



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



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

**CORROSÃO DE CORPOS MOEDORES USADOS EM SISTEMAS DE
BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO**

ANA LAURA BRAGA NASCIMENTO

OURO PRETO, fevereiro 2024

ANA LAURA BRAGA NASCIMENTO

ana.lbn@aluno.ufop.edu.br

**CORROSÃO DE CORPOS MOEDORES USADOS EM SISTEMAS DE
BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO**

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

Coorientadora: Jeilce Maria Abreu dos Santos

Ouro Preto, fevereiro 2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

N244c Nascimento, Ana Laura Braga.
Corrosão de corpos moedores usados em sistemas de beneficiamento de minério de ferro. [manuscrito] / Ana Laura Braga Nascimento. - 2024.
43 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Maria Aparecida Pinto.
Coorientadora: Ma. Jeilce Maria Abreu dos Santos.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Corrosão e anticorrosivos. 2. Ondas eletromagnéticas - Polarização.
3. Minérios de ferro. 4. Cromo. I. Pinto, Maria Aparecida. II. Santos, Jeilce
Maria Abreu dos. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 669.01

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Ana Laura Braga Nascimento

Corrosão de corpos moedores usados em sistemas de beneficiamento de minérios de ferro

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 22 de Fevereiro de 2024

Membros da banca

Dr.^a Maria Aparecida Pinto - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto
Engenheira Jeilce Maria Abreu dos Santos - REDEMAT - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Daniel Fraga Pinto - Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Ouro Preto
Dr.^a Nayara Aparecida Neres da Silva - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto

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 25/03/2024



Documento assinado eletronicamente por **Maria Aparecida Pinto, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 30/03/2024, às 11:10, 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 **0693128** e o código CRC **64AC7F81**.

DEDICATÓRIA

Ao meu avô Eustáquio.

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas me auxiliaram nessa longa jornada acadêmica e no árduo trabalho que foi conceber esse Trabalho de Conclusão de Curso do mais "temido" curso da UFOP. Sendo temido por muitos, ele é amado por apenas quem o vive intensamente. Apesar de ser dado como o mais tradicional curso da Escola de Minas, tenho a grande honra de ser mais uma aluna da Gloriosa que o finaliza. De modo especial agradeço a Universidade Federal de Ouro Preto e a Escola de Minas, em especial ao DEMET, que com seus estimados e renomados professores me proporcionaram um ensino de qualidade e conhecimentos inimagináveis.

Agradeço ao ITV por proporcionar um ambiente seguro, altamente equipado e inovador, apoiando pesquisas científicas como a desse trabalho, com seus profissionais dedicados, capacitados e solícitos. Agradeço em especial ao Jimmy Penagos, Cristian Arango, Rodney Santos e à toda equipe de Tribologia.

Agradeço a Profa. Dra. Maria Aparecida Pinto, por incentivar, desafiar e apoiar incondicionalmente todos os seus alunos ao longo desses anos, suas observações e inúmeras horas de dedicação a esse trabalho foram extremamente valiosas, obrigada. Ao Prof. Dr. Geraldo Lúcio de Faria e Prof. Dr. Gilberto Henrique Tavares Álvares da Silva, que em diversos momentos deram a esse trabalho o apoio em seus laboratórios, LTM e NanoLab, em conjunto com a equipe técnica dos laboratórios do DEMET, sem eles parte dos resultados não seria possível.

Aos meus colegas de laboratório da graduação Felipe Mion, Victor Campideli e Vitor Fraga, e do mestrado Jeilce Santos e Leandro Moreira, cujo bom humor, competência e perseverança, foram necessários para que conseguíssemos passar por todo aperto e horas dedicadas a esse projeto.

Por fim, agradeço a todo apoio incondicional da minha família e amigos, por não me deixar desistir em vários momentos de exaustão, sempre me motivando e me fazendo lembrar dos meus objetivos, acreditando no meu potencial e torcendo pelo meu sucesso. O apoio e paciência de vocês foi fundamental para a conclusão dessa etapa da minha vida.

RESUMO

Neste trabalho avaliou-se o efeito da corrosão em corpos moedores utilizados em moinhos no sistema de beneficiamento de minério de ferro. A corrosão ocorre especialmente em ambientes aquosos, um problema comum em metais que estão em contato constante com a polpa de minério, podendo causar danos nos equipamentos e atrasando o processo de beneficiamento. O estudo se concentrou em dois tipos de materiais usados em corpos moedores: ferro fundido branco alto cromo (FFBAC) e aço baixa-liga (ABL). Foram realizados ensaios eletroquímicos de polarização potenciodinâmica em triplicata, utilizando uma solução padrão com 3,5% de NaCl para avaliar o comportamento em corrosão dos corpos de prova. A amostra de FFBAC 1 apresentou o maior E_{corr} e menor i_{corr} , ou seja, um comportamento mais nobre quando comparada à amostra de FFBAC 2 e de ABL. A análise por microscopia óptica e eletrônica de varredura, com o objetivo de caracterizar a microestrutura, mostrou que o ABL apresentou corrosão uniforme, enquanto as amostras de FFBAC apresentaram corrosão galvânica localizada. Assim, a avaliação da resistência à corrosão dos materiais dos corpos moedores mostrou-se relevante para a melhoria da seleção de matérias a serem usados em moinhos a fim de gerar menores perdas e custos operacionais e otimizar o processo de beneficiamento de minérios.

Palavras-chave: Corpos moedores. Corrosão. Polarização. Minério de ferro. Cromo.

ABSTRACT

In this work, the effect of corrosion on grinding bodies used in mills in the iron ore processing system was evaluated. Corrosion occurs especially in aqueous environments, a common problem in metals that are in constant contact with ore pulp, which can cause damage to equipment and delay the processing process. The study focused on two types of materials used in grinding bodies: high-chromium white cast iron (FFBAC) and low-alloy steel (ABL). Electrochemical potentiodynamic polarization tests were carried out in triplicate, using a standard solution with 3.5% NaCl to evaluate the corrosion behavior of the specimens. The FFBAC 1 sample presented the highest E_{corr} and lowest i_{corr} , that is, a more noble behavior when compared to the FFBAC 2 and ABL samples. Analysis by optical and scanning electron microscopy, with the aim of characterizing the microstructure, showed that the ABL presented uniform corrosion, while the FFBAC samples presented localized galvanic corrosion. Thus, the evaluation of the corrosion resistance of grinding body materials proved to be relevant for improving the selection of materials to be used in mills in order to generate lower losses and operational costs and optimize the ore processing process.

Keywords: Grinding bodies. Corrosion. Polarization. Iron ore. Chrome.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 3. 1 - Funcionamento de uma pilha eletrolítica..... | 15 |
| Figura 3. 2 - Curvas de polarização anódicas e catódicas | 17 |
| Figura 3. 3 - Representação gráfica da extrapolação de Tafel..... | 17 |
| Figura 3. 4 - Esquema de montagem do ensaio potenciodinâmico | 18 |
| Figura 3. 5 - Diagrama ferro-cementita metaestável. | 19 |
| Figura 3. 6 - Moinho cilíndrico | 23 |
| Figura 3. 7 - Características dos corpos moedores. | 25 |
| Figura 4. 1 - Bola de moinho cortada ao meio | 26 |
| Figura 4. 2 – Eletroerosão ITV | 27 |
| Figura 4. 3 – Imagem do potenciostato AutoLab | 29 |
| Figura 5. 1 - Comparação da análise química | 31 |
| Figura 5. 2 – Curvas de potencial de circuito aberto | 32 |
| Figura 5. 3 – Curvas de Polarização | 32 |
| Figura 5. 4 – Resultados dos ensaios de polarização..... | 33 |
| Figura 5. 5 - Micrografia do ABL após ensaio de polarização apresentando produto de corrosão uniforme na superfície da amostra: (a) MO e (b) MEV | 34 |
| Figura 5. 6 - Micrografia do FFBAC 1 após ensaio de polarização apresentando regiões de corrosão localizada: (a) MO e (b) MEV | 35 |
| Figura 5. 7 - Microestrutura da amostra FFBAC 1 com a presença de carbonetos primários e eutéticos M_7C_3 e carbonetos secundários na matriz martensítica. | 36 |
| Figura 5. 8 -Microestrutura da amostra FFBAC 2 com a presença de carbonetos primários e | |

| | |
|---|----|
| eutéticos M_7C_3 e carbonetos secundários na matriz martensítica. | 36 |
| Figura 5. 9 - Micrografia do FFBAC 2 após ensaio de polarização: (a) MO; (b) MEV e (c) detalhe do produto de corrosão da região destacada em (b)..... | 37 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 3. 1 - Composição química e dureza de ferros fundidos brancos para bolas de moinhos | 20 |
| Tabela 3. 2 - Propriedades mecânicas de ferros fundidos resistentes à corrosão | 20 |
| Tabela 5. 1 - Análise química realizada em amostras de Ferro Fundido Branco de Alto Cromo e Aço Baixa-Liga..... | 30 |
| Tabela 5. 2 - Resultados dos ensaios de polarização..... | 33 |

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ABL – Aço Baixa-Liga

ABRACO - Associação Brasileira de Corrosão

CE – Contra eletrodo

DEMET – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
e – Elétrons

E - Potencial

E_{corr} – Potencial de corrosão

EDS – Espectroscopia de Energia Dispersiva

FFBAC – Ferro Fundido Branco de Alto Cromo

I - Corrente

i_{corr} – Densidade de corrente de corrosão

LTM - Laboratório de Tratamentos Térmicos e Microscopia Óptica

M^{+n} - Íon dissolvido

M – Metal

MEV – Microscopia eletrônica de Varredura

MO – Microscopia óptica

NanoLab - Laboratório de ensino e pesquisa na área de caracterização microestrutural de materiais.

n – Número de elétrons

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 DA LITERATURA | 14 |
| 3.1 | Conceitos Gerais de Corrosão | 14 |
| 3.2 | Ensaio de Polarização | 16 |
| 3.3 | Corrosão do Ferro Fundido Branco de Alto Cromo | 18 |
| 3.4 | Corrosão do Aço Baixa-Liga..... | 21 |
| 3.5 | Corpos Moedores..... | 23 |
| 4 | PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 26 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 30 |
| 5.1 | Análise Química | 30 |
| 5.2 | Avaliação da corrosão | 31 |
| 5.3 | Análise Microscópica | 34 |
| 6 | CONCLUSÃO..... | 38 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 39 |

1 INTRODUÇÃO

A caracterização microestrutural dos materiais utilizados nos processos de beneficiamento de minério é fundamental para o melhor aproveitamento do recurso mineral a ser utilizado como matéria-prima de processos metalúrgicos. A fim de gerar menores perdas e otimizar o processo de beneficiamento para garantir um produto final de qualidade, os efeitos corrosivos devem ser considerados de grande importância durante a seleção de materiais.

