

FORNO APRIMORADO PARA ESTUDO DE PROCESSOS DE REDUÇÃO CARBOTÉRMICA DE MINÉRIOS INCENTIVADA POR MICROONDAS

Edmilson Renato de Castro ¹

Marcelo Breda Mourão ²

Luiz Alberto Jermolovicius ³

José Thomaz Senise ⁴

Cyro Takano ⁵

Resumo

O presente trabalho apresenta um equipamento em desenvolvimento para o processamento de reduções carbotérmicas sob campo de microondas. Este equipamento permite pleno controle da potência fornecida e da medida da energia de microondas efetivamente aplicada à carga em processo de redução. Permite, sobretudo, a medida simultânea de temperatura e de massa do material sob redução, e a fácil reprodutibilidade das condições de ensaio. 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 opera com um gerador de microondas de 2,45 GHz e potência variável até 3 kW. O equipamento monitora simultaneamente a temperatura e a 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 durante o processo. Os dados colhidos com este protótipo permitiram realizar uma análise da energia de microondas efetivamente consumida na redução do minério.

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

IMPROVED OVEN FOR THE CARBOTHERMIC REDUCTIONS OF MINERAL ORES ASSISTED BY MICROWAVE

Abstract

A device for microwave enhanced carbothermic reductions which permits the full control of microwave power irradiated was built. This equipment allows the measurement of effectively applied microwave power to the charge in process, the simultaneous records of its temperature and mass loss, and good reproducibility of operation parameters, is introduced by this paper. 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. It also allows acquisition of temperature and mass loss for the material under carbothermic reduction. It works under argon gas atmosphere. Operational tests for iron ore reduction with charcoal were performed. 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.

¹Engenheiro Químico. Instituto Mauá de Tecnologia. Centro Universitário. Laboratório de Microondas. Praça Mauá, 01 – Bairro Mauá – 09580-900 – São Caetano do Sul, SP, Brasil. renatocastro@maua.br

²Dr. Eng. Metalúrgica. Depto. Eng. Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP. Av. Prof. Mello Moraes, 2463 – 05508-900 – São Paulo, SP, Brasil. mbmourao@usp.br

³Dr. Eng. Química. Instituto Mauá de Tecnologia. Centro Universitário. Laboratório de Microondas. Praça Mauá, 01 – Bairro Mauá – 09580-900 – São Caetano do Sul, SP, Brasil. jermolovicius@maua.br

⁴Dr. Eng. Elétrica. Instituto Mauá de Tecnologia. Centro Universitário. Laboratório de Microondas. Praça Mauá, 01 – Bairro Mauá – 09580-900 – São Caetano do Sul, SP, Brasil. jtsenise@maua.br

⁵Dr. Eng. Metalúrgica. Depto. Eng. Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP. Av. Prof. Mello Moraes, 2463 – 05508-900 – São Paulo, SP, Brasil. cytakano@usp.br

I INTRODUÇÃO

A literatura reporta muitos experimentos de redução carbônica de óxidos metálicos realizados em fornos de microondas de uso doméstico⁽¹⁻³⁾ ou comercial.⁽⁴⁻⁵⁾

Apesar de sua relevância, esses experimentos geralmente apresentam limitações que decorrem do próprio tipo de forno utilizado, a saber:

- não há como medir a potência transmitida do gerador (magnetron) para o interior da cavidade do forno e a potência refletida de volta. Estas permitem calcular a potência efetivamente aplicada na amostra de material irradiada, pela diferença entre as duas. Também, não permitem determinar as perdas de energia nas paredes do próprio forno. Em outras palavras, não há como determinar a energia específica (J/kg) efetivamente consumida para obter o efeito observado na amostra, dado esse essencial para o cálculo da eficiência do processo e para um eventual aumento de escala;
- em cavidades multimodais, como o são os fornos domésticos, é praticamente impossível determinar a direção e a intensidade do campo eletromagnético na posição em que se encontra a amostra sob irradiação. Essa limitação torna difícil reproduzir os resultados em fornos diferentes ou em posições diferentes 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; e
- apesar de ser fácil adaptar uma balança ao forno para acompanhar de maneira contínua a variação da massa da amostra durante o aquecimento, esse recurso é raramente utilizado.

