

## COMPORTAMENTO DE DIFERENTES MINÉRIOS DO MINAS-RIO NA COMINUIÇÃO\*

*Henrique Dias Gatti Turrer<sup>1</sup>  
José Raphael Olegário França<sup>2</sup>  
Carlos Magno Nascimento<sup>1</sup>  
Elias Fonseca de Castro<sup>1</sup>  
José Francisco Cabello Russo<sup>1</sup>  
Juliana Segura Salazar<sup>2</sup>  
Gabriel Kamilo Pantoja Barrios<sup>2</sup>  
Luís Marcelo Tavares<sup>2</sup>  
Jens Lichter<sup>3</sup>*

### Resumo

O complexo Minas-Rio da Anglo American iniciou suas operações em agosto de 2014. A usina de tratamento produziu, em 2017, quase 15 milhões de toneladas secas de concentrado. O minério, explotado no município de Conceição do Mato Dentro (MG), passa pelas etapas de cominuição, classificação, concentração e separação sólido-líquido antes de ser transportado por 529 km até o município de São João da Barra (RJ), onde é filtrado, estocado e embarcado para exportação. A preparação do minério ocupa uma posição importante no processo, tanto por viabilizar uma separação eficiente por flotação quanto o transporte no mineroduto. Entretanto o limitado conhecimento da resposta das diferentes tipologias de minério encontrados na jazida na cominuição impõe um desafio importante nessas operações. O presente trabalho objetivou a coleta de amostras nas frentes de lavra, bem como na alimentação da usina, para a realização de testes de laboratório (britabilidade de Bond, DWT, abrasividade Los Angeles e Ai, moabilidade, CLP e PLT) para a determinação de parâmetros que permitissem prever seu comportamento nas etapas iniciais de cominuição. Os resultados desses testes mostraram que os minérios apresentavam comportamentos distintos, impactando, potencialmente, o desempenho das etapas iniciais de fragmentação iniciais, podendo até afetar as etapas subsequentes de deslamagem e flotação.

**Palavras-chave:** geometalurgia, minério de ferro, britagem, moagem.

### BEHAVIOR OF DIFFERENT ORE TYPES FROM MINAS RIO DURING COMMINUTION

#### Abstract

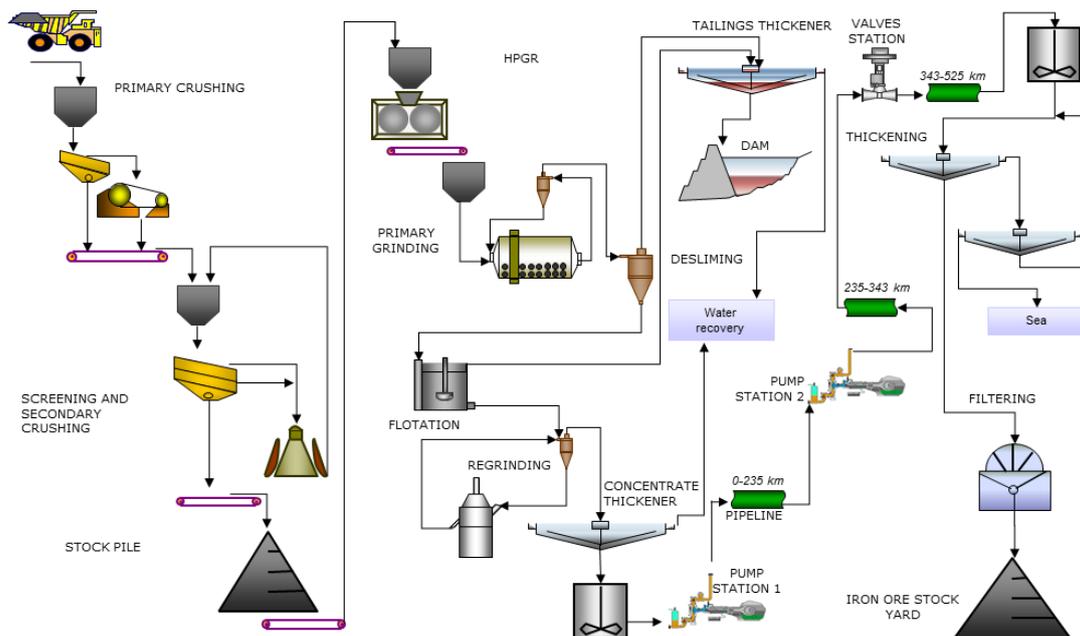
Anglo American's Minas-Rio complex started operation on 2014 August. The treatment plant produced, in 2017, almost 15 million tons of dry concentrate. The ore, exploited at Conceição do Mato Dentro at Minas Gerais State, is submitted to the stages of comminution, classification, concentration and solids-liquid separation before pumping through 529 km to reach São João da Barra at Rio de Janeiro State, where is filtered, stocked and shipped to be exported. The ore preparation has an important role in the process because it enables the concentration by flotation and pumping through pipeline. However the limited knowledge of comminution performance from the different ore lithologies occurred in the mine impose a challenge for plant operation. This work aimed the collection of samples from the mine pit and plant feeding for lab testing (Bond crushability, DWT, Ai and Los Angeles abrasivity, moability, CLP and PLT) to determine parameters that permit foreseen their behavior at initial comminution stages. The results showed that ores presented different performances in the initial comminution, affecting even the following stages, such as desliming and flotation.

