

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA E TRATAMENTO DE UM REJEITO GROSSO DE MINÉRIO DE FERRO POR CONCENTRAÇÃO MAGNÉTICA DE ALTA INTENSIDADE

*

Osmar Henrique Costa Barbosa¹
IvonLuis Silva Prado²
Ludmila Samara Barbosa³
Manoel Robério Fernandes⁴

Resumo

A unidade Arcelor Mittal Mineração Serra Azul gera um rejeito do processo de jigagem, durante a concentração de minério de ferro do tipo *sinterfeed*. Esse material é empilhado e não comercializado devido às características que não se adequam aos padrões de qualidade definidos pelo mercado siderúrgico. O presente estudo propõe a caracterização tecnológica desse rejeito, através das técnicas de classificação granulométrica, fluorescência de raios X, difração de raios X e microscopia óptica. Posteriormente, propõe-se a rota de concentração magnética de alta intensidade em etapa *rougher* para três faixas granulométricas distintas. Amostra A- (-5,00mm+2,36mm), Amostra B- (-2,36mm+0,60mm) e Amostra C- (-0,60mm). Após os ensaios de concentração, os valores de recuperações mássicas e metalúrgicas foram respectivamente: amostra A (78,30% e 95,13%); amostra B (50,75% e 96,83%) e amostra C (68,59% e 84,08%). Como resultados do estudo, observa-se a obtenção de um concentrado comercializável para a amostra C, com teor de Fe superior a 62,50% e teor de SiO₂ inferior a 8,5%. As amostras A e B não alcançaram o padrão comercial, entretanto, uma blendagem com um material mais rico poderia ser uma opção para correção dos teores.

Palavras-chave: Minério de ferro; Rejeito; Caracterização; Concentração.

TECHNOLOGICAL CHARACTERIZATION AND TREATMENT OF A THICK IRON ORE REJECT BY A HIGH INTENSITY MAGNETIC CONCENTRATION

Abstract

The Arcelor Mittal Mining Serra Azul unit generates a tailings from the jiggling process during sinter feed iron ore concentration. This material is stacked and not marketed due to characteristics that do not conform to the quality standards defined by the steel market. The present study proposes the technological characterization of this tailing, through the techniques of granulometric classification, X-ray fluorescence, X-ray diffraction and optical microscopy. Subsequently, the route of magnetic concentration of high intensity in rougher stage is proposed for three different granulometric bands. Sample A- (-5.00mm + 2.36mm), Sample B- (-2.36mm + 0.60mm) and Sample C- (-0.60mm). After the concentration tests, the values of mass and metallurgical recoveries were respectively: sample A (78.30% and 95.13%); sample B (50.75% and 96.83%) and sample C (68.59% and 84.08%). As results of the study, it is possible to obtain a commercially available concentrate for sample C, with a Fe content of more than 62,50% and a SiO₂ content of less than 8.5%. Samples A and B did not reach the commercial standard, however, blending with a richer material could be an option to correct the contents.

Keywords: Iron ore; Waste; Description; Concentration.

¹ Graduando em Engenharia Metalúrgica, Pontifícia Universidade Católica, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Graduando em Engenharia Metalúrgica, Pontifícia Universidade Católica, Belo Horizonte, MG, Brasil.

³ Graduanda em Engenharia Metalúrgica, Pontifícia Universidade Católica, Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁴ Engenheiro de Minas, Professor da Pontifícia Universidade Católica, Belo Horizonte, MG, Brasil.

¹

1- INTRODUÇÃO

A empresa Arcelor Mittal Mineração Serra Azul (AMMSA), localizada no município de Itatiaiuçu/MG, tem como carro chefe a produção de minério de ferro fino do tipo *sinterfeed*. Dentro do fluxograma de produção, o minério que é lavrado, britado, classificado e, por fim, não aproveitado na separação magnética de baixa intensidade, tem como destino o equipamento denominado jigue. Os jigues geram um rejeito que é empilhado com teor de Fe médio, normalmente compreendido entre a faixa de 45-50%. Logo, diante de uma geração de rejeitos de aproximadamente 50 t/h, é possível que em um dia de produção a empresa tenha que empilhar um volume correspondente a 1000ton desse rejeito. Trata-se de um volume representativo, uma vez que a capacidade diária de produção de *sinterfeed* é de aproximadamente 4500ton.

