

DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DA ENERGIA DE MICRO-ONDAS PELOS MATERIAIS (1ª FASE)

Ana Carolina Andref Morales¹; Edmilson Renato de Castro²

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

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

Resumo.

O estudo se refere simultaneamente a duas áreas de conhecimento: a de materiais e a de aquecimento com micro-ondas. A proposta compreende em um projeto e operação de equipamento desenvolvido pelo Laboratório de Micro-ondas do Instituto Mauá de Tecnologia para irradiação com micro-ondas com a característica de quantificar a eficiência da absorção da energia de micro-ondas por um material. Com este estudo, determinou-se a habilidade de placas de carbetto de silício de 20 mm de espessura em absorver a energia de micro-ondas. As amostras foram irradiadas por 20 minutos com 1000 W de potência de micro-ondas na frequência de 2,45 GHz e os resultados mostraram que o equipamento apresentou grande reprodutibilidade nos resultados encontrados.

Introdução

O aquecimento por micro-ondas em muitos materiais possui algumas vantagens sobre o aquecimento convencional: é volumétrico, seletivo, propicia altas taxas de aquecimento, reduz o tempo de processamento, diminui o consumo de energia, é uma tecnologia “limpa”, etc. (Feher, 2009). Teoricamente, a energia de micro-ondas absorvida por materiais pode ser determinada através de suas propriedades dielétricas e magnéticas, que é proporcional à frequência do campo elétrico aplicado, ao fator de perda e ao quadrado da intensidade do campo elétrico local, (Nanthakumar et al., 2007). No entanto as propriedades dielétricas da maioria dos materiais estão relacionadas com diversas variáveis, como teor de umidade, frequência, temperatura, condutividade elétrica e térmica, calor específico, densidade e a geometria dos materiais. Portanto, é difícil de obter, na verdade, a energia de micro-ondas absorvida por materiais com base apenas em cálculos teóricos. De fato, muitas vezes é realizada uma medição direta da temperatura do material para se obter a energia de micro-ondas absorvida. Foram relatados alguns métodos. Por exemplo, a temperatura de uma amostra no interior de um forno de micro-ondas pode ser medida através da inserção de um dispositivo de medição de temperatura no material quente imediatamente depois de desligar a potência do micro-ondas. Muitos dispositivos de medição, tais como fibras ópticas, pirômetros ópticos, termopares e a sonda de temperatura por ultrassom ou laser, foram utilizados para a medição da temperatura (Haque, 1999). No entanto, existiram muitas limitações dos métodos e dispositivos acima mencionados quando usados em fornos de micro-ondas tradicionais. Por exemplo, os dispositivos de medição geralmente falharam no desempenho quando contatado com alguns materiais aquecidos que eram sensíveis à absorção de micro-ondas e rapidamente atingiu-se uma temperatura muito elevada. A temperatura de medição foi sujeita a um número limitado de pontos, de modo que as temperaturas medidas ou os seus valores médios não poderiam refletir a verdadeira característica de temperatura dos materiais, especialmente para materiais misturados. Portanto, é de grande importância buscar um novo método para analisar a característica dos materiais na absorção de micro-

ondas, de modo a selecionar materiais adequados em campo de micro-ondas e de prever os comportamentos de aquecimento destes materiais, quando aquecido por irradiação de micro-ondas. Neste trabalho, um novo método na medição da energia de micro-ondas absorvida pelos materiais foi proposto. A primeira contribuição deste estudo é o desenvolvimento de um equipamento para este fim e realizar testes operacionais exploratórios para o desenvolvimento do procedimento de operação e interpretação dos resultados exploratórios.

Definição de micro-ondas

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 energia. No caso de ondas eletromagnéticas planas há um campo elétrico (E) conjugado com um campo magnético (H), caracterizado por um comprimento de onda (λ) e movendo-se na velocidade da luz (C) se o meio material for o ar, conforme representado na Figura 1. A frequência de micro-ondas mais utilizada para aquecimento é 2,45 GHz por apresentar a melhor relação custo-benefício entre todas as frequências alocadas para aplicações industriais, científicas e médicas (ISM) pela União Internacional de Telecomunicações (UIT). Esta frequência corresponde ao comprimento de onda no espaço livre de aproximadamente 12,25 cm.

