

AVALIAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO NA MOAGEM DE DOIS DIFERENTES TIPOS LITOLÓGICOS DO DEPÓSITO DA SERRA DO SAPO¹

Henrique Dias Gatti Turrel²
Edilson Yoshiyuki Sawasato²
Fernando Rosa Guimarães²
Carlos Roberto Magalhães²
Geraldo Sarquis Dias²
José Cabello Russo³
Danielle Andrade Pimentel³
Douglas Batista Mazzinghy⁴

Resumo

Comumente a aparência de uma rocha é associada à energia necessária para sua fragmentação durante o tratamento mineral. Contudo, outras características, que não podem ser determinadas com uma simples inspeção visual, são as responsáveis por determinar a energia necessária numa etapa de moagem, como, por exemplo, função quebra. Os depósitos de minério de ferro exibem características distintas em função do ambiente de formação bem como sua história evolutiva e, conseqüentemente, apresentam propriedades físicas diferentes. O Projeto Minas-Rio da Anglo American, com capacidade para produção de 24,5 milhões de toneladas por ano de *pellet feed*, extrairá minério da jazida da Serra do Sapo em Conceição do Mato Dentro, MG. A classificação litológica do minério, em friável e compacto, é baseada na intensidade do intemperismo que apesar de prática, não reflete a moabilidade do mesmo. Diversos testes de bancada foram realizados com amostras da jazida da Serra do Sapo para determinação do desempenho dessas amostras na moagem primária. Esses testes mostraram que os minérios classificados como friáveis apresentavam consumo energético superior aos classificados como compacto. Investigações no minério alimentado na moagem indicaram que a diferenciação nos tamanhos das partículas de quartzo pode ser uma explicação para a causa desses resultados.

Palavras-chave: Moagem; Energia; *Pellet feed*; Itabirito; Minério de ferro.

GRINDING ENERGY CONSUMPTION EVALUATION FOR TWO DIFFERENT LITHOLOGIC TYPES OF SERRA DO SAPO DEPOSIT

Abstract

Commonly the rocks aspect is associated to the necessary energy for its fragmentation during mineral processing. However, others characteristics, that could not be determined by a simple visual inspection, are responsible for necessary energy determination in a milling stage, such as, breakage function. Iron ore deposits exhibit different characteristics as a function of the environmental formation and historical evolution. Consequently they present different physical properties. Anglo American's Minas Rio Project, with a production capacity around 24.5 million tons per year of pellet feed, is going to exploit ore from Serra do Sapo Deposit in Conceição do Mato Dentro, Minas Gerais. Ore lithological classification in friable and compact is based mainly in the weathering intensity, which, in spite of the operational practicality, does not reflect ore grindability. Many bench tests were performed with Serra do Sapo's samples to determine their primary grinding performance. These showed, curiously, iron ores classified as friable presented higher energy consumption than the compact ones. Investigation in the ore fed to the grinding indicated that the quartz particles size distinction could be a explanation for these results.

Key words: Grinding; Energy; Pellet feed; Itabirite; Iron ore.

¹ Contribuição técnica ao 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 1º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 1 a 4 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Diretoria de Operações, Projeto Minas-Rio, Anglo American. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

³ Diretoria de Estudos Técnicos, Projeto Minas-Rio, Anglo American. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

⁴ Diretoria de Projetos, Projeto Minas-Rio, Anglo American. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

1 INTRODUÇÃO

Com passar do tempo, minérios de ferro com partículas liberadas são cada vez mais raros de se encontrar. Isso é facilmente observado pela quantidade produzida de granulados e finos. Enquanto a produção mundial dos granulados aumentou somente 18 % de 1998 a 2006, a de finos aumentou 95%.⁽¹⁾ Com isso, a etapa de fragmentação vem ganhando destaque, principalmente a moagem, uma vez que é necessária para a produção de *pellet feed* e consome grande quantidade de energia, impactando significativamente o custo de produção desse produto.

