



FLOTAÇÃO INVERSA DE MINÉRIOS DE FERRO DE BAIXOS TEORES DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO-MG¹

Rosa Malena Fernandes Lima²
Gilmara Mendonça Lopes³
Carlos de Figueiredo Gontijo⁴

Resumo

Neste trabalho são apresentados os resultados de caracterização tecnológica, que constou de análise mineralógica semi-quantitativa por microscopia ótica, análise granulométrica, análise química, determinação de densidade e porosidade de quatro amostras de minérios de ferro de baixos teores do Quadrilátero Ferrífero- MG. Posteriormente, foi efetuado estudo comparativo de flotação inversa das mesmas, usando planejamento estatístico de experimentos. Nesses estudos verificou-se que foram obtidas maiores recuperações metalúrgicas e teores de Fe para as duas amostras de menores porosidades e que os valores preditos de teores de SiO₂ nos concentrados rougher pela otimização do modelo estatístico estavam entre 3,9 a 6,6%.

Palavras-chaves: Caracterização tecnológica; Flotação; Minério de ferro.

INVERSE FLOTATION OF POOR IRON ORE FROM QUADRILÁTERO FERRÍFERO-MG

Abstract

This paper presents the technological characterization results, which were constituted by mineralogical analyses semi-quantitative, size distribution, chemical analysis, determinations of density and porosity of four poor iron ores samples from Quadrilátero Ferrífero-MG. After were carried out comparative studies of inverse flotation of the samples by factorial planning design of experiments. In these studies it was verified higher metallurgical recoveries and iron contents in the concentrates of the two samples with lower values of porosities. The SiO₂ contents in rougher concentrates predicted by optimization of the statistical model were between 3.9 to 6.6% values.

Key words: Technological characterization; Flotation; Iron ore.

¹ Contribuição técnica ao 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 11º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 19 a 22 de setembro de 2010, Belo Horizonte, MG.

² Dr.^a, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral/DEMIN/EM/UFOP

³ MSc., doutoranda do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG

⁴ MSc., Vale S.A.

1 INTRODUÇÃO

Aspectos geológicos, em particular a mineralogia e a gênese, de minérios de ferro têm papel importante tanto para o entendimento quanto para a escolha do método mais adequado para beneficiá-los. Para minérios de ferro maciços e laminados de alta dureza e minérios de altos teores não há necessidade de métodos complicados de beneficiamento. Para minérios de baixos teores de ferro e de altos teores de impurezas faz-se necessário a aplicação de métodos específicos de concentração tais como concentração gravítica, magnética e flotação para adequá-los às especificações de mercado, especialmente as frações finas (*sinter* e *pellet feed*).^(1,2)

Araújo et al.⁽¹⁾ em uma revisão sobre diversos métodos de concentração de finos de minérios de ferro brasileiros, afirmaram que a flotação reversa catiônica de *pellet feed* é fortemente recomendada para minérios, cujo mineral-minério predominante é a hematita e ganga constituída principalmente pelo quartzo com baixa proporção de minerais de alumínio. A mesma é recomendada também para minérios cujos minerais portadores de ferro predominantes são a magnetita e goethita associadas ao quartzo com baixas proporções de alumino-silicatos.

Os minerais-minérios de ferro brasileiros se classificam em: hematita especular, hematita martítica (meteórica e hidrotermal), hematita microcristalina, goethita (maciça e terrosa) e magnetita. Em relação à textura-microestrutura, os mesmos se classificam em: lamelar e/ou planar, que é característico da hematita especular, granular porosa (hematita martítica meteórica), granular pouco porosa a não porosa (hematita martítica hidrotermal) e granular muito fina (hematita microcristalina). A perda de recuperação na flotação de minérios contendo hematita especular e hematita martítica hidrotermal finas se deve a dois fatores: granulometria e hábito cristalino.⁽³⁾

Santos e Brandão⁽⁴⁾ em estudos de caracterização de amostras de minério de ferro de diferentes frentes de lavra da Mina de Alegria com ênfase na mineralogia, morfologia e microestrutura verificaram a presença de hematita martítica, com porosidade variada, com poros contendo ou não material terroso, grãos de hematita lamelar de diversos tamanhos, goethita botroidal, microporosa e terrosa (textura fina, com teores de Al_2O_3 e SiO_2 variáveis e com diferentes modos de ocorrência: inter e intragranular) além da presença de magnetita em diferentes estágios de oxidação. Segundo os autores, tanto a hematita martítica quanto a goethita contribuem para o aumento da área superficial específica dos concentrados obtidos e a goethita terrosa é responsável pelo aumento de finos durante o processamento mineral.

