

# CONCENTRAÇÃO MAGNÉTICA A SECO DE MINÉRIOS DE FERRO VIA REDUÇÃO PARCIAL<sup>1</sup>

Alberto Eloy Anduze Nogueira<sup>2</sup>

Nilson Nedes de Paula<sup>3</sup>

Carlos de Figueiredo Gontijo<sup>4</sup>

Cyro Takano<sup>5</sup>

Marcelo Breda Mourão<sup>5</sup>

Guilherme Frederico Bernardo Lenz e Silva<sup>6</sup>

Solon Yasuhiko Tagusagawa<sup>7</sup>

## Resumo

A produção de pelotas de minério de ferro, como todos os processos industriais, deve sempre buscar tecnologias ambientalmente sustentáveis, com menor geração de rejeitos e utilização mais eficiente da energia. É cada vez mais frequente a utilização de minérios de baixo teor, os quais geralmente são submetidos à concentração gravítica e/ou operações que envolvem uso de água, podendo gerar rejeitos que demandem sua neutralização antes do descarte. Uma das tecnologias alternativas é a redução parcial do minério hematítico a magnetita, seguida de concentração magnética. O presente trabalho estuda este processo aplicado a três tipos diferentes de minério hematítico, com granulometrias de -1,0 mm e -0,15 mm. Em reator aquecido por resistências, o minério é pré-reduzido por mistura CO/CO<sub>2</sub> de 15/85 (v/v) com um fluxo de 1,5 NI/min. Trabalhou-se a duas temperaturas, 673 K (400°C) e 773 K (500°C). Os ensaios foram conduzidos por 60 minutos. Foi realizada separação magnética em duas passadas. As amostras foram analisadas por difração de raios-X e microscopia eletrônica. Estudou-se a cinética da pré-redução e a porcentagem de recuperação de ferro.

**Palavras-chave:** Minério de ferro; Concentração; Magnetita; Redução direta.

## DRY MAGNETIC CONCENTRATION OF IRON ORE VIA PARTIAL REDUCTION

### Abstract

The production of iron ore pellets, as all industrial processes, should always seek environmentally sustainable technologies to generate less waste and more efficient use of energy. It is increasingly common to use low-grade ores, which are usually subjected to gravity concentration and / or operations involving the use of water may generate wastes that require its neutralization prior to disposal. An alternative technology is the partial reduction of hematite to magnetite, followed by magnetic concentration. This paper studies this process applied to three different types of hematite ore with particle sizes of -1.0 mm and -0.15 mm. In reactor heated by electric resistance, the ore is pre-reduced by CO/CO<sub>2</sub> mixture of 15/85 (v/v) at a flow rate of 1.5 NI / min. Work was done at two temperatures, 673 K (400°C) and 773 K (500°C). The tests were conducted for 60 minutes. Magnetic separation was performed in two passes. The samples were analyzed by X-ray diffraction and electron microscopy. Studied the kinetics of pre-reduction and recovery percentage of iron.

**Key words:** Iron ore; Concentrate; Magnetite; Direct reduction.

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

<sup>2</sup> Doutor Pesquisador, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Membro da ABM, SP, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro, Engenharia de processos, Companhia Vale S.A., Brasil.

<sup>4</sup> Doutor Pesquisador, Engenharia de processos, Companhia Vale S.A., Brasil.

<sup>5</sup> Professor Associado, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Membro da ABM, SP, Brasil.

<sup>6</sup> Professor Doutor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Membro da ABM, SP, Brasil.

<sup>7</sup> Engenheiro, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Membro da ABM, SP, Brasil.

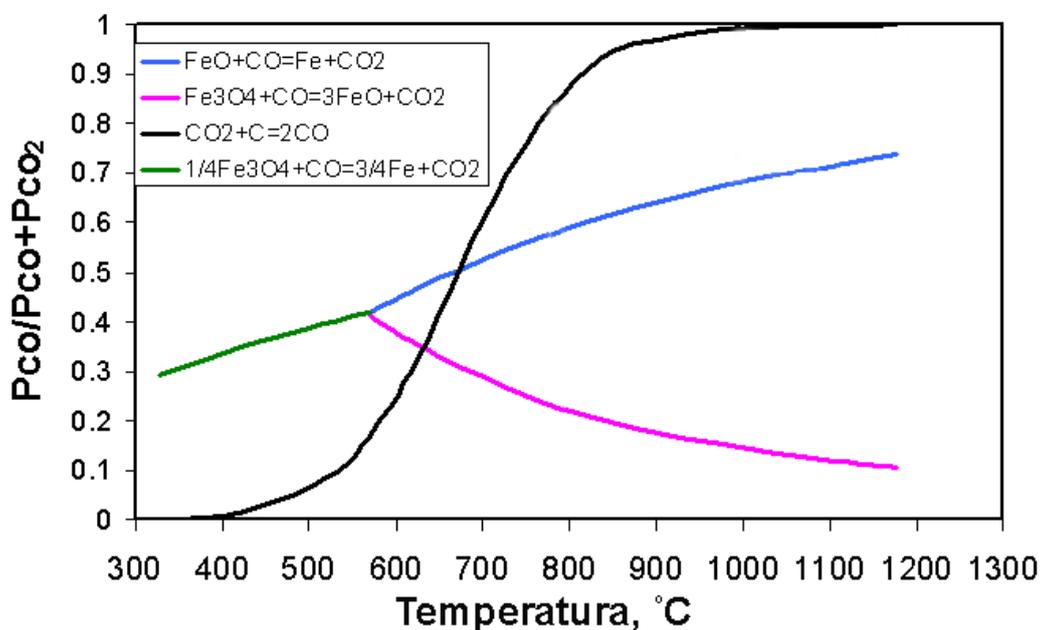
# 1 INTRODUÇÃO

Há na literatura informações técnicas de outros processos de concentração de minérios de ferro, menos ávidos em energia e menos agressivos ao meio ambiente. A concentração magnética é um deles, considerando que o minério de ferro – hematita (material fracamente magnético) pode ser facilmente reduzida à magnetita, que é ferrimagnético. Portanto, o processo poderia concentrar minérios pobres em ferro, através da sua moagem e classificação granulométrica, seguida de sua redução parcial a magnetita.<sup>(1)</sup>