2 CONCEITUAÇÃO DE FORNO EM GUIA DE ONDAS

A conformação mais comum para aplicadores de microondas é a cavidade multimodal, o melhor exemplo é o forno de microondas doméstico. Em cavidades multimodais há uma dispersão de microondas por todo o seu volume, devido às sucessivas reflexões do feixe de microondas nas suas paredes internas. Isto cria uma densidade de energia de microondas que não é homogênea, propiciando a existência de pontos com maior concentração energética. Por este motivo é que autores que usam fornos domésticos em seus experimentos necessitam buscar a melhor posição, dentro do forno, para a colocação da amostra a ser irradiada.

Outro conceito de aplicador de microondas é o de aplicador dito “no guia”. Consiste em um guia de ondas retangular com seção de dimensões $a \times b$, como apresentado na Figura 1. Nele é possível transmitir em vários “modos”, ou seja, com várias configurações do campo eletromagnético. Porém limitam-se essas configurações a uma única, denominada modo fundamental (TE_{10}).

No modo fundamental, o campo elétrico só tem uma componente,⁽⁶⁾ que é 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 . Isto deixa patente que o máximo do campo elétrico ocorre no plano de simetria no meio das faces maiores do guia de ondas ($x=a/2$)

$$E = E_0 \text{sen}(\pi x/a) \quad (1)$$

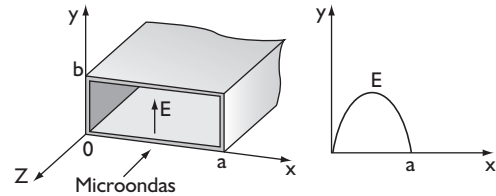


Figura 1. Variação da intensidade do campo elétrico no modo fundamental.⁽⁶⁾

Entretanto, a Equação 1 é válida para um guia uniforme, sem perdas. Em situações reais, as perdas em trechos curtos de guias podem ser desprezadas, ou, se necessário, medidas. Tenha-se um guia fechado em sua extremidade por uma parede refletora de microondas, isto é, uma carga em curto (ou simplesmente, curto), que reflete a radiação de volta pelo guia de ondas. A intensidade do campo elétrico, neste caso, varia conforme a Equação 2, onde d é a distância medida a partir do curto e λ_g é o comprimento de onda no guia.

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

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

$$E = 2E_0 \text{sen}(2\pi d/\lambda_g) \quad (3)$$

Em termos práticos, estes princípios de propagação de ondas eletromagnéticas permitem localizar em um dado ponto do guia um determinado valor de campo elétrico, variando a distância d entre este ponto e o curto. Na Figura 2, esta possibilidade é apresentada. Ou seja, pode-se irradiar uma amostra sempre com um determinado valor de campo elétrico, variando esta distância d .

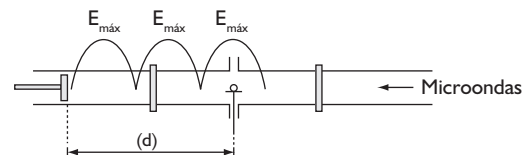


Figura 2. Representação do campo elétrico em um guia retangular em curto.⁽⁶⁾

A teoria⁽⁶⁾ mostra que o campo magnético (H), 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 variam conforme a Equação 4.

$$H = B \cos(2\pi d/\lambda_g) \quad (4)$$

Comparando (3) e (4), 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).

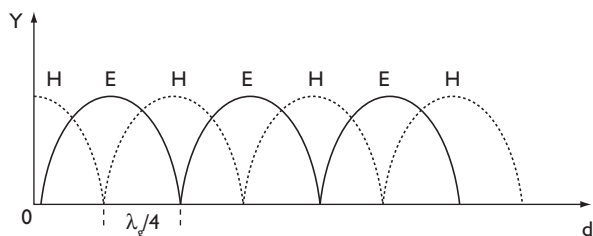


Figura 3. Variação das intensidades (normalizadas) de E e H com a distância da carga, num guia de ondas em curto.⁽⁶⁾

Concluindo, o aplicador no guia permite, pela variação da distância relativa de um curto em relação à posição do material a irradiar, determinar qual o perfil da onda, em termos de campos elétrico e magnético, naquela posição. Isto permite estudar aquecimentos com predominância do campo elétrico ou do campo magnético. As condições de irradiação da amostra, assim, são perfeitamente definidas e facilmente reproduzíveis, eliminando as incertezas próprias de experimentos realizados em fornos domésticos ou similares.