**Keywords:** geometallurgy, iron ore, crushing, grinding.

- <sup>1</sup> *Gerência de Desenvolvimento de Processos da unidade de negócio Minério de Ferro Brasil da Anglo American – Rodovia MG 10, Km 180, Córrego Pereira, Conceição do Mato Dentro, MG, Brasil.*
- <sup>2</sup> *Laboratório de Tecnologia Mineral, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, Bloco F, Sala 214, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ, Brasil*
- <sup>3</sup> *Group Technical & Sustainability da Anglo American..*

## 1 INTRODUÇÃO

O minério de ferro processado no complexo industrial do Minas-Rio, Anglo American, totalizou quase 15 milhões de toneladas de concentrado em 2017. O minério é extraído da jazida da Serra do Sapo em Conceição do Mato Dentro, MG. O processamento contempla as etapas de cominuição, por britadores de mandíbulas e grelhas, britadores cônicos e peneiras, prensas de rolos, moinhos de bolas e hidrociclones, seguido por deslamagem, flotação, remoagem em moinhos verticais (para adequação da granulometria de transporte), espessamento, bombeamento por 529 km de mineroduto e separação sólido-liquido para embarque, conforme Figura 1.



**Figura 1.** Fluxograma simplificado do processamento mineral no Minas-Rio.

Os minérios lavrados no Minas-Rio são classificados em função da coesividade das amostras de furo diamantado e composição química. Existem muitos tipos de minérios, mas que podem ser classificados em três grandes grupos: itabirito (o mais abundante em toneladas e em subtipos), canga e hematita.

O conhecimento prévio do desempenho dos diferentes minérios nas etapas de beneficiamento é de fundamental importância para manutenção da eficiência do processo. Alguns estudos anteriores realizaram avaliações comparativas de desempenho de etapas selecionadas de processo do Minas-Rio entre diferentes tipos de minérios, como pode ser encontrado em Turrer et al. [1], Varela et al. [2] e Turrer et al. [3].

No caso dos processos de cominuição, existem vários testes que fornecem parâmetros importantes para essa avaliação. Testes que visam a obtenção desses parâmetros têm sido utilizados, discutidos, melhorados e reportados ao longo dos anos (Gaudin [4], Krogh [5], Díaz et al. [6]). Recentemente, Mwanga et al. [7] apresentam uma revisão sobre os principais métodos utilizados para isso e propõem um procedimento experimental que demandaria pequena quantidade de amostra.

O presente trabalho tratou da determinação de parâmetros que descrevem o comportamento dos diferentes minérios testados nos processos de cominuição que antecedem a concentração,

ou seja, devem reduzir o tamanho das partículas minerais para garantir a liberação e seletividade na flotação. Esses tipos de minérios, embora não representem isoladamente o runof mine (ROM) da usina, foram selecionados pois sua presença, mesmo em pequenas proporções, pode influenciar significativamente o desempenho dos processos de cominuição.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Materiais e Métodos

Foram selecionadas quatro amostras para o trabalho, cada uma com cerca de 200 kg e as características de cada uma estão resumidas na Tabela 1 e na Figura 2.

