



FUSÃO DE METAIS NÃO-FERROSOS USANDO FORNO DE MICRO-ONDAS DOMÉSTICO

Luís O. P. Pechoto¹, Luciana Takahashi¹, Juno Gallego^{1,2}

1 – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, UNESP-Ilha Solteira, Ilha Solteira, SP.

2 - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, UNESP-Ilha Solteira, Avenida Brasil Centro, 56, Ilha Solteira, CEP 15385-000, SP. juno.gallego@unesp.br

RESUMO

A fundição de metais é um dos processos de fabricação mais tradicionais e importantes na indústria. O propósito deste trabalho é investigar a aplicação de irradiação de micro-ondas na fusão de metais não-ferrosos puros, como o estanho, o chumbo, o alumínio e o cobre. Os ensaios foram realizados em forno de micro-ondas doméstico comum, operando em 2,45GHz com potência nominal 1050W. Amostras com 50 e 100 gramas, com pureza mínima de 95% do metal, foram fundidas em cadinho de grafite com auxílio de um anel suscepter feito de carboneto de silício. A variação de temperatura foi verificada durante o aquecimento por termopar tipo K. Os resultados obtidos mostram que o aquecimento híbrido por meio da irradiação de micro-ondas pode ser uma técnica alternativa, simples e viável, para a fundição sustentável de peças metálicas em pequena escala.

Palavras-chave: fusão; metais; aquecimento híbrido; micro-ondas.

INTRODUÇÃO

A fundição de peças metálicas é um processo bastante antigo e ainda tradicional. Os métodos para aquecimento e fusão dos metais e suas ligas tem sido continuamente aperfeiçoados, buscando-se incrementar a sustentabilidade dos processos industriais. A aplicação da irradiação de micro-ondas, ondas eletromagnéticas com frequências entre 300MHz a 300GHz, no processamento de materiais cerâmicos e poliméricos é feita há muitas décadas. O aquecimento de materiais metálicos por micro-ondas é um fato relativamente recente⁽¹⁾.

O aquecimento por micro-ondas depende das propriedades elétricas e dielétricas do material, que pode tornar este material transparente, absorvedor ou refletor das ondas eletromagnéticas. Deste modo os metais, devido a sua elevada condutividade elétrica, se caracterizam por refletirem as ondas eletromagnéticas e terem baixíssima profundidade de penetração D_p na superfície (penetration depth)⁽²⁾. O parâmetro D_p representa a profundidade dentro do material onde a potência da onda atinge 36,8% do valor da superfície e tem como valores 1,7 e 2,7 μ m para alumínio e cobre, respectivamente⁽³⁾.

Como não é possível aquecer diretamente quantidades massivas de metal (*bulk*) por meio da irradiação por micro-ondas é necessário adotar outra estratégia para esta finalidade: o aquecimento híbrido por micro-ondas (Microwave Hybrid Heating – MHH)⁽²⁻⁴