

REDUÇÃO CARBOTÉRMICA DE MINÉRIO DE FERRO COM BIOMASSA RESIDUAL INCENTIVADA POR MICRO-ONDAS

Nicolas Youn¹; Edmilson Renato de Castro²

¹ Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

² Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *Este trabalho determinou as quantidades de carbono fixo em biomassas residuais in natura base seca, como bagaço de cana de açúcar, borra de café, caroço de abacate, casca de coco, sabugo de milho, semente de algodão e torta de mamona. A biomassa casca de coco foi a escolhida para testes do possível uso como biorredutor em processo de redução carbotérmica de minério de ferro, na forma de pelotas auto-redutoras. Avaliou-se também o efeito de aplicar duas formas de gerar calor: micro-ondas e resistência elétrica. As variáveis estudadas foram a velocidade de reação, o consumo de energia e o tempo de processamento. As experiências com micro-ondas foram realizadas com potência de 3 kW a 2,45 GHz. Os resultados obtidos com micro-ondas foram comparados com resultados obtidos em um forno aquecido por resistência elétrica com temperatura fixa de 1000°C.*

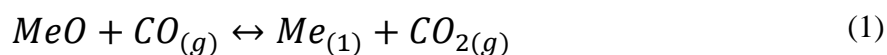
Introdução

A indústria do aço busca continuamente alternativas tecnológicas e operacionais para aumentar sua eficiência energética e diminuir a emissão de gás CO₂ e particulados na atmosfera em cada etapa básica da sua produção, a saber: na redução carbotérmica (em que o minério de ferro é transformado em ferro metálico), no refino (em que são retiradas as impurezas da liga metálica e reduzido o teor de carbono, etapa na qual se obtém o aço propriamente dito) e na conformação mecânica (na qual o produto semiacabado, resultado da solidificação do aço, lingotamento, é laminado na forma desejada, isto é, chapas, barras, fios, tubos etc) (BNDES Setorial. 2014). Apesar desta tecnologia ser consolidada tanto tecnicamente como economicamente, ainda é possível pesquisar alternativas inovadoras para mitigar a emissão de gases de efeito estufa e outros poluentes, de aproveitar resíduos com algum poder calorífico na cogeração de energia (Nagata et al. 2009), e, principalmente, de aumentar a velocidade de reação do processo (Ishizaki, 2006). Com esta visão, este trabalho avaliou o efeito de aplicar micro-ondas a etapa de redução carbotérmica de minério de ferro usando biomassa residual agrícola (biorredutor) na forma de pelotas auto-redutoras quantificando a velocidade de reação, o consumo de energia, o tempo de processamento e a diminuição na emissão de gás CO₂.

Redução do minério de ferro

Redução carbotérmica é o tratamento químico de redução de uma substância mineral (quimicamente um óxido) com o emprego do elemento carbono (comumente coque ou carvão) para a produção de um metal. Devido à alta temperatura empregada, característica da operação, todos os outros componentes da carga normalmente acabam por se fundir e os produtos (excetuando-se naturalmente os gases) são removidos no estado líquido. Deste processo, obtém-se o chamado ferro primário ou ferro de primeira fusão (liga de ferro e carbono). A obtenção do ferro primário ou ferro reduzido pode ser feita por meio de diversas rotas tecnológicas e as mais comumente utilizadas são a de redução do minério (na forma de granulado, de sinter ou de pelota) tanto em altos-fornos como em fornos menores com uso do coque de carvão mineral como agente termorredutor, da produção de ferro-esponja (ferro primário sólido), a partir do minério também na forma de pelotas ou granulado, com uso de gás reformado como agente redutor (em geral, obtido a partir do gás natural), processo este conhecido como redução direta,

cuja tecnologia mais usada é a Midrex® ou através de fusão redutora, cuja tecnologia mais usada é a Corex®. A reação global que descreve o processo é a seguinte:



Biomassa

Biomassa pode ser definida como uma fonte de energia não poluente e renovável, disponível em grande abundância e derivada de materiais orgânicos. Todos os organismos existentes capazes de realizar fotossíntese (ou derivados destes) podem ser utilizados como biomassa. Exemplos disso são: cana-de-açúcar, restos de madeira, resíduos lignocelulósico agroindustrial, estrume de gado, plantas oleaginosas, lixo urbano, etc. A biomassa é um exemplo no qual propriedades físicas e químicas têm influência direta sobre a viabilidade de uso do material como combustível. Além disso, a melhoria destas propriedades, sujeitas a manejo e tratamento, podem tornar a biomassa mais atrativa para sistemas de geração de energia, tornando-se competitiva com outros combustíveis, que a princípio teriam maior qualidade energética. Assim, para determinar a qualidade da biomassa agroindustrial é fundamental a análise e conhecimento de sua composição química (elementar e imediata) (Brand, 2010). Porém, para o uso como fonte de carbono em processos siderúrgicos de obtenção do ferro primário, o mais importante é, através de uma análise química imediata, conhecer o conteúdo percentual do carbono fixo, fundamental para os cálculos e eficiência do processo.

Micro-ondas – Definição e vantagens

Micro-ondas são radiações eletromagnéticas na faixa de frequência (espectro) de 0,3 a 300 GHz, com o correspondente intervalo de comprimento de onda de 1 m a 1 mm considerando o ar como meio material e que pode ser usada como fonte de calor (Castro, 2016). O aquecimento por micro-ondas é um processo dentro de uma família de técnicas de eletroaquecimento, como indução, radiofrequência, resistência direta ou aquecimento por infravermelho, que utilizam partes específicas do espectro eletromagnético. Esses processos complementam e, em casos específicos, substituem totalmente os sistemas convencionais de aquecimento usados na indústria ou em pesquisas. Isso ocorre porque alguns sistemas convencionais são muito volumosos, não são fáceis de operar, podem poluir o meio ambiente devido a emissões prejudiciais e, acima de tudo, podem ser muito ineficientes. As principais vantagens do uso de micro-ondas para processamento industrial são: rápida transferência de calor, aquecimento volumétrico e seletivo, compactidade do equipamento, velocidade de ativação e desativação e ambiente livre de poluição, pois não há produtos de combustão (Metaxas, 1983).

Material e Métodos

Biomassas

As biomassas residuais (base seca) utilizadas foram: bagaço de cana de açúcar, borra de café, caroço de abacate, casca de coco, sabugo de milho, semente de algodão e torta de mamona.

Caracterização das biomassas

O teor de carbono fixo das amostras de biomassas residuais foram determinados, em duplicata, através da análise química elementar descrita pela norma ABNT-NBR 8112, tradicionalmente utilizada em amostras de carvão vegetal.

Forno para redução carbotérmica de óxidos metálicos com aquecimento por resistência elétrica

As experiências que utilizaram como fonte de energia a resistência elétrica foram processadas em um forno mufla, modelo Q318M21, marca Quimis, que atinge uma máxima temperatura de 1200°C através de 1730W de potência. Este forno foi adaptado para poder determinar taxas de reação durante o processo de aquecimento. As leituras da variação de massa das pelotas durante o processo são obtidas por um sistema composto por um cadinho sobre um prato de aço inox conectado a um fio de Ni-Cr que está interligado com uma balança semi-analítica, modelo BK3000, marca Gehaka, localizada na parte superior de sua plataforma de sustentação. A posição do cadinho com pelotas é sempre na parte central da cuba do forno. A temperatura é medida através de um termopar tipo K. A Figura 1 apresenta o equipamento adaptado para esta finalidade.