Atualmente a busca por alternativas para o beneficiamento de materiais, até então considerados rejeito, tem ganhado significativa relevância. A escassez de matéria-prima de boa qualidade e a questão da conservação ambiental tem levado ao aprimoramento de técnicas que possam proporcionar recuperações do conteúdo metálico das frações granulométricas antes descartadas. Torna-se cada vez mais necessário a realização de investimentos em tecnologias de tratamento de minérios que apontem rotas para este fim. Especificamente, em relação ao minério de ferro, estamos em um cenário no qual há o empobrecimento das jazidas e isso ocorre paralelamente ao crescimento da demanda dessa *commoditie* mineral no mercado internacional, forçando as empresas mineradoras a investirem no aperfeiçoamento de suas operações e no desenvolvimento de novas tecnologias que visem à obtenção de produtos dentro de especificações comerciais para as aplicações a que os minérios costumeiramente se destinam.

Busca-se, portanto, contemplar a possibilidade real do aproveitamento de rejeitos visando à eliminação/minimização do passivo ambiental dos pátios existentes e/ou redução na quantidade destes. Consequentemente, riscos à segurança geotécnica poderiam ser mitigados e ainda com possibilidade de retorno de capital para a empresa.

A caracterização desse minério mostrou-se relevante pelo fato de que os conhecimentos das propriedades físicas, químicas e mineralógicas poderão servir em princípio, de orientação para os ensaios de concentração. Posteriormente, podem subsidiar adaptações e/ou desenvolvimentos dos processos de concentração industrial, visando uma melhor recuperação de ferro, aumentando a vida útil da mina e diminuindo o impacto ambiental causado pela pilha de rejeito que cresce a cada ano.

Esse estudo possui como objetivo conduzir uma análise técnica do aproveitamento de rejeito de minério de ferro, através do beneficiamento do rejeito de jigues da unidade Arcelor Mittal Mineração Serra Azul, o qual é empilhado e não comercializado devido às especificações químicas que fogem aos padrões de qualidade de *sinter-feed* definidos pelo mercado siderúrgico. Para tanto, ensaios de concentração magnética de alta intensidade foram realizados seguindo duas rotas distintas. A primeira, que utilizou apenas a classificação granulométrica e a segunda, que utilizou processo de cominuição para a obtenção do material de pesquisa.

2-MATERIAIS E MÉTODOS

2.1- Materiais

As análises químicas de caracterização e concentração se deram através de fluorescência de raios X, no equipamento de RX da marca *Panalytical*, modelo *AxiosMinerals*, no Laboratório de Análises Químicas da Arcelor Mittal Mineração Serra Azul.

2.2.4- Análise mineralógica

A análise da constituição e proporção mineralógica da amostra do rejeito grosso se deu por difratometria de raios X, no Laboratório de Raios X da UFMG. O equipamento utilizado foi o difratômetro de raios X marca *Panalytical*, modelo *Empyrean*, radiação $\text{CuK}\alpha$ e cristal monocromador de grafita. As condições do ensaio foram: faixa de varredura $3,03^\circ - 89,97^\circ$ (2theta), passo $0,06^\circ$ e tempo de contagem 3s. Ainda, através dessa análise, foi possível estimar as densidades das principais fases cristalinas identificadas. Após a difração de raios X foi realizada a análise química semiquantitativa por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) utilizando o equipamento Espectrômetro PHILIPS PW-2400. A FRX teve por objetivo identificar os principais elementos presentes na amostra.

2.2.5- Classificação e cominuição

Paralelamente à amostragem para a caracterização mineralógica, submeteu-se 60Kg da amostra coletada na mina ao quarteador do tipo Jones, obtendo-se 30Kg de amostragem para eventuais reanálises e os demais 30Kg destinados à classificação granulométrica por via seca. Dividiu-se o material em três amostras distintas, amostra A- (-5,00mm+2,36mm), Amostra B- (-2,36mm+0,60mm) e Amostra C- (-0,60mm). Para a amostra A, foi realizado peneiramento, para se extrair um volume com granulometria-5,00mm +2,36mm. Para as amostras B e C, foram efetuados processos de moagem em moinho de barras, marca *Metso*. Para a amostra B, a cominuição se deu durante 10 minutos a 10 rpm e em seguida, classificação granulométrica -2,36mm +0,60mm. Para a amostra C, o moinho foi utilizado durante 10 minutos e 25 rpm e em seguida, classificação granulométrica - 0,60mm. Todos os peneiramentos foram realizados a seco, com 15 minutos de duração e frequência de 15 Hz.