Durante todo o processo de trituração do minério, a moagem é a etapa que concentra maior investimento, pois exige um grande gasto energético e de material (Figueira, Luz e Almeida, 2010), podendo chegar até 75% do gasto energético de uma usina segundo Musa e Morisson (2009, *apud* Massola, 2015). Segundo Rocha (2023), o consumo de corpos moedores em plantas de pelotização varia de 0,60kg/t e 0,80kg/t. Esses valores podem representar um custo considerável de até 50% apenas na etapa de cominuição e até 25% em toda usina de beneficiamento de minério (Massola, 2015).

Segundo Massola (2015), a corrosão está presente em sistemas de mineração que estão em contato com as polpas de minério, como é o caso dos corpos moedores. Estes últimos estão sujeitos a condições de desgaste mecânico, como erosão e abrasão, e processos de perdas de material por ações químicas/eletroquímicas. De acordo com McCafferty (2010) e Gentil (2017), os processos corrosivos na superfície de um metal são agressivos e podem danificá-los, seja devido a interação eletroquímica ou química.

Apesar de se manifestar de diferentes formas e meios, a corrosão em metais é mais comum em meio aquoso (Gentil, 2017). De um modo geral, a corrosão atua na superfície do metal, onde há uma interação eletroquímica entre o agente corrosivo e o metal. O metal apresenta um estado de energia elevado, maior que em seu estado natural de minério, o que, durante o processo de corrosão, o leva a seu estado de menor energia até que todo metal seja consumido e perca sua função devido à deterioração (Silva, 1981).

No caso dos sistemas de moagem a úmido, por ser um processo que envolve reações de oxirredução, são necessárias técnicas eletroquímicas para avaliar a influência dos processos corrosivos no sistema. Os corpos moedores presentes no sistema de moagem a úmido são afetados pela ação do meio corrosivo da polpa do minério de ferro, que influenciam na durabilidade do material selecionado. Segundo Landolt (2006), as técnicas de polarização

permitem avaliar o comportamento em corrosão de materiais metálicos. Elas têm sido usadas, cada vez mais, para entender o efeito do desgaste mecânico na cinética das reações de corrosão (Landolt, Mischler e Stemp, 2001).

Neste trabalho foram avaliados dois tipos de materiais utilizados em corpos moedores que têm grande aplicação industrial na área de moagem de minérios: ferro fundido branco de alto cromo e aço baixa-liga. Ambas as amostras foram fornecidas por diferentes fabricantes, com o objetivo de comparar a influência da corrosão no desempenho e vida útil desses materiais, visto que eles são um fator de alto custo no processo de moagem.

2 OBJETIVOS

Para a realização deste trabalho, foram definidos os seguintes objetivos:

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o efeito da corrosão em corpos moedores fabricados em ferro fundido branco de alto cromo e aço baixa-liga.

2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Caracterizar microestruturalmente amostras de corpos moedores fabricados em aço baixa-liga e ferro fundido branco de alto cromo;
- ✓ Avaliar a resistência à corrosão dos materiais dos corpos moedores, via ensaios eletroquímicos de polarização potenciodinâmica em solução padrão com 3,5% de NaCl.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Esta seção tem por objetivo a apresentação de aspectos fundamentais acerca do estado da arte dos processos de corrosão de metais, em particular dos ferros fundidos brancos de alto cromo e dos aços baixa-liga.

3.1 Conceitos Gerais de Corrosão

Todos os metais e ligas estão sujeitos à corrosão. É impossível eliminar a corrosão, mas é possível entender o meio corrosivo e os mecanismos de corrosão que afetam os materiais, com o objetivo de projetar um sistema de engenharia que vise o seu controle. A corrosão é a deterioração do material, quando sujeito a uma ação química ou eletroquímica, provocada pelo meio ambiente (Silva, 1981).

Uma reação é considerada eletroquímica se ela estiver associada a uma passagem de corrente elétrica em um meio para uma distância finita, maior do que a distância interatômica (Wolyne, 2013). Durante a corrosão do metal ocorrem as reações de oxidação e redução que envolvem a transferência de elétrons entre a superfície metálica e soluções químicas. Na oxidação há perda de elétrons pelo metal e na redução há um ganho de elétrons. Quando esses processos têm lugar em uma célula eletroquímica, ocorrem as reações anódicas (oxidação) e catódicas (redução); as anódicas ocorrem em um eletrodo negativo e as catódicas em um eletrodo positivo, pelo qual elas são responsáveis pela corrosão eletroquímica (Gentil, 2017).

A corrosão eletroquímica normalmente ocorre com a formação de uma pilha de corrosão e envolve a movimentação de elétrons na superfície do metal (Lourenco, 2007). Existe uma condição para a corrosão eletroquímica: a formação da pilha eletroquímica. Ela ocorre com a formação de uma área anódica (superfície em que se forma a corrosão ocorrendo reações de oxidação), de uma área catódica (região na qual não há corrosão na superfície ocorrendo as reações de redução), o eletrólito e uma substância metálica formando uma pilha que envolve, de forma conjunta, as áreas anódicas e catódicas (McCafferty, 2010). A partir da interação elétrica das áreas anódicas e catódicas, acontecerão as reações de oxidação em que metal passa da forma reduzida para a forma oxidada, como representado na Figura 3.1 (Wolyne, 2013).

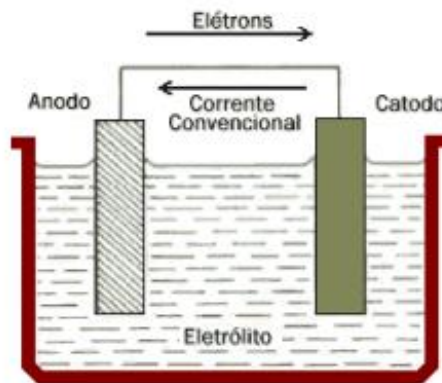


Figura 3. 1 - Funcionamento de uma pilha eletrolítica (ABRACO, 2023)

Pode-se notar uma reação anódica, na qual os íons do metal passam para a solução, como apresentado na Reação 3.1 (ABRACO, 2023), que envolve a oxidação do metal M, formando íons dissolvidos M^{n+} , e a transferência de n elétrons (e) por átomo oxidado:



As reações de redução são catódicas, ocorrendo em meios corrosivos, e os íons que foram transferidos do metal para o meio são consumidos pelas reações. Essas reações podem ocorrer em meios neutros, em meios ácidos e em meios básicos, tanto em ambientes desaerados quanto aerados de acordo com as Reações 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 (ABRACO, 2023):



A taxa de corrosão do metal M depende do potencial elétrico que ocorre na interface metal/eletrólito (potencial do eletrodo), determinado na Reação 3.1. Em condições normais de corrosão, essa reação está em equilíbrio cinético com a reação de redução e o potencial correspondente do eletrodo é chamado potencial de corrosão (McCafferty, 2010).

O potencial de corrosão (E_{corr}) é definido quando um material metálico entra em contato com um meio corrosivo e, como consequência, ele irá apresentar o seu próprio potencial de

eletrodo, sendo que o potencial é frequentemente referenciado em relação a um eletrodo padrão de referência. O conhecimento desse valor é importante durante as técnicas eletroquímicas por oferecer informações que ajudam a medir a eficiência do material em processos corrosivos, como a eficiência dos inibidores de corrosão na proteção anódica e proteção catódica (Wolyneec, 2013).

Segundo Wolyneec (2013), existem vários tipos de corrosão a serem analisados a partir de ensaios eletroquímicos como corrosão generalizada, por pite, em frestas, intergranular e galvânica. Dois tipos de pilhas de corrosão eletroquímica são importantes para a abordagem do estudo: as pilhas de ação local e a pilha ativa-passiva.

A corrosão que é localizada, chamada de pilhas de ação local, está associada à impurezas do metal, e certamente é a mais encontrada em materiais metálicos devido às heterogeneidades do material como inclusões, segregações, trincas ou diferença de tamanhos de grãos e seus contornos, as quais apresentam taxas de corrosão altas por estarem concentradas em uma área específica (Gentil, 2017). Quando um material durante o processo de corrosão forma uma fina camada de película protetora na sua superfície, sofrida pela ação do produto da corrosão, ocorre o fenômeno da pilha ativa-passiva; porém, se esse filme for quebrado, seja pela ação de cloretos ou mecânica, uma área anódica (ativa) é formada na presença de uma grande área catódica (passiva), como consequência haverá corrosão acelerada, gerando o aparecimento de uma corrosão localizada (Gentil, 2017).

3.2 Ensaios de Polarização

Os ensaios de polarização possibilitam obter o comportamento corrosivo de um metal por meio da variação do seu potencial em um determinado meio de acordo com os valores de densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) e do potencial de corrosão (E_{corr}) (Wolyneec, 2013). No E_{corr} passam a corrente anódica no metal, igual à corrente de corrosão, e a corrente catódica, que tem valor igual à anódica, mas em sentido oposto. Assim, a corrente anódica não pode ser medida diretamente, sendo medida apenas por métodos indiretos baseados na extrapolação das retas de Tafel (Gentil, 2017).

A extrapolação de Tafel baseia-se na teoria de potencial por controle misto aplicada sobre as curvas de polarização. O controle misto ocorre de forma simultânea, tanto nas curvas de polarização anódicas (situadas na área anódica e a corrosão é controlada anodicamente) e

nas curvas de polarização catódicas (situadas na área catódica e a corrosão predominante é por polarização catódica), representadas na Figura 3.2 (Gentil, 2017).

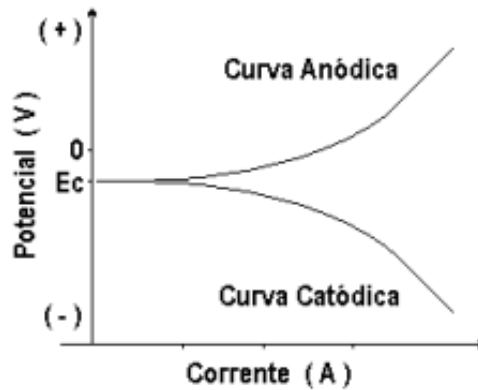


Figura 3. 2 - Curvas de polarização anódicas e catódicas (ABRACO, 2023)

Ao traçar linhas retas uma seguindo a linearidade da curva anódica e outra seguindo a linearidade da curva catódica até ambas interceptarem o eixo de E_{corr} , pode-se determinar i_{corr} . A i_{corr} também pode ser definida como taxa de corrosão ou velocidade de corrosão, dada pela perda de massa do metal em determinada área por um certo tempo. A curva de Tafel, de maneira ideal, deve ser linear com intervalos de potenciais que estão situados próximos no gráfico, como representado na Figura 3.3 (Woly nec, 2013).

