.1 apresenta esses mapas, enquanto na Tabela 5.2 encontram-se os resultados médios semiquantitativos dos teores (% em peso) dos elementos detectados, os quais foram comparados aos limites estabelecidos pela norma ASTM A532 (2019), classe III.

Figura 5. 1 - Mapa de composição do corpo moedor: a) Região da amostra submetida à análise por EDS; b) Espectro de soma de mapas; c) Elementos distribuídos na matriz



(c)
Fonte: (Cirilo, 2022)

Tabela 5. 2 – Comparação entre a composição química do corpo moedor de acordo com a norma ASTM A532 (2019) e a análise química semiquantitativa do corpo moedor via EDS

Elementos Químicos	ASTM A532 (Classe III) (% em peso)	Corpo moedor (% em peso)
C	2,0 - 3,3	2,61
Cr	23,0 - 30,0	26,42
Si	1,5 máx.	0,46

Fonte: (Cirilo, 2022)

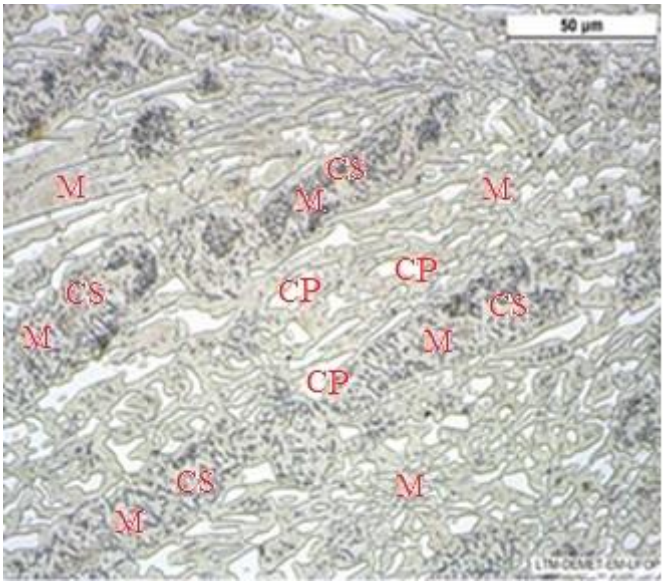
Os resultados obtidos indicam que a composição química do corpo moedor atende aos requisitos da norma ASTM A532 (2019) para a classe III, com concentrações de carbono, cromo e silício dentro dos limites especificados. Ressalta-se que o cromo exerce função essencial na liga, favorecendo a

formação de carbonetos, promovendo maior resistência à corrosão e contribuindo para a estabilidade microestrutural em condições de alta temperatura (Jiyang, 2011; Cirilo, 2022).

5.2 Análise Microestrutural

A análise da microestrutura das amostras foi realizada no trabalho de Cirilo (2022). As imagens obtidas por microscopia óptica das amostras analisadas revelaram a presença de uma microestrutura típica de um ferro fundido branco hipoeutético de alto cromo, composta por carbonetos primários (CP) e secundários (CS) do tipo M_7C_3, imersos em uma matriz martensítica (M), como ilustrado na Figura 5.2 (Cirilo, 2022).

Figura 5. 2 - Microestrutura da amostra com um aumento de 500x



Fonte: (Cirilo, 2022)

5.3 Dureza

Cirilo (2022) também realizou a caracterização da dureza das amostras utilizando o método Rockwell C. Para isso, foi empregado um durômetro com carga de 150kgf e penetrador cônico de diamante. Foram efetuadas sete medições seguindo um perfil radial, com espaçamento de 2mm a partir da borda em direção ao centro da amostra.

Os valores obtidos nos ensaios de dureza das amostras encontram-se apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5. 3 - Valores de dureza HRC das amostras

Ensaios de Dureza Rockwell C (HRC)							
1º	**2º**	**3º**	**4º**	**5º**	**6º**	**7º**	**Média**
59,9	61,1	59,6	57,9	58,1	60,0	58,8	59,3

Fonte: (Cirilo, 2022)

5.4 Composição do Minério

A Tabela 5.4 apresenta a composição química típica do minério utilizado nos ensaios, fornecida pela empresa que cedeu o material.

