



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



**Determinação da abrasividade do minério jaspilito,
via ensaio Miller, conforme norma ASTM G75,
variando o pH da polpa**

VÍTOR FRAGA DE OLIVEIRA

Ouro Preto, fevereiro de 2024

VÍTOR FRAGA DE OLIVEIRA

vitor.fraga@aluno.ufop.edu.br

**Determinação da abrasividade do minério jaspilítico, via ensaio Miller,
conforme norma ASTM G75, variando o pH da polpa**

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

Orientador: Prof.^a Dr.^a Maria Aparecida Pinto

Coorientador: Leandro Moreira Pinto

Ouro Preto, fevereiro de 2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

O48d Oliveira, Vitor Fraga de.
Determinação da abrasividade do minério jaspilite, via ensaio Miller, conforme norma ASTM G75, variando o pH da polpa. [manuscrito] / Vitor Fraga de Oliveira. - 2024.
32 f.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Aparecida Pinto.

Coorientador: Leandro Moreira Pinto.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Abrasivos. 2. Minérios de ferro. 3. Desgaste mecânico - Corpos moedores. I. Pinto, Maria Aparecida. II. Pinto, Leandro Moreira. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 669.01

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Vitor Fraga de Oliveira

Determinação da abrasividade do minério jaspilito, via ensaio Miller, conforme norma ASTM G75, variando o pH da polpa

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

Aprovada em 22 de Fevereiro de 2024

Membros da banca

Dr.^a Maria Aparecida Pinto - Orientadora - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto
Engenheiro Leandro Moreira Pinto - Coorientador - Instituto Tecnológico Vale
Dr. Daniel Fraga Pinto - Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Ouro Preto
Dr.^a Nayara Aparecida Neres da Silva - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto

Maria Aparecida Pinto, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 25/03/2024



Documento assinado eletronicamente por **Maria Aparecida Pinto, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 30/03/2024, às 11:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0693131** e o código CRC **0EFE1106**.

Dedico essa etapa vencida a minha família por todo apoio, especialmente minha querida mãe.

Dedico também a minha amada companheira, Élide, por todo suporte e fazer parte desse sonho.

Por último, dedico também a gloriosa República Quinta Negra, meu lar em Ouro Preto que fez parte do meu crescimento pessoal e profissional ao lado de pessoas incríveis.

AGRADECIMENTOS

A toda minha família, principalmente minha mãe Raquel Cristina Fraga, por todo apoio, suporte e dedicação ao seu filho. Uma mulher guerreira e batalhadora que tem que ser enaltecida por toda a minha caminhada e objetivos alcançados ao longo dessa vida.

A minha namorada Élide, por todo o suporte físico e mental, por ser minha mais fiel amiga e confidente e quem possibilitou buscar aprender mais sobre mim mesmo.

À minha orientadora Maria Aparecida, pelo incentivo, orientação e paciência nessa reta final de curso.

Aos professores do DEMET, por todo ensino de qualidade provido e por me capacitar e preparar não só para o mercado profissional, mas também para o mundo.

Ao ITV pela oportunidade de aprendizado, experiência de convivência e apoio financeiro.

À República Quinta Negra, que foi meu único lar, me acolheu desde minha chegada e proporcionou momentos incríveis. Foi o lugar que me proveu paz, lazer, estudos, amizades e parcerias ao longo desses 5 anos de graduação. Também agradeço as Repúblicas Koxixo, Exílio, MMs e Senzala, por toda amizade e companheirismo ao longo desses anos.

Aos meus amigos de curso, que me ajudaram nessa árdua caminhada: Ana Laura, Arlindo, Barbacena, Corega, Geovane, Lucas Neto, Faustão, Marcelinho e Pé de pano.

Por fim, a todos que de forma direta ou indireta contribuíram com o meu crescimento.

RESUMO

O ensaio Miller, padronizado pela norma ASTM G75, foi desenvolvido para quantificar a abrasividade de polpas minerais, sendo destacado pela sua praticidade e reprodutibilidade. Neste trabalho, a abrasividade do minério jaspilite foi avaliada para diferentes valores de pH da polpa. Os ensaios foram realizados para os valores de pH da polpa não ajustado, pH=8 e com adição de 3,5% de NaCl na polpa. O ensaio permitiu calcular o Número de Miller (MN) referente ao minério, possibilitando mensurar a perda por desgaste abrasivo a partir da abrasividade gerada pela polpa. Os resultados permitiram quantificar o impacto da alteração nos valores de pH na taxa de desgaste abrasivo. Verificou-se que há uma influência significativa do pH da polpa no desgaste dos corpos de prova, resultando em um menor Número de Miller, que corresponde a uma menor abrasividade da polpa, para maior valor de pH.

Palavras-Chave: Abrasividade. Ensaio Miller. Minério de ferro. Corpos moedores.

ABSTRACT

The Miller test, standardized by the ASTM G75 standard, was developed to quantify the abrasiveness of mineral slurries, and is highlighted by its practicality and reproducibility. In this work, the abrasiveness of jaspilite ore was evaluated for different pH values of the slurry. The tests were carried out for unadjusted slurry pH values, pH=8 and with the addition of 3.5% NaCl to the slurry. The test made it possible to calculate the Miller Number (MN) for the ore, making it possible to measure the loss due to abrasive wear based on the abrasiveness generated by the slurry. The results made it possible to quantify the impact of changes in pH values on the abrasive wear rate. It was found that there is a significant influence of the pH of the slurry on the wear of the test specimens, resulting in a lower Miller Number, which corresponds to a lower abrasiveness of the slurry, for a higher pH value.