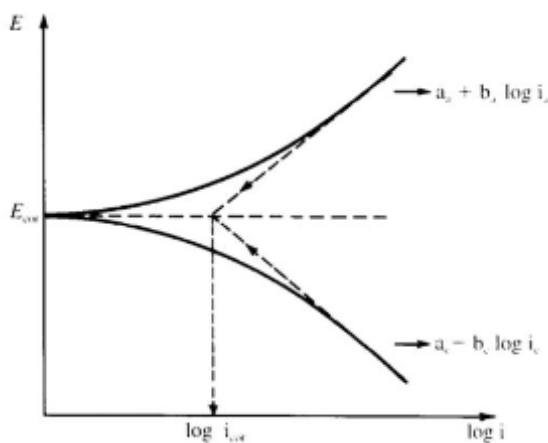
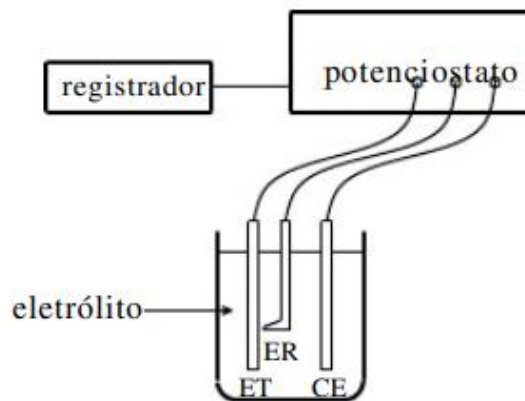


Figura 3. 3 - Representação gráfica da extrapolação de Tafel (Woly nec, 2013)

Os ensaios eletroquímicos permitem determinar a taxa de corrosão rapidamente, usando técnicas de polarização ou varredura linear de potencial. As curvas de polarização representam a relação i_{corr} e E_{corr} durante um experimento e fornecem informações cruciais sobre os processos anódicos e catódicos em sistemas eletroquímicos, sendo essenciais para a

compreensão dos fenômenos de corrosão (César; Oliveira; Bertazzoli, 2011).

O ensaio de polarização potenciodinâmico tem como variável de controle o potencial. Nesse caso, é essencial o uso de um potenciostato que permite variar o potencial em uma determinada faixa a ser aplicada ao corpo de prova que está sendo estudado. A partir do eletrólito (cloreto de sódio, por exemplo) e de um potenciostato, que registra a transferência de elétrons por meio de sinais elétricos, serão obtidas as curvas de polarização junto da extrapolação de Tafel. O objetivo é analisar a sobrevoltagem da dissolução anódica por meio do controle adequado do potencial. Pode-se variar o potencial do metal no sentido anódico ou catódico em comparação com o eletrodo de referência (Osório, 2004). O sistema é ilustrado na Figura 3.4.



ET = eletrodo de trabalho; ER = eletrodo de referência; CE = contraeletrodo.

Figura 3. 4 - Esquema de montagem do ensaio potenciodinâmico (Wolyneq, 2013)

Segundo Mischler (2008), existem metais ativos que dissolvem quando em contato com a solução usada, e metais passivos que vão criar um filme passivo de oxidação na superfície. Como apresentado por Wolyneq (2013) e Gentil (2017), dependendo do ambiente, o metal pode variar a sua taxa de corrosão, devido à variação do potencial de corrosão.

3.3 Corrosão do Ferro Fundido Branco de Alto Cromo

Segundo Coutinho (1992), os ferros fundidos em geral apresentam uma boa resistência à corrosão atmosférica, por água doce ou gás e a altas temperaturas, tanto que são utilizados em fogões e encanamentos. São ligas de Fe-C-Si, com carbono acima do limite de solubilidade, ou seja, acima da temperatura A1 a austenita estará em equilíbrio com a cementita ou com a grafita.

Durante o processo de solidificação, a velocidade de resfriamento e o teor de silício são importantes para a decomposição da cementita em um sistema metaestável e esse equilíbrio da austenita com a cementita resultará na formação do ferro fundido branco, com uma microestrutura final formada por perlita e cementita e, quanto maior a porcentagem de cementita, mais duro e resistente à abrasão será o material (Coutinho, 1992). Essa microestrutura final dos ferros fundidos brancos também pode variar dependendo da sua composição química, quando comparada à composição do líquido eutético, podendo ser hipoeutética (2,11% até 4,3% de C), eutética (4,3% de C) ou hipereutética (acima de 4,3% de C), como apresentado no diagrama Fe-Fe₃C metaestável da Figura 3.5 (Colpaert, 2008).

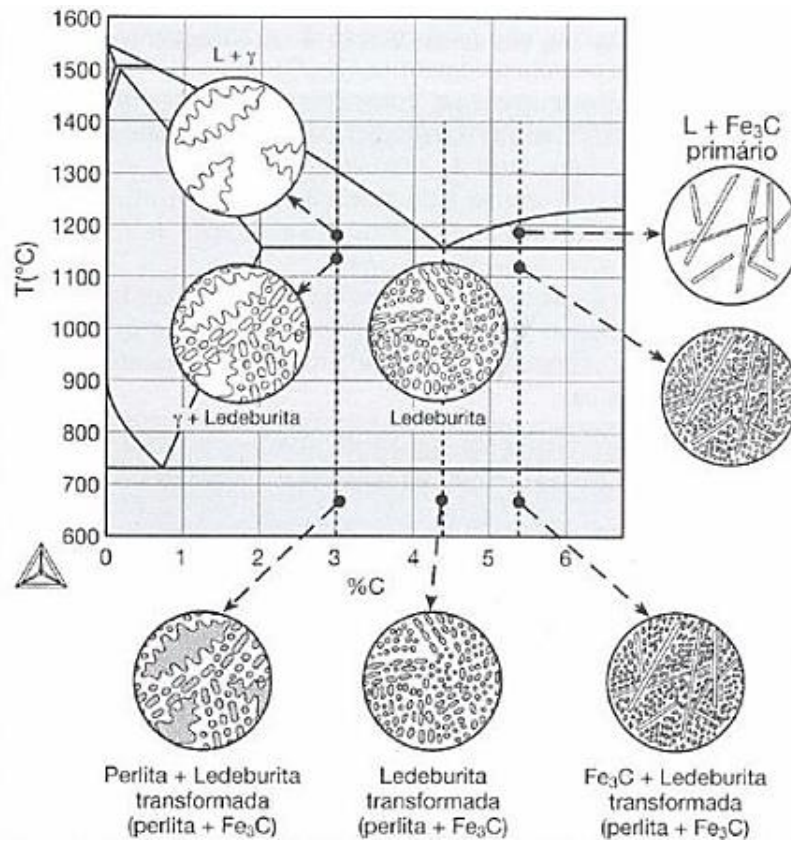


Figura 3.5 - Diagrama ferro-cementita metaestável.
(Colpaert, 2008)

Coutinho (1992) mostrou que além dos tratamentos térmicos, a composição química também influencia na dureza dos ferros fundidos brancos para bolas de moinhos. As composições e dureza das ligas estudadas são apresentadas na Tabela 3.1 e a comparação da composição química dos mesmos são apresentadas na Figura 3.6.

Tabela 3. 1 - Composição química e dureza de ferros fundidos brancos para bolas de moinhos

| Composição química (% em peso) | | | | | | | | |
|---------------------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|
| Tipo | C | Si | Mn | Cr | Ni | S | P | HB |
| 1 | 2,80 | 0,3 | 0,4 | - | - | 0,15 | 0,12 | 415 a 417 |
| 2 | 3,20 | 0,6 | 0,5 | 2,0 | - | 0,15 | 0,15 | 477 a 555 |
| 3 | 3,50 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | - | 0,12 | 0,30 | 477 a 534 |
| 4 | 3,20 | 0,5 | 0,3 | 1,4 | 3,5 | 0,15 | 0,20 | 555 a 627 |

Fonte: Adaptado de Coutinho, 1992

Ao adicionar cromo, em teores entre 12% e 35%, será obtido um material com resistência à corrosão e à oxidação em altas temperaturas, juntamente com a resistência à abrasão. O cromo influencia microestruturalmente nos ferros fundidos branco de alto cromo (FFBAC) formando carbonetos de cromo estáveis, isso ocorre em uma composição de cromo entre 20% a 35% (Coutinho, 1992). A Tabela 3.2 apresenta as propriedades mecânicas de ferros fundidos que são resistentes à corrosão.

Tabela 3. 2 - Propriedades mecânicas de ferros fundidos resistentes à corrosão

| Classe | Dureza HB | Resistência à tração (MPa) | Resistência à compressão (MPa) | Tenacidade (J) |
|-----------------------------------|------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| F. F. Alto Silício | 480-520 | 90-180 | 690 | 2,7-5,4 ^a |
| F. F. Alto Cromo | 250-740 | 205-830 | 690 | 2,7-47 ^a |
| F. F. Cinzento Alto Níquel | 120-250 | 170-310 | 690-1100 | 80-200 ^a |
| F. F. Nodular Alto Níquel | 130 - 240 | 380 - 480 | 1240-1380 | 14-40 ^b |

^(a) barra de 30,5mm de diâmetro, sem entalhe, testada em máquina Charpy, em vão de 152mm;

^(b) ensaio em Charpy padrão.

Fonte: Adaptado de Coutinho, 1992

Os FFBAC contêm uma matriz com um alto teor de cromo em solução, que forma uma película de óxido passiva protegendo o material contra a corrosão, e uma densa rede de carbonetos de cromo duros (Salasi *et al.*, 2019). Apesar de ser um metal com alta dureza, esses materiais ainda apresentam falhas durante as operações, podendo ocorrer uma corrosão na

interfase (matriz/carbonetos), gerando como consequência a diferença de potencial entre matriz e carbonetos de cromo, onde o teor de cromo é menor (Neville *et al.*, 2006). O uso de tratamentos térmicos tornou-se o meio mais econômico e viável para melhorar as propriedades dos metais. Por meio do controle de precipitação, distribuição, tamanho de grão e morfologia dos carbonetos das ligas de FFBAC, os carbonetos secundários deixam de ser formados ao longo dos limites dos grãos da austenita presentes na matriz (gerando defeitos e corrosão na interface de carbonetos eutéticos/matriz) para serem refinados, aumentando sua nucleação e distribuindo-se uniformemente (Hong *et al.*, 2021).

O tratamento térmico de têmpera e revenimento é o mais recomendado. Temperaturas mais elevadas de tratamento térmico podem promover a dissolução parcial dos carbonetos de cromo, reduzindo a fração volumétrica de carbonetos, mas aumentando o teor de cromo na matriz, contribuindo para a melhoria geral da resistência à corrosão (El Jersifi *et al.*, 2022). Nota-se uma dependência em relação à fração de Cr/C com a resistência a corrosão, ao reduzir a relação de cromo e carbono, a área da matriz diminui e a fração de carbonetos primários aumenta, ocorrendo corrosão em torno dos carbonetos e não na matriz (Neville *et al.*, 2006), pois a matriz atua como ânodo de sacrifício, sendo menos nobre que o potencial de corrosão dos carbonetos (Watson *et al.*, 1995).

