

**CARACTERIZAÇÃO DE ITABIRITO COMPACTO PARA ANÁLISE DE USO COMO
CORPO MOEDOR****SANCHES, J.G.¹, BERGERMAN, M.G.¹, DELBONI JR, H.², LIMA, N. P.³**

¹Universidade de São Paulo Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo,
Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais
e-mail: julia.sanches@usp.br

² Universidade de São Paulo Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo,
Laboratório de Simulação e Controle de Processos de Tratamento de Minérios

³Vale, Brasil

RESUMO

Com o passar dos anos e a queda nos teores dos minérios, as usinas de beneficiamento do quadrilátero ferrífero passaram a processar minérios com liberação mais fina e aumentaram seus custos de operação como o consumo de corpos moedores. Como uma alternativa ao uso de bolas de aço como corpos moedores, a presente pesquisa visa estudar a viabilidade de utilização do itabirito compacto como *pebbles* para a moagem de itabiritos da região do Quadrilátero Ferrífero. Duas amostras de minério foram caracterizadas e ensaios de moagem foram realizados em escala de bancada. Os resultados mostraram que o itabirito compacto possui alto índice de abrasividade, que o itabirito friável tem índice de trabalho maior que o compacto, índice de abrasão, calculado pelo resultado do ensaio de *Tumbling* apenas com o itabirito compacto, como alta resistência, e resultados de ensaios de quebra que mostram que o itabirito compacto é bem mais tenaz que o friável. Além deste, destaca-se os resultados obtidos pela moagem de arredondamento dos *pebbles* onde se concluiu que estes cessam seu desgaste significativo rapidamente, mostrando competência e características positivas para seu uso como corpo moedor.

PALAVRAS-CHAVE: Itabirito compacto, *pebbles*, corpos moedores, moagem.

ABSTRACT

Over the years and the drop in ore grades, the processing of the “quadrilátero ferrífero” began to process ores with finer release and increased their operating costs such as the consumption of grinding medias. As an alternative to the use of balls as grinding medias, the present research aims to study the feasibility of using compact itabirite as pebbles for grinding itabirite from the “quadrilátero ferrífero”. Two ore samples were characterized and grinding tests were performed on laboratory scale. The results showed that the compact itabirite has a high abrasiveness index, that the friable itabirite has a higher work index than the compact one, the abrasion index, calculated by the result of the Tumbling test only with the compact itabirite, as high strength, and breakage tests that show that the compact itabirite is much more tenacious than the friable one. In addition, the results obtained by the rounding grinding of the pebbles are highlighted, where it was concluded that they cease their significant wear quickly, showing competence and positive characteristics for their use as a grinding media.

KEYWORDS: Compact itabirite, *pebbles*, grinding media, milling .

1. INTRODUÇÃO

O setor mineral em todo o mundo observa uma clara tendência de queda dos teores das minas em operação (DELBONI JUNIOR, 2007). O quadrilátero ferrífero, região de grande riqueza mineral presente no estado de Minas Gerais, segundo estado que mais arrecada CFEM no Brasil, sofreu ao longo dos anos as alterações nos seus minérios explorados (ANM 2019). O minério de ferro, em meados da década de 60, era processado comumente apenas pelas etapas de britagem e peneiramento. Atualmente, alguns casos necessitam também das etapas de moagem e concentração (como a flotação). Usinas que iniciaram suas produções por minérios mais ricos como hematita compacta e hematita friável, necessitaram aumentar a vazão mássica de alimentação para produzir a mesma quantidade de produtos, a partir do momento em que iniciou o processamento com minérios de menores teores como o itabirito friável e o itabirito compacto, materiais de estudo desta pesquisa. O itabirito compacto, por sua vez, causou um aumento significativo do consumo de corpos moedores na etapa de moagem em relação ao mesmo minério friável (DORR, 1969; PINTO, 2016). Sendo assim, o material de estudo dessa pesquisa foi um circuito de moagem de bolas de uma usina de tratamento de minérios do quadrilátero ferrífero que processa itabiritos friável e compacto.