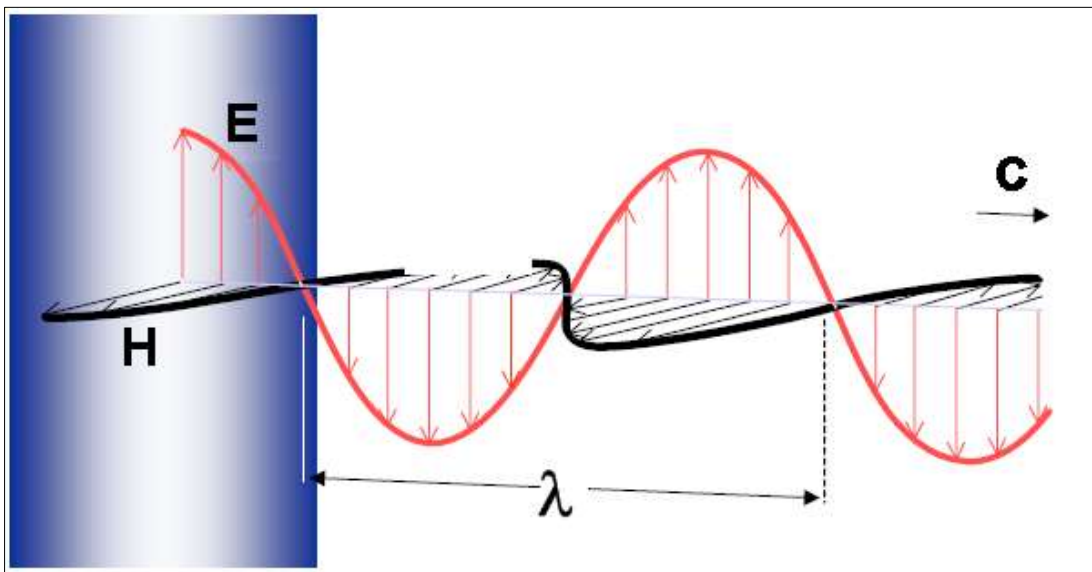


Figura 1: Ilustração de uma onda eletromagnética.

Interação da energia de micro-ondas com os materiais

Em geral, existem três modelos qualitativos em que um material pode ser categorizado em relação à sua interação com o campo de micro-ondas como mostrado pela Figura 2: transparentes (materiais de baixa perda dielétrica) – permitem a total passagem das ondas através de si, sem perdas significativas de energia; opacos (condutores) – micro-ondas são refletidas e não penetram no material; e, absorvedores (materiais de perda dielétrica elevada) - absorvem a energia de micro-ondas com base no valor da força do campo elétrico e do fator de perda dielétrica (Sutton, 1989). Um quarto tipo de interação é o de um absorvedor misto. Este tipo de interação é observado em

materiais compósitos ou de fases múltiplas em que uma das fases é um material de elevada perda, enquanto o outro é um material de baixa perda. Absorvedores mistos tiram proveito de uma das características mais significativas de processamento com micro-ondas, que é o aquecimento seletivo. As micro-ondas são absorvidas pelo componente que tem uma elevada perda dielétrica, enquanto passam através do material de baixa perda, ou seja, com pouca perda de energia. Neste processo de aquecimento seletivo a economia de energia é significativa pois apenas o material dielétrico pode ser aquecido, sem o aquecer de toda a matriz. Este fenômeno não é possível em ambientes de aquecimento convencionais (Sutton, 1989).

