



COMPARAÇÃO DA REDUÇÃO DA HEMATITA (Fe_2O_3) DE ALTA PUREZA POR GÁS DE HIDROGÊNIO E POR PLASMA FRIO DE HIDROGÊNIO*

Tiago Bristt Gonoring¹
Adonias Ribeiro Franco Júnior²
Estéfano Aparecido Vieira²
Ramiro Conceição Nascimento²

Resumo

Este trabalho estuda a redução de pós de hematita de alta pureza (com $\text{Fe}_2\text{O}_3 > 99,00\%$ e tamanho de partículas $< 5 \mu\text{m}$) usando como agentes redutores o gás de hidrogênio e o plasma frio de hidrogênio. A redução a plasma foi realizada sob tensão de 540 V e largura do pulso (T_{on}) na faixa de 120 a 130 μs , e da mesma forma que na redução a gás foram empregadas as seguintes condições: fluxo de 400 cm^3/min de hidrogênio, pressão de 530 Pa, temperaturas de 360°C e 400°C e tempos de 30, 60, 90 e 120 min. Os pós foram caracterizados por difração de raios X (DRX) e perda de massa de oxigênio por gravimetria. Os resultados mostraram que a 400°C e 120 minutos obtém-se uma fração de redução (α) de 0,93 quando se usa o plasma de hidrogênio contra 0,56 quando é usado o gás. Em todas as condições estudadas, verificou-se que a redução de hematita a ferro se deu em duas etapas: $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{Fe}$.

Palavras-chave: Redução; Plasma de hidrogênio; Hematita; Ferro; Baixas temperaturas.

COMPARING THE REDUCTION OF HIGH PURITY HEMATITE (Fe_2O_3) USING HYDROGEN GAS AND HYDROGEN COLD PLASMA

Abstract

This work deals with studies on the reduction of powders of high purity hematite (with $\text{Fe}_2\text{O}_3 > 99,00\%$ and particle size $< 5 \mu\text{m}$) using as reducing agents both hydrogen gas and cold plasma. Both reduction experiments were carried out under the same reference conditions: hydrogen flow-rates of 400 cm^3/min , pressure of 533 Pa, temperatures of 360°C and 400°C, and reduction times of 30, 60, 90 and 120 min. Especially, plasma reduction experiments were conducted with a BIAS voltage of 540V and cycle duties at the range of 120 to 130 μs . The powders were characterized by X-ray diffraction (XRD) and weight loss of oxygen by gravimetry. The results showed that at 400 °C and 120 minutes it is possible obtaining a reduction fraction (α) of 0.93 using plasma as reducing agent, while a reduction fraction of only 0.56 can be obtained when gas is used. In all the studied conditions, it has been found that the reduction process occurs in two steps: $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{Fe}$.

Keywords: Reduction; Hydrogen plasma; Hematite; Iron; Low temperatures.

¹ Engenheiro Metalurgista, Mestrando do Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Propemm – IFES Campus Vitória, ES, Brasil.

² Professor Doutor do Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Propemm – IFES Campus Vitória, membro da ABM, ES, Brasil.

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



1 INTRODUÇÃO

O carbono é o principal combustível e agente redutor utilizado nas indústrias siderúrgicas. A indústria do aço é considerada uma das principais fontes geradores do CO₂, principal gás responsável pelo efeito estufa. Do total de aço produzido no mundo, 95% é através da redução dos minérios de ferro via alto forno e cerca de 5% via redução direta e forno elétrico a arco [1].

As exigências na diminuição das emissões de gases do efeito estufa, principalmente o CO₂, aliadas à futura escassez de carvão mineral coqueificável, têm impulsionado a pesquisa por processos alternativos de produção de aço. Por isso, é crescente o esforço para o desenvolvimento de processos em que se usa o gás hidrogênio (H_{2(g)}) como agente redutor. O hidrogênio é um excelente agente redutor em temperaturas elevadas e o subproduto de sua reação com o óxido de ferro ou qualquer outro óxido é o vapor d'água [2,3].

Quando o gás hidrogênio (H_{2(g)}) passa para o estado de plasma de não equilíbrio, ou plasma frio, além das moléculas de hidrogênio, estão presentes várias outras espécies, como moléculas de hidrogênio energeticamente excitadas (H₂^{*}), hidrogênio atômico (H), hidrogênio iônico (H⁺), fótons e elétrons livres.