2.2.6- Ensaio de concentração magnética

Para os ensaios a seco de concentração magnética de alta intensidade das amostras A e B foi utilizado um Separador Magnético de Rolo de Terras Raras, da marca *Inbras* (figura 2), com rotação de 12 rpm. O campo magnético alcançado foi 8500 Gauss. Para o ensaio da amostra C, a úmido, utilizou-se o Concentrador Eletromagnético de Carrossel, marca *Inbras* (figura 3) e atingiu-se o campo magnético de 10000 Gauss com uma corrente elétrica de 19 amperes.



Figura 2. Separador Magnético de Rolo de Terras Raras



Figura 3. Concentrador Eletromagnético de Carrossel

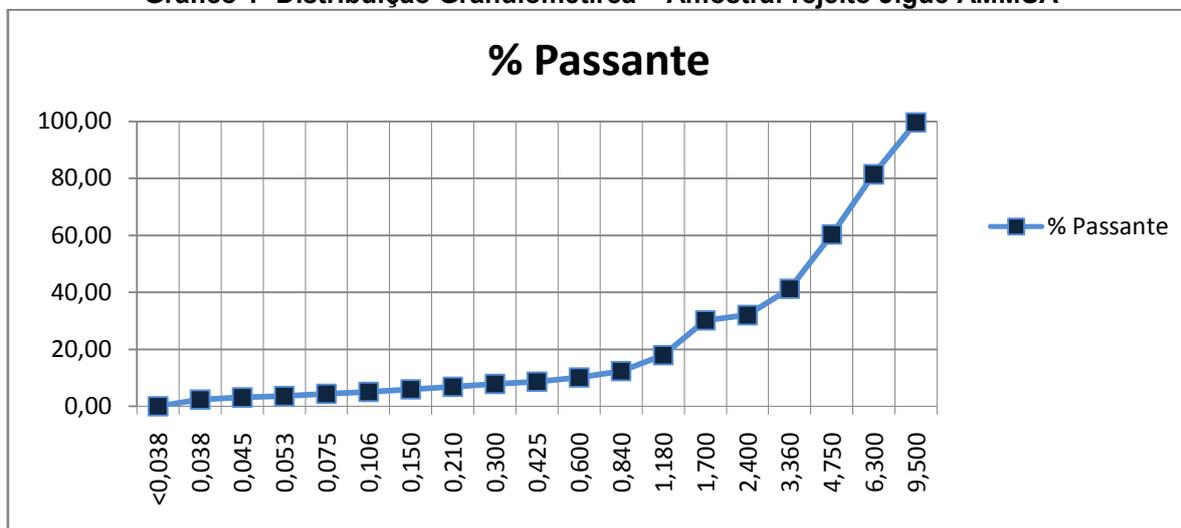
3- RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1- Caracterização do minério

3.1.1- Análise granulométrica

No gráfico 1, está apresentada a distribuição granulométrica realizada por peneiramento a úmido. Percebe-se que essa amostra se aproxima da granulometria *top size* de *sinterfeed*. A predominância de retenção ocorre a partir da malha de 3,36mm, com 58,73%. Ao considerar que esse minério foi britado e passou por operações de concentração magnética e gravítica, buscou-se a faixa granulométrica em que esse minério deixaria de ser marginal e poderia retornar ao processo de concentração.