Nesse trabalho são apresentados estudos comparativos de flotação inversa catiônica de minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero - MG de diferentes composições mineralógicas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizadas quatro amostras de minérios de ferro fornecidas pela Vale S.A. denominadas de: Jangada, João Pereira, Fábrica Nova e Serra Serpentina, que foram recebidas no Laboratório de Tratamento de Minérios do DEMIN na granulometria adequada para os ensaios de flotação.

2.1 Caracterização das Amostras de Minérios

Os estudos de caracterização das quatro amostras constaram de: análise mineralógica, análise granulométrica, análise química e determinação do peso específico, da superfície específica e da porosidade das mesmas.

As semi-quantificações mineralógicas das quatro amostras de minério de ferro (Jangada, João Pereira, Fábrica Nova e Serra Serpentina) foram efetuadas por microscopia ótica pelo próprio pessoal da Vale S.A.

As análises granulométricas das amostras foram efetuadas por peneiramento a úmido e/ou combinado até a granulometria de 38 μm , usando a série Tyler de peneiras e pelo granulômetro a laser da marca Cilas 1064 do Laboratório de Propriedades Interfaciais do DEMIN/UFOP para a fração abaixo de 38 μm .

As densidades das amostras foram determinadas por picnometria a gás. O equipamento utilizado foi o Ultrapycnometro 1000 do Laboratório de Valorização de Materiais Mineraiis do DEMET/UFOP. Enquanto que as áreas superficiais foram efetuadas pelo analisador de área superficial BET – Modelo Nova 1200e do Laboratório de Propriedades Interfaciais do DEMIN/UFOP.

2.2 Ensaios de Flotação

Os ensaios de flotação em escala de bancada foram efetuados pela utilização de planejamento fatorial de experimentos (2^2) com réplica, cujas variáveis estudadas estão apresentadas na Tabela 1. Nesses ensaios foram fixados o valor de pH em 10,5, porcentagem de sólidos em 45% em peso, rotação da célula de flotação (CIMAQ com cuba de 1,5 L) em 1200RPM, tempo de condicionamento com amido e amina em 5 e 3 minutos, respectivamente. As variáveis respostas analisadas utilizando o software Minitab 15 foram: Recuperação metalúrgica de Fe (y_1), teor de Fe no concentrado (y_2) e teor de SiO_2 no concentrado (y_3).

Tabela 1 – Níveis das variáveis estudadas no planejamento fatorial 2^2 na flotação inversa de minérios de ferro

Reagente/Fabricante	Variáveis	Níveis		Identificação
		(-)	(+)	
Coletor: Amina EDA - Clariant	Dosagem de amina (g/t)	75	150	a
Depressor: Amido de Milho – Santa Amália	Dosagem de amido (g/t)	200	400	b
Reguladores de pH: NaOH e HCl – grau analítico				

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização das Amostras de Minérios

A composição mineralógica semi-quantitativa, a porosidade e o grau de liberação do quartzo, determinados por microscopia ótica das amostras de minério de ferro estudadas estão apresentados na Tabela 2. As diferenças marcantes em termos de composição mineralógica das mesmas são:

- a proporção de hematitas compactas (HC's) presentes no minério Serra Serpentina é de 54,48%. No minério Jangada é de 46,36%, que são valores bem