## 1.1 Termodinâmica da Redução

A Figura 1 mostra as diferentes fases do sistema Fe-C-O.<sup>(2)</sup> Dependendo da temperatura e da pressão parcial de CO, termodinamicamente estão presentes  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , FeO, Fe-metálico e  $\text{Fe}_3\text{C}$ , além das fases líquidas de Fe-metálico e óxido de ferro. Nesta mesma figura, é justaposta a curva da reação de Boudouard. A redução de hematita a magnetita ocorre em condições de relativamente baixa temperatura e baixa pressão parcial de CO. Portanto, são condições operacionais que facilitam a obtenção de magnetita, mesmo com “off gas” com  $(p_{\text{CO}})/(p_{\text{CO}_2})$  de apenas 0,1, ou seja, pobre em CO.

Para otimizar a recuperação de ferro, é necessário evitar a formação de material não magnético contendo este elemento. Portanto, é importante evitar a formação da wustita. A Figura 1 mostra as regiões de estabilidade termodinâmica do ferro, wustita, magnetita e hematita, em função da temperatura e  $p_{\text{O}_2}$ <sup>(2)</sup> (pressão parcial de oxigênio na mistura gasosa, em equilíbrio com as fases sólidas).



**Figura 1.** Sistema Fe-C-O, mostrando as diferentes fases presentes em função da temperatura e composição dos gases.<sup>(2)</sup>

A wustita só é estável a temperaturas acima de 570 °C. Uma forma simples de evitar a sua formação é conduzir a redução parcial da hematita a temperaturas inferiores a esta.<sup>(3)</sup>

## 1.2 Cinética da Redução

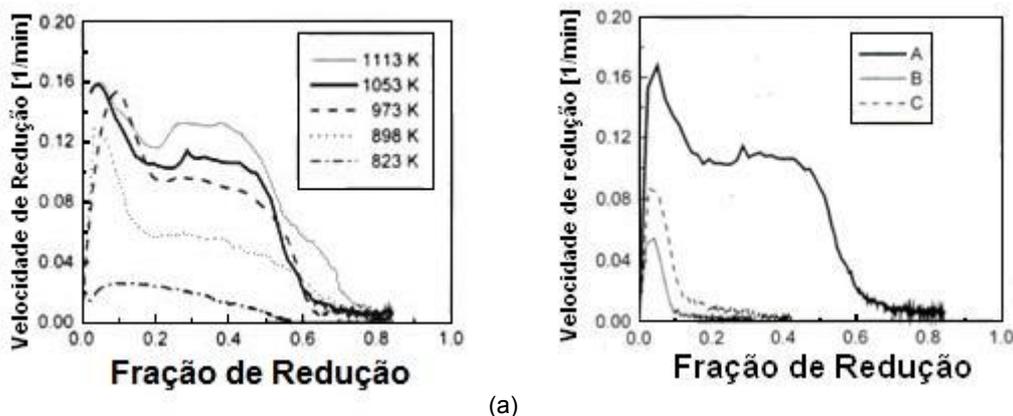
Para uma dada distribuição granulométrica do minério de ferro, a cinética de redução de hematita a magnetita varia com a temperatura, composição dos gases, velocidade relativa gás-sólido e pressão do sistema. Esta última variável será deixada de lado, porque sistemas que trabalham fora da pressão atmosférica, em geral, são onerosos.

## 1.3 Efeito da Temperatura

A cinética da redução é função direta da temperatura. Este efeito pode ser melhor entendido analisando a Figura 2a.<sup>(4)</sup> Ela mostra o efeito da temperatura na velocidade de redução da hematita com uma mistura gasosa de 55% H<sub>2</sub>, 9% CO, 5% CO<sub>2</sub> e 31% N<sub>2</sub>. Aumentando a temperatura de 550 °C para 625 °C acelera significativamente a redução da hematita, principalmente na sua fase inicial.

