

## EQUIPAMENTO PARA REDUÇÃO CARBOTÉRMICA DE MINÉRIO DE FERRO UTILIZANDO MICRO-ONDAS\*

Edmilson Renato de Castro<sup>1</sup>  
Marcelo Breda Mourão<sup>2</sup>  
Luiz Alberto Jermolovicius<sup>3</sup>  
Renata Borges do Nascimento<sup>1</sup>  
Eduardo Victor Pousada<sup>4</sup>  
José Thomaz Senise<sup>4</sup>  
Cyro Takano<sup>2</sup>

### Resumo

O presente trabalho apresenta um forno para a produção de ferro gusa por redução carbotérmica estimulada por micro-ondas de minério de ferro, na forma de pelotas auto-redutoras. O forno de redução com potência regulável de até 15 kW de micro-ondas de 2.45 GHz foi especialmente projetado e construído para este processo. A estrutura do forno é em aço inoxidável e utiliza três geradores de micro-ondas focados para o centro de um aplicador cilíndrico. Com esta configuração conseguiu-se produzir um campo eletromagnético de alta densidade energética. As cargas de pelotas auto-redutoras, com massas em torno de 90 g e 30 g foram reduzidas em um cadinho de carbeto de silício. A potência de micro-ondas irradiada foi de 6 kW. A montagem do forno dispõe de uma balança elétrica adaptada para suportar o cadinho de redução. O presente forno dispõe de controle e medida da potência fornecida e refletida, permitindo medir a energia de micro-ondas efetivamente aplicada à carga. Esta característica permite realizar balanços de massa e de energia além de determinar a evolução da taxa de reação através da medida contínua da massa das pelotas sob redução, ao longo do tempo de processamento. Obtiveram-se curvas cinéticas de redução carbotérmica de minério de ferro incentivada por micro-ondas e de seu consumo de energia durante o processo.

**Palavras-chave:** Forno redução carbotérmica; Micro-ondas; Ferro gusa.

### EQUIPMENT FOR CARBOTHERMAL REDUCTION OF IRON ORE APPLYING MICROWAVE

#### Abstract

This paper presents of furnace for production of pig iron by carbothermic reduction of iron ore in the form of self-reducing pellets enhanced by microwaves. The reduction furnace with adjustable up to 15 kW microwave power of 2.45 GHz has been specially designed and built for this purpose. The furnace structure is made of stainless steel and has three microwave generators focused to the center of a cylindrical applicator. With this setup we were able to produce a high energy density electromagnetic field. The burden of self-reducing pellets with mass around 90 g and 30 g were reduced in a crucible silicon carbide. The power microwave radiated is 6 kW. The oven features an electric balance appropriately adapted to support the crucible reduction. This oven allows the measurement and control of power supplied and reflected establishing the effective energy applied to load. This feature allowed for mass and energy balances and to observe the evolution of reduction rate by continuously measuring of reacting mass during its processing. Curves for carbothermic reduction of iron ore were determined and, also, the energy consumption during the process. This feature allows to perform mass and energy balances and to determine the progress of the reaction rate by continuously measuring the mass of pellets under reducing along the processing time. Curves for carbothermic reduction of iron ore were determined and, also, the energy consumption during the process.

**Keywords:** Carbothermic reduction furnace; Microwave; Pig iron.

<sup>1</sup> Engenheiro Químico, Mestre, Professor, Laboratório de Micro-ondas, Centro Universitário Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalúrgico, Doutor, Professor, Departamento de Metalurgia e Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Químico, Doutor, Professor, Laboratório de Micro-ondas, Centro Universitário Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro Elétrico, Doutor, Professor, Laboratório de Micro-ondas, Centro Universitário Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, aumentou em muito o interesse de se aplicar a energia de micro-ondas como fonte de calor em substituição aos aquecimentos convencionais no processamento de materiais tanto para aplicações em escala laboratorial como industrial. Na área metalúrgica a literatura reporta muitos experimentos de redução carbotérmica de óxidos metálicos realizados em fornos de micro-ondas 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, pois utilizam normalmente, fornos domésticos adaptados, com cavidades paralelepípedicas. 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. 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. 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. 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.

