

IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLES EM PROCESSO DE REDUÇÃO CARBOTÉRMICA DE MINÉRIO DE FERRO INCENTIVADA POR MICROONDAS¹

Edmilson Renato²

Marcelo Breda Mourão³

Luiz Alberto Jermolovicius⁴

José Thomaz Senise⁵

Cyro Takano⁶

Resumo

O presente trabalho apresenta um equipamento em desenvolvimento para o processar de reduções carbotérmicas sob campo de microondas, que permita pleno controle da potência fornecida e medida da energia de microondas efetivamente aplicada à carga em processo de redução, e, também, medida simultânea de temperatura e de massa do material sob redução. No desenvolvimento do equipamento, foram atendidas, simultaneamente, as necessidades inerentes aos processos de redução carbotérmica e ao processo de aquecimento de materiais com irradiação por microondas. O protótipo desenvolvido opera com um gerador de microondas de 2,45 GHz e potência variável até 3 kW e registro simultâneo da temperatura e da perda de massa do material em redução. Opera sob atmosfera de argônio. Nos testes operacionais do protótipo procedeu-se à redução carbotérmica de minério de ferro, utilizando carvão vegetal como redutor. Obtiveram-se curvas cinéticas de redução de minério de ferro e de consumo de energia consumida neste processo. Os dados colhidos com este protótipo permitiram realizar uma análise da energia e microondas efetivamente consumida na redução do minério.

Palavras-chave: Redução carbotérmica; Microondas; Minério de ferro.

IMPLEMENTING CONTROLS FOR MICROWAVE ENHANCED IRON ORE REDUCTION PROCESSES

Abstract

This paper presents a the development of a device for microwave enhanced carbothermic reductions which permits the full control of microwave power irradiated, the measurement of effectively applied microwave power to the charge in process, and the simultaneous records of its temperature and mass loss. This equipment was designed to simultaneously satisfy the technical requirements for the carbothermic reduction of ores and for the microwave irradiation of metallurgical materials. This prototype works with a 2.45 GHz microwave generator with variable power up to 3 kW and on time acquisition of temperature and mass loss data for the material under carbothermic reduction. It works under argon gas atmosphere. Operational tests were performed with iron ore reduction with charcoal. Kinetic curves of iron ore reduction and effective consumption of microwave power curves were determined. These results made possible to perform an analysis of actual energy consumption for enhanced microwave iron ore carbothermic reduction.

Key words: Carbothermic reduction; Microwaves; Iron ore.

¹ *Contribuição técnica ao XXXVII Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 18 a 21 de setembro de 2007, Salvador - BA, Brasil.*

² *Instituto Mauá de Tecnologia, renatocastro@maua.br, Engenheiro Químico.*

³ *Escola Politécnica da USP, jermolovicius@maua.br, Dr. Eng. Química.*

⁴ *Instituto Mauá de Tecnologia, mbmourao@usp.br, Dr. Eng. Metalúrgica.*

⁵ *Instituto Mauá de Tecnologia, jtsenise@maua.br, Dr. Eng. Elétrica.*

⁶ *Escola Politécnica da USP, cytakano@usp.br, Dr. Eng. Metalúrgica.*

1 INTRODUÇÃO

A literatura reporta muitos experimentos de redução carbotérmica de óxidos metálicos realizados em fornos de microondas de uso doméstico ou comercial. Apesar de sua relevância, esses experimentos geralmente apresentam limitações que decorrem do próprio tipo de forno utilizado. A saber:

a) Não há como medir a potência transmitida do gerador (magnetron) para o interior da cavidade do forno e a potência refletida de volta. A potência efetivamente aplicada na amostra de material irradiada é dada pela diferença entre as duas, a menos de perdas nas paredes do próprio forno. Em outras palavras, não há como determinar a energia específica (J/kg) consumida para obter o efeito observado na amostra, dado esse essencial para o cálculo da eficiência do processo e para um possível aumento de escala.

b) É praticamente impossível determinar a direção e a intensidade do campo eletromagnético na posição em que se encontra a amostra. Essa limitação torna difícil reproduzir os mesmos resultados em fornos diferentes ou em posições diferentes da amostra no mesmo forno, particularmente no caso de amostras com propriedades magnéticas, caso em que o aquecimento da amostra pode também ser em parte devido à ação da componente magnética do campo eletromagnético.

c) Apesar de ser fácil adaptar uma balança ao forno, podendo acompanhar de maneira contínua a variação da massa da amostra durante o aquecimento, esse recurso é raramente utilizado.