- maiores que aqueles das amostras, João Pereira (13,17%) e Fábrica Nova (6,26%);
- os minérios Fábrica Nova e João Pereira têm altas proporções de hematita martítica, 30,21% e 23,16%, respectivamente. Para o minério Jangada essa proporção é de 0,34% e inexistente no minério Serra Serpentina;
 - os minérios Jangada e João Pereira possuem maiores proporções de magnetita 13,07% e 11,76%, respectivamente. Em Fábrica Nova a proporção é baixa (0,77%) e não foi identificada em Serra Serpentina;
 - a maior proporção de goethita ocorre no minério Fábrica Nova (3,67%), seguido do minério João Pereira (1,67%), Serra Serpentina (1,03%) e finalmente, Jangada (0,28%);
 - todas as amostras estudadas apresentaram altas proporções de quartzo. No entanto, a amostra Fábrica Nova possui maior proporção desse mineral (59,29%), seguida da amostra João Pereira com 49,49%, Serra Serpentina com 43,85% e finalmente Jangada com 39,76%. Somente a amostra Jangada e a amostra Fábrica Nova possuem 2,09 e 0,06% de quartzo misto, respectivamente. Ou seja, o mineral quartzo ocorre preferencialmente como partículas livres em todas as amostras analisadas. Este fato foi comprovado pelo grau de liberação do quartzo (principal mineral de ganga) variando de 94,7 a 100%, que se encontram adequados para a etapa de concentração, pois industrialmente, recomenda-se grau de liberação acima de 95%;
 - as proporções de argilas nas amostras analisadas foram baixas. No caso do mineral caulinita variaram de 0,03% (Jangada) a 0,13% (Fábrica Nova e João Pereira). Em Serra Serpentina esse valor foi de 0,09%. A gibsita variou de 0,18% (Jangada) a 0,63% (Fábrica Nova), seguido de Serra Serpentina (0,54%) e finalmente João Pereira (0,48%); e
 - observaram-se maiores porosidade dos minérios Jangada e Fábrica Nova, 12,75 e 12,50%, respectivamente. A porosidade da amostra João Pereira foi de 7,93%. A amostra menos porosa foi a amostra Serra Serpentina (4,38%).



Tabela 2 – Análise mineralógica semi-quantitativa, porosidade e grau de liberação do quartzo das amostras de minério de ferro, determinadas por microscopia ótica

Amostra	Minerais identificados (%)																
	HE	HL	HG	HS	HC's	HM	MA	GO	GT	QL	QM	MN	CA	GB	OT	PO	GL
Jangada	0,61	3,75	13,01	28,99	46,36	0,34	13,07	0,28	0,42	37,25	2,09	0,00	0,03	0,18	0,00	12,75	94,70
João Pereira	0,03	0,67	11,40	1,06	13,17	23,16	11,76	1,67	1,84	47,65	0,00	0,00	0,13	0,63	0,00	7,93	100,00
Fábrica Nova	0,19	0,72	4,10	1,25	6,26	30,41	0,77	3,67	2,14	56,09	0,06	0,00	0,13	0,48	0,00	12,50	99,89
Serra Serpentina	19,60	23,74	10,95	0,19	54,48	0,00	0,00	1,03	0,46	43,39	0,00	0,00	0,09	0,54	0,00	4,38	100,00

HE - Hematita especular; HL – Hematita lamelar; HG – Hematita granular; HS – Hematita sinuosa; HM – Hematita martítica; MA – Magnetita; GO – Goethita;; GT – Goethita terrosa; QL – Quartzo livre; QM – Quartzo misto; MN – Óxido de manganês ; CA – Caulinita; GB – Gbisita; OT – Outros; PO – Poros; GL – Grau de liberação do quartzo

A porcentagem de partículas menores do que 10 µm varia de 3% (minério Serra Serpentina) a 12% (minério Jangada) (Figura 1).

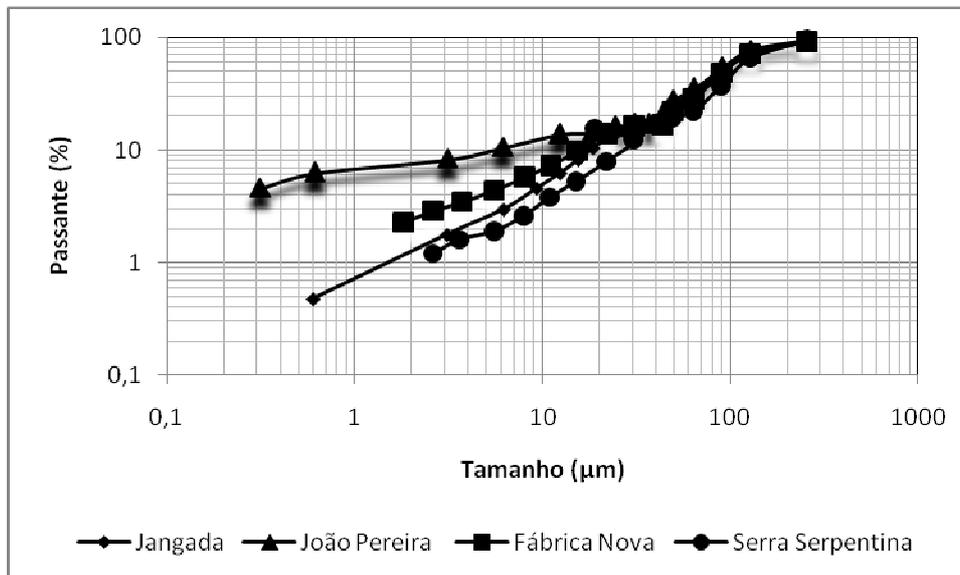


Figura 1 – Distribuição granulométrica das amostras de minério de ferro.