Diferentemente do hidrogênio molecular (H₂), as espécies H e H⁺ são capazes de reduzir termodinamicamente vários óxidos metálicos, tanto em baixa quanto em alta temperatura, conforme mostra a Figura 1 [4,5].

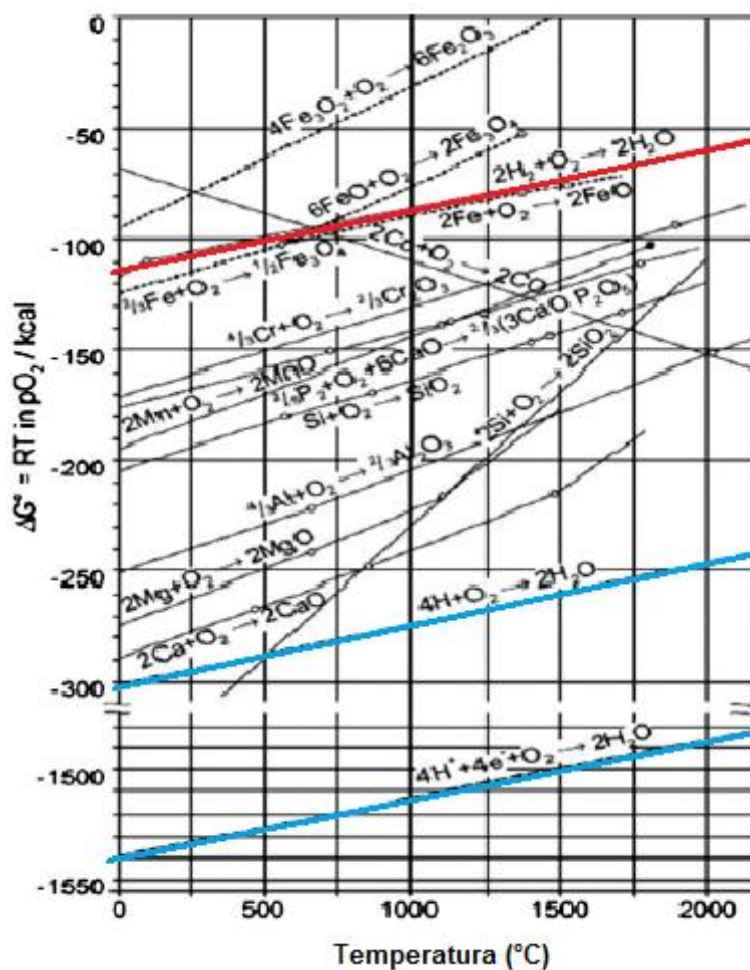


Figura 1. Diagrama de Ellingham Richardson [4].

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



Como pode ser visto no diagrama de Ellingham-Richardson da Figura 1, o hidrogênio molecular (H_2) reduz facilmente Fe_2O_3 e Fe_3O_4 , já o valor do ΔG° dos equilíbrios $2H_2 + O_2 = 2H_2O$ e $2Fe + O_2 = FeO$ são bem próximos. Entretanto, os valores de ΔG° envolvendo hidrogênio atômico e iônico são muito elevados e negativos em comparação com o do hidrogênio molecular e de outros óxidos. Isso significa que as espécies H e H^+ são capazes de reduzir termodinamicamente praticamente a todos os óxidos apresentados no diagrama, tanto em altas quanto em baixas temperaturas. Em razão de no estado de plasma coexistirem ambas as espécies, estão em curso estudos para produzir ferro utilizando o plasma frio de hidrogênio ou o plasma formado a partir de misturas de gases [5,6].