Para os itabiritos, o seu estado de intemperismo ou alteração é outra característica que vêm ganhando atenção com o passar do tempo. Cada vez mais, itabiritos com baixos níveis de intemperismo e baixo teor de Fe, antes considerados estéreis, estão compondo o minério das minas em operação e dos novos projetos. Prova disso, é o recente número de estudos realizados com minérios brasileiros sobre o tema.⁽²⁻⁷⁾

Itabiritos com baixo grau de intemperismo comumente apresentam menor grau de liberação. Isso porque o quartzo, principal mineral de ganga, é mais facilmente removido pelos processos geológicos que modificam a rocha, deixando a hematita, principal mineral-minério, intacta e liberada, dando origem aos itabiritos friáveis. Prováveis mecanismos para esse processo de enriquecimento em ferro estão descritos na literatura.⁽⁸⁻¹⁰⁾

De modo geral, os itabiritos que não sofreram processos intempéricos são chamados de compactos. Esse adjetivo é usado para se referir a elementos, partes, unidades ou segmentos de composição que estão firmemente unidos entre si.⁽¹¹⁾

Uma vez que a grande maioria desses minérios também apresenta um alto consumo energético na moagem, o termo compacto é comumente e equivocadamente associado à resistência a fragmentação. Os itabiritos com maior grau de intemperismo apresentam uma menor união entre suas partículas e, por isso, são usualmente denominados de friáveis.

Pereira et al.⁽³⁾ estudaram oito diferentes itabiritos provenientes do depósito de Serra Azul e observaram que o consumo energético na moagem aumenta na seguinte sequência: dos itabiritos mais pobres para os mais ricos, dos mais coesos para os menos. Silva⁽²⁾ comparou também oito diferentes minérios da Vale e verificou que os minérios compactos apresentaram maior consumo energético, menor teor de ferro, e liberação, especialmente nas frações maiores que 0,21 mm, do que os friáveis.

Silva et al.⁽⁷⁾ mostraram que minérios descritos como compacto também podem apresentar baixo consumo energético na moagem. Testes em escala piloto e simulações matemáticas determinaram o consumo energético do minério como sendo na faixa entre 2 e 4 kWh/t, dependendo do circuito adotado.

O Projeto Minas-Rio da Anglo American, com capacidade para produção de 24,5 milhões de toneladas por ano de *pellet feed*, extrairá minério da jazida da Serra do Sapo em Conceição do Mato Dentro, MG. O processo produtivo contempla a extração do minério por escavadeiras e caminhões, a fragmentação do mesmo, por britadores de mandíbulas e cônicos, prensas de rolos e moinhos de bolas, seguido por deslamagem, flotação, remoagem em moinhos verticais (adequação da granulometria de transporte), espessamento, bombeamento por 525 km de mineroduto e separação sólido-líquido para embarque.

Os minérios do Projeto Minas Rio são classificados em compacto e friável através de uma avaliação visual e com auxílio de algumas ferramentas simples. Se as partículas minerais do itabirito estão coesas, sendo necessária uma serra mecânica

para cortar os testemunhos, o mesmo é classificado como compacto. Se uma ferramenta manual é suficiente para cortar o testemunho, o mesmo é chamado de semi-compacto. Caso o itabirito tenha um aspecto pulverulento, totalmente decomposto e possa ser amostrado sem que seja serrado, o mesmo é classificado como friável.

Esses três tipos de minérios (Figura 1), classificados como friável, semi-compacto e compacto correspondem a, respectivamente, 27, 23 e 50% do recurso medido do Depósito da Serra do Sapo. Por isso o entendimento do comportamento desse último tipo no processo produtivo é de fundamental importância.



Figura 1. Afloramentos de itabiritos na Serra do Sapo: a) friável, b) semi compacto, c) compacto.

O consumo energético na prensa de rolos foi estudado por Russo, Mazzinghy e Turrer.⁽¹²⁾ Foram realizados testes com prensas de rolos (HPGR) em escala semi-industrial e moagem de bancada com dois tipos de minérios do Depósito da Serra do Sapo. Foi observado que, para o minério friável, a fragmentação no HPGR não trazia ganhos significativos de consumo energético na moagem seguinte. Contudo, no itabirito compacto, a diminuição do consumo energético foi de 13%, quando a prensagem foi realizada.

O presente trabalho tem por objetivo relatar os resultados obtidos por diversas campanhas de testes realizadas para determinação do consumo energético na moagem primária de minérios do Depósito da Serra do Sapo. Além disso, foi realizada uma caracterização detalhada das amostras em busca de evidências para os resultados obtidos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

As amostras minerais foram obtidas por sondagem diamantada, com brocas de diâmetro interno médio igual a 6,67 cm, em regiões e profundidades representativas do Depósito da Serra do Sapo.

