



Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Departamento de Minas e Construção Civil
Curso de Engenharia de Minas

Alex Botelho Álvares da Silva

INFLUÊNCIA DO pH NO DESGASTE DE CORPOS MOEDORES

Trabalho de Conclusão de Curso

ARAXÁ
2019

INFLUÊNCIA DO pH NO DESGASTE DE CORPOS MOEDORES

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Fábio de São José
Coorientador: Prof. Dr. Natal Pires Junio

ARAXÁ

2019

ALEX BOTELHO ALVARES DA SILVA

INFLUÊNCIA DO PH NO DESGASTE DE CORPOS MOEDORES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG, como requisito parcial para a obtenção de grau de bacharel em Engenharia de Minas.

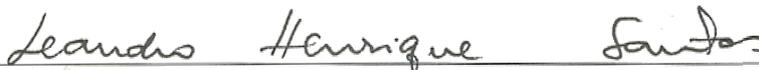
Araxá, 06 de dezembro de 2019



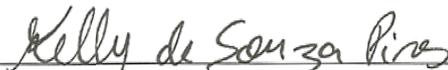
Presidente e Orientador: Prof. Dr. Fábio de São José
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular e Coorientador: Prof. Dr. Natal Junio Pires
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular: Prof. Me. Leandro Henrique Santos
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular: Prof.ª Me. Kelly de Souza Pires
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

Dedico esse trabalho à minha família,
Que sempre me apoiou na medida do possível.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai João Cirilo por sempre ter se envolvido em toda a minha vida acadêmica, ensinando valores que sempre carregarei.

A minha carinhosa mãe Suely que sempre está ao meu lado, buscando me ajudar com muita determinação.

Ao meu irmão Ciro que sempre me encorajou e me compreendeu.

Ao meu Professor Orientador Fábio e Coorientador Natal pela paciência, orientação e dedicação para a realização deste trabalho.

Aos bons professores que eu tive em minha vida e tornaram cada vez maior meu interesse pela engenharia.

Ao técnico João Victor e estagiários que me deram suporte com a parte laboratorial deste trabalho.

Ao CEFET que me possibilitou muito desenvolvimento intelectual e a encontrar grandes amizades que me são importantes.

A todos familiares, amigos, instituição que ajudaram em meu crescimento humano e são responsáveis pelo que sou atualmente.

Sou muito grato a todos!

“Em algum lugar, alguma coisa incrível está esperando para ser descoberta.”

Carl Sagan

RESUMO

A cominuição é uma etapa do beneficiamento de minérios que fragmenta a rocha até liberar o mineral-minério da ganga para se obter uma concentração de boa qualidade técnica. Os corpos moedores de moinhos que são empregados nessa etapa sofrem muitos desgastes físicos pela abrasão de partículas e químicos pela corrosão para realizar a fragmentação no modo via úmida. O processo corrosivo é acelerado pela abrasão, pois o produto da corrosão é um material oxidado e removível pela ação mecânica da rolagem entre as bolas, intensificada pela presença de minerais abrasivos e pelo meio em que se encontra. A remoção expõe uma superfície de metal, quimicamente ativa e pronta para ser corroída rapidamente. Deste modo, a ação conjunta torna-se extremamente rápida e danosa. Com base na importância desse tema, esse trabalho teve como objetivo avaliar qual é a influência que o pH apresenta no desgaste dos corpos moedores durante a operação de moagem. Após a análise dos resultados, verificou-se que a variação da taxa de desgaste foi influenciada pelo pH da polpa utilizada. Nesse caso, observou-se que com pH 7 e aço carbono ocorreu a maior taxa de desgaste das esferas. Por outro lado, o aço cromo apresentou maior taxa de desgaste com pH 11. Portanto, conclui-se que com este trabalho que ligas diferentes podem apresentar melhores condições de trabalho, desde que seja selecionada adequadamente a substância em que o corpo moedor estiver em contato.

Palavras-chave: pH, Corpos Moedores, Desgaste, Corrosão.

ABSTRACT

Comminution is a stage of mineral processing that fragments the rock to liberate the mineral facilitating good technical concentration. The grinders work in this step suffer much physical wear from the abrasion of particles and chemicals from corrosion to perform wet mode fragmentation. The corrosive process is accelerated by abrasion, as the corrosion product is an oxidized and removable material by the mechanical action of rolling between the balls, intensified by the presence of abrasive minerals and the environment in which it is stay. Removal exposes a chemically active metal surface ready to be quickly eroded. In this way the joint action becomes extremely fast and harmful. Based on the importance of this theme, this study aimed to evaluate the influence of pH on grinding body wear during the grinding operation. After analyzing the results, it was verified that the variation of the wear rate was influenced by the pH of the slurry used. In this case, it was observed that with pH 7 and carbon steel the highest rate of wear of the spheres occurred. On the other hand, chromium steel presented higher wear rate at pH 11. Therefore, it is concluded that with this work different alloys can present better working conditions, provided that the substance in which the grinder is in good condition is properly selected contact.

Keywords: *pH, Grinder, Wear, Corrosion.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Moinho Cilíndrico. (LUZ et al, 2010).....	15
Figura 2.2. Soma de vetores de força em um corpo moedor de um moinho.....	16
Figura 2.3. Regime em cascata (FIGUEIRA et al, 2010)	17
Figura 2.4. Regime em catarata (FIGUEIRA et al, 2010)	18
Figura 2.5. Velocidade do moinho versus volume de carga, Chaves e Peres (2012)	23
Figura 2.6. Reações de oxidação do ferro (PANNONI, 2015).....	24
Figura 2.7. Velocidade de corrosão (GENTIL, 1996).	25
Figura 2.8. Influência da concentração de oxigênio dissolvido na água (GENTIL, 1996).	25
Figura 2.9. Ataque uniforme em uma corrente de aço (USP, 2019- A).	27
Figura 2.10. Corrosão galvânica entre um tubo de aço galvanizado e o cobre (USP, 2019 -B).....	28
Figura 2.11. Corrosão por frestas em um sistema de tubulação de aço inox 304L – causa: soldagem sem penetração completa (USP, 2019).	29
Figura 2.12. Corrosão por pites (CALLISTER Jr. 2006).....	30
Figura 2.13. Degradação de uma solda em aço inoxidável (CALLISTER Jr., 2006). 32	
Figura 2.14. Falha em uma curva de tubulação de vapor atacada por erosão- corrosão, (CALLISTER Jr., 2006).....	33
Figura 2.15. Fotomicrografia onde é mostrado o trincamento intergranular devido a corrosão sob tensão no latão (CALLISTER Jr., 2006)	34
Figura 2.16. Diagrama de Pourbaix do ferro (PANNONI, 2015).....	38
Figura 2.17. Influência do pH sobre a corrosão do ferro (GENTIL, 1996)..	38
Figura 2.18. Representação esquemática do aço (PAVANATI, 2008).....	41
Figura 2.19. Microscopia ótica do aço inoxidável (USP, 2019-C).....	42
Figura 2.20. Microestrutura típica ferrítica, ataque água-régia 50 x, (USP, 2019-C). 43	
Figura 2.21. Microscopia ótica de aço inoxidável martensítico, USP (2019- C).	43
Figura 2.21. Representação esquemática do ferro fundido (FoFo) (PAVANATI, 2008)	44
Figura 3.1. Estrutura simplificada da metodologia.....	45
Figura 3.2. Moinho de jarro em operação	46
Figura 3.3. Esferas aço carbono à esquerda e de aço-cromo à direita	46
Figura 3.4. Distribuição granulométrica da areia.....	47
Figura 3.5 Balança semianalítica	49
Figura 4.1. Variação de massa do aço-cromo em 10 horas de moagem	52
Figura 4.2. Diagrama de pourbaix do silício a esquerda e do cromo a direita (TAKENO,2005)	53
Figura 4.3. Variação de massa do aço carbono em 10 horas de moagem	54
Figura 4.4. Taxa de corrosão em polegadas por ano em função do pH.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Materiais metálicos mais importantes para moinhos, Chaves e Peres (2012).....	16
Tabela 2.2. Comparação entre moagem a seco e a úmido (CHAVES e PERES, 2012)	19
Tabela 2.3. Elementos progressivamente mais e menos inertes, Callister Jr. (2006)..	28
Tabela 3.1: Especificação dos elementos de liga para o aço 52100 e 1015 segundo a AISI.	47
Tabela 4.1. Valores estatísticos do desgaste no período de 10 horas	54
Tabela 4.2. Massa média das esferas de aço carbono	56
Tabela 4.3. Variação teórica do raio em 10 horas de moagem	56
Tabela 4.4 Comparação da teoria com a prática.....	57
Tabela A1: Massas (em gramas) das esferas de aço-cromo em pH 7 e média de desvio padrão	62
Tabela A2: Massas (em gramas) das esferas de aço-cromo em pH 11 e média de desvio padrão	63
Tabela A3: Massas (em gramas) das esferas de aço carbono em pH 7 e média de desvio padrão	64
Tabela A4: Massas (em gramas) das esferas de aço carbono em pH 11 e média de desvio padrão	65
Tabela A5. Média das massas (gramas) de cada moagem realizada e coeficiente angular da regressão linear gramas por hora	66
Tabela A6. Variação das massas (gramas) das esferas de aço-cromo pH 7 e média e desvio padrão	67
Tabela A7. Variação das massas (gramas) das esferas de aço-cromo pH 11 e média e desvio padrão.....	68
Tabela A8. Variação das massas das esferas de aço carbono pH 7 e média e desvio padrão	69
Tabela A9. Variação das massas das esferas de aço carbono pH 11 e média e desvio padrão	70

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO.....	12
CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1. Moagem.....	14
2.1.1. Moinhos.....	14
2.1.2. Dinâmica interna dos moinhos.....	16
2.1.3. Moagem a úmido e a seco.....	18
2.1.4. Moinho de bolas.....	20
2.2. Desgaste de corpos moedores.....	21
2.3. Corrosão.....	22
2.3.1. Velocidade de corrosão.....	23
2.3.2. Passivação.....	25
2.3.3. Tipos de corrosão.....	26
2.3.4. Ambientes corrosivos.....	35
2.3.5. Prevenção da corrosão.....	36
2.3.6. Relação entre pH e corrosão.....	37
2.3.6.1. Diagrama Pourbaix.....	37
2.3.6.2. Taxa de corrosão e pH.....	38
2.4. Ligas metálicas.....	39
2.4.1. Ligas ferrosas.....	40
2.4.2. Aços.....	40
2.4.3. Ferro fundido.....	43
CAPÍTULO 3. METODOLOGIA.....	45
3.1. Descrição das etapas.....	45
CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
4.1. Avaliação das taxas de desgaste.....	51
4.2. Comparação entre a literatura e resultados alcançados.....	55
CAPÍTULO 5. CONSIDERAÇÕES FINAS.....	58
REFERÊNCIAS.....	59
APÊNDICE A.....	62

1. INTRODUÇÃO

A cominuição pode ser entendida como sendo a fragmentação de uma estrutura sólida quando submetida a forças mecânicas. Nesse contexto, necessita-se de energia para vencer as forças de ligação interatômica. As forças mecânicas são aplicadas nas partículas através dos elementos do moinho ou do meio moedor, provocando a deformação das partículas. As deformações provocam a geração de tensões internas, já que deformações e tensões estão ligadas por leis mecânicas da matéria (ROVERI E CHAVES, 2011).

A moagem é uma importante operação de beneficiamento mineral, em que fragmentos de rochas menores que $\frac{3}{4}$ são cominuídos para liberação do mineral-minério, adequando granulometria para operações posteriores de transporte em mineroduto e concentração como a magnética, a eletrostática, a flotação,. Por essas razões, a moagem é frequentemente empregada na mineração e merece estudos para avaliar eficiência e desgaste de peças metálicas como corpos moedores.

Na maioria das vezes, a moagem é feita em via úmida, pois essa operação reduz o consumo de energia por tonelada moída, além de reduzir problemas técnicos com poeira, transporte e heterogeneidade do produto moído. Porém, a utilização de água na moagem cria problemas como o aumento do desgaste por corrosão dos metais presentes no moinho (CHAVES e PERES, 2012)

Como aços são materiais para manufaturar corpos moedores, a água favorece o desgaste deles devido à corrosão. Por isso, estudos visando à variação do ambiente que afeta o metal podem ser de fundamental importância para redução da corrosão que afeta o desgaste de corpos moedores.

Segundo Gentil (1996), meios alcalinos reduzem a corrosão de ligas de ferro, pois um ambiente alcalino modifica a camada superficial do ferro e cria um óxido protetor (hematita), tornando o metal passivo à corrosão, ou seja, não reativo. Por isso, Chaves e Peres (2012) defende que em pH básico os desgastes de corpos moedores são amenizados e sugere que a moagem seja executada nesse tipo de ambiente.

O objetivo desse trabalho é avaliar como o desgaste dos corpos moedores é influenciado pela variação do pH da suspensão de polpa e determinar em qual condição apresentará menor desgaste de corpos metálicos de aço carbono e aço-cromo.

Antes da parte prática da pesquisa, foi feita uma revisão bibliográfica que abrangeu, principalmente, temas que estão relacionados com a influência do pH de suspensões minerais (carga a moer) no desgaste e corrosão de corpos moedores de moinhos e verificar qual o valor de pH seria mais vantajoso e que propiciaria os melhores resultados (menores taxas de desgaste).

Como base para este estudo, a revisão bibliográfica abordou, principalmente:

- **Moagem:** conceitos de moagem, características estruturais dos corpos moedores e desgaste geral;
- **Corrosão:** Conceitos básicos, passivação, tipos de ambientes corrosivos, tipos de corrosão, prevenção de corrosão e relação entre pH e corrosão;
- **Ligas metálicas:** principalmente aços e ferros fundidos.

Portanto, o trabalho foi estruturado de modo a mostrar no Capítulo 2 a Revisão Bibliográfica. No Capítulo 3 é abordada a Metodologia. O Capítulo 4 mostra os Resultados e Discussão. No Capítulo 5 são feitas as Considerações Finais. Na sequência, são mostradas as Referências que fizeram parte da pesquisa. Finalmente, como foram produzidas setecentas e vinte amostras, optou-se em colocar todas as tabelas no Apêndice A que se encontram final deste trabalho.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Moagem

A moagem é o último estágio da fragmentação, onde os tamanhos das partículas são reduzidos pela combinação de impacto, compressão, abrasão e atrito, a uma granulometria adequada à liberação do mineral de interesse, geralmente, a ser concentrado nas operações seguintes. Cada minério tem uma malha ótima para ser moído, e isso depende de muitos fatores como a distribuição do mineral útil na ganga e a operação de separação que será usada em seguida (LUZ et al, 2010).

A moagem tem a função de preparar o minério para: a concentração por meio da liberação das espécies minerais, a adequação granulométrica de minério industrial, ajuste de tamanho do minério para transporte em minerodutos e para o aumento da área superficial a fim de facilitar ataques químicos e aglomeração (CHAVES e PERES, 2012).

Além disso, a moagem é a área da fragmentação que requer mais investimentos. Também ocorre maior consumo de energia e é considerada uma operação importante para o bom desempenho de uma instalação de tratamento de minérios (FIGUEIRA et al, 2010).

2.1.1. Moinhos

A moagem é uma operação realizada por equipamentos chamados de moinhos, cujas classes são variadas e que apresentam funcionamentos diferentes. Dessas classes de moinhos, os mais importantes são os moinhos tubulares de carga cadente. Segundo Chaves e Peres (2012), “moinhos de carga cadente (moinhos de barras, de bolas e de seixos) são os equipamentos mais importantes, responsáveis pela imensa maioria das utilizações industriais.” Outros tipos de moinhos como os de eixo vertical e de martelo são utilizados apenas para materiais em condições específicas.

Os moinhos de carga cadentes também são chamados de moinhos cilíndricos (Figura 2.1), sendo fabricados de metal cuja rotação é responsável por movimentar corpos moedores e proporcionar a moagem. Para Chaves e Peres (2012):

“Os moinhos de carga cadente são constituídos de um corpo cilíndrico que gira entorno de seu eixo. A carcaça (*shell*) é feita de chapas calandradas e

soldadas. Ela é fechada nas duas extremidades por peças de aço fundido chamadas tampas, cabeças ou espelhos (*heads*), o aço geralmente usado é o MR-ST-37-3N(DIN 17-100).”