Hibler e Plaul [4] obtiveram ferro reduzido a partir de minério de ferro usando uma tocha de plasma de hidrogênio. Os trabalhos permitiram a concepção de uma planta industrial para a produção de aço baseado no uso do plasma térmico de hidrogênio. Rajput et al [5] realizaram ensaios de redução de minérios de ferro por plasma de hidrogênio em um reator a plasma de micro-ondas com alimentação de 3000 W de $2,95 \times 10^9$ Hz, pressão de $2,63 \times 10^3$ Pa e fluxo de H_2 de $200 \text{ cm}^3/\text{min}$. Segundo os autores, o equipamento em funcionamento garante uma concentração de um átomo de hidrogênio a cada 10 mil moléculas de hidrogênio e 1 íon de hidrogênio a cada 10 mil átomos de hidrogênio. A partir de minério de ferro, com o uso do plasma de hidrogênio eles conseguiram obter uma fração de redução de 94% a 300°C por tempo de 120 minutos, contra apenas 2% quando se usa o gás de hidrogênio nas mesmas condições. Em razão da baixa concentração das espécies H e H^+ presentes no plasma, eles atribuíram a redução principalmente às moléculas de hidrogênio vibracionalmente excitadas (H_2^*) presentes em altas concentrações [5].

Segundo Ogorodnikova [7], para a molécula de hidrogênio reagir na superfície de um sólido, antes é necessário que ocorra a sua dissociação termicamente ativada. As espécies H e H^+ não necessitam passar pela etapa de dissociação enquanto as moléculas de H_2^* precisam de menor energia de ativação para dissociação. Logo, as espécies ativadas do plasma possuem uma cinética de reação sólido-gás mais eficiente e favorável.

A reação de redução necessita de uma menor energia de ativação quando o hidrogênio passa para níveis de maior energia, ou seja, com a sua conversão em espécies mais energéticas. Assim, através da geração do plasma em temperaturas mais baixas pode-se alcançar um grau de redução com maior eficiência termodinâmica e cinética [8].

O objetivo do presente trabalho é comparar a redução da hematita de alta pureza usando como agentes redutores o gás hidrogênio e o plasma de hidrogênio gerado em reator a plasma pulsado DC.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A hematita utilizada nesta pesquisa foi fornecida pela Sigma-Aldrich. De acordo com as especificações, o seu grau de pureza é de 99,0% de Fe_2O_3 e 95% das partículas de pó apresentam granulometria abaixo de $5\mu\text{m}$.

Tanto os experimentos de redução a gás quanto os a plasma foram realizados em reator a plasma pulsado DC modelo Thor NP da marca SDS, pertencente ao Laboratório de Redução do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), campus Vitória. Um desenho esquemático do reator é apresentado na Figura 2.

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.

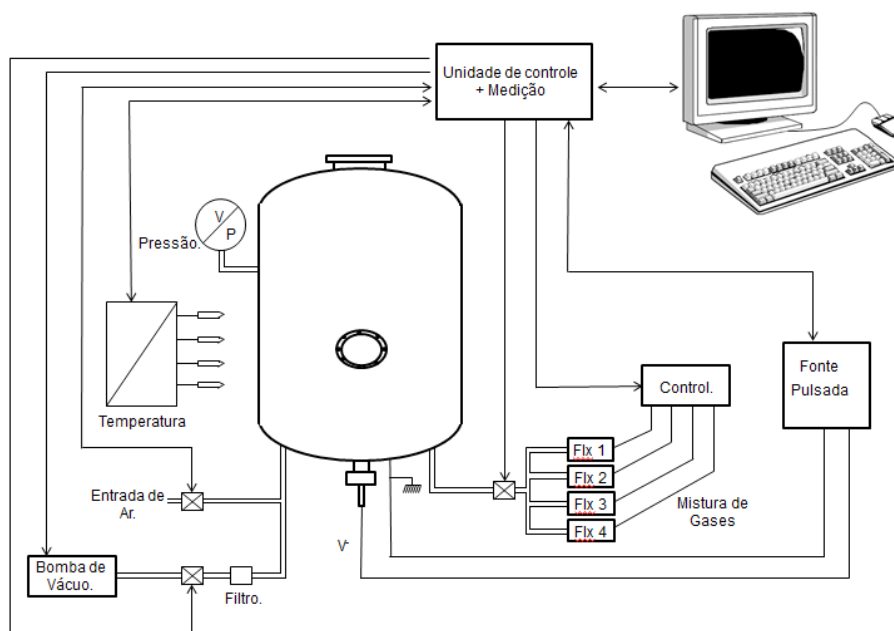


Figura 2. Representação esquemática do reator a plasma pulsado DC utilizado nos experimentos de redução a plasma e a gás.