**Tabela 1.** Descrição das amostras testadas

Nº	Local de coleta	Tipo de minério
01	Frente de lavra	Canga CGM
02	Frente de lavra	Itabirito IFX (itemperizado e com alta alumina)
03	Frente de lavra	Itabirito IT3 (rocha fresca)
04	Frente de lavra	Itabirito IT4 (rocha fresca hidrotermalizada ou silificada)
05	Correia da usina (ROM)	Mistura alimentada na prensa (alimentação da usina)



**Figura 2.** Imagem das amostras (não estão na mesma escala): 01) CGM; 02) IFX; 03) IT3; 04) IT4; 05) alimentação da usina.

Não foi possível testar a amostra 5 em todos os ensaios devido a indisponibilidade de fragmentos na granulometria desejada. Em alguns testes, as amostras 1, 2, 3 e 4 foram britadas, com uso de martelos manuais, britadores de laboratório de mandíbula e/ou cônico.

Essas amostras foram submetidas a ensaios de determinação da densidade específica, índice de trabalho de impacto de Bond, resistência à compressão PLT (*point-load test*) e à compressão em leito de partículas (CLP), resistência à fragmentação por abrasão Los Angeles, abrasividade de Bond e moabilidade em moinhos com diâmetros de 30 e 58 cm equipados com sensores de torque. Todos esses testes foram realizados no Laboratório de Tecnologia Mineral da COPPE/UFRJ seguindo procedimentos internos.

O ensaio de britabilidade de Bond por impacto foi realizado em amostras com tamanho de 75 a 50 mm. Maiores detalhes sobre o método podem ser encontrados em Tavares e Carvalho [8].

O teste de carga pontual (PLT) foi realizado com equipamento Instron® modelo 33R5567 com célula de carga de 5.000 N e amostras com tamanho entre 37,5 e 31,5 mm.

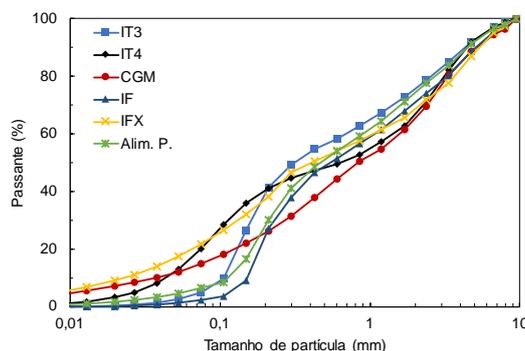
O ensaio de fragmentação por abrasão de Los Angeles foi realizado em moinho de 700 mm de diâmetro e 500 mm de comprimento equipado com barras levantadoras de 90 mm. A carga é composta por 11 bolas de aço de 48 mm de diâmetro. A amostra foi composta por duas partes, cada com 2,5 kg, de material na faixa de 19 a 12,5 mm e 12,5 e 9,5 mm. Maiores detalhes na ABNT NBR NM51 [9].

O teste de abrasividade Aifoi foi realizado com partículas entre 19 e 12,5 mm. Nele é medido o desgaste de uma peça de aço com dureza de 50 HRC depositado dentro do tambor adaptado para isso a 632 rpm por 15 min.

O teste de queda de peso (DWT) utilizou partículas numa amplitude pequena de tamanho para cada experimento. Ao todo foram realizados testes em 6 intervalos de tamanho cobrindo uma faixa de 63 até 4,75 mm. Maiores detalhes a respeito do teste podem ser encontrados em Napier-Munn et al. [10].

O teste de compressão de leitos de partículas (CLP) foi realizado com uma prensa Shimadzu® em partículas classificadas em faixas de tamanho estreita submetidas a diferentes forças de compressão. Ao todo foram ensaiadas 7 faixas de tamanho indo de tamanhos de 32 até 0,6 mm. O método é descrito em detalhe por Daniel [11].