2 PROJETO DO FORNO EM GUIA DE ONDAS

2.1 Conceitos Básicos

Num guia de ondas de seção retangular é possível transmitir em vários “modos”, ou seja, com várias configurações do campo eletromagnético. Pode-se porém limitar essas configurações a uma única, denominada modo fundamental.

No modo fundamental (conhecido por TE_{10}), o campo elétrico só tem uma componente, perpendicular aos lados maiores da seção, variando em intensidade conforme a equação (1) e indicado na Figura 1. O valor de E_0 depende da frequência e potência do sinal transmitido e das dimensões a, b .

$$E = E_0 \sin(\pi/a)x \quad (1)$$

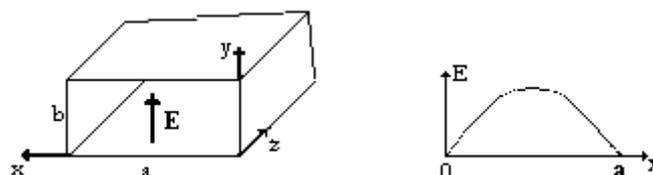


Figura 1: Variação da intensidade do campo elétrico no modo fundamental.

Num guia de ondas uniforme (seção transversal axb igual à da Figura 1 para qualquer valor de z) e sem perdas, terminado numa carga que absorve totalmente a energia que recebe, isto é, que não reflete, a intensidade do campo E é dada pela equação (1) em qualquer seção transversal do guia.

Por outro lado, num guia fechado em sua extremidade, isto é com carga em curto, a intensidade do campo elétrico varia conforme a equação (2), onde d é a distância medida a partir do curto.

$$E = 2 E_0 \text{sen}(\pi/a)x \text{sen}(2\pi/\lambda_g)d \quad (2)$$

Ou seja, no plano de simetria $x = a/2$, E varia conforme a (3) representada na Figura 2.

$$E = A \text{sen}(2\pi/\lambda_g)d \quad (3)$$



Figura 2: Representação do campo elétrico em um guia retangular em curto.

A é uma constante e λ_g é o comprimento de onda no guia, calculável pela equação (4)

$$\lambda_g = \lambda_0(\epsilon - (\lambda_0/2a)^2)^{-1/2} \quad (4)$$

λ_0 é o comprimento de onda no vácuo e ϵ é a constante dielétrica do meio sem perdas que enche o guia. λ_0 relaciona-se com a frequência f pela equação (5)

$$\lambda_0 = c/f \quad (5)$$

$c \approx 3 \times 10^8$ m/s é a velocidade de propagação da onda eletromagnética no vácuo

A teoria mostra que o campo magnético, no modo fundamental do guia, apresenta componentes em x e z , sendo nulo em y .

No plano de simetria $x=a/2$, $H_y=0$, $H_z=0$ e H varia conforme a equação (6).

$$H = B \cos(2\pi/\lambda_g)d \quad (6)$$

Comparando (3) e (6), observa-se que no plano $x = a/2$ E e H variam da mesma forma, apenas deslocados de $\lambda_g/4$, fazendo com que os máximos de E ocorram a distâncias da carga onde H é nulo e vice-versa (Figura 3).

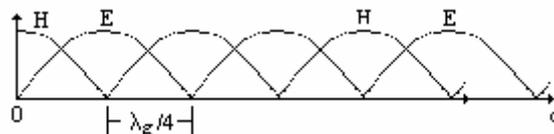


Figura 3. Variação das intensidades (normalizadas) de E e H com a distância da carga, num guia de ondas em curto.

2.2 Construção do Forno

A aplicação destes conceitos nos leva à configuração da Figura 4, na qual se representa o conceito do forno para operar em temperaturas da ordem de 1500 °C.

Neste equipamento, o circulador direciona para a seção de teste a potência de saída do gerador e desvia para a carga dissipativa (sem reflexão) a potência refletida. A potência transmitida é medida com um medidor de potência conectado ao acoplador direcional 1. A potência refletida não atinge o gerador e é medida com um medidor de potência conectado ao acoplador direcional 2.