A câmara do reator é cilíndrica fabricada com aço inoxidável austenítico AISI 304, cujas dimensões são de 500 mm de diâmetro e 750 mm de altura. A fonte de tensão pulsada fornece tensão máxima de 650 V, frequência de pulso de 3,4 kHz e período de pulso (τ) de 250 μ s. A bomba mecânica de palhetas de duplo estágio permite pressão de até 1Pa no interior da câmara de vácuo. Há três fluxímetros de gás de vazão máxima de 1000, 750 e 500 cm^3/min . O reator ainda contém medidor de pressão e termopares para o monitoramento da temperatura das amostras. Na parte central da câmara do reator, o porta-amostras funciona como catodo (-), enquanto as paredes da câmara funcionam como o anodo (+).

Uma vez evacuada a câmara, introduz-se o gás que é mantido a baixa pressão e a partir do qual é gerado o plasma [9,10]. As colisões inelásticas dos elétrons com as moléculas do gás levam a excitação, quebra de ligações das moléculas e ionização do gás. As colisões que geram excitações das moléculas são seguidas pela de-excitação das moléculas/átomos com emissão de radiação, que são responsáveis pelo brilho da descarga (*glowdischarge*) gerando-se assim o plasma a frio [9,10].

O controle do período de pulso (τ) da fonte de tensão permite aquecer a superfície das amostras até a temperatura desejada. Este período é composto pelo tempo de pulso ligado da fonte (τ_{ON}), também denominado largura do pulso, mais o tempo de pulso desligado (τ_{OFF}). Para o tempo de pulso desligado (τ_{OFF}) a fonte trabalha como se estivesse desligada. O aumento de temperatura na superfície do catodo pode ser feito pelo aumento do período de pulso (τ_{ON}) da fonte de tensão [9].

As amostras de pós de hematita usadas nos experimentos de redução foram colocadas em cinco cadinhos de aço inoxidável austenítico AISI 316L de 25 mm de diâmetro, 5 mm de altura e 3 mm de espessura de parede. Em cada cadinho, eram colocados cerca de 200 mg de pós de hematita, totalizando cada experimento cerca de 1000 mg de hematita. Após a determinação da massa de cada uma das amostras de pó em balança semianalítica com precisão de 0,1 mg, os cadinhos contendo os pós de hematita eram colocados dentro do reator.

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



Os experimentos de redução foram realizados utilizando-se como agente redutor hidrogênio gasoso ($H_{2(g)}$) e o plasma de Hidrogênio. O hidrogênio fornecido pela empresa White Martins apresenta grau de pureza de 99,999% H_2 .

As condições experimentais de redução tanto a gás quanto a plasma são apresentadas na Tabela 1. No total, foram realizados 16 experimentos.

Tabela 1. Condições utilizadas durante os ensaios de redução.

Temperatura(°C)	360 e 400
Tempo (min)	30, 60, 90 e 120
Fluxo de H_2 (cm^3/min)	400
Pressão (Pa)	533,3
Tensão DC (V)	540 e 0(*)

(*) Na redução por $H_{2(g)}$ a fonte de tensão pulsada se mantém desligada.

Para todos os experimentos de redução a plasma, foi usada a seguinte seqüência de procedimentos:

1. Pesagem dos cadinhos e das amostras;
2. Colocação no interior da câmara de vácuo dos cadinhos contendo as amostras e fechamento desta;
3. Bombeamento da câmara até atingir pressões inferiores a 10 Pa;
4. Introdução de nitrogênio (99,999%) até uma pressão de 100 Pa;
5. Acionamento do plasma e ajuste de τ_{ON} para aquecer o sistema até a temperatura desejada;
6. Após atingir a temperatura de trabalho, fechamento do suprimento de N_2 e abertura da entrada da mistura gasosa desejada, o tempo de residência do gás N_2 é de cerca de 50 s [10];
7. Elevação da pressão para cerca de 530 Pa;
8. Ajuste de τ_{ON} devido à nova mistura e pressão.
9. Após o tempo estipulado de tratamento, desligamento do plasma e corte do suprimento de gás;
10. Resfriamento sob vácuo até temperatura próxima da ambiente seguido de Evacuação da câmara.