Outra forma de melhorar a resistência a corrosão do FFBAC é adicionando elementos de liga. O molibdênio pode ser adicionado para aumentar a dureza da matriz e deixar a superfície mais homogênea, atuando como um suporte maior aos carbonetos durante os ataques corrosivos (Imurai *et al.*, 2015).

3.4 Corrosão do Aço Baixa-Liga

O aço baixa-liga (ABL) apresenta ampla aplicação em solo, mar e atmosfera, por isso, deve não só ter ótimas características de resistência mecânica, mas também de resistência à corrosão. Quando tratado termicamente apresenta não só melhorias nas propriedades mecânicas como também na ductilidade e resistência à tração (Wang *et al.*, 2021). A adição de elementos de liga, juntamente com o tratamento térmico, pode promover a formação de uma camada de óxido protetora e aderente, o que dificulta o ataque do aço por agentes agressivos presentes no meio ambiente, assim, o ABL tem maior resistência à corrosão quando comparada a outros metais como o aço carbono (Gentil, 2017).

O cromo e o molibdênio influenciam o comportamento dos aços baixa-liga em meios corrosivos. A presença de cromo promove a formação de compostos compactos e refinados, o molibdênio tende acumular em locais propícios à corrosão, melhorando a resistência à corrosão localizada (Liu *et al.*, 2016). Quanto maior o teor de cromo, mais evidente é o potencial passivo. Uma maior concentração de cromo na superfície, onde ocorre interação intermetálica, reduzirá a sua taxa de dissolução aumentando a região passiva e diminuindo a densidade da corrente de polarização do aço. O molibdênio, que também está em maior concentração na superfície, quando junto ao cromo, proporciona a formação de um filme passivo, aumentando, assim, sua resistência à corrosão (Liang, Guo e Hu, 2007).

O níquel tem maior efeito na diminuição da perda por corrosão, sem alterar o padrão de corrosão, porém se o teor for alterado o padrão de corrosão também é alterado, tornando a adição de níquel mais notável do que a adição de cromo nos ABL (Tahara e Shinohara, 2005). Já nas ligas Fe-Cr, o níquel enriquece a liga superficialmente e faz com que a região se torne positiva, entretanto, o níquel, por ser um elemento substitucional, pode ser substituído por átomos de soluto considerados impurezas, como o S, e geram uma influência negativa no pite (Liang, Guo e Hu, 2007).

O Si aumenta a região de passividade com uma menor taxa de dissolução anódica, podendo prevenir a corrosão por pites. O Al contribui para um ligeiro aumento da corrente de corrosão e induz a alta polarização anódica (Liang, Guo e Hu, 2007). Essas adições de elementos de liga como cromo, molibdênio ou até mesmo alumínio, cobre, manganês, níquel, fósforo e vanádio, têm como objetivo melhorar tanto as propriedades mecânicas quanto a resistência à corrosão atmosférica, por meio da variação da composição química e modificação da sua microestrutura como descrito por Bellei (2004, *apud* Chiquito, 2013).

Além da quantidade de cromo, carbono e outros elementos de liga na microestrutura influenciarem na resistência à corrosão, outras propriedades também foram analisadas na literatura. Wang *et al.* (2015) investigaram como o revenimento induz um aumento na resistência à corrosão no ABL, mostrando que, à medida que se aumenta a temperatura de revenimento (650°C), a densidade de corrente diminui e melhora a resistência à corrosão. O refinamento de grão e orientação cristalográfica preferencial também podem ser usados para aumentar ainda mais a resistência à corrosão dos ABL, podendo melhorar as características de passivação (Wang *et al.*, 2021).

3.5 Corpos Moedores

Segundo Roveri e Chaves (2011), o processo de moagem de minérios pode representar cerca de 40% dos custos de uma planta em operação. De acordo com Alves (2006), os moinhos convencionais tem 40% do seu volume interno ocupado por corpos moedores e minerais que serão moídos. Sendo assim, o custo operacional de uma planta de beneficiamento mineral tem um consumo de corpos moedores significativo.

Os moinhos são alimentados com uma carga contendo corpos moedores e polpa de minério, em um tambor revestido internamente por placas de aço ou borracha, que giram por meio de um motor, apresentado na Figura 3.6. Os corpos moedores são levados pelo tambor que tem uma carcaça giratória. Quando a carga interior atinge uma determinada altura na qual a força centrífuga imposta pelo movimento circular giratório é menor que a gravidade, os corpos moedores caem uns sobre os outros promovendo a fragmentação do minério por meio da compressão ou impacto gerados pela gravidade. Os moinhos, que usam bolas como corpo moedor, têm o objetivo de fragmentar o material até seu refino (Figueira, Luz e Almeida, 2010). As bolas de moinho são repostas diariamente para manter o volume e a taxa de carga solicitada pela produção (Rocha, 2023).

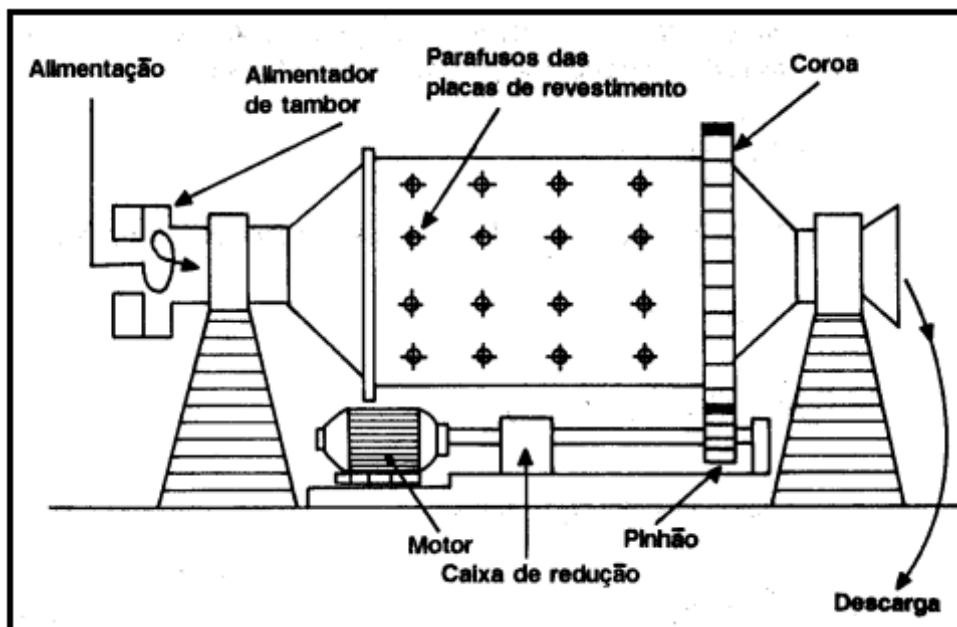


Figura 3. 6 - Moinho cilíndrico
(Figueira, Luz e Almeida, 2010)

Segundo Figueira, Luz e Almeida (2010), o tipo de alimentação do moinho pode ser

feito a seco ou a úmido, vai depender do tipo de circuito de moagem determinado pela usina, que também vai influenciar diretamente no tipo de moinho e corpo moedor a ser empregado. A moagem a úmido geralmente está ligada ao tipo de granulometria que se deseja obter, sendo que a proporção de água e partículas sólidas é um fator crucial, pois quando se tem uma polpa muito diluída a moagem é pouco eficiente e quando se tem muito sólido há um aumento do consumo de bolas nos moinhos.

Chaves e Peres (2009, *apud* Roveri e Chaves, 2011) abordaram diversas formas em que as bolas de moinhos desgastam, a maioria por abrasão, destacando-se a corrosão por pite, que são furos profundos de corrosão no metal gerados a partir de pares galvânicos.

Independentemente do tipo de material das bolas (bolas de ferro ou aço) a moagem de minério a úmido vai gerar reações de corrosão nas áreas desgastadas e nas não desgastadas, Pois há um efeito de par galvânico entre os minerais, que irão atuar como catodos, e entre os corpos moedores, que irão atuar como anodos (Rajagopal e Iwasaki, 1992). Cassola, Moraes e Albertin (2006) fizeram um estudo comparativo de seis tipos de materiais de corpos moedores e avaliaram as condições de corrosão em ensaios de polarização. A Figura 3.7 apresenta o resultado dos ensaios nos quais pode-se perceber diferentes formas de corrosão dependendo do tipo de material e de sua composição química em termos de carbono e cromo.


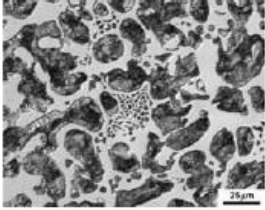

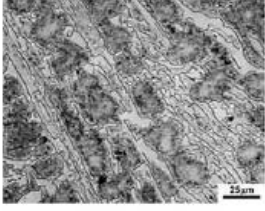

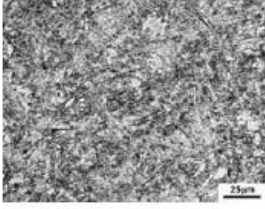

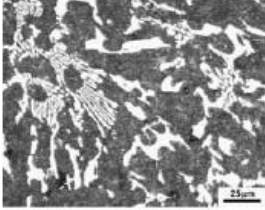

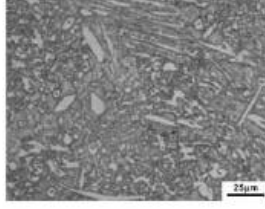

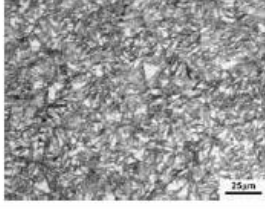
| Corpo moedor | | | Tipo de liga | Comp. química | | Resultado do ensaio de corrosão |
|--------------|---|---|---------------------------------------|---------------|--------|---------------------------------|
| CM | Fotografia | Microestrutura | | C (%) | Cr (%) | |
| 1 |  |  | Ferro fundido branco comum coquilhado | 3,26 | 1,1 | Ataque generalizado |
| 2 |  |  | Ferro fundido branco de alto cromo | 2,71 | 25 | Comportamento passivo |
| 3 |  |  | Aço alto carbono temperado | 0,86 | 0,22 | Ataque por pite |
| 4 |  |  | Ferro fundido branco de alto cromo | 3 | 11 | Ataque por pite |
| 5 |  |  | Ferro fundido branco de alto cromo | 3 | 30 | Comportamento passivo |
| 6 |  |  | Aço alto carbono temperado | 1,19 | 0,59 | Ataque por pite |

Figura 3. 7 - Características dos corpos moedores.
(Cassola, Moraes e Albertin, 2006)

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Corpos de prova foram elaborados a partir de três tipos amostras de bolas de moinho para os ensaios de corrosão e análise da composição química, duas em FFBAC e uma em ABL.