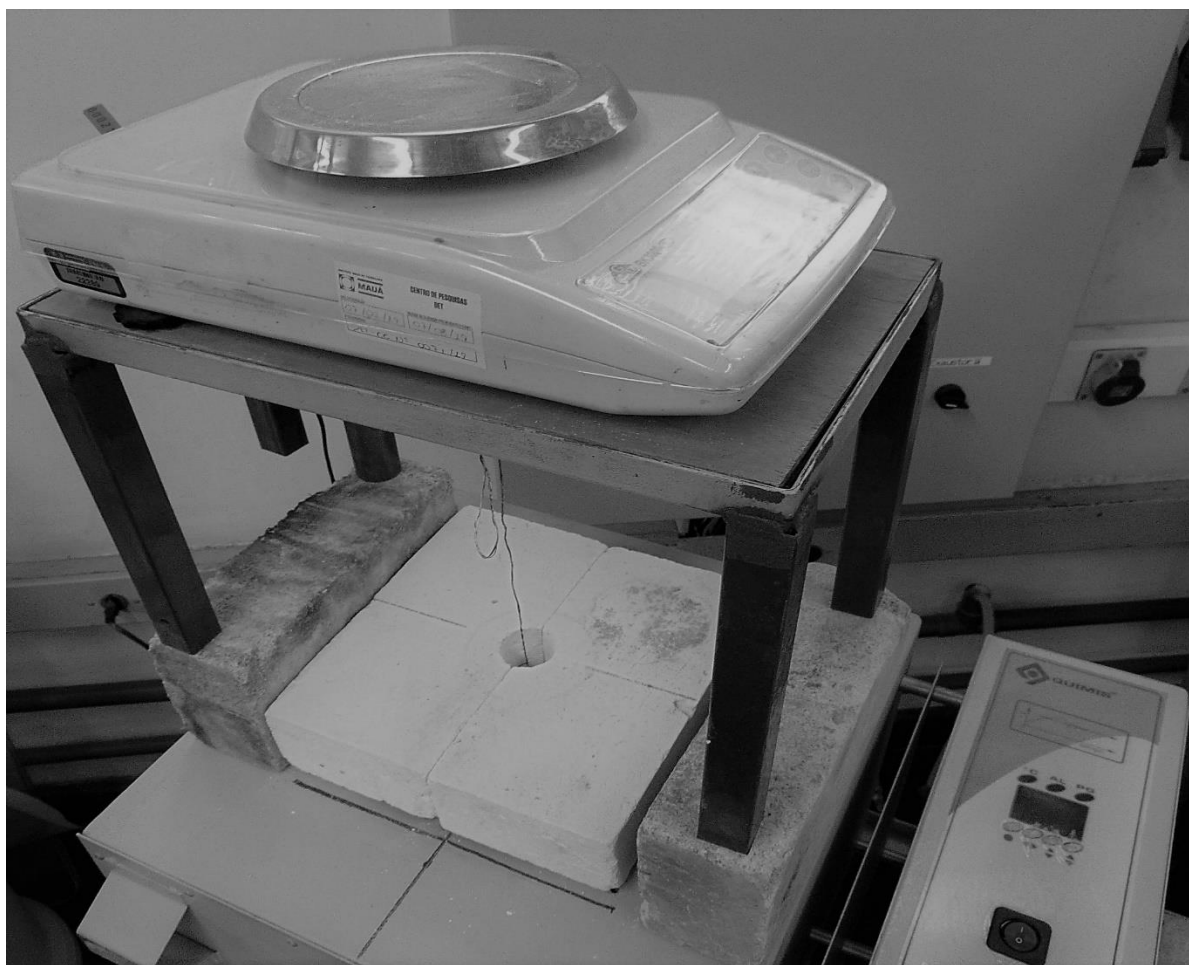


Figura 1 – Vista geral do forno de resistência utilizado nos ensaios termogravimétricos

Forno para redução carbotérmica de óxidos metálicos com aquecimento por micro-ondas

O forno com volume interno da cavidade em torno de 27 L e geometria hexagonal, possui filtros de micro-ondas, um tubo localizado tanto na parte superior como na inferior da câmara de reação. Estes tubos impossibilitam o vazamento da energia eletromagnética para fora do forno. O filtro superior, além de servir como saída do gás inerte e fumos, também assegura o monitoramento da temperatura na superfície das pelotas sob o processo de redução. Estas leituras são obtidas através ou de um pirômetro óptico marca Cibrapam, modelo IS-3D (faixa de 880 a 2000°C) ou de um termômetro infravermelho marca Fluke, modelo 568 (faixa de - 40 a 820°C). O filtro inferior possibilita além da alimentação do gás inerte argônio no interior do

forno com sua vazão medida por um rotâmetro, também possibilita a quantificação da perda de massa das pelotas através de um conjunto composto por um cadinho sobre um prato de aço inox, ambos localizados na parte central do forno e conectados, através de um eixo de porcelana, a uma balança semi-analítica, modelo BK3000, marca Gehaka, localizada abaixo do forno. O forno está conectado a um gerador de micro-ondas de potência regulável até 6 kW, protegido 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. A cavidade é apresentada pela Figura 2 e o equipamento é apresentado pela Figura 3.

