

VI-110 – REDUÇÃO DA EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA PRODUÇÃO DE FERRO GUSA POR PROCESSO DE REDUÇÃO CARBOTÉRMICA INCENTIVADA POR MICRO-ONDAS

Edmilson Renato de Castro⁽¹⁾

Engenheiro Químico pela Escola Superior de Química das Faculdades Oswaldo Cruz. Doutorando em Engenharia Metalúrgica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Atua no Laboratório de Micro-ondas do Instituto Mauá de Tecnologia.

Luiz Alberto Jermolovicius

Engenheiro Químico pelo Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia. Doutor em Engenharia Química pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Atua no Laboratório de Micro-ondas do Instituto Mauá de Tecnologia.

Marcelo Breda Mourão

Engenheiro Metalurgista, Doutor e Livre-docência pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Atualmente é professor associado da Universidade de São Paulo.

Cyro Takano

Engenheiro Metalurgista, Doutor e Livre-docência pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Atualmente é professor sênior da Universidade de São Paulo.

José Thomaz Senise

Engenheiro Mecânico e Elétrico pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Doutor em Engenharia Elétrica - Stanford University. Atua no Laboratório de Micro-ondas do Instituto Mauá de Tecnologia.

Endereço⁽¹⁾: Pça Mauá, 1 – Bairro Mauá - São Caetano do Sul – SP – CEP:09580-900 – Tel.:55 11 4239 3049 – Fax: 55 11 4238 8988 – e-mail: renatocastro@maua.br

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma tecnologia inovadora, a redução carbotérmica incentivada por micro-ondas, para reduzir a emissão do dióxido de carbono gerado na produção de ferro gusa. Na siderurgia convencional, os gases quentes efluentes do alto forno são reciclados para aproveitamento da sua energia na redução do minério, porém esta quantidade necessita ser complementada com a energia da queima de combustível fóssil, gerando uma maior quantidade de gases estufa. Preconiza-se a substituição desta complementação energética por aquecimento com micro-ondas. O forno opera com um gerador de micro-ondas de 2,45 GHz e potência variável até 6 kW e registro contínuo da perda de massa do material em redução através de uma balança elétrica devidamente adaptada para suportar o cadinho de redução. Os dados colhidos foram tratados matematicamente obtendo-se resultados acima de 99,9% de conversão.

PALAVRAS-CHAVE: Redução na emissão de CO₂, Micro-ondas.

INTRODUÇÃO

Devido à diminuição de recursos energéticos e a introdução de leis ambientais mais rigorosas, a busca de novos processos de produção de aço e ferro-gusa tornaram-se importantes. A redução da emissão de gás carbônico (CO₂) bem como a conservação de energia são tarefas urgentes para prevenir o aquecimento global. Como grande parte das emissões de CO₂ na atmosfera é atribuída à fabricação do ferro em altos fornos, apesar da tecnologia do alto forno ser avançada, novos processos de fabricação do ferro baseados em alternativas inovadoras podem ser introduzidos. A possibilidade de se usar aquecimento por micro-ondas para reduzir a emissão de CO₂ foi estudado.

A produção do ferro metálico é baseada principalmente na redução de minérios de ferro por materiais carbonáceos em alto-forno. Entretanto, continua a busca por um processo de redução que poderia superar alguns dos poucos inconvenientes do alto-forno, como a emissão de gases de efeito estufa.

A grande maioria dos óxidos metálicos e carbono (carvão e coque), respondem ao aquecimento por micro-ondas. Portanto, a redução carbotérmica de óxidos metálicos com micro-ondas é possível.

DEFINIÇÃO DE MICRO-ONDAS

Micro-ondas são radiações eletromagnéticas na faixa de frequência de 0,3 a 300 GHz, com o correspondente intervalo de comprimento de onda de 1 m a 1 mm. As micro-ondas, tal como as ondas visíveis, obedecem às leis da óptica e podem ser transmitidas, absorvidas ou refletidas dependendo do tipo de material.