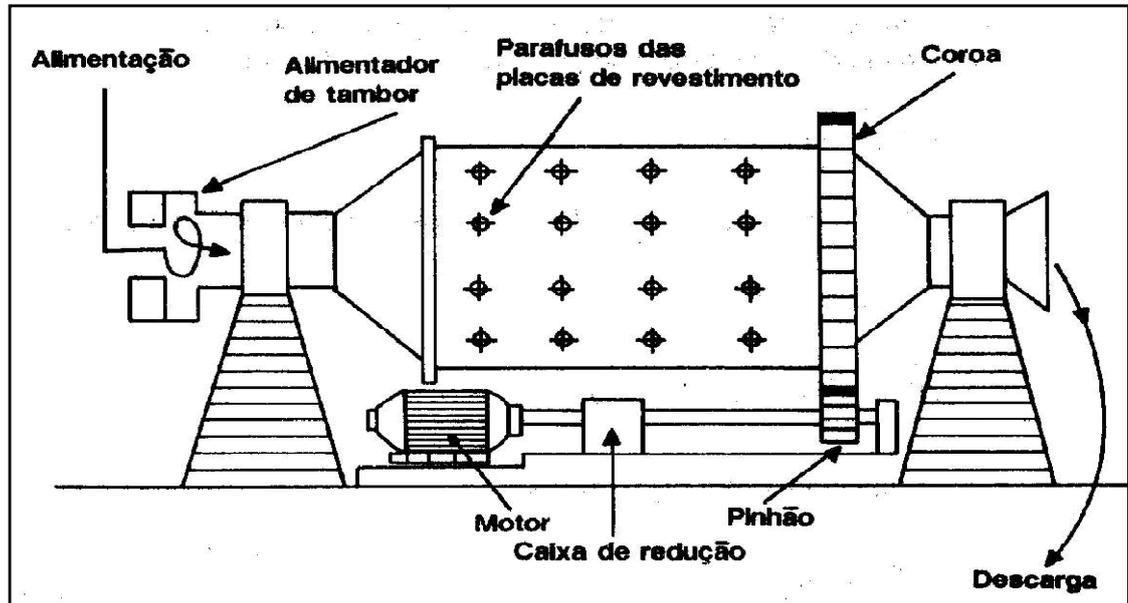


Figura 2.1. Moinho Cilíndrico, LUZet al, 2010

Esses equipamentos apresentam estruturas para sustentar a massa do moinho e seu conteúdo. Além disso, possuem mecanismos de auxílio para o seu funcionamento, como alimentadores, motores e outros elementos mecânicos.

Chaves e Peres (2012) afirmaram que “Moinhos são sempre revestidos internamente por materiais resistentes ao desgaste, metálico ou de borracha, sendo que eventualmente se encontram moinhos com revestimento cerâmico”. Tais revestimentos são escolhidos de acordo com a necessidade de moagem do mineral. Por exemplo, alguns minerais não podem ser contaminados com ferro, então os revestimentos cerâmicos ou de borracha são os mais indicados.

Chaves e Peres (2012) esclareceram que os revestimentos de metal apresentam a composição de aços-liga como o aço cromo-molibdênio, o Ni-*hard* e também ferro fundido especial, pois esses metais são resistentes à abrasão. A Tabela 2.1 mostra os materiais metálicos mais importantes para moinhos.

Tabela 2.1. Materiais metálicos mais importantes para moinhos, Chaves e Peres (2012)

Material	Dureza Brinell	Desgaste relativo
Ferro fundido ao Cr-Mo 15-3	600-740	100-105
Ferro fundido de alto Cr(23% a 28%)	550-650	110-115
Ni-hard	520-650	120-130
Aço martensítico ao Cr-Mo, médio C	450-555	135-145
Aço austenítico 6% Mn, 1% Mo	190-230	150-175
Aço perlíticoCr-Mo, Alto C	250-420	155-200
Aço austenítico 12% Mn(Hadfield)	180-220	200-300

Chaves e Peres (2012) afirmaram que revestimentos feitos de borracha estão sendo mais utilizado, pois são mais resistentes que os metálicos, apresentam menores massas e absorvem os ruídos, porém os custos são elevados em relação aos de aços e ferros fundidos que tornam as borrachas pouco utilizadas em relação aos metais.

2.1.2. Dinâmica interna dos moinhos

Os moinhos funcionam pela rotação de um cilindro em um eixo. Para que isso aconteça são necessários motores potentes que fornecem energia suficiente para mover revestimento, minério e corpos moedores. Por isso, a velocidade de rotação torna uma variável de moagem, a chamada “velocidade crítica”. Segundo Figueira et al, 2010, “velocidade crítica é aquela na qual a bola consegue atingir o ponto mais elevado do moinho sem se desprender da parede.” Essa velocidade ocorre quando a soma dos vetores da aceleração centrífuga com a aceleração da gravidade são iguais a zero, conforme a Figura 2.2.

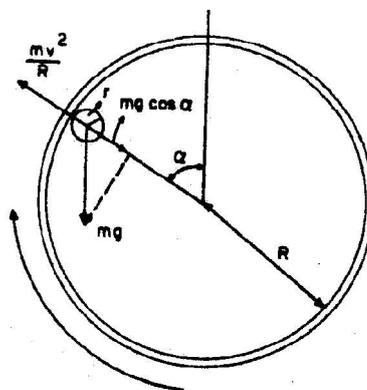


Figura 2.2. Soma de vetores de força em um corpo moedor de um moinho (FIGUEIRA et al., 2010).

Para determinar a velocidade crítica utiliza-se a Equação 2.1 (FIGUEIRA et al, 2010):

$$N_c = \frac{42,3}{\sqrt{D - d}}$$

2.1

Em que:

D= diâmetro interno do moinho, em metros;

d= diâmetro máximo das bolas, em metros;

N_c= velocidade crítica, em rotações por minuto.

Para Mazzinghy (2009), “os moinhos de bolas podem operar em dois regimes distintos: cascata e catarata. No regime de cascata é menos importante a moagem por choque, sendo a moagem por atrito mais evidenciada”. Esses dois regimes são diferentes em função da velocidade de operação em relação à velocidade crítica. Já o regime cascata apresenta velocidade suficiente para a rolagem dos corpos moedores e do minério (Figura 2.3).

Por outro lado, o regime em catarata tem velocidade escalar suficiente para prender as partículas de minério e corpos moedores no revestimento para depois cair sobre outras partículas (Figura 2.4).

Os regimes comentados nas Figuras 2.3 e 2.4 não dependem apenas da velocidade crítica da moagem. Está incluído também o fato de o enchimento ter influência da condição interna do moinho, tendo em vista que à medida que o enchimento é aumentado, dificulta-se a ocorrência do regime de catarata, como pode ser observado na Figura 2.5.

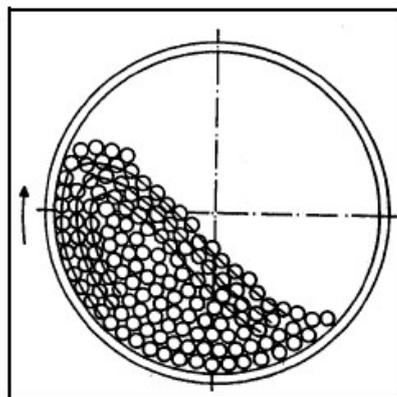


Figura 2.3. Regime em cascata (FIGUEIRA et al, 2010)

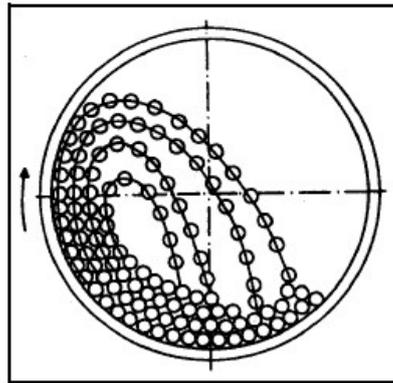


Figura 2.4. Regime em catarata (FIGUEIRA et al, 2010)

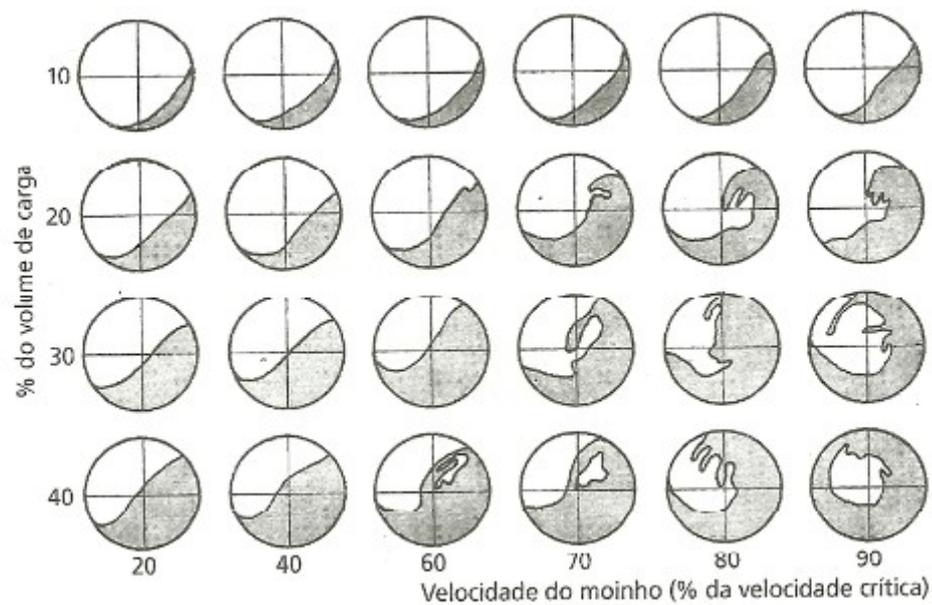


Figura 2.5. Velocidade do moinho versus volume de carga, Chaves e Peres (2012).

2.1.3. Moagem a úmido e a seco.

Segundo Chaves e Peres (2012), a moagem a úmido, é uma operação que fragmenta partículas em polpa com porcentagem de sólidos variando entre 50 e 60%. A polpa apresenta as seguintes vantagens:

- Consome 25% menos energia em relação à moagem seca;
- Os sólidos são transportados por bombeamento;
- Não há a formação de poeira;
- Diminui a necessidade de equipamentos periféricos no moinho (para controle de poeira e transporte de sólidos);

- Minimiza o aquecimento do moinho;

Garante a homogeneização das partículas devido ao movimento de rotação associado ao uso de água. A Tabela 2.2 apresenta a comparação entre moagem a seco e a úmido.

Tabela 2.2. Comparação entre moagem a seco e a úmido(CHAVES e PERES, 2012)

Item	A úmido	A seco
Consumo de energia	3/4	1
Equipamentos periféricos	Desnecessário	Essenciais
Condições de trabalho(poeiras)	Boas	Ruins
Transporte	Facilitado	Difícil
Operação em circuito fechado	Mais eficiente ; mais barata	-
Mistura no moinho(homogeneidade do produto)	Melhor	-
Aquecimento do moinho	Inexistente	Crítico
nível de ruído	Menor	Maior
Consumo metálico(desgaste)	100	20
Contaminação com ferro	-	Menor
Manutenção/substituição de peças de desgaste	-	Menor
Reação com a carga	-	Não ocorre
<i>Work index operacional (kwh/st)</i>	12	16
Potencia consumida(kwh/t)	9	12
Potencia dos periféricos(kwh/t)	1	4
Consumo metálico(lb bolas/t)	1,46	0,34
Consumo metálico(lb revestimento/t)	0,3	0,07
Kwh/lb de revestimento	30	175

Segundo Chaves e Peres (2012), “na moagem a seco ocorre desgaste menor dos revestimentos e dos corpos moedores, porque as polpas contem eletrólitos que causam a corrosão das partes metálicas expostas.” Ou seja, o simples fato de adicionar a água na moagem, faz com que o revestimento e corpos moedores sofram desgastes provenientes da corrosão não apenas desgaste por abrasão.

2.1.4. Moinho de bolas

Segundo Chaves e Peres (2012), esses moinhos trabalham com a alimentação na faixa de 14# a 28# e geram um produto tão fino quanto se queira. Essa versatilidade do moinho é possível, pois a moagem tem variáveis maleáveis operacionalmente como tempo de moagem que determina a granulometria do produto.

Para Souza e Menegali (2010), quando se trata de moinhos de bolas, a moagem demanda um longo tempo, pois o tempo é uma variável operacional da moagem. Nos moinhos são utilizados corpos moedores, elementos de elevada dureza que têm por objetivo proporcionar melhor fragmentação aos materiais. A distribuição das bolas dentro do moinho influencia na moagem. O tipo de distribuição pode influenciar no volume aparente de bolas, no fator de empacotamento e no desgaste das bolas do moinho que influenciam no rendimento da operação de moagem. Uma forma de obter uma melhor eficiência nessa operação é preencher de 35% a 55% do volume do moinho com corpos moedores.

De acordo com Bergerman (2012), as variáveis que afetam a operação de um moinho são:

a) Variáveis de projeto

- Tipo de revestimento;
- Rotação do moinho (% da velocidade crítica, oscila de 69 a 75%);
- Tamanho de reposição do corpo moedor. Normalmente a reposição é realizada com o maior tamanho ou com os dois maiores tamanhos para garantir um perfeito colar de distribuição;
- Relação entre o diâmetro e o comprimento do moinho;
- Tipo de descarga (*overflow* / grelha).

b) Variáveis de Controle Operacional

- Taxa de alimentação;
- Granulometria da alimentação;
- Granulometria do produto moído;
- Porcentagem (%) de carga circulante (cc);

- Redução da granulometria da alimentação do moinho;
- Aumento da carga circulante próximo ao tamanho final de moagem;
- Diminuição do tempo de residência e geração de finos;
- Tamanho de bolas;
- Melhor fator de enchimento;
- Melhor ajuste da relação volume de sólidos/líquido.
- Grau de enchimento do moinho / potência
- Porcentagem de sólidos (evitar muito baixa ou muito alta);
- Granulometria do produto (evitar muito baixa ou muito alta).

2.2. Desgaste de corpos moedores

“Em princípio, quanto mais dura a bola, maior deve ser a sua durabilidade. Porém a dureza está sempre relacionada a fragilidade e essa característica pode comprometer a durabilidade do corpo moedor”, Chaves e Peres (2012). Isso ocorre porque ligas muito duras são frágeis ao receberem choques mecânicos, enquanto as ligas mais maleáveis apresentam fraqueza contra abrasão.

De acordo Chaves e Peres (2012), o desgaste de um corpo moedor é diretamente proporcional ao seu volume quando a moagem é realizada no regime de cascata. Porém existe outra teoria de que o corpo moedor apresenta um desgaste diretamente proporcional à sua área superficial. Essas diferenças são devido ao mecanismo de moagem, pois no regime de catarata ocorre impacto, enquanto no regime de cascata a moagem é por abrasão.

Para Roveri e Chaves (2011), os mecanismos de desgaste abrasivo são:

- Desgaste por Sulcamento: Grãos minerais de granulometria grosseira e dureza elevada impactam a superfície de baixa dureza do corpo moedor com velocidade média a alta causando remoção de partículas grosseira do corpo moedor.
- Riscamento: minerais duros riscam a superfície dos corpos moedores levantando metal no sentido de movimento, isso cria uma saliência fraca

abrasão. Mas quando as partículas são menores ocorre um processo de polimento e erosão do corpo moedor.

- Indentação ou mordida: grãos duros são comprimidos entre dois corpos moedores, deformando a superfície desses, causando uma cratera inicialmente que será um ponto de fraqueza para erosão.
- Desgaste metal contra metal: corpos moedores se chocam ou atritam, causando desgaste por entrarem em contato entre si.
- *Pittingcorrosion*: quando há a formação de pares galvânicos (reações eletroquímicas entre dois metais)no corpo moedor, entre corpos ou com a polpa ocorre esse tipo de desgaste. Criando furos profundos na superfície da esfera.
- Lascamento: ocorre por causa de defeitos de fabricação tanto de fundição quanto de moldagem. O corpo moedor é lascado em camadas sucessivas assim como descamar uma cebola.

2.3. Corrosão

Como os moinhos apresentam aços e ferro-fundido em seus revestimento e corpos moedores, então se tornam necessárias informações sobre corrosão, para um melhor entendimento de desgastes provenientes da interação com água. Segundo Chaves e Peres (2012), como, no caso, a corrosão é influenciada pela abrasão. Para Gentil (1996), a corrosão está diretamente ligada à degradação de um material quando esse está em contato com o ambiente, seja por reação química ou eletroquímica, não importando se isso ocorre quando o material está ou não sofrendo esforços mecânicos.