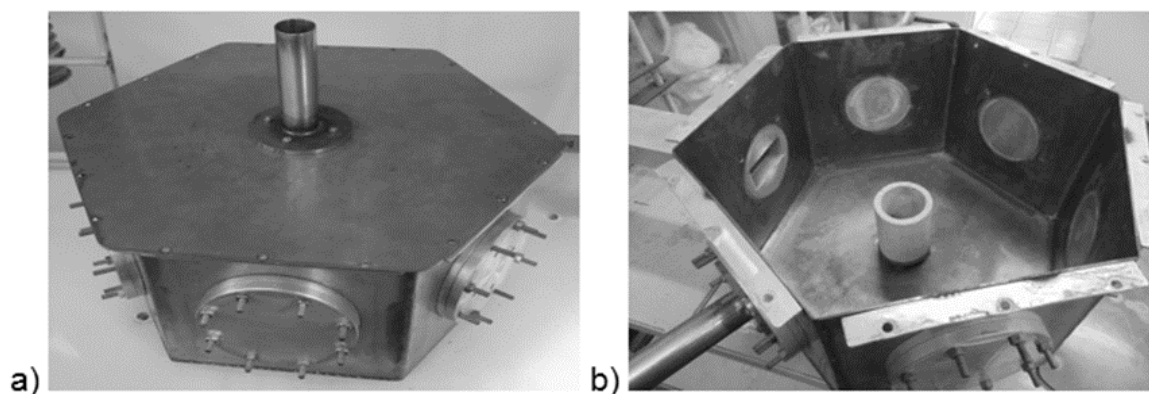


Figura 2 – (a) Vista da cavidade hexagonal desmontada, (b) e aberta com o cadinho