Tabela 5. 4 - Composição química do minério (% em peso)

Fe	**SiO_2**	**AL_2O_3**	**P**	**MnO**	**CaO**	**TiO_2**
63,03	6,497	0,341	0,068	0,071	0,017	0,036

Fonte: Própria autora

5.5 Ensaio Eletroquímico

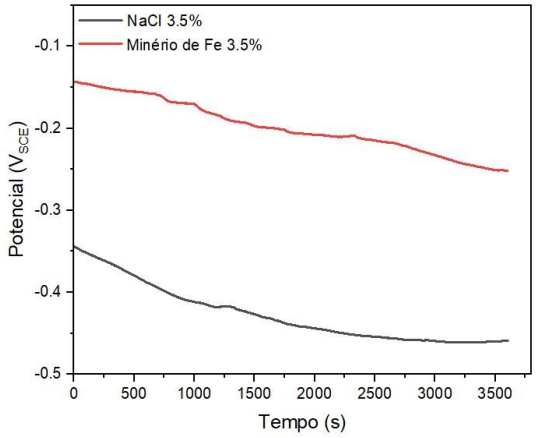
O pH da polpa de minério, utilizada no ensaio eletroquímico, apresentou um valor de 8,87, caracterizando um meio levemente alcalino. Essa condição pode afetar significativamente os mecanismos eletroquímicos de corrosão dos corpos moedores, uma vez que o pH influencia a solubilidade dos íons metálicos e a formação de filmes passivantes ou produtos de corrosão sobre a superfície do material (Liu *et al.*, 2013; Venugopal; Narayanan, 2005).

Os resultados obtidos nos ensaios de corrosão por polarização potenciodinâmica, realizados com amostras de FFBAC em dois meios distintos, foram devidamente tratados. O pH da polpa de minério, utilizada no ensaio eletroquímico, foi determinado, apresentando um valor de 8,87, caracterizando um meio levemente alcalino. A partir desses dados, foram geradas as curvas de Potencial de Circuito Aberto (OCP) e de polarização, apresentadas nas Figuras 5.3 e 5.4, respectivamente.

A partir da análise dos ensaios eletroquímicos, observou-se que o meio com NaCl 3,5% promoveu maior tendência à corrosão em comparação à polpa de minério de ferro. A curva de polarização revelou densidades de corrente mais elevadas na solução salina, indicando maior taxa de corrosão devido à presença de íons cloreto, conhecidos por romper camadas passivas e acelerar o ataque

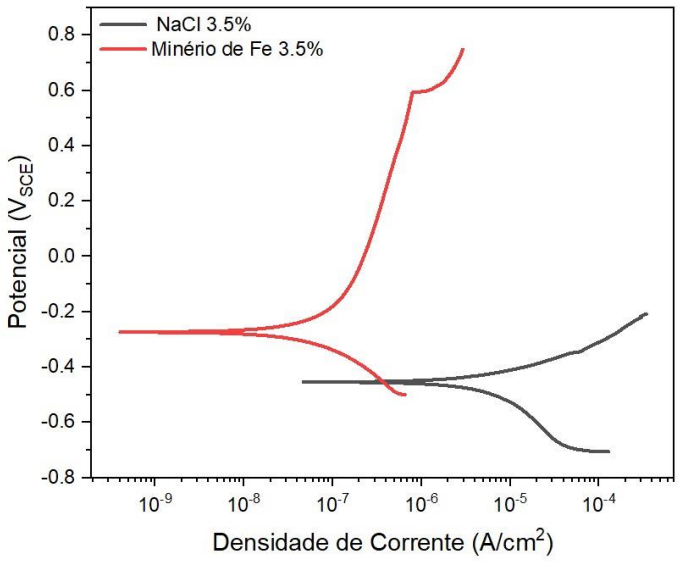
corrosivo (Gentil, 2011; Fontana, 1987). Além disso, os potenciais de circuito aberto medidos ao longo do tempo apresentaram valores mais negativos no NaCl 3,5%, refletindo a maior instabilidade eletroquímica do material nesse ambiente (Panossian, 1993). Em contrapartida, a polpa de minério apresentou comportamento menos agressivo, com menores densidades de corrente e potenciais mais nobres. Observa-se ainda um comportamento típico de passivação nesse meio, evidenciado pela região em que a densidade de corrente permanece praticamente constante mesmo com o aumento do potencial, indicando a formação de uma camada protetora que dificulta a continuidade do processo corrosivo (Gentil, 2011).