“Para os materiais metálicos, o processo de corrosão é normalmente um processo eletroquímico, isto é, uma reação química em que existe uma transferência de elétrons de uma espécie química para outra (processo denominado de oxidorredução), Frauches-Santos et al (2014).”

As espécies que perdem elétrons (sofrem oxidação) são chamadas de anodos e geralmente metais como o ferro, enquanto as espécies que ganham elétrons são chamados de catodos (sofrem redução) como o oxigênio e hidróxido mostrados na Figura 2.6.

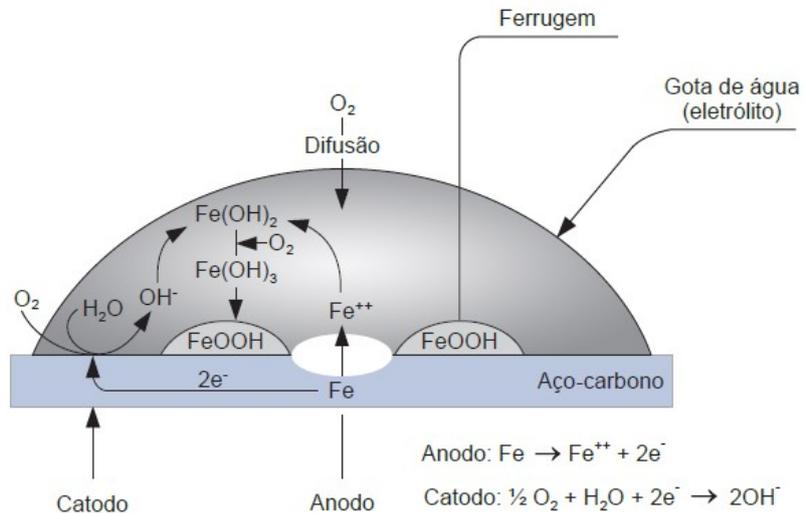


Figura 2.6. Reações de oxidação do ferro (PANNONI, 2015)

O fluxo de elétrons entre elementos químicos tem relação com correntes elétricas, essa condição é denominada eletroquímica, cuja unidade de medida é o Volt. Logo o elemento com maior potencial de redução será o catodo enquanto o de menor potencial será o anodo.

Caracteristicamente, os átomos metálicos têm seus elétrons retirados, no que é chamada uma reação de oxidação. A quantidade de elétrons retirada de um determinado metal é uma característica dele e pode variar de um metal para outro. As espécies que retiram os elétrons do metal sofrem um processo denominado de redução.

2.3.1. Velocidade de corrosão

Segundo Gentil (1996), a velocidade de corrosão pode ser instantânea ou média. A velocidade média pode ser um fator para determinar a vida útil de uma peça. Enquanto a velocidade instantânea indica a necessidade de inibidores de corrosão em um momento.

A velocidade de corrosão pode apresentar os seguintes comportamentos e que estão representados na Figura 2.7:

- Curva A é velocidade contínua de corrosão. Ocorre quando não há variações quando a área superficial não varia, o produto da corrosão é inerte e a quantidade de agente corrosivo não varia.
- Curva B é a condição equivalente a condição anterior, porém com um atraso provocado por uma película que protege a superfície de ser corroída.
- Curva C é uma condição na qual a velocidade é reduzida pela formação de produtos que protegem a superfície.
- Curva D. É uma condição em que a corrosão acelera o processo por si só, geralmente acontece com o aumento da área anódica com produto solúvel.

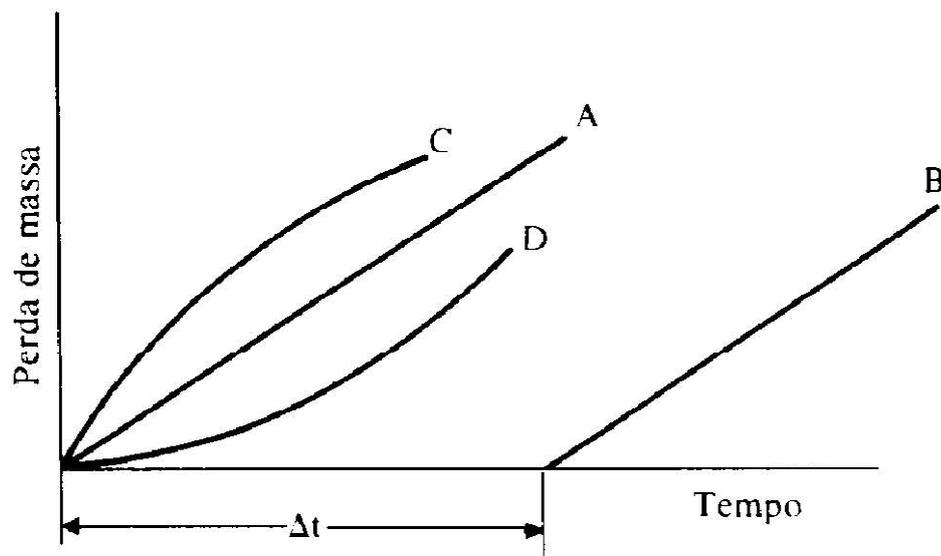


Figura 2.7. Velocidade de corrosão, Gentil (1996).

Para Gentil (1996), uma gama de fatores pode influenciar a velocidade de corrosão. Para o ferro, o oxigênio dissolvido em água é um fator determinante para a velocidade da corrosão. Em água neutra e temperatura ambiente a velocidade de corrosão do ferro inicia rapidamente que desacelera com a formação de um óxido protetor. Quando a água não apresenta oxigênio dissociado, ela apresentará velocidade de corrosão desprezível, mas ao adicionar oxigênio a água apresenta poder para corroer o ferro. Porém, esse aumento de velocidade de corrosão

apresenta um limite, que começa a decair quando atinge a concentração crítica de oxigênio

A Figura 2.8 apresenta a influência da concentração de oxigênio dissolvido na água.

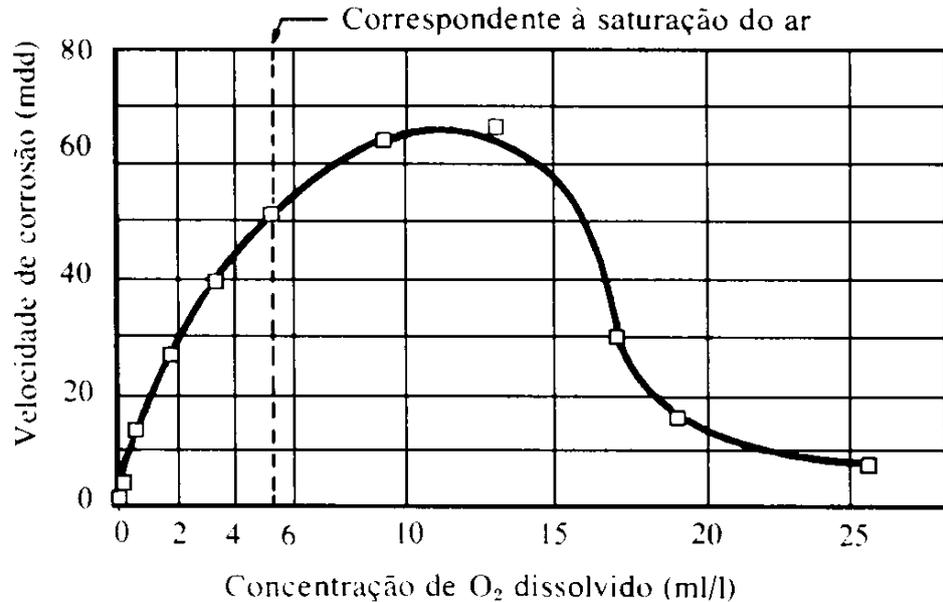


Figura 2.8. Influência da concentração de oxigênio dissolvido na água(GENTI, 1996).

Na água destilada a concentração de oxigênio, acima da qual a corrosão decresce, é de 12 ml de O₂ por litro, essa redução da corrosão provavelmente está relacionada com a passivação do ferro.

2.3.2. Passivação

Segundo Callister Jr. (2006), “alguns metais e ligas normalmente ativos, sob condições ambientais específicas, perdem sua reatividade química e se tornam extremamente inertes, esse fenômeno é conhecido como passividade e é exibido pelo cromo, ferro, níquel titânio e muitas das ligas desses metais”.

Segundo Gentil (1996), “alguns metais e ligas tendem a torna-se passivos à formação de uma película fina e aderente de óxido ou outro composto insolúvel nas suas superfícies entre esses metais tem-se: alumínio chumbo, aço inoxidável, titânio ferro e cromo.” Há a teoria de que a passividade ocorre por uma fina camada de óxido muito fina e com aderência muito forte sobre a superfície do metal. O aço inox apresenta resistência à corrosão dessa camada passivadora. Pois no momento em que 11 por cento de cromo estão em contato com o ambiente ele oxida formando

uma fina camada de Cr_2O_3 que é responsável pela passivação. Na literatura há uma elevada preocupação com a presença de íons cloreto, pois essa película é frágil contra esse halogênio.

2.3.3. Tipos de corrosão

A corrosão é um fator importante que pode causar muitos casos excepcionais de falha. Informações valiosas para a solução de uma falha por corrosão podem ser obtidas com observação cuidadosa dos corpos de prova corroídos ou equipamento defeituoso.

A corrosão, geralmente, é classificada de oito formas em que se manifesta, mas alguns autores a classifica em nove tipos, como é o caso deste trabalho. A base para essa classificação é a aparência do metal corroído e aspectos relacionados ao desgaste apresentado. Algumas dessas nove formas são únicas e distintas, mas todas elas, normalmente, estão em graus variados inter-relacionados. A seguir, é feito um resumo dos nove tipos de corrosão, conforme Callister Jr. (2006).

- **Ataque uniforme**

O ataque uniforme é o mais comum. Normalmente é caracterizado por ação química ou reação eletroquímica que prossegue uniformemente sobre toda a superfície exposta, com frequência deixando para trás uma incrustação. O metal se torna mais fino e, eventualmente, pode falhar. Ataque uniforme ou corrosão geral representa a maior destruição de metal em regime de tonelagem.

Alguns exemplos familiares de ataques uniformes incluem a ferrugem do aço e do ferro, bem como o escurecimento e a perda de brilho que ocorre em pratarias. Esta forma de corrosão, no entanto, não é de grande preocupação do ponto de vista técnico, porque a vida útil do equipamento pode ser estimada com precisão com base em testes comparativamente simples ou experiência. A Figura 2.9 mostra um exemplo de ataque uniforme em uma corrente de aço.

Por outro lado, a maioria das outras formas de corrosão é de natureza insidiosa e são consideravelmente mais difíceis de prever. São as formas que causam falhas inesperadas ou prematuras e consequentes dores de cabeça para a gestão.



Figura 2.9. Ataque uniforme em uma corrente de aço (USP, 2019 - A).

- **Corrosão Galvânica**

A corrosão galvânica ocorre quando dois metais ou ligas que possuem composições diferentes estão em contato uns com os outros ou de outra forma conectado eletricamente e exposto a uma solução corrosiva líquida ou condutiva, um potencial existe entre estes dois metais e uma corrente flui. A corrosão de um metal menos nobre é frequentemente acelerada e a do outro mais nobre é reduzida, em comparação com o comportamento desses metais quando eles não estão em contato. A Tabela 2.3 mostra os elementos progressivamente mais e menos inertes.

Por exemplo, parafusos de aço se corroem quando entram em contato com latão em um ambiente marinho; ou se tubulações de cobre e de aço são unidas em um aquecedor de água doméstico. Nesse caso, o aço será corroído na vizinhança da junção entre os tubos..

A série da Tabela 2.3 indica as reatividades relativas na água do mar de uma variedade de metais e ligas. Quando duas ligas são acopladas na água do mar, aquela que está localizada mais abaixo da série galvânica irá experimentar corrosão. Algumas ligas da Tabela 2.3 estão agrupadas com colchetes, isso porque, normalmente, o metal de base é o mesmo para as ligas que estão no mesmo colchete, de modo que existe pouco perigo de corrosão se essas ligas forem acopladas umas às outras. A Figura 2.10 mostra uma corrosão galvânica entre um tubo de aço galvanizado e um tubo de cobre.

Tabela 2.3. Elementos progressivamente mais e menos inertes(CALLISTERJr.,2006).

	Platina
	Ouro
	Grafita
	Titânio
	Prata
	Aço inoxidável 316 (passivo)
	Aço inoxidável 304 (passivo)
	Inconel (80Ni-13Cr-7Fe) (passivo)
	Níquel (passivo)
	Monel (70Ni-30Cu)
	Ligas cobre-níquel
	Bronzes (ligas Cu-Sn)
	Cobre
	Latões (ligas Cu-Zn)
	Inconel (ativo)
	Níquel (ativo)
	Estanho
	Chumbo
	Aço inoxidável 316 (ativo)
	Aço inoxidável 304 (ativo)
	Ferro fundido
	Ferro e aço
	Ligas de alumínio
	Cádmio
	Alumínio comercialmente puro
	Zinco
	Magnésio e ligas de magnésio

Progressivamente mais inerte (catódico) ↑

↓ Progressivamente mais ativo (anódico)



Figura 2.10. Corrosão galvânica entre um tubo de aço galvanizado e o cobre (USP, 2019- B).

- **Corrosão em frestas**

É uma forma de corrosão localizada que acontece nas regiões com frestas ou fechadas, nas quais o meio corrosivo pode entrar e permanecer em condições estagnadas. A fresta pode ser provocada por um detalhe de projeto, uma falha na

execução da soldagem, um depósito na superfície do material (estagnação de sujeira, produtos contaminantes e incrustações diversas). De modo geral, os meios que contém cloretos são particularmente perigosos na corrosão por frestas nos aços inoxidáveis.

Nesse caso, a fresta deve ser ampla o suficiente para que a solução penetre, porém deve ser também estreita o suficiente para que haja a estagnação do fluido, geralmente a largura seria de milésimos para cada centímetro.

Características: a corrosão por frestas é frequentemente associada a líquidos estagnados no interior de furos, superfícies de gaxetas, juntas sobrepostas, depósitos superficiais, espaços sob a cabeça de porcas e parafusos (aberturas estreitas e/ou áreas confinadas).

Mecanismo da corrosão em frestas: ocorre em materiais passivos ou não. No início da exposição tanto a fresta quanto a região externa a essa corroem com a mesma intensidade: as curvas anódica e catódica das duas regiões são idênticas. O desenvolvimento do processo corrosivo cria condições para o estabelecimento, manutenção e aceleração do ataque corrosivo. Para funcionar como um sítio de corrosão, a fresta deve ser suficientemente larga de modo a permitir a penetração do líquido e suficientemente estreita para criar uma zona de estagnação (aberturas geralmente inferiores a 1/8" de polegadas). A Figura. 2.11 mostra um tipo de corrosão em fresta.



Figura 2.11. Corrosão por frestas em um sistema de tubulação de aço inox 304L – causa: soldagem sem penetração completa (USP, 2019 –C).

- **Corrosão por pites (*Pitting*)**

A corrosão por pites (*Pitting*) ou buraco é talvez a forma mais destrutiva de corrosão, pois os recipientes podem falhar por causa da perfuração, mas apenas uma pequena quantidade de metal é perdida em toda a estrutura. Além do mais, *pitting* é difícil de avaliar em uma base experimental e a vida útil do equipamento é correspondentemente incerta.

Pitting é provavelmente responsável por falhas inesperadas em equipamentos do que qualquer uma das outras formas de corrosão. Frequentemente, a maior parte da superfície do metal mostra quase nenhum ataque, mas a corrosão é localizada em áreas mais ou menos isoladas. Por estas razões, *pitting* pode ser considerado como uma situação intermediária entre corrosão global geral e imunidade de ataque.

Por exemplo, uma placa aço inoxidável ao cromo, níquel exposta a água do mar estagnada pode parecer estar em perfeitas condições, mas um exame atento mostrará a presença de pequenos orifícios que parecem ter sido perfurados. Em geral, os cloretos e outros halogênios são os principais agentes picadores, particularmente em aços e ligas de cromo-níquel.

O mecanismo para corrosão por pites é provavelmente o mesmo da corrosão em frestas, no sentido que o desenvolvimento da oxidação ocorre no interior do próprio de pites, com uma redução complementar da superfície. Este tipo de corrosão é susceptível nos aços inoxidáveis. A Figura 2.12 mostra uma chapa corroída por pites.