O máximo de campo elétrico (e mínimo de campo magnético) aplicado na amostra é obtido ajustando a distância s , que determina a posição relativa do curto móvel com relação à amostra. As condições de irradiação da amostra são perfeitamente definidas e facilmente reproduzíveis, eliminando, assim, as incertezas próprias de experimentos realizados em fornos domésticos ou similares.

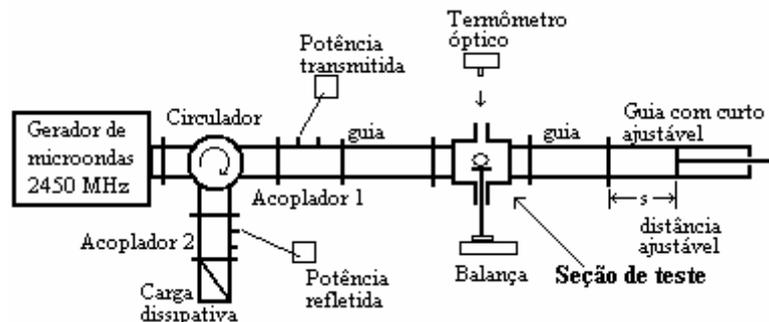


Figura 4. Esquema do forno de microondas para redução carbotérmica.

Para trabalhos em redução carbotérmica são necessários recursos para inertizar a câmara de redução do minério; monitorar a perda de massa e a temperatura do material em redução. Assim, com relação:

a) à medida de temperatura: foi instalado um pirômetro óptico na parte frontal do equipamento de modo a medir a temperatura do meio reagente. O sistema de medição consiste em um pirômetro óptico na faixa 900 – 2000°C, instalado sobre uma plataforma mecânica que permite a regulagem de sua posição segundo três eixos de referência, de modo que o pirômetro meça a temperatura da massa no interior do forno, através de um espelho instalado logo acima da boca de saída de fumos da cavidade, sem sofrer interferência devido ao campo de microondas e aos fumos gerados no processo (Figura 5);

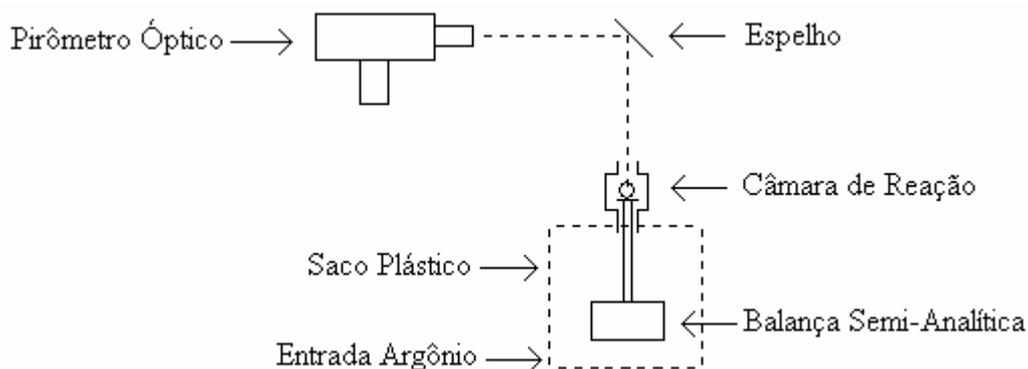


Figura 5: Esquema do uso do pirômetro

b) ao registro da variação de massa da amostra: foi instalado em uma balança semi-analítica com saída apropriada para a aquisição de dados, segundo a segundo, e respectivo registro em computador;

c) ao registro das potências geradas, efetivas e refletidas: foi instalado um sistema de aquisição e registro destas variáveis para análise posterior desenvolvido pelo Laboratório de Microondas do Instituto Mauá de Tecnologia;

d) a isolamento térmica da cavidade: foi construído um bloco de isolante térmico para evitar perda de calor do meio reagente para o meio ambiente. Esta isolamento consiste em uma câmara de fibra cerâmica transparente às microondas, construída em uma forma geométrica que permite o melhor aproveitamento da irradiação de microondas;

e) a inertização da câmara de reação: foi instalado um saco plástico transparente com entrada para argônio e para o fio de alimentação de energia da balança semi-analítica (Figura 5). Este sistema permite que tanto a balança semi-analítica como o reator estejam em um ambiente inerte, devido a uma corrente de argônio, cuja vazão é medida por um rotâmetro;

f) a aquisição de dados: foi utilizado um computador para registro e tratamento dos dados colhidos durante os experimentos.