Figura 5. 3 - Curvas de potencial de circuito aberto



Fonte: Própria autora

Figura 5. 4 - Curvas de Polarização Potenciodinâmica



Fonte: Própria autora

A Tabela 5.5 apresenta os parâmetros eletroquímicos obtidos nos ensaios de polarização linear, incluindo os valores de E_{corr} e I_{corr}.

Tabela 5. 5 - Parâmetros Eletroquímicos do ensaio de polarização linear

Meio	E_{corr} (V)		I_{corr} (μA/cm^2)	
	Média	DP	Média	DP
NaCl 3,5%	-0,441	0,022	3,64	1,90
Polpa de minério	-0,232	0,056	0,09	0,08

Fonte: Própria autora

Segundo Gentil (2022), quanto mais negativo for o potencial de corrosão (E_{corr}), maior a susceptibilidade do material à corrosão, e quanto maior a densidade de corrente de corrosão (I_{corr}), maior será sua taxa de corrosão. Com base nisso, observa-se que a amostra em solução de NaCl 3,5% apresentou o E_{corr} mais negativo (-0,441 ± 0,022V), indicando maior tendência à corrosão em comparação com a polpa de minério de ferro que apresentou E_{corr} de -0,232 ± 0,056V. Além disso, os valores de I_{corr} reforçam essa análise: a amostra em NaCl 3,5% apresentou I_{corr} média de 3,64A/cm², consideravelmente superior à da polpa de minério de ferro que apresentou o valor médio de I_{corr} de 0,09A/cm², o que indica uma taxa de corrosão mais elevada no meio com cloreto, como observado por Azizi *et al*. (2013).

Outra justificativa para a maior resistência à corrosão da amostra em polpa de minério é o valor do pH (pH=8,87), indicando um meio ligeiramente alcalino que, de acordo com Adam *et al*. (1986) e Marimuthu e Kannoorpatti (2016), estudando o efeito do pH nas correntes galvânicas, concluíram que as correntes galvânicas diminuem com o aumento do pH, indicando o papel que a passivação do FFBAC desempenha em valores de pH mais elevados.

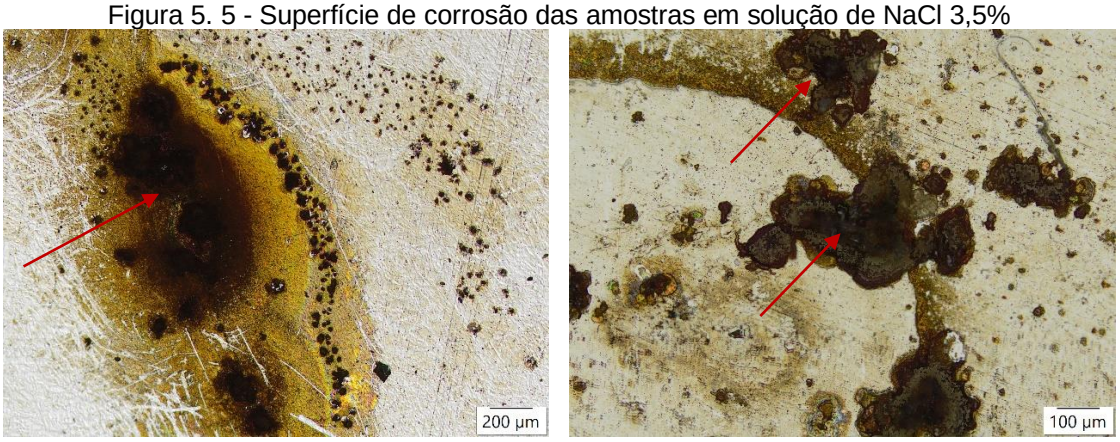
5.6 Análise da Superfície de Corrosão

A partir das imagens de microscopia óptica, avaliou-se morfologicamente o ataque corrosivo nas amostras de FFBAC após os ensaios de polarização potenciodinâmica. Na Figura 5.5, observa-se que as amostras submetidas ao ensaio em solução padrão de NaCl 3,5% apresentaram corrosão do tipo generalizada, caracterizada por extensas áreas uniformemente atacadas e acúmulo de produtos de corrosão, com maior concentração em regiões com

defeitos, como poros, indicados pelas setas vermelhas. Esse tipo de corrosão está associado à elevada agressividade dos íons cloreto, que rompem filmes protetores e intensificam o ataque (Revie, 2008; Jones, 1996; ASTM G46-94, 2018).