Existem basicamente três tipos de materiais, com relação à forma de interação com as micro-ondas. Os materiais transparentes às micro-ondas permitem a total passagem das ondas através de si, sem perdas significativas de energia. Os materiais opacos refletem as ondas eletromagnéticas enquanto que os materiais com altas perdas dielétricas, ou seja, materiais que absorvam irradiação de micro-ondas, também chamados de dielétricos interagem com as micro-ondas absorvendo-as eficientemente, resultando em seu aquecimento [1-2].

A frequência de micro-ondas, das disponíveis para aplicação industrial, mais utilizada para aquecimento industrial é 2,45 GHz por apresentar a melhor relação custo-benefício entre todas as frequências alocadas para aplicações industriais, científicas e médicas (ISM) definidas pela União Internacional de Telecomunicações (UIT). Esta frequência corresponde ao comprimento de onda no espaço livre de 12,25 cm.

REDUÇÃO CARBOTÉRMICA DE MINÉRIO DE FERRO

Quando um óxido de ferro e carbono sólido são misturados e aquecidos numa temperatura de redução, a reação ocorre segundo o mecanismo: reação gás-sólido com intermediários gasosos (reações de 2 a 5) e a reação (1) sólido-sólido tem participação desprezível no processo de redução do minério de ferro devido a fatores cinéticos (baixa velocidade de reação em comparação às reações gás-sólido).



Reações gás-sólido com intermediários gasosos:



A taxa de reação do minério de ferro é definida como sendo a porcentagem do material reagido e foi determinado pela perda de massa. O cálculo da quantidade de material que reagiu durante cada experimento realizado foi efetuado empregando-se a equação 6:

$$\% \text{TR} = [(M_i - M_t) / (M_i \times M)] \times 100 \quad \text{equação (6)}$$

Onde: TR = Taxa de reação (%), M_i = Massa inicial da amostra (g), M_t = Massa no instante t (g), M = Porcentagem máxima de perda de massa (35%).

MATERIAIS E MÉTODOS

Hematita de Carajás com 67% de ferro e coque com 86,5% de carbono fixo, ambos na forma de pó com faixa granulométrica entre 0,074 a 0,106 mm foram utilizados na preparação de pelotas contendo minério e redutor na proporção estequiométrica para redução do minério de ferro.

Estes pós finos são aglomerados com carboxietilcelulose. O diâmetro destas pelotas, depois de secas, foi reduzido para valores entre 15-18 mm. As pelotas foram pesadas (massa aproximada de ± 20 g) e foram colocadas em um cadinho de grafite de 100 mL.

Esta carga foi colocada no centro de uma peça de fibra cerâmica anular, revestida internamente com carbetto de silício. Este conjunto foi colocado sobre um suporte cerâmico, no interior de um forno de micro-ondas. Este suporte é apoiado em uma balança elétrica. A posição do cadinho de grafite com as pelotas no interior do forno foi sempre o centro.

As pelotas foram irradiadas com micro-ondas de 2,45 GHz. A câmara de reação foi preenchida com gás argônio seco com uma vazão de 1,0 L/min. A cada 2 minutos, registrou-se a perda de massa das pelotas através de uma balança elétrica especialmente adaptada para monitorar a taxa de reação. A irradiação por micro-ondas foi mantida até que a perda de massa tornou-se nula.

Os fumos gerados no processo foram descartados, após controle analítico. Note-se que a única fonte de energia neste processo foi a de micro-ondas.