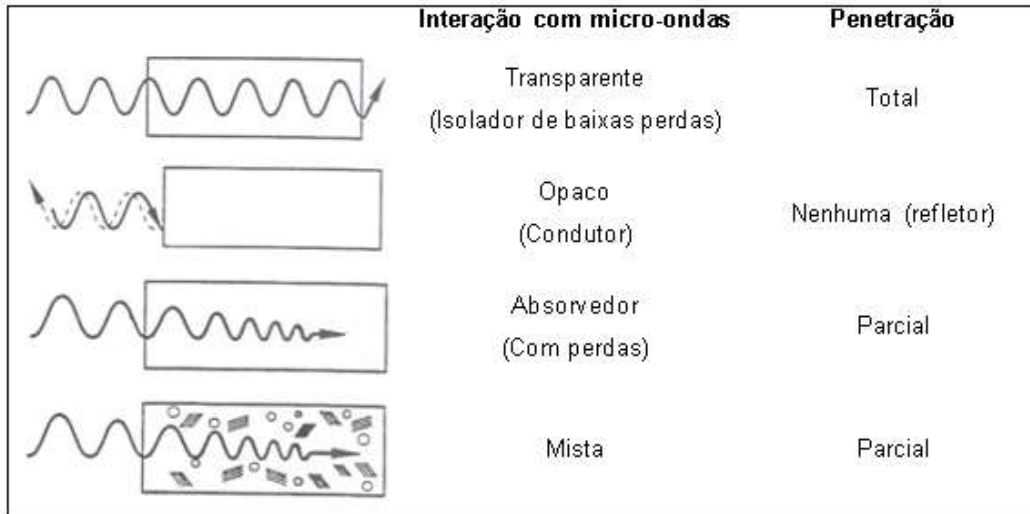


Figura 2 – Interação das micro-ondas com os materiais.

Materiais e Métodos

Descrição do equipamento

Para promover a irradiação de micro-ondas nos materiais, foi desenvolvido pelo Laboratório de Micro-ondas do Instituto Mauá de Tecnologia o equipamento da Figura 3 que é descrito a seguir.

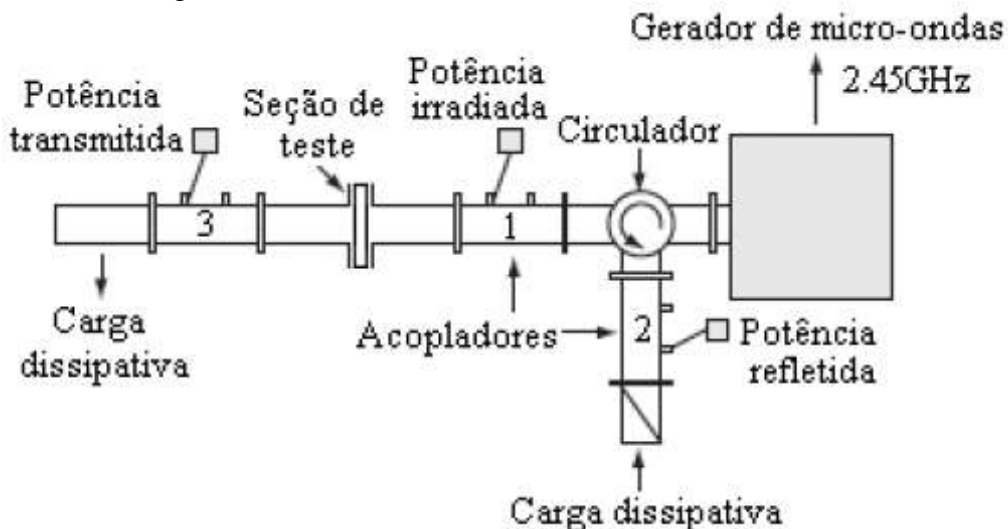


Figura 3: Diagrama esquemático do equipamento para irradiar micro-ondas sobre amostras de materiais

A seção de teste para a irradiação por micro-ondas dos materiais foi construída em aço inox e é constituída por um flange com orifício retangular com as dimensões internas superior ao de um guia de ondas e serve de suporte mecânico para a amostra em teste. A flange com a amostra possui 3 orifícios distribuídos pela circunferência do dispositivo que possibilita as medidas de temperaturas como mostra a Figura 4 a e b.