Para os experimentos de redução a gás ($H_{2(g)}$), foi usada outra seqüência a partir do 4^o procedimento do experimento a plasma:

4. Aquecimento das amostras com sistema de aquecimento externo (“catodo quente”).
5. Após atingir a temperatura de trabalho, introdução do gás e ajuste da pressão;
6. Após o tempo estipulado para o tratamento, desligamento da resistência do “catodo quente” e fechamento da entrada de gás;
7. Resfriamento sob vácuo até temperatura próxima a ambiente e evacuação (quebra de vácuo).

Após cada um dos experimentos de redução, foram pesados os cadinhos contendo as amostras. A diferença de massa do cadinho contendo a amostra antes e após o ensaio dá o quanto de massa que foi extraída pelo processo de redução. A única possibilidade de perda de massa é a de oxigênio, que sai do reator através da bomba de vácuo na forma de vapor d’água. Então o balanço de massa das amostras para o cálculo da fração de redução (α) é em cima do balanço de massa de oxigênio. Para este calculo utilizamos a equação 1:

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



$$\alpha_i = \frac{C_o^i - C_t^i}{0,297.m_0^i} \quad (1)$$

Em que:

C_o^i = massa da amostra mais a massa do cadinho (i) antes do ensaio de redução, sendo $i=1, \dots, 5$;

C_t^i = massa da amostra mais o cadinho (i) após a redução, sendo $t= 30, 60, 90$ e 120 minutos.

m_0^i = massa da amostra (i) antes do ensaio de redução.

O fator de correção 0,297 esta relacionado com o grau de pureza da hematita (99%) e a % em massa de oxigênio estequiométrico presente na mesma.

O valor de α determinado em cada experimento corresponde à média aritmética de cinco amostras. Com relação aos agentes redutores (H_2 puro, plasma de H_2), de posse dos resultados de $\alpha_i(t)$, foram plotadas as curvas de redutibilidade.

A identificação das fases geradas pelos processos de redução foi feita por difração de raios-X (DRX) que permitiu acompanhar a evolução das fases formadas. O equipamento de DRX, modelo D2 PhaserBruker, utilizado para esse fim pertence ao Laboratório de Redução do IFES – campus Vitória. Foi utilizado um tubo com radiação de $Cu-k_\alpha$ operando em 30 kV e 10 mA. Os padrões de difração foram obtidos com 2θ variando de 10° a 100° e intervalos de $0,02^\circ$ por segundo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta a fração de redução $\alpha=f(t)$ das amostras de hematita após os ensaios de redução por hidrogênio gasoso e plasma frio de hidrogênio nas temperaturas de $360^\circ C$ e $400^\circ C$.

Observa-se que para uma dada temperatura, maiores períodos de tempo favorecem maiores valores de α . Alternativamente, fixado o tempo maiores temperaturas proporcionam maiores valores de α . Ou seja, para os processos de redução aplicados, a redução é diretamente proporcional ao tempo e a temperatura.

De modo semelhante, fixados o tempo e a temperatura, a redução da hematita (Fe_2O_3) por plasma de hidrogênio foi sempre superior à redução por hidrogênio gasoso. A $400^\circ C$ a redução a gás alcançou 57% ($\alpha \times 100$) em 120 minutos, enquanto que a plasma, obteve-se 93% de redução.

Os dados de fração de redução a plasma e a gás a $400^\circ C$ se ajustam com boa aproximação ($R^2=0,99983$ a plasma; $R^2= 0,99609$ a gás) a uma curva de uma função sigmoideal. Este resultado indica que a taxa de redução ($d\alpha/dt$) é crescente até determinado ponto ($t, \alpha(t)$) e em seguida é progressivamente decrescente, ou seja, a redução da hematita por plasma e a gás evolui a menores taxas nas etapas finais. Ambas as curvas apresentaram comportamentos semelhantes, porém a redução a plasma foi significamente maior. Da mesma forma, a $360^\circ C$ as frações de redução a plasma e a gás tiveram comportamento semelhantes até $t=90$ minutos, a partir daí a redução a gás tendeu a um valor constante ($\alpha=0,16$) e a redução a plasma entre $t=90$ e $t=120$ minutos apresentou uma elevada taxa de redução alcançando-se um valor de $\alpha=0,54$, valor este bem próximo da redução a gás em $400^\circ C$ e $t= 120$ min e a plasma a $400^\circ C$ e $t = 60$ min. Assim como a $400^\circ C$, a redução a plasma a $360^\circ C$ foi superior a redução a gás.