Keywords: Abrasiveness. Miller Test. Iron ore. Grinding ball.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3. 1 – Ensaio de riscamento com indentador Rockwell e carga de 60N mostrando a influência do veio de quartzo	15
Figura 3. 2 - Ensaio de riscamento com indentador Rockwell e carga de 28N, mostrando o veio de quartzo e sua influência. Transição entre sulcamento e trincamento fora da trilha no veio de hematita e trincamento fora da trilha no quartzo.	15
Figura 3. 3 -Dimensões do bloco de desgaste/amostra de desgaste.....	19
Figura 3. 4 - Desenho esquemático da máquina Miller	20
Figura 5. 1 - Perda de Massa acumulada (mg) versus tempo (h) para o CP 1 para pH normal da polpa	27
Figura 5. 2 - Cálculo do Número de Miller, CP 1, pH normal da polpa	27
Figura 5. 3 - Perda de Massa acumulada versus tempo para o CP 5, pH 8 da polpa	28
Figura 5. 4 - Perda de Massa acumulada versus tempo para o CP 9, polpa com 3,5% de NaCl	28
Figura 5. 5 - Cálculo do Número de Miller, CP 5, pH 8 da polpa	29
Figura 5. 6 - Cálculo do Número de Miller, CP 9, polpa com 3,5% de NaCl.....	29
Figura 5. 7 - Número de Miller para as três condições de ensaio	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1 - Cálculo do desgaste de bolas de aço com concentrado AS em pH 8,5	17
Tabela 3. 2 - Resultados: taxas médias de desgaste obtidas (mm/h) para pH 8,518	
Tabela 3. 3 - Condições experimentais	18
Tabela 3. 4 - Taxas médias de desgaste obtidas (mm/h) para pH 10,5 - efeito da abrasão	18
Tabela 5. 1 - Perda de Massa Acumulada em mg para pH da polpa não ajustado	26
Tabela 5. 2 - Perda de Massa Acumulada (mg) para pH = 8.....	27
Tabela 5. 3 -Perda de Massa Acumulada (mg) para 3,5% de NaCl na polpa.....	28

LISTA DE SIGLAS

AS	Alta sílica
ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	Baixa sílica
DEMET	Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
FFB	Formação Ferrífera Bandada
FFBAC	Ferro fundido branco de alto cromo
MN	Número de Miller
SAR	Índice de Resposta Abrasiva

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS.....	13
2.1 Objetivo Geral	13
2.2 Objetivos Específicos.....	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1 Minério de Ferro.....	14
3.2 Abrasividade	16
3.3 Impacto do pH na Abrasividade	16
3.4 Ensaio Miller	19
4 MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1 Material Abrasivo	23
4.2 Ensaio Miller	23
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
6 CONCLUSÃO	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

1 INTRODUÇÃO

A indústria mínero-metalúrgica é responsável pelo fornecimento de matérias-primas essenciais para diversos ramos da economia global. Vários setores são altamente dependentes dessa atividade. Entre os recursos essenciais que ela fornece incluem-se minerais, metais preciosos e recursos fósseis (Siqueira, 2018).

Os procedimentos associados ao uso de matérias-primas, desde a extração até a obtenção do produto, representam um processo complexo e dispendioso. Durante esses processos, é fundamental exercer extrema cautela e implementar um gerenciamento adequado a fim de prevenir contratemplos. Qualquer falha dentro da cadeia produtiva resultará em atrasos na produção, o que normalmente acarreta um aumento nos custos finais de fabricação. Portanto, para evitar eventuais contratemplos e falhas, é essencial manter padrões elevados de engenharia e realizar manutenção de alta qualidade (Siqueira, 2018).

Em sua tese, Siqueira (2018) afirma que é de suma importância realizar a investigação sobre o desgaste abrasivo na indústria mínero-metalúrgica. A definição comumente aceita para desgaste é a perda de massa de uma superfície devido ao movimento relativo desta superfície e um corpo com a qual esteja em contato. Existem diferentes mecanismos de desgaste de materiais. Estes podem ser agrupados de acordo com a aplicação e/ou o tipo do sistema tribológico (Siqueira, 2018).

Abrasão pode ser entendida como um tipo de desgaste no qual pequenas partículas de materiais relativamente mais “duros” penetram materiais mais “macios” sob tensão. Em materiais dúcteis isso leva ao processo de formação de microsulcos e microcortes na superfície do material mais macio. Em materiais mais rígidos isso conduz à formação de microtrincas (Siqueira, 2018).

Ainda segundo Siqueira (2018, p.14),

“No entanto, a literatura especializada ainda não possui um conjunto confiável de informações sobre abrasividade obtidas usando o método proposto por Miller. Essa abordagem pode ser empregada para ajudar no desenvolvimento de projetos relacionados ao transporte de polpas e lamas na indústria mineral, contribuindo, assim, para a otimização desse processo. Adicionalmente, reunindo um conjunto de dados sobre a

abrasividade de polpas e lamas minerais, é possível explorar a relação entre as propriedades da lama transportada e sua abrasividade, economizando tempo e evitando possíveis falhas que poderiam prejudicar tanto a eficiência produtiva quanto o meio ambiente.”

Dessa forma, para auxiliar o estudo desse projeto recorreu-se ao Ensaio Miller, padronizado pela norma ASTM G75 (2001), o ensaio é utilizado para avaliar a abrasividade de polpas de minério e a resistência à abrasão de amostras de materiais para uma determinada polpa. O ensaio pode ser executado de duas formas, com um bloco padrão ou com uma polpa padrão. Amostra padrão determinam a abrasividade da polpa (Número de Miller), enquanto a polpa padrão determina a resistência à abrasão de um material ou de um revestimento (Número SAR) (ASTM G75, 2001).

Este estudo tem como objetivo mensurar a abrasividade do minério jaspilite, que contém quantidade expressiva de quartzo em sua composição, variando o pH da polpa, a partir de ensaios realizados na Máquina Miller. O Ensaio Miller será a ferramenta de avaliação deste estudo, destacando sua grande praticidade e reprodutibilidade.

2 OBJETIVOS

Para a realização deste trabalho foram determinados os seguintes objetivos:

2.1 Objetivo Geral

Analisar a abrasividade do minério jaspilito para diferentes valores de pH da polpa.

2.2 Objetivos Específicos

Realizar o Ensaio Miller para diferentes valores de pH da polpa de jaspilito em água destilada, a fim de quantificar a abrasividade do material de estudo, para as seguintes situações:

- pH não ajustado da polpa (pH variando de 5,5 a 6,0);
- pH 8 da polpa;
- e polpa com adição de 3,5% de NaCl.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção tem por objetivo a apresentação de temas fundamentais que abrangem o minério de ferro, sua abrasividade e o Ensaio Miller para realização deste trabalho.