Nas amostras expostas à polpa de minério de ferro (Figura 5.6), foi observada a ocorrência de corrosão mais localizada, concentrada em pontos de defeitos do material, que atuam como áreas de alta energia favorecendo o início dos processos corrosivos (Revie, 2008; ASTM G46-94, 2018). No entanto, não se verificou corrosão generalizada com a mesma intensidade observada na solução salina.

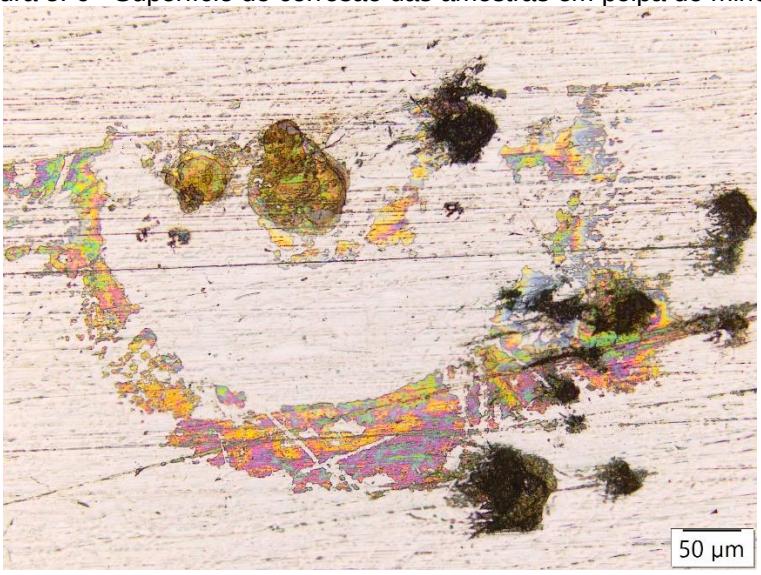
Figura 5. 5 - Superfície de corrosão das amostras em solução de NaCl 3,5%



(a) (b)

Fonte: Própria autora

Figura 5. 6 - Superfície de corrosão das amostras em polpa do minério

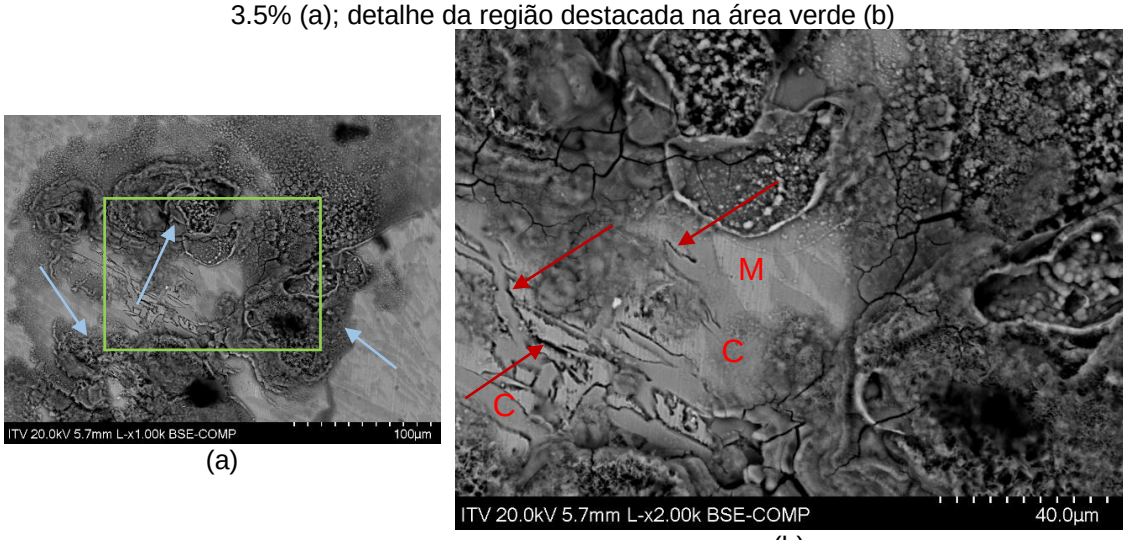


Fonte: Própria autora

A caracterização das superfícies com produtos de corrosão por microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitiu uma análise mais detalhada das regiões que foram atacadas.