As bolas de moinho foram cortadas ao meio e depois, preferencialmente em região que não apresentava defeitos como rechupes e porosidades, apresentada em vermelho na Figura 4.1, foram obtidas amostras com área de 1cm², por meio do processo de eletroerosão, cujo equipamento é apresentado na Figura 4.2. Em seguida as amostras cortadas foram conectadas a uma das pontas desencapadas de um fio elétrico por uma fita de cobre colante. As amostras foram embutidas a frio juntamente com o fio conectado e depois lixadas em uma politriz, apresentada na Figura 4.3, em uma sequência de lixas 120#, 220#, 320#, 400# a 600#. Após o lixamento, as amostras foram desgorduradas com sabão líquido e algodão, lavadas em água e álcool e secadas com o auxílio de um secador. Posteriormente as amostras tiveram as interfaces de metal/resina seladas com araldite (Figura 4.4).

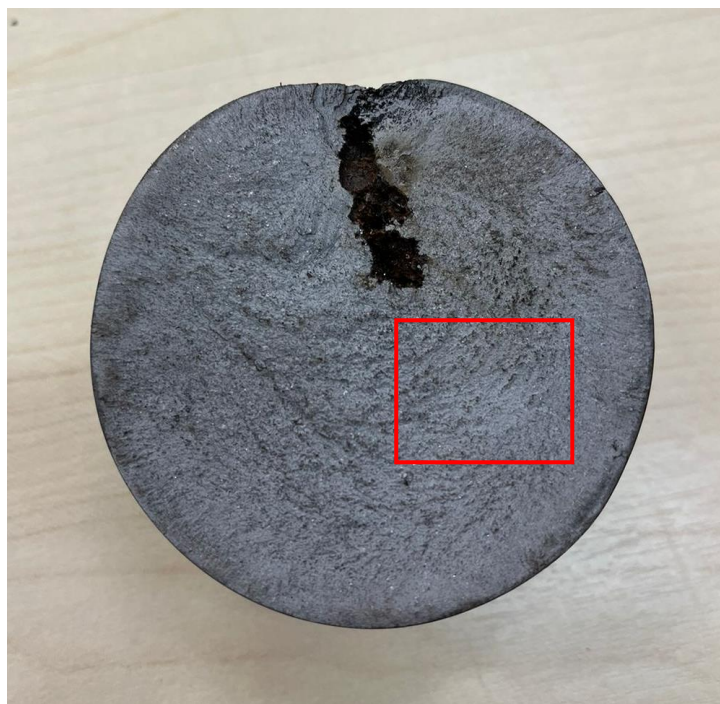


Figura 4. 1 - Bola de moinho cortada ao meio
Fonte: Própria autora



Figura 4. 2 – Eletroerosão ITV
Fonte: Própria autora

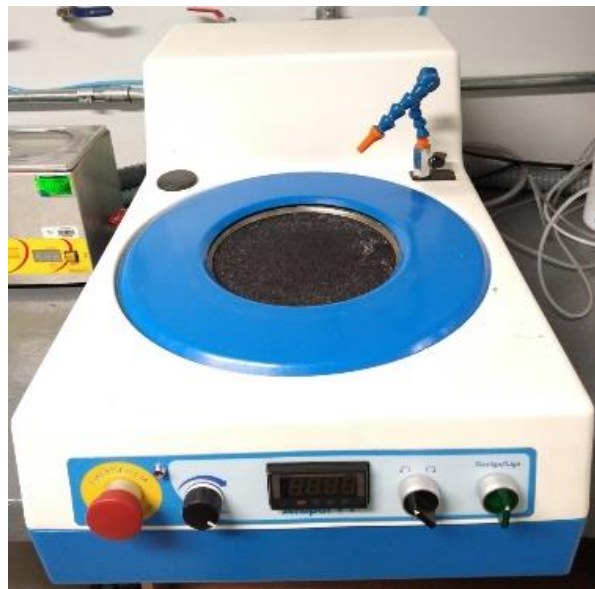


Figura 4. 3 – Politriz ITV
Fonte: Própria autora

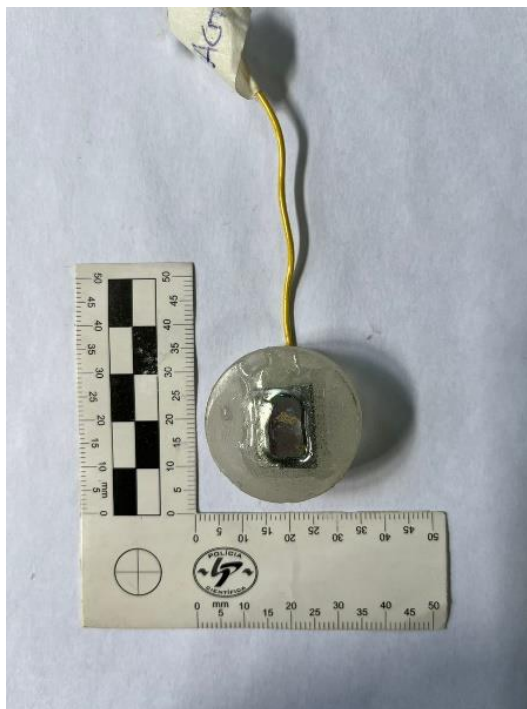


Figura 4. 4 - Amostra embutida a frio com conexão elétrica
Fonte: Própria autora

Foi realizado ensaio de Espectrometria de Emissão Óptica da Siderúrgica VDL, em pontos diferentes da amostra a partir da emissão de luz por átomos excitados, os átomos emitem radiação em comprimentos de onda específicos, que são registrados para identificação e quantificação de elementos. As amostras de FFBC e ABL foram analisadas a partir desse ensaio com o objetivo de apurar se as composições químicas estão de acordo com os padrões exigidos para corpos moedores.

O ensaio eletroquímico de polarização foi realizado em triplicata, em uma célula eletroquímica de três eletrodos, um eletrodo de referência de calomelano saturado (SCE), um eletrodo de platina como contraeletrodo (CE) e o eletrodo de trabalho que é o metal estudado. Os ensaios de polarização potenciodinâmica foram realizados após 1h de estabilização do potencial de circuito aberto (OCP) a uma taxa de varredura constante de 1mV/s, de -250mV_{ocp} a +250mV_{ocp}. A densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) e o potencial de corrosão (E_{corr}) foram determinados pelo método de extrapolação de Tafel. Foi utilizado o Potenciostato AutoLab, apresentado na Figura 4.5. O potenciostato utiliza o programa NOVA 2.1 para controle eletroquímico e recebimento de dados para a geração das curvas de polarização.



Figura 4. 3 – Imagem do potenciostato AutoLab
Fonte: Própria autora

As amostras foram analisadas quanto à estrutura, utilizando as técnicas de microscopia óptica (MO) no equipamento Olympus BX53M, e *software* Olympus Stream Essentials, e microscopia eletrônica de varredura (MEV) no equipamento VEGA III modelo TESCAN. A partir do MEV foram obtidas imagens via detecção de elétrons retroespalhados e elétrons secundários.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise Química

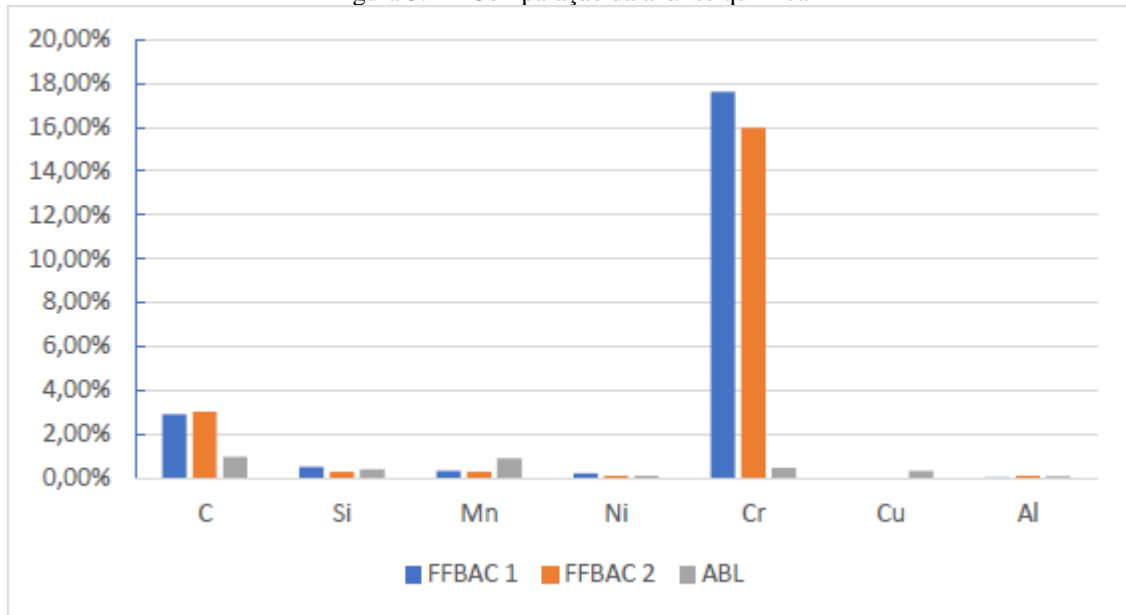
Foram determinadas as composições químicas dos materiais utilizados nos ensaios de polarização com a finalidade de avaliar o teor de cada um dos elementos de liga. A Tabela 5.1 apresenta a composição química de duas amostras de FFBAC e uma amostra de ABL, destacando os principais elementos a serem comparados. A Figura 5.1 apresenta a comparação da composição dos principais elementos destacados na Tabela 5.1 a serem discutidos.