A moagem é comumente conhecida por ser um dos maiores consumos energéticos das usinas de beneficiamento de minérios(DELBONI JUNIOR, 2007). O consumo energético da usina e a granulometria requerida se associam de forma inversamente proporcional, ou seja, quanto menor a granulometria necessária do produto, maior o consumo energético da etapa de cominuição (CHAVES; PERES, 2012; ROWLAND, 2002). Além do consumo energético, algumas usinas também possuem alto consumo de corpos moedores, como é o caso da usina objeto desta pesquisa que atualmente consome cerca de 13.000 toneladas por ano de bolas de aço para o processamento de itabiritos. Fez-se, assim, necessários estudos que visam diminuir tal custo de operação.

O circuito de moagem avaliado possui uma capacidade ociosa em seus moinhos, que licencia estudos alternativos, como o uso de *pebbles* como corpos moedores. A moagem por *pebbles* trata-se de moagem em moinho tubular utilizando *pebbles* como corpos moedores. É considerada a moagem autógena mais antiga utilizada no mundo e se destaca pelo baixo custo operacional quando utiliza o próprio minério processado como corpo moedor, ou seja, não possui o custo de operação dos corpos moedores como bolas ou barras.(CHAVES; PERES, 2012; CROCKER, 1985) Os *pebbles* podem ser provindos de etapas anteriores do processamento, como britagem e/ou moagem primária autógena ou semi-autógena, ou ainda de fontes externas como seixos rolados ou bolas de cerâmica (CROCKER, 1985; DELBONI JUNIOR, 2007). Na Escandinávia, um comum uso da moagem com *pebbles* é no circuito AG-Seixos, onde a moagem primária é realizada por um moinho AG e a moagem secundária é realizada por moinho de seixos, utilizando os *pebbles* gerados no moinho primário autógeno(DELBONI JUNIOR, 2007). Observa-se que neste caso, os *pebbles* utilizados são produtos de moagem AG tendo, assim, formato arredondado. Para o presente estudo, será analisada a possibilidade de utilização do itabirito compacto com formato angulado, provindo das etapas secundária e/ou terciária de britagem. Estudos mostraram que há influência na moagem quando alterados os formatos dos corpos moedores, porém são menores do que o esperado em alguns materiais (LAMECK, 2005; PILLAY; LOVEDAY, 2015; SHAHBAZI et al., 2020). Este ponto coloca a presente aplicação como particular em relação ao praticado na indústria.

O presente trabalho, portanto, visa caracterizar o itabirito compacto de modo a observar se há propriedades que indicam a viabilidade de seu uso como corpo moedor, ou seja, empregá-lo como *pebble*.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Foram recebidas no LTM-USP as amostras de itabirito friável e de itabirito compacto. Realizou-se, inicialmente, análise granulométrica das amostras. Em seguida, foram preparadas alíquotas de ambas as amostras para a realização dos ensaios de AI de Bond, WI de Bond, LCPC, picnometria com água, picnometria com hélio e *Geopyörä Breakage Test*. Outros dois ensaios foram realizados apenas com o itabirito compacto, pois o itabirito friável não gerou massa suficiente para tais ensaios devido a sua faixa granulométrica. São eles: *Tumbling* e *Drop Weight Test*. Um fluxograma dos ensaios realizados fora apresentado na Figura 1.

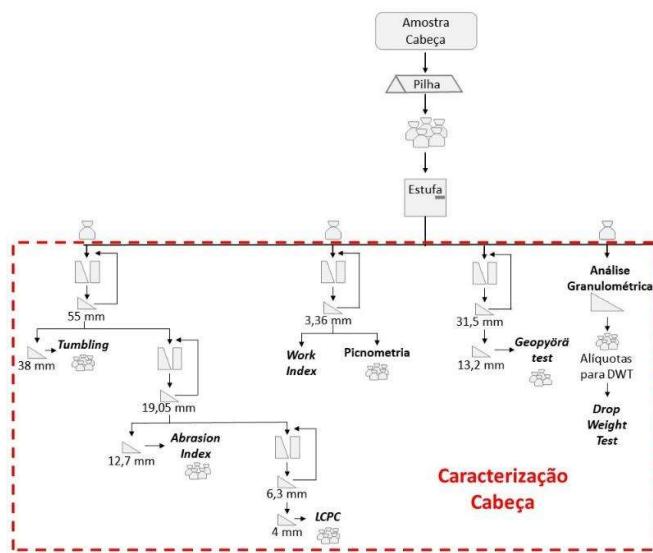


Figura 1 - Fluxograma dos ensaios de caracterização do material
Fonte: Elaboração própria

A análise granulométrica foi realizada no Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais da USP, em duas etapas: a seco em peneirador quadrado 500 x 500 mm acima da malha 2,36 mm e a úmido em peneirador da empresa Haver & Boecker® que possui vibração em ultrassom, abaixo da malha 2,36 mm. As análises química e mineralógica foram realizadas nos laboratórios da empresa Vale.