Gráfico 1- Distribuição Granulométrica – Amostra: rejeito Jigue AMMSA



3.1.2- Análise do grau de liberação

Realizaram-se três contagens de 500 partículas por faixa granulométrica. As médias ponderadas das contagens dos grãos e os percentuais de liberação de Fe e quartzo foram agrupados de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1- Graus de liberação para Fe e quartzo

Malha(mm)	Σ Mineral livre	Σ Ganga livre	Σ Partícula mista	Grau lib. Fe (%)	Grau lib. quartzo(%)
0,425	43	37	45	63,33%	59,77%
0,300	43	44	38	64,86%	65,38%
0,212	66	26	33	76,30%	55,91%
0,150	67	38	20	85,03%	76,31%
0,106	73	42	10	91,82%	86,60%
0,075	74	44	7	94,39%	90,91%

Verificou-se a relação entre tamanho de grão e comportamento de liberação do mineral de interesse e da ganga (quartzo). Através da análise visual fez-se a contagem das partículas livres e mistas. Através das micrografias dos grãos (figuras 4 a 9) obtidas via microscópio, percebe-se que o grau de liberação do Fe sempre aumenta, mesmo que o número de partículas livres tenha permanecido estável nas malhas de 0,425mm e 0,300mm. Observa-se que o resultado mais alto de liberação, tanto de Fe quanto de quartzo ocorreu na retenção da malha de 0,075mm, com 94,39%Fe e 90,91% para quartzo. Em virtude da consideração positiva do grau de liberação em +0,075, tanto para Fe quanto para quartzo, não foram realizadas novas análises em tamanhos inferiores. Observa-se também, através da Tabela 1 e figuras de 1 a 6, que o número de partículas mistas diminui com a diminuição da granulometria, o que indica a liberação do mineral de interesse ou da ganga nas frações granulométricas inferiores. No entanto, a partir de 0,425mm poderia se sugerir um método de concentração gravítica, através de espirais concentradoras. Para a fração granulométrica +0,106mm, a flotação seria a rota a ser considerada, pois os valores de liberação de Fe e quartzo se aproximam de 90% para um teor de Fe 49,11%. Mesmo que o grau de liberação em +0,075mm seja maior, o eventual custo da moagem até atingir-se essa granulometria poderia ser evitado. Nas figuras, de 4 a 9, são reveladas micrografias dos grãos.



Figura 4, Micrografia de fração +0,425mm

Figura 5, Micrografia de fração +0,300mm



Figura 6, Micrografia de fração +0,212mm

Figura 7, Micrografia de fração +0,150mm

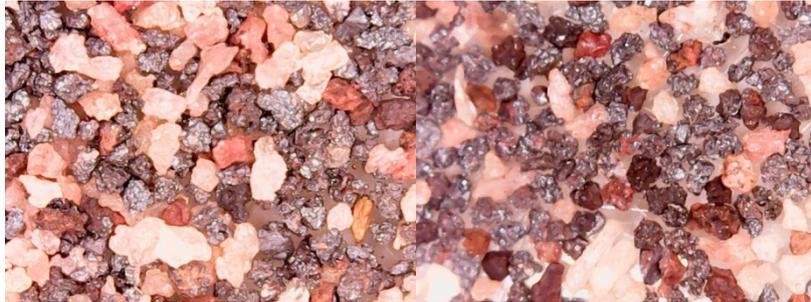


Figura 8, Micrografia de fração +0,106mm

Figura 9, Micrografia de fração +0,075mm

3.1.3- Análise química

Na tabela 2, há a apresentação do teor global e químico nas faixas granulométricas correspondentes às malhas do grau de liberação. Percebe-se que na malha de 0,300mm, há aumento do teor de SiO₂ e diminuição no teor de Fe, o que pode corresponder ao maior número de partículas de ganga livre de acordo com a tabela 1. O maior valor de Fe encontra-se na malha +0,212mm e mantém-se estável até +0,075mm.

Tabela 2- Análise granuloquímica

Granulometria (mm)	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	TiO ₂	MgO	PPC	FECH
0,425	38,05	41,88	1,63	0,06	0,04	<0,01	0,07	<0,01	2,20	100,36
0,300	34,79	47,30	1,19	0,02	0,04	0,01	0,04	0,01	1,66	100,03
0,212	49,82	23,76	2,17	0,07	0,07	<0,01	0,12	0,01	2,94	100,49
0,150	46,83	27,63	2,15	0,06	0,07	0,01	0,08	0,02	2,46	99,55
0,106	49,11	27,46	0,92	0,04	0,04	0,01	0,04	0,02	1,17	99,96
0,075	49,09	25,11	1,98	0,07	0,05	0,02	0,11	<0,01	2,54	100,16
Global	49,25	24,89	2,02	0,07	0,05	0,00	0,10	<0,01	2,79	100,46

3.1.4- Análise mineralógica

Através da figura 10, apresenta-se o difratograma de raios X típico da amostra do rejeito grosso. Verificam-se as principais fases cristalinas presentes, sendo hematita, quartzo, goethita e gibbsita as mais representativas. A tabela 3 revela o percentual em massa das fases cristalinas através do Refinamento de *Rietveld* pelo software GSAS e estimativa das respectivas densidades.