A Figura 6 apresenta uma fotografia do equipamento completo.



Figura 6: Vista geral do equipamento de redução carbotérmica via irradiação por microondas

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para os testes operacionais do equipamento foi utilizado minério de ferro CAUÊ, da região de Carajás, com teor de ferro 66,7 %. Como redutor utilizou-se carvão vegetal moído. As pelotas foram preparadas com a seguinte composição: 80 % de minério e 20 % de redutor. Também foram adicionados aglomerantes.

Depois de secas em estufa a 105 °C, foram estocadas em um dessecador com sílica gel. As pelotas, após resfriadas, tiveram o seu peso acertado, por raspagem de sua superfície, para o valor de $2,7 \pm 0,1\text{g}$.

Na redução incentivada por microondas, a potência nominal utilizada foi de 1000 W, a qual perfaz uma potência específica 588 W/g de pelota e a vazão de argônio foi de 1 L CNTP/min. A perda de massa, a potência efetiva de microondas e a temperatura

foram monitoradas durante o experimento com duração de até 7 minutos, quando a queda de massa entrava em um patamar.

Durante a redução foram monitorados os valores da temperatura, da massa residual da pelota, das potência de microondas irradiada, refletida e efetiva a intervalos de 10 segundos.

4 RESULTADOS

O equipamento acima descrito apresentou grande facilidade de controle da potência aplicada de microondas e de aquisição de dados.

Os gráficos das Figuras 7 a 9 apresentam as curvas médias obtidas da perda de massa da pelota, do perfil de temperatura na superfície da pelota durante sua redução e a potência de microondas efetivamente consumida pela reação.