Os testes de moabilidade foram conduzidos em dois moinhos de 58 x 24 cm com oito barras de levantamento de carga de 240 x 25 x 10 mm e bolas de aço com distribuição de tamanho igual a usada nos moinhos industriais do Minas-Rio. Os parâmetros de testes foram 75% da velocidade crítica, percentual e sólidos em peso de 76%, enchimento de bolas de 24%, enchimento da porosidade da carga moedora por material de 100%. As distribuições granulométricas das amostras originalmente recebidas variaram significativamente. A fim de limitar o seu efeito na moagem esforços foram realizados no sentido de controlar não somente o tamanho máximo alimentado aos moinhos, 9,52 mm, mas também toda a distribuição granulométrica, como é mostrado na Figura 3. Assim, o intuito não foi o de reproduzir a alimentação dos moinhos industriais, mas sim realizar ensaios sob as condições mais comparáveis para as diferentes tipologias.



**Figura 3.** Distribuição granulométrica das amostras alimentadas nos testes de moabilidade com moinho 58 x 24 cm.

Análises granulométricas foram realizadas de forma combinada, sendo realizadas por peneiramento a úmido nas faixas maiores que 0,425 mm em peneirador Ro-Tap® e por espalhamento a laser (Sympatec® Mytos) para as faixas mais finas.

Análises de fluorescência de raios-x foram realizadas para determinação da composição química em equipamento Shimadzu<sup>®</sup>, modelo EDX-720.

## 2.2 Resultados e Discussão

A Tabela 2 resume os resultados das análises químicas, os quais mostram que a amostra de IFX, de acordo com o sistema de classificação de minério da empresa, seria reclassificada para hematita. Contudo, no trabalho em questão, a terminologia de itabirito continuará sendo usada já que o difere um minério do outro é somente o teor de ferro, enquanto que para o presente trabalho, a característica mais relevante é o seu alto teor de alumina.

**Tabela 2.** Análise química das amostras

Nº	Tipo de minério	%Fe	%SiO <sub>2</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
01	CGM	53,0	5,2	8,9
02	IFX	62,5	5,5	3,2
03	IT3	36,6	47,8	<0,1
04	IT4	37,2	45,3	0,3
05	Alimentação da usina	37,5	44,0	1,4

Os testes de impacto de Wi avaliaram o comportamento das partículas mediante a aplicação de energias baixas numa taxa rápida. A distribuição granulométrica do produto tem duas populações: partículas maiores produzidas por tração e partículas menores originadas pela compressão no ponto de carga. Os resultados, resumidos na Tabela 3, mostraram que a canga se destaca por apresentar um índice significativamente mais baixo que os demais minérios, enquanto a amostra número 4 (IT4) se destaca pelo valor mais alto. As distribuições granulométricas dos produtos dos ensaios (Figura ) são muito distintas, novamente destacando a maior competência do IT4.

O teste de carga PLT aplica uma pequena e constante taxa de compressão, gerando fraturas das partículas por esforços predominantemente de tração. O produto do teste é composto, em geral, por poucas partículas de grande tamanho geradas pela compressão pontual no ponto de carga. Os resultados desse teste, resumidos também na Tabela 3, mostram a maior resistência do IT3 e IT4 em comparação às demais.

Abrasão é o principal mecanismo de quebra no teste de Los Angeles. Porém, energias de alto impacto, aproximadamente 0,3 kWh/t, também ocorrem pela queda de bolas de aço durante o movimento de rotação do tambor. Os resultados (Tabela 3 e Figura 4) mostraram que o IT3 apresenta um índice maior do que os IT4 e CGM. Os tipos 3 e 4 apresentaram comportamento de quebra semelhantes (Figura 4), com um ponto de inflexão em tamanhos de partícula da ordem de 0,3 mm. A canga, por sua vez, não apresentou ponto de inflexão distinto claramente.