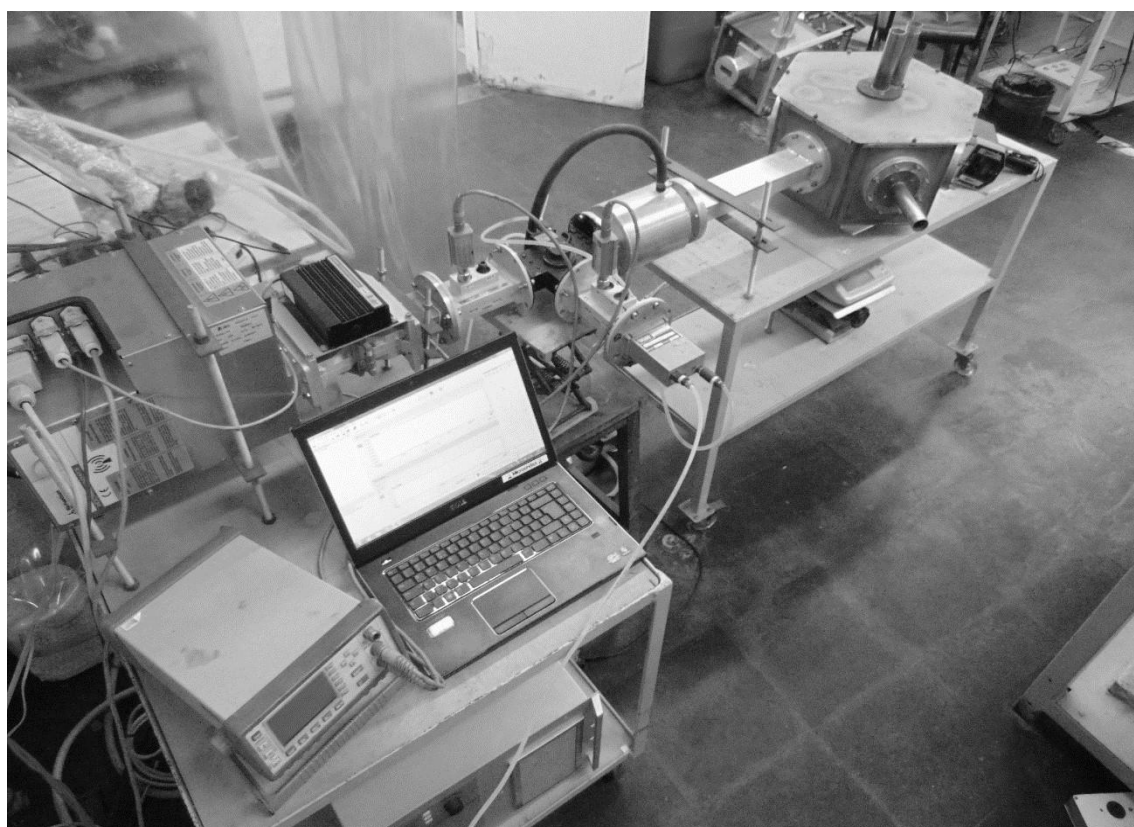


Figura 3 - Vista geral do forno hexagonal (termogravimétrico) para redução carbotérmica

Procedimento para determinar as potências de micro-ondas durante os ensaios

As potências irradiadas, refletidas e efetivas foram automaticamente registradas por um aquisitor de dados e calculadas conforme a equação 2 para a potência efetiva e pela equação 3 para a potência refletida.

$$P_{ef} = P_{irr} - P_{refl} \quad (2)$$

$$P_{refl} = P_{irr} - P_{ef} \quad (3)$$

Onde:

P_{ef} = potência de micro-ondas efetivamente utilizada no processo de redução carbotérmica (W);

P_{irr} = potência de micro-ondas irradiada durante o processo de redução carbotérmica (W);

P_{refl} = potência de micro-ondas refletida pelo equipamento durante o processo de redução carbotérmica (W);

Determinação da taxa de reação de pelotas auto-redutoras durante os ensaios

A taxa de reação 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 seguinte equação:

$$\%TR = [(M_i - M_t)/(M_i \times M)] \times 100 \quad (4)$$

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%)

Adotou-se 30 minutos de duração dos ensaios de redução carbotérmica em ambas as formas de aquecimento e a massa de pelotas de minério de ferro e biorredutor foi de aproximadamente 20 g. No aquecimento por resistência elétrica utilizou-se uma temperatura fixa de 1000°C e no aquecimento por micro-ondas utilizou-se uma potência fixa de 3 kW.

Resultados e Discussão

A Tabela 1 apresenta os valores médios de ensaios em duplicata da porcentagem de carbono fixo presente nas biomassas estudadas.

Tabela 1 – % de carbono fixo (CF) das biomassas (% base seca)

Bagaço de cana (açúcar)	Borra de café	Caroço de abacate	Casca de coco	Sabugo de milho	Semente de algodão	Torta de mamona
13,9	17,2	17,3	17,6	18,1	19,0	7,9

A biomassa semente de algodão foi a que apresentou maior percentual de carbono fixo. Porém, decidiu-se optar em usar a biomassa casa de coco por duas razões, a saber: primeiro devido à dificuldade em obter sementes de algodão em quantidades suficientes para serem carbonizadas e segundo que a casca de coco é facilmente encontrada no comércio em sua forma carvão, isto é, sem a necessidade de carbonizá-la. O valor da porcentagem de carbono fixo fornecido pelo produtor é de 66% e a encontrada experimentalmente foi de 68,5 %.

A Figura 4 apresenta o perfil da evolução da taxa de reação encontrados durante os ensaios. A Figura 5 apresenta a evolução do perfil da potência de micro-ondas refletida. A potência refletida foi calculada através da equação 3 e a taxa de reação pela equação 4.