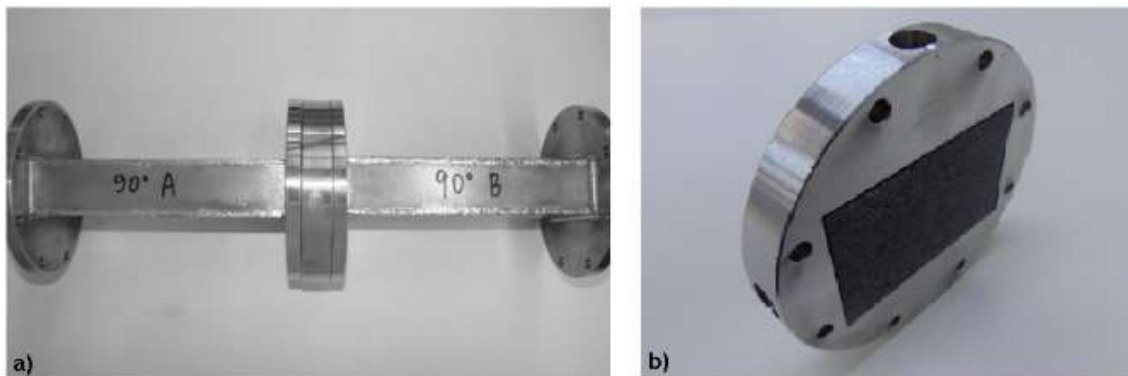


Figura 4: a) Seção de teste; b) Flange com amostra de carbeto de silício

De um lado da seção de teste está montado um gerador de micro-ondas de 2,45 GHz com potência regulável até 6 kW. Um circulador protege o gerador contra o retorno da energia refletida pelo sistema, direcionando-a através do acoplador direcional 2, para uma carga dissipativa que a elimina. Neste acoplador 2 mediu-se a potência refletida de micro-ondas pelo sistema. Após o circulador, é montado o acoplador 1, no qual mediu-se a potência irradiada efetiva de micro-ondas. Do outro lado da seção de teste, estão instalados o acoplador 3 e uma carga de dissipação. No acoplador 3, mede-se a potência de micro-ondas que eventualmente transpassa a amostra em teste. Esta segunda carga de dissipação absorve as micro-ondas que transpassaram a amostra em teste, assegurando que somente uma quantidade mínima (ou nula) de energia fosse refletida de volta para a amostra. As potências de micro-ondas mencionadas acima foram medidas com três medidores de potência conectados aos diferentes acopladores direcionais. A comunicação e a coleta de dados em computador foram realizadas por um software e analisadas posteriormente.

Material

O material estudado, em um total de seis peças, foram placas de refratário a base de carbeto de silício (SiC) usadas em fornos de alta temperatura devido à alta refratariedade, excelente resistência mecânica, elevada condutibilidade térmica e a boa resistência ao choque térmico e possuíam as seguintes dimensões médias: 60 mm de altura, 90 cm de largura e 20 mm profundidade. As placas de carbeto de silício possuíam a mesma procedência e densidades similares admitindo-se assim que a composição das amostras fossem a mesma para todas. Para corroborar com esta homogeneidade, as placas foram previamente secas a 100°C em estufa e armazenadas em dessecador para eliminar a umidade.

Método operacional

Em cada ensaio a amostra foi posicionada no interior da seção de teste de acordo com a Figura 4a e 4b. As amostras foram irradiadas por micro-ondas de 2,45 GHz em potência de 1000 W por 20 minutos, em triplicata. Durante o aquecimento foram

monitorados os valores das temperaturas superior, lateral esquerda e lateral direita além das potências irradiadas, refletidas e transpassadas pelo material a intervalos de 1 minuto. Um termômetro infravermelho digital na faixa -50 a 900°C da marca Fluke foi usado para medir a variação da temperatura. A irradiação por micro-ondas foi mantida constante até que se alcançava 20 minutos de ensaio.