Pela análise dos resultados de análise química apresentada na Tabela 3 dos minérios estudados pode-se afirmar que:

- o minério Jangada é o minério mais rico dentre as amostras analisadas: teor de Fe e de SiO₂ de 40,08 e 42,18%, respectivamente. Enquanto que o minério Fábrica Nova é o mais pobre com teor de Fe de 31,45% e de SiO₂ igual a 52,35%; e
- não há diferença significativa entre os teores de Fe e SiO₂ das amostras Fábrica Nova (31,45 e 52,35%) e Serra Serpentina (34,66 e 49,04%).

Tabela 3– Análise química das amostras de minério de ferro

Elemento e/ou composto	Jangada	João Pereira	Fábrica Nova	Serra Serpentina
Fe	40,08	33,94	31,45	34,66
SiO ₂	42,18	50,65	52,35	49,04
Al ₂ O ₃	0,25	0,46	0,63	0,93
TiO ₂	0,016	0,033	0,023	0,036
CaO	0,022	0,023	0,020	0,023
MgO	0,003	0,091	0,039	0,085
Mn	0,020	0,030	0,162	0,04
P	0,014	0,027	0,034	0,017
PPC	0,17	0,22	1,88	0,59

Pela Tabela 4, observa-se que os pesos específicos dos minérios variaram de 3,4g/cm³ (Fábrica Nova) a 4g/cm³ (Jangada). Os valores de densidades encontrados estão coerentes com os resultados das análises químicas apresentados na Tabela 3. Ou seja, o minério de maior teor de Fe (Jangada) possui a maior densidade. O minério João Pereira possui a maior área superficial MultPoint BET (7,241 g/m²), seguido de Fábrica Nova (3,945 g/m²). Coincidentemente, esses dois minérios possuem maiores valores de porosidade, 6,069 x 10⁻³ e 4,082 x 10⁻³ cm³/g,

respectivamente. O que está coerente com os valores de porosidade determinados por microscopia ótica (Tabela 2).

Tabela 4 – Valores de peso específico, superfície específica e porosidade das amostras de minério de ferro

Minério	Peso específico (g/cm ³)	Superfície específica MP BET (m ² /g)	Porosidade	
			Volume total cm ³ /g	Raio médio Å
Jangada	4,0385	1,52	2,559 x 10 ⁻³	3,367 x 10 ¹
João Pereira	3,634	7,241	6,069 x 10 ⁻³	8,828
Fábrica Nova	3,4015	3,945	4,082 x 10 ⁻³	1,897 x 10 ¹
Serra Serpentina	3,71	1,782	1,898 x 10 ⁻³	1,658 x 10 ⁻¹

MP BET – MultiPoint BET

3.2 Ensaios de Flotação

Após a análise dos resultados dos ensaios de flotação inversa apresentados na Tabela 5, usando diagrama de Pareto (software Minitab 15) para um nível de confiança de 5%, verificou-se que nenhuma das variáveis testadas (dosagem de amina e amido) foram significativas para as variáveis respostas teor de Fe (y₂) e SiO₂ (y₃) nos concentrados do minério Jangada para os níveis testados. Somente a dosagem de amina (a) teve influência sobre a recuperação metalúrgica de Fe na amostra Jangada e sobre os teores de Fe e SiO₂ dos concentrados da amostra Serra Serpentina. As equações dos dados não codificados, que descrevem os modelos estatísticos das quatro amostras de minério de ferro estudadas estão apresentadas a seguir:

- Jangada

$$y_1 = 80,53 - 0,21a \quad (01)$$

- João Pereira

$$y_1 = 94,1 - 0,14a - 0,05b + 4,5 \times 10^{-4}ab \quad (02)$$

$$y_2 = 7,72 + 0,45a + 0,16b - 1,4 \times 10^{-3}ab \quad (03)$$

$$y_3 = 84,37 - 0,63a - 0,23b + 2,01ab \quad (04)$$

- Fábrica Nova

$$y_1 = 131,1 - 0,67a - 0,17b + 2,01 \times 10^{-3}ab \quad (05)$$

$$y_2 = 53,59 + 0,11a + 0,03b - 4,1 \times 10^{-4}ab \quad (06)$$

Tabela 5 – Resultados do planejamento estatístico de experimentos da flotação

Jangada							
Matriz		Rec. Fe (%)		Teor de Fe (%)		Teor de SiO ₂ (%)	
Amina (a)	Amido (b)	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 1	Rep. 2
75	200	63,36	71,16	63,36	63,36	8,95	8,93
150	200	62,03	61,7	63,32	64,9	8,66	6,92
75	400	69,21	70,05	65,88	64,27	5,38	7,7
150	400	74,65	74,28	63,61	64,08	8,93	7,86
João Pereira							
Matriz		Rec. Fe (%)		Teor de Fe (%)		Teor de SiO ₂ (%)	
Amina (a)	Amido (b)	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 1	Rep. 2
75	200	80,2	81,4	52,51	53,91	22,84	20,96
150	200	76,1	78,2	65,88	65,69	3,81	5,5
75	400	77,1	78	64,82	64,52	6,98	6,73
150	400	80,6	81,1	55,78	55,79	19,74	19,84
Fábrica Nova							
Matriz		Rec. Fe (%)		Teor de Fe (%)		Teor de SiO ₂ (%)	
Amina (a)	Amido (b)	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 1	Rep. 2
75	200	77,1	76,75	61,7	62,06	6,786	6,41
150	200	56,43	57,02	63,4	63,99	4,46	3,4
75	400	70,71	75,9	62,52	61,93	6,12	7,28
150	400	82,41	83,92	57,37	58,44	13,51	11,91
Serra Serpentina							
Matriz		Rec. Fe (%)		Teor de Fe (%)		Teor de SiO ₂ (%)	
Amina (a)	Amido (b)	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 1	Rep. 2
75	200	84,70	85,86	59,52	62,48	13,97	9,32
150	200	79,31	77,88	66,62	66,2	3,38	4,38
75	400	84,03	83,60	61,50	60,51	10,87	12,19
150	400	80,59	80,26	65,64	65,88	5,23	4,78

$$y_3 = 17,83 - 0,15a - 0,04b + 5,8 \times 10^{-4}ab \quad (07)$$

- Serra Serpentina

$$y_1 = 96,73 - 0,13a - 0,02b + 2,2 \times 10^{-4}ab \quad (08)$$

$$y_2 = 54,93 + 0,081a \quad (09)$$

$$y_3 = 20,77 - 0,12a \quad (10)$$

De uma maneira geral, pelas equações dos modelos estatísticos e pela Tabela 5 observa-se que as recuperações metalúrgicas de Fe do minério Jangada e Fábrica Nova foram menores do que os valores obtidos com os demais minérios. A diferença marcante destes minérios em relação aos outros é a maior proporção de poros (Tabela 2) de raio médio maior do que os poros das demais amostras (Tabela 4). Apesar da amostra Jangada possuir maior teor de Fe (40,08%) e menor teor de SiO₂ (42,18%) do que as demais amostras estudadas o valor predito de SiO₂ na condição otimizada do planejamento de experimentos, utilizando a ferramenta "Plot

Optimization” do software Minitab 15 foi de 6,5%, que é bem próximo do valor predito (6,6%) para a amostra Fábrica Nova. Este fato pode estar relacionado com o recobrimento das partículas de quartzo pelos finos (minerais de ferro) presentes nestas amostras, ocasionando a depressão das mesmas e aumento do teor de SiO₂ nos concentrados obtidos. Além disso, Fábrica Nova possui maior teor de SiO₂ (52,25%). No entanto, apesar da proporção de finos na amostra João Pereira ser a maior (12%) o teor de SiO₂ no concentrado desta amostra foi menor do que das duas outras citadas anteriormente.