Os testemunhos foram então serrados, para que a metade dos mesmos fossem fragmentada e classificadas em britadores e peneiras de laboratório. Inicialmente a metade do testemunho foi submetida a britagem e peneiramento em 32 mm. O passante dessa etapa foi submetido a mais duas etapas de britagem/ peneiramento, dessa vez com malhas de controle de 25 mm e 3 mm (Figura 2). As aberturas dos britadores foram ajustadas, na posição fechada, para a malha de controle. Esse fluxo objetivou simular o processo industrial de fragmentação nos britadores primários, secundários e prensas de rolos.

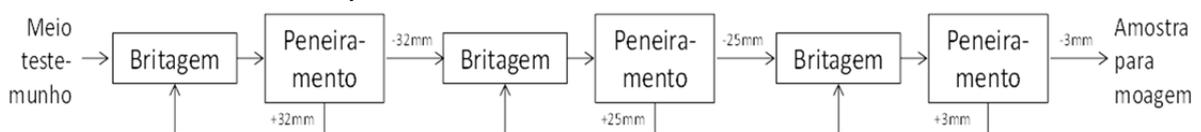


Figura 2. Fluxograma para adequação das amostras para moagem.

Um volume maior de amostra foi gerado, a partir da composição de várias alíquotas, de forma que o montante final fosse proporcional à média de cada tipo de minério. Nesse caso, a última etapa de britagem/peneiramento foi substituída por fragmentação em prensa de rolos em escala piloto.

A determinação do consumo energético na moagem foi realizada por três métodos diferentes, dependendo da ocasião.

No primeiro teste, a moagem do material foi realizada segundo procedimentos sugeridos por Donda⁽¹³⁾ até obtenção de 90% passante na malha de 0,150 mm. A determinação do consumo energético foi calculada através de equação apresentada em Rowland.⁽¹⁴⁾ Este método foi elaborado através de estudo fatorial de forma a avaliar as variáveis de maior peso e determinar as condições operacionais de teste que reproduzissem a operação industrial do circuito de remoagem da Samarco.

O segundo teste foi realizado de acordo com procedimento descrito por Bond⁽¹⁵⁾ adotando-se uma malha de controle de 0,150 mm. O método de Bond é utilizado para classificar diferentes minérios com relação a moagem. Os valores de W_i são ajustados por fatores de correção para dimensionamento de circuitos industriais.⁽¹⁶⁾

No último, foi utilizado moinho dotado de medição de torque para determinação da energia específica de moagem, conforme modelo de Herbst e Fuerstenau.⁽¹⁷⁾ O procedimento para a realização desse teste é descrito por Mazzinghy.⁽¹⁸⁾ O modelo do balanço populacional considera a taxa de quebra e a distribuição gerada após eventos de quebra de cada fração de tamanho de partículas.

Os ensaios granulométricos foram realizados por peneiramento via úmida com aberturas de 1000, 300, 100, 74, 44 e 37 μm , além de ciclonação com corte em aproximadamente 10 μm .

As análises para determinação da composição químicas foram feitas por fluorescência de raios-X, em pastilhas fundidas, em espectrômetro *Axios* da *PANalytical*, e calcinação em mufla.

A análise mineralógica foi realizada por difração de raios-X em equipamento da *PANalytical*, modelo *X'Pert PRO* com detector *X'Celerator*.

Microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada para avaliação semi-quantitativa dos elementos químicos presentes nos diversos minerais constituintes das amostras. O equipamento utilizado foi um microscópio *Stereoscan* da *Leo* com espectrômetro de raios-X por dispersão de energia (EDS) *Inca* da *Oxford*, com detector de silício. As amostras analisadas foram recobertas com carbono para análise.

O estudo mineralógico das formas de ocorrência e associação dos minerais foi realizado de forma semi-automatizada, em seções polidas, utilizando o software *MLA (Mineral Liberation Analyser)* da *FEI* acoplado ao microscópio eletrônico de varredura *Quanto 600 FEG* da *FEI* e sistema de microanálise por EDS *Esprit* da *Bruker*.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizadas duas grandes baterias de testes, com amostras de diversas regiões do Depósito. Na primeira, foram testadas 96 amostras no total, sendo que 61% foram classificadas originalmente como itabirito compacto. Na segunda, foram testadas 556 amostras. Dessa vez, o percentual de amostras classificadas como itabirito compacto foi bem menor, somente 10%.

Os resultados das duas baterias mostraram que o material classificado como itabirito compacto apresentava um consumo energético menor do que o itabirito friável,

mesmo apresentando distribuição granulométrica de alimentação com maior fração de grossos. O consumo energético do itabirito compacto foi 18% e 15% menor que do itabirito friável nas duas campanhas de teste.