Balanço de energia do sistema

Para transformar potência de micro-ondas (W) em energia de micro-ondas (kJ), utilizou-se a equação 1.

$$E (kJ) = [P (W) \times \Theta (s)] / 1000 \quad (1)$$

As energias disponíveis e refletidas pelo material foram automaticamente registradas por um aquisitor de dados e calculadas conforme as equações 2 e 3, respectivamente.

$$E_{disp} = E_{irr} - E_{refl} \quad (2)$$

$$E_{refl} = E_{abs} + E_{perdas} \quad (3)$$

Onde:

E_{disp} = energia de micro-ondas disponível para ser absorvida para a amostra (kJ);

E_{irr} = energia de micro-ondas irradiada durante o processo (kJ);

E_{refl} = energia de micro-ondas refletida pelo sistema (kJ);

Para um balanço energético global, computou-se a energia fornecida a seção de teste, a energia absorvida pelo material, calculada a cada minuto pela equação 4, e as perdas de energia pelo sistema, isto é, a energia refletida pela amostra mais a energia perdida pelo equipamento para o meio ambiente na forma de calor calculada pela equação 3.

$$E_{abs} = m \times cp \times \Delta T \quad (4)$$

A tabela 1 apresenta os dados das seis placas de carbetto de silício ensaiadas neste experimento. O valor do calor específico usados em todos os cálculos foi de 750 J/kg·K e obtido no site do fabricante (Saint Gobain, 2018).

Tabela 1- Dados das placas de carbetto de silício

		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6
Massa	(kg)	0,2836	0,2836	0,2858	0,2742	0,2818	0,2829
Área	(cm ²)	5,5	5,5	5,5	5,4	5,5	5,5
Densidade	(g/cm ³)	2,5	2,5	2,5	2,4	2,5	2,4

A capacidade de 6 placas de carbetto de silício em absorver energia de micro-ondas foi testada. Todas as placas possuíam massa, densidade e área de exposição frente as micro-ondas muito similares.

Resultados parciais e Discussão

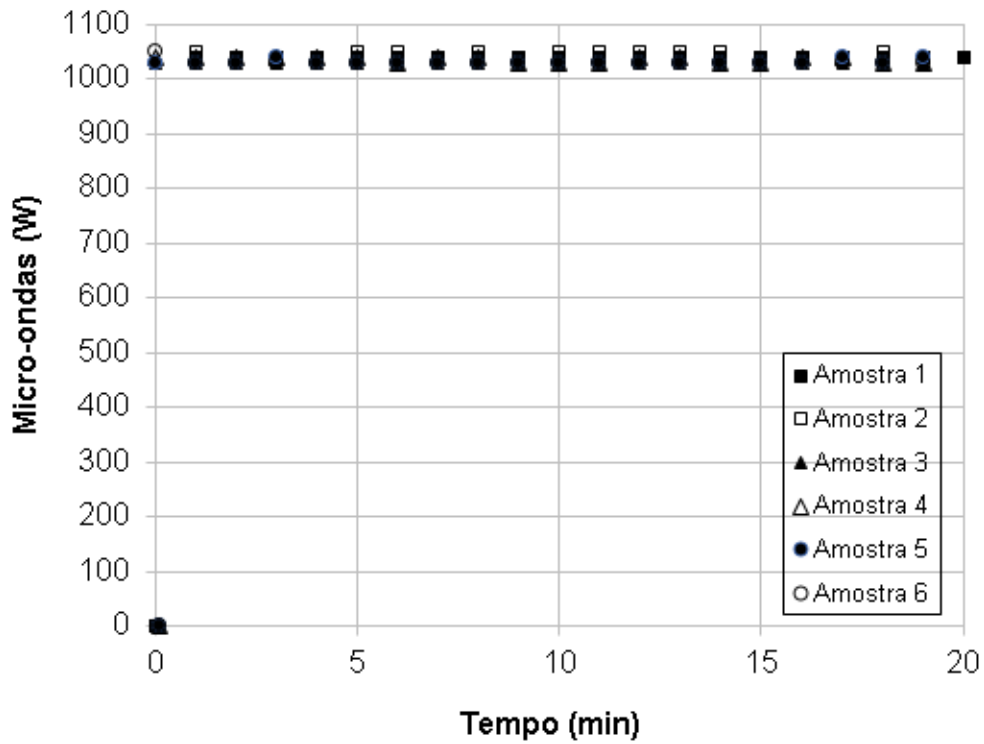


Figura 5 - Perfil da evolução da potência de micro-ondas irradiada (W) na placa de carbetto de silício em função do tempo.