## 1.4 Efeito da Composição dos Gases

O aumento da concentração de CO na mistura CO/CO<sub>2</sub> acelera a velocidade de redução, como pode ser observado na Figura 2b. Aumentando o teor de CO na mistura CO, CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> de 20% CO (curva B) para 30% CO (curva C), a velocidade de redução na fase inicial quase que dobra.<sup>(5)</sup>

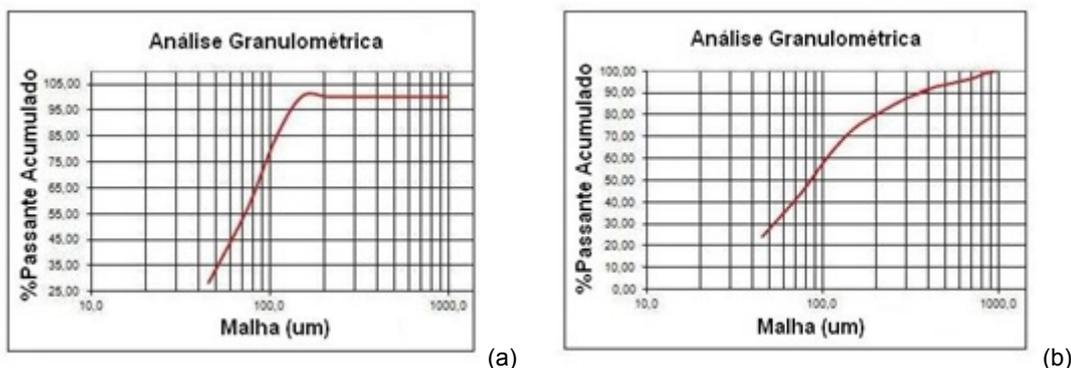


**Figura 2.**(a) Efeito da temperatura na velocidade de redução da hematita com uma mistura de gás de 55% H<sub>2</sub>, 9% CO, 5%CO<sub>2</sub>, 31% N<sub>2</sub>.<sup>(4)</sup> (b) Efeito da composição do gás redutor na velocidade de redução a 1 bar e 1053 K. A: 55% H<sub>2</sub>, 9% CO, 5% CO<sub>2</sub>. B: 20% CO, 2,5% CO<sub>2</sub>. C: 30% CO, 2,5% CO<sub>2</sub>. O balanço é N<sub>2</sub>.<sup>(4)</sup>

## 2 MATERIAIS E METODOS

### 2.1 Caracterização das Matérias-Primas

Os minérios de ferro utilizados nesta pesquisa foram: Itabirito Compacto de Conceição, natural e deslamado, e o Itabirito Goethítico Alegria, todos nas granulometrias de -0,15 e -1,0 mm. Estes minérios representam interesses específicos da Vale S.A. no processo de pré-redução e concentração magnética. As granulometrias empregadas são as comumente usadas nas primeiras etapas de mineração. Na Figura 3 tem-se a distribuição granulométrica para o Itabirito Compacto de Conceição natural, nas faixas de -0,15 e -1,0 mm.



**Figura 3.** Distribuição granulométrica do Itabirito Compacto de Conceição de (a) -0,15 mm e (b) -1,0 mm.

Na Tabela 1 tem-se a análise química global para cada minério, mostrando a porcentagem de ferro total e dos elementos formadores de ganga, além da densidade real.

**Tabela 1.** Análise química global e densidade real dos minérios

Minério	Itabirito Compacto Conceição -0,15 mm (CE-0,15)	Itabirito Compacto Conceição -1,00 mm (CE-1,0)	Itabirito Goethítico Alegria - 0,15 mm (GA-0,15)	Itabirito Goethítico Alegria - 1,00 mm (GA-1,0)
Espécie				
Fe	44,9	40,7	55,5	54,6
SiO <sub>2</sub>	32,9	38,7	6,6	8,2
P	0,02	0,02	0,08	0,08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,0	1,1	2,4	2,0
Mn	0,08	0,1	0,2	0,3
TiO <sub>2</sub>	0,09	0,1	0,2	0,1
CaO	0,02	0,03	0,01	0,01
MgO	0,099	0,1	0,063	0,036
PPC	0,8	0,8	10,6	10,5
F.Q.	99,3	99,1	99,6	99,6
ρ (g/ml)	4,0	3,8	3,9	3,9

## 2.2 Método

As amostras de minério foram quarteadas e secas a 120°C por 2 horas. Pesou-se a quantidade de 1 kg de cada uma delas. Trabalhou-se em duas faixas de temperaturas, a 673 K (400°C) e 773 K (500°C), As amostras foram processadas por um período de duas horas. A montagem experimental está representada na Figura 4. Ela consiste de dois reatores, um reator secundário para gerar o gás CO e outro reator chamado de reator principal, onde o minério foi pré-reduzido. O minério de ferro foi pré-reduzido com uma mistura CO/CO<sub>2</sub> de aproximadamente 16±1% em volume de CO (15-17%), com o intuito de garantir a pré-redução na zona da magnetita (Figura 1). Na tampa da retorta existe um sistema de entrada e saída de gases controlados por válvulas e fluxômetros, e um agitador mecânico para homogeneizar a mistura durante a reação. A mistura é homogeneizada a cada 3 minutos com uma rotação de 1 rev/s por 30 segundos. A retorta é aquecida em um forno de resistências de 8kVA. No processo de aquecimento e resfriamento do reator, o sistema era purgado com nitrogênio. Após o resfriamento, a carga foi

pesada para medir a pré-redução. A separação magnética foi elaborada com as seguintes características: tambor de ímãs permanentes, campo de baixa de 1500 Gauss, diâmetro do tambor de 304,8 mm (12 pol.), Largura de alimentação 228,6 mm (9 pol.), com uma rotação de 120 r.p.m. Foram feitas duas passadas com as mesmas características. A magnetita é sensível a campos superiores a 1000 Gauss, e a hematita começa a ser sensível acima de 5000 Gauss.

