

ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE MINERALOGIA, MORFOLOGIA E MOABILIDADE DE MINÉRIOS DE CARAJÁS¹

Bianca Foggiatto²

Homero Delboni Júnior³

Thiago Luis Alves Jatobá⁴

Marco Túlio Santiago Ferreira⁵

Resumo

Desde 2006 o circuito de moagem de Carajás é alimentado com R.O.M. selecionado nas frentes de lavra e misturas de minério contendo produto granulado. Este cenário é resultante de variações na demanda e nos preços dos produtos de minério de ferro. O presente trabalho teve por objetivo analisar as possíveis relações entre a mineralogia e morfologia dos minerais presentes ante ao índice de moabilidade de Bond. Trata-se de uma primeira abordagem visando estabelecer uma relação entre características dos minérios e o respectivo desempenho no circuito de moagem de Carajás. Foram realizadas amostragens em quatro frentes de lavra e na usina de Carajás (produto granulado e *sinter feed*). Na etapa de caracterização tecnológica empregou-se a difração de raios-X para identificar fases minerais, e para quantificar tais fases, cálculos estequiométricos realizados a partir da análise química e contagem de grãos em microscópio óptico. O índice de moabilidade de Bond foi também determinado para cada amostra. Foram conduzidas análises estatísticas para verificar a existência de relações entre os dados obtidos. Na quantificação das fases minerais ambas as técnicas empregadas mostraram-se eficazes, sendo que a contagem apresentou a vantagem de permitir a quantificação das morfologias de hematita. Nas análises estatísticas foram verificadas duas fortes correlações: entre a porcentagem em massa de hematita e a moabilidade e entre a porcentagem em massa de goethita e a moabilidade, sendo que as porcentagens de hematita e de goethita apresentam relações inversas. Para as amostras em estudo não foram observadas correlações significativas entre as diferentes morfologias de hematita e a moabilidade do minério.

Palavras-chave: Minério de ferro; Moabilidade; Mineralogia; Análise de desempenho.

ANALYSIS OF THE RELATION BETWEEN MINERALOGY, MORPHOLOGY AND GRINDABILITY OF CARAJÁS ORES

Abstract

Since 2006 the Carajás grinding circuit has been processing Run-of-Mine ores from selected mining areas, as well as blends with relatively coarse products. This scenario results from market demands for the various products. As both circuit capacity and mass recovery is currently affected by a variety of feed characteristics, the aim of this work was to investigate selected ore characteristics with respective breakage characteristics. Accordingly, mineralogy and morphology were first evaluated and latter analyzed in terms of relationships with Bond Work Index - WI. Such a study is here considered as a solid first step for predicting the Carajás grinding circuit as a function of feed characteristics. Samples were obtained in four different mining areas, as well as in the Carajás beneficiation plant. The sequence of the experimental work included identification of minerals by X-ray diffraction, mineral quantification by stoichiometric calculations and grain counting under optical microscope, as well as WI testing in all selected samples. Statistical analyses were used to assess relationships between most frequent minerals and the WI test results. Two major correlations were observed in the statistical analysis: the first between amount of hematite and WI, and the second between amount of goethite and WI.

Key words: Iron ore; Grindability; Mineralogy; Performance analysis.

¹ Contribuição técnica ao 39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 10º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 22 a 26 de novembro de 2009, Ouro Preto, MG.

² Mestre, Pesquisadora do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica - USP.

³ Doutor, Professor do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica - USP.

⁴ Graduando em engenharia de minas, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica - USP.

⁵ Especialista em processos minerais, Gerência de Otimização de Processos, Divisão de Ferrosos Norte, VALE.

1 INTRODUÇÃO

O circuito de moagem de Carajás foi inicialmente projetado para processar *sinter feed* para produção de *pellet feed*, em função da demanda destes produtos. Nesse processo há geração significativa de finos, que são descartados, acarretando, portanto, em perdas. O descarte é em função do tamanho das partículas, já que as especificações dos teores dos compostos de interesse sejam atendidas.

Além da perda de material com teores altos de ferro, desde 2006 o circuito vem sendo alimentado não apenas com *sinter feed*, mas também com material granulado e *run of mine* (R.O.M.) de qualidade adequada para *pellet feed*, selecionado nas frentes de lavra de Carajás. Trata-se de um cenário que resulta de variações da demanda e dos preços dos produtos de minério de ferro.

Um melhor entendimento das características dos vários tipos de minérios, bem como de sua relação com o desempenho do circuito de moagem, é aqui considerada uma forma adequada de aumentar a recuperação em massa e a produtividade do circuito. Nesse contexto, foram conduzidas análises mineralógicas para identificar e quantificar as espécies minerais presentes nas amostras de Carajás, uma vez que estes apresentam comportamentos diferentes no processo de cominuição.

O escopo do trabalho incluiu as seguintes etapas:

- execução de amostragens na mina e no circuito industrial; e
- caracterização das amostras coletadas quanto à moabilidade (ensaio de Bond), composição química e mineralógica.

Visando avaliar relações entre a mineralogia e o comportamento quanto à fragmentação, foram realizadas análises estatísticas empregando-se os resultados obtidos na caracterização tecnológica dos principais tipos de minérios de Carajás.