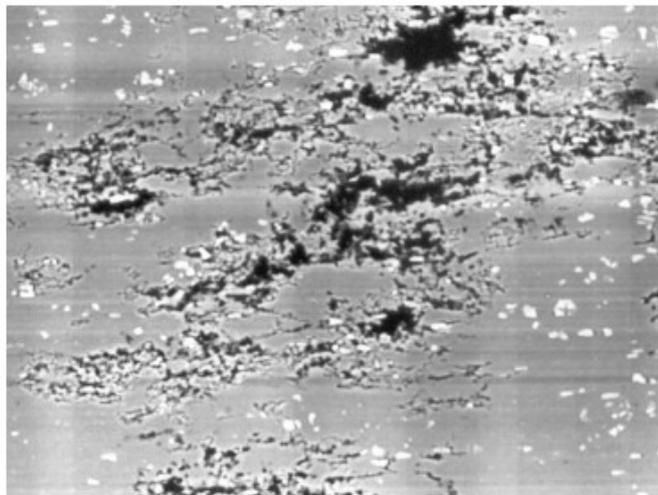


Figura 2.12. Corrosão por pites (CALLISTER Jr. 2006).

As razões pelas quais o pite ocorre em um certo ponto e deixam as áreas adjacentes relativamente corroídas são um tanto obscuras, mas vários fatores podem contribuir para isso. Aparentemente, corrosão localizada ocorre devido à falta de homogeneidade completa na superfície do metal. A presença de impurezas, como inclusões ou pontos ásperos, arranhões ou cortes na superfície do metal, promove a formação de poços ou buracos.

- **Corrosão intergranular**

Geralmente, a corrosão envolve a degradação de uma superfície metálica exposta. A corrosão ocorre de diversas formas, desde uma corrosão uniforme em toda a superfície, a focos de corrosão severa.

Conforme o nome sugere, é um tipo de corrosão que ocorre nos contornos do grão. Esta corrosão é também chamada corrosão intercristalina. Habitualmente, este tipo de corrosão ocorre quando existe a precipitação de carboneto de cromo nos contornos do grão, durante o processo de soldagem, ou como consequência de um tratamento térmico insuficiente.

Consequentemente existe uma zona estreita à volta dos contornos do grão que poderá perder o cromo, e tornar-se menos resistente à corrosão do que o resto do metal. Este processo é extremamente significativo uma vez que o crómio desempenha um papel importante na resistência à corrosão.

Existem alguns exemplos de metais sujeitos a corrosão intergranular:

- Aço inoxidável - que possui um tratamento térmico ou soldagem insuficientes;
- Aço inoxidável EN 1.4401 (AISI 316) em ácido nítrico concentrado, (CALLISTER Jr., 2006).

Características (USP, 2019 - C):

- Associada à natureza mais reativa dos contornos de grãos sob condições particulares;
- O ataque se restringe às regiões do contorno de grão e às suas adjacências;
- Pode haver perda de massa considerável do metal devido ao destacamento dos grãos.

Fatores que mais contribuem para este tipo de ataque:

- Acúmulo de impurezas;
- Precipitação de fases – geralmente com dimensões submicrométricas;
- Enriquecimento em um determinado elemento de liga;
- Empobrecimento em um determinado elemento de liga.

Materiais onde o fenômeno é mais frequente:

- Alumínio – segregação de fases ricas em Fe ou em Cu em ligas de elevada resistência mecânica;
- Latões – tendência do Zn se acumular nestas regiões;
- Aço Inoxidável – empobrecimento em Cr nos contornos de grão.
- Quando o material está propenso à corrosão intergranular diz-se que o mesmo se encontra *sensitizado*.

A Figura 2.13 mostra a degradação de uma solda em aço inoxidável.

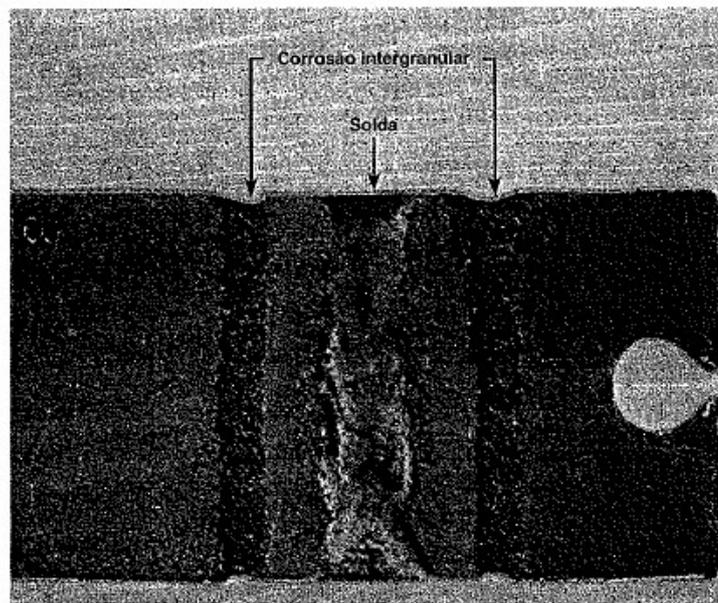


Figura 2.13. Degradação de uma solda em aço inoxidável, (CALLISTER Jr., 2006).

- **Lixívia seletiva**

Ocorre em ligas de solução sólida quando um elemento ou constituinte é removido preferencialmente como consequência do processo de corrosão, como por

exemplo, o Zn no latão; fica somente uma massa porosa de Cu na região de remoção, comprometendo as propriedades da liga que muda sua cor.

Nesse processo de corrosão, as propriedades mecânicas da liga são comprometidas significativamente porque causa mudanças na estrutura da superfície atacada.

A lixívia seletiva também pode ocorrer com outros sistemas de ligas onde o alumínio, o ferro, o cobalto, o cromo ou outros elementos sejam vulneráveis a uma remoção preferencial.

- **Erosão-corrosão**

É a ação combinada de ataque químico e abrasão mecânica ou desgaste pelo movimento de um fluido. Prejudicial para ligas passivadas (o revestimento deve ser repostado rápido e continuamente). Metais macios são susceptíveis; Cu e Pb.

Neste caso, quanto maior for a velocidade do fluido maior será a taxa de corrosão. Além disso, a presença de bolhas e particulados em suspensão aumenta a severidade desta corrosão.

Normalmente, este tipo de corrosão é encontrado em tubulações (dobras, curvas, mudanças de direção, variações bruscas de diâmetro, posições onde há mudança de direção do fluido tornando o escoamento turbulento). A natureza do fluido também pode exercer uma forte influência sobre o comportamento da corrosão. A Figura 2.14 mostra a falha em uma curva de tubulação de vapor atacada por erosão-corrosão.



Figura 2.14. Falha em uma curva de tubulação de vapor atacada por erosão-corrosão, (CALLISTER Jr., 2006).

Principais medidas preventivas da erosão-corrosão:

- Modificação do projeto para eliminar efeitos de colisão do fluido e turbulências;
- Utilização de materiais mais resistentes;
- Remoção de particulados e bolhas da solução.
- **Corrosão sob tensão**

É a ação combinada de tensão trativa num meio corrosivo. Pequenas trincas formam-se perpendicularmente à direção das tensões relativamente baixas. As tensões podem ser originadas por cargas externas ou serem residuais (variações de temperatura). Normalmente, alguns materiais que são inertes em um meio corrosivo específico se tornam suscetíveis a essa forma de corrosão quando uma tensão é aplicada. Exemplos: aços inox em soluções com íons cloreto, latões em soluções de amônia. A Figura 2.14 apresenta uma fotomicrografia onde é mostrado o trincamento intergranular devido a corrosão sob tensão no latão.

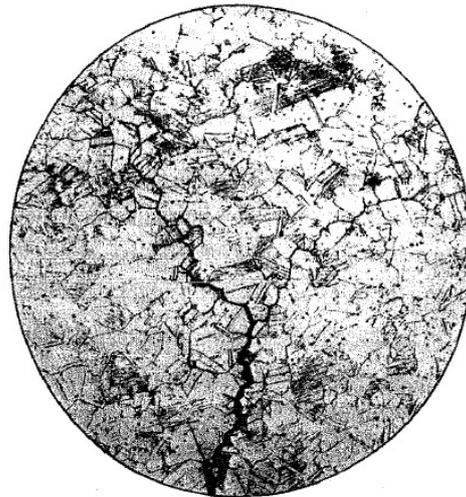


Figura 2.15. Fotomicrografia de um trincamento intergranular devido a corrosão sob tensão no latão, (CALLISTER Jr., 2006).

Medidas preventivas:

- Diminuição da tensão pela redução da carga aplicada ou aumento da área da secção reta na direção perpendicular à tensão;
- Realização de tratamentos térmicos de recozimento para eliminar tensões residuais.

- **Fragilização por hidrogênio**

Várias ligas sofrem considerável redução na sua ductilidade e no LRT (limite de resistência à tração) ao serem penetradas por hidrogênio atômico. Exemplos: aços de alta resistência (martensíticos) e ligas CFC (cúbica de face centrada, exemplos: aços austeníticos, ligas de Cu, Al e Ni) endurecidas por precipitação.

A fragilização (trincamento pelo H) é um tipo de falha decorrente de tensões trativas ou tensões residuais trativas que resulta em fratura frágil de forma catastrófica (as trincas crescem e propagam-se rapidamente).

O hidrogênio (atômico e mesmo em ppm) se difunde intersticialmente na rede cristalina causando as trincas (normalmente transgranulares). Para a sua ocorrência é necessária alguma fonte de hidrogênio e possibilidade de formação do seu componente atômico. Ex.: H₂S encontrados em fluidos derivados e petróleo, gás natural e salmouras de poços de petróleo. O H₂S é considerado um agente prejudicial por retardar a formação de hidrogênio molecular e aumentar o tempo de residência do hidrogênio atômico.

2.3.4. Ambientes corrosivos

Os ambientes corrosivos incluem a atmosfera, as soluções aquosas, os solos, os ácidos, as bases, os solventes inorgânicos, os sais fundidos, os metais líquidos e por fim e não menos importante o corpo humano. (CALLISTER JR, 2006).

A atmosfera é um importante meio corrosivo, pois ela apresenta a umidade e o oxigênio como os principais agentes corrosivos. Além disso, cloretos e o enxofre presentes na atmosfera podem aumentar o poder corrosivo da mesma.

Outro ambiente comum são os meios aquosos que apresentam concentração de diferentes eletrólitos, como o cloreto de sódio que está associado ao oxigênio dissolvido na água. (CALLISTER JR, 2006).

Os solos são outro caso de ambiente corrosivo, pois eles apresentam uma grande gama de agentes corrosivos: umidade, teor de oxigênio, teores de sais, alcalinidade e a presença de micro-organismos.

2.3.5. Prevenção da corrosão

Industrialmente uma série de técnicas é utilizada para reduzir a corrosão dos materiais, elas são: adoção de revestimentos, aplicação de inibidores de corrosão, métodos de modificação do meio, uso de proteção catódica e anódica, conforme apresentação a seguir.

- **Aplicação de revestimento:** consiste em aplicar uma barreira resistente a corrosão e impermeável como camadas de passivação, metais líquidos que são solidificados sobre a superfície e aplicações de revestimentos poliméricos como tintas e revestimentos cerâmicos.
- **Os protetores catódicos:** são substâncias que possuem íons metálicos capazes de reagir com a alcalinidade catódica, produzindo assim compostos insolúveis. Esses compostos envolvem toda a área catódica, impedindo a difusão do oxigênio e dos elétrons, inibindo o processo catódico. A eficiência dos protetores catódicos no concreto comparando-os com os anódicos é razoavelmente baixa (FRAUCHES-SANTOS et al, 2013).
- **Os protetores anódicos:** são aqueles que atuam nas reações anódicas, ou seja, aqueles que migram para a superfície anódica, causando passivação em presença de oxigênio dissolvido. Este tipo de protetor reage com o produto de corrosão inicialmente formado, dando origem a um filme aderente e extremamente insolúvel em sua superfície, resultando em sua proteção (FRAUCHES-SANTOS et al, 2013).
- **Técnicas de modificação do meio corrosivo:** o ato de modificar o ambiente consiste em mudar as propriedades que causam a corrosão como pH, presença de sais, disponibilidade de oxigênio, temperatura, dentre outros.
- **Inibidores de corrosão:** inibidores são substâncias que em pequenas quantidades podem retardar a velocidade de corrosão, podendo ser por corrosão criando revestimento, reduzindo cinética química ou evitando troca de elétrons em reações de oxirredução.

2.3.6. Relação entre pH e corrosão

De acordo com Atkins et al (2018), o pH é uma abreviatura para potencial de Hidrogênio, que tem como propriedade indicar a quantidade de íons H_3O^+ ou H^+ dissociados em uma solução. Para a temperatura padrão de 25°C , o pH varia de 0 (zero) a 14, porém, em temperaturas diferentes esta faixa é diferente.

Quanto mais próximo de o pH estiver de 0 (zero), mais ácida será a solução, enquanto o pH estiver próximo 14 mais básica será a solução e o valor intermediário de 7 é um ambiente neutro. O pH é determinado pelo valor negativo do logaritmo da concentração de hidrogênio iônico, representado pela Equação 2.2.

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+] \quad 2.2$$

No caso da moagem, "... se a polpa tiver de trabalhar em meio alcalino (por exemplo, por exigência da flotação ou da dispersão de lamas, é de conveniência regular o pH da polpa antes da entrada do moinho, de modo a também minorar a corrosão", Chaves e Peres (2011).

2.3.6.1. Diagrama Pourbaix

O diagrama de Pourbaix é descrito por meio do equilíbrio termodinâmico entre as espécies de um elemento químico. Isso o torna uma ferramenta muito útil para determinar como um metal imerso irá se comportar de acordo com o pH e o potencial elétrico da solução (PANNONI, 2015):

- Domínio da imunidade, cujo metal não apresenta possibilidade de oxidar ou sofre corrosão;
- Domínio da corrosão, cujo metal poderá solubilizar e formar íons estáveis, e desse modo sofrer corrosão;
- Domínio da passividade, cujo metal apresenta a tendência de formar um óxido insolúvel na superfície, que será responsável pela passivação do metal e protegê-lo.

O digrama de Pourbaix para o ferro apresenta as regiões citadas anteriormente, que podem ser vistas marcadas na Figura 2.16, que apresenta uma marcação inseridano domínio de corrosão. Para evitar a corrosão pode-se mudar o meio para a região imune (seta 3) utilizando proteção catódica no metal ou mudar o

meio para um domínio de passivação, aumentando o pH do meio (seta 2) ou aumentando do potencial eletroquímico (seta 1) por meio de agentes oxidantes.

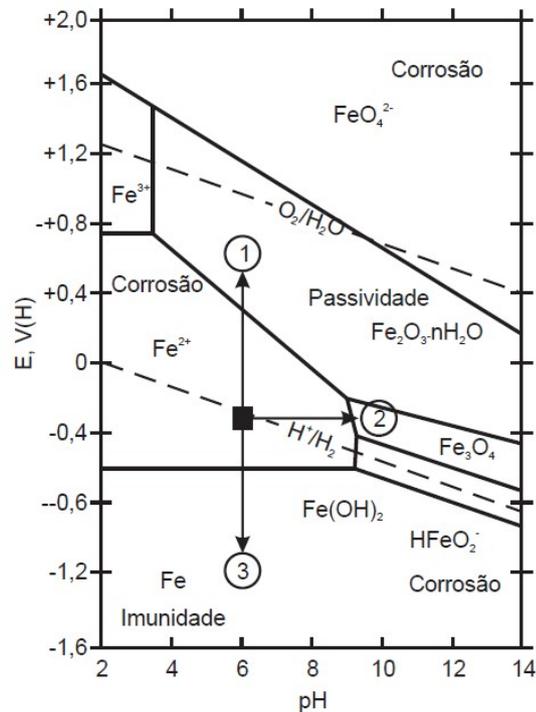


Figura 2.16. Diagrama de Pourbaix do ferro(PANNONI, 2015).

Apesar do diagrama de Pourbaix ser tão útil, ele apresenta certas limitações. Isso ocorre porque ele considera os equilíbrios termodinâmicos das espécies e assim o diagrama não demonstra taxa de corrosão por ser uma variável cinética. Quando os íons estão fora do equilíbrio, o diagrama não representa a realidade, além disso, a passivação não considera a capacidade protetora do óxido insolúvel formado.