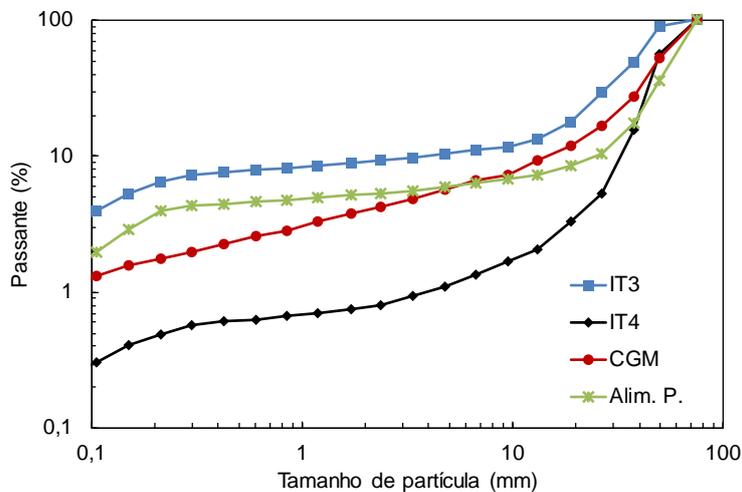
De forma análoga ao teste de abrasão LA, o teste de abrasividade Ai mostrou que a canga apresenta um padrão de quebra diferente das demais tipologias e o IT4 foi o mais competente. Ao contrário do que se poderia supor por uma análise visual dos minérios, o IFX foi mais competente do que o IT3. A amostra de ROM exibiu competência intermediária entre o IT3 e IT4. Isso certamente ocorreu porque os fragmentos menores, provenientes do itabirito friável e menos competentes, não possuem a granulometria adequada para serem testados. Logo, os fragmentos testados devem ser compostos por uma mistura de IT3 e IT4.

Os testes de queda DWT também mostraram uma mudança no comportamento da Canga em função do tamanho das partículas (Figura 5). Na fração de maior granulometria, 63-53 mm, o

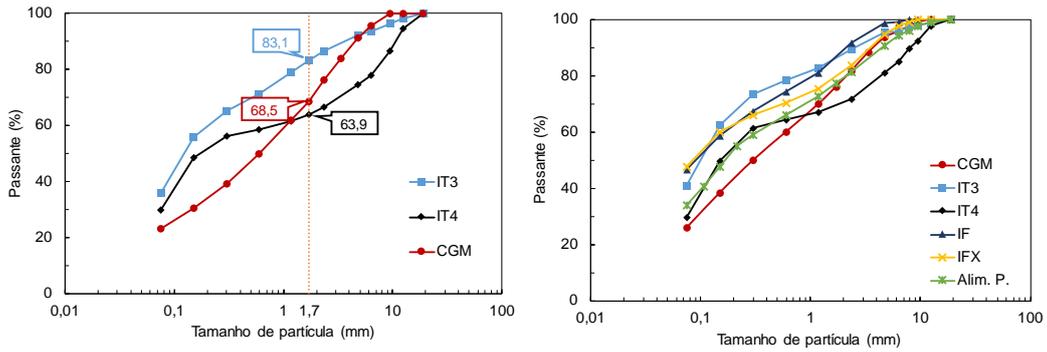
IT4 foi o mais competente, seguido do IT3 e Canga. Porém, para granulometrias menores que 16 mm, aproximadamente, a Canga exibiu maior competência.