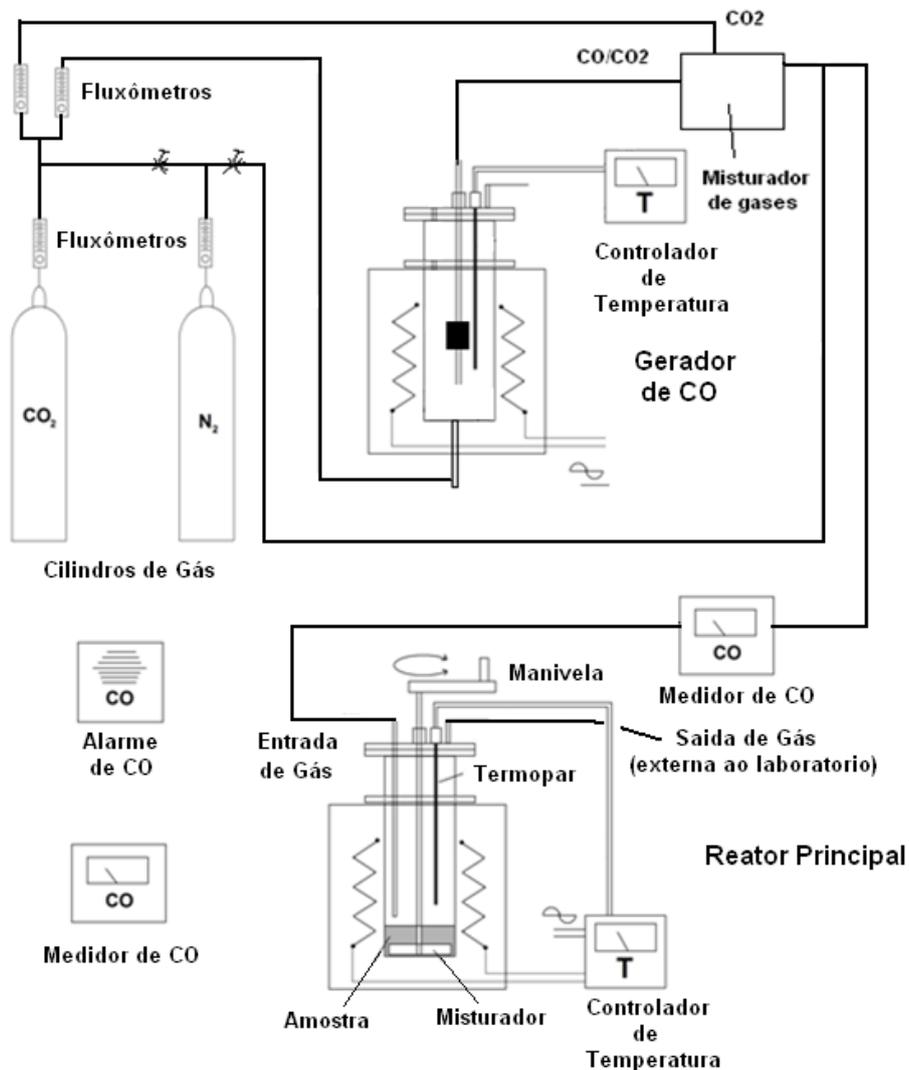


Figura 4. Montagem experimental.

### 2.3 Cálculo da Recuperação Metálica

Um dos dados importantes a ser trabalhados neste relatório é a recuperação metálica de cada uma das amostras. Ela indica quanto do ferro inicial foi possível recuperar. Tendo os dados de porcentagem de concentrado e porcentagem de rejeito e a concentração de ferro em cada, é possível calcular a massa de ferro em ambas, obtendo-se a recuperação metálica aplicando:

$$\text{Recuperação metálica} = \frac{\text{Massa Fe concentrado}}{(\text{Massa Fe concentrado} + \text{Massa Fe Rejeito})} \quad (1)$$

## 2.4 Correlação de Variáveis

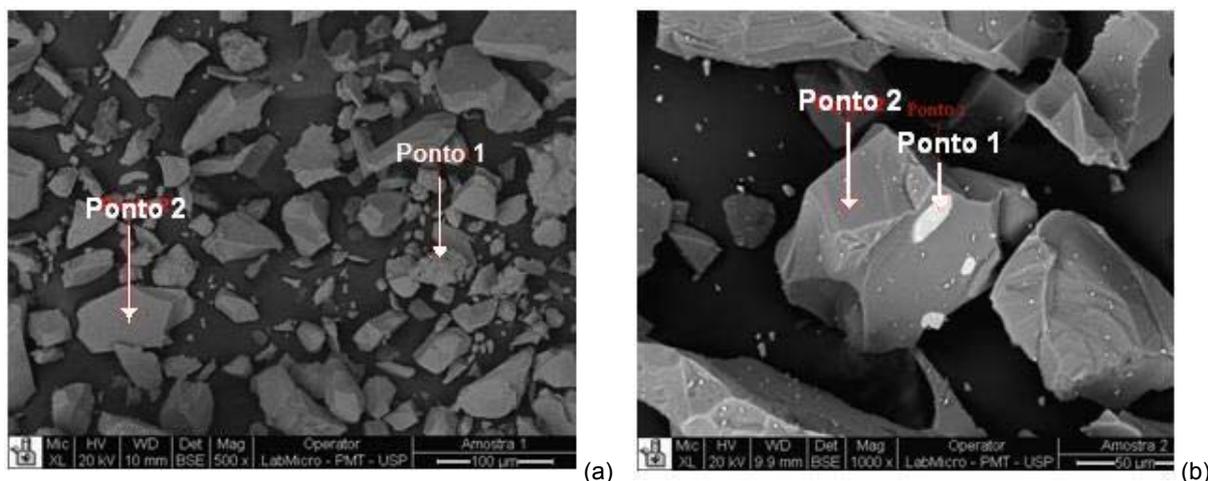
As principais variáveis a ser estudadas para a otimização do processo de concentração do minério de ferro são: porcentagem de recuperação metálica, porcentagem de ferro no concentrado, porcentagem de ganga no concentrado, em função do tipo de minério, granulometria e temperatura de processamento. Para isto pensou-se em encontrar uma correlação entre as variáveis, de forma que ajuda-se a entender os fatos acontecidos e maximizar as variáveis. Esta correlação está especificada abaixo e foi chamada de eficiência relativa.