Para determinar a densidade real dos sólidos, foram realizados dois tipos de ensaios: picnometria utilizando água como referência e picnometria usando gás Hélio como referência. Este foi realizado no LCT-USP e aquele no LTM-USP.

O *Work Index* projetado por Bond (1952) foi realizado utilizando malha-teste de 150 µm, de acordo com os parâmetros operacionais utilizados no Complexo de Vargem Grande. O *Abrasion Test*, também projetado por Bond e descrito por Bergstrom (1985), determinou o índice de abrasividade de cada uma das amostras cabeça, a partir do desgaste que o material causa em uma palheta metálica que gira na câmara de moagem de um moinho pré definido pelos parâmetros do ensaio. A massa de desgaste classifica a abrasividade do minério. Com o mesmo objetivo do AI de Bond, foi realizado o ensaio denominado *Laboratoite*

Central des Ponts et Chaussées, ou ainda, LCPC, que também reproduz o índice de abrasividade medido pelo desgaste de uma palheta metálica, porém utilizando menos massa de material e exigindo granulometria mais final que aquele.

Para as moagens semi-autógenas, um ensaio bastante difundido é o *Drop Weight Test*. Este foi realizado com o método simplificado (CHIEREGATI, 2001) apenas com a amostra de itabirito compacto que, devido a sua exigência por uma faixa granulométrica de 22,4 a 19 mm, não foi possível atingir a massa desejada na amostra de itabirito friável. O ensaio consiste em realizar, com uma massa conhecida, um impacto sobre uma única partícula e, assim, calcular a energia gasta para a quebra desta (NAPIER-MUNN et al., 1996). Porém, outro ensaio com o mesmo objetivo foi realizado, já que foi possível gerar massa de ambas as amostras e, assim, comprar os resultados. O *Geopyörä breakage test* consiste em duas rodas girando em sentidos opostos que quebram a partícula passante entre elas. A força utilizada para a quebra é posteriormente aplicada para cálculos que resultam em um índice de quebra (BUENO et al., 2021).

De maneira a observar a resistência à fragmentação por abrasão, o ensaio realizado foi o *Tumbling*. Trata-se de um tamboramento em um jarro de 300 x 300 mm apenas com massa de 3 kg do minério e granulometria entre -55+38 mm, o que permitiu realizar apenas com o itabirito compacto. O jarro possui barras elevatórias para que o minério seja lançado contra ele mesmo. A velocidade de rotação é de 53 rpm e o processamento ocorre por 10 minutos.

Por fim, foi realizado um ensaio de moagem com carga de corpos moedores com 100% *pebbles* de maneira a analisar o arredondamento dos *pebbles*. Os parâmetros de moagem estão presentes na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetro para os ensaios de moagem

Parâmetro	Valor
Dimensões internas do moinho D x L (polegadas)	12 x 12
Carga do moinho (%)	30
Massa dos corpos moedores (g)	14.171,3
Massa específica do <i>blend</i> de minério (g/cm ³)	3,56
Massa de sólidos (g)	4.227,4
Massa de polpa (g)	5.705,0
Porcentagem de sólidos (%)	74
Velocidade de rotação (% da velocidade crítica)	72
<i>Top size</i> da alimentação	100% passante em 2,35 mm

Fonte: Elaboração própria

A alimentação da moagem foi feita por um blend dos materiais, de acordo com a alimentação da usina, ou seja, 70% itabirito friável e 30% de itabirito compacto. A cada 30 minutos de moagem, os corpos moedores eram peneirados, secos e pesados para analisar as perdas. O procedimento foi repetido cinco vezes, completando um total de 150 minutos de ensaio. Imagens auxiliaram na análise do arredondamento dos *pebbles*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise granulométrica das amostras iniciais estão ilustrados na Figura 2. O itabirito friável está representado pela sigla IF e o itabirito compacto, IC.