**Tabela 3.** Resumo dos resultados de caracterização tecnológica das amostras

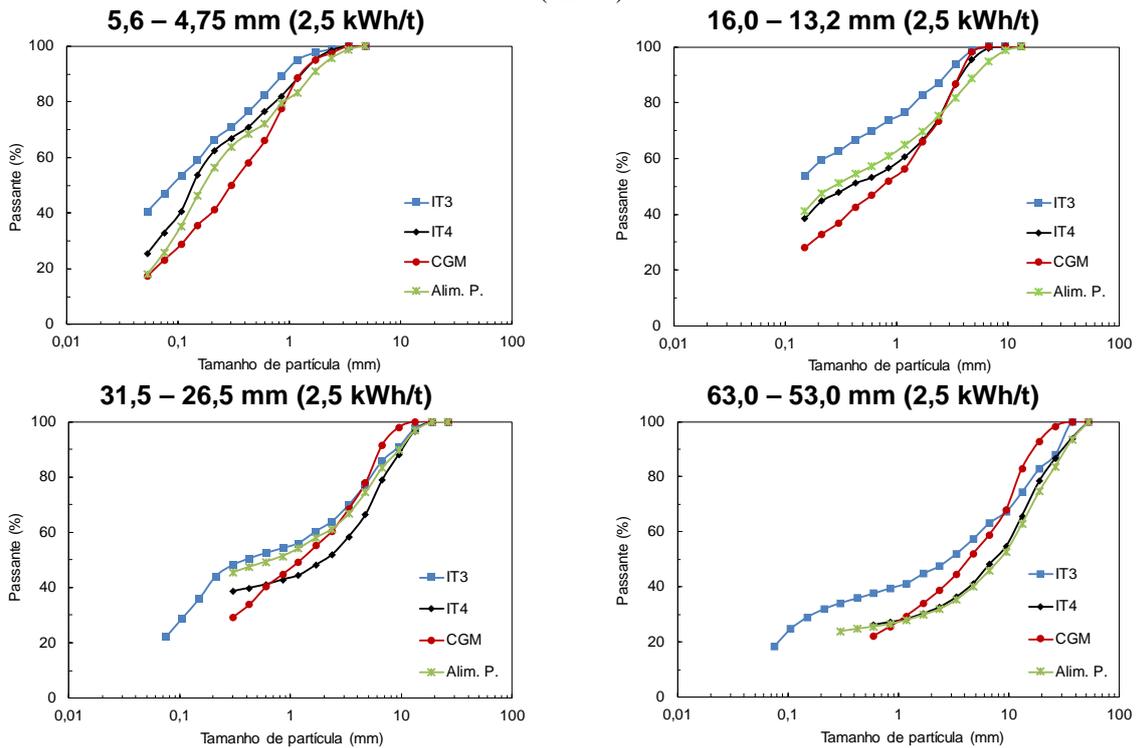
Teste	Resposta	1	2	3	4	5
		CGM	IFX	IT3	IT4	Alim. usina
Britabilidade de impacto	Wi (kWh/t)	4.3	-	6.2	8.3	7.2
	IS(20) (MPa)	2.15	1.23	11.19	17.43	4.75
Compressão PLT	Média (MPa)	1.64	6.14	11.35	18.5	6.11
	LA (%)	68.6	-	83.1	63.9	-
Abrasão	Ai (g)	0.02	0.03	0.13	0.48	0.28
	Ai >2,36mm (%)	18.11	16.1	10.7	28.1	18.4
	A	58.5	-	72.5	58.4	64.6
Queda de peso DWT	b	4.8	-	3.9	3.2	3.7
	A*b	281	-	283	187	239
	A*b total	74	-	418	198	242
Compressão CLP	A*b (6,7-5,6mm)	144	-	506	211	298
	A*b (850-600µm)	36	101	80	69	142
	> 106 µm (%)	66.6	81.4	59.1	76.3	69.8
Moabilidade: 58 x 32 cm	> 10µm (%)	28.3	32.7	12.2	13.7	19.8
	Competência (Esc/um)] <sup>^(-1/2))</sup>	5.06	5.07	7.74	4.26	6.17