Diante dessa constatação, uma amostra representativa de cada tipo de minério foi preparada para realização de investigações mais minuciosas.

O primeiro teste realizado com essas amostras confirmou os resultados anteriores. O Wi (*Work index*) do friável foi de 4,9 kWh/sht e do compacto foi de 3,9 kWh/sht, ou seja, uma diferença de 20%.

A composição química das amostras preparadas foi um forte indicativo da boa representatividade das mesmas. Os teores dos principais elementos químicos (Tabela 1) foram muito próximos da média do Depósito, com exceção para o fósforo no itabirito friável. O maior teor de perda ao fogo da amostra de itabirito friável constatou o maior grau de alteração da mesma.

Tabela 1. Composição química das amostras de itabirito friável (IF) e compacto (IC)

Minério	Composição (%)				
	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	PPC
IF	39,5	42,3	1,47	0,04	0,69
IC	32,4	52,8	0,57	0,04	0,23

Os resultados das análises mineralógicas das duas amostras (Tabela 2) mostraram similaridades na composição. Com predominância de hematita e quartzo para as duas. A exceção foi a goethita, que apesar de minoritária no itabirito friável, não foi encontrada no itabirito compacto. Essa constatação já era esperada, uma vez que a goethita ocorre como produto do intemperismo de minerais de ferro.⁽¹⁹⁾

Tabela 2. Composição química das amostras de itabirito friável (IF) e compacto (IC)

Minério	Composição (%)			
	Hematita	Quartzo	Goethita	Outros
IF	51	47	0,9	0,6
IC	45	55	0,0	0,8

No itabirito friável, o quartzo responde por praticamente 100 % do total de sílica. A alumina está associada minoritariamente à goethita, 10 % do total, e majoritariamente a outros minerais como k-feldspato, muscovita, caulinita (Figura 3a) diopsídio e outros filossilicatos. O fósforo está associado quase que em partes iguais à goethita, 43% do total, e apatita ou aluminato-fosfatos.

No itabirito compacto, o quartzo também responde pela quase totalidade da sílica. Uma vez que não há goethita, toda alumina está associada k-feldspato, muscovita, caulinita, diopsídio e outros filossilicatos. O fósforo, por sua vez, ocorre somente nas apatitas (Figura 3b) e aluminato-fosfatos.

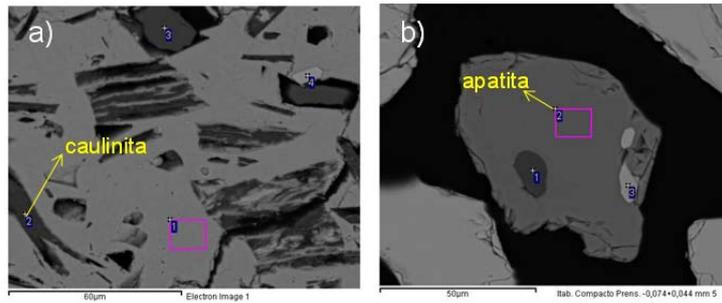


Figura 3. Caulinita na fração -1,0 +0,3 mm do itabirito friável (a) e apatita na fração -0,074 + 0,044 mm do itabirito compacto

Nenhuma das diferenças relatadas até o momento poderia explicar o desempenho obtido nos testes de moagem. Contudo, foi percebida uma ligeira diferença no tamanho dos grãos de quartzo entre as duas amostras (Figura 4). Enquanto o tamanho das partículas de hematita era praticamente o mesmo para as duas amostras, as partículas de quartzo do itabirito compacto apresentaram uma distribuição de tamanhos diferente. No compacto, cinquenta por cento do material (d50) foi menor que 50 μm , enquanto que o d50 do friável foi de 63 μm .

Testes realizados em moinho de bolas com medição precisa de potência através de torquímetro indicaram maior consumo energético para a amostra de itabirito friável, corroborando para as diferenças granulométricas evidenciadas na Figura 4.