Tabela 5. 1 - Análise química realizada em amostras de Ferro Fundido Branco de Alto Cromo e Aço Baixa-Liga

| Elemento | FFBAC 1 (%) | FFBAC 2 (%) | ABL (%) |
|-----------------|------------------------|------------------------|--------------------|
| C | 2,885 | 3,011 | 0,968 |
| Si | 0,489 | 0,271 | 0,390 |
| S | 0,017 | 0,035 | 0,023 |
| P | 0,038 | 0,040 | 0,028 |
| Mn | 0,310 | 0,273 | 0,889 |
| Ni | 0,183 | 0,075 | 0,089 |
| Cr | 17,610 | 15,973 | 0,465 |
| Mo | 0,000 | 0,000 | 0,035 |
| V | 0,067 | 0,036 | 0,006 |
| Cu | 0,000 | 0,000 | 0,300 |
| W | 0,011 | 0,012 | 0,010 |
| Ti | 0,020 | 0,010 | 0,002 |
| Sn | 0,005 | 0,006 | 0,013 |
| Co | 0,031 | 0,028 | 0,008 |
| Al | 0,004 | 0,070 | 0,054 |
| Nb | 0,039 | 0,006 | 0,002 |
| Mg | 0,019 | 0,018 | 0,000 |
| Fe | 78,27 | 80,14 | 96,719 |

Fonte: Própria Autora

Figura 5. 1 - Comparação da análise química



Fonte: Própria Autora

É possível notar que ambas as amostras de FFBAC têm aproximadamente de 2% a 3% de C em sua composição, confirmando ser um FFBAC hipoeutético, sem formação de grafita. O baixo Si também coopera com a estabilização da cementita, evitando a formação da grafita (Colpaert, 2008). Os altos valores de Cr favorecem o aumento a dureza, resistência ao desgaste e à corrosão, além de estabilizar os carbonetos e impedir a formação da grafita. Por fim, vale destacar a adição de Ni que, mesmo em um teor baixo, pode influenciar, juntamente com o Cr, na resistência à corrosão (Coutinho, 1992).

O ABL é hipereutetóide com 0,968% de C, 0,889% de Mn, 0,465% de Cr, 0,390% de Si e 0,300% de Cu, confirmando ser um aço baixa-liga.

5.2 Avaliação da corrosão

Os resultados dos ensaios de corrosão por polarização potenciodinâmica, realizados nas amostras de ABL e FFBAC, foram tratados e, a partir deles, geradas as curvas de OCP e de polarização apresentadas nas Figuras 5.2 e 5.3, respectivamente.

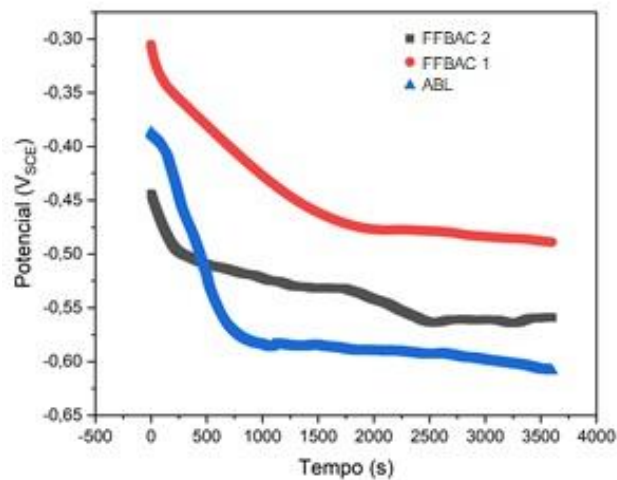


Figura 5. 2 – Curvas de potencial de circuito aberto
 Fonte: Equipe Tribologia ITV

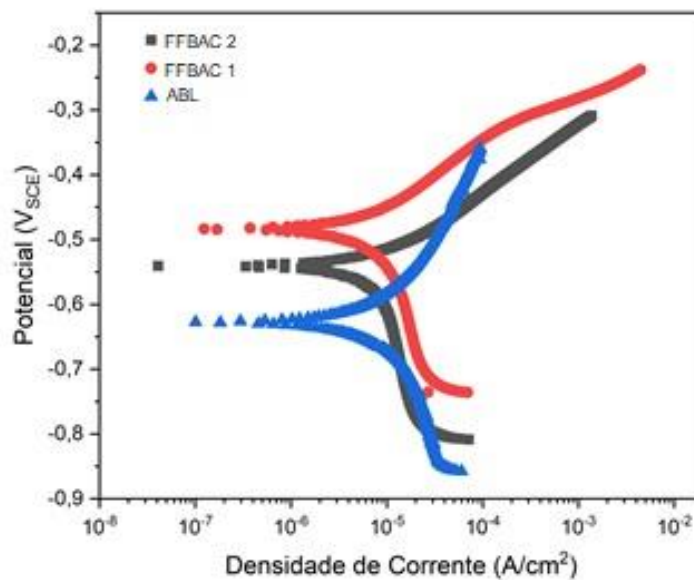
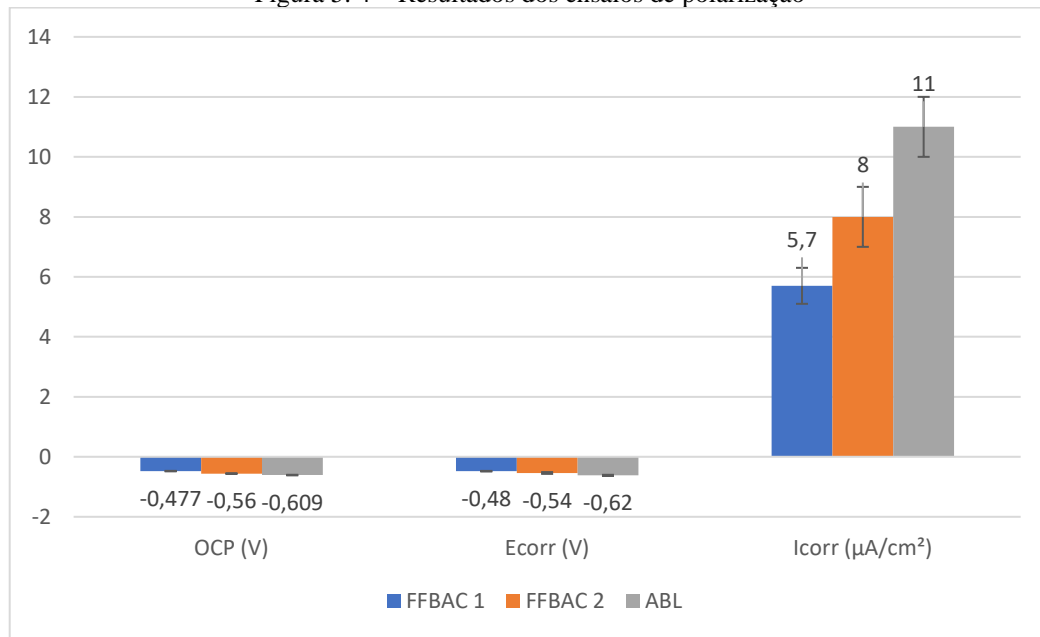


Figura 5. 3 – Curvas de Polarização
 Fonte: Equipe Tribologia ITV

A partir da análise das curvas de polarização pode-se observar que o ABL tem maior tendência à corrosão do que as amostras de FFBAC. Esses resultados estão de acordo com os dados da literatura. Wang *et al* (2015), ao realizar o mesmo ensaio de polarização potenciodinâmica com 3,5% de NaCl em ABL, observaram que quanto maior o tempo de imersão das amostras, mais estáveis são os resultados das taxas de corrosão.

A Figura 5.4 e a Tabela 5.2 apresentam os valores de E_{corr} e i_{corr} obtidos a partir do método de extrapolação de Tafel para as amostras analisadas.

Figura 5. 4 – Resultados dos ensaios de polarização



Fonte: Equipe Tribologia ITV

Tabela 5. 2 - Resultados dos ensaios de polarização

| Amostra | OCP (V) | DP | E _{corr} (V) | DP | i _{corr} (µA/cm ²) | DP |
|----------------|---------|-------|-----------------------|------|---|-----|
| FFBAC 1 | -0,477 | 0,008 | -0,48 | 0,01 | 5,7 | 0,6 |
| FFBAC 2 | -0,560 | 0,002 | -0,54 | 0,03 | 8 | 1 |
| ABL | -0,609 | 0,01 | -0,62 | 0,02 | 11 | 1 |

Fonte: Equipe Tribologia ITV

Analisando o potencial de corrosão das amostras, pode-se observar que o ABL apresenta o potencial $-0,62 \pm 0,02V$ que foi o menor potencial dentre as amostras, sendo as amostras de FFBAC 1 $-0,48 \pm 0,01V$ e FFBAC 2 $-0,54 \pm 0,03V$ as de maior potencial, respectivamente. Isso indica que o ABL é mais ativo que os FFBAC, sendo mais susceptível à corrosão. Ao comparar as amostras de FFBAC observa-se que a amostra FFBAC 2 é mais susceptível à corrosão que a amostra FFBAC 1, provavelmente em função do maior teor de Cr. Segundo Gentil (2013), quanto mais negativo o E_{corr} mais susceptível à corrosão o material será, e quanto mais positivo, mais resistente à corrosão. No mesmo sentido, se a corrente de corrosão for maior, a velocidade de corrosão também será maior. Pode-se observar que a i_{corr} é maior para a amostra de ABL seguida da amostra FFBAC 2 e amostra FFBAC 1, resultando maior taxa de corrosão para o ABL.

5.3 Análise Microscópica da Superfície de Corrosão

A microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura foram realizadas com o objetivo de complementar os resultados dos ensaios de polarização, avaliando a superfície de corrosão das amostras.

A Figura 5.5 apresenta as micrografias feitas em MO (Figura 5.5a) e MEV (Figura 5.5b) da amostra de ABL. O ABL, conforme pode ser observado na Figura 5.5, apresentou corrosão uniforme, visto que os baixos teores de Cr, Ni e Cu não foram suficientes para alterar o tipo de corrosão como apresentado por Tahara e Shinohara (2005) que notaram que a adição de Cu, Ni e Cr em um ABL foi capaz de alterar a condição de corrosão uniforme da superfície para uma condição de corrosão localizada.