3 CONSTRUÇÃO DE FORNO EM GUIA DE ONDAS

A aplicação destes conceitos nos leva à configuração de forno da Figura 4a, que permite operar com diferentes relações entre campos elétrico e magnético.

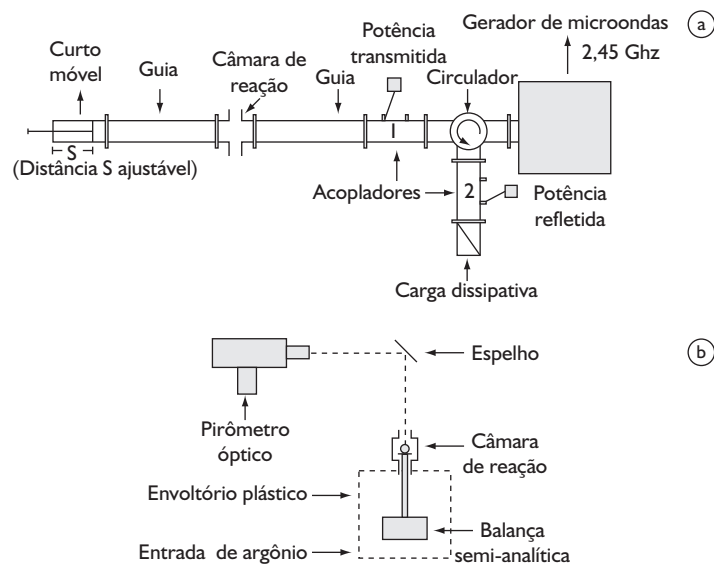


Figura 4. a) Esquema de forno "no guia";⁽⁷⁾ e b) Esquema da câmara de redução.

Compõe-se de um conjunto (fonte chaveada e magnetron) gerador de microondas de 2,45 GHz marca National Electronics, modelo MH3.OW-S e de potência regulável até 3 kW da marca Richardson Electronics modelo SM1050. Este gerador de microondas é protegido contra o retorno de microondas por um circulator da National Electronics modelo 2722-162-11171, que desvia a radiação refletida para uma carga de dissipação. No circulator, conectam-se dois acopladores direcionais da marca Richardson Electronics modelo 366004 que permitem medir a potência de microondas irradiada (a que sai do gerador) e a refletida (a que retorna do forno e é direcionada à carga de dissipação). Aos acopladores direcionais conectam-se medidores de potência Agilent modelo E4419B, que permitem determinar e registrar as potências de microondas emitida pelo gerador e refletida pelo forno. Ao acoplador de energia irradiada, conecta-se a câmara de redução carbotérmica, a qual termina em um curto ajustável. É o curto ajustável que permite a manobra apresentada, no item anterior, de localizar exclusivamente o campo elétrico da onda eletromagnética sobre a amostra em estudo.

Esta montagem trivial em Engenharia Elétrica, para se aplicada em trabalhos de redução carbotérmica foi dotada de recursos adicionais como (Figura 4a):

- balança semi-analítica para monitoração da variação da massa da pelota em redução. Trata-se de uma balança elétrica Gehaka BK3000 para até 3 kg, de topo, sobre cujo prato repousa um implemento de sustentação da pelota. Este implemento é um tarugo de Teflon, com uma base de sustentação em Teflon e topo de material cerâmico refratário. Sobre este refratário é que se coloca a pelota a ser reduzida (Figura 4b). A balança possui saída para a aquisição de dados, permitindo o registro em computador da variação da massa da pelota, segundo a segundo;
- isolamento térmico da cavidade por um bloco de isolante térmico para evitar perda de calor do meio reagente para o meio ambiente e, assim atingir elevadas temperaturas. Esta isolamento é de fibra cerâmica MBoard transparente às microondas, e moldada na forma geométrica que permite o melhor aproveitamento da irradiação de microondas;