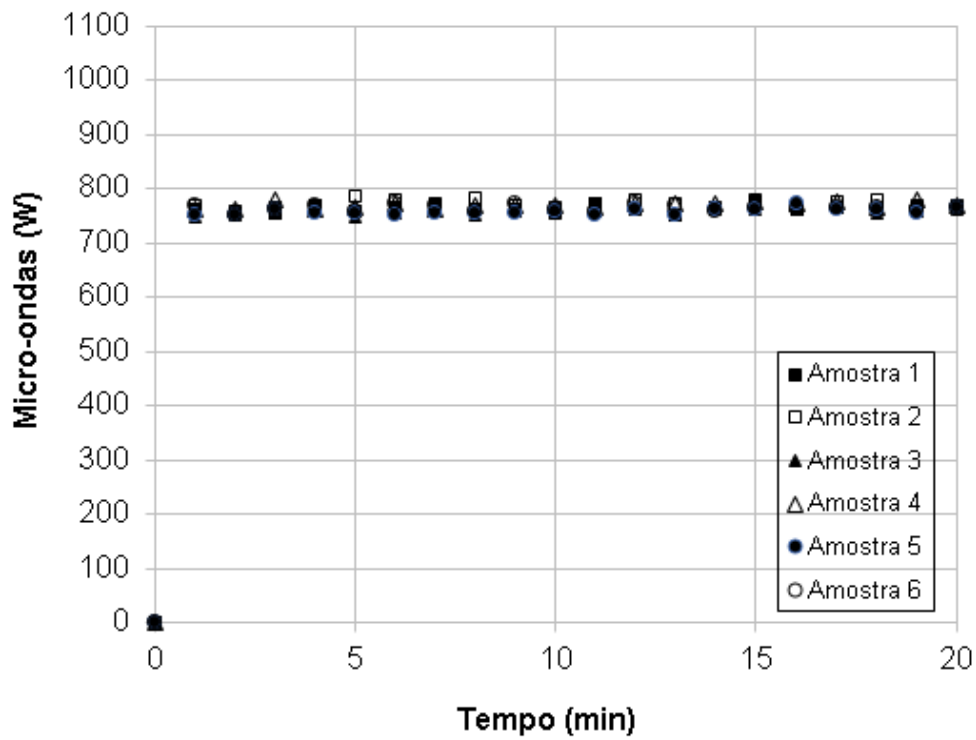


Figura 6 - Perfil da evolução da potência de micro-ondas refletida (W) na placa de carbetto de silício em função do tempo.