3.1 Minério de Ferro

O ferro é o quarto elemento mais comum na crosta terrestre e está presente em diversas classes minerais, entretanto, só é economicamente viável sua extração a partir de seus óxidos. Os principais produtores mundiais de minérios de ferro são Austrália, Brasil e China, os dois primeiros focados principalmente no fornecimento para o mercado internacional e a China produz, principalmente, para o abastecimento da indústria siderúrgica local (Carvalho *et al.*, 2014).

As reservas mundiais de minério de ferro são da ordem de 170 bilhões de toneladas. O Brasil, é o segundo maior produtor e detém 19,8% dessas reservas, com teor médio de 46,2% de ferro. As principais reservas nacionais e respectivas regiões produtoras estão localizadas nos Estados de Minas Gerais (Quadrilátero Ferrífero), Pará (Província Mineral de Carajás) e Mato Grosso do Sul (Distrito de Urucum). A Província Mineral de Carajás hospeda a maior reserva mundial de minério de ferro, estimada em 17,68Gt, com teor médio de 53,5% de ferro (Vale, 2018).

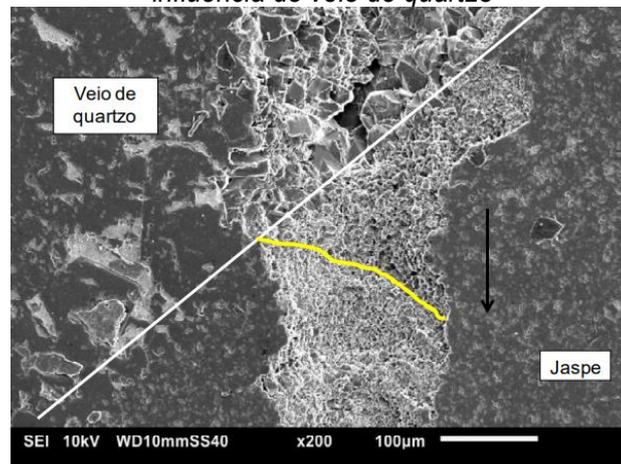
As Formações Ferríferas Bandadas (FFB) são caracterizadas por uma estrutura bandada, constituída por bandas em que predominam minerais silicatados (quartzo) intercaladas com bandas compostas por minerais de ferro, com teores entre 24% e 35% de ferro (James, 1954; James e Trendall, 1982).

O esgotamento de minérios de alto teor tem tornado as FFB importantes alvos para a exploração e o processamento mineral, visando o seu aproveitamento econômico. As FFB requerem processos de fragmentação para adequação granulométrica e, em alguns casos, processos de concentração para obtenção do teor de ferro adequado. Devido as FFB necessitarem de diferentes etapas de fragmentação para adequação do produto, aumenta-se o consumo de energia nessas etapas (Norgate e Jahanshahi, 2011; Hesse, Popov e Lieberwirth, 2017; Rodrigues *et al.*, 2021). Além disso, segundo Teixeira *et al.* (2000), nas operações

de fragmentação, as interações com os minérios causam um desgaste significativo na superfície dos materiais de revestimento dos equipamentos e dos materiais necessários para a fragmentação.

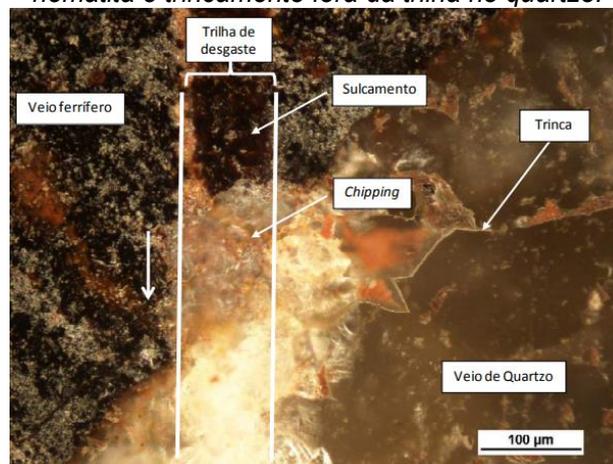
Em ensaios de riscamento realizados com indentadores Vickers e Rockwell, buscando respostas tribológicas para diferentes minérios de ferro, Magnol (2018) obteve resultados para os minérios: hematita, goethita e jaspilito, todos contendo veios de quartzo. O quartzo influenciou na resposta tribológica dos minerais que o tangenciam, tendendo a fragilizá-los, como pode ser observado na Figura 3.1 para o jaspilito e na Figura 3.2 para a hematita.

Figura 3. 1 – Ensaio de riscamento com indentador Rockwell e carga de 60N mostrando a influência do veio de quartzo



Fonte: (Magnol, 2018)

Figura 3. 2 - Ensaio de riscamento com indentador Rockwell e carga de 28N, mostrando o veio de quartzo e sua influência. Transição entre sulcamento e trincamento fora da trilha no veio de hematita e trincamento fora da trilha no quartzo.



Fonte: (Magnol, 2018)

Os resultados obtidos por Magnol (2018) ajudam a entender como o empobrecimento do minério de ferro, tendo aumento nos percentuais das frações de quartzo, impactam no desgaste dos materiais. Tendo em vista que o aumento da porcentagem de sílica nos minérios, como é o caso do jaspilite, corresponde ao aumento dos mecanismos de desgaste, que são sustentados nesse trabalho.

3.2 Abrasividade

Abrasão é o tipo de desgaste no qual pequenas partículas de materiais relativamente mais “duros” penetram materiais mais macios sob tensão. Em materiais dúcteis isso leva ao processo de formação de microdeformações e microcortes na superfície do material mais macio. Em materiais mais rígidos isso conduz à formação de microtrincas (Siqueira, 2018).

A quantidade de desgaste de uma dada superfície é dependente do tribossistema considerado. Um tribossistema consiste em quatro principais elementos: as duas superfícies em contato, o meio entre as superfícies em contato e um meio que circunda todo o sistema tribológico (ASTM G75, 2001).

Para gerar abrasão, os triboelementos, isto é, as duas superfícies em contato, devem estar em movimento relativo. O desgaste abrasivo é dependente da cinética e da angulosidade das partículas entre as superfícies em contato. Neste processo, o papel desempenhado pelas partículas abrasivas entre as superfícies em contato é crucial na determinação do desgaste abrasivo ocorrido (Siqueira, 2018).