2 COLETA DE AMOSTRAS

Para obtenção de amostras para ensaios de caracterização dos minérios de Carajás foram realizadas amostragens nas frentes de lavra das minas N4 e N5, bem como em pontos da usina de Carajás. As frentes de lavra selecionadas para amostragem foram aquelas que possuíam minério típico de alimentação da moagem, qual seja, composto por hematita mole a pulverulenta e dentro das especificações quanto ao teor de fósforo, alumina e manganês. As frentes de lavra amostradas foram: N4E, N4W Central, N4WN e N5W. Na usina foram coletadas amostras de produtos que são tipicamente utilizados para alimentar o circuito de moagem, quais sejam *sinter feed* (SFCK) e produto granulado (NP2). O produto granulado foi empregado para compor duas amostras, contendo misturas de ROM e material granulado nas seguintes proporções: 85/15% e 70/30%.

As amostras foram homogeneizadas por pilha alongada e quarteadas no Laboratório Físico de Carajás, sendo as subamostras encaminhadas para caracterização tecnológica.

3 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

3.1 Análise Química

As análises químicas via úmida foram realizadas segundo o procedimento interno da Vale. A determinação de FeO foi realizada pela SGS Geosol por

solubilização em HCl e titulação com $K_2Cr_2O_7$. Os teores dos elementos/compostos estão listados na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados das análises químicas

Elemento/ Composto	Teores (%)						
	N4W Central	N4E	N4WN	N5W	SFCK	NP2 15%	NP2 30%
Fe total	67,84	68,41	68,71	67,30	66,84	67,64	67,61
SiO ₂	0,80	0,59	0,53	0,65	1,11	0,73	0,83
P	0,02	0,02	0,02	0,04	0,03	0,02	0,02
Al ₂ O ₃	0,38	0,51	0,23	0,48	0,85	0,66	0,69
Mn	0,08	0,35	0,15	0,82	0,60	0,49	0,41
MgO	0,07	0,07	0,07	0,09	0,05	0,04	0,05
PPC	1,61	0,51	0,68	1,36	1,51	1,12	1,12
FeO	1,26	1,80	1,15	0,03	0,06	0,30	0,03

O teor de ferro mais elevado foi observado para a amostra N4WN, enquanto os teores de sílica e alumina foram mais altos para o *sinter feed*. As amostras de mistura também apresentaram teores de sílica e alumina relativamente altos. As amostras apresentaram grande variação no teor de manganês, já que o intervalo de variação observado foi entre 0,08 a 0,82%, respectivamente para N4W Central e N5W, respectivamente. A perda ao fogo foi outro parâmetro que indicou variações importantes principalmente para as amostras N4E e N4W Central.

Os teores de impurezas especificados pela Vale para o produto *pellet feed* moído estão listados na Tabela 2, conforme variações para os diversos clientes.

Tabela 2. Especificações para os teores de impurezas do pellet feed de Carajás⁽¹⁾

	Teores (%)	
	Limite Inferior	Limite Superior
SiO ₂	0,90%	1,50%
P	0,029%	0,051%
Al ₂ O ₃	1,30%	1,90%
Mn	0,44%	0,86%

Nota-se que o limite inferior de alumina não foi atingido por nenhuma amostra, isto é, todas as amostras apresentaram teores menores que o limite inferior. O teor de manganês da amostra N5W foi maior que o limite superior, porém a diferença foi muito pequena. À exceção da amostra de *sinter feed*, todas as amostras apresentaram teores de sílica menores que o limite inferior.

3.2 Identificação das Fases Minerais

A difração de raios-X é uma metodologia que permite identificar as fases minerais a partir do espectro gerado por sua estrutura cristalina.⁽²⁾ Cada uma das sete amostras listadas na seção anterior foi submetida a difratometria de raios X, realizadas no Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da USP (LCT-EPUSP), com a finalidade de gerar uma primeira aproximação qualitativa dos minerais existentes nas amostras. Para tanto, cada amostra foi pulverizada inicialmente em moinho de panela, sendo que as pastilhas foram preparadas pela técnica de *back loading*, que consiste no pressionamento do pó contra a abertura de lâmina de alumínio, disposta sobre superfície lisa e firme.

As amostras foram submetidas à difratometria de raios X através do método do pó utilizando-se difratômetro de raios X, marca Philips, modelo MPD 1880. Os difratogramas obtidos foram comparados com o banco de dados do *International Centre of Diffraction Data* (ICDD). Para a interpretação dos difratogramas utilizou-se o programa X'Pert HighScore Plus. Os minerais identificados estão listados na Tabela 3.

Tabela 3. Minerais identificados na difração de raios X

Fases Minerais	Fórmula química	N4W Central	N4E	N4WN	N5W	SFCK	NP2 15%	NP2 30%
Hematita	Fe ₂ O ₃	X	X	X	X	X	X	X
Magnetita	Fe ₃ O ₄	X	X	X	X	X	X	
Goethita	FeO(OH)	X	X	X	X	X	X	X
Quartzo	SiO ₂			X		X	X	X
Gibbsite	Al(OH) ₃	X			X			

Apesar de não identificados na difração de raios X, devido aos limites de detecção do equipamento, foram considerados outros minerais na análise mineralógica, que não aqueles apresentados na Tabela 3. Tal procedimento foi adotado em função dos dados da análise química e em informações fornecidas pela geóloga Linda H. Fujikawa da Vale. Desta maneira, foi considerada a presença de: (a) minerais portadores de manganês, genericamente chamados de óxidos e (b) hidróxidos de manganês; e dois argilominerais portadores de alumínio, a gibbsite e a caulinita.