2.3.6.2. Taxa de corrosão e pH

A taxa de corrosão está diretamente ligada à velocidade de corrosão. A Figura 2.17 mostra a taxa de corrosão em condição aerada em função do pH. Com isso, podemos determinar a influência do pH sobre a corrosão do ferro.

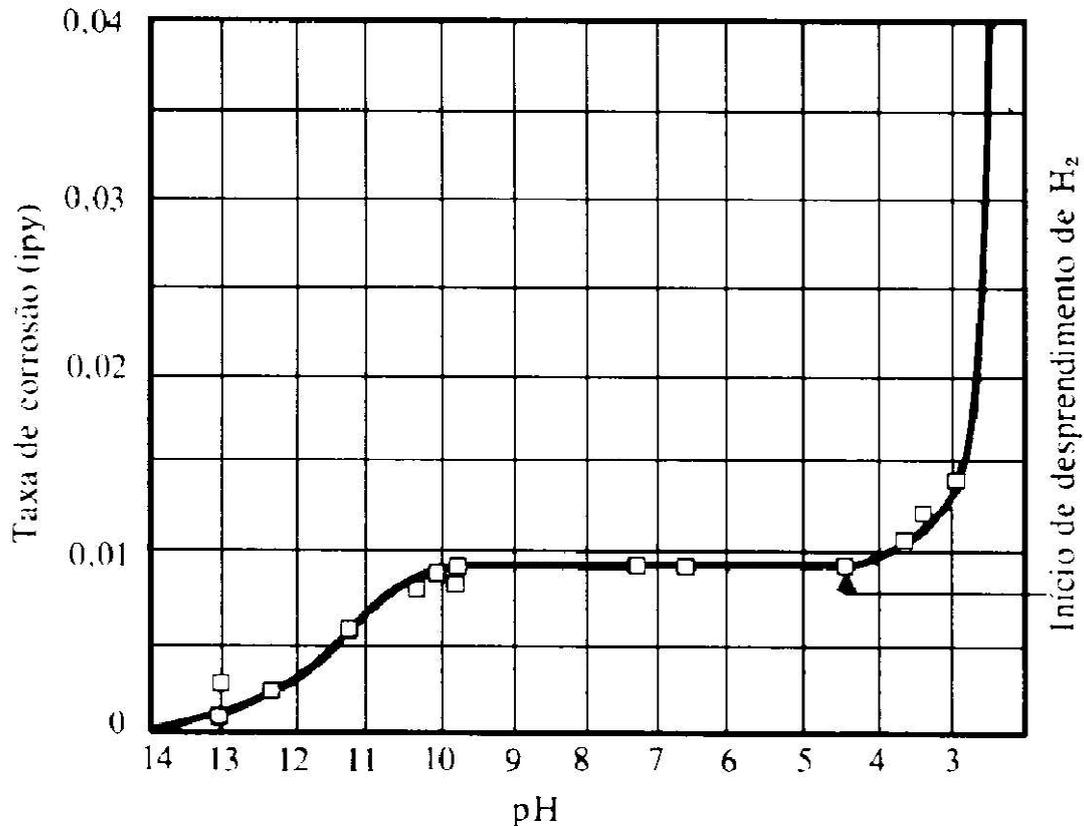


Figura 2.17. Influência do pH sobre a corrosão do ferro (GENTIL, 1996).

Em valores de pH entre 4,5 e 10 não apresentam muita variação da taxa de corrosão, segundo Gentil (1996), a corrosão nessa faixa depende mais da quantidade de oxigênio da água do que dos íons de H^+ . Enquanto que em pH maiores que 10, a passivação tornará o ferro resistente a corrosão e para pH abaixo de 4, o metal será mais favorável à corrosão. Porém, em pH elevado com baixa oxigenação pode ocorrer a solubilização do ferro pela formação de $HFeO_2^-$

2.4. Ligas metálicas

As ligas metálicas estão incluídas na revisão bibliográfica porque, normalmente, os revestimentos dos moinhos e corpos moedores são fabricados com essas ligas. Nesse caso são dadas ênfases às ligas ferrosas em especial o aço.

2.4.1.Ligas ferrosas

O ferro é um elemento químico de número atômico 26, abundante na natureza, um metal maleável de coloração cinza prateado apresentando propriedades magnéticas e não é um elemento nativo e normalmente vem associado a outros elementos como oxigênio e enxofre, formando compostos como a hematita (Fe_2O_3) e pirita (FeS), respectivamente. Ele é explotado de jazidas, geralmente na forma de óxidos de ferro, sendo reduzido em alto forno, transformado em ferro-gusa e então refinado, (WIENS, 2013).

Ligas ferrosas são ligas metálicas onde o ferro é o elemento majoritário. São amplamente utilizadas na engenharia, nas indústrias e no dia a dia. São as ligas produzidas em maior quantidade e sua ampla utilização se deve a abundância do elemento na natureza, sua fácil produção e a sua versatilidade. As desvantagens são a densidade elevada, a condutividade baixa e a baixa resistência à corrosão, (WIENS, 2013).

As ligas ferrosas possuem uma propriedade especial em que suas características podem ser alteradas por processos do tratamento térmico ou pela adição da quantidade pequena de elementos de liga. As ligas ferrosas possuem diferentes propriedades físicas de acordo com a porcentagem de carbono que possuem, (WIENS, 2013).

As ligas ferrosas são divididas em dois grandes grupos, aços e ferros fundidos, e são classificados de acordo com o teor de carbono (variando entre 0,008 e 2,11%) presente em cada uma (WIENS, 2013).

2.4.2. Aços

Aços são ligas metálicas constituídas por ferro e carbono e são atualmente a mais importante das ligas metálicas. As suas propriedades podem variar de acordo com sua composição química e teor de carbono, que são densidade, resistência mecânica, durabilidade, adaptabilidade e resistência à corrosão. O teor de carbono é inferior a 2,11%. O aço pode ser classificado de acordo com a quantidade de carbono em porcentagem, sua composição química e quanto à sua aplicação, (PAVANATI, 2008).

Existem diversos tipos de aços como aço damasco, rápido, carbono, temperado, inoxidável e sintético e todos eles têm aplicações diversas. Como, por exemplo, o aço damasco que é usado para fabricação de espadas samurai e o aço rápido é utilizado para brocas, fresas e serras. A composição estrutural e o processamento controlado dos aços é o que os tornam adequados para inúmeras aplicações diferentes, (PAVANATI, 2008). A Figura 2.18 mostra a representação esquemática do aço.



Figura 2.18. Representação esquemática do aço (PAVANATI, 2008).

Os aços-liga incorporam elementos como cromo, níquel, molibdênio e titânio, entre outros para conferir maior resistência e durabilidade sem aumentar o peso. O aço inoxidável é um importante aço-liga feito com cromo. Os aços-liga, geralmente, são usados em construção, máquinas-ferramentas e componentes elétricos, (CALLISTER Jr. 2006).

Os aços inoxidáveis são altamente resistentes à corrosão (ferrugem) em uma variedade de ambientes. Seu elemento de liga predominante é o cromo em uma concentração de pelo menos 11% em peso, (CALLISTER Jr., 2006).

Os aços inoxidáveis são divididos em três classes com base no constituinte de fase predominante da microestrutura: austenítico, ferrítico, martensítico. O resumo das propriedades é descrito a seguir, conforme UFPR (2019) e USP (2019-C).

Austeníticos: composição típica 18% Cr e 8% Ni

- Sensitização: tratamento de solubilização;
- Endurecimento por trabalho a frio;

- Mecanismo de resistência;
- Recozimento para alívio de tensão e brilhante;
- Apresentam excelente combinação de resistência à corrosão, ductilidade, tenacidade e soldabilidade.

A Figura 2.18 apresenta a microscopia ótica exibindo o início de recristalização secundária em um aço inoxidável austenístico estabilizado com titânio após tratamento de recozimento.

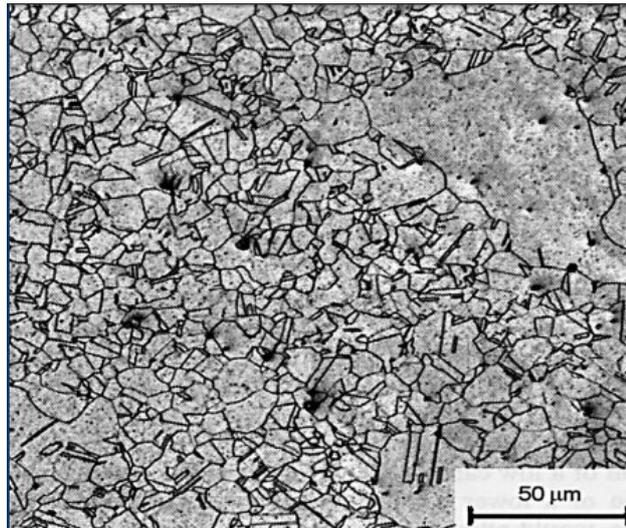


Figura 2.19. Microscopia ótica do aço inoxidável austenístico (USP, 2019 -C).

Ferríticos - 15% a 20% Cr, baixo C, sem Ni

Os aços inoxidáveis ferríticos são essencialmente ligas Fe-Cr, de baixo C. As últimas versões receberam adições de Ti e Nb, para estabilização. Possuem elevada resistência à corrosão e boa estampabilidade, mais importante para produtos planos. Mas, os inoxidáveis ferríticos também encontram aplicações em barras, como em válvulas solenóides. A Figura 2.20 apresenta a microestrutura típica ferrítica, ataque água-régia 50 x.



Figura 2.20. Microestrutura típica ferrítica, ataque água-régia 50 x, USP (2019-C).

Martensíticos - máximo 18% Cr

- São ligas do sistema Fe-Cr-Ni contendo cromo 11,5 a 18% e carbono 0,1 a 1,2%, e são austeníticos a altas temperaturas 950°C, e necessitam estabilizar esta fase devido a presença de cromo, que é um elemento alfacênico.
- Aço inoxidável de baixo carbono.

A Figura 2.21 apresenta a microscopia ótica de um aço inoxidável martensítico AISI 410, temperado e revenido 20 HRC, mostrando a microestrutura de martensita revenida com finos carbonetos precipitados.

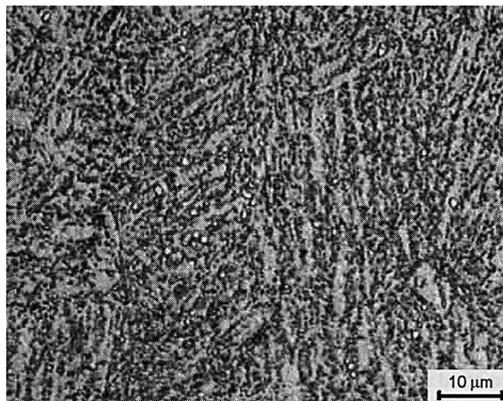


Figura 2.21. Microscopia ótica de aço inoxidável martensítico, USP (2019- C).

2.4.3. Ferro fundido

É uma liga ferrosa contendo 2,11%-6,67% de carbono e de 1%-3% de silício. Existem vários tipos de ferros fundidos como os dúcteis, brancos, maleáveis, porém

o mais importante é o ferro fundido cinzento. Como o ferro fundido é uma liga feita de ferro, carbono e silício, ele é frágil, duro e resistente ao desgaste. É usado em tubulações de água, máquinas-ferramentas, motores de automóveis e fogões. A Figura 2.22 mostra a representação esquemática do ferro fundido (FoFo).

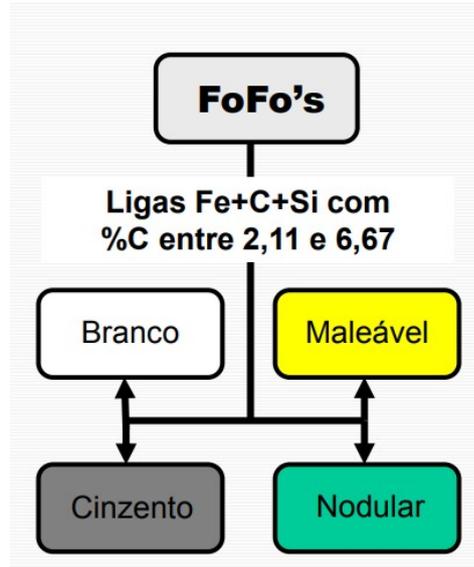


Figura 2.22. Representação esquemática do ferro fundido (FoFo) (PAVANATI, 2008).

CAPÍTULO 3. METODOLOGIA

Por ser um trabalho experimental que requereu várias etapas para sua conclusão, foi necessário descrever em detalhes as principais fases dessas etapas, de modo a esclarecer como todos os procedimentos foram elaborados. A Figura 3.1 mostra a estrutura simplificada da metodologia utilizada na execução dos procedimentos experimentais.

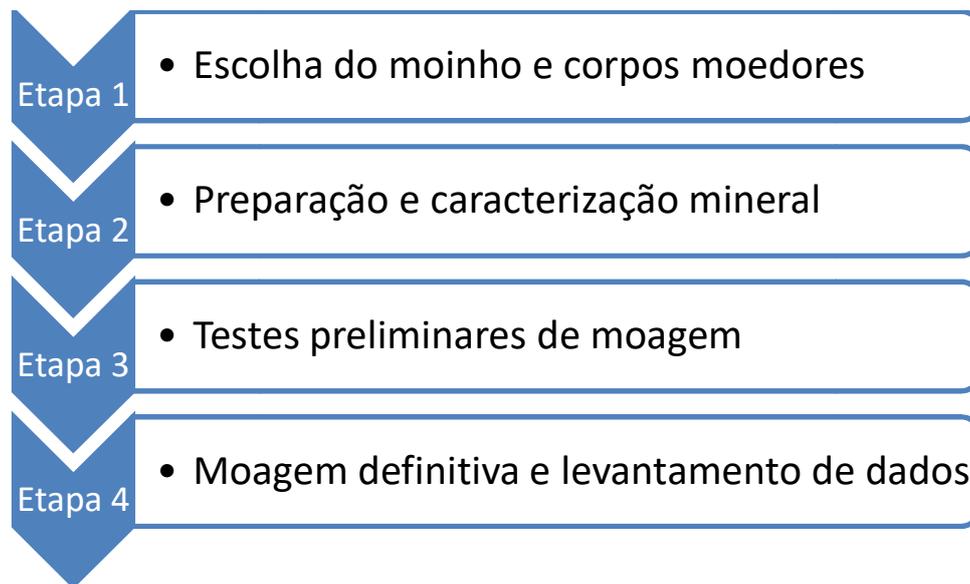


Figura 3.1. Estrutura simplificada da metodologia

3.1. Descrição das etapas

- **Etapa 1: Escolha do moinho e corpos moedores**

Foi escolhido o moinho de jarro de aço, devido à sua resistência a meios alcalinos e disponibilidade no Laboratório de Tratamento de Minérios do Curso de Mineração do CEFET-MG- Unidade de Araxá. A Figura 3.2 mostra o moinho de jarro com as dimensões de 14 cm e 19 cm de diâmetro e comprimento, respectivamente, cujo volume corresponde a 3 litros utilizado nos procedimentos experimentais.

Nesta mesma etapa, foi feita a aquisição de corpos moedores (esferas) de 2 cm de diâmetro, de aço carbono SAE 1015 e aço-cromo SAE 52100, correspondendo a 60 unidades de cada tipo de aço. A opção por esses tipos de aço

foi devida à disponibilidade no mercado, bem como as características diferentes. A Figura 3.3 mostra as esferas utilizadas na pesquisa.



Figura 3.2. Moinho de jarro em operação no CEFET-MG- Unidade Araxá.