Para quantificar a abrasividade da polpa, pode ser utilizado o ensaio de abrasividade. De acordo com Siqueira (2018), o método de Miller destaca-se devido à sua produtividade e praticidade.

3.3 Impacto do pH na Abrasividade

Em testes realizados por Roveri e Chaves (2010) foram ensaiados dois concentrados de minério de ferro de diferentes teores de sílica, usando bolas

marcadas, variando a composição do material das bolas e o pH da polpa de moagem.

Ainda segundo Roveri e Chaves (2010)

“Este trabalho mediu o desgaste ocorrido em um moinho de bancada, usando bolas de aço e bolas de ferro fundido branco de alto cromo (FFBAC) e dois tipos de concentrado de ferro, tipo pellet feed, originários de Minas Gerais, sendo o primeiro denominado de Baixa Sílica (BS) e o outro, de Alta Sílica (AS), respectivamente, contendo em torno de 1,8% e 6% SiO₂”.

Para a realização do ensaio, foram utilizadas bolas marcadas. Para completar a carga do moinho, foram utilizadas bolas não-marcadas, denominadas bolas de enchimento. Foram utilizadas 15 bolas marcadas de aço e 15 de ferro fundido. Após a pesagem de cada lote de bolas, foi completada a massa de carga moedora. Registra-se que foi necessário determinar as massas com duas casas decimais para conferir precisão às medidas de desgaste (Roveri e Chaves, 2010).

A Tabela 3.1 exemplifica o cálculo da taxa de desgaste:

Tabela 3. 1 - Cálculo do desgaste de bolas de aço com concentrado AS em pH 8,5

Bola nº	Alimentação massa (g)	Ø equiv. (mm)	Bola nº	Pesagem 8 h massa (g)	Ø equiv. (mm)	Desgaste (mm)
1	117,84	30,61	1	117,58	30,58	0,023
2	118,03	30,62	2	117,75	30,60	0,024
3	118,05	30,62	3	117,86	30,61	0,016
4	118,22	30,64	4	117,94	30,61	0,024
5	118,26	30,64	5	117,97	30,62	0,025
6	118,54	30,67	6	118,26	30,64	0,024
7	118,96	30,70	7	118,68	30,68	0,024
8	119,07	30,71	8	118,77	30,69	0,026
9	119,08	30,71	9	118,81	30,69	0,023
10	119,27	30,73	10	118,85	30,69	0,036
11	119,27	30,73	11	118,97	30,70	0,026
12	119,28	30,73	12	118,98	30,70	0,026
13	119,45	30,74	13	119,14	30,72	0,027
14	119,76	30,77	14	119,40	30,74	0,031
15	122,22	30,98	15	121,99	30,96	0,019
média	119,02	30,71	média	118,73	30,68	0,025
desvio	1,07	0,09	desvio	1,06	0,09	0,004
Ø equiv. médio (mm)		30,71	Ø equiv. médio (mm)		30,68	
			TD média (µm/h)		3,12	

Fonte: (Roveri e Chaves 2010)

A Tabela 3.2 apresenta, como resultados, as taxas médias de desgaste obtidas para os concentrados de baixa e alta sílica e pH 8,5.

Tabela 3. 2 - Resultados: taxas médias de desgaste obtidas (mm/h) para pH 8,5

Taxa média de desgaste	Bola de aço	Bola de ferro fundido
Concentrado BS	2,85	1,06
Concentrado AS	3,12	1,10

Fonte: (Roveri e Chaves, 2010)

Após isso, foram realizados quatro ensaios com pH 10,5, para avaliar o impacto da alteração do pH da polpa no desgaste. Nessa etapa, foi utilizado hidróxido de sódio, em escamas, com 70% de alcalinidade, aumentando o pH de 8,5 para 10,5. A programação dos ensaios é mostrada na Tabela 3.3 e na Tabela 3.4 são apresentados, como resultados, as taxas médias de desgaste obtidas.

Tabela 3. 3 - Condições experimentais

Ensaio	Material	Concentrado	pH
5	aço	BS	10,5
6	FFBAC	BS	10,5
7	aço	AS	10,5
8	FFBAC	AS	10,5

Fonte: (Roveri e Chaves, 2010)

Tabela 3. 4 - Taxas médias de desgaste obtidas (mm/h) para pH 10,5 - efeito da abrasão

Taxa média de desgaste	Bola de aço	Bola de ferro fundido
Concentrado BS	2,52	0,99
Concentrado AS	2,99	1,04

Fonte: (Roveri e Chaves, 2010)

Fica evidenciado que, para a mesma bola e mesmo tipo de concentrado, quando se eleva o pH para 10,5 obtém-se a maior variação para a bola de aço, com decréscimo de 11,70% na taxa de desgaste. Também se verifica uma diminuição na taxa de desgaste para a bola FFBAC, de 6,70% na taxa de desgaste (Roveri e Chaves, 2010).

A partir desses ensaios, Roveri e Chaves (2010) conseguiram fundamentar que, variando o pH, obtém-se diminuição da taxa de desgaste, em especial para bolas de aço (Roveri e Chaves, 2010).

3.4 Ensaio Miller

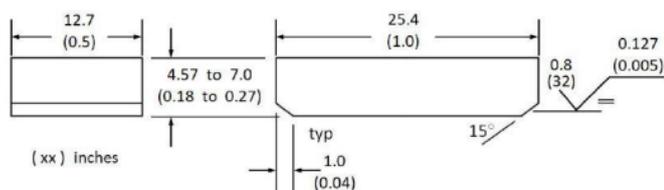
Para comparar as diferentes taxas de desgaste dos materiais, determinados indicadores são utilizados. Os mais importantes indicadores utilizados na indústria mineral são o número de Miller (NM) e o índice de resposta abrasiva (SAR) (Siqueira, 2018).

O ensaio Miller foi padronizado a partir da norma ASTM G75, o ensaio é utilizado para avaliar a abrasividade de polpas e também para avaliar a resistência à abrasão de amostras de materiais para uma polpa específica. O ensaio pode ser executado de duas maneiras, com uma amostra padrão ou com uma polpa. Amostras padrão determinam a abrasividade da polpa (Número de Miller), enquanto a polpa padrão determina a resistência à abrasão de um material ou de um revestimento (Número SAR) (ASTM G75, 2001).