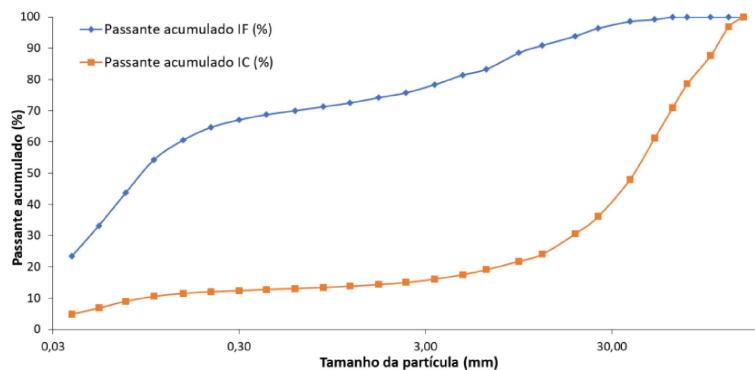


Figura 2 - Análise granulométrica da amostra cabeça
Fonte: Elaboração própria

Pela Figura 2 fica evidente que o itabirito friável tem granulometria de entrada na usina bem mais fina que o itabirito compacto, explicando a impossibilidade de realização de alguns ensaios com o itabirito friável. Os resultados das análises química e mineralógica são apresentados nas Tabela 2 e Tabela 3, respectivamente.

Tabela 2 - Resultado análise química

Amostra	Fe (%)	SiO ₂ (%)	P (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Mn (%)	TiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	PPC (%)
Itabirito friável	39,30	41,59	0,02	0,90	0,01	0,04	0,01	0,08	0,64
Itabirito compacto	39,08	42,38	0,03	0,31	0,01	0,04	0,02	0,07	0,53

Fonte: Elaboração própria com dados da Vale

Tabela 3 - Resultado análise mineralógica

Amostra	Hematita	Magnetita	Goethita	Quartzo	Óxido de Mn	Caulinita	Gibbsita	Outros
Itabirito friável	56,44	0,13	1,51	41,31	0,01	0,01	0,09	0,21
Itabirito compacto	53,99	0,71	2,56	42,63	0,00	0,01	0,02	0,03

Fonte: Elaboração própria com dados da Vale

Para as análises químicas e mineralógicas, pode-se observar que não há diferenças significativas entre o itabirito friável e o compacto. Os resultados da análise mineralógica mostram uma menor presença de hematita no itabirito compacto, além de uma maior presença de quartzo e de goethita, porém não possuem diferenças significativas.

A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios de determinação da densidade real. Os resultados de densidade, entre os materiais, não demonstraram grandes diferenças. Esse resultado já era esperado devido ao fato de ambos serem itabiritos e por terem mineralogia bastante próxima. Entre os tipos de ensaio, eram esperadas diferenças pequenas, por se tratar de metodologias diferentes.

Tabela 4 - Resultados de densidade real

Amostra	Picnometria comum (g/cm ³)	Picnometria com hélio (g/cm ³)
Itabirito friável	3,57	3,61
Itabirito compacto	3,54	3,65

Fonte: Elaboração própria

Os resultados do Ai de Bond e LCPC estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados de índice de abrasividade

Amostra	Abrasion Index	LCPC
Itabirito friável	0,06	104
Itabirito compacto	0,40	363

Fonte: Elaboração própria

Pela Tabela 5, pode-se notar que tanto no AI de Bond quanto no LCPC, os resultados se conservam, ou seja, o itabirito compacto possui índice significativamente maior que o itabirito friável. O consumo de corpos moedores aumentou no circuito de moagem da usina avaliada juntamente com o início do processamento de itabirito compacto, corroborando os resultados dos ensaios de índice de abrasividade.