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.

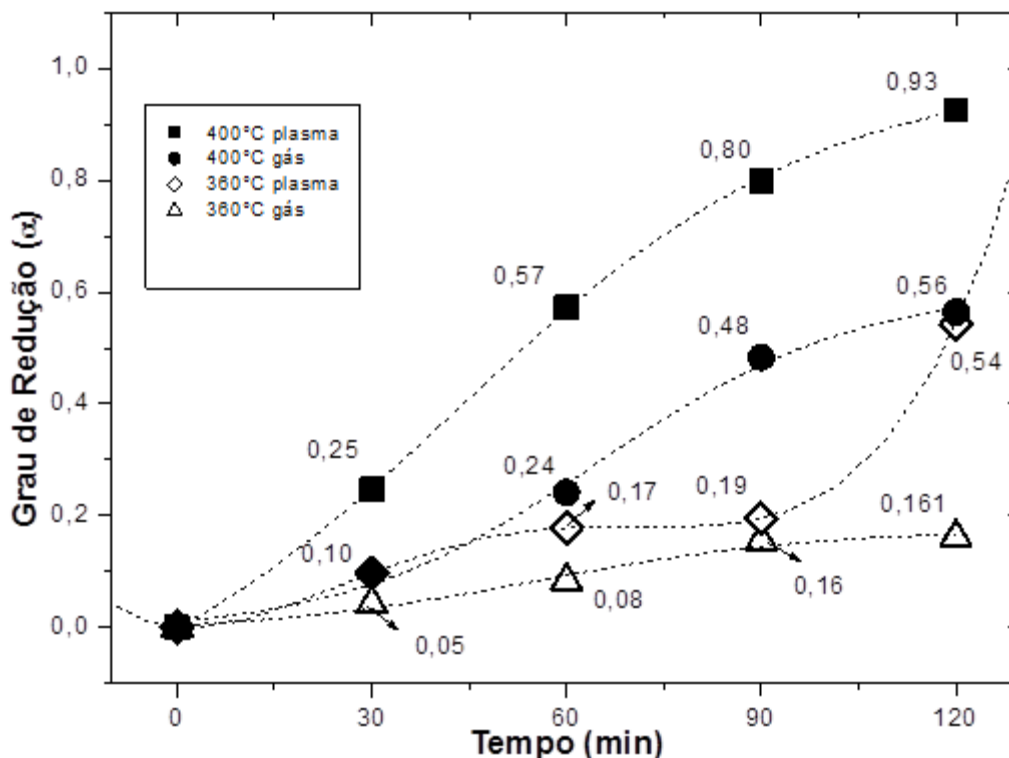


Figura 3. Grau de redução (α) em função do tempo (min.) dos ensaios de redução de hematita por hidrogênio gasoso e plasma frio de hidrogênio.

Os difratogramas apresentados nas Figuras 4(a) e 4(b) são das amostras reduzidas a plasma respectivamente a 360°C (60 e 120min) e 400°C (30, 60 e 120 min). Em todos os difratogramas das amostras reduzidas a plasma, foram detectadas as fases ferro ($Fe_{(\alpha)}$) e magnetita (Fe_3O_4) e todo o Fe_2O_3 foi reduzido. A diferença básica entre os difratogramas está na intensidade dos picos dos planos de $Fe_{(\alpha)}$ que estão em função da fração de redução, ou seja, quanto maior o valor de α maiores as intensidades dos picos de $Fe_{(\alpha)}$ e menor a intensidade dos picos de Fe_3O_4 . Observa-se que há grande semelhança entre os difratogramas da Figura 4 (a) em 120 min. ($\alpha=0,54$) e Figura 4 (b) 60 min. ($\alpha=0,57$). De fato, a diferença entre a contagem dos picos dos planos de ferro, entre estas duas amostras é muito pequena, assim como a dos planos de magnetita. De posse da evolução das fases apresentadas pelos difratogramas, podemos sugerir que a redução ocorreu em duas etapas: $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow Fe_{(\alpha)}$ ou $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 + Fe_{(\alpha)} \rightarrow Fe_{(\alpha)}$.