A abrasividade relativa de uma polpa, tanto para o Número de Miller quanto para o Número SAR, é determinada usando-se a medida da perda de massa de um bloco de desgaste de ferro fundido-27% cromo com formato padrão (Número Miller), em que a polpa é a amostra (ASTM G75, 2001).

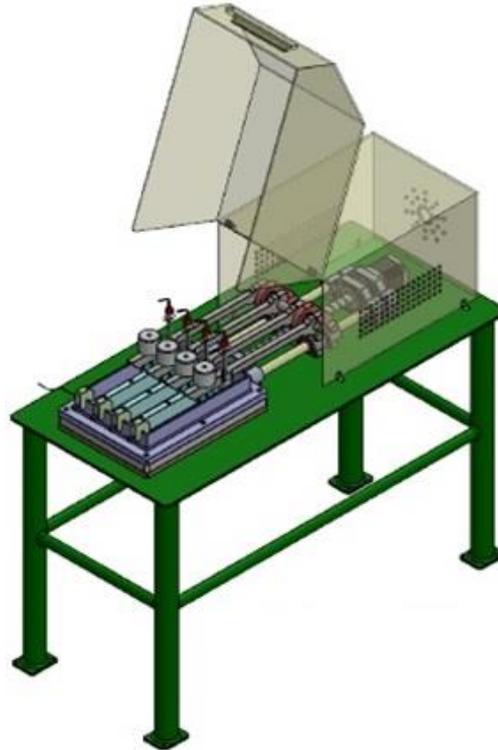
A amostra padrão (Figura 3.3) acoplada a um braço acionado, com movimento linear alternado de vai e vem, desloca dentro de uma calha contendo a polpa do minério. O fundo da calha é equipado com uma peça de Neoprene que atua como um colo. Uma força é aplicada à amostra padrão. Em uma das extremidades da calha, a amostra padrão é levantada do colo pela ação de um came por tempo suficiente para permitir que o material da polpa fresca flua sob a amostra padrão (ASTM G75, 2001). A Figura 3.4 apresenta um desenho esquemático da máquina Miller.

Figura 3. 3 -Dimensões do bloco de desgaste/amostra de desgaste



Fonte: (ASTM G75, 2001)

Figura 3. 4 - Desenho esquemático da máquina Miller



Fonte: Equipe Tribologia ITV

O Número de Miller é calculado a partir da curva de perda de massa acumulada, em função do tempo, obtida com a realização de vários ensaios sucessivos e cumulativos. O Número SAR é uma medida da resposta à abrasão relativa de qualquer material em qualquer polpa, em que se relacionam taxa de perda de massa de uma amostra, a partir da curva de perda de massa acumulada com o tempo, obtida segundo o mesmo procedimento para determinação do Número de Miller. A evolução do desgaste é registrada acumulando-se a perda de massa em intervalos regulares durante o ensaio (Assis, 2013).

A metodologia para o cálculo para o Número de Miller foi apresentada por Miller (1973) e é apresentada a seguir, conforme descrito na Norma ASTM G75 (2001).

A equação matemática básica para um ajuste da curva dos dados de perda de massa acumulada, em função do tempo é apresentada na Equação 3.1.

$$M = A \cdot t^B \quad (3.1)$$

em que:

M = perda de massa acumulada (mg),
 A = primeiro coeficiente de ajuste da curva,
 B = segundo coeficiente de ajuste da curva e
 t = tempo, h

Usando o método dos mínimos quadrados, os valores de A e B são calculados para a curva de ajuste que mais se aproxima da curva de dados do ensaio.

O número de Miller e o número SAR são descritos como índices relacionados à taxa na qual o bloco de desgaste ou amostra de desgaste perde massa para um tempo de ensaio de 2h, o que pode ser calculado usando a derivada primeira da Equação 7.1 para o tempo de ensaio de 2h, conforme Equação 7.2 (inclinação da linha tangente à curva para 2 horas):

$$M_{(mg/h)} = A \cdot B \cdot t^{(B-1)} \quad (3.2)$$

O Número de Miller (NM) é, então, calculado multiplicando a Equação 2 pelo fator de escala 18,18h/mg, conforme Equação 7.3.

$$NM = 18,18 \cdot A \cdot B \cdot t^{(B-1)} \quad (3.3)$$

É desejável ter um número inteiro significativo para que a expressão dos efeitos de corrosão-abrasão seja usada para que os resultados do Número Miller sejam: igual a 1 para enxofre e igual a 1000 para coríndon. Qualquer método aceitável de ajuste de curva pode ser usado para calcular os resultados A e B a partir dos dados de perda de massa.

O número SAR é obtido simplesmente pela multiplicação do valor do número de Miller pela razão entre a densidade do material do bloco de desgaste padrão (7,58) e a densidade do material da amostra de desgaste e pelo fator de escala igual a 18,18h/mg, conforme Equação 7.4, sendo ρ a densidade.

$$\text{Número SAR} = NM \cdot 18,18 \cdot \left(\frac{\rho_{\text{Ferro-27\%cromo}}}{\rho_{\text{amostra de teste}}} \right) \quad (3.4)$$

A escala adotada para o Número de Miller estabelece o valor mínimo igual a 1 para uma mistura “não abrasiva” composta de 50% de enxofre em água (dureza Mohs=1); o limite superior igual a 1000 é estabelecido para uma mistura muito abrasiva de Coríndon (220 mesh, 50% em peso em água, dureza Mohs=9). Números de Miller maiores que 50 indicam que a polpa é abrasiva requerendo, portanto, cuidados adequados no projeto de equipamentos e tubulações.

A precisão deste método de ensaio para determinar o número de Miller ou o número SAR foi demonstrada em um teste interlaboratorial e os resultados obtidos mostram que um coeficiente de variação (COF) de 5,8% foi obtido para o número de Miller e de 11,8% para o número SAR (ASTM G75, 2001).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os materiais e os respectivos métodos utilizados para se obter os dados quantitativos de abrasividade a partir do Ensaio Miller.