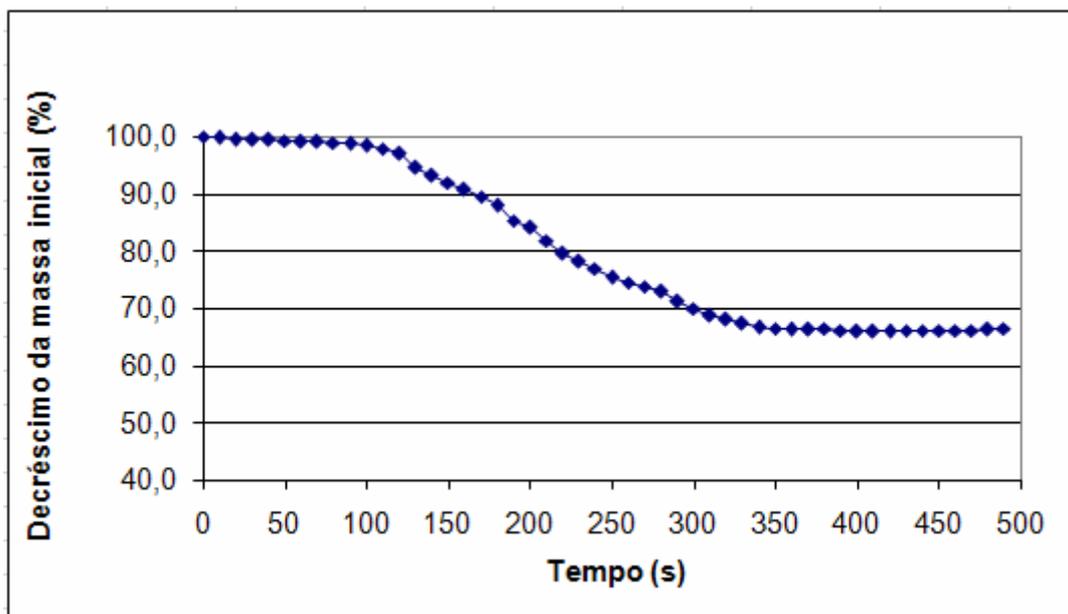


Figura 7: Perda de massa da pelota durante a redução

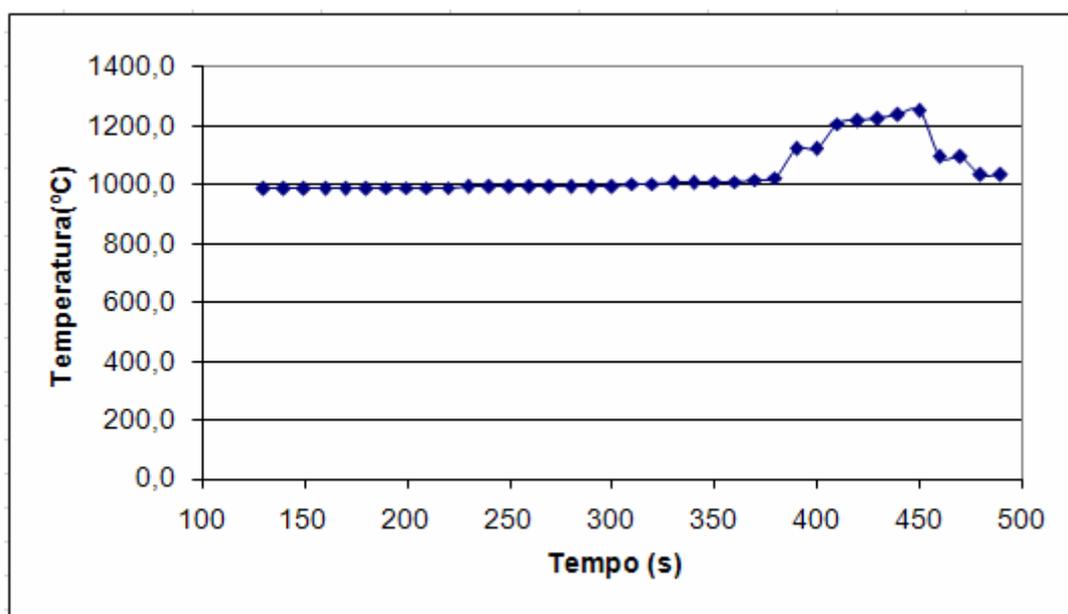


Figura 8: Perfil de temperatura na superfície da pelota durante sua redução

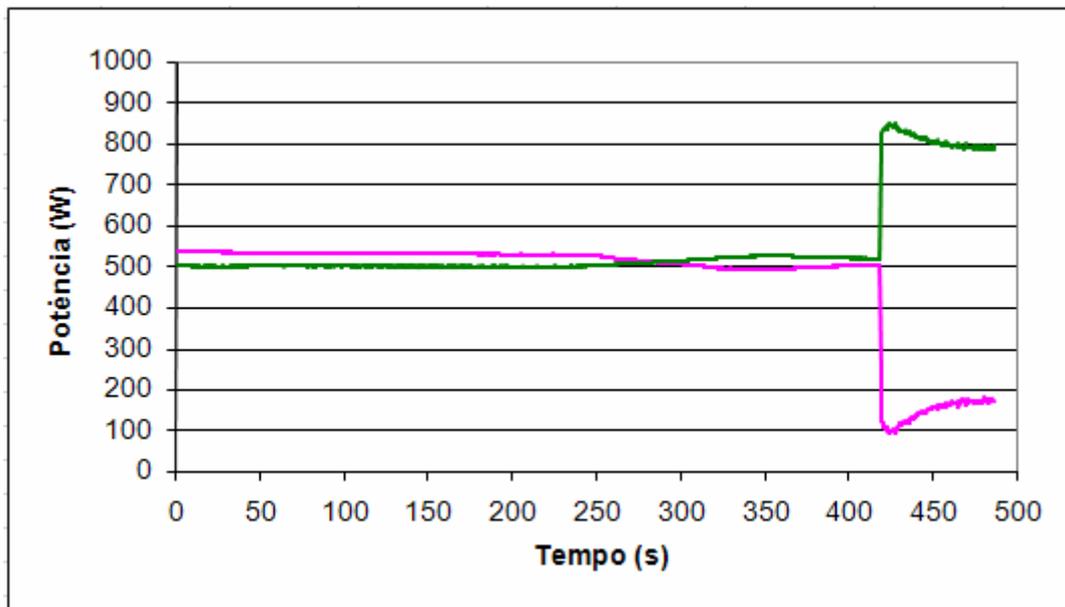


Figura 9: Perfil da evolução da potência de microondas efetiva e refletida. (--- potência efetiva; --- potência refletida)

5 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

A medida da temperatura na superfície ainda não satisfaz completamente, pois a temperatura observada na superfície da pelota, durante a redução, é menor que no seu interior. Este fenômeno foi identificado visualmente, ao observar a pelota em redução: sua superfície é mais escura que as rachaduras que se abrem. Isto pode ser atribuído à corrente de argônio usada para inertizar a câmara de redução, e que resfria a superfície da pelota quando de sua passagem pela câmara de redução.