**Figura 3.** Distribuições granulométricas dos fragmentos do teste de impacto de WI.

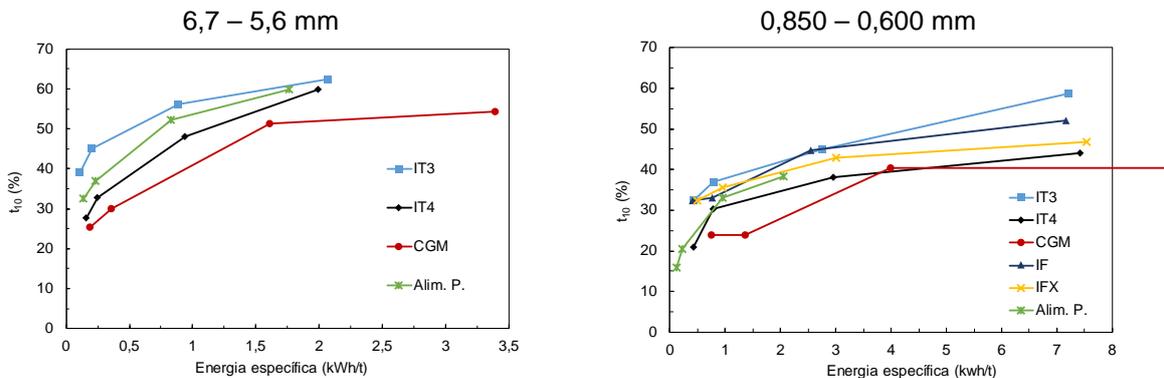


**Figura 4.** Distribuição granulométrica dos produtos do teste de abrasão LA (esquerda) e abrasividade Ai (direita).



**Figura 5.** Distribuição granulométrica dos produtos do teste DWT com energia de 2,5 kWh/t.

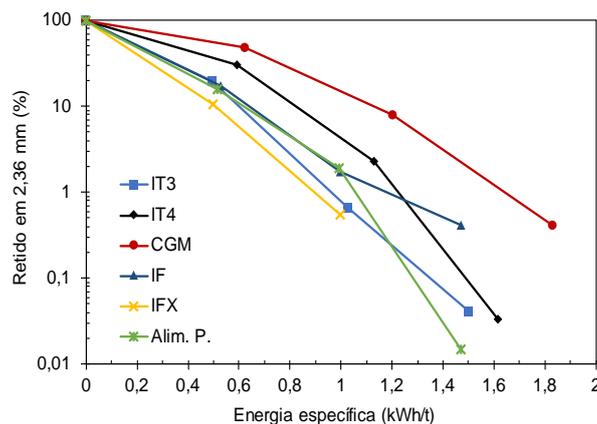
O teste que consistiu na aplicação gradativa e suave de compressão numa camada de partículas com tamanhos similares (CLP) mostrou que, diferentemente dos testes com partículas maiores, a canga possui uma competência maior (Figura 6).



**Figura 6.** Resultados de testes de compressão em leito de partículas para diferentes faixas granulométricas

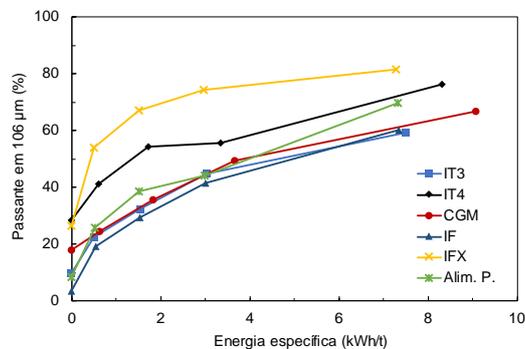
Conforme já informado, as amostras para os testes de moabilidade foram compostas de forma diferenciada, em função do moinho utilizado. No moinho de menor diâmetro objetivou-se minimizar as diferenças granulométricas entre os diferentes tipos de minério que, certamente, iriam impactar no desempenho final do teste. Enquanto no moinho de maior objetivou-se reproduzir, aproximadamente, as distribuições que alimentadas aos moinhos industrial em Minas-Rio.

Os testes no moinho, quando analisados sob a geração de finos abaixo de 2,36 mm, mostraram que a CGM e o IT4 apresentaram o pior desempenho (Figura ).



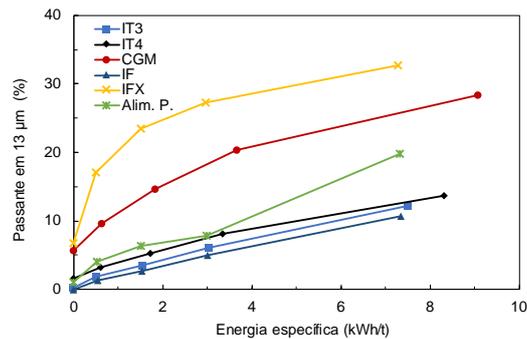
**Figura 7.** Redução da quantidade de partículas de maior diâmetro no teste de moabilidade para os diferentes tipos de minério no moinho.