4.1 Material Abrasivo

Foi utilizado o minério jaspilito para os ensaios na Máquina Miller preparado no ITV. Esse minério foi preparado e inicialmente utilizado no trabalho de Nins *et al.* (2022) no estudo sobre abrasividade de minérios em correias transportadoras. O minério foi homogeneizado, quarteado e, em seguida, foi secado, britado e agrupados em duas classes de tamanho: fino (0,15mm-0,30mm), semelhante à areia de teste AFS 50/70, e grosso (0,30mm-0,60mm). A fração utilizada nesse trabalho foi a grossa.

A polpa abrasiva do minério foi submetida a ensaios considerando o pH da polpa não ajustado (pH variando de 5,5 a 6,0), polpa com pH=8 e polpa com adição de 3,5% de NaCl com o objetivo de avaliar o impacto do pH da polpa nos valores obtidos no Número de Miller.

4.2 Ensaio Miller

Os Ensaio Miller foram realizados em duplicada seguindo a norma ASTM G75 (2001), foram utilizados corpos de prova padrão (ferro fundido com 27% de cromo) para análise da abrasividade do minério jaspilito.

O equipamento utilizado foi a máquina de ensaios Miller do Laboratório de Fundição do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET) da Escola de Minas (EM) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) é constituída de uma caixa com quatro calhas. Em cada calha há um braço, no qual é fixado o suporte da amostra padrão (Figura 3.3), que é carregada com um peso de modo que a força total descendente na face da amostra padrão é de 22,24N.

O mecanismo de acionamento do braço fornece um movimento harmônico alternado horizontal com 203,2mm de curso. O acionamento é feito utilizando-se um atuador linear e motor de passo, que permite que o sistema seja controlado por

um microcontrolador garantindo estabilidade e precisão durante os ensaios, além de possibilitar o acompanhamento, em tempo real, de parâmetros de ensaio e o armazenamento de dados via computador.

Na Figura 4.1 é mostrada uma foto da máquina de ensaios Miller do Laboratório de Fundição do DEMET/EM/UFOP, desenvolvida dentro do projeto Comportamento Tribocorrosivo de Materiais em Polpas de Minério de Ferro em parceria com o Instituto Tecnológico Vale – ITV.

Figura 4.1 - Máquina de ensaios Miller do Laboratório de Fundição



Fonte: Equipe Tribologia ITV

Cada ensaio ocorre em três ciclos de 2 horas e, ao fim de cada ciclo, os corpos de prova, em número de quatro por ensaio, são retirados da máquina para serem limpos em banho de ultrassom e secadas para pesagem. A pesagem, executada em balança analítica, com resolução de 0,001g, a cada intervalo de 2 horas tem como objetivo obter valores de perda de massa, realizando a subtração da massa inicial (antes do ensaio) de cada amostra e após a realização de cada etapa do ensaio. Ao concluir o processo, é possível calcular os números de Miller (NM), podendo, assim, calcular a abrasividade da polpa do minério analisado.

Os valores obtidos permitem determinar a abrasividade do minério, possibilitando a previsibilidade do desgaste de materiais com os quais os minérios são submetidos à interação direta.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fim de determinar o impacto do pH na abrasividade da polpa do minério jaspilítico, o Ensaio Miller realizado nas seguintes configurações: pH da polpa não ajustado, pH 8 e com adição de 3,5% de NaCl à polpa.

A partir dessas condições, os cálculos do Número de Miller foram realizados com o auxílio do Excel e são apresentados na Tabela 5.1, a fim de comparar os valores obtidos a partir das condições de cada ensaio.

A Tabela 5.1 apresenta a perda de massa acumulada dos corpos de prova padrão (CP) em ensaio realizado com o pH da polpa não ajustado. Os valores apresentados são a média de quatro ensaios.

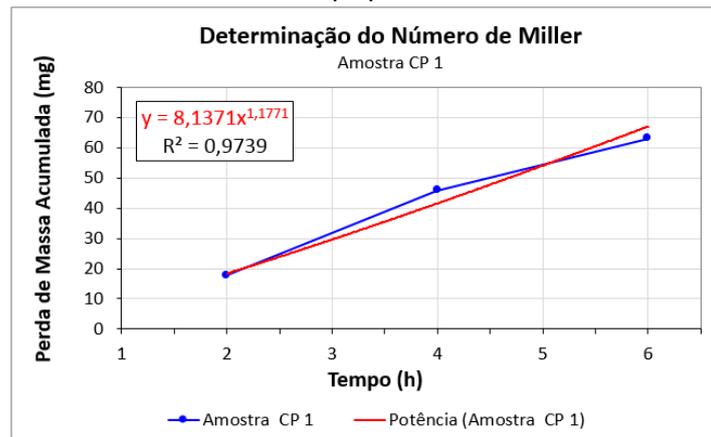
Tabela 5. 1 - Perda de Massa Acumulada em mg para pH da polpa não ajustado

Tempo	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4
2h	17,760	18,940	28,880	23,860
4h	45,800	38,440	38,620	44,500
6h	63,120	53,560	55,380	57,000

Fonte: (Próprio Autor)

A partir dos dados da Tabela 5.1 foi utilizado o programa Excel para determinação das curvas de perda de massa acumulada em mg em função do tempo para cada corpo de prova, como exemplificado na Figura 5.1 para o CP 1, e plotada a linha de tendência de potência para determinação dos valores de “A”, primeiro coeficiente de ajuste, e de “B”, segundo coeficiente de ajuste, da Equação 3.1. Obtidos os valores de “A” e “B”, determinou-se o NM, considerando o pH da polpa não ajustado, conforme exemplificado na Figura 5.2 para o CP 1.

Figura 5. 1 - Perda de Massa acumulada (mg) versus tempo (h) para o CP 1 para pH normal da polpa



Fonte: (Próprio autor)

Figura 5. 2 - Cálculo do Número de Miller, CP 1, pH normal da polpa

$M(t) = A \times t^B$		$M'(t) = A \times B \times t^{(B-1)}$	
Coefficiente A	8,1371	$MN = C \times M'$	
Coefficiente B	1,1771		
Tempo de 2h	2,0		
M: Taxa de perda de massa (mg/h)	10,8292		
Fator de Escala	18,18	mg/h	
Número de Miller	196,87	$SAR = MN \times \frac{\text{Densidade Especifica CP padrão}}{\text{Densidade Especifica CP utilizado}}$	
Densidade Especifica do CP padrão (g/cm³):		7,58	
Densidade Especifica do CP utilizado (g/cm³):			
Índice SAR:	#DIV/0!		