As Figuras 7 e 8 apresentam resultados da evolução da perda de massa e da temperatura. No caso da temperatura, o registro só foi possível acima de 900 °C por restrição do pirômetro utilizado. Há uma suave elevação de temperatura até perto de 400 segundos de aquecimento, que coincide com o decréscimo da massa da pelota. Pode-se aceitar que neste período ocorra a redução carbotérmica do minério de ferro.

Após os 400 segundos, a massa se mantém constante e a temperatura aumenta significativamente, até a marca de 450 segundos, para então decair rapidamente. A massa apresenta um leve incremento de seu valor, que pode ser atribuído à contaminação com oxigênio do argônio utilizado. O resultado das reduções realizadas foi a formação de gotas de ferro. Porém, a novidade observada é o comportamento da potência de microondas durante o processo de redução.

A potência irradiada, isto é, a alimentada à cavidade, é mantida constante pelo gerador de microondas, assim durante todo o trabalho o seu valor foi de 1000 W. Já a potência refletida, que é a parte da potência irradiada que não foi absorvida pelo sistema, e a potência efetiva, que é a diferença entre a irradiada e a refletida, dependem do comportamento do corpo submetido à irradiação. Ou seja, dependem do comportamento da mistura minério/carvão frente as microondas, o qual é expresso na Figura 9.

Observa-se que até 250 segundos, a potência efetiva se mantém, praticamente, constante. Para, a seguir, crescer ligeiramente até 420 segundos, período que coincide com o da admitida redução. Aos 420 segundos, há um pico de potência efetiva, que ao decrescer um pouco tende a se estabilizar em um patamar elevado.

Este último período coincide com o período de elevação da temperatura e massa constante. Pode-se imaginar que corresponda a um período de fusão do ferro recém reduzido. Isto é corroborado pelo fato da potência refletida atingir, neste período, seu valor mínimo.

O decréscimo da potência refletida de microondas indica que o material passou a absorver mais energia que nas fases iniciais deste experimento. A maior absorção de energia indica um processo fortemente endotérmico, como a fusão, por exemplo.

O experimento realizado demonstrou que é possível especificar e reproduzir com precisão as condições de irradiação por microondas, em um processo de redução carbotérmica incentivada por microondas, viabilizando estudos mais profundos da interação de microondas com o sistema minério / redutor, que não eram viáveis nas adaptações de fornos domésticos citadas na literatura especializada.

O equipamento ora apresentado, sem dúvida, abre a oportunidade de uma série de experimentos que levarão a um melhor conhecimento da interação das microondas com o sistema minério/redutor por possibilitar a quantificação da energia colocada em jogo no processo de redução carbotérmica incentivada por microondas.

Agradecimentos

Os autores agradecem a colaboração de Renata B. do Nascimento, Patrícia Azzi e Luis F. Baccan. Agradecem à FAPESP (projeto 02404-0) pelo suporte deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- 1 AGUILAR, J. A.; GOMEZ, I. Microwaves Applied to Carbothermic Reduction of Iron Ore Pellets. J. Microwave Power Eletrom. Energy, v. 22, n,2, 67-73, 1997.
- 2 GOMEZ, I.; AGULAR, J.; GONZALEZ, M.; MORALES, J. Kinetics of Reduction of Iron Oxides Using Microwaves as Power Source, Mat. Res. Symp. Proc., v. 430, 1996.
- 3 METAXAS, A. C.; MEREDITH, R. J. Industrial Microwave Heating. England, Peter Peregrinus, 1983.
- 4 ZHONG, S.; GEOTZMAN, H. E.; BLEIFUSS, R. L. Reduction of Iron Ore with Coal by Microwave Heating, Min. Metall. Proc., 174-176, Nov. 1966.