- câmara inerte de reação constituída por um saco plástico transparente com entrada para argônio e para o fio de alimentação de energia da balança semi-analítica (Figura 4b). Este sistema permite que tanto a balança semi-analítica como a câmara de redução estejam em um ambiente inerte, devido a uma corrente de argônio, cuja vazão é medida por um rotâmetro;
- medida de temperatura por meio de um pirômetro óptico instalado na parte frontal do equipamento de modo a medir a temperatura da pelota em redução. O pirômetro óptico marca Pirograf, modelo IS-3D com faixa de medida entre 900°C e 2.000°C, foi 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 4b); e
- registro das potências irradiada, efetiva e refletida: por meio de um software de aquisição e registro destas variáveis para análise posterior, marca Agilent, modelo VEE-PRO.

A Figura 5 apresenta uma fotografia do equipamento completo.

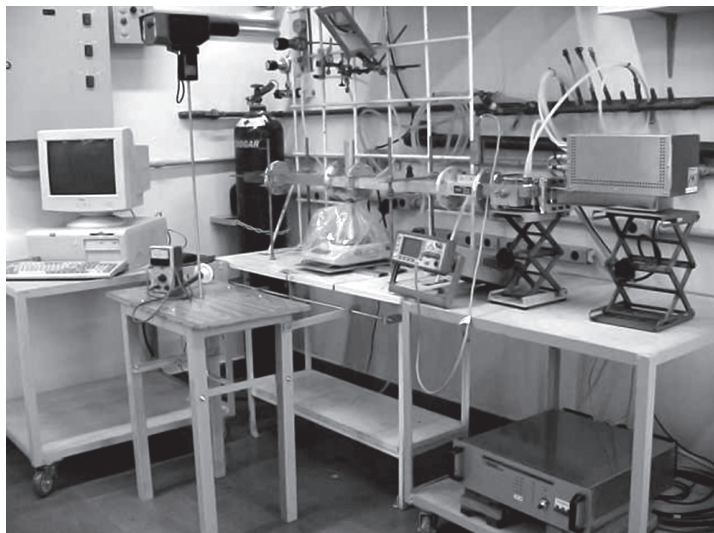


Figura 5. Vista geral do equipamento de redução carbotérmica via irradiação por microondas.

4 TESTE DE USO DO FORNO EM GUIA DE ONDAS

Para os testes operacionais do equipamento acima descrito foi utilizado minério de ferro de Carajás, com teor de ferro 66,7%. Como redutor utilizou-se carvão vegetal moído, com teor de carbono fixo 77,3%. As pelotas com diâmetro de 18 mm foram preparadas com a seguinte composição: 80% de

minério e 20% de redutor. Também foi adicionado aglomerante. 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 $2,7 \pm 0,1$ g.

Na redução incentivada por microondas, a potência nominal utilizada foi de 1000 W, a qual perfaz uma potência efetiva específica 588 W/g de pelota e a vazão de argônio foi de 1L CNTP/min. A perda de massa, a potência efetiva de microondas e a temperatura foram monitoradas durante o experimento. A sua duração foi de até 7 minutos, quando a perda de massa entrava em um patamar.

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

5 RESULTADOS

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

Na Tabela I, apresentam-se os resultados de quatro repetições da redução carbotérmica de minério de ferro de Carajás. Os gráficos da Figura 6 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.