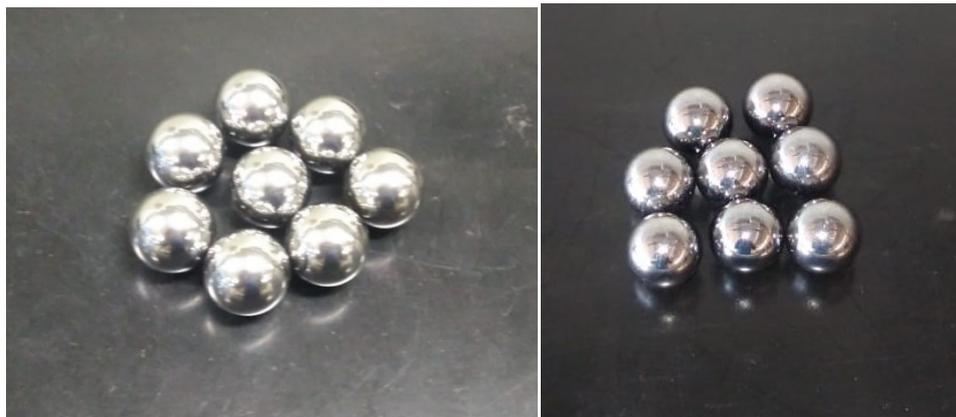


Figura 3.3. Esferas aço carbono (SAE 1015 à esquerda) e de aço-cromo (SAE 52100 à direita)

Ainda nessa etapa, foi levantada a densidade (aço-cromo $7,81\text{g/cm}^3$ e aço carbono $7,87\text{g/cm}^3$) e a composição química informada pelo fabricante dos dois aços utilizados nos procedimentos experimentais, conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Especificação dos elementos de liga para o aço SAE 52100 e 1015 segundo a AISI(American Iron and Steel Institute).

ELEMENTOS LIMENTOS DE LIGA	AÇO 52100	AÇO 1015
Carbono (C)	0.98% – 1.1%	0,13% -0,18%
Cromo (Cr)	1.3% – 1.6%	0%
Manganês (Mn)	0.25% – 0.45 %	0,3% - 0,6%
Fósforo (P)	< 0.025%	<0,04%
Silício(Si)	0.15 – 0.30%	0%
Enxofre(S)	< 0.025%	< 0,05%

- **Etapa 2: Preparação e caracterização mineral**

Nesta etapa, foi realizada uma pilha alongada com 30 kg de areia de construção, devida a sua alta abrasividade, 100% passante em peneira de 1,18 mm, com o objetivo de quartejar uma massa para análise de densidade ($2,68 \text{ g/cm}^3$) por picnometria. Para avaliar a distribuição granulométrica da areia e ainda para garantir a reprodutibilidade dos experimentos, foi feito um peneiramento que apresentou os seguintes valores de granulometria, conforme a Figura 3.4.

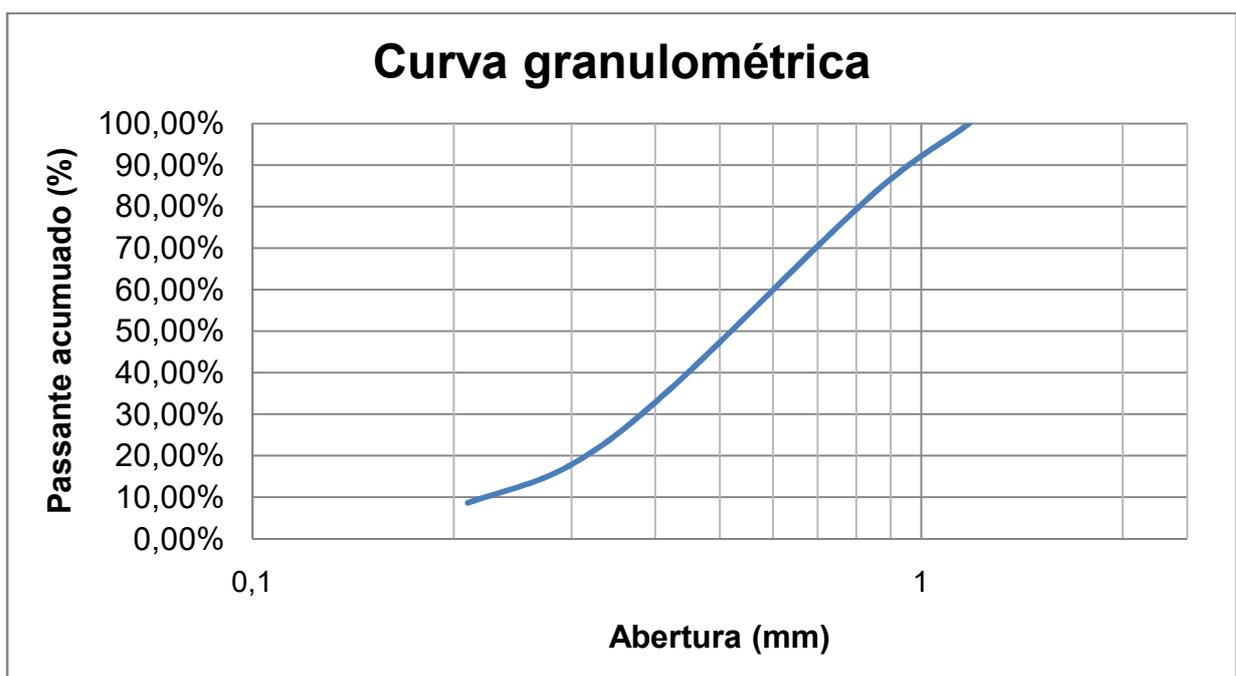


Figura 3.4. Distribuição granulométrica da areia

- **Etapa 3: Testes preliminares de moagem.**

Estes testes foram executados para promover o conhecimento dos princípios de operação e funcionamento do moinho, bem como estabelecer os parâmetros de trabalho de operação e refinar a padronização da metodologia escolhida para os testes.

Nesse caso, foi avaliada a metodologia mais adequada de secagem; a porcentagem de sólido mais adequado entre 30%, 45%, e 60%; seleção do tipo de balança a ser utilizado e, finalmente, o método de pesagem utilizado. Optou-se para a secagem das esferas a utilização de papel toalha, na moagem foram utilizados 45% de sólidos e balança semianalítica de cada corpo moedor.

Após os testes preliminares, outra pilha alongada foi montada com a mesma areia utilizada anteriormente a fim de quartear 32 alíquotas de areia com 668g cada, destinados à moagem experimental.

- **Etapa 4: Moagem definitiva e levantamento de dados**

Para realização dos testes foi utilizado o fator de enchimento de 40% do volume total do moinho, com o objetivo de manter o desgaste dos corpos moedores sempre constante. A velocidade de rotação do moinho foi de 32 RPM, que é aproximadamente 30% da velocidade crítica, devido ao regime de cascata apresentar moagem por abrasão de acordo com Chaves e Peres (2012), pelo período de 2 horas para cada operação de moagem.

A carga de enchimento do moinho consistiu de grupo de 30 esferas de um tipo dos aços escolhido se totalizava, aproximadamente 1 kg de corpo moedor em cada moagem e polpa de minério com 45% de sólidos, em função dos testes preliminares (668 g de areia e 818 ml de água).

A escolha do pH levou em consideração que o desgaste dos aços pode sofrer influência do meio em que se encontram. De acordo com Gentil (1996), “para muitas ligas de ferro, pode ocorrer a passivação do metal quando em meio alcalino”. Por isso, os pHs 7 e 11 foram os definidos como uma alternativa para se tentar diminuir a ação corrosiva, pela introdução de algum álcali. Para o ajuste do pH foi utilizado o pHmetro, disponível no CEFET-MG – Unidade Araxá. Para ajustar o pH 7 utilizou-se ácido clorídrico e para pH 11 utilizou-se soda cáustica.

Cada moagem realizada durou exatamente 2 horas, sendo repetidas 5 vezes com alíquotas diferentes de areia para ambos os pHs 7 e 11 e para ambos os

metais. Logo cada grupo de corpos moedores atuou por 10 horas em cada par de variáveis (pH e metal), totalizando 40 horas de desgaste e 20 moagens diferentes.

Logo após cada moagem de duas horas, os copos moedores foram lavados com água e secos com papel toalha e permaneceram no laboratório durante um dia, com a finalidade de remover resquícios de umidade.

Após cada secagem e antes da primeira moagem, as massas das 30 esferas de cada grupo foram pesadas uma a uma em balança semianalítica (com quatro casas decimais, Figura 3.4), totalizando 180 valores de massa para cada par de variáveis estudadas, totalizando 720 massas de esferas que foram cuidadosamente pesadas.



Figura 3.4 Balança semianalítica, disponível no CEFET-MG – Unidade Araxá,

O método de avaliação do desgaste de corpo moedor em moagem consistiu em pesar separadamente as 720 amostras (esferas de aço). De posse dos valores de massa os dados coletados pela metodologia que estão nos Apêndices, esses dados foram tratados e resumidos por meio de cálculos estatísticos para determinação de média e desvio padrão, os quais são demonstrados em gráficos e tabelas. Todos os dados de massa também estão apresentados nos Apêndices.

Para catalogar as esferas, foram considerados apenas os valores de massa todas as esferas presentes no moinho. Por outro lado, para avaliar o desgaste de cada esfera, considerou-se que ranque de massa permanecia constante, por exemplo, a menor massa no início da operação seria também a menor massa no final da operação. Esta condição pode ser observada Nas tabelas do Apêndice.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com Chaves e Peres (2012), a taxa de desgaste é linear e diretamente proporcional ao quadrado do diâmetro do corpo moedor. Por isso, é necessário determinar se será importante converter os valores de massa em diâmetro teórico. Para isso, o cálculo diferencial pode ser utilizado, conforme apresentado a seguir.

$$M = \frac{4\pi R^3 \rho}{3} \quad 4.1$$

$$\frac{\partial M}{\partial R} = 4\pi R^2 \rho \quad \partial R = 0,01 = 4\pi \times 1^2 \times 7,81 \times \partial R$$

$$\partial R = 1,02 \times 10^{-4}$$

$$\frac{\partial R}{R} = \Delta R\% = 1,02\% \times 10^{-2}$$

Em que:

-**M** é a massa de uma bola teórica;

$\frac{\partial M}{\partial R}$ é a massa que varia em uma moagem de aproximadamente 10 horas;

-**R** é o raio da esfera;

- ∂R é a variação raio das esferas;

- **ρ** é a densidade das esferas.

O valor $\Delta R\%$ é o percentual de variação do diâmetro em um período de 10 horas, ou seja, é quanto a taxa de desgaste varia de acordo com o raio. Como o raio não apresenta variação considerável, os dados foram discutidos com base em diferença de massa.

4.1. Avaliação das taxas de desgaste

Os gráficos a seguir apresentam as massas médias das bolas em cada etapa de moagem, cujos grupos foram feitos de acordo com o material do corpo moedor (esferas), pH e tempo de moagem.

O gráfico da Figura 4.1 mostra a variação de massa da bola de aço-cromo, apresentando seu desgaste. Por meio de regressão linear dos dados, pode-se afirmar qual é a influência do pH do meio sobre o desgaste dessa liga metálica.

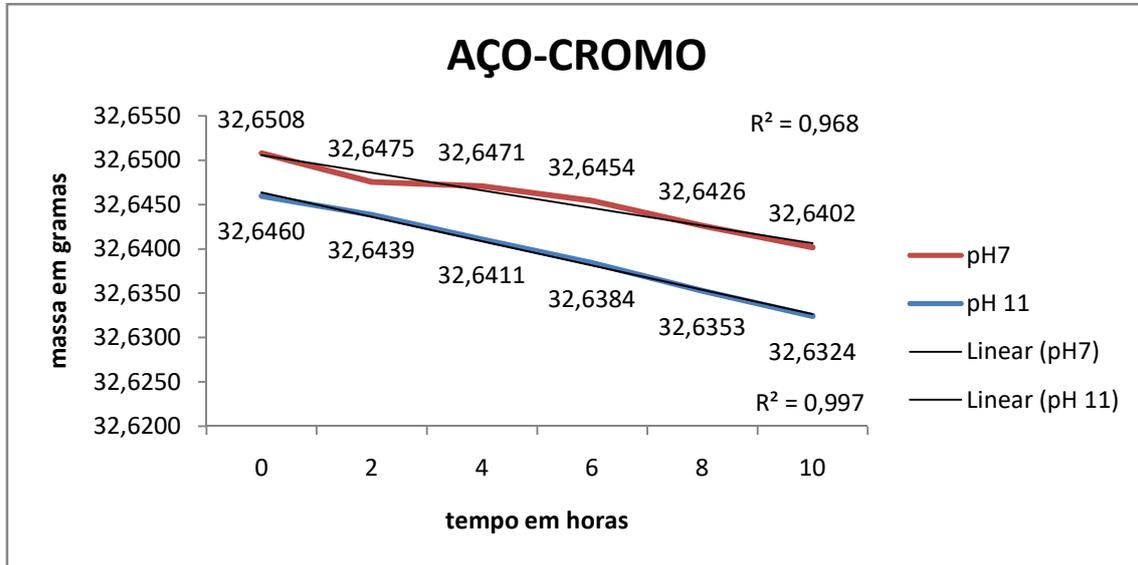


Figura 4.1. Variação de massa do aço-cromo em 10 horas de moagem

Como a massa variou em função do tempo de moagem em horas, os coeficientes angulares das regressões lineares (Tabela A5 do apêndice) apresentaram a taxa de desgaste do aço-cromo frente aos dois meios estudados. Nesse caso, os valores das taxas de desgastes foram de 0,99 mg/h quando o pH foi igual a 7. Mas quando pH foi 11, a taxa de desgaste foi de 1,37 mg/h.

Em função do comportamento verificado na Figura 4.1, pode-se observar que o aço-cromo apresentou uma taxa de desgaste maior em pH 11 do que em pH 7. Esse resultado não era esperado frente à propriedade do ferro de sofrer passivação em pHs alcalinos. Porém, essa liga metálica não é composta apenas por ferro e carbono, ela também apresenta elementos como silício, cromo e outros elementos que são mais ionizáveis em pH 11 e levemente oxidativo como pode-se observar na Figura 4.2

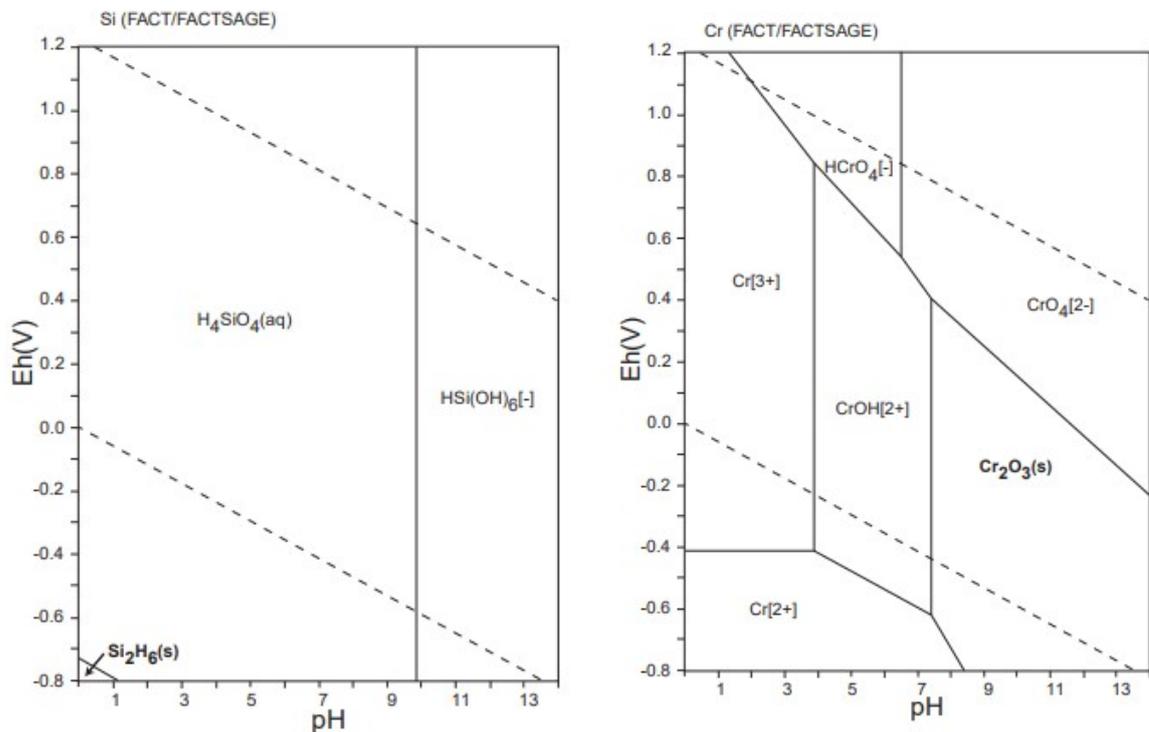


Figura 4.2. Diagrama de pourbaix do silício à esquerda e do cromo à direita (TAKENO,2005).