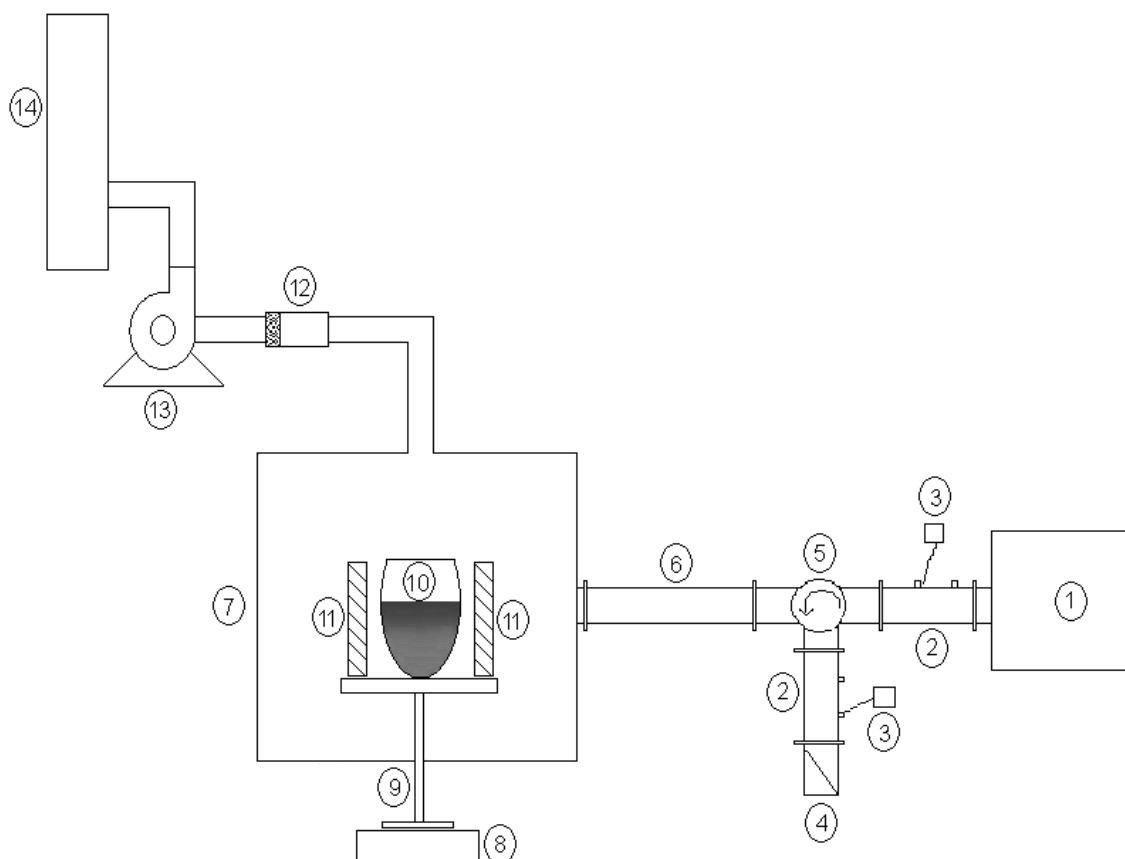


Figura 1 – Esquema do forno para redução carbotérmica (balança termogravimétrica) irradiada por micro-ondas. Legenda: 1 - Gerador de micro-ondas de 2,45 GHz de potência regulável até 6 kW; 2 – Acopladores direcionais; 3 – Medidores de potência de micro-ondas; 4 – Carga dissipativa para as micro-ondas refletidas; 5 – Circulador; 6 – Trecho de guia de onda; 7 – Cavidade de aço inoxidável; 8 – Balança semi-analítica até 3 kg; 9 – Suporte de cadinho em cerâmica; 10 – Cadinho de grafite de 100 mL; 11 – Fibra cerâmica anular revestida internamente com carbetto de silício; 12 – Analisador de gases; 13 – Exaustor; 14 – Chaminé.

O forno consiste em uma cavidade retangular de aço inoxidável de 38 L de volume, conectada a um gerador de micro-ondas de 2,45 GHz de potência regulável até 6 kW. O gerador é protegido contra reflexão de micro-ondas por um circulador. Dispõe de um acoplador direcional para permitir a medida da potência de micro-ondas irradiada ao sistema reagente e a refletida pelo mesmo sistema. O esquema e a foto do equipamento é apresentado pela Figura 1 e 2 respectivamente.



Figura 2: Vista geral do forno de redução carbotérmica via irradiação por micro-ondas.

RESULTADOS

A figura 3 apresenta uma fotografia do cadinho ao rubro, durante a redução carbotérmica incentivada por micro-ondas.