As pesquisas com micro-ondas na redução de minério de ferro concentram-se em reduzir o tempo de redução em relação ao consumido em forno elétrico [6]; em reduzir a emissão de CO<sub>2</sub> bem como a conservação de energia em um processo de redução carbotérmica comparando-o com alto-forno [7]; nas mudanças das fases do ferro formado variando os níveis de potência irradiada de micro-ondas [5]; do efeito da variação da frequência de micro-ondas de 2,45 GHz para 30 GHz [8] e da utilização de outras fontes de carbono para substituírem os redutores convencionais [1]. Além disso, 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 estratégicos. A redução da emissão de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) bem como a conservação de energia são tarefas cruciais para prevenir o aquecimento global [9]. Esta premência ocasiona a busca por um processo de redução que supere estes inconvenientes. Almeja-se, ainda, que a transferência de calor, que desempenha um papel fundamental na velocidade global do processo, seja mais rápida que no forno convencional. Apesar da tecnologia do alto-forno ser avançada, novos processos de fabricação do ferro baseados em alternativas inovadoras podem ser introduzidas.

Em estudo anterior, os autores desenvolveram um equipamento em escala reduzida com finalidade de controlar a taxa de redução carbotérmica de minério de ferro por um material carbonoso na forma de pelotas auto redutoras utilizando micro-ondas. Os resultados obtidos nesse primeiro projeto confirmaram a hipótese de que as micro-ondas efetivamente apresentam um aumento da produtividade na redução do minério de ferro [10].

O objetivo deste trabalho é desenvolver um processo e forno em escala ampliada, visando contribuir para a evolução da tecnologia de aplicação de micro-ondas a

processos de obtenção de ferro primário com alta eficiência energética, usando micro-ondas como fonte de calor.

## 1.1 Conceitos Sobre 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 [11-12].

A frequência de micro-ondas mais utilizada, dentre as permitidas, pela União Internacional de Telecomunicações (UIT), para aplicação industrial em aquecimento industrial é 2.45 GHz. Esta opção é guiada pela melhor relação custo-benefício dos equipamentos geradores de micro-ondas, com relação às demais frequências alocadas para aplicações industriais, científicas e médicas definidas. Esta frequência corresponde ao comprimento de onda no espaço livre de 12,25 cm.

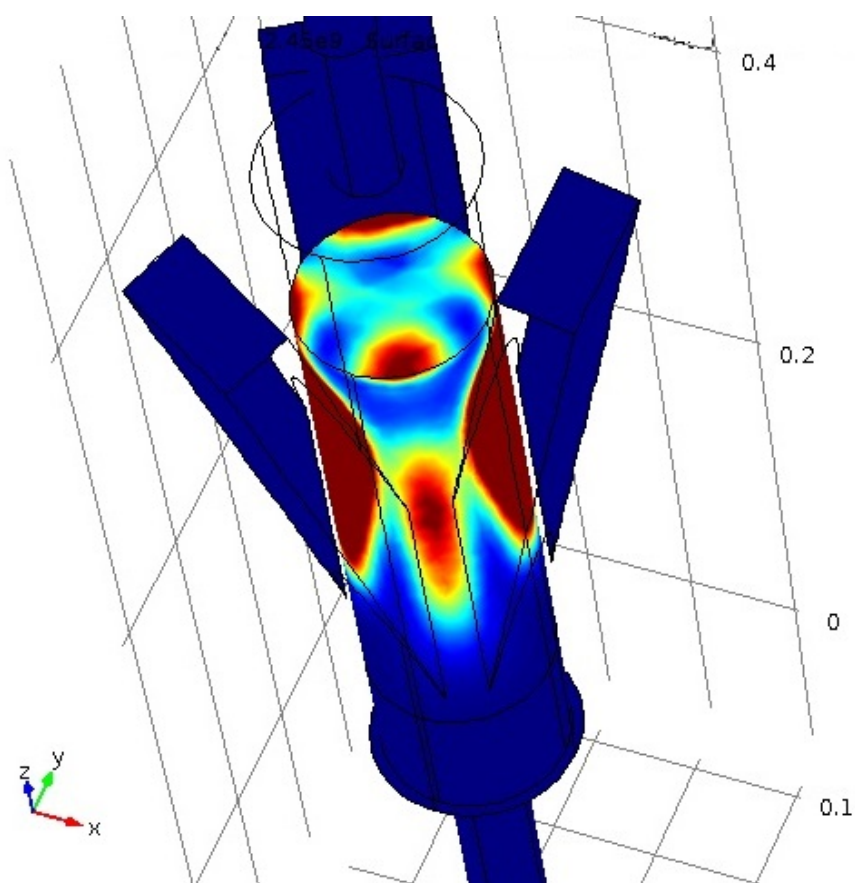
## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Construção do Forno de Micro-Ondas