Porém, quando o desempenho da moagem em batelada foi analisado sob o ponto de vista de outra malha de controle, a de 106  $\mu\text{m}$ , o desempenho nos moinhos foi diferenciado (Figura ). Essa malha foi definida em função do P80 alvo do processo de moagem industrial, aproximadamente 120 $\mu\text{m}$ . O IFX ainda foi menos competente e a amostra de alimentação da usina apresentou um comportamento intermediário. Enquanto aCGM e o IT3 foram os piores. A explicação para esse comportamento está, provavelmente, na granulometria mais grosseira, em relação as demais amostras testadas no moinho de 58 x 24 cm. Contudo, não é possível desprezar a hipótese de uma possível interação com a carga de bolas, que eram diferentes nos dois testes.



**Figura 8.** Desempenho na moagem com moinho de 58 x 24 cm.

O IFX e a CGM apresentaram uma geração de lamas, medida pelo percentual passante em 13  $\mu\text{m}$ , muito maior do que os demais minérios (Figura 9).



**Figura 9.** Geração de lama no teste demoabilidade para os diferentes tipos de minério.

Um resumo dos resultados é apresentado na Tabela 3. Trabalhos se encontram em andamento para utilizar essas informações em simulador estacionário de processos desenvolvido para os processos do Minas-Rio que vai da britagem até a deslamagem. Assim, será possível simular o efeito da composição de tipos de minério no ROM.

### 3 CONCLUSÃO

Os testes aplicados nas amostras de minérios permitiram comparar o comportamento dos mesmos nas etapas de fragmentação em britadores, HPGR e moinho tubular de bolas do Minas-Rio. O IT4 se mostrou como o maior desafio para a britagem, pois necessita de grande esforço para fragmentação das partículas e possui alta abrasividade. No HPGR, por sua vez, a CGM demandaria um maior trabalho do equipamento. Por fim, na moagem, os minérios que resultariam num maior desafio seriam o IFX, a CGM e o IT4/IT3, devido, respectivamente, a maior geração de finos, a baixa eficiência de fragmentação de partículas muito grandes e maior demanda de energia para atingimento do P80.

### REFERÊNCIAS

- [1] Turrer, HDG; Sawasato, EY; Guimarães, FR; Magalhães, CR; Dias, GS; Russo, JFC; Pimentel, DA; Mazzinghy, DB. Avaliação do consumo energético na moagem de dois diferentes tipos litológicos do depósito da Serra do Sapo. In: Anais do 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; 2014, p.278-286.
- [2] Turrer, HDG; Mazzinghy, DB; Nascimento, CM; Russo, JFC; Dias, GS. Desempenho no processamento mineral de dois tipos de itabiritos da Serra do Sapo. In: Anais do 45º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 16º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 3º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro; 2015, 9p.
- [3] Varela, JJ; Raaz, V; Mazzinghy, DB; Russo, JFC. Aplicação do teste de carga pontual modificado para seleção de britadores para minério de ferro. In: Anais do XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa; 2015, p.14-21.
- [4] Gaudin, AM. An Investigation Of Crushing Phenomena. The American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers; 1926, 58p.

- [5] Krogh, SR. Determination of Crushing and Grinding Characteristics Based on Testing of Single Particles. The American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers; 1980, 6p.
- [6] Díaz, E; Voisin, L; Kracht, W; Montenegro, V. Using advanced mineral characterisation techniques to estimate grinding media consumption at laboratory scale. Minerals Engineering; 2018, v.121, p.180–188.
- [7] Mwanga, A; Lamberg, P; Rosenkranz, J. Comminution test method using small drill core samples. Minerals Engineering; 2015, v.72, p.129-139.
- [8] Tavares, LM; Carvalho, RM. Impact work index prediction from continuum damage model of particle fracture. MineralsEngineering; 2007, v.20, p.1.368-1.375.
- [9] ABNT NBR NM51. Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”; 2001, 6p.
- [10] Napier-Munn, TJ, Morrell, S, Morrison, RD, Kojovic, T. Mineral comminution circuits: their operation and optimisation (1 ed.). Australia: Julius Kruttschnitt Mineral Research Center; 1996.
- [11] Daniel, MJ. HPGR model verification and scale-up. Master’ s thesis. Brisbane, Australia: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, Department of Mining and Metallurgical Engineering, University of Queensland; 2002.