Por isso, provavelmente esses elementos podem ter influenciado no desgaste por meio de lixiviação seletiva e corrosão intergranular que podem criar fraquezas na superfície e/ou íons que podem prejudicar a formação de óxido passivador, acelerando a corrosão erosiva.

O aço carbono 1015, com gráfico semelhante ao plotado para aço-cromo, apresentou os mesmos tipos de dados. Por meio deste gráfico, as avaliações do desgaste dos corpos moedores podem ser observadas no gráfico da Figura 4.3.

Através do mesmo raciocínio verificado anteriormente, é possível observar que o aço carbono apresentou as seguintes taxas de desgastes: 1,14 mg/h quando em meio de pH 7. Mas para pH igual a 11 a taxa de desgaste foi 0,96 mg/h.

Em função dos resultados encontrados, pode-se observar que a taxa de desgaste foi menor quando o meio apresentou um pH igual a 11. Portanto, quantitativamente, essa redução no desgaste em função do pH foi de 15,8% em relação ao pH 7.

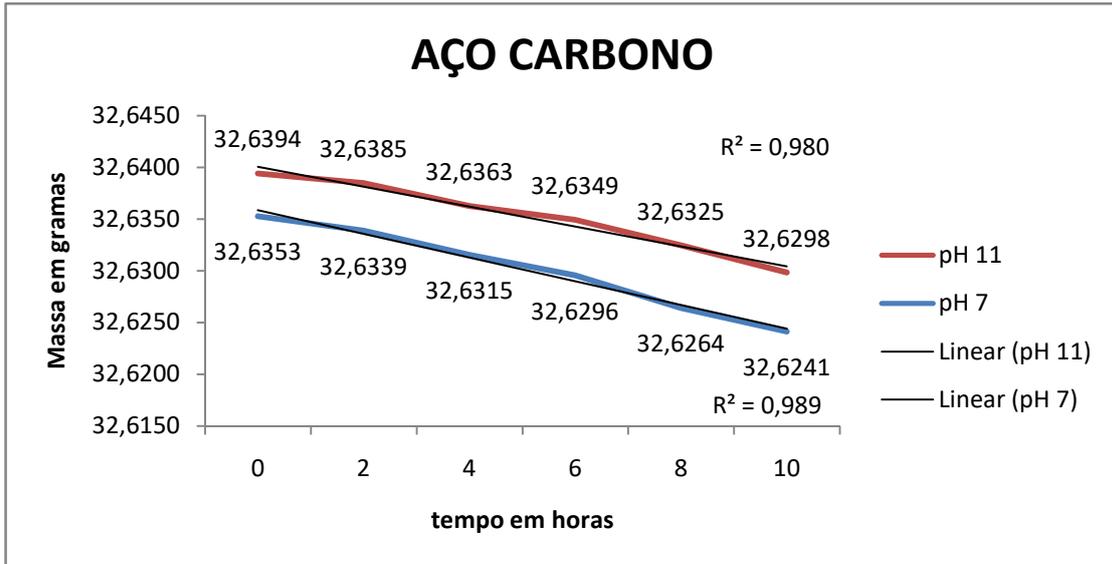


Figura 4.3. Variação de massa do aço carbono em 10 horas de moagem

Esse resultado confirma que o ambiente alcalino torna o aço mais resistente a corrosão devido a processo de passivação e conseqüentemente o desgaste do corpo moedor também é menor.

Para uma validação dos resultados encontrados, tanto para o aço carbono(aço 1015) quanto para o aço-cromo (aço 52100), dois testes de hipótese entre duas amostras, rejeitando a hipótese nula, confirma se realmente houve variação no desgaste dos corpos moedores superior a variáveis aleatórias.

Os valores da média (μ) e do desvio padrão (σ) foram determinados pela variação de massa de cada bola após 10 horas de moagem em seus respectivos pHs, conforme a Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Valores estatísticos do desgaste no período de 10 horas

	pH7		pH11	
	Aço-cromo	Aço carbono	Aço-cromo	Aço carbono
μ	0,0106 g	0,0111 g	0,0135 g	0,0096 g
σ	0,0003 g	0,0007 g	0,0005 g	0,0012 g

Com base na Tabela 4.1, os testes de hipótese para duas amostras de $n = 30$ apresentam $Z = 6$ para as moagens com aço carbono, nos dois pH diferentes. Isso rejeita a hipótese com uma confiança maior que 99,99% ($Z=3,72$), demonstrando

que realmente houve variação na taxa de desgaste. Já o aço-cromo apresenta $Z = -29$ que rejeita a hipótese nula com uma confiança maior que 99,99%.

4.2. Comparação entre a literatura e resultados alcançados

A partir dos resultados práticos desse trabalho, pode-se verificar se houve concordância com a literatura, tendo em vista que em pH alcalino ocorreu a redução dos efeitos da corrosão para o aço carbono.

O gráfico da Figura 4.4 (Gentil, 1996) mostra a taxa de corrosão em função do pH em uma solução aerada. Esse gráfico passou por uma ampliação por meio de ferramentas de edição de imagens e serviu para identificar qual foi a taxa de corrosão em pH 7 e pH 11.

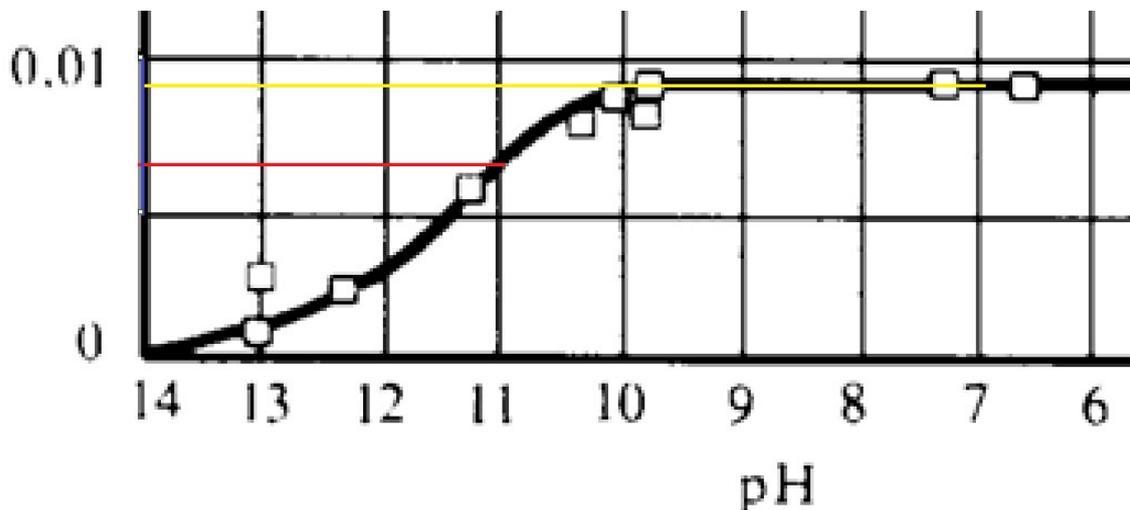


Figura 4.4. Taxa de corrosão em polegadas por ano em função do pH, adaptado de Gentil (1996).

Avaliando as distâncias de grade no gráfico da Figura 4.4, foi possível determinar que a taxa de corrosão do ferro foi de 0,00667 polegadas por ano e 0,00813 polegadas por ano para meios de pH 11 e pH 7, respectivamente.

Com as massas médias das esferas composta de aço carbono da Tabela 4.2, encontradas por meio de procedimentos matemáticos, pode-se determinar qual a variação teórica do raio. A variação do raio médio pode ser determinada pela equação de massa 4.1:

$$M = \frac{4\pi R^3 \rho}{3}$$

4.1

Tabela 4.2. Massa média das esferas de aço carbono

	Tempo (horas)	pH11	pH7
Massa inicial (g)	0	32,6394	32,6353
Massa final (g)	10	32,6298	32,6241

A Tabela 4.3 mostra a variação teórica do raio em 10 horas de moagem.

Tabela 4.3. Variação teórica do raio em 10 horas de moagem

	pH11	pH7
Raio inicial cm	0,996689	0,996647
Raio final cm	0,996591	0,996533
Variação do raio μm	0,9773	1,14025

Para correlacionar os valores obtidos no gráfico da Figura 4.4 com os da Tabela 4.2, foi necessário converter a taxa de corrosão da unidade polegadas por ano para a unidade μm por hora. Isso resulta nos seguintes valores 0,0236 e 0,0193 μm por hora para o pH 7 e 11, respectivamente.

Enquanto que a moagem a úmido por 10 horas causa uma variação no raio das bolas 1,1403 e 0,9773 μm para os meios de pH 7 e 11, respectivamente, a taxa média de desgaste foi 0,1140 $\mu\text{m}/\text{h}$ e 0,0977 $\mu\text{m}/\text{h}$.

Comparando a taxa de corrosão teórica com a taxa de desgaste experimental do aço carbono, conclui-se que o desgaste por corrosão teórica em pH 7 representa 21% do desgaste total. Para o pH 11, a influência da corrosão teórica é de 20% em relação ao desgaste total, como pode ser observado na (Tabela 4.4), mostrando que o desgaste abrasivo representa aproximadamente 80% do desgaste total na condição estudada.

Comparando a taxa de desgaste prática em pH 7 com pH 11, pode-se observar que o desgaste no pH mais alcalino foi de 85,7% em relação ao pH neutro. Por outro lado, comparando a taxa de corrosão em pH 7 com pH 11, pode-se observar que a corrosão no pH mais alcalino foi de 82 % em relação ao pH neutro, como mostrado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 Comparação da teoria com a prática

	pH 7	pH 11	Variação do desgaste
Desgaste prático	0,1140 $\mu\text{m}/\text{h}$	0,0977 $\mu\text{m}/\text{h}$	85,71%
Corrosão teórica	0,0236 $\mu\text{m}/\text{h}$	0,0193 $\mu\text{m}/\text{h}$	82,04%
Influencia da corrosão	21%	20%	

A diferença entre desgaste prático e a corrosão teórica em pH 7 foi 0,0904 $\mu\text{m}/\text{h}$ e para o pH 11 foi de 0,0784 $\mu\text{m}/\text{h}$. Como esses não são constantes, mostra que não ocorre apenas desgaste abrasivo, esta discrepância indica a presença de corrosão- erosão no caso do aço carbono, ou seja, o desgaste por corrosão e abrasão ocorrem simultaneamente, pois são variáveis dependentes.

Não foi realizado o mesmo procedimento para o aço-cromo, tendo em vista que os resultados com esse tipo aço não condizem com aqueles previstos na teoria, que é o aumento do desgaste do aço-cromo em pH alcalino junto à abrasão.

CAPÍTULO 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, através dos procedimentos experimentais, que consistiu na moagem de substâncias com pH 7 e pH 11, utilizando corpos moedores de aço carbono e aço-cromo e por meio de análise estatística, demonstrou-se que o meio fluido apresenta influência sobre o desgaste de corpos moedores tanto por abrasão e corrosão.

Este fato leva em consideração que os resultados encontrados apresentaram variação em função das propriedades do meio fluido utilizado, evidenciando influência no desgaste de corpos moedores.

No caso de corpos moedores de aço carbono 1015, em que foi utilizado o pH 11, a taxa de desgaste percentual foi menor que quando foi utilizado o pH 7. Essa redução pode ser devida à passivação do ferro em pH alcalino, indicando que aços dessa classe são mais úteis para trabalhos em meios de pH igual a 11 do que em pH 7.

Por outro lado, quando os corpos moedores de aço-cromo 52100 foram utilizados no meio com pH 11, a taxa percentual de desgaste foi maior que quando se utilizou pH 7. Isso pode ter ocorrido devido às propriedades dos elementos de liga presentes nesse tipo de aço, como por exemplo, cromo e silício, pois tais elementos provavelmente, em meio de pH 11 são levemente oxidativos e apresentam tendência de solubilizarem. Isso pode influenciar a passivação e a resistência superficial do corpo moedor.

Com base nesses resultados, sugere-se que aço-cromo não é recomendado para trabalhos em meios de pH elevado, tendo em vista que em solução alcalina a taxa de desgaste dos corpos moedores pode ser mais acentuada. Então é necessário cautela ao empregar ferros fundidos devido a quantidade de silício e ligas de aço-cromo como açosferríticos, martensíticos e austeníticos.

Finalmente, com base nos resultados analisados, foi possível perceber a existência de corrosão-erosão, pois a diferença entre o desgaste prático e corrosão teórica não se manteve constante durante as operações de moagem.

REFERÊNCIAS

ATKINS, Peter; LORETTA, Jones; LAVERMAN, Leroy. **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**, LTC, 2018.

BERGERMAN, Mauricio Guimarães. **Cominuição, Desgaste, carga circulante e prática operacional**. UNIFAL – MG - Instituto de Ciência e Tecnologia – Núcleo de Engenharia de Minas, 2012.

CALLISTER JR, W. D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais- uma abordagem integrada**. LTC Rio de Janeiro, 2006.

CHAVES, Arthur P.; PERES, Antônio E. C. **Britagem, Peneiramento e Moagem**. 5. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. Coleção Teoria e prática do tratamento de minérios, v. 3. 324p.

FIGUEIRA, Hedda Vargas O; LUZ, Adão Benvindo. ALMEIDA, Salvador Luiz Matos. **Britagem e moagem**. Capítulo 4. CETEM. 5ª Edição. 2010.

FRAUCHES-SANTOS, C.; ALBUQUERQUE, M. A.; OLIVEIRA, M. C. C.; ECHEVARRIA, A. **A Corrosão e os Agentes Anticorrosivos**. *Rev. Virtual Quim.*, 2014, 6 (2), 293-309. Data de publicação na Web: 20 de dezembro de 2013.

GENTIL, V.; **Corrosão**. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora: Rio de Janeiro, 1996.

LUZ, A. B; SAMPAIO, J. A. FRANÇA, S. C. A; **Tratamento de Minérios –5ª Edição/Ed**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

MAZZINGHY, Douglas Batista. **Modelagem e Simulação de Circuito de Moagem Através da Determinação dos Parâmetros de Quebra e da Energia Específica de Fragmentação**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da UFMG, 2009.

PANNONI, Fábio Domingos. **Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio**. Gerdau. 6ª Edição, 2015.

PAVANATI, Henrique Cezar. **Introdução à tecnologia dos materiais**. CEFET-SC. 2008. Disponível em: http://pavanati.com.br/doc/Cap_2b_-_Ligas_metalicas_ferrosas.pdf. Acesso em: 28 abr. de 2019.

ROVERI, Eduardo, CHAVES, Arthur Pinto. **Mecanismos de desgaste de corpos moedores em moinhos de bolas**. Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 8, n. 4, p. 261-266, out.-dez. 2011.

SOUZA, Filipe José; MENEGALI, Gilson Bez Fontana. **Estudo da eficiência de moagem de matérias-primas cerâmicas em função do tipo do elemento moedor**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade do Extremo Sul Catarinense. 2010.

TAKENO, Naoto. **Atlas of Eh-pH diagrams**. Geological Survey of Japan Open Report No.419.2005

UFPR- Universidade Federal do Paraná. **Aços inoxidáveis**. Disponível em: http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM206/Prof_Marcondes/Acos%20inoxidaveis.pdf. Acesso em: 08 de jun. 2019-A.

USP. **Aços inoxidáveis: tipos, propriedades, microestruturas**. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4366975/mod_resource/content/0/aula09-a%C3%A7o_inoxid%C3%A1vel.pdf. Acesso em: 08 de jun. 2019 - B.

USP **Corrosão em frestas**. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3486831/mod_resource/content/1/CORROSAO%20EM%20FRESTAS_2.pdf. Acesso em: 15 mai. 2019.

USP. **Corrosão galvânica ou bimetálica**. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3438430/mod_resource/content/1/Galvanica_HGM_2017.pdf Acesso em: 20 de jun. 2019.

WIENS, Rachel. **Ligas Ferrosas**. Universidade Federal do Paraná. 2013. Disponível em: <https://www.ebah.com.br/content/ABAAAgZ1wAH/ligas-ferrosas>. Acesso em: 03 mai. de 2019.