A evolução das fases durante os processos de redução da hematita por hidrogênio gasoso é apresentada na Figura 5 (a) e Figura 5(b). A 360°C a hematita não foi completamente reduzida nos tempos de tratamento, e os picos de ferro só foram evidenciados para os tempos de 90 e 120 minutos. Pode-se inferir que a redução ocorreu segundo as etapas: $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_2O_3 + Fe_3O_4 \rightarrow Fe_2O_3 + Fe_3O_4 + Fe_{(\alpha)}$. Observa-se no difratograma da Figura 5 (b) t=90 minutos, a presença somente de magnetita e ferro, enquanto para t=120 minutos, além dessas fases, detecta-se a presença de hematita ainda não reduzida. Porém as intensidades dos picos dos planos de ferro na amostra tratada durante t=120min foram maiores, ao passo que as da magnetita, menores. Colombo et al [11] realizaram experimentos termogravimétricos de redução de hematita a temperaturas abaixo de 400°C. De acordo com esses pesquisadores, é comum a presença de uma hematita não reagida no final da

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



redução quando o grau de redução é pequeno ou não expressivo. Eles atribuíram esse fenômeno ao surgimento durante a redução de um *spinel* formado por um ou ambos Fe_3O_4 e $\text{Fe}_{3+w}\text{O}_4$ e propuseram o seguinte mecanismo: $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{spinel} + \text{Fe}(\alpha)$.

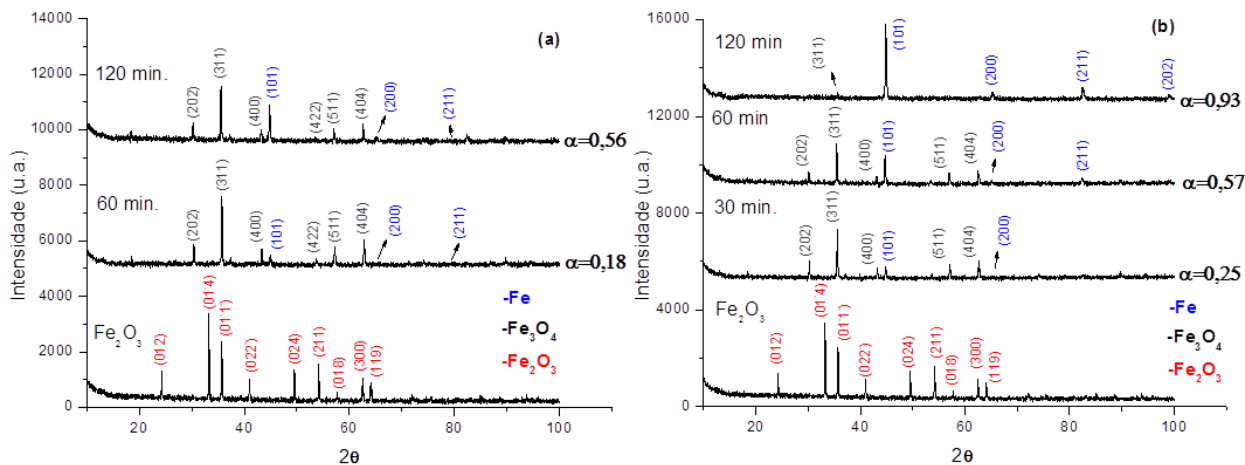


Figura 4. Evolução das fases presentes nos pós de hematita na redução por plasma de hidrogênio, a 360°C (a) e 400°C (b).