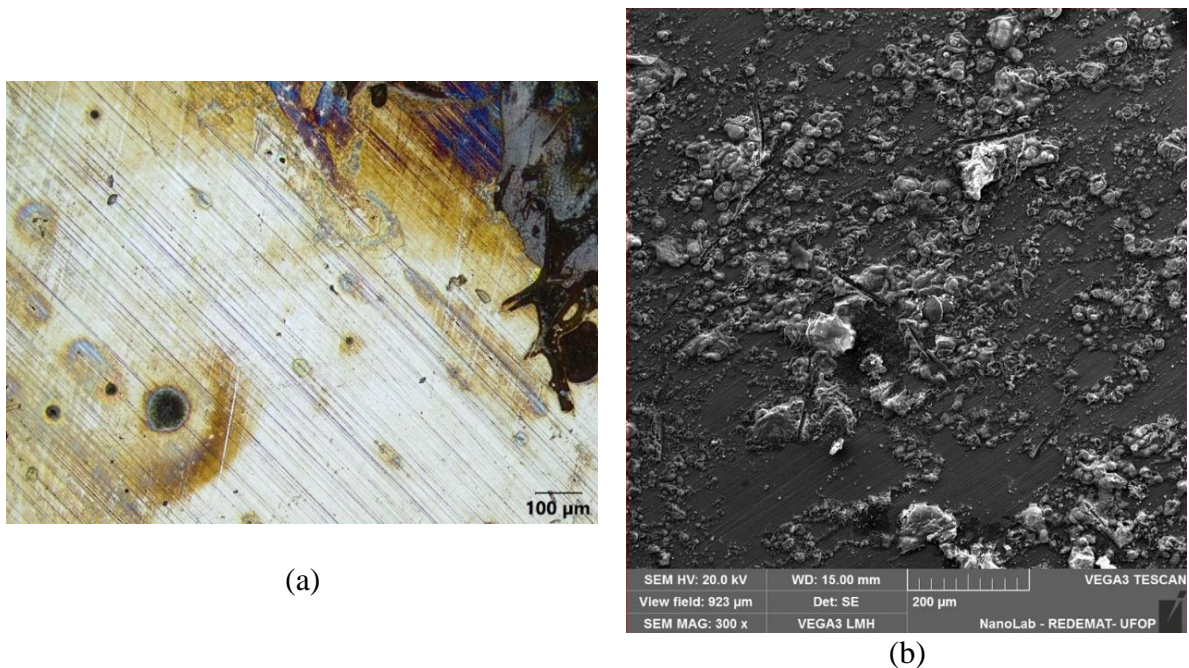


Figura 5. 5 - Micrografia do ABL após ensaio de polarização apresentando produto de corrosão uniforme na superfície da amostra: (a) MO e (b) MEV

Fonte: Equipe Tribologia ITV

A Figura 5.6 apresenta as micrografias feitas em MO (Figura 5.6a) e MEV (Figura 5.6b) da amostra de FFBC 1.

Girelli *et al* (2020), a partir de análise metalográfica, observaram que quando o FFBC tem uma matriz predominantemente martensítica, ela é menos resistente à corrosão do que um FFBC com matriz austenítica, que torna a amostra eletroquimicamente mais nobre. Ao

observar a Figura 5.6, nota-se um tipo de corrosão localizada em regiões nas quais há descontinuidades na superfície da amostra, além disso, observou-se também corrosão galvânica na interface matriz/carbonetos, regiões de maior energia livre que geram um par galvânico.

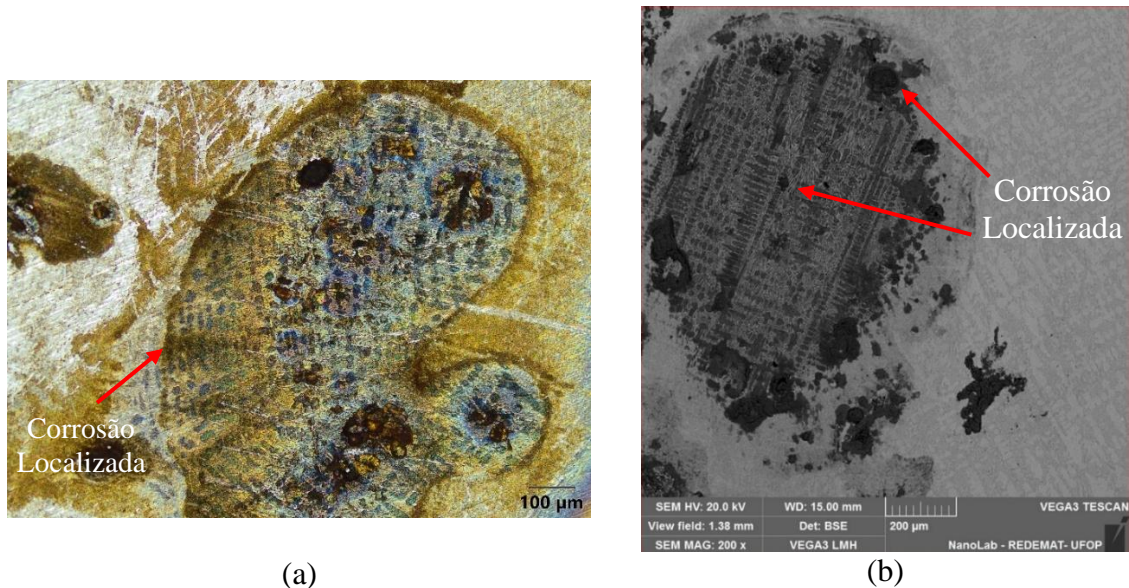


Figura 5. 6 - Micrografia do FFBAC 1 após ensaio de polarização apresentando regiões de corrosão localizada: (a) MO e (b) MEV

Fonte: Equipe Tribologia ITV

A estrutura de fundição dos FFBAC é constituída de matriz austenita que, após tratamento térmico de têmpera se transforma em martensita. Sendo assim, é possível observar na Figura 5.7 que a microestrutura da amostra FFBAC 1 é constituída por carbonetos primários e eutéticos do tipo M_7C_3 e matriz martensítica com a presença de carbonetos secundários. O alto teor de cromo presente em solução sólida na matriz e na forma de carbonetos primários e eutéticos contribuem para o melhor comportamento em corrosão desse material comparado ao ABL.

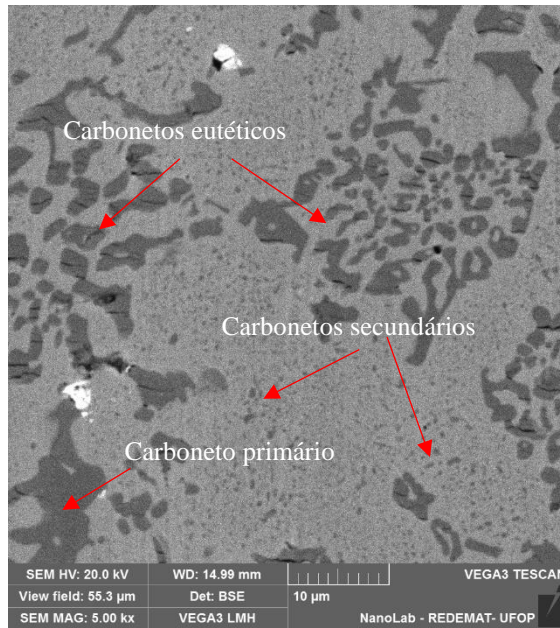


Figura 5. 7 - Microestrutura da amostra FFBAC 1 com a presença de carbonetos primários e eutéticos M_7C_3 e carbonetos secundários na matriz martensítica.
 Fonte: Própria autora

A Figura 5.8 apresenta a microestrutura do FFBAC 2 que, assim como a amostra de FFBAC 1, é constituída de carbonetos primários e eutéticos do tipo M_7C_3 e matriz martensítica com a presença de carbonetos secundários. Entretanto, comparando a Figura 5.7 e a Figura 5.8, pode-se observar que a amostra de FFBAC 2 apresenta estrutura mais grosseira.

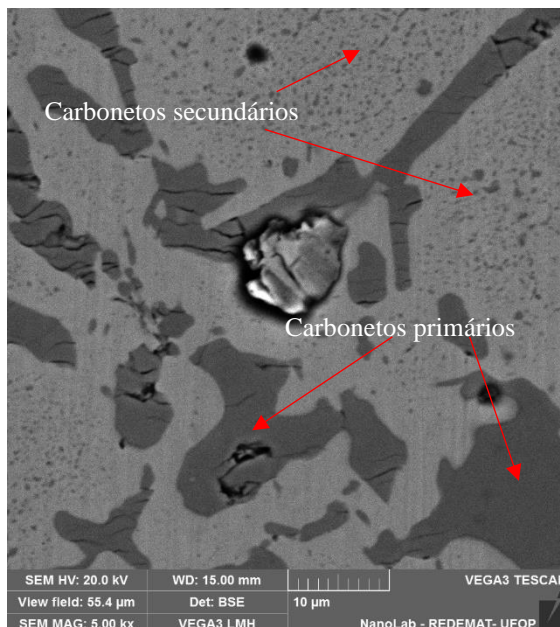


Figura 5. 8 -Microestrutura da amostra FFBAC 2 com a presença de carbonetos primários e eutéticos M_7C_3 e carbonetos secundários na matriz martensítica.
 Fonte: Própria autora

Na análise da superfície de corrosão do FFBAC 2 (Figura 5.9), verificou-se o mesmo

tipo de corrosão localizada observada no FFBAC 1, entretanto, a corrosão foi mais intensa com pontos de concentração de produto de corrosão, como pode ser observado na Figura 5.9c.

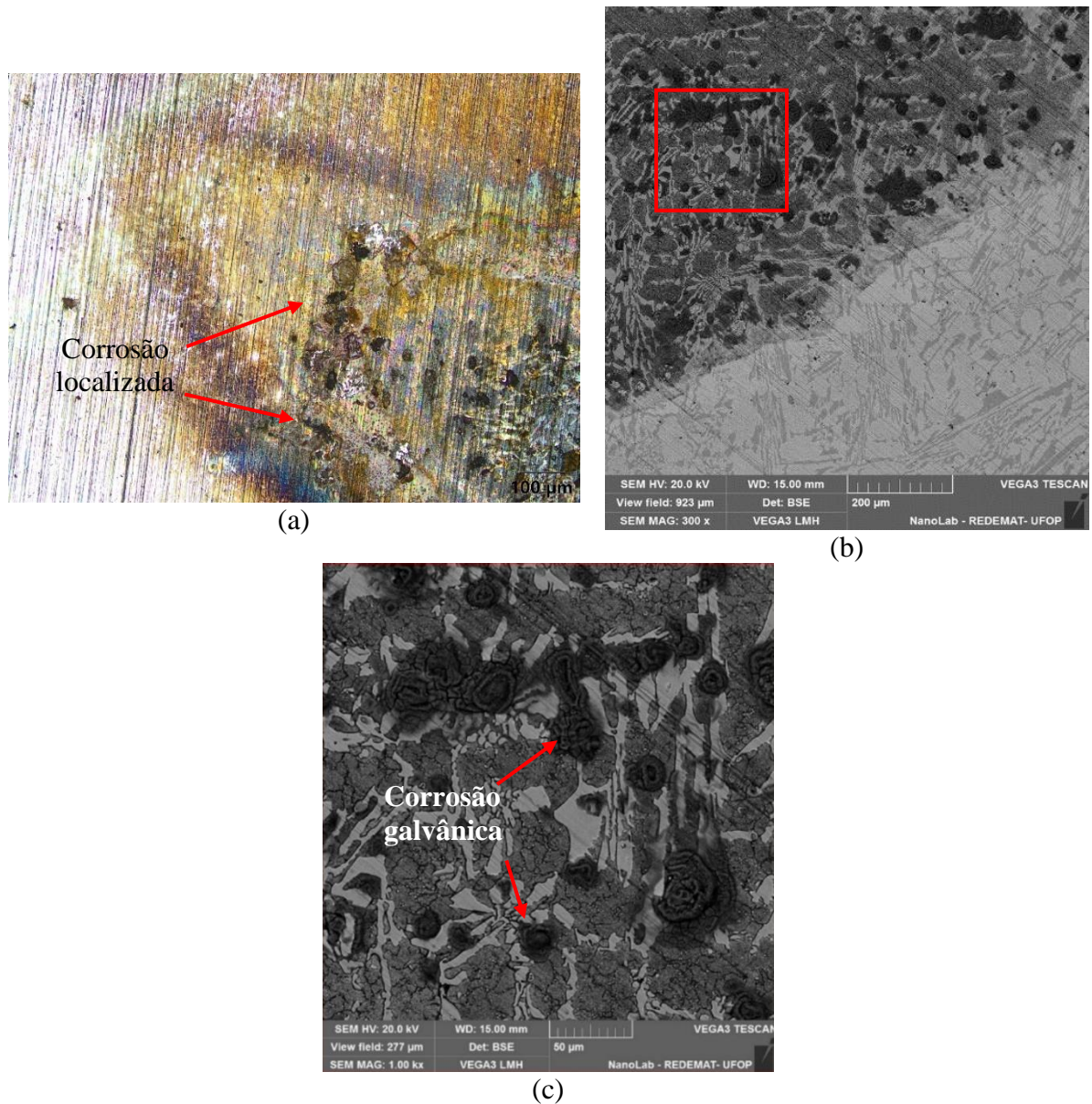


Figura 5. 9 - Micrografia do FFBAC 2 após ensaio de polarização: (a) MO; (b) MEV e (c) detalhe do produto de corrosão da região destacada em (b)