3.3 Quantificação das Fases Minerais

Os métodos para quantificação mineralógica são essencialmente baseados na contagem de grãos, independentemente dos recursos auxiliares utilizados. Essa metodologia é apoiada em avaliações visuais, o que pode levar a resultados imprecisos e de baixa reprodutibilidade, uma vez que os resultados obtidos são dependentes do operador. Para minimizar tais desvios são utilizados sistemas de análise de imagens automatizados, nos quais são ressaltadas as variações de cor entre as espécies minerais e operações entre imagens binárias resultam na quantificação das espécies. A aplicação de tal técnica aos minérios de ferros apresenta o inconveniente de os minerais de ferro apresentarem números atômicos muito semelhantes,⁽³⁾ resultando em níveis de cinza similares quando observados ao microscópio eletrônico, dificultando a análise entre magnetita e hematita, bem como a análise morfológica.

Para a quantificação das fases minerais presentes nas amostras de Carajás, duas técnicas foram empregadas, quais sejam, cálculos estequiométricos utilizando os resultados das análises químicas e contagem de grãos em microscópio óptico de luz refletida.

3.3.1 Estequiometria

Utilizando os teores obtidos nas análises químicas foram realizados cálculos estequiométricos, uma vez que as espécies minerais presentes foram determinadas. O mesmo procedimento de cálculos foi adotado para cada uma das amostras. Como

o ferro e o alumínio estão presentes em mais de uma espécie mineral, cada um dos minerais teve sua porcentagem determinada por um cálculo específico.

A magnetita foi o primeiro mineral a ter sua quantidade determinada. A porcentagem de magnetita foi diretamente calculada dividindo-se o teor de FeO obtido na análise química pela porcentagem em massa de FeO na magnetita (31,03%). A porcentagem de óxidos e hidróxidos de manganês foi determinada diretamente pelo teor de manganês e a quantidade de gibsita e a caulinita, pelo teor de alumínio. Com base no teor de alumínio total e na perda ao fogo, foi calculada a quantidade de cada um destes minerais, de forma a obter a porcentagem de quartzo. Esta porcentagem foi calculada pela diferença entre a sílica total e a sílica presente na caulinita. Subtraindo-se da água total a água presente na caulinita, na gibsita e nos hidróxidos de manganês, foi então calculado a porcentagem de goethita e, por fim, a porcentagem de hematita foi obtida a partir do ferro restante, ou seja, a diferença entre o ferro total na amostra e o ferro contido na magnetita e na goethita.

A Tabela 4 mostra os resultados obtidos para as sete amostras de Carajás, em porcentagem da massa.

Tabela 4. Resultado da quantificação dos minerais através de cálculos estequiométricos

Fases Minerais	Teores (%)						
	N4W Central	N4E	N4WN	N5W	SFCK	NP2 15%	NP2 30%
Hematita	80,3	90,0	89,4	87,4	85,6	88,6	89,5
Magnetita	4,1	5,9	3,8	0,1	0,2	1,0	0,1
Goethita	14,1	2,3	5,8	10,2	11,3	8,3	8,2
Ox/Hidroxi Mn	0,1	0,4	0,2	0,9	0,7	0,5	0,5
Quartzo	0,8	0,4	0,3	0,6	0,1	0,0	0,0
Gibsita/Caulinita	0,6	1,0	0,6	0,8	2,2	1,7	1,7

Verifica-se que a amostra N4E e a amostra N4W Central apresentam, respectivamente, a maior e a menor porcentagem de hematita. As amostras N5W, SFCK e as misturas apresentaram quantidades muito baixas de magnetita, enquanto as demais amostras apresentaram porcentagens superiores a 3,8% deste mineral. A goethita, apesar de presente em todos os tipos de minério, apresentou uma porcentagem muito menor do que a média (8,6%) para a amostra N4E. A amostra N4W Central mostrou a maior porcentagem desse mineral, com 14,1%. A porcentagem em massa de quartzo foi menor que 0,8% para todas as amostras de Carajás. Os minerais portadores de alumínio estiveram presentes em todas as amostras, porém as amostras de SFCK e as misturas apresentaram quantidades significativamente maiores.

3.3.2 Microscopia ótica

A contagem de grãos foi realizada em microscópio óptico de luz refletida, marca Olympus, modelo BX60MF. As amostras foram submetidas a uma etapa inicial de preparação, na qual as amostras foram cominuídas em britador de mandíbulas e em britador de rolos, de maneira que todo o material passasse na malha 3,36 mm. Posteriormente, os produtos obtidos foram submetidos ao peneiramento nas malhas 1,00 mm; 0,50 mm; 0,25 mm e 0,105 mm. As frações do peneiramento foram quarteadas e utilizadas para a confecção de pastilhas polidas.