Fonte: (Equipe de Tribologia ITV)

Finalizado os testes com o pH normal da polpa foram executados ensaios para o pH 8 da polpa e para a polpa com adição de 3,5% de NaCl, para que se pudesse avaliar o impacto da alteração do pH na taxa de desgaste dos corpos de prova. Os dados obtidos são apresentados nas Tabelas 5.2 e 5.3.

Tabela 5. 2 - Perda de Massa Acumulada (mg) para pH = 8

Tempo	CP 5	CP 6	CP 7	CP 8
2h	29,620	23,420	14,640	28,260
4h	41,460	38,380	25,360	39,060
6h	53,920	49,480	35,420	55,260

Fonte: (Próprio Autor)

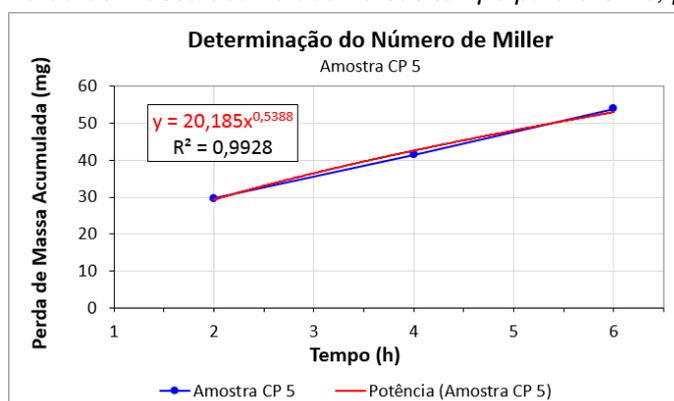
Tabela 5. 3 -Perda de Massa Acumulada (mg) para 3,5% de NaCl na polpa

Tempo	CP 9	CP 10	CP 11	CP 12
2h	27,300	19,460	21,480	24,160
4h	49,920	37,540	44,800	44,060
6h	70,320	52,360	61,000	61,480

Fonte: (Próprio Autor)

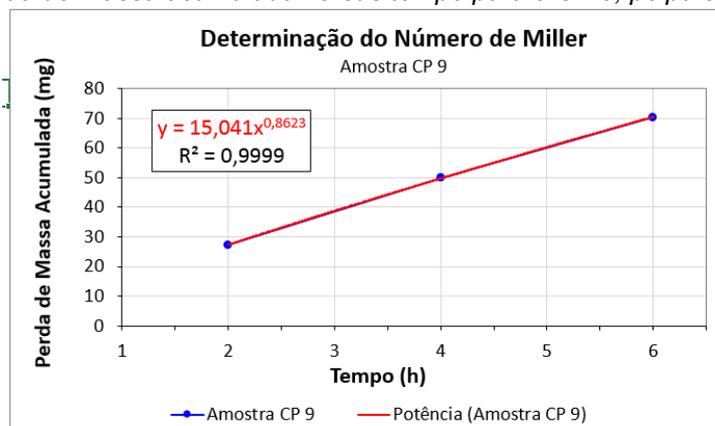
De maneira análoga ao procedimento executado para o pH normal da polpa, a partir dos dados das Tabelas 5.2 e 5.3, foram traçadas as curvas de perda de massa acumulada em mg em função do tempo, obtidos os valores de “A” e “B” para determinação do NM, para o pH 8 da polpa e polpa com adição de 3,5% de NaCl. As Figuras 5.3 e 5.4 apresentam os valores do NM, considerando os corpos de prova CP 5 e CP 9 para os pH 8 da polpa e polpa com 3,5% de NaCl, respectivamente.

Figura 5. 3 - Perda de Massa acumulada versus tempo para o CP 5, pH 8 da polpa



Fonte: (Próprio autor)

Figura 5. 4 - Perda de Massa acumulada versus tempo para o CP 9, polpa com 3,5% de NaCl



Fonte: (Próprio autor)

Calculados os valores de “A” e “B” para a polpa com pH 8 e polpa com 3,5% de NaCl foram determinados os NM's para essas duas condições e os resultados são exemplificados nas Figuras 5.4 e 5.5 para os CP's 5 e 9, respectivamente.

Figura 5. 5 - Cálculo do Número de Miller, CP 5, pH 8 da polpa

$M(t) = A \times t^B$		$M'(t) = A \times B \times t^{(B-1)}$	
Coefficiente A	20,1850	$MN = C \times M'$	
Coefficiente B	0,5388		
Tempo de 2h	2,0		
M': Taxa de perda de massa (mg/h)	7,8999		
Fator de Escala	18,18	mg/h	
Número de Miller	143,62	$SAR = MN \times \frac{\text{Densidade Especifica CP padrão}}{\text{Densidade Especifica CP utilizado}}$	
Densidade Especifica do CP padrão (g/cm ³):		7,58	
Densidade Especifica do CP utilizado (g/cm ³):			
Índice SAR:	#DIV/0!		

Fonte: (Equipe de Tribologia ITV)

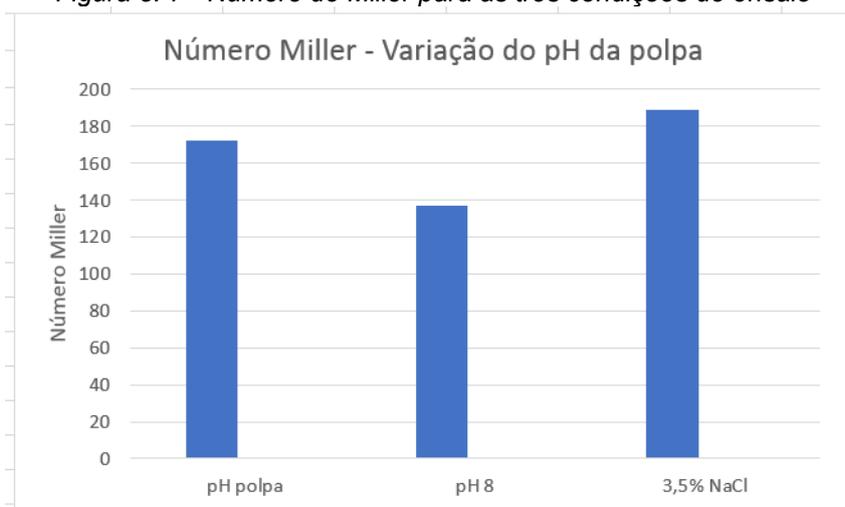
Figura 5. 6 - Cálculo do Número de Miller, CP 9, polpa com 3,5% de NaCl