Tabela I. Redução carbotérmica de minério de ferro de Carajás com carvão vegetal incentivada por microondas de 2,45 GHz

Tempo (s)	Massa (g)				Média massa (g)	Desvio padrão
	E1	E2	E3	E4		
0	2,77	2,71	2,75	2,73	2,74	0,03
50	2,74	2,68	2,74	2,71	2,72	0,03
100	2,69	2,63	2,69	2,68	2,67	0,03
150	2,49	2,37	2,50	2,51	2,47	0,07
200	2,22	2,10	2,20	2,29	2,20	0,08
250	1,99	1,93	1,92	2,06	1,98	0,06
300	1,85	1,82	1,77	1,91	1,84	0,06
350	1,74	1,77	1,70	1,81	1,76	0,05
400	1,74	1,75	1,70	1,80	1,75	0,04
450	1,74	1,75	1,70	1,80	1,75	0,04
500	1,74	1,75	1,69	1,80	1,75	0,04

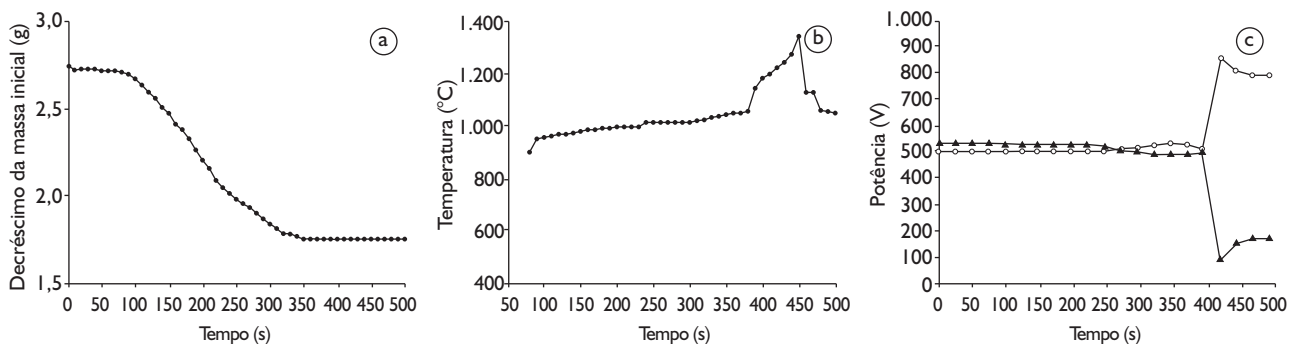


Figura 6. a) Perda de massa da pelota durante a redução; b) Perfil de temperatura na superfície da pelota durante sua redução; e c) Perfil da evolução da potência de microondas efetiva e refletida (○ potência efetiva; ▲ potência refletida).

6 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.

A Figura 6a apresenta resultados da evolução da perda de massa da pelota durante a sua redução incentivada por microondas. Observa-se um período de indução, entre o início e 90 segundos, no qual ocorre o fenômeno de aquecimento da pelota até a temperatura de reação. Basicamente, consiste na conversão de energia de microondas em energia térmica. Há uma perda de massa insignificante, que pode ser atribuída à perda de voláteis como a água. Após este período de inicialização, o valor da massa começa a decrescer de modo significativo, indicando franca reação de redução carbotérmica do minério de ferro, entre 90 segundos e 380 segundos. Após este período de redução, o registro de variação de massa apresenta que não há mais variação de massa significativa, o que indica o término da reação de redução do minério. A rigor, o registro de 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 à formação de gotas de ferro.

No caso da temperatura, o registro só foi possível acima de 900°C por restrição do pirômetro utilizado (Figura 6b). Há uma suave elevação de temperatura da ordem de 150°C, até 380 segundos de aquecimento, que coincide com o período de decréscimo da massa da pelota. Após este intervalo quase isotérmico a temperatura sobe a 1.340°C, em questão de 70 segundos, o que justifica a formação de gotas de ferro. E em seguida volta a cair ao nível de 1.000°C.

A Figura 6c apresenta o comportamento da potência de microondas durante a redução carbotérmica. A potência irradiada é a alimentada à cavidade e é mantida constante pelo gerador de microondas, assim durante todo o trabalho o seu valor foi de 1.000 W. A potência refletida é a porção da potência irradiada que não foi absorvida pelo sistema e retorna ao gerador de microondas, sendo

descartada pelo circulador. A potência efetiva é a diferença entre a irradiada e a refletida, e depende do comportamento do corpo submetido à irradiação. Ou seja, depende do comportamento da mistura minério/carvão frente às microondas. Observa-se que até 250 segundos, a potência efetiva se mantém, praticamente, constante. Para, a seguir, crescer 20 W até a marca de 420 segundos.