APÊNDICE A

Tabela A1: Massas (em gramas) das esferas de aço-cromo em pH 7, média e desvio padrão

	Aço-Cromo pH 7					
	0h	2h	4h	6h	8h	10h
1	32,6436	32,6391	32,6398	32,6386	32,6354	32,6333
2	32,6440	32,6402	32,6400	32,6386	32,6357	32,6333
3	32,6444	32,6407	32,6408	32,6389	32,6361	32,6334
4	32,6445	32,6410	32,6409	32,6392	32,6362	32,6336
5	32,6450	32,6425	32,6414	32,6399	32,6371	32,6344
6	32,6456	32,6433	32,6418	32,6399	32,6371	32,6347
7	32,6469	32,6439	32,6430	32,6416	32,6389	32,6363
8	32,6471	32,6439	32,6434	32,6419	32,6390	32,6365
9	32,6472	32,6449	32,6436	32,6419	32,6390	32,6370
10	32,6476	32,6449	32,6440	32,6423	32,6393	32,6373
11	32,6478	32,6450	32,6441	32,6426	32,6399	32,6373
12	32,6480	32,6455	32,6444	32,6426	32,6400	32,6374
13	32,6482	32,6457	32,6444	32,6429	32,6402	32,6375
14	32,6491	32,6460	32,6452	32,6435	32,6406	32,6382
15	32,6495	32,6461	32,6461	32,6442	32,6417	32,6392
16	32,6496	32,6467	32,6462	32,6442	32,6422	32,6394
17	32,6499	32,6469	32,6462	32,6448	32,6424	32,6395
18	32,6502	32,6473	32,6464	32,6450	32,6425	32,6402
19	32,6517	32,6475	32,6474	32,6459	32,6429	32,6405
20	32,6520	32,6493	32,6483	32,6463	32,6432	32,6410
21	32,6524	32,6493	32,6485	32,6469	32,6440	32,6417
22	32,6535	32,6509	32,6494	32,6484	32,6442	32,6432
23	32,6542	32,6510	32,6503	32,6488	32,6456	32,6438
24	32,6546	32,6517	32,6509	32,6490	32,6465	32,6439
25	32,6576	32,6537	32,6539	32,6523	32,6496	32,6470
26	32,6586	32,6553	32,6552	32,6531	32,6506	32,6481
27	32,6595	32,6553	32,6559	32,6539	32,6513	32,6484
28	32,6596	32,6553	32,6559	32,6542	32,6514	32,6487
29	32,6598	32,6559	32,6560	32,6545	32,6516	32,6488
30	32,6616	32,6572	32,6581	32,6563	32,6535	32,6509
Média	32,6508	32,6475	32,6471	32,6454	32,6426	32,6402
Desvio padrão	0,0053	0,0051	0,0053	0,0053	0,0053	0,0053

Tabela A2: Massas (em gramas) das esferas de aço-cromo em pH 11, média e desvio padrão

	Aço-Cromo pH 11					
	0h	2h	4h	6h	8h	10h
1	32,6363	32,6352	32,6314	32,6291	32,6261	32,6239
2	32,6379	32,6365	32,6325	32,6301	32,6266	32,6240
3	32,6384	32,6365	32,6334	32,6310	32,6280	32,6251
4	32,6411	32,6388	32,6358	32,6334	32,6307	32,6276
5	32,6414	32,6390	32,6370	32,6339	32,6310	32,6280
6	32,6417	32,6399	32,6370	32,6341	32,6311	32,6280
7	32,6419	32,6399	32,6370	32,6346	32,6312	32,6285
8	32,6425	32,6404	32,6376	32,6350	32,6317	32,6288
9	32,6425	32,6409	32,6377	32,6352	32,6318	32,6288
10	32,6428	32,6410	32,6383	32,6354	32,6322	32,6291
11	32,6433	32,6412	32,6383	32,6354	32,6323	32,6291
12	32,6435	32,6413	32,6384	32,6357	32,6326	32,6301
13	32,6439	32,6415	32,6387	32,6360	32,6328	32,6301
14	32,6441	32,6415	32,6391	32,6362	32,6333	32,6303
15	32,6446	32,6428	32,6400	32,6373	32,6341	32,6313
16	32,6454	32,6429	32,6404	32,6379	32,6349	32,6317
17	32,6455	32,6436	32,6410	32,6382	32,6350	32,6322
18	32,6457	32,6437	32,6410	32,6386	32,6352	32,6323
19	32,6464	32,6438	32,6413	32,6389	32,6356	32,6325
20	32,6468	32,6443	32,6418	32,6393	32,6359	32,6332
21	32,6476	32,6449	32,6420	32,6395	32,6362	32,6333
22	32,6478	32,6456	32,6427	32,6397	32,6369	32,6340
23	32,6480	32,6456	32,6433	32,6409	32,6379	32,6355
24	32,6489	32,6468	32,6442	32,6416	32,6386	32,6356
25	32,6500	32,6480	32,6448	32,6422	32,6389	32,6360
26	32,6501	32,6486	32,6459	32,6434	32,6401	32,6376
27	32,6516	32,6496	32,6469	32,6442	32,6408	32,6384
28	32,6539	32,6511	32,6489	32,6464	32,6435	32,6405
29	32,6602	32,6575	32,6552	32,6524	32,6492	32,6462
30	32,6651	32,6633	32,6605	32,6570	32,6540	32,6515
Média	32,6460	32,6439	32,6411	32,6384	32,6353	32,6324
Desvio padrão	0,0061	0,0059	0,0061	0,0060	0,0060	0,0060

Tabela A3: Massas (em gramas) das esferas de aço carbono em pH 7, média e desvio padrão

	Aço carbono pH7					
	0h	2h	4h	6h	8h	10h
1	32,6116	32,6095	32,6072	32,6059	32,6027	32,6003
2	32,6164	32,6146	32,6123	32,6108	32,6074	32,6052
3	32,6232	32,6211	32,6183	32,6167	32,6130	32,6105
4	32,6233	32,6213	32,6190	32,6167	32,6136	32,6110
5	32,6234	32,6240	32,6195	32,6178	32,6142	32,6127
6	32,6260	32,6279	32,6218	32,6202	32,6174	32,6151
7	32,6262	32,6280	32,6220	32,6203	32,6175	32,6154
8	32,6295	32,6298	32,6253	32,6240	32,6203	32,6184
9	32,6303	32,6306	32,6260	32,6241	32,6209	32,6185
10	32,6319	32,6307	32,6279	32,6265	32,6231	32,6210
11	32,6330	32,6312	32,6290	32,6272	32,6244	32,6216
12	32,6331	32,6312	32,6290	32,6275	32,6246	32,6220
13	32,6335	32,6317	32,6299	32,6275	32,6248	32,6225
14	32,6337	32,6324	32,6304	32,6282	32,6254	32,6230
15	32,6347	32,6340	32,6333	32,6292	32,6265	32,6242
16	32,6373	32,6354	32,6350	32,6319	32,6290	32,6262
17	32,6386	32,6367	32,6351	32,6332	32,6297	32,6278
18	32,6388	32,6368	32,6354	32,6336	32,6304	32,6283
19	32,6389	32,6370	32,6359	32,6344	32,6305	32,6287
20	32,6399	32,6378	32,6362	32,6346	32,6309	32,6290
21	32,6399	32,6381	32,6370	32,6346	32,6317	32,6291
22	32,6409	32,6391	32,6376	32,6349	32,6319	32,6296
23	32,6411	32,6391	32,6380	32,6355	32,6325	32,6299
24	32,6422	32,6399	32,6385	32,6360	32,6333	32,6305
25	32,6432	32,6410	32,6393	32,6371	32,6338	32,6316
26	32,6432	32,6414	32,6394	32,6380	32,6351	32,6330
27	32,6450	32,6430	32,6408	32,6391	32,6355	32,6330
28	32,6480	32,6458	32,6442	32,6423	32,6393	32,6372
29	32,6491	32,6473	32,6455	32,6440	32,6407	32,6393
30	32,6620	32,6597	32,6572	32,6553	32,6523	32,6492
Média	32,6353	32,6339	32,6315	32,6296	32,6264	32,6241
Desvio padrão	0,0103	0,0099	0,0105	0,0104	0,0104	0,0104

Tabela A4: Massas (em gramas) das esferas de aço carbono em pH 11, média e desvio padrão

	Aço carbono pH11					
	0h	2h	4h	6h	8h	10h
1	32,6152	32,6146	32,6128	32,6115	32,6087	32,6070
2	32,6190	32,6184	32,6161	32,6147	32,6117	32,6095
3	32,6203	32,6195	32,6169	32,6153	32,6128	32,6097
4	32,6248	32,6240	32,6218	32,6207	32,6185	32,6163
5	32,6263	32,6259	32,6238	32,6218	32,6196	32,6167
6	32,6281	32,6273	32,6256	32,6240	32,6215	32,6192
7	32,6282	32,6275	32,6257	32,6245	32,6220	32,6192
8	32,6283	32,6281	32,6260	32,6246	32,6222	32,6197
9	32,6286	32,6286	32,6263	32,6248	32,6223	32,6201
10	32,6319	32,6303	32,6284	32,6272	32,6243	32,6212
11	32,6326	32,6319	32,6302	32,6288	32,6269	32,6242
12	32,6343	32,6332	32,6315	32,6300	32,6276	32,6251
13	32,6365	32,6354	32,6332	32,6318	32,6287	32,6260
14	32,6369	32,6355	32,6341	32,6327	32,6304	32,6281
15	32,6403	32,6393	32,6365	32,6346	32,6315	32,6283
16	32,6403	32,6393	32,6369	32,6360	32,6337	32,6316
17	32,6405	32,6398	32,6369	32,6367	32,6345	32,6317
18	32,6415	32,6411	32,6380	32,6377	32,6354	32,6328
19	32,6416	32,6411	32,6385	32,6381	32,6359	32,6337
20	32,6441	32,6427	32,6409	32,6392	32,6364	32,6338
21	32,6472	32,6464	32,6436	32,6425	32,6396	32,6366
22	32,6485	32,6485	32,6462	32,6448	32,6423	32,6400
23	32,6509	32,6498	32,6477	32,6464	32,6445	32,6415
24	32,6519	32,6502	32,6483	32,6467	32,6445	32,6416
25	32,6523	32,6517	32,6493	32,6477	32,6457	32,6428
26	32,6530	32,6518	32,6500	32,6483	32,6460	32,6435
27	32,6560	32,6525	32,6501	32,6487	32,6460	32,6436
28	32,6560	32,6551	32,6531	32,6520	32,6499	32,6477
29	32,6634	32,6627	32,6598	32,6577	32,6549	32,6511
30	32,6641	32,6628	32,6599	32,6584	32,6557	32,6531
Média	32,6394	32,6385	32,6363	32,6349	32,6325	32,6299
Desvio padrão	0,0131	0,0128	0,0127	0,0127	0,0127	0,0126

Tabela A5. Média das massas (gramas) de cada moagem realizada e coeficiente angular da regressão linear gramas por hora

Meio	Metal	Horas						Coeficiente angular
		0	2	4	6	8	10	
pH 7	Aço carbono	32,6353	32,6339	32,6315	32,6296	32,6264	32,6241	-0,00114
	Aço-cromo	32,6508	32,6475	32,6471	32,6454	32,6426	32,6402	-0,00099
pH11	Aço carbono	32,6394	32,6385	32,6363	32,6349	32,6325	32,6298	-0,00096
	Aço-cromo	32,6460	32,6439	32,6411	32,6384	32,6353	32,6324	-0,00137

Tabela A6. Variação das massas (gramas) das esferas de aço-cromo pH 7, média e desvio padrão

Aço-Cromo pH 7		
Massa inicial	Massa final	Desgaste
32,6436	32,6333	0,0103
32,6440	32,6333	0,0107
32,6444	32,6334	0,0110
32,6445	32,6336	0,0109
32,6450	32,6344	0,0106
32,6456	32,6347	0,0109
32,6469	32,6363	0,0106
32,6471	32,6365	0,0106
32,6472	32,6370	0,0102
32,6476	32,6373	0,0103
32,6478	32,6373	0,0105
32,6480	32,6374	0,0106
32,6482	32,6375	0,0107
32,6491	32,6382	0,0109
32,6495	32,6392	0,0103
32,6496	32,6394	0,0102
32,6499	32,6395	0,0104
32,6502	32,6402	0,0100
32,6517	32,6405	0,0112
32,6520	32,6410	0,0110
32,6524	32,6417	0,0107
32,6535	32,6432	0,0103
32,6542	32,6438	0,0104
32,6546	32,6439	0,0107
32,6576	32,6470	0,0106
32,6586	32,6481	0,0105
32,6595	32,6484	0,0111
32,6596	32,6487	0,0109
32,6598	32,6488	0,0110
32,6616	32,6509	0,0107
	Média	0,0106
	Desvio padrão	0,0003

Tabela A7. Variação das massas (gramas) das esferas de aço-cromo pH 11, média e desvio padrão

Aço-Cromo pH 11		
Massa inicial	Massa final	Desgaste
32,6363	32,6239	0,0124
32,6379	32,6240	0,0139
32,6384	32,6251	0,0133
32,6411	32,6276	0,0135
32,6414	32,6280	0,0134
32,6417	32,6280	0,0137
32,6419	32,6285	0,0134
32,6425	32,6288	0,0137
32,6425	32,6288	0,0137
32,6428	32,6291	0,0137
32,6433	32,6291	0,0142
32,6435	32,6301	0,0134
32,6439	32,6301	0,0138
32,6441	32,6303	0,0138
32,6446	32,6313	0,0133
32,6454	32,6317	0,0137
32,6455	32,6322	0,0133
32,6457	32,6323	0,0134
32,6464	32,6325	0,0139
32,6468	32,6332	0,0136
32,6476	32,6333	0,0143
32,6478	32,6340	0,0138
32,6480	32,6355	0,0125
32,6489	32,6356	0,0133
32,6500	32,6360	0,0140
32,6501	32,6376	0,0125
32,6516	32,6384	0,0132
32,6539	32,6405	0,0134
32,6602	32,6462	0,0140
32,6651	32,6515	0,0136
	Média	0,0135
	Desvio padrão	0,0005

Tabela A8. Variação das massas das esferas de aço carbono pH 7, média e desvio padrão

Aço carbono pH 7		
Massa inicial	Massa final	desgaste
32,6116	32,6003	0,0113
32,6164	32,6052	0,0112
32,6232	32,6105	0,0127
32,6233	32,6110	0,0123
32,6234	32,6127	0,0107
32,6260	32,6151	0,0109
32,6262	32,6154	0,0108
32,6295	32,6184	0,0111
32,6303	32,6185	0,0118
32,6319	32,6210	0,0109
32,6330	32,6216	0,0114
32,6331	32,6220	0,0111
32,6335	32,6225	0,0110
32,6337	32,6230	0,0107
32,6347	32,6242	0,0105
32,6373	32,6262	0,0111
32,6386	32,6278	0,0108
32,6388	32,6283	0,0105
32,6389	32,6287	0,0102
32,6399	32,6290	0,0109
32,6399	32,6291	0,0108
32,6409	32,6296	0,0113
32,6411	32,6299	0,0112
32,6422	32,6305	0,0117
32,6432	32,6316	0,0116
32,6432	32,6330	0,0102
32,6450	32,6330	0,0120
32,6480	32,6372	0,0108
32,6491	32,6393	0,0098
32,6620	32,6492	0,0128
	Média	0,0111
	Desvio padrão	0,0007

Tabela A9. Variação das massas das esferas de aço carbono pH 11, média e desvio padrão

Aço carbono pH11		
Massa inicial	Massa final	Desgaste
32,6152	32,6070	0,0082
32,6190	32,6095	0,0095
32,6203	32,6097	0,0106
32,6248	32,6163	0,0085
32,6263	32,6167	0,0096
32,6281	32,6192	0,0089
32,6282	32,6192	0,0090
32,6283	32,6197	0,0086
32,6286	32,6201	0,0085
32,6319	32,6212	0,0107
32,6326	32,6242	0,0084
32,6343	32,6251	0,0092
32,6365	32,6260	0,0105
32,6369	32,6281	0,0088
32,6403	32,6283	0,0120
32,6403	32,6316	0,0087
32,6405	32,6317	0,0088
32,6415	32,6328	0,0087
32,6416	32,6337	0,0079
32,6441	32,6338	0,0103
32,6472	32,6366	0,0106
32,6485	32,6400	0,0085
32,6509	32,6415	0,0094
32,6519	32,6416	0,0103
32,6523	32,6428	0,0095
32,6530	32,6435	0,0095
32,6560	32,6436	0,0124
32,6560	32,6477	0,0083
32,6634	32,6511	0,0123
32,6641	32,6531	0,0110
	Média	0,0096
	Desvio padrão	0,0012