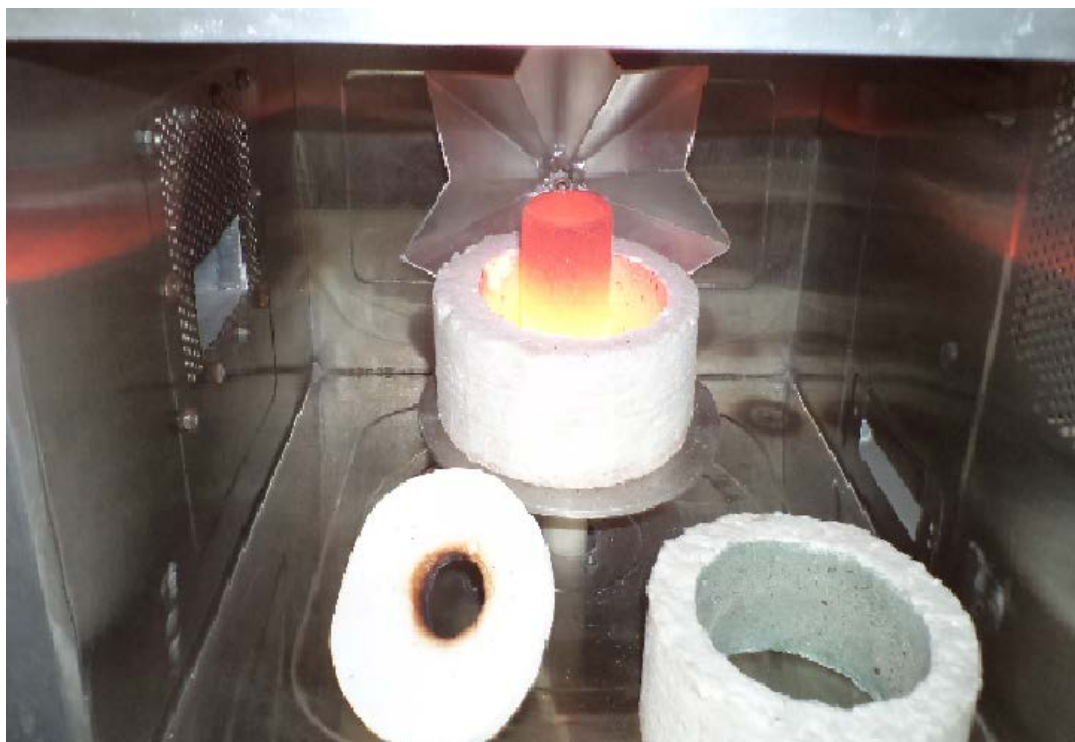


Figura 3: Cadinho ao rubro, no interior de uma fibra cerâmica anular revestida com carvão de silício, durante a redução carbotérmica incentivada por micro-ondas.

A figura 4 apresenta a taxa de reação em função do tempo de exposição à irradiação por micro-ondas. Este gráfico apresenta resultados da evolução da taxa de reação para três repetições. Os dados das medidas contínuas de perda de massa foram matematicamente tratados através da equação 6.