Na Figura 5.7, referente às amostras expostas à solução de NaCl 3,5%, verificou-se regiões com formação de produtos de corrosão, com aspecto de uma “flor”, indicadas com setas azuis na Figura 5.7. É possível observar regiões bem distintas, apresentando tonalidades diferentes, devido ao modo de obtenção da imagem por elétrons retroespalhados no MEV. No detalhe da Figura 5.7b a fase clara corresponde à matriz (M) e a fase cinza corresponde aos carbonetos (C). Observa-se que a matriz apresenta produtos de corrosão, o que indica a ocorrência de corrosão galvânica local, promovida por diferenças de potencial eletroquímico entre os constituintes do FFBAC (matriz e carbonetos), com maior intensidade na interface carboneto-matriz, como indicado por setas vermelhas (Marimuthu; Kannoorpatti, 2016; Fontana, 1987; ASM Handbook, 2000).

Figura 5. 7 - Imagens por microscopia eletrônica da superfície de corrosão em meio de NaCl 3.5% (a); detalhe da região destacada na área verde (b)



(a) (b)

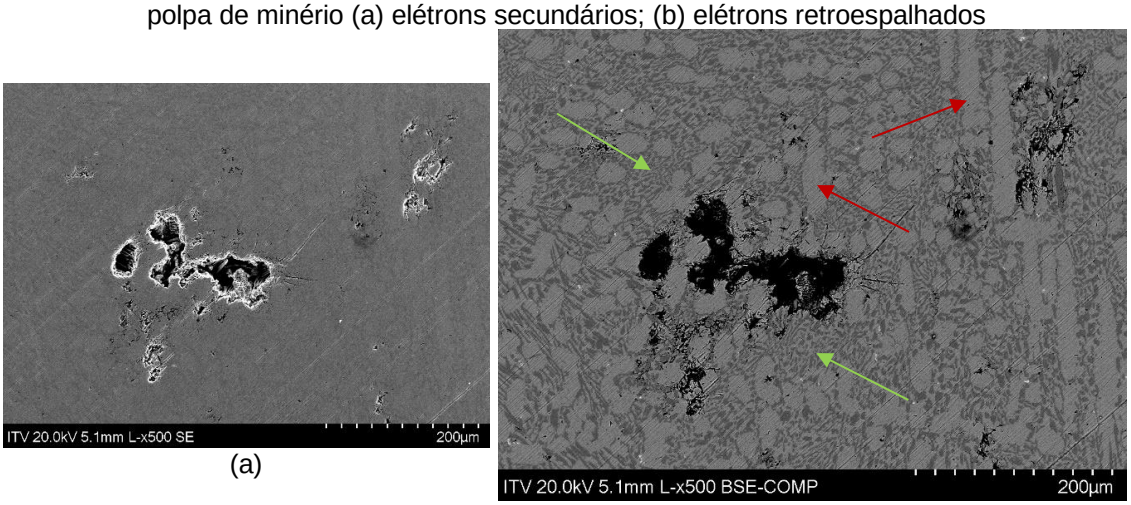
Fonte: Própria autora

As micrografias das amostras expostas à polpa de minério de ferro (Figura 5.8) evidenciaram indícios de ataque localizado nas regiões de defeitos da amostra. Na imagem por microscopia eletrônica no modo de elétrons secundários, os produtos de corrosão correspondem às áreas claras nas bordas

do defeito, como apresentado na Figura 5.8a. Esse mesmo comportamento foi observado nas imagens por microscopia óptica (Figura 5.6).