Os resultados do WI indicam o consumo energético do itabirito friável em 10,8 kWh/t e do itabirito compacto em 6,8 kWh/t. Diferentemente dos demais resultados, o ensaio de WI gerou dados que não acompanham o consumo industrial. Tal resultado já foi reportado na literatura. Existe uma interferência negativa de excesso de finos para este ensaio e com isto, como o itabirito friável possui uma grande quantidade de finos, demonstrada pela análise granulométrica presente na Figura 2, os valores de consumo energético encontrados no WI, podem não refletir o consumo industrial onde a presença de itabirito compacto gerou um aumento no consumo energético da usina. Outro fator é a possibilidade do itabirito friável possuir partículas de quartzo com maior granulometria que no itabirito compacto. (FERREIRA et al., 2015; MAZZINGHY; RUSSO; PIMENTEL, 2013).

O DWT foi realizado apenas no itabirito compacto que possui um índice de quebra com valor 88, classificado, assim, com baixa resistência ao impacto. Os resultados do Geopyörä estão presentes na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados do ensaio Geopyörä

Amostra	F (kN)	Ecs (kWh/t)	t ₁₀ (%)	% -150 µm
Itabirito friável	6,5	0,17	28,7	16,5
Itabirito compacto	15,0	0,56	16,8	5,6

Fonte: Elaboração própria com dados da ©Geopyörä

Tais resultados apresentados na Tabela 6 mostram que o itabirito compacto maior resistência ao impacto que o itabirito friável.

Em relação à resistência à abrasão, o *Tumbling* realizado apenas com o itabirito compacto mostrou o índice t_a com valor de 0,48, classificado em alta resistência à abrasão. Essa classificação é importante para o objetivo da pesquisa em relação ao itabirito compacto, ou seja, alta resistência à abrasão é um resultado positivo para que o itabirito compacto seja usado como *pebble*.

Por fim, foi realizado um ensaio de moagem para acompanhar o arredondamento do itabirito compacto quando utilizado como corpo moedor. A Figura 3 apresenta os resultados dos peneiramentos realizados dos *pebbles* a cada trinta minutos de ensaio.

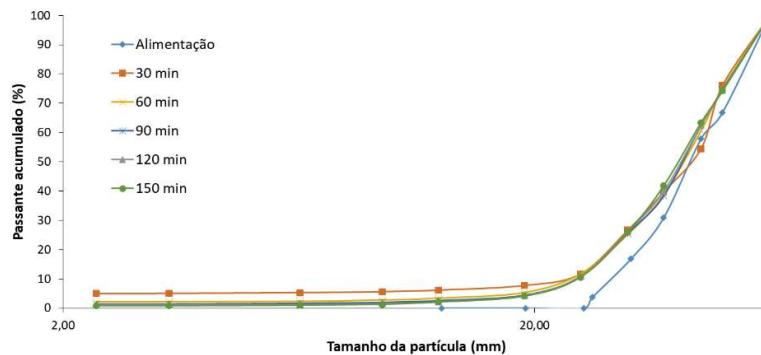


Figura 3 - Peneiramento dos *pebbles* usados nos ensaios de arredondamento
Fonte: Elaboração própria

Observa-se, portanto, pela Figura 3, que o itabirito compacto para de sofrer desgaste de forma significativa após 60 minutos de ensaio, apenas, corroborando com o resultado do ensaio *Tumbling* e fundamentando o seu uso como corpo moedor. As Figura 4, Figura 5 e Figura 6 mostram o itabirito compacto na granulometria de corpo moedor, de maneira comparativa: sem moagem, com 30 minutos de moagem e com 150 minutos de moagem.



Figura 4 - Pebbles sem moagem
Fonte: Arquivo pessoal

Figura 5 - Pebbles após 30 minutos de moagem
Fonte: Arquivo pessoal

Figura 6 - Pebbles após 150 minutos de moagem
Fonte: Arquivo pessoal

As Figura 4, Figura 5 e Figura 6 confirmam os demais dados, mostrando o itabirito compacto como possível corpo moedor, com características positivas para tal. Fica evidente, ainda, que há arredondamento das superfícies mais angulosas por meio de quebra por abrasão, porém sem grande representatividade de quebra por impacto, podendo este fato, ser referente ao tamanho do moinho utilizado.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo caracterizou duas amostras de diferentes itabiritos que são processados em uma usina no quadrilátero ferrífero. O índice de abrasão em 0,48, resultado do ensaio de *Tumbling* e classificado como alta resistência à abrasão, foi o primeiro indicativo de boas características do itabirito compacto para uso como corpo moedor. O ensaio de moagem para analisar o arredondamento dos *pebbles*, mostrou que o itabirito compacto rapidamente cessou o desgaste significativo, ou seja, pode ser considerado competente e com boas características para ser utilizado como corpo moedor. Sendo assim, percebe-se que o itabirito compacto tem potencial positivo de seu uso como corpo moedor, *pebbles*.