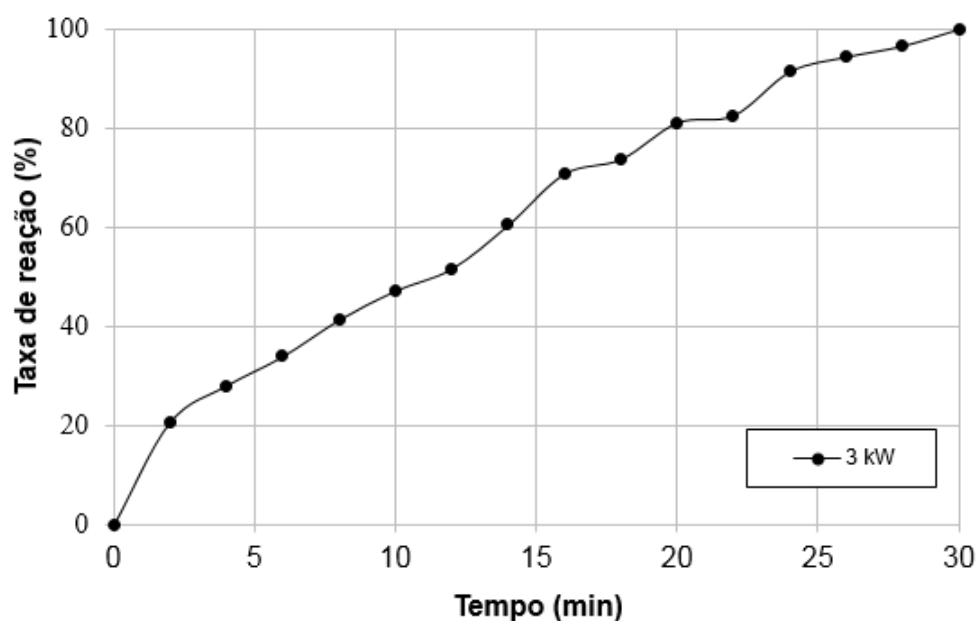


Figura 4: Taxa de reação em função do tempo de exposição a 3kW de potência às micro-ondas.

CONCLUSÕES

A primeira conclusão deste trabalho é a comprovação empírica de é possível produzir gusa apenas com micro-ondas como fonte de energia [3-6].

Considerando que o processo de fabricação do ferro gusa, através de usinas integradas a coque, em um alto forno convencional se consome, aproximadamente, 500 kg de coque por 1000 kg de metal produzido e gera aproximadamente, 1700 kg de gás CO_2 [7]. Podemos, assim, visualizar o dano à biosfera gerado por esta emissão de gás carbônico.

O volume anual de produção, no Brasil, segundo o “Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico – Ano 2012” do Ministério de Minas e Energia, em 2011, é de 27×10^6 toneladas de ferro gusa com a consequente produção de $4,6 \times 10^{10}$ toneladas de CO_2 [4]. Isto representa 3,1 % de todo o gás CO_2 gerado no país.

O consumo de carbono para a produção de ferro gusa a partir de minério de ferro atende a duas necessidades. A primeira é como redutor na redução do óxido de ferro a ferro gusa. A segunda, é o fornecimento de energia para manter a temperatura de reação. A queima de coque ou outra fonte de carbono visa complementar a energia recuperada pelo reciclo dos fumos de alto-forno.

Em ambas, os consumos de carbono são similares. Quando a energia pertinente à segunda aplicação for fornecida por energia de micro-ondas, praticamente metade da emissão do CO_2 da produção do ferro gusa é eliminada.

Mais ainda, usando micro-ondas gerada por eletricidade associada a fontes de energia elétrica como a eólica, solar ou nuclear reduzem-se ainda mais o impacto ambiental [3].

Este trabalho, em fase inicial, visou contribuir para o conhecimento da tecnologia de aplicação de micro-ondas a processos de obtenção de ferro primário. É uma alternativa para a redução da emissão de carbono na indústria siderúrgica que merece ser melhor estudada com vista à sua eventual evolução para um processo comercial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SUTTON, W. H Microwave Processing of Ceramic Materials. Ceramic Bulletin. v.68, n.2, p. 376-386, 1989.
2. HAQUE, K. E. Microwave Energy for Mineral Treatment Processes – a brief review. International Journal of Mineral Processing. v. 57, p. 1-24, 1999.
3. HAYASHI, M.; TAKEDA, K.; KASHIMURA, K.; WATANABE, T.; NAGATA, K. Carbothermic reduction of hematite powders by microwave heating. ISIJ International, 53 (7), pp.1125-1130, 2013.
4. CLEMENTS, B.; POMALIS, R.; ZHENG, L.; HERAGE, T.; GODIN, E. Method for reducing fuel consumption and greenhouse gases in an iron ore traveling grate furnace. Minerals and Metallurgical Processing, 29 (3), pp.137-143, 2012.
5. NAGATA, K.; HAYASHI, M. Innovation of ironmaking by microwave technology. Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan, 132 (1), pp.20-22, 2012.
6. CASTRO, E. R.; MOURÃO, M. B.; JERMOLOVICIUS, L. A.; TAKANO, C.; SENISE, J.T. Carbothermal Reduction of Iron Ore Applying Microwave Energy. Steel Research International, v.83, n.2, p.131-138, 2012.
7. Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico. Ministério de Minas e Energia, pp.50, 2012.