Comparando os gráficos da Figura 6, pode-se dizer que até a conclusão da redução do minério, a potência refletida, conseqüentemente a efetiva, se manteve no patamar inferior de 526 W, e ao terminar a redução, teve um acréscimo de 324 W. Isto indica que o meio irradiado mudou de natureza e apresenta após redução uma permissividade elétrica pouco maior que lhe o pequeno incremento de potência observado.

Observa-se nestes gráficos, que após o período de redução do minério, em se mantendo o fornecimento de energia de microondas a temperatura eleva-se de 1.055°C até 1.340°C, na marca de 450 segundos, quando neste tempo, a potência efetiva dá um pico até 850 W (a refletida dá um decréscimo até 90 W), e após uma ligeira oscilação estabiliza em 790 W (para refletida em 180 W). Isto indica uma forte alteração da composição do meio, que agora absorve bem mais microondas que no início da redução. Paralelamente, nesta faixa de tempo, a temperatura da camada externa da pelota reduzida chegou a 1.340°C, portanto a temperatura no interior da pelota reduzida deve ter atingido temperatura bem superior a isto. Considerando que nas pelotas se encontraram gotas de ferro fundido, pode-se dizer que, naquele intervalo, as microondas levaram o ferro reduzido à fusão, que é notoriamente um processo endotérmico.

O experimento realizado demonstrou que é possível especificar e reproduzir com precisão as condições de irradiação por microondas, em um processo de redução carbotérmica incen-

tivada por microondas, viabilizando estudos mais profundos da interação de microondas com o sistema minério/reductor, 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/reductor por possibilitar a quantificação da energia de microondas colocada em jogo no processo de redução carbotérmica incentivada por microondas e permitir a fácil reprodutibilidade das condições de ensaio.

Agradecimentos

Os autores agradecem à colaboração de Renata B. Nascimento, Patrícia Azzi, Lauro Ferreira e Luis F. Baccan. Agradecem ao Instituto Mauá de Tecnologia e à FAPESP (projeto 02404-0) pelo suporte deste trabalho

REFERÊNCIAS

- 1 CHO, S.; LEE, J. Metal recovery from steel mill scale by microwave heating. **Metals and materials international**, v. 14, n. 2, p. 193-6, Apr. 2008.
- 2 NISHIOKA, K.; TANIGUCHI, T.; UEKI, Y.; OHNO, K.; MAEDA, T.; SHIMIZU, M. Gasification and reduction behavior of plastics and iron ore mixtures by microwave heating. **ISIJ International**, v. 47, n. 4, p. 602-7, Dec. 2006.
- 3 SAIDI, A.; AZARI, K. Carbothermic reduction of zinc oxide concentrate by microwave. **Journal Science Technology**, v. 21, n. 5, p.724-8, Jan. 2005.
- 4 NAGATA, K.; HAYASHI, M. Pig iron making by microwave heating. In: JAPAN-BRAZIL SYMPOSIUM ON DUST PROCESSING-ENERGY-ENVIRONMENT IN METALLURGICAL INDUSTRIES, 7., 2008, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: ABM, 2008. p.134-42.
- 5 ISHIZAKI, K.; NAGATA, K.; HAYASHI, T. Localized heating and reduction of magnetite ore with coal in composite pellets using microwave irradiation. **ISIJ International**, v. 47, n. 6, p. 817-22, Mar. 2007.
- 6 POZAR, D.M; **Microwave Engineering**. Hoboken, USA: John Wiley, 2005.
- 7 RICHARDSON ELECTRONICS. **Electronic catalog**. Disponível em: <<http://www.catalog.rell.com>>. Acesso em: 14 jun. 2007.

Recebido em: 30/06/2008

Aceito em: 21/01/2009

Proveniente de: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 38., 2007, Salvador, BA. São Paulo: ABM, 2007.