$M(t) = A \times t^B$		$M'(t) = A \times B \times t^{(B-1)}$	
Coefficiente A	15,0410	$MN = C \times M'$	
Coefficiente B	0,8623		
Tempo de 2h	2,0		
M': Taxa de perda de massa (mg/h)	11,7892		
Fator de Escala	18,18	mg/h	
Número de Miller	214,33	$SAR = MN \times \frac{\text{Densidade Especifica CP padrão}}{\text{Densidade Especifica CP utilizado}}$	
Densidade Especifica do CP padrão (g/cm ³):		7,58	
Densidade Especifica do CP utilizado (g/cm ³):			
Índice SAR:	#DIV/0!		

Fonte: (Equipe de Tribologia ITV)

Considerando os valores do NM das quatro amostras ensaiadas, determinou-se os valores médios do NM representativos para cada uma das condições de ensaio (pH da polpa não ajustado, pH 8 da polpa e polpa com 3,5% de NaCl). Esses valores são apresentados na Figura 5.7.

Figura 5. 7 - Número de Miller para as três condições de ensaio



Fonte: (Próprio Autor)

A partir desses dos ensaios realizados verificou-se que a abrasividade diminuiu com o aumento do pH da polpa, o que está de acordo com a proposição de Roveri e Chaves (2010), mencionada no item 3.3, demonstrando que o aumento do pH da polpa resulta em um decréscimo na taxa de desgaste, uma vez que para o pH da polpa não ajustado (pH variando entre 5,5 e 6,0) o NM foi de 171,8 e para o pH 8 foi de 136,5.

No ensaio realizado com o acréscimo de 3,5% de NaCl à polpa, verificou-se um aumento do NM (188,7) em relação às outras duas condições de ensaio. Esse resultado pode estar relacionado à maior perda de massa do corpo de prova ocasionada pela ação de íons cloreto que podem ter provocado corrosão no material, estabelecendo uma condição de tribocorrosão, ou seja desgaste abrasivo associado à corrosão.

6 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos neste trabalho pode-se concluir que:

- Os resultados permitiram quantificar o impacto da alteração nos valores de pH e da configuração da polpa na taxa de desgaste abrasivo.
- Verificou-se que há uma influência significativa do pH da polpa no desgaste dos corpos de prova, resultando em um menor Número de Miller, que corresponde a uma menor abrasividade da polpa, para maior valor de pH.
- Considerando que no processo de moagem o custo dos corpos moedores representa uma parcela significativa do custo total de moagem, é necessário estabelecer, em função da mineralogia de cada minério, as melhores condições do pH da polpa que resulte em menores perdas por desgaste dos materiais usados tanto nos corpos moedores quanto nos revestimentos dos moinhos, reduzindo custos e aumentando a produtividade do processo.
- Finalizando, verificou-se que foram atingidos os objetivos propostos neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G75**: Standard Test Method for Determination of Slurry Abrasivity (Miller Number) and Slurry Abrasion Response of Materials (SAR Number). West Conshohocken, 2001. 10 p.
- ASSIS, F. **Desgaste abrasivo de níquel e de liga binária níquel-cobalto eletrodepositados em substrato de cobre**. 2009. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais - REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2009.
- CARVALHO, P. S. L.; SILVA, M. M.; ROCIO, M. A. R.; MOSZKOWICZ, J. **Minério de ferro**. 39. ed. Rio de Janeiro: BNDS, 2014. 37 p.
- HESSE, M.; POPOV, O.; LIEBERWIRTH, H. Increasing efficiency by selective comminution. **Minerals Engineering**, v. 103-104, p. 112-126, abr. 2017.
- JAMES, H. L., Sedimentary facies of iron-formations. **Economic Geology**, v. 49, p. 235-293, 1954.
- JAMES, H. L.; TRENDALL, A. F. Banded Iron Formation: Distribution in Time and Paleoenvironmental Significance. **Mineral Deposits and The Evolution of The Biosphere**, Berlin, v. 3, p. 199-217, 1982.
- NINS, B.; PENAGOS, J. J.; PINTO, L. M.; MÜNCH, D.; FALQUETO, P.; VIÁFARA, C. C.; COSTA, A. R. Abrasiveness of iron ores: Analysis of service-worn conveyor belts and laboratory Dry Sand/Rubber Wheel tests. **Wear**, v. 506, id 204439, p. 1-14, 2022.
- MAGNOL, R, V. **Caracterização Tribológica de Formação Ferrífera Bandada Através do Ensaio de Esclerometria Linear**. 2018. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.
- NORGATE, T.; JAHANSHAH, S. Reducing the greenhouse gas footprint of primary metal production: Where should the focus be? **Minerals Engineering**, Clayton South, v. 24, p. 1563-1570, Nov. 2011.

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

RODRIGUES, A. F.D.V.; DELBONI, H. J.; POWELL, M. S.; TAVARES, L. M. Comparing strategies for grinding itabirite iron ores in autogenous and semi-autogenous pilot-scale mills. **Minerals Engineering**, v. 163, id. 106780, p. 1-8, mar. 2021.

SIQUEIRA, F. S. **Abrasividade de polpas minerais associadas às propriedades do abrasivo: Morfologia, concentração, tamanho médio e natureza das partículas**. 2018. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Rede Temática em Engenharia de Materiais - REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2018.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. **Decifrando a terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 558p.

VALE S.A. **Formulário 20-F. 2018**. Disponível em: https://www.vale.com/PT/investors/informationmarket/annualreports/20f/20FDocs/Vale_20-F%20FY2018%20-%20final_p.pdf. Acessado em 29/01/2024.