Como a fração menor que 0,105 mm já é considerada como produto final do circuito de moagem e devido à limitação do aumento em microscópio óptico (objetiva com aumento de até 50 vezes), esse material não foi utilizado na contagem de grãos.

Um quadrado virtual foi delimitado dentro da pastilha, com intuito de evitar os efeitos de borda. Com o auxílio do *charriot*, linhas inteiras tiveram seus grãos contados, totalizando no mínimo 500 grãos por fração, ou seja, 2.000 grãos por amostra. Como o “quadrado” teve a mesma dimensão para todas as pastilhas, as linhas tiveram seu espaçamento definido de acordo com o tamanho dos grãos analisados. Devido ao tamanho dos grãos, aumentos distintos foram selecionados, de maneira que o campo visual englobasse pelo menos um grão inteiro: para a fração maior que 1 mm foi empregado um aumento de 5 vezes e para as demais frações, aumentos de 10 vezes.

• Descrição das fases minerais de ferro

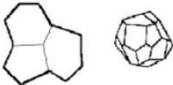
Os principais minerais de ferro são a hematita e a magnetita, que ocorrem em conjunto com outros minerais oxidados de ferro, secundários, chamados genericamente de limonita, que são formados pela alteração e hidratação das variedades primárias.⁽⁴⁾ Um exemplo de limonita é a goethita.

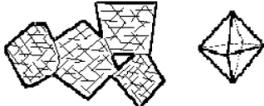
A hematita é um óxido férrico (Fe_2O_3) que contém 70% de ferro e ocorre em cristais usualmente tabulares. É a principal variedade mineral que predomina em formações ferríferas dos minérios brasileiros, apresentando-se sob diferentes texturas. Os principais tipos texturais são: microcristalina, lobular, lamelar e granular. A magnetita (Fe_3O_4) é um mineral com forte brilho metálico, que se apresenta na forma maciça granular. É fortemente magnética e é composta por 72,4% de Fe. É um mineral de ferro comum, que freqüentemente se encontra distribuído na forma de mineral acessório em rochas ígneas. Quando alterada em hematita é denominada martita.

A goethita (FeO(OH)) é um mineral que geralmente apresenta textura porosa. É um dos minerais mais comuns, pois ocorre em condições de oxidação, como produto do intemperismo dos minerais portadores de ferro.

A Tabela 5 apresenta as principais texturas de cristais de óxidos/hidróxidos de ferro, conforme padrões da Vale.

Tabela 5. Tipos texturais de óxidos e hidróxidos de ferro ⁽⁵⁾

Tipo	Forma/ textura	Ilustração esquemática
Hematita microcristalina	- cristais muito pequenos, <0.01mm - textura porosa - contatos pouco desenvolvidos	
Hematita lobular	- formatos irregulares inequidimensionais - contatos irregulares, geralmente imbricados	
Hematita granular	- formatos regulares equidimensionais - contatos retilíneos e junções tríplices - cristais compactos	
Hematita lamelar	- cristais inequidimensionais, hábito tabular - contatos retilíneos - cristais compactos	

Magnetita	- cristais euédricos, isolados ou em agregados - cristais compactos	
Martita	- hematita com hábito de magnetita - oxidação segundo os planos cristalográficos da magnetita - geralmente porosa	
Goethita	- material amorfo e/ou criptocristalino - estrutura coliforme, hábito botrioidal - textura porosa	

• Resultados da contagem de grãos

Após a compilação dos dados da contagem de grãos foi possível calcular a porcentagem de cada fase mineral de ferro por faixa granulométrica. Os demais minerais portadores de manganês e alumínio e o quartzo foram agrupados e denominados “outros”. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.

De acordo com a Tabela 6, a amostra N4W Central apresentou uma concentração de hematita granular nas partículas entre 0,50 e 0,25 mm. Na mesma amostra, as frações mais grossas que 0,50 mm apresentaram maior proporção de goethita e magnetita.

Na amostra N4E nota-se uma concentração na fração mais fina (- 0,250 + 0,105 mm) de martita, magnetita e goethita. Nas frações mais grossas que 0,25 mm foram observadas maiores quantidades das diferentes morfologias da hematita.

Já a amostra N4WN apresentou porcentagens de goethita significativamente mais elevadas do que as demais amostras, em todas as faixas granulométricas. Valores altos de hematita granular e microcristalina foram registrados em frações mais finas que 0,50 mm.

As menores porcentagens de magnetita e martita foram obtidas para a amostra N5W e as principais morfologias de hematita presentes nesta amostra são a hematita microcristalina e a lobular, para todas as faixas de tamanho analisadas.

No *sinter feed* (SFCK) quantidades relativamente pequenas de hematita granular foram observadas para todas as faixas de tamanho analisadas. Ainda, as maiores porcentagens foram obtidas para a hematita microcristalina e lobular.

As amostras de mistura apresentaram distribuição dos minerais de ferro e suas morfologias muito semelhantes, com pequenas quantidades de martita e magnetita, porém a amostra de NP2 a 30% apresentou uma quantidade maior de hematita lamelar.