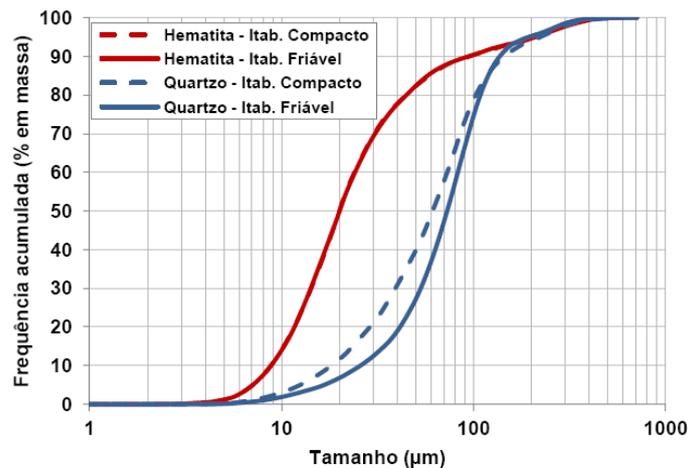


Figura 4. Distribuição de tamanho dos grãos de hematita e quartzo das amostras de itabiritos analisadas.

Outra importante diferença ainda foi evidenciada entre as amostras. O itabirito friável apresentou 94% de quartzo liberado na faixa menor que 0,3 mm, enquanto o compacto só apresentou esse grau de liberação nas partículas menores que 0,044 mm (Figura 5). Grande parte das partículas mistas apresentavam uma estrutura indicativa de fácil descompactação, ou, em termos técnicos, liberação das mesmas (Figura 6).

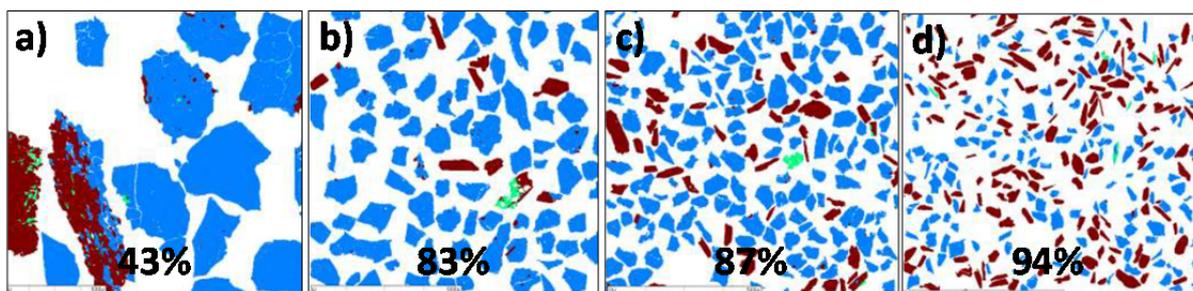


Figura 5. Liberação do quartzo nas frações de +0,3 mm (a), -0,10 +0,74 mm (b), -0,074 +0,044 mm (c) e -0,044 +0,037 mm (d) do itabirito compacto: hematita (marron), quartzo (azul) e outros minerais (verde).

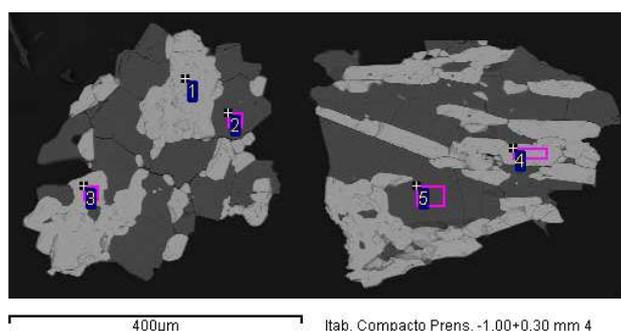


Figura 6. Típicas partículas mistas de itabirito compacto.

É importante ressaltar que o circuito do concentrador do Projeto Minas-Rio já contempla uma etapa de remoagem, objetivando um produto com média de 85% passante em 0,044 mm para o seu transporte pelo mineroduto. Assim, o itabirito compacto estaria no fim do processo produtivo, completamente liberado. A adição de uma nova etapa de concentração, após essa remoagem, certamente resultará na obtenção de um *pellet feed* com a qualidade desejada com qualquer um dos itabiritos, sem necessidade de alterações complexas no fluxograma de concentração.

4 CONCLUSÕES

Amostras de itabiritos compactos do Depósito da Serra do Sapo apresentaram menor consumo energético médio na moagem primária do que os itabiritos friáveis. A amostra representativa de itabirito compacto apresentou menor teor de ferro, alumina e perda ao fogo, consumo energético na moagem primária e grau de liberação do que a de itabirito friável.

As partículas de quartzo do itabirito compacto apresentaram uma distribuição granulométrica de menor tamanho do que a do itabirito friável. Por isso, o consumo energético na moagem do itabirito compacto foi menor que do itabirito friável.