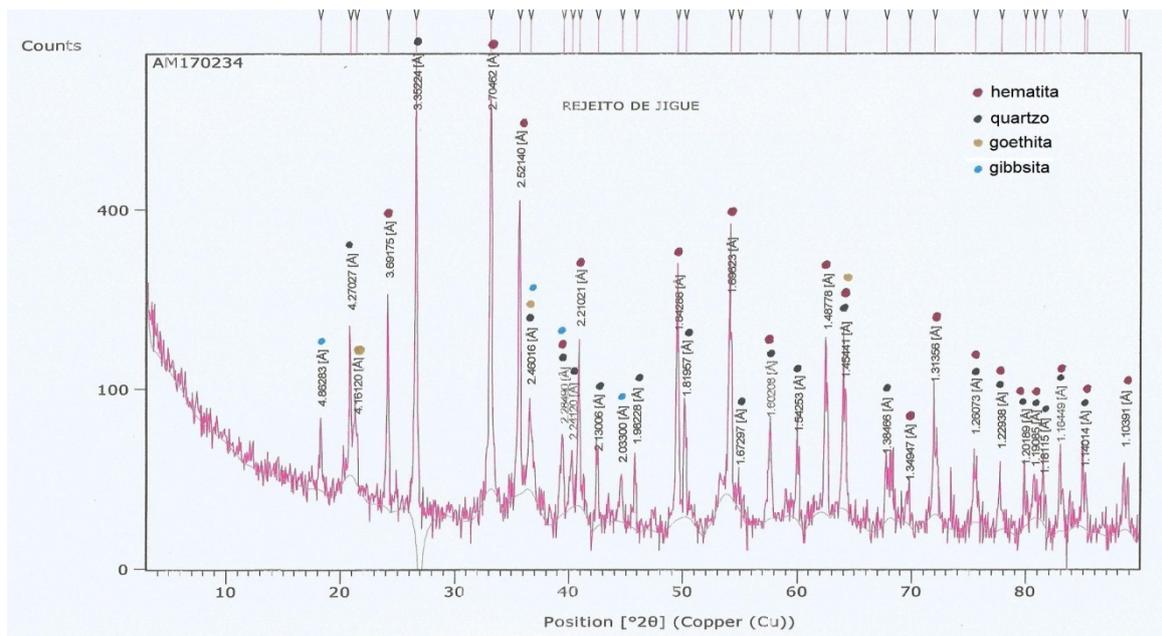


Figura 10- Difratograma da amostra do rejeito grosso por DRX

Tabela 3 – Percentual em massa e densidades das fases predominantes

Fase	Hematita	Quartzo	Goethita	Gibbsita
% em massa	47,56	31,08	15,04	6,32
Densidade (g/cm ³)	5,28	2,65	4,22	2,33

Pela fluorescência de RX, verifica-se a análise semiquantitativa de elementos presentes na amostra. Através da tabela 4, há a percepção de que Fe e O são os elementos mais abundantes da amostragem, logo se justifica a busca do conhecimento das características desse material que atualmente é considerado estéril, cujas informações podem subsidiar a adaptação e/ou desenvolvimento da rota de concentração de minério de Fe.

Tabela 4 – Análise semiquantitativa de elementos da amostragem

Elemento	Fe	O	Si	Al	P	Cu	Ni	Mn	Cr	Ti	Ca	K	Cl	S	Mg	Na
Distribuição	++++	++++	+++	++	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

++++ Alta distribuição; +++ média distribuição; ++ baixa distribuição; + traço de elemento.

3.2- Ensaios de concentração magnética de alta intensidade

Para os ensaios de concentração magnética de alta intensidade, partiu-se de um rejeito denominado de rejeito global, figura 11.