Na Figura 5.8b, no modo de imagem retroespalhado, verificou-se que não houve corrosão generalizada na superfície da amostra e foram observadas poucas evidências de corrosão na interface matriz-carboneto (matriz indicada por setas vermelhas; carbonetos indicados por setas verdes), confirmando os resultados apresentados nos ensaios de polarização, com o material apresentando melhor comportamento em corrosão em polpa de minério, correspondente a uma redução percentual na densidade de corrente de corrosão de 97% em relação ao meio contendo NaCl 3,5%. A análise visual das superfícies corroídas está de acordo com os critérios estabelecidos pela norma ASTM G46-94 (2018), que orienta a identificação e classificação de formas de corrosão localizada, como a observada neste estudo.

Figura 5. 8 - Imagens por microscopia eletrônica da superfície de corrosão da amostra em polpa de minério (a) elétrons secundários; (b) elétrons retroespalhados



(a) (b)

Fonte: Própria autora

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, avaliou-se o comportamento eletroquímico de corpos moedores utilizados na moagem de minério de ferro.

A partir da caracterização química e microestrutural, confirmou que o material atende aos requisitos da norma ASTM A532, classe III, sendo composto majoritariamente por carbonetos do tipo M_7C_3 distribuídos em uma matriz martensítica, o que lhe garante alta dureza e resistência ao desgaste.

Os ensaios eletroquímicos revelaram diferenças significativas na resposta do material quando exposto a diferentes meios. A solução de NaCl 3,5% promoveu maiores taxas de corrosão, evidenciadas por valores mais negativos de potencial de corrosão (E_{corr}) e elevadas densidades de corrente de corrosão (I_{corr}). Em contrapartida, a polpa de minério de ferro apresentou comportamento menos agressivo, sugerindo um efeito inibidor decorrente da composição química do meio.

As análises por microscopia óptica e eletrônica corroboraram os dados eletroquímicos, evidenciando diferentes mecanismos de degradação: corrosão generalizada na solução de NaCl 3,5% e corrosão localizada na polpa de minério.

Dessa forma, conclui-se que, além das propriedades mecânicas e da resistência ao desgaste, a resistência à corrosão dos corpos moedores deve ser cuidadosamente considerada, especialmente em função do meio em que operam. Os resultados obtidos reforçam a importância de estudos eletroquímicos para prever o desempenho e a durabilidade desses materiais em condições reais de operação, contribuindo para a seleção adequada de ligas e a otimização dos processos de moagem mineral.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAM, K.; NATARAJAN, K. A.; RIEMER, S. C.; IWASAKI, I. Electrochemical Aspects of Grinding Media-Mineral Interaction in Sulfide Ore Grinding. **Corrosion**, v. 42, n. 8, p. 440-446, Aug. 1986.

AFONSO, A. F. M. **Estudo da resistência ao desgaste de um ferro fundido branco de alto cromo.** 2012. 64f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 2012.

ALBERTIN, E.; MORAES, S. L. Maximizing wear resistance of balls for grinding of coal. **Wear**, v. 263, p. 43-47, 2007.

ALDRICH, C. Consumption of steel grinding media in Mills – A review. **Minerals Engineering**, v.49, p.77-91, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM A532-19: Standard specification for abrasion-resistant cast irons standard**. West Conshohocken: ASTM International, 2019. 4p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G40-22a: Standard terminology relating to wear and erosion**. West Conshohocken, PA: ASTM, 2022. 9p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G46-94: Standard guide for examination and evaluation of pitting corrosion.** West Conshohocken, PA: ASTM, 2018. 14 p.

ASM HANDBOOK: **Corrosion** – 9. ed. vol. 13. Ohio Materials Park: ASM International, 2000. 1177 p.

AZIZI, A.; SHAFAEI, S.Z.; NOAPARAST, M.; KARAMOOZIAN, M. The effect of pH, solid content, water chemistry and ore mineralogy on the galvanic interactions between chalcopyrite and pyrite and steel balls. **Frontiers of Chemical Science Engineering,** v.7, p. 464–471, 2013

BOND, F.C. Metal wear in crushing and grinding. **Chemical Engineering Progress**, v. 60, n. 2, p. 90, 1964.

CÂNDIDO, L. C. **Notas de aulas da disciplina MET144 – Seleção dos Materiais**. Curso de Engenharia Metalúrgica. Escola de Minas – UFOP, Ouro Preto, MG, 2024.