Agradecimentos

Os autores gostariam de registrar o agradecimento aos colegas de Anglo American Bruno Pachione Sampaio Pelli e Leslie Bryson, que contribuíram para o assunto com discussões muito enriquecedoras.

REFERÊNCIAS

- 1 CRU ANALYSIS (2007). The iron ore market service: Main report 2007. CRU International Limited. Londres.
- 2 SILVA, M.L.F.A. (2009). Desenvolvimento de processos para o aproveitamento de itabiritos friáveis de baixo teor e dos itabiritos compactos – o ponto de vista da Engenharia de Projetos. In: 13º Congresso Brasileiro de Mineração, Ibram, 20p, <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00000553.pdf>> acessado em 17/7/2012.
- 3 PEREIRA, A.S.G.; MEIJON, P.H.; CASTRO, E.B.; JUNIOR, H.D.; FOGGIATTO, B. (2010) Caracterização dos itabiritos compactos da Serra Azul quanto à cominuição. In: Anais do 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 11º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 6p.
- 4 VASCONCELOS, J.A; BRANDÃO, P.R.G.; LEMOS, L.N. (2010) Caracterização mineralógica e tecnológica de itabirito compacto da mina Lagoa das Flores, MG. In: Anais do 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 11º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 11p.
- 5 SOUZA, N. (2010) Análise crítica de rotas de processamento de minério de ferro itabiríticos. Dissertação de mestrado apresentada a Escola Politécnica da UFRJ, Rio de Janeiro, 107 p.
- 6 PEREIRA, A.S.G.; MEIJON, P.H.; FELIPE, E.A.; JUNIOR, H.D.; FOGGIATTO, B. (2011) Campanha piloto de moagem dos itabiritos compactos da Serra Azul. In: Anais do 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 6p.
- 7 SILVA, K.C.; PAULA, N.N.; REIS, M.H.; FERREIRA, R.F (2011) Fechamento de circuitos de moagem com peneira de alta frequência. In: Anais do 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 9p.
- 8 GUILD, P. W. (1957) Geology and mineral resources of the Congonhas District, Minas Gerais, Brazil. U. S. Geol. Surv. Prof. Pap.290: 90p.
- 9 DORR, J.V.N. (1959) Esboço geológico do Quadrilátero Ferrífero de MG. In: DNPM-USGS. Publicação Especial 1.
- 10 BIONDI, J. C. (2003) Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros. São Paulo: Editora Oficina de Textos. 528p.
- 11 HOUAISS, A.; VILLAR, M. S. (2001) Dicionário Houaiss da língua portuguesa. Objetiva, Rio de Janeiro. p.772.
- 12 RUSSO, J. R; MAZZINGHY, D. B.; TURRER, H. D. G. (2013) Testes de prensa de rolos em escala piloto com itabirito friável e compacto. Submetido para o 68º Congresso da ABM. 9p.
- 13 DONDA, J. D. (2003) Um método para prever o consumo específico de energia na (re)moagem de concentrados de minérios de ferro em moinhos de bolas. Tese de doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerias, 47p.
- 14 ROWLAND, C. A. (1986) Ball Mill Scale-Up – Diameter Factors. In: SOMASUNDARAM, P. Advances in Mineral Processing. New York, Society of Mining Engineers, Inc., American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, p. 605-617.
- 15 BOND, F.C. (1961) Crushing and grinding calculations. Part I, British Chemical Engineering, Vol. 6, p.382.
- 16 ROWLAND, C. A. (1972) Grinding calculations related to the application of large rod and ball mills, Canadian Mineral Processors, Ottawa, Ontario.
- 17 HERBST, J. A. & FUERSTENAU, D. W. (1973) Mathematical simulation of dry ball milling using specific power information. Trans. AIME/SME, 254, pp. 343-348.
- 18 MAZZINGHY, D. B. (2009) Estudo de modelagem e simulação de circuito de moagem baseado na determinação dos parâmetros de quebra e energia específica de fragmentação. Dissertação de mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerias, 128p.

- 19 DEER, W. A., HOWIE, R. A., ZUSSMAN, J. (1997) An introduction to the rock-forming minerals. 2nd ed. England: Longman. 694p apud ROCHA, J. M. P. (2008) Definição da tipologia e caracterização mineralógica e microestrutural dos itabiritos anfíbolíticos das Minas de Alegria da Samarco Mineração S.A. – Minas Gerais. Tese de doutorado apresentada no curso de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais. Vol.1, p.51.