Figura 11. Rejeito global

Após os ensaios de concentração magnética, foram fotografadas frações de volumes das alimentações, concentrados e rejeitos gerados pelas amostras nomeadas A, B e C (figura 12 à figura 20) que são faixas granulométricas da amostra coletada no rejeito da jigagem da AMMSA.



Figura 12.
Alimentação amostra A

Figura 13.
Concentrado amostra A

Figura 14.
Rejeito amostra A



Figura 15.
17. Alimentação amostra B

Figura 16.
Concentrado amostra B

Figura 17.
Rejeito amostra B



Figura 18.
amostra C

Figura 19.
Rejeito amostra C

Figura 20.
Alimentação amostra C

Através da tabela 5, temos as massas de alimentação, concentrados e rejeitos. Os volumes de alimentação respeitaram os volumes máximos contidos nos manuais de instrução e operação, fornecidos pelo fabricante dos concentradores, tanto a seco

quanto a úmido. Para os ensaios a seco (amostras A e B), a alimentação foi de 1400g. Para o ensaio a úmido (amostra C), a alimentação foi de 175g, com 40% de percentual de sólidos.

Tabela 5- Massas de alimentação, concentração e rejeito.

Massa (g)			
Malha (mm)	-5,00 +2,36	-2,36 +0,60	-0,60
Alimentação	1400	1400	175
Concentrado	1096	710	120
Rejeito	304	690	55

Pela tabela 6, verificaram-se os teores químicos global e de alimentações, concentrados e rejeitos. Comercialmente, a Arcelor Mittal Mineração Serra Azul deve produzir um *sinterfeed* que atenda às especificações químicas de no mínimo 62,50% Fe e no máximo 8,5% de SiO₂. A amostra C atendeu na plenitude esses parâmetros, de forma que poderia ser incorporada ao concentrado final e comercializada. Apesar de as amostras A e B não produzirem concentrados dentro dos padrões anteriormente mencionados, deve-se ater à proximidade dos valores ao padrão comercial e ainda destacar o baixo teor de Fe nos rejeitos, inferiores a 3% Fe.

Tabela 6- Teores químicos

IDENTIFICAÇÃO		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	TiO ₂	MgO	PPC	FECH
Amostra A	Alimentação	49,09	25,11	1,98	0,07	0,05	0,02	0,11	<0,01	2,54	100,16
	Concentrado	59,64	10,16	1,73	0,07	0,03	0,01	0,12	<0,01	2,41	99,91
	Rejeito	2,64	94,30	0,72	0,01	0,01	0,01	0,09	<0,01	0,47	99,30
Amostra B	Alimentação	31,72	50,55	1,82	0,05	0,02	<0,01	0,05	0,01	1,83	99,76
	Concentrado	60,52	8,66	1,89	0,08	0,06	0,01	0,12	0,01	2,84	100,33
	Rejeito	2,97	93,38	1,02	0,01	0,01	<0,01	0,08	<0,01	0,69	99,37
Amostra C	Alimentação	51,13	21,60	2,23	0,08	0,06	0,01	0,12	<0,01	2,78	100,09
	Concentrado	62,68	6,44	1,45	0,07	0,05	0,01	0,13	0,03	2,35	100,25
	Rejeito	22,78	58,89	3,86	0,09	0,07	0,02	0,09	<0,01	4,07	99,80
Global		49,25	24,89	2,02	0,072	0,054	0,003	0,103	<0,01	2,79	100,46

Na tabela 7 apresentam-se as recuperações de massa e metalúrgica para as três amostras. Para a amostra C, que apresentou teores químicos dentro do limite comercial, houve uma recuperação mássica de 68,59% e metalúrgica de 84,08%. As amostras B e C apresentaram recuperações metalúrgicas superiores a 95%, principalmente devido ao baixo teor de Fe no rejeito, inferiores a 3%. O processo de concentração das amostras A e B não devem ser descartados, mesmo não atingindo os valores comerciais de teores químicos. Os valores de recuperação dessas amostras de granulometria superior indicariam no mínimo uma redução significativa do teor de Fe no rejeito global.