CASSOLA, M. S.; MORAES, S. L.; ALBERTIN, E. Desgaste Na Mineração: o Caso Dos Corpos Moedores. **REM: Revista Escola de Minas**, v. 59, n. 2, p.173–178, 2006.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e prática do tratamento de minérios britagem, peneiramento e moagem.** 5. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 324p.

CIRILO, P. H. **Caracterização e comparação microestrutural de corpos moedores em ferro fundido branco de alto cromo**. 2022. 38f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

DAVIS, J. Cast Irons. In: **ASM Specialty Handbook**. Materials Park, Ohio: ASM International, 1996. 494p.

DETOGNNI, M. A. **Principais mecanismos de desgaste e avaliação de diferentes ligas para corpos moedores**. 2010. 60f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2010.

FARAH, A. F. **Desenvolvimento de uma liga de ferro fundido branco alto cromo com nióbio, tratada termicamente, para resistência ao desgaste abrasivo**. 1997. 130f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Instituto de Física e Química e Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, 1997.

FIGUEIRA, H. V. O.; LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M. Britagem e Moagem. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A. e FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: 2010, p.143-211.

FILIPOVIC, M. M. Iron-chromium-carbon-vanadium white cast irons: Microstructure and properties. **Hemijska Industrija**, v.68, n.4, p.413-427, 2014.

FONTANA, M. G. **Corrosion Engineering**. 3. ed. Singapore: McGraw-Hill, 1987. 556 p.

GANGOPADHYAY, A. K.; MOORE, J. J. The role of abrasion and corrosion in grinding media wear. **Wear**, v. 104, p. 49- 64, 1985.

GENTIL, V. **Corrosão**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022. 405 p.

GOMES, A. C. T. **Análise da corrosão e da erosão-corrosão do aço carbono em meio com $NaHCO_3$ e CO_2**. 2005. 137f. Dissertação (Mestrado, em Engenharia de Materiais e Processos) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2005.

JIYANG, Z. Colour Metallography of Cast Iron - White Cast Iron (II). **China Foundry**, v.8, n.4, p.447-462, 2011.

JONES, D. A. **Principles and prevention of corrosion**. 2. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1996. 399 p.

LACERDA, A. C.; ARAÚJO, V. H. L.; MATTOS, G. B.; SEIXAS, M. L. MORAES, G. A.; BAPTISTA, A. L. B.; RIBAS, P.R.F. Fatores que afetam a resistência ao desgaste de aços e ferros fundidos utilizados em componentes mecânicos que trabalham em mineração. In: 57° CONGRESSO ANUAL DA ABM INTERNACIONAL, 2002, São Paulo, **Anais [...]** São Paulo: ABM. 2002, p.1810-1819.

LAIRD, G.; GUNDLACH, R.; RÖHRIG, K. **Abrasion-resistant cast iron handbook**. Schaumburg, Illinois: American Foundry Society, 2000. 222 p.

LIU, G.; ZHANG, W.; LI, D.; ZHANG, T. Effect of pH on corrosion behavior of high chromium cast iron in iron ore slurry**. Corrosion Science**, v. 75, p. 243–252, 2013.

LIU, Y.; SHEN, W.; GAO, N. A study on the dynamic characteristics of abrasion for high chromium alloys. **Wear**, v.169, n. 1, p.1-7,1993.

LIMA, L. I. L. **Metodologia para avaliação da corrosão da zona termicamente afetada de aço inoxidável ferrítico AISI439 soldado**. 2007. 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2007.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5. ed., Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 965p.

MARIMUTHU, V.; KANNOORPATTI, K. Corrosion Behaviour of High Chromium White Iron Hardfacing Alloys in Acidic and Neutral Solutions. **Journal of Bio and Tribo-Corrosion**, v. 2, n. 29, p. 1-12, 2016.

MASSOLA, C. P. **Abrasão – corrosão em corpos moedores na moagem de minério de ferro**. 2015. 107f. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

McCAFFERTY, E. **Introduction to Corrosion Science**. New York: Springer, 2010. 575p.

MISCHLER, S. Triboelectrochemical techniques and interpretation methods in tribocorrosion: A comparative evaluation. **Tribology International**, v. 41, n. 7, p. 573–583, Jul. 2008.

MOEMA, J. S.; PAPO, M. J.; SLABBERT, G. A.; ZIMBA, J. Grinding media quality assurance for the comminution of gold ores. In: WORLD GOLD CONFERENCE, 2009, Johannesburg. **Proceedings [...]** Johannesburg: The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2009. p.27-33.