Todas as amostras de Carajás apresentaram quantidade significativamente maior de hematita, do que dos demais minerais de ferro presentes nestas amostras. Os gráficos das Figuras 1 e 2 mostram as distribuições dos minerais listadas na Tabela 6.

Tabela 6. Resultados da contagem de grãos

Amostra	Fração	Retido simples (%)	Hematita (%)				Martita (%)	Magnetita (%)	Goethita (%)	Outros (%)
			Micro-cristalina	Lobular	Granular	Lamelar				
N4W Central	+ 1,0 mm	25,0	16,2	19,1	28,2	4,6	4,0	6,8	18,9	2,2
	+ 0,5 mm	13,1	14,9	20,5	26,0	2,7	3,0	10,6	17,5	4,8
	+ 0,25 mm	9,6	15,5	14,6	54,2	0,3	1,8	5,0	4,8	3,7
	+ 0,105 mm	19,2	17,3	28,6	35,4	7,2	1,7	2,7	6,2	0,9
	+ 0,105 mm global	66,8	16,2	21,5	33,6	4,4	2,8	6,1	13,0	2,5
N4E	+ 1,0 mm	54,3	22,3	19,4	16,6	9,5	11,6	10,9	6,7	2,9
	+ 0,5 mm	15,1	37,7	25,4	15,7	6,2	6,6	6,3	1,3	0,8
	+ 0,25 mm	8,2	27,6	33,3	22,6	3,5	4,5	6,4	0,9	1,1
	+ 0,105 mm	10,2	21,0	7,5	9,6	9,6	24,1	18,3	9,8	0,0
	+ 0,105 mm global	87,7	25,3	20,3	16,2	8,4	11,5	10,5	5,6	2,0
N4WN	+ 1,0 mm	33,4	20,2	14,8	21,8	10,5	17,5	4,9	10,3	0,1
	+ 0,5 mm	18,2	20,5	19,0	15,1	4,5	17,6	5,5	13,4	4,5
	+ 0,25 mm	12,8	34,4	12,6	23,8	1,2	16,1	3,1	6,6	2,3
	+ 0,105 mm	11,6	26,4	16,3	41,0	1,0	10,1	0,7	3,3	1,1
	+ 0,105 mm global	76,0	23,6	15,7	23,5	6,0	16,2	4,1	9,4	1,7
N5W	+ 1,0 mm	42,0	33,8	35,0	12,7	6,6	3,2	1,8	3,6	3,3
	+ 0,5 mm	17,3	25,7	27,5	13,5	3,8	1,8	2,2	16,5	9,1
	+ 0,25 mm	9,6	49,1	20,6	9,9	1,6	0,2	0,7	7,4	10,5
	+ 0,105 mm	11,8	39,3	29,8	8,4	1,4	0,2	0,3	14,4	6,1
	+ 0,105 mm global	80,7	34,7	30,9	11,9	4,6	2,1	1,5	8,4	5,8
SFCK	+ 1,0 mm	37,9	32,8	27,8	6,5	8,6	4,0	3,6	10,5	6,3
	+ 0,5 mm	14,6	25,9	31,6	5,1	5,4	5,8	5,3	13,9	7,0
	+ 0,25 mm	9,1	32,1	11,3	6,5	10,7	13,8	9,9	9,6	6,2
	+ 0,105 mm	14,6	34,8	29,5	8,0	3,3	6,0	3,8	8,6	6,0
	+ 0,105 mm global	76,2	31,8	26,9	6,5	7,2	5,9	4,7	10,7	6,4
NP2 15%	+ 1,0 mm	33,4	32,2	24,2	12,5	11,6	9,5	2,1	5,6	2,3
	+ 0,5 mm	18,4	22,0	24,7	13,4	5,7	3,1	7,3	15,0	8,7
	+ 0,25 mm	10,9	34,2	31,8	17,9	2,0	1,1	0,9	3,6	8,3
	+ 0,105 mm	15,5	23,9	40,7	16,8	2,0	3,9	1,8	8,6	2,3
	+ 0,105 mm global	78,2	28,4	28,6	14,3	7,0	5,7	3,1	8,1	4,6
NP2 30%	+ 1,0 mm	28,5	24,0	41,6	12,2	9,6	3,1	1,4	5,3	2,7
	+ 0,5 mm	15,8	25,6	13,8	9,8	19,5	11	6,2	13,0	0,4
	+ 0,25 mm	11,4	32,4	29,0	16,8	9,3	11,8	1,3	6,3	2,7
	+ 0,105 mm	20,0	21,2	40,9	9,8	14,2	2,8	1,4	5,9	3,9
	+ 0,105 mm global	75,7	24,8	33,7	11,8	12,8	4,7	2,4	7,2	2,5