Tabela 7- Recuperações mássicas e metalúrgicas

Recuperações	Mássica	Metalúrgica
Amostra A	78,30%	95,13%
Amostra B	50,75%	96,83%
Amostra C	68,59%	84,08%

4- CONCLUSÕES

Diante da pesquisa de caracterização e concentração magnética de alta intensidade para beneficiamento do rejeito de jigue, obtêm-se as seguintes conclusões:

- Na concentração magnética da amostra C (-0,60mm) a 10000 Gauss, observa-se a obtenção de um concentrado comercializável, com teor de Fe igual a 62,68% e teor de SiO₂ correspondente a 6,44%. Nessa amostra, as recuperações mássica e metalúrgica foram respectivamente 68,59% e 84,08%.
- As amostras A(-5,00mm +2,36mm) e B(-2,36mm +0,600) atingiram no concentrado, teores de Fe e SiO₂ próximos dos limites definidos pelo mercado siderúrgico. Logo, uma blendagem com outro material mais rico poderia ser viável para a produção de *sinterfeed*.
- Os baixos valores de Fe nos rejeitos das amostras A e B indicam uma significativa recuperação metalúrgica. Ainda, com teores de Fe inferiores a 3%, haveria uma redução quantitativa de Fe no rejeito global.
- Os concentrados das amostras A e B apresentaram valores de Fe e SiO₂ próximos dos definidos pelo mercado siderúrgico de *sinterfeed*. Diante disso, sugere-se, a repetição do processo de concentração com manipulação de variáveis operacionais e de processo ou ainda a realização do teste em etapa *cleaner*.
- o grau de liberação mais alto para Fe e quartzo ocorre em +0,075mm, com liberações de 94,39% e 90,31% respectivamente. No entanto, a partir de 0,212mm, a sugestão de concentração gravítica por espiral concentradora se mostra viável, diante de baixo custo (a planta de concentração em questão conta com esse processo) se comparado à moagem para produção de *pellet feed*.
- a rota de concentração por flotação pode ser considerada para a fração -0,150mm, uma vez que os valores de liberação de Fe e quartzo aproximam-se de 90%.

5- AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Arcelor Mittal Mineração Serra Azul pela cessão do material objeto de estudo e pelas análises químicas, ao Laboratório de Beneficiamento de Minérios da PUC Minas, aos Laboratórios de Tratamento de Minérios do CDTN e da UFMG pelo valioso auxílio técnico, à FAPEMIG pelo auxílio financeiro na forma de bolsa a dois dos autores, e ao nosso orientador, Manoel Robério Ferreira Fernandes pelas leituras e releituras que contribuíram para construção deste artigo.

6- REFERÊNCIAS

- 1 Araujo, 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. April 2003. v.112,. n.1. p. C54-C64.

- 2 Araujo, C. B. Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro. Rio de Janeiro: COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006, 133 p. (Dissertação de Mestrado).
- 3 Blum, P. Magnetic Susceptibility In. BLUM, P. Physical Properties Handbook: A Guide to the Shipboard Measurement of Physical Properties of Deep-sea Cores by the Ocean Drilling Program. 1. ed. Chapter 04, p. 4-1 – 4-10, 1997.
- 4 Lins, F. A. F. (2004). Concentração Gravítica. Tratamento de Minérios, Centro de Tecnologia Mineral CETEM, 4ª edição revisada, capítulo 6, P.239- 268, Rio de Janeiro.
- 5 Luz, A. B.; Sampaio, J.A.; França, S.C.A.Tratamento de Minérios. 5ª Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.
- 6 Guimarães, N. C. Filtragem de rejeitos de minérios de ferro visando a sua disposição em pilhas. Belo Horizonte: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgicas e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2011, 110 p. (Dissertação de Mestrado).
- 7 Reis, J.L.M.; Gomes, W.A. Concentração magnética: princípios e equipamentos.Conselheiro Lafaiete: FUPAC, 2014. 46 p.
- 8 Sampaio, C. H. e Tavares, L. M. M. (2005). Beneficiamento Gravimétrico: uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade. UFRGS Editora, p. 603, Porto Alegre.
- 9 Sampaio, J.A.; Luz, A.B.; França, S.C.A. Separação magnética e eletrostática. In: Tratamento de minérios. 5a ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap. 9, p. 365-396.