$$\text{Eficiência relativa} = \frac{(\text{Porcentagem de recuperação metálica} \times \text{Porcentagem de ferro no concentrado})}{\text{Porcentagem de ganga no concentrado}} \quad (2)$$

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Microscopia Eletrônica da Fração Magnética e Não Magnética

Na Figura 5a tem-se a fração magnética do Itabirito Conceição deslamado processado a 673 K. Na imagem de elétrons secundários retroespalhados, se observa que todas as partículas apresentam a mesma tonalidade apontando a mesma densidade atômica, que pelas análises da porcentagem atômica (At.) apresentadas na tabela 2 nos pontos 1 (92% Fe At.) e 2 (70% Fe At.) correspondem a magnetita, mostrando um alto nível de concentração, coerente com as Figuras 7 e 9. A porcentagem atômica consiste no número de átomos de um determinado elemento em uma base de cem. Na Figura 5b tem-se uma imagem de elétrons secundários retroespalhados das partículas da fração não magnética do Itabirito Conceição deslamado processado a 673 K, onde se observa que as partículas de ganga possuem partículas de óxido de ferro (Partículas claras, ponto 1) com 81,% Fe At. A composição da ganga no ponto 2 corresponde a 56 % Si At. (Tabela 2) e é coerente com a composição apresentada na Figura 7.



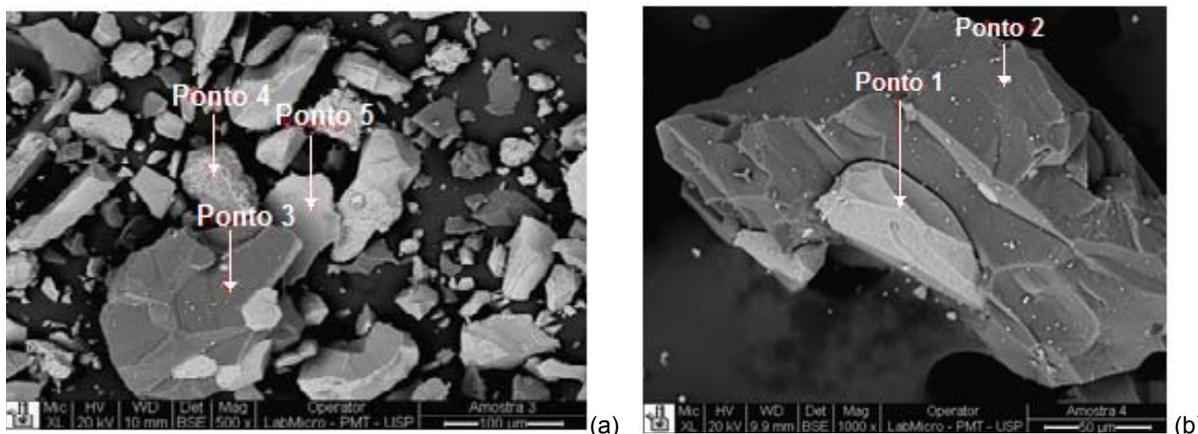
**Figura 5.** Itabirito Conceição deslamado -0,15 mm processado a 673 K. (a) Fração magnética, e (b) Fração não magnética.

**Tabela 2.** EDS do Itabirito Conceição deslamado processado a 673 K. Porcentagem Atômica (At.)

Ponto	Magnético ponto1	Magnético ponto 2	Não mag. ponto 1	Não mag. ponto 2
O	5,7	30	5,1	44
Si	2,2	0,8	13,7	56
Fe	92	70	81	0,30

Na Figura 6a tem-se a fração magnética do Itabirito Conceição deslamado processado a 773 K. A diferença do anterior, a imagem de elétrons secundários retroespalhados apresentam fases claras e obscuras mostrando a presença de ganga no concentrado. Na Tabela 3 tem-se a composição dos pontos 3 (60% Si At.) 4 (57% Fe At.) e 5 (65% Fe At.) que confirmam este fato e são coerentes com as Figuras 7 a 9.