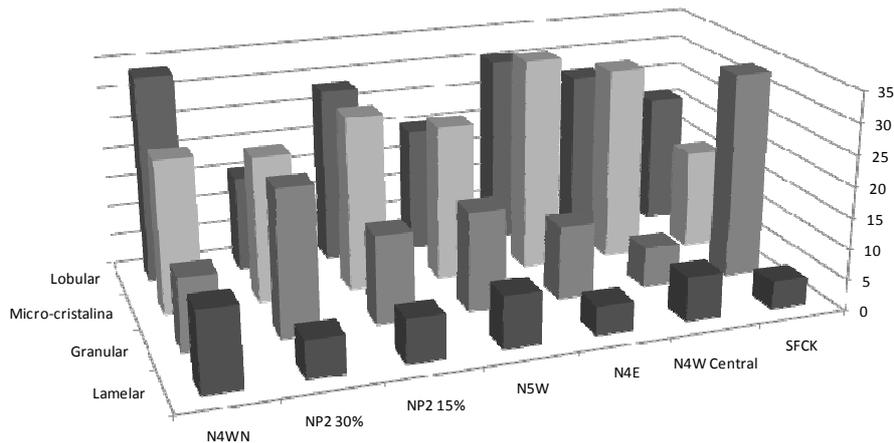


Figura 1. Gráfico da distribuição das morfologias de hematita por amostra de Carajás.

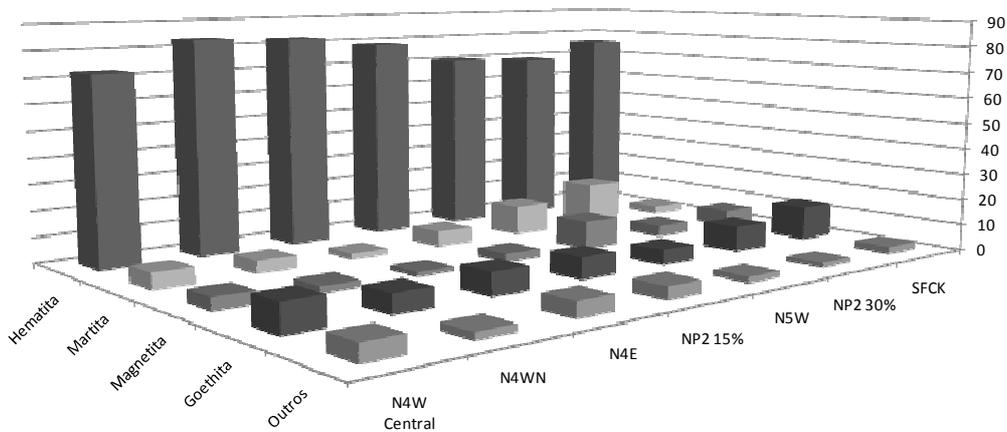


Figura 2. Gráfico da distribuição dos minerais presentes nas amostras de Carajás.

3.4 Ensaios de Moabilidade (*Work Index* ou *WI de Bond*)

O índice de moabilidade de Bond é uma forma de caracterizar o comportamento de minérios quanto à fragmentação e é determinado pelo ensaio proposto por Bond em 1952.⁽⁶⁾ O ensaio é conduzido a seco em circuito fechado com peneiramento para simular as condições de recirculação de um circuito industrial, até que o equilíbrio seja estabelecido. O procedimento que Bond sugeriu foi posteriormente normatizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas.⁽⁷⁾

Cada uma das sete amostras objeto do presente estudo foi submetida ao ensaio de moabilidade de Bond, no Laboratório de Tratamento de Minérios da Escola Politécnica da USP. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Resultados dos ensaios de moabilidade de Bond⁽⁸⁾

Amostra		N4W Central	N4E	N4WN	N5W	SFCK	NP2 15%	NP2 30%
Porcentagem passante em 0,105 mm da alimentação	%	19,2	28,7	20,4	20,8	11,7	21,6	19,5
P ₈₀ da alimentação	mm	1,50	1,30	1,80	2,00	2,40	1,85	1,90
P ₈₀ da fração passante na malha teste no último período	mm	0,113	0,128	0,140	0,122	0,130	0,12	0,119
Média dos últimos três valores de gramas por revolução	g/revol	1,171	3,428	2,276	2,056	1,552	1,913	1,859
WI	kWh/st	18,1	8,4	11,7	11,4	14,6	12,1	12,3

Os valores listados apresentam variação significativa, sendo os extremos formados por uma amostra com valor de 8,4 kWh/st (N4E) e uma amostra com valor de 18,1 kWh/st (N4W Central). A média das sete amostras foi de 12,7 kWh/st com desvio padrão de 3,0. A partir da divisão do desvio padrão pela média das amostras obtém-se coeficiente de variação do WI, que resultou em 23%.

4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para verificar a existência de relações entre a mineralogia/morfologia dos minérios de Carajás e sua moabilidade foi selecionado o coeficiente de Pearson entre os pares das variáveis de interesse, com o auxílio do programa de análise estatística *SPSS Statistics*. Os valores significativos para o coeficiente são os mais próximos de 1 ou -1, o que evidencia a existência de correlação mas não, necessariamente, de causa e efeito. Zero consiste em falta de correlação.

Foram consideradas como variáveis independentes os teores de cada mineral analisado (e morfologias na contagem de grãos) pelos dois métodos quantitativos, a saber, estequiometria e contagem de grãos. As variáveis dependentes foram o WI, a porcentagem passante em 0,015 mm na amostra preparada para análise em microscópio óptico (denominada finos).