MOUTINHO, J.; GUASTALA, F. A.; NOVAIS, M. R. Projeto de desenvolvimento de nova liga de corpo moedor em ferro fundido branco alto cromo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGLOMERAÇÃO DE MINÉRIOS, 5., 2017, São Paulo - SP. **Anais [...]** 2017, p.149-160.

NATARAJAN, K. A. Laboratory studies on ball wear in the grinding of a chalcopyrite ore. **International Journal of Mineral Processing**, v. 46, p. 205-213, 1996.

OSÓRIO, W. R. R. **Análise da influência de parâmetros estruturais da solidificação de metais e ligas na resistência à corrosão**. 2004. 194p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, SP.

PANOSSIAN, Z. **Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas**. São Paulo: Graphium Publicidade e Editora Ltda., v.1. 1993. 280 p.

REVIE, R. W. **Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering**. 4. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2008. 880 p.

RICARDI, N. C. **Estudo da inibição da corrosão do aço carbono AISI 1920 em solução simulando a água do mar com pólipo fosfatado obtido a partir da epoxidação do óleo de linhaça**. 2014. 59f. Monografia (Graduação em Química Industrial) - Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil, 2014.

ROVERI, E.; CHAVES, A. P. Mecanismos de desgaste de corpos moedores em moinhos de bolas. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 8, n. 4, p. 261-266, 2011.

SANCHES, L. P**. Estudo comparativo quanto a resistência à corrosão entre aços inoxidáveis utilizados em trocadores de calor**. 2009. 79f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

SANTOS, J. M. D.; GUASTALA, F. A.; NOVAIS, M. R. Projeto de desenvolvimento de nova liga de corpo moedor em ferro fundido branco alto cromo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGLOMERAÇÃO DE MINÉRIOS, 5., 2017, São Paulo - SP. **Anais [...]** 2017, p.149-160.

SANTOS, L. C. **Influência do tratamento térmico de revenimento sobre a resistência ao desgaste abrasivo de corpos moedores produzidos com ferro fundido branco de alto cromo**. 2014. 59f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

SILVA, P.F. **Introdução à Corrosão e Proteção das Superfícies Metálicas.** Belo Horizonte: Imprensa Universitária da UFMG, 1981. 357p.

SIRIANI, F. A. **Características gerais de desgaste de mandíbulas em britadores**. 1973. 281f. Tese. (Doutorado em Engenharia de Minas) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 1973.

TABRETT, C.P.; SARE, I.R.; GHOMASHCHI, M.R. Microstructure-property relationships in high chromium white iron alloys. **International Materials Reviews**, v.41, n.2, p.59-82, 1996.

TAO, D.; CHEN, G.L.; PAREKH, B.K. Corrosion protection of mild carbon steel media in phosphate grinding mill using impressed current technology. **Minerals Engineering**, v. 18, p. 481-488, 2005.

THORPE, W.R.; CHICCO, B. The Fe-rich corner of the metastable C-Cr-Fe liquidus surface. **Metallurgical Transactions**, v.16, p.1541-1549,1985.

VARGAS, F.; LEITE, T.O.N.; RODRIGUES, W.G.X.; ANANIAS, M.V.; DEMUNER, L.R. Redução do consumo de corpos moedores na moagem de willemita por meio do uso de teste de bolas marcadas. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, XXVIII, 2019, Belo Horizonte - MG. **Anais [...]** Belo Horizonte – MG, 2019, p.375-382.

VENUGOPAL, R.; NARAYANAN, R. Corrosive wear of grinding media in phosphate slurry**. Wear**, v. 258, n. 3, p. 477–481, 2005.

WEI, D.; CRAIG, I. K. Grinding mill circuits: a survey of control and economic concerns. **International Journal of Mineral Processing,** v. 50, p. 56-66, 2008.

WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. J. **Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery**. 7. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. 444 p.

WOLYNEC, S. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão**. São Paulo: EDUSP, 2013. 163p.

ZHANG, X.; HAN, Y.; KAWATRA, S. K. Effects of grinding media on grinding products and flotation performance of sulfide ores. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, v. 42, n. 3, p. 172-183, 2020.