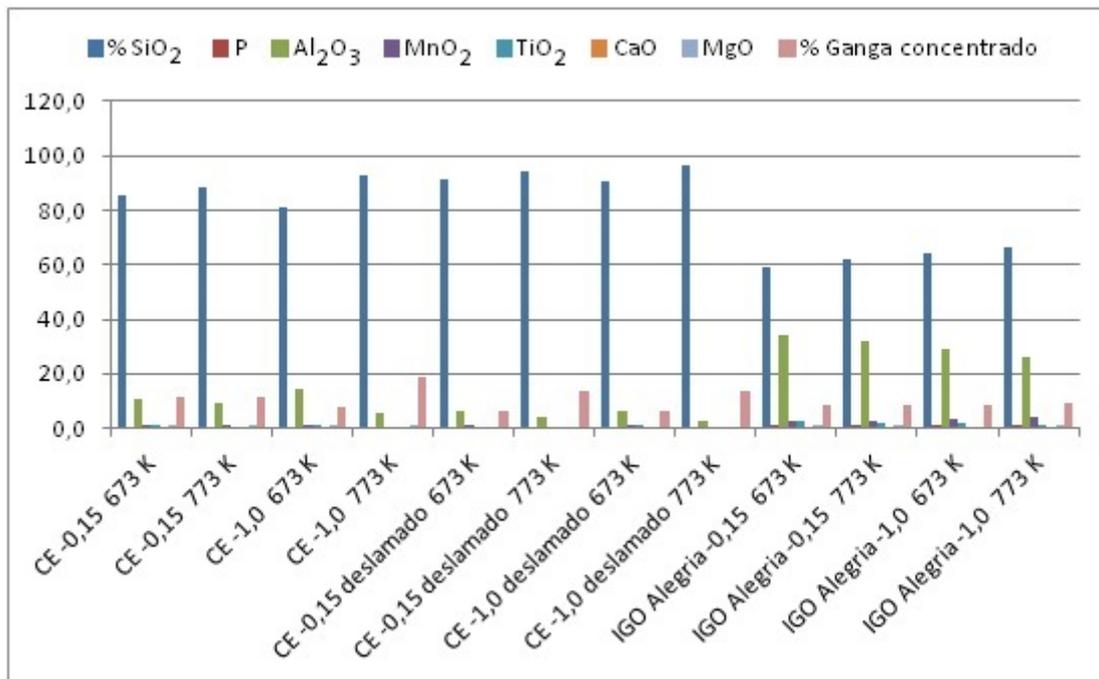
Na Figura 6b Tem-se uma imagem de elétrons secundários retroespalhados de uma partícula da fração não magnética mostrando no ponto 1 uma partícula de óxido de ferro (66% Fe At.) presa na ganga. No ponto 2 tem-se a composição da ganga, Tabela 3 (56% Si At.). São estas partículas de óxido de ferro as responsáveis pela presença de impurezas no concentrado magnético a maiores temperaturas, pois aumentam a sensibilidade magnética da ganga.



**Figura 6.** Itabirito Conceição deslamado -0,15 mm processado a 773 K. (a) Fração magnética, e (b) Fração não magnética.

**Tabela 3.** EDS do Itabirito Conceição deslamado processado a 773 K. Porcentagem Atômica (At.)

Ponto	Magnético ponto 3	Magnético ponto 4	Magnético ponto 5	Não mag. Ponto 1	Não mag. Ponto 2
O	40	29	31	33	43
Si	60	5,7	1,9	1,1	56
Fe	0,6	57	65	66	0,55
Al	-	7,6	-	-	1,1
Ca	-	0,7	-	-	-



**Figura 7.** Representação da porcentagem e da composição da ganga do concentrado em função do tipo do minério, da granulometria e da temperatura de processamento.

### 3.2 Resultados do Processamento em Função do Minério

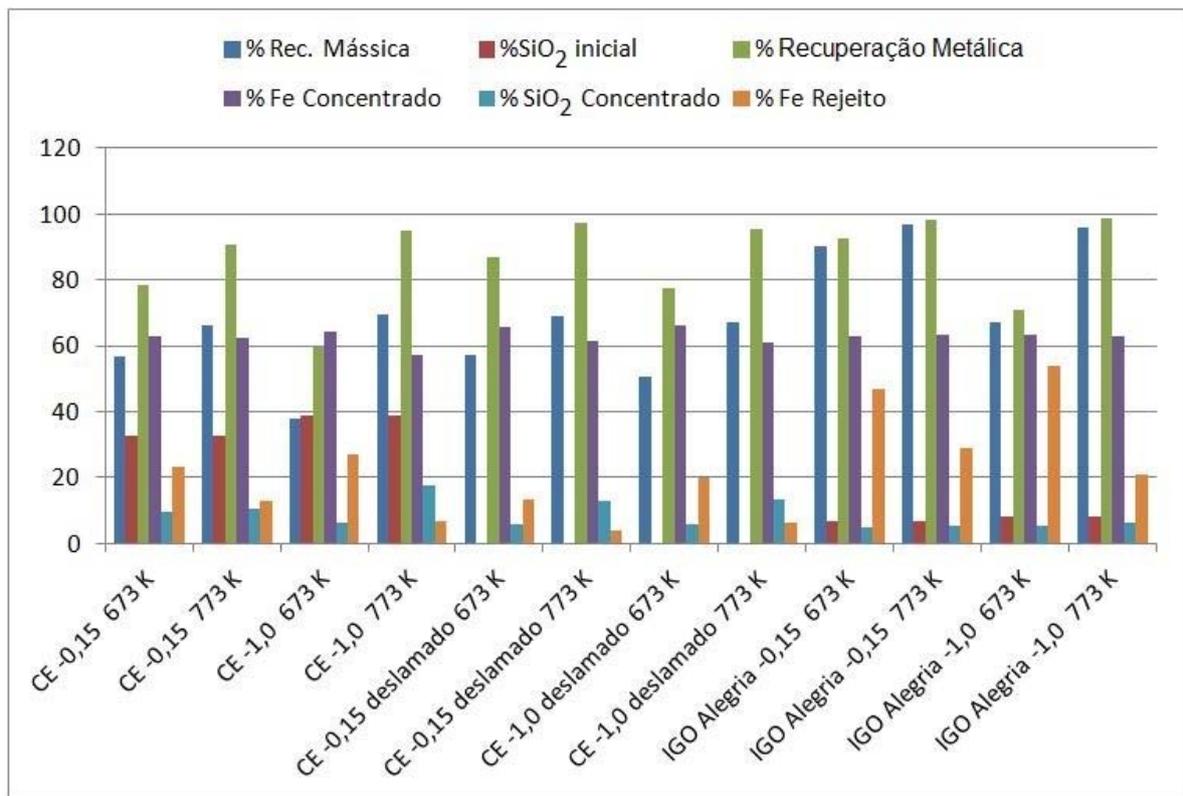
Na Figura 8 tem-se a porcentagem de sílica inicial, a recuperação metálica (Equação 1), a composição do concentrado e do rejeito em função do minério, da granulométrica e da temperatura de processamento. Os minérios apresentaram diferentes resultados conforme sua formação mineralógica.