A partir dos valores obtidos para os dados da estequiometria, foi observado que existe uma forte correlação negativa entre a quantidade de hematita e o WI, com coeficiente de - 0,916. Já para a quantidade de goethita tal correlação foi igualmente forte porém positiva, além de apresentar um coeficiente de correlação de - 0,904 entre a quantidade de finos e a quantidade de goethita. Para a correlação entre a quantidade de hematita e de goethita e o WI foram obtidas significâncias abaixo de 0,006, sugerindo a dependência entre estas variáveis.

Na análise estatística da contagem de grãos foram incluídas as texturas dos minerais de ferro como variáveis independentes. Não foram observadas correlações entre as texturas de hematita e as duas variáveis analisadas. A correlação entre a quantidade de goethita e o WI teve o melhor resultado para as correlações: 0,960 para o coeficiente de Pearson e significância igual a 0,001. As quantidades obtidas para as texturas de hematita e martita foram somadas e resultaram na quantidade de hematita total. A análise de deste parâmetro resultou em uma correlação negativa com coeficiente de Pearson de 0,650, valor menor do que aquele obtido na análise anterior.

Com base nos resultados obtidos foram traçados gráficos para os pares de variáveis que apresentaram as maiores correlações, tanto para a estequiometria como para a contagem de grãos:

- WI em função da quantidade de hematita (Figura 3);

- WI em função da quantidade de goethita (Figura 4); e
- Quantidade de finos (fração passante em 0,105 mm) em função da quantidade de goethita (Figura 5).

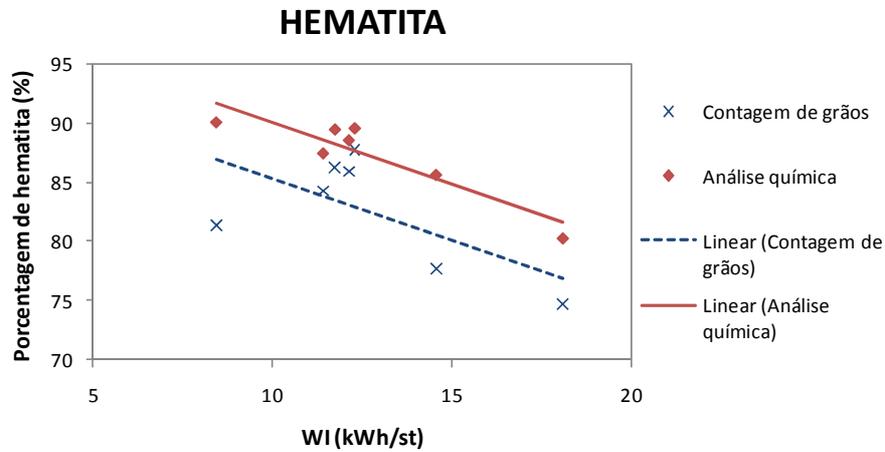


Figura 3. Gráfico do WI em função da quantidade de hematita.

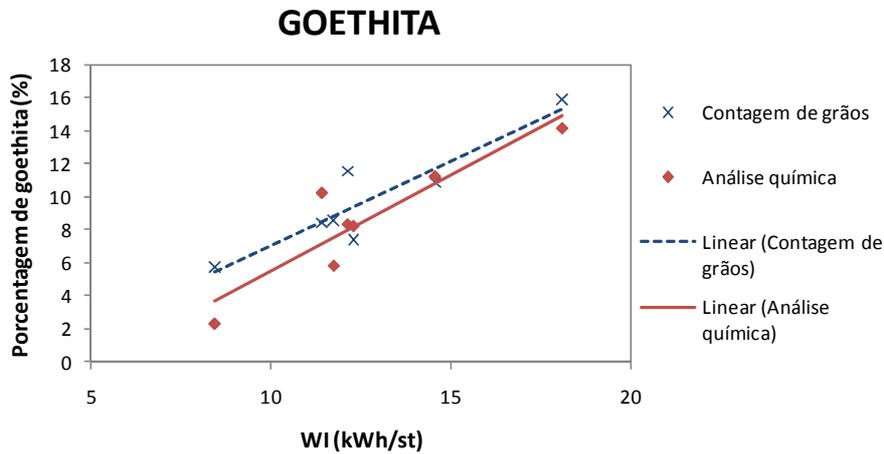


Figura 4. Gráfico do WI em função da quantidade de goethita.

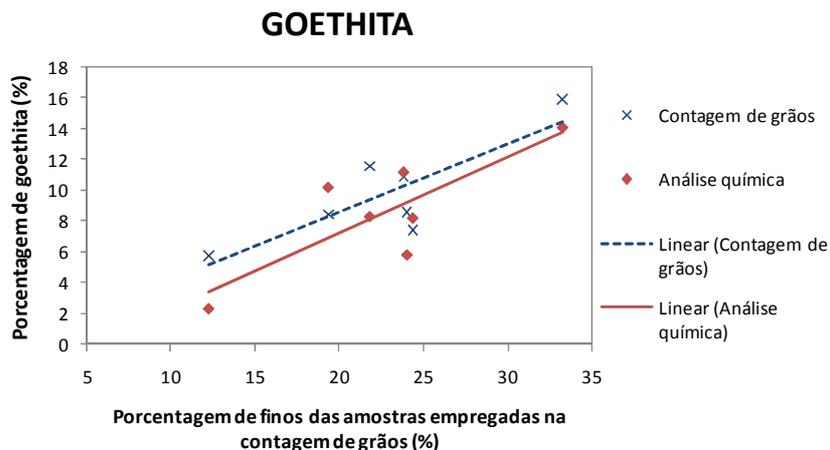


Figura 5. Gráfico do WI em função da quantidade de finos.