5. AGRADECIMENTOS

A primeira autora agradece o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – pela bolsa no programa de demanda social Código de Financiamento 001 processo 88887.606604/2021-00. O segundo autor agradece ao CNPq pela bolsa produto DT-2 processo 313411-2019. Agradecimentos ao professor Dr. Arthur Pinto Chaves e à Vale na realização da presente pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

ANM - AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Informe Mineral - 2º semestre**. Brasília. Disponível em: <http://www.anm.gov.br>.

BERGSTROM, B. H. Abrasiveness. In: **SME Mineral Processing Handbook**. New York: SME Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1985. p. 30–70.

BOND, F. C. The third theory of comminution. **Mining Engineering**, [S. I.], v. 193, n. October 1951, p. 484–494, 1952.

BUENO, Marcos; TORVELA, Janne; CHANDRAMOHAN, Rajiv; CHAVEZ, Tabatha; LIEDES, Toni; POWELL, Malcolm. The double wheel breakage test. **Minerals Engineering**, [S. I.], v. 168, n. June 2020, p. 1–12, 2021. DOI: 106905.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios v.3 Britagem, peneiramento e moagem**. 5. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CHIEREGATI, A. C. **Novo método de caracterização tecnológica para cominuição de minérios**. 2001. Universidade de São Paulo, [S. I.], 2001.

CROCKER, B. S. Pebble Mills. In: WEISS, Norman L. (org.). **SME Mineral Processing Handbook**. 1. ed. New York: Society of Mining Engineers, 1985. p. 3C94–3C107.

DELBONI JUNIOR, H. Cominuição. In: **Tendências Tecnológicas Brasil 2015**. 1. ed. Rio de Janeiro: CETEM - Centro de Tecnologia Mineral, 2007.

DORR, J. V. N. **Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilatero Ferrífero Minas Gerais , Brazil**. [s.l.: s.n.].

FERREIRA, K. C.; GALERY, R.; MONTENEGRO, L. C. M.; PERES, A. E. C. Efeito Do Escalpe No Work Index De Bond. **Holos**, [S. I.], v. 7, p. 59, 2015. DOI: 10.15628/holos.2015.3703.

LAMECK, N. N. S. **Effects of Grinding Media Shapes on Ball Mill Performance**. 2005. University of the Witwatersrand, [S. I.], 2005.

MAZZINGHY, D. B.; RUSSO, J. F. C.; PIMENTEL, D. A. Avaliação dos parâmetros cinéticos de moagem para amostras de itabiritos compacto e friável. **XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology**, [S. I.], p. 451–458, 2013.

NAPIER-MUNN, T. J.; MORRELL, S.; MORRISON, R. D.; KOJOVIC, T. **Mineral Comminution Circuits - Their Operation and Optimisation**. 1. ed. Queensland: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 1996.

PILLAY, T.; LOVEDAY, B. Optimization of pebble milling. In: SAG CONFERENCE 2015, Vancouver. **Anais** [...]. Vancouver p. 1–17.

PINTO, P. H. F. **Desenvolvimento de rotas para cominuição de itabiritos compactos do quadrilátero ferrífero**. 2016. Universidade de São Paulo, [S. I.], 2016.

ROWLAND, C. A. Selection of Rod Mills, Ball Mills and Regrind Mills. In: MULAR, Andrew L.; HALBE, D. N.; BARRATT, Derek J. (org.). **Mineral Processing Plant Design, Practice and Control V.1**. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc, 2002. p. 733–735.

SHAHBAZI, B.; JAFARI, M.; PARIAN, M.; ROSENKRANZ, J.; CHEHREH CHELGANI, S. Study on the impacts of media shapes on the performance of tumbling mills – A review. **Minerals Engineering**, [S. I.], v. 157, n. March 2019, p. 106490, 2020. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106490. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106490>.