Comparando as porcentagens de recuperação metálica em função do minério, para uma mesma granulometria e temperatura, o minério que apresentou uma maior porcentagem de recuperação de ferro foi o Itabirito Goethítico Alegria, com uma recuperação metálica de 98,5% em Fe. O Itabirito Compacto Conceição apresentou uma recuperação ligeiramente menor, de 95,1%.

### 3.3 Efeito da Granulometria

Na Figura 8, tem-se o efeito da granulometria sobre a recuperação de ferro nos casos de (a) 673 K e (b) 773 K. Na menor temperatura, a 673 K é mais evidente a maior recuperação da granulometria fina, a de -0,15 mm do que a de -1,00 mm. A maior temperatura não se tem um comportamento definido. Este fato pode dever-se ao fato de que as granulometrias menores permitem uma maior liberação do ferro, permitindo uma recuperação maior.

Os minérios de granulometria fina (~ -0,15mm) permitem maior liberação da ganga, conseguindo com isso obter melhores valores de porcentagem de recuperação metálica (até 19% a mais), recuperação mássica (até 19% a mais), maior porcentagem de ferro no concentrado (até 6% a mais), menor porcentagem de sílica no concentrado (até 7% a menos) e menor porcentagem de ferro no rejeito (até 7% a menos).



**Figura 8.** Recuperação metálica, teores de Fe do concentrado e do rejeito, teores de sílica inicial e no concentrado, em função do minério, da granulometria e da temperatura de processamento.

### 3.4 Efeito da Temperatura de Processamento

Na figura 8 tem-se a recuperação metálica em função da temperatura para cada minério. É notável em todos os casos, que a temperatura de 773 K gera uma maior recuperação metálica do que a temperatura de 673 K, possivelmente pelo fato de a maior temperatura promover uma maior conversão de hematita à magnetita.

Também na figura 8 se apresentam os valores de recuperação mássica, teores de Fe e SiO<sub>2</sub> do concentrado e porcentagem de ferro no rejeito. De modo geral, a recuperação metálica é maior e a concentração do ferro no rejeito é menor na medida em que o minério é processado a maior temperatura (773 K).

Processar o minério a uma menor temperatura permite uma maior sensibilidade para descartar a sílica, porém a porcentagem de ferro no rejeito aumenta. A amostra que apresentou a menor porcentagem de sílica no concentrado foi o itabirito Goethítico de Alegria, de -0,15 mm processado a 673 K.

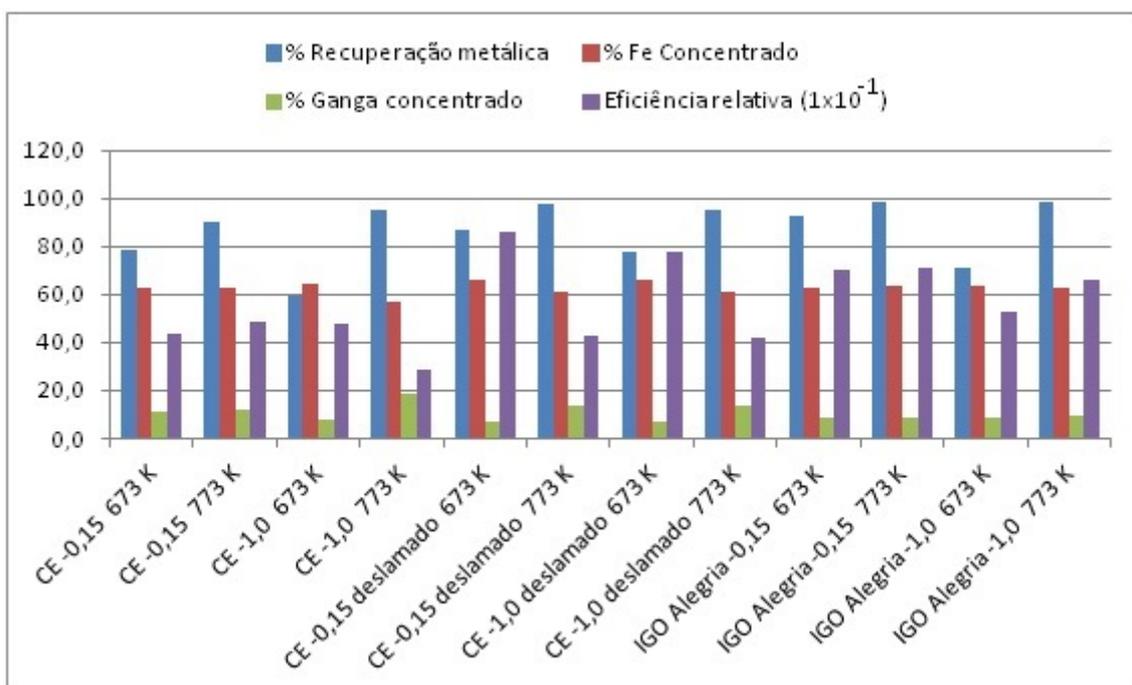
### 3.5 Comparação dos Concentrados Itabirito Compacto de Conceição Natural e Deslamado