Fonte: Equipe Tribologia ITV

A justificativa para esse comportamento pode estar associada a um teor de cromo total menor que do FFBAC 1 e uma estrutura mais grosseira. Além disso, na análise quantitativa elementar via MEV-EDS verificou-se que a concentração média de cromo na matriz para o FFBAC 1 foi de 13,32% e para o FFBAC 2 foi de 7,68% favorecendo o processo de corrosão nesse material.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou avaliar o comportamento em corrosão em corpos moedores fabricados em ferro fundido branco de alto cromo e aço baixa-liga.

O ensaio de corrosão confirmou que o ABL apresenta o menor E_{corr} e maior i_{corr} , sendo o mais susceptível à corrosão quando comparado às amostras de FFBAC. Entre os ferros fundidos brancos, a amostra FFBAC 2 tem menor E_{corr} e maior i_{corr} que a amostra FFBAC 1. Assim, a amostra FFBAC 2 é mais propensa a sofrer corrosão que a amostra FFBAC 1.

A caracterização microestrutural realizadas nas amostras mostrou que o ABL apresentou corrosão uniforme, enquanto as amostras de FFBAC apresentaram corrosão galvânica localizada com melhor comportamento em corrosão.

A resistência à corrosão dos materiais analisados não se deve apenas ao teor de Cr, mas também à presença de Si, Ni e Mn e refino da estrutura que influenciam nos mecanismos de proteção à corrosão, mostrando que a amostra FFBAC 1 tem caráter de liga mais nobre.

Portanto, a avaliação do comportamento em corrosão dos materiais dos corpos moedores, via ensaios eletroquímicos de polarização potenciodinâmica, mostrou-se relevante podendo ser usado como parâmetro para a melhoria da seleção de materiais a serem usados em moinhos a fim de gerar menores perdas e custos, otimizando o processo de beneficiamento de minérios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRACO, Associação Brasileira de Corrosão. **Corrosão – Uma Abordagem Geral**. Disponível em: < https://www.academia.edu/30405859/Teoria_Corrosao_ABRACO>. Acesso em: 19 out. de 2023.

ALVES, V. K. **Otimização de carga moedora utilizando ferramentas de modelamento matemático e simulação de moagem**. 2006. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2006. Disponível em: < <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-8DJHCL>>. Acesso em: 4 out. 2023.

BELLEI, I.H. **Edifícios Industriais em Aço: Projeto e cálculo**. 5. Edição, revisada e atual. São Paulo, 2004. 552p.

CASSOLA, M. S.; MORAES, S. L. de.; ALBERTIN, E. Desgaste na mineração: o caso dos corpos moedores. **Rem: Revista Escola De Minas**, v. 59, n. 2, p. 173–178, 2006.

CÉSAR, P.; OLIVEIRA, A.; BERTAZZOLI, R. Determinação da Densidade de Corrente de Corrosão em Meios de Baixa Condutividade: Uso de Microeletrodos para Minimizar a Queda Ôhmica. **Química Nova**, v. 34, n. 2, p. 325–329, 2011.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e prática do tratamento de minérios: britagem, peneiramento e moagem**. 4. ed. São Paulo: Signus. 2009. 258p.

CHIQUITO, M. A. **Comparação de desempenho de aços de baixa-liga frente à corrosão atmosférica e corrosão eletroquímica**. 2013. 61f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2013. Disponível em: < <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-A39QEZ>>. Acesso em: 4 out. 2023.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. Edição, revisada e atualizada por André Luiz Vasconcelos da Costa e Silva. São Paulo: Edgard Blücher, 2008. 676p.

COUTINHO, C. B. **Materiais metálicos para engenharia**. Belo Horizonte, MG: Fundação Christiano Ottoni, 1992. 405 p.

EL JERSIFI, A.; AOUADI, K.; ALI, M. B.; CHBIHI, A.; SEMLAL, N.; BOUAOUINE, H.; NAAMANE, S. The Effect of Heat Treatments on the Properties of a Ferritic High-Chromium Cast Iron. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 32, n. 18, p. 8262–8273, 15 dez. 2022.

FIGUEIRA, H. V. O.; LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M. **Britagem e Moagem**. Comunicação Técnica elaborada para o Livro Tratamento de Minérios, 5ª ed. Cap. 4. Ed.: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. Rio de Janeiro: CETEM., 2010. pág. 143–211.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6. ed. [Reimpressão]. Rio de Janeiro: LTC, 2017. 1372p.

GIRELLI, L.; POLA, A.; GELFI, M.; LA VECCHIA, G.M. Performance optimization of high resistant white cast iron for severe working applications. **La Metallurgia Italiana**, v. 109, n.6, p. 5-10, 01 jan. 2017.

HONG, H. D. T.; HONG, H. N.; NGOC, M. N.; NGOC, O. H. T. Effects of the Destabilisation Heat Treatments on the Precipitation of Secondary Carbides and Their Effect on the Corrosion of 27 wt.% Chromium White Cast Iron. **ISIJ International**, v. 61, n. 5, p. 1660–1668, 15 may. 2021.

IMURAI, S.; THANACHAYANONT, C.H.; PEARCE, J.T.H.; CHAIRUANGSRI, T. Microstructure and Erosion-Corrosion Behaviour of as-Cast High Chromium White Irons Containing Molybdenum. In: Aqueous Sulfuric-Acid Slurry. **Archives of Metallurgy and Materials**, v. 60, n. 2, p. 919–923, 1 jun. 2015.

LANDOLT, D.; MISCHLER, S.; STEMP, M. Electrochemical methods in tribocorrosion: A critical appraisal. **Electrochimica Acta**, v. 46, n. 24-25, p. 3913–3929, 2001.

LANDOLT, D. Electrochemical and materials aspects of tribocorrosion systems. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 39, n. 15, p. 3121–3127, 21 jul. 2006.

LIANG, C.; GUO, J.; HU, X. Effects of Mo composites on the corrosion behaviors of low alloy steel. **Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition**, v. 22, n. 1, p. 12–16, 1 fev. 2007.

LOURENCO, L. I. **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, MG, Brasil, 2007. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/SBPS-79UM9R>>. Acesso em: 4 out. 2023.

LIU, Z.; GAO, X.; LI, J.; DU, L.; YU, C.; LI, P.; BAI, X. Corrosion behaviour of low-alloy martensite steel exposed to vapour-saturated CO₂ and CO₂-saturated brine conditions. **Electrochimica Acta**, v. 213, p. 842–855, 1 set. 2016.

MASSOLA, C. P. **Abrasão-corrosão em corpos moedores na moagem de minério de ferro**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Acesso em: 4 out. 2023.

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.

MUSA, F.; MORRISON, R. A more sustainable approach to assessing comminution efficiency. Minerals Engineering. **Minerals Engineering**, v.22, p.593-601, 2009.

NEVILLE, A.; REZA, F.; CHIOVELLI, S.; REVEGA, T. Characterization and corrosion behavior of high-chromium white cast irons. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 37, n. 8, p. 2339–2347, ago. 2006.

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. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1597035>. Acesso em: 4 out. 2023.

RAJAGOPAL, V.; IWASAKI, I. Corrosion Properties of Cast Iron Ball Materials in Wet Grinding. **Corrosion**, v. 48, n. 2, p. 124–131, fev. 1992.

ROCHA, V. P. J. **Avaliação de corpos moedores de ferro fundido branco alto cromo utilizados na moagem da pelletização**. 2023. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Metalúrgica) – Instituto Federal do Espírito Santo. Vitória, ES. Disponível em: https://repositorio.ifes.edu.br/bitstream/handle/123456789/3157/TCC_Avaliacao_Corpos_Moedores_FFBC.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 4 out. 2023.

ROVERI, E.; CHAVES, A. P. **Mecanismos de desgaste de corpos moedores em moinhos de bolas**. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 8, n. 4, p. 261-266, 2011. Disponível em: <http://www.tmm.periodikos.com.br/article/10.4322/tmm.2011.041/pdf/tmm-8-4-261.pdf>. Acesso em: 04 out. 2023.

SALASI, M.; IANNUZZI, M.; RICKARD, W.; QUADIR, Z. Low Stress Abrasion-Corrosion of High-Cr White Cast Iron: Combined Effects of Particle Angularity and Chloride Ions. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 166, n. 13, p. C382–C393, 1 jan. 2019.

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

TAHARA, A.; SHINOHARA, T. Influence of the alloy element on corrosion morphology of the low alloy steels exposed to the atmospheric environments. **Corrosion Science**, v. 47, n. 10, p. 2589–2598, out. 2005.

WANG, H.; YU, C.; WANG, S.; GAO, J. Electrochemical Corrosion Behavior and Prediction of Corrosion Rate for Low Alloy Steel after Tempering Treatment. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 10, n. 2, p. 1169–1185, 1 fev. 2015.

WANG, P.; MA, L.; CHENG, X.; XIAOGANG, L. Effect of grain size and crystallographic orientation on the corrosion behaviors of low alloy steel. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 857, p. 158258–158258, 1 mar. 2021.

WATSON, S. W.; FRIEDERSDORF, F.J.; MADSEN, B.W.; CRAMER, S.D. Methods of measuring wear-corrosion synergism. **Wear**, v. 181-183, p. 476–484, mar. 1995.

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