Das amostras estudadas os melhores desempenhos em termos de recuperação metalúrgica de Fe, teores de Fe e de SiO₂ nos concentrados obtidos foi para o minério Serra Serpentina e João Pereira para os mesmos valores de dosagem dos reagentes utilizados (Tabela 6) apesar da amostra João Pereira possuir o maior percentual de partículas menores do que 10µm (12%). No entanto, as duas amostras têm menores valores de porosidade (Tabelas 2 e 4), apresentadas anteriormente. O menor teor de Fe (61,9%) predito pela ferramenta “Plot optimization” foi para a amostra Fábrica Nova, que é a amostra mais pobre dentre as amostras estudadas (Tabela 3).

Tabela 6 – Respostas otimizadas dos ensaios de flotação das amostras de minério de ferro

Jangada						Valores preditos	Variáveis otimizadas
Parâmetros analisados							
Resp.	Obj.	LI	Alvo	LS			
y ₁	Max.	50	85	85	69,6	Amina – 75 g/t Amido – 400 g/t	
y ₂	Max.	40	68	68	65,1		
y ₃	Min.	2	2	15	6,5		
João Pereira						Valores preditos	Variáveis otimizadas
Parâmetros analisados							
Resp.	Obj.	LI	Alvo	LS			
y ₁	Max.	50	85	85	77,2	Amina – 150g/t Amido – 200g/t	
y ₂	Max.	35	68	68	65,8		
y ₃	Min.	2	2	15	4,7		
Fábrica Nova						Valores preditos	Variáveis otimizadas
Parâmetros analisados							
Res.	Obj.	LI	Alvo	LS			
y ₁	Max.	50	85	85	77	Amina – 75g/t Amido – 200g/t	
y ₂	Max.	30	68	68	61,9		
y ₃	Min.	2	2	15	6,6		
Serra Serpentina						Valores preditos	Variáveis otimizadas
Parâmetros analisados							
Resp.	Obj.	LI	Alvo	LS			
y ₁	Max.	50	85	85	78,6	Amina – 150g/t Amido – 200g/t	
y ₂	Max.	35	68	68	66,4		
y ₃	Min.	2	2	15	3,9		

LI - limite inferior; LS - limite superior

De uma maneira geral, pode-se afirmar que as diferenças mineralógicas das amostras estudadas não tiveram influência muito significativa nos resultados dos ensaios de flotação reversa e que há necessidade de etapa cleaner para todas as amostras estudadas para a obtenção de teores de Fe e SiO₂ nos concentrados de 68 e 2%, respectivamente.

4 CONCLUSÃO

Através dos estudos efetuados pode-se concluir que as flotações inversas das quatro amostras de minérios de ferro, todas de baixos teores, tiveram desempenho satisfatório independente da composição mineralógica. Ou seja, há a possibilidade de obtenção de teores dentro das especificações de mercado após o emprego de etapas de limpeza.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fapemig pelos recursos, que foram utilizados para compra de diversos equipamentos do Laboratório de Propriedades Interfaciais, utilizados para a realização dos ensaios, à CAPES pela bolsa de mestrado para uma das autoras e à Vale S.A. pela doação das amostras, análises químicas e pelo financiamento do projeto.

REFERÊNCIAS

- 1 ARAÚJO, A. C., AMARANTE, S. C., SOUZA C. C., SILVA R. R. R. Ore mineralogy and its relevance for selection of concentration methods in processing of Brazilian iron ores. Mineral Processing and Extractive Metallurgy (Trans. Inst. Min. Metall. C). 2003. v.112, p. C44-C64.
- 2 UPADHYAY, R. K. VENKATISH, S.A., RAO, M. U. S., BANERJEE, P. K. Relevance of geological aspects and ore mineralogy in selecting beneficiation methods for processing of eastern Indian iron ores. Mineral Processing and Extractive Metallurgy (Trans. Inst. Min. Metall. C). 2009. v.118, n.1. p. 49-59.
- 3 LIBANEO, C. A., KANEKO, K. M., COELHO, L. T., PURIFICAÇÃO, E. X., Classificação Mineralógica, Textural e Granulométrica de Detalhe de Minério de Ferro (Pellet Feed) e Suas Implicações Geometalúrgicas. In: III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO. 2001. Ouro Preto-Minas Gerais. Anais. p.70-78. 1 CD
- 4 SANTOS, L. D., BRANDÃO, P. R. G. Variações Mineralógicas e Microestruturais em Minérios de Ferro do Quadrilátero Ferrífero, MG, e Suas Implicações no Processamento Mineral. In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO. 2003. Ouro Preto-Minas Gerais. Anais. p.674-682. CD.