Comparando as amostras de Itabirito Compacto de Conceição deslamadas com as naturais, as primeiras apresentam: até 18% a mais de recuperação metálica, entre até 13% a mais de recuperação mássica, até 4% a mais de porcentagem de ferro no concentrado, até 4% a menos de sílica no concentrado, e até 9% a menos de ferro no rejeito. Este resultado indica que o processo de deslamagem aprimora algumas variáveis do processo.

### 3.6 Eficiência Relativa

Como previamente discutido em correlação de variáveis, capítulo 2.4, para estabelecer um padrão ótimo entre a porcentagem de recuperação metálica, porcentagem de ferro no concentrado e porcentagem de ganga no concentrado, foi criada uma correlação entre elas, chamada de eficiência relativa (Equação 2). Na Figura 9 pode-se observar os valores obtidos.

O minério que apresentou maior eficiência relativa foi o Itabirito Compacto Conceição -0,15 mm deslamado processado a 673 K. Em ordem decrescente seguem o Itabirito Compacto Conceição -1,00 mm deslamado processado a 673 K e os Itabiritos Goethíticos Alegria -0,15 mm processados a 673 e 773 K. E notória a queda da eficiência ( $\approx 50\%$ ) nos casos dos Itabiritos Compacto Conceição pelo incremento da temperatura de processamento.



**Figura 9.** Correlação na forma de eficiência relativa entre as variáveis de porcentagem de recuperação metálica, porcentagem de ferro no concentrado, porcentagem de ganga, em função do tipo de minério, Granulometria e temperatura de processamento.

## 4 CONCLUSÕES

- Processar o minério a uma temperatura menor permite uma maior sensibilidade para descartar a sílica, porém a porcentagem de ferro no rejeito aumenta;
- as amostras de Itabirito Compacto de Conceição deslamadas apresentam melhores resultados em comparação com os concentrados naturais;
- os minérios de granulometria fina (-0,15mm) permitem maior liberação da ganga, conseguindo com isso obter melhores valores de porcentagem de recuperação metálica (até 19% a mais), recuperação mássica (até 19% a mais), maior porcentagem de ferro no concentrado (até 6% a mais), menor porcentagem de sílica no concentrado (até 7% a menos) e menor porcentagem de ferro no rejeito (até 7% a menos);

- a combinação de granulometrias finas (-0,15 mm) com temperaturas de processamento do minério próximas a 773 K permite obter recuperações mássicas maiores de até 29% com menores porcentagens de ferro no rejeito, obtendo-se entre um 14- 25% a menos que a granulometria mais grosseira (-1,0 mm);
- no caso da combinação de granulometrias finas (-0,15 mm) com temperaturas de processamento do minério próximas a 673 K permite obter maior porcentagem de ferro no concentrado (até 6% a mais) e menor porcentagem de sílica no concentrado (até 8% a menos);
- a maior correlação apresentada entre a porcentagem de recuperação metálica, porcentagem de ferro no concentrado e porcentagem de ganga no concentrado, chamada de eficiência relativa, foi o Itabirito Compacto Conceição -0,15 mm deslamado processado a 673 K. Em ordem decrescente seguem o Itabirito Compacto Conceição -1,00 mm deslamado processado a 673 K e os Itabiritos Goethíticos Alegria -0,15 mm processados a 673 e 773 K;
- notória a queda da eficiência relativa ( $\approx 50\%$ ) nos casos dos Itabiritos Compacto Conceição deslamado, pelo incremento da temperatura de processamento.

## Agradecimentos

A Fundação de Amparo a Pesquisa do estado de São Paulo (Fapesp) processo n. 2011/22544-7; a companhia Vale S.A. pelo financiamento e ajuda; a empresa Inbras-Eriez Ltda pelas separações magnéticas dos minérios.

## REFERENCIAS

- 1 Website da Vale S.A. Disponível em [www.vale.com](http://www.vale.com), acessado em 30/05/2011, às 10:00.
- 2 MOURÃO, M.; TAKANO, C. Self-reducing pellets for ironmaking: reaction rate and processing. *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review* London, Taylor & Francis, v. 24, n. 3-4, p.183-202, 2003.
- 3 BOGDANDY, L.; ENGELL, H. The reduction of iron ores. New York: Verlag Stahleisen, 1971, p.18-30.
- 4 HABERMANN, A.; WINTER, F.; HOFBAUER, H.; ZIRNGAST, J.; SCHENK, J. An experimental study on the kinetics of fluidized bed iron ore reduction. *ISIJ International*, v. 40, n.10, p. 935-942, 2000.
- 5 GAVIRIA, J.; BOHÉ, A.; PASQUEVICH, A.; PASQUEVICH, D. Hematite to magnetite reduction monitored by Mossbauer spectroscopy and X-ray diffraction. *Physica B: Condensed Matter*, v. 389, issue 1, 1, p.198-201, 2007.