A similaridade entre as inclinações das linhas de tendências obtidas demonstra que a associação entre a quantidade de hematita/goethita e o WI existe e que o WI aumenta com a quantidade de goethita e diminui com a quantidade de hematita.

6 CONCLUSÃO

A partir das análises mineralógicas conduzidas foi possível identificar e quantificar as espécies minerais presentes nas amostras de minérios e produtos de Carajás, através de dois métodos diferentes: estequiometria e contagem de grãos.

As técnicas empregadas para quantificar as fases minerais mostraram-se eficazes, sendo que a contagem de grãos apresentou a vantagem de permitir a quantificação também das morfologias dos minerais e a desvantagem de ser uma técnica muito demorada.

As relações entre a mineralogia e a moabilidade de Bond foram analisadas a partir dos resultados obtidos e assim foram verificadas duas fortes correlações, quais sejam, entre a porcentagem em massa de hematita e a moabilidade e entre a porcentagem em massa de goethita e a moabilidade. Ainda, as porcentagens de hematita e de goethita apresentam relações inversas com o WI.

Para as amostras em estudo não foram observadas correlações significativas entre as diferentes morfologias de hematita e a moabilidade do minério.

A tendência de comportamento da moabilidade segundo a porcentagem de hematita e de goethita foi evidenciada pelo paralelismo das retas médias traçadas. Os autores sugerem um estudo aplicado, empregando-se maior quantidade de amostras e somente através da técnica de análise química, que além de ser mais rápida, apresenta resultados coerentes com aqueles obtidos na contagem de grãos.

O estudo deve também ser ampliado para a previsão desempenho de cada tipo de minério no circuito de moagem de Carajás, com foco em dois parâmetros: vazão de alimentação do circuito e geração de finos pela moagem.

Agradecimentos

À FAPESP pela concessão da bolsa e da reserva técnica.

À Vale, pelo apoio técnico e financeiro que se configurou em pessoas como José Antonio R. Oliveira, Francisco R. Patto, Vânia D. Oliveira, Eduardo W. Veríssimo, Ercílio R. Almeida, Rogério Patente, Pablo Sacramento Mendes, além da equipe do Laboratório Físico de Carajás.

À equipe do Laboratório de Tratamento de Minérios da Escola Politécnica da USP (LTM-EPUSP), principalmente ao professor Eldon Masini e ao técnico Alfredo dos Santos Freitas, quem conduziu os trabalhosos ensaios de moabilidade.

À professora Gianna Maria Garda do Instituto de Geologia da USP, à geóloga Linda H. Fujikawa da Gerência de Estudos Técnicos e Engenharia da Vale e ao professor Henrique Kahn (LCT) pela orientação na determinação de procedimentos e técnicas empregadas na quantificação das espécies minerais. À equipe do Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT-EPUSP), às pesquisadoras Maria Manuela Tassinari e Liz Z. D'Agostino e ao técnico Edvaldo Pinto Braga, pela apoio nas etapas de preparação das pastilhas e na contagem de grãos.

REFERÊNCIAS

- 1 COMPANHIA VALE DO RIO DOCE. Diretoria de Ferrosos do Sistema Norte. Especificação de produtos: operacional. Parauapebas: CVRD, 2007. (Relatório Interno, 2007).
- 2 JENKINS, R.; SNYDER, R.L. Qualitative Analysis. In: JENKINS, R.; SNYDER, R.L. Introduction to X-ray powder diffractometry. New York: John Wiley & Sons, 1996. v. 132. chapter 12. p. 349-354.

- 3 GOMES, O.F.M. Microscopia Co-Localizada: Novas possibilidades na caracterização de minérios. Tese (Doutorado) apresentada ao Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio. Rio de Janeiro: 2007. Disponível no endereço eletrônico: <www2.dbd.puc-rio.br>.
- 4 DANA, J. D. Manual de mineralogia. 1ª ed. [1969] revisada por Cornelius Searle Hurlbut Jr. Tradução de Rui Ribeiro Franco. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos, 1986. 642 p.
- 5 COMPANHIA VALE DO RIO DOCE. Gerencia Geral de Tecnologia. Principais tipos texturais de cristais de óxidos/ hidróxidos de ferro. Belo Horizonte: CVRD, 2008.
- 6 BOND, F. C. The third theory of comminution. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, New York, v. 193, p. 484-494, jan. 1952.
- 7 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. MB-3253: moinho de bolas - determinação do índice de trabalho. Rio de Janeiro, 1990.
- 8 FOGGIATTO, B. Previsão do desempenho do circuito de moagem de Carajás. Dissertação (Mestrado) apresentada à Escola Politécnica da USP. Edição revisada. São Paulo: 2009. Disponível no endereço eletrônico: <www.teses.usp.br>