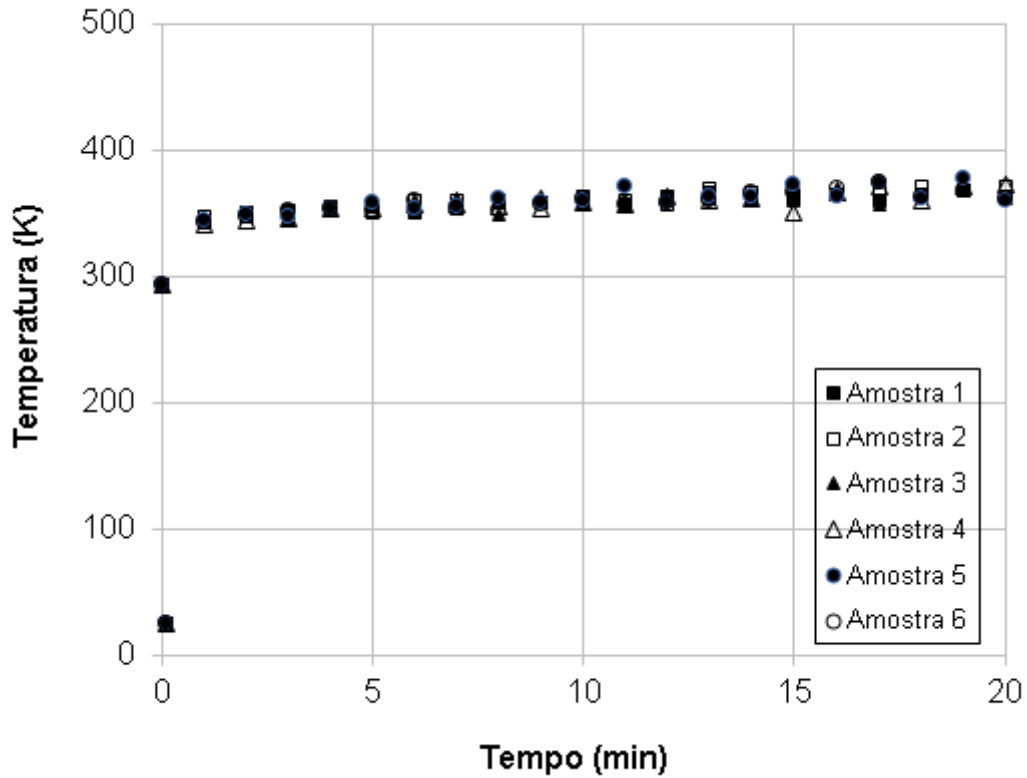


Figura 7 - Temperatura da superfície das placas de carbetto de silício em função do tempo de exposição.

As Figuras 5 e 6 apresentam a evolução do perfil da potência de micro-ondas irradiada e refletida, respectivamente. A curva apresentada pela Figura 5 mostrou que o gerador disponibilizou micro-ondas a câmara de teste de uma forma constante. Já a curva presente na Figura 6 é uma característica da capacidade do material em interagir com a energia eletromagnética disponível, isto é, refletindo o que não foi absorvido pela amostra e o que não foi possível quantificar na forma de perdas de um modo geral. A Figura 7 mostra a evolução da temperatura médias dos três pontos amostrados. Nestas determinações, observou-se uma distribuição desigual da temperatura pela placa. A Tabela 2, apresenta os resultados energéticos matematicamente tratados através das equações 1, 2, 3 e 4.

Tabela 2 – Dados do balanço de energia

		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6
<i>Energia irradiada</i>	(kJ)	1248,0	1254,0	1236,0	1243,2	1237,8	1237,2
<i>Energia refletida</i>		916,1	926,6	909,4	924,6	905,8	917,2
<i>Energia disponível</i>		331,9	327,4	326,6	318,6	332,0	320,0
<i>Energia absorvida</i>		277,7	285,9	277,9	264,6	283,9	278,6
<i>Energia perdida</i>		54,2	41,5	48,7	54,0	48,1	41,5

Os dados da Tabela 2 apresentam uma similaridade das energias em todos os ensaios, que ratifica a reprodutibilidade dos resultados nos ensaios além de determinar a capacidade de absorver micro-ondas para diferentes materiais, objetivo deste estudo. Observou-se a falta de “janelas” na seção de teste para determinar a temperatura nas faces, frontal e verso, das placas ensaiadas, que propiciariam uma melhor análise da energia de micro-ondas analisadas no processo.

Conclusões

O equipamento desenvolvido mostrou que é possível especificar e reproduzir com precisão as condições de irradiação por energia de micro-ondas em um processo para quantificar a eficiência da absorção da energia de micro-ondas por um material além de resolver a inexistência de equipamentos laboratoriais e comerciais para tal finalidade. Se faz necessário a instalação de “janelas” na câmara de teste para possibilitar uma leitura direta da temperatura nas faces do material em um futuro equipamento.

Referências Bibliográficas

- Feher, L. E. (2009) *Energy Efficient Microwave*, German, *Springer*.
- Nanthakumar B., Pickles C.A., Kelebek S. (2007) Microwave pretreatment of a double refractory gold ore. *Minerals Engineering*, **20**, 1109-1119.
- Haque, K. e. (1999) Microwave energy for mineral treatment processes – a brief review. *International Journal of Mineral Processing*, **57**, 1-24.
- Sutton W. H. Microwave processing of ceramic materials. (1989) *Ceramic Bulletin*. v. **68**, n. 2, 376-386.