O forno é constituído por uma cavidade cilíndrica em aço inoxidável e utiliza três geradores de micro-ondas focados para o centro deste aplicador. Guias de ondas transferem a energia de micro-ondas destes geradores, dois com potência regulável de até 6 kW cada e um de 3 kW, para o interior da cavidade podendo totalizar 15 kW. Os trechos dos guias de ondas próximos ao reator cilíndrico estão envolvidos por trocadores de calor para resfriá-los durante o processo de redução. Um circulador de micro-ondas é utilizado para proteger cada gerador contra reflexão de energia pelo sistema irradiado. Além destes, há dois acopladores direcionais, por gerador, que permitem medir a potência de micro-ondas irradiada (a que sai do gerador) e a refletida (a que retorna do forno e é direcionada a carga de dissipação). A medida do valor da potência é feita por meio de dois medidores de potência que registram as potências citadas. Com esta configuração consegue-se produzir um campo eletromagnético de alta densidade energética no interior do forno. Filtros que evitam vazamento de micro-ondas estão localizados tanto na parte superior como inferior do forno. O superior assegura a saída do gás inerte (argônio) e dos fumos de reação. O inferior possibilita a passagem de um suporte para o cadinho de carbetto de silício usado para a redução. Este suporte é constituído por um eixo e um prato de porcelana e é acoplado sobre uma balança permitindo monitorar a perda de massa das pelotas em redução no interior de um cadinho. Tanto o prato como o eixo são construídos em material transparente a micro-ondas. A figura 1 mostra uma visão global do equipamento.



**Figura 1.** Forno para redução de minério de ferro por irradiação de micro-ondas.



**Figura 2.** Simulação da dissipação de energia no reator cilíndrico.

A posição do cadinho no interior da cavidade foi otimizada por meio de simulação multifísica empregando o programa COMSOL Multiphysics. A figura 2 apresenta uma imagem da simulação da região com maior densidade energética ( $W/m^3$ ) no interior da cavidade. A cor vermelha indica uma maior temperatura e a azul uma menor. A comunicação e a coleta de dados para um computador foram realizadas

por um software específico. Todo o equipamento é suportado em uma estrutura metálica e foi desenvolvido pelo Laboratório de Micro-ondas do Instituto Mauá de Tecnologia em parceria com o Departamento de Engenharia Metalúrgica da Universidade de São Paulo.

## 2.2 Suprimentos

Utilizaram-se pelotas auto-redutoras produzidas na seguinte proporção: 68,6% de minério de ferro de Carajás com 67,7% de ferro total, 22,3% de carvão mineral Chipanga com 65,58% de carbono fixo e 9,1% de cimento. Foi utilizado argônio para manter a câmara de reação inerte, com uma vazão adotada para todos os ensaios de 1 L/min. A composição do cadinho utilizado nos ensaios era de 64,5% de carbetto de silício mais material refratário e sua capacidade, em volume, de 100 mL.

## 2.3 Determinação da Taxa de Reação e da Energia de Micro-Ondas Refletida

O cadinho com as pelotas foi inserido no interior do reator na posição otimizada pelo programa COMSOL Multiphysics (Figura 2) e apoiado em uma balança semi-analítica para monitorar a perda de massa da carga. Foram utilizadas duas massas de pelotas: 30 g e 90 g. As pelotas foram irradiadas com micro-ondas a 2.45 GHz com potência de 6 kW. As potências irradiadas e refletidas foram automaticamente registradas por um aquisitor de dados.

O início da reação de redução foi considerado logo que a fonte de micro-ondas foi ligada e o término quando a perda de massa da pelota tornava-se constante, ou quando a taxa de reação atingia 100% ou ainda quando se alcançava 30 minutos de ensaio. A taxa de reação do minério de ferro é definida como sendo a porcentagem do material reagido e foi determinado pela perda de peso. O cálculo da quantidade de material que reagiu durante cada experimento realizado foi efetuado empregando-se a equação 1:

$$TR = \left( \frac{M_i - M_t}{M_i - M} \right) \times 100 \quad (1)$$

Onde:

$TR$  = Taxa de reação (%);

$M_i$  = Peso inicial da amostra (g);

$M_t$  = Peso no instante  $t$  (g);

$M$  = Porcentagem máxima de perda de peso (teoricamente no valor de 35%)

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados os principais resultados encontrados nos ensaios realizados em duplicata para a redução carbotérmica de 30 g e 60 g de pelotas auto-redutoras com irradiação por micro-ondas com 6 kW a 2.45 GHz.

A figura 3 apresenta a taxa de reação em função do tempo de exposição à 6 kW de potência irradiada de micro-ondas para 30 g e 90 g de pelotas, calculada através da equação 1.

A figura 4 mostra o perfil da evolução da potência refletida de micro-ondas quando da irradiação de 6 kW da potência de micro-ondas utilizada na redução carbotérmica de 30 e 90 g de pelotas auto redutoras.

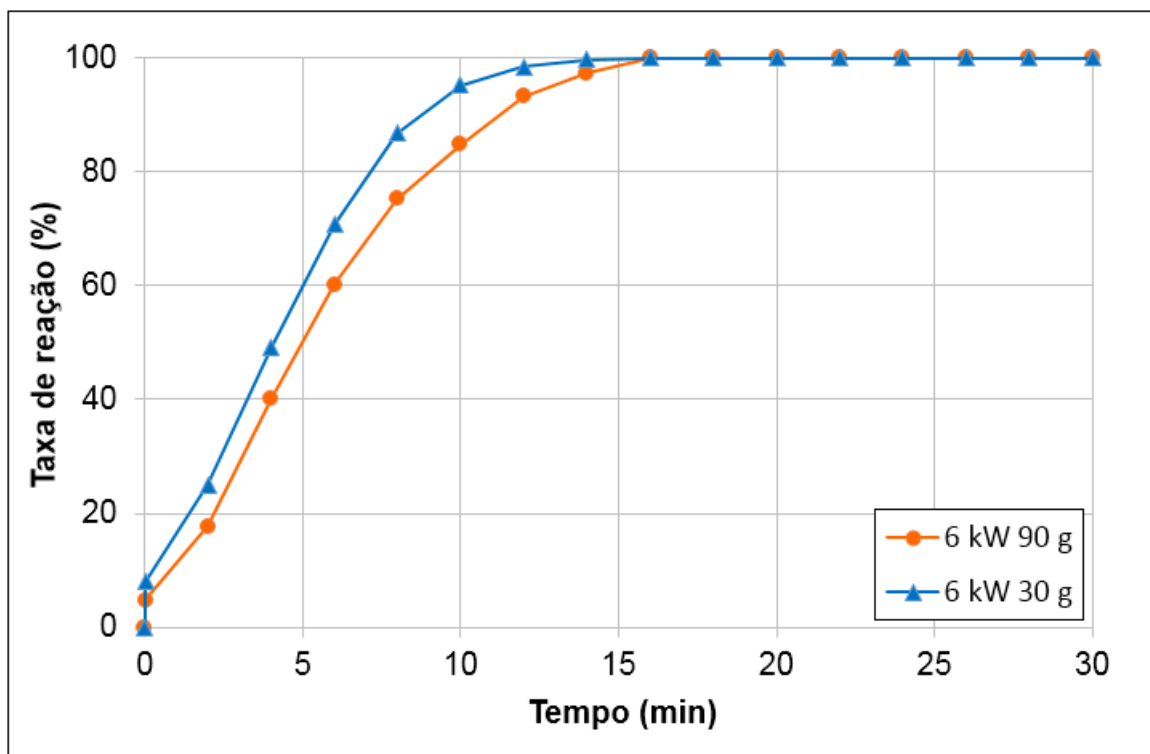


Figura 3. Taxa de reação em função do tempo de irradiação à 6 kW de potência de micro-ondas para 30 g e 90 g de pelotas.

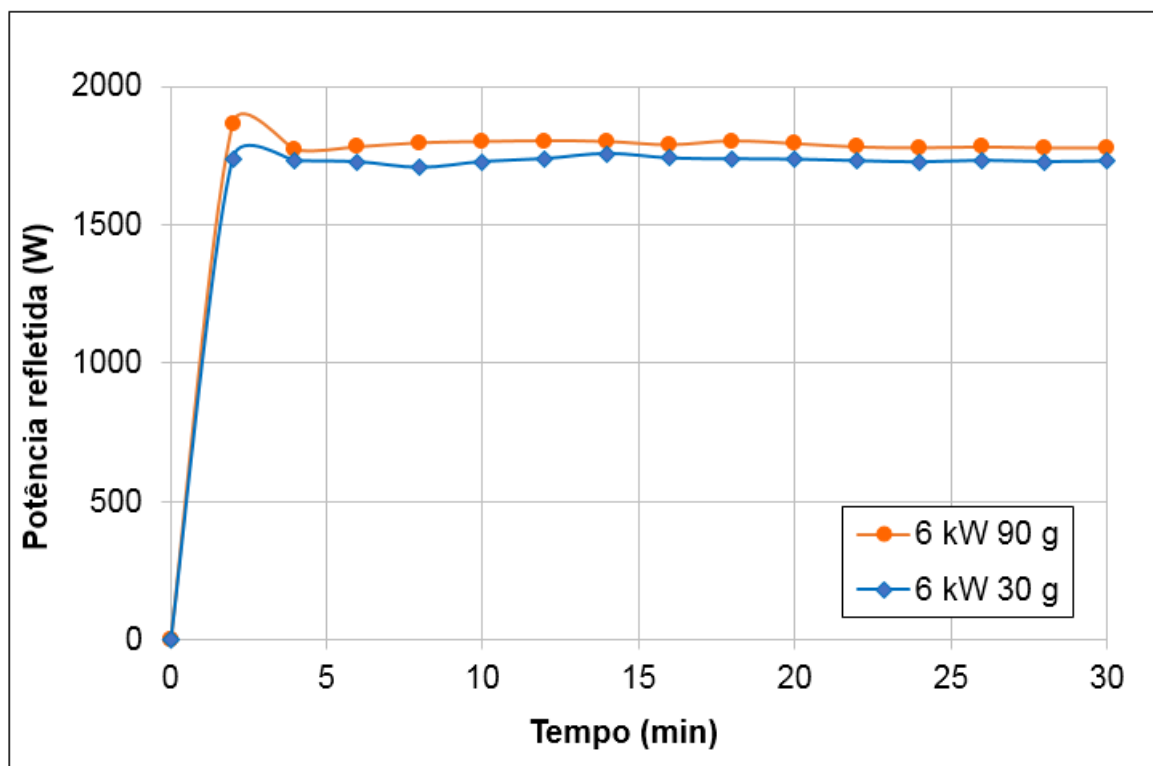


Figura 4. Perfil da evolução da potência de micro-ondas refletida (W) em função do tempo de irradiação.

As taxas de reação apresentadas pela figura 3 atingiram completa redução carbotérmica. Ambas as curvas atingiram 100% da taxa de reação após 15 minutos de ensaio. Porém, observa-se um melhor resultado com a carga de 30 g. Isto se

deve a uma melhor absorção da potência de micro-ondas pelo sistema cadinho/pelotas e conseqüentemente em uma menor energia refletida como pode ser comprovado através da figura 4. Ao analisar a carga após o ensaio as pelotas estavam totalmente reduzidas e continham pontos metálicos em sua superfície. Um problema encontrado foi a perda térmica pelas paredes do forno devido à falta de isolamento térmico atingindo temperaturas em torno de 500°C como mostrado pela figura 5.



**Figura 5.** Perda de energia térmica pela superfície externa do forno.

#### **4 CONCLUSÃO**

O equipamento ora apresentado abre a oportunidade de uma série de experimentos que permitirão um melhor conhecimento da aplicação das micro-ondas ao sistema cadinho/pelotas de minério de ferro/carvão. Este experimento mostrou a necessidade de isolar termicamente a superfície externa. Esta ação melhorará o eficiência energética do sistema possibilitando assim obter ferro gusa líquido.

#### **Agradecimentos**

Os autores agradecem à colaboração de Dimitri Zinizopoulos Passeti, Glauco Chagas Bertolaccini, Carlos Tognela e Adriano Gimenez. Agradecem ao Centro Universitário Instituto Mauá de Tecnologia, à Universidade de São Paulo, à FAPESP (projeto 10/51269-1) e à Vale pelo suporte deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 Cho S, Lee J. Metal recovery from steel mill scale by microwave heating. *Metals and materials international*. 2008;14(2):193-196.
- 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*. 2006;47(4):602-607.
- 3 Saidi A, Azari K. Carbothermic reduction of zinc oxide concentrate by microwave. *Journal Science Technology*. 2005;21(5):724-728.
- 4 Nagata K, Hayashi M. Pig iron making by microwave heating. In: *Japan-Brazil Symposium on Dust Processing-Energy-Environment in Metallurgical Industries*. 2008;134-142.
- 5 Ishizaki K, Nagata K, Hayashi T. Localized heating and reduction of magnetite ore with coal in composite pellets using microwave irradiation. *ISIJ International*. 2007;47(6):817-822.
- 6 Ishizaki K, Nagata K, Hayashi T. Production of Pig Iron from Magnetite Ore-Coal Composite Pellets by Microwave Heating. *ISIJ International*. 2006;46(10):1403-1409.
- 7 Nagata K, Ishizaki K, Kanazawa M, Hayashi T, Sato M, Matsubara A, et al. *Proc. 11th International Conference on Microwave and High Frequency Heating*. 2009:87-90.
- 8 Takayama S, Link G, Thumm M, Matsubara A, Sato M, Sano S. Reduction of Magnetite in Air by Use of Microwave Heating. 2007.
- 9 Kashimura K, Nagata K, Motoyasu S. Concept of furnace for metal refining by microwave heating – A design of microwave smelting furnace with low CO<sub>2</sub> emission. *Materials Transactions*. 2010;51:1847-1853.
- 10 Castro ER, Mourão MB, Jermolovicius LA, Senise JT, Takano C. Forno aprimorado para estudos de processos de redução carbotérmica de minérios incentivada por micro-ondas. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*. 2009;5(3):156-161.
- 11 Sutton WH. Microwave processing of ceramic materials. *Ceramic Bulletin*. 1989;68(2):376-386.
- 12 Haque KE. Microwave energy for mineral treatment processes – a brief review. *International Journal of Mineral Processing*. 1999;57:1-24.