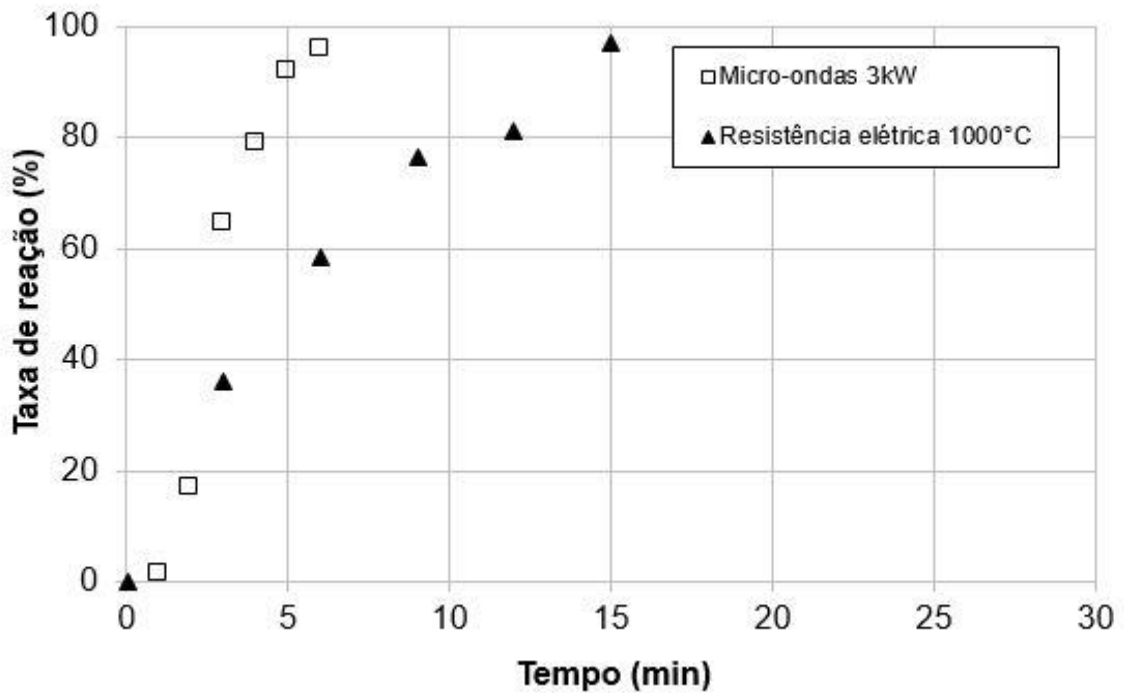


Figura 4 - Perfil da taxa de reação em função do tempo de exposição a duas formas de aquecimento: micro-ondas e aquecimento por resistência elétrica.