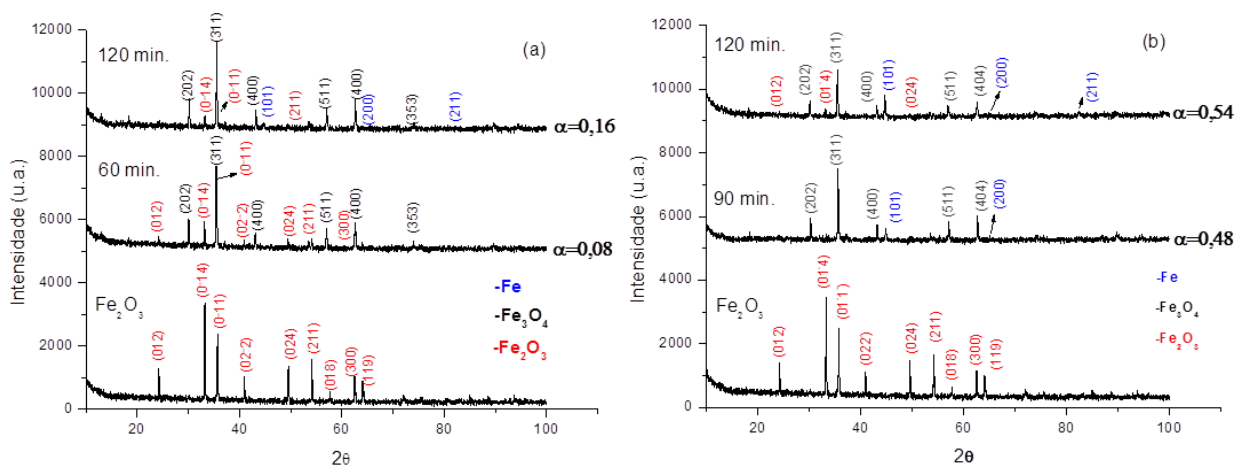


Figura 5. Evolução das fases presentes nos pós de hematita na redução por hidrogênio gasoso, a 360°C (a) e 400°C (b).

4 CONCLUSÃO

Experimentos de redução a plasma de pós de hematita de elevada pureza por hidrogênio gasoso e por plasma frio de hidrogênio nas temperaturas de 360°C e 400°C foram realizados.

A redução dos pós de hematita por plasma frio de H_2 mostrou-se mais eficiente em relação a redução por hidrogênio gasoso em todas as condições estudadas.

Foi obtida uma redução de 93% a partir da hematita a 400°C e 120 minutos, utilizando-se plasma de hidrogênio.

A redução dos pós de hematita por plasma ocorre em duas etapas: $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{Fe}(\alpha)$ ou $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Fe}(\alpha) \rightarrow \text{Fe}(\alpha)$.

A redução dos pós de hematita por hidrogênio gasoso nas condições de estudo seguiu as etapas: $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Fe}(\alpha)$.

* Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado concedida a Tiago Bristt Gonoring.

REFERÊNCIAS

- 1 Birat J-P, Hanrot F, Danloy G. CO₂ mitigation technologies in the steel industry: a benchmarking study based on process calculations. *Stahl und Eisen*, 2003; 123(9): 69-72.
- 2 Lampert K, Ziebig A, Stanek W. Thermoconomical analysis of CO₂ removal from the Corex export gas and its integration with the blast-furnace assembly and metallurgical combined heat and power (CHP) plant. *Energy*, 2010; 35(2): 1188-1195.
- 3 Ghosh A, Chatterjee A. *Ironmaking and steelmaking: theory and practice*. PHI Learning Private Limited, New Delhi, 2008.
- 4 Hiebler H, Plaul J. Hydrogen plasma smelting reduction – An option for steelmaking in the future. *Metalurgija*, 2004; 43(3): 155-162.
- 5 Rajput P, Bhoi B, Sahoo S, Paramguru KR, Mishra BK. Preliminary investigation into direct reduction of iron in low temperature hydrogen plasma. *Ironmaking and Steelmaking*, 2013; 40(1): 61-68.
- 6 Khina BB, Grinchuk PS. Modeling of iron scale reduction by methane conversion products in a plasma jet. I. Thermodynamic modeling. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2011; 84(2): 280-286.
- 7 Ogorodnikova OV. Comparison of hydrogen gas-, atom- and ion-metal interactions. *Journal of Nuclear Materials*, 2000; 277(2): 130-142.
- 8 Zhang Y, Ding W, Lu X, Guo S, Xu K. Reduction of TiO₂ with hydrogen cold plasma in DC pulsed glow discharge®. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2005; 15(3): 594-599.
- 9 Bogaerts A, Neyts E, Gijbels R, Van Der Mullen J. Gas discharge plasmas and their applications. *SpectrochimicaActa Part B: Atomic Spectroscopy*, 2002; 57(4): 609-658.
- 10 Chapman BN. *Glow discharge processes: Sputtering and plasma etching*. New York: Wiley, 1980.
- 11 Colombo U, Gazzarrini F, Lanzavecchia G. Mechanisms of iron oxides reduction at temperatures below 400°C. *Materials Science and Engineering*, 1967; 2(3): 125-135.

* *Contribuição técnica ao 44^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*