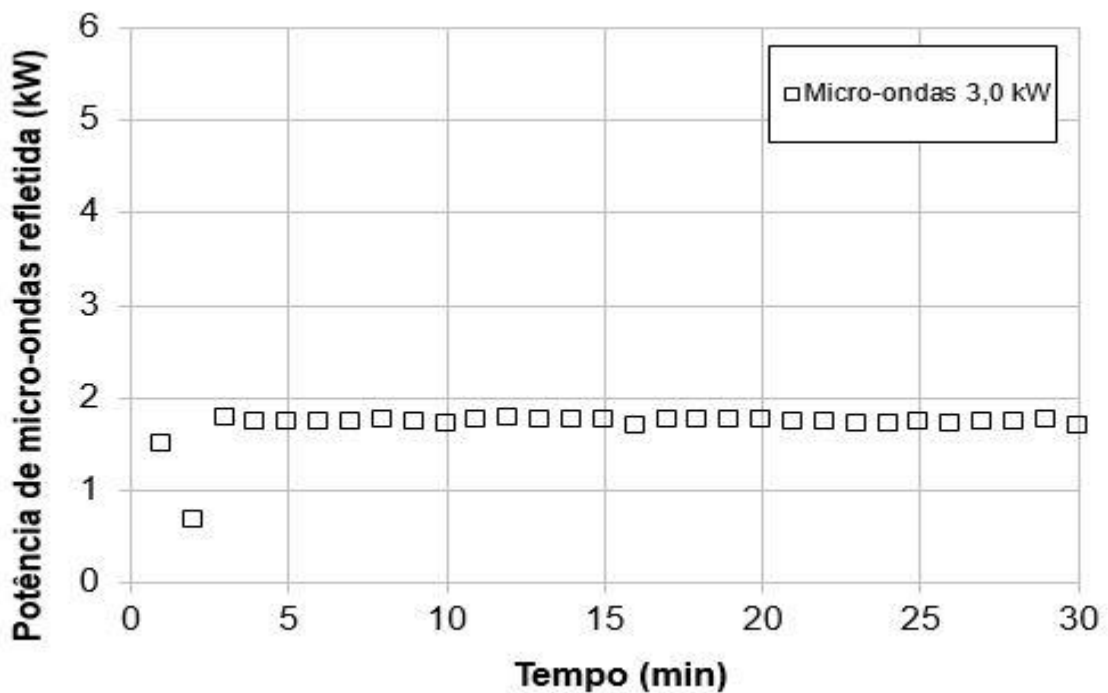


Figura 5 – Perfil da evolução da potência de micro-ondas refletida (W) na redução carbotérmica.

Nas curvas de redução apresentadas pela Figura 4 observa-se melhor resultado para com as pelotas irradiadas a 3,0 kW comparada ao aquecimento por resistência elétrica na temperatura de 1000°C. O melhor resultado está diretamente relacionado com a temperatura, isto é, a temperatura é o parâmetro mais importante na redução do minério de ferro com o

carbono. A taxa de reação da redução do minério de ferro com o carbono depende da taxa de gaseificação do carbono. A gaseificação do carbono é altamente endotérmica e necessita de alta temperatura para ter uma taxa de redução apreciável. Deste modo, evidencia-se que o aquecimento por micro-ondas gerou um pouco mais de energia térmica para as pelotas durante os ensaios.

Um problema comum encontrado nos ensaios com micro-ondas foi a dificuldade de medir a temperatura devido a principalmente dois problemas. O primeiro era a formação de arcos voltaicos na superfície da tampa da cavidade, deixando o processo inseguro e falseando as medidas com o termômetro de infravermelho ou óptico. Quando tal fenômeno ocorria o ensaio era interrompido por medida de precaução para não danificar o equipamento. Este fenômeno ocorreu várias vezes e para solucioná-lo instalou-se no filtro superior do forno, uma exaustão dos fumos gerados pela carga de pelotas. Esta ação resolveu o problema inicial mas gerou o segundo problema, isto é, impossibilitou de medir a temperatura na superfície das pelotas.

A Figura 5 mostrou que os ensaios com micro-ondas nem toda a energia irradiada, isto é a energia disponível no interior do forno, é absorvida pelo sistema. Entende-se, neste caso por sistema, a carga de pelotas, o cadinho metalúrgico, as perdas térmicas para as paredes do forno, etc. Praticamente dois terços da energia não é utilizada e trata-se de uma questão a ser otimizada no futuro.

Conclusões:

É possível observar que os ensaios com ambas formas de aquecimento atingiram completa redução em tempos de reação próximos. Isto pode ser atribuído a possíveis diferenças de temperatura. O aquecimento por micro-ondas foi ligeiramente superior, pois provavelmente gerou mais calor na massa de pelotas que o aquecimento por resistência elétrica. Deste modo a principal conclusão deste trabalho é a comprovação empírica de é possível produzir ferro primário utilizando uma biomassa residual como fonte de carbono (biorredutor) em processos de redução carbotérmica de minério de ferro utilizando como fonte de energia térmica micro-ondas ou aquecimento convencional por resistência elétrica.

Referências Bibliográficas

- BNDES Setorial (2014) Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade, p. 181-236
- Nagata K, Ishizaki K, Kanazawa M, Hayashi T, Sato M, Matsubara A, et al. (2009) Proc. 11th International Conference on Microwave and High Frequency Heating, 87-90.
- Ishizaki K, Nagata K, Hayashi T. (2006) Production of Pig Iron from Magnetite Ore-Coal Composite Pellets by Microwave Heating. ISIJ International. 46(10):1403-1409
- Brand, M.A. (2010) *Energia de biomassa florestal*. Rio de Janeiro. Editora Interciência.
- Castro, E.R. (2016) Contribuição ao desenvolvimento da redução carbotérmica de óxidos metálicos empregando energia de micro-ondas.
- Metaxas. A.C.; Meredith, R.J. (1983) *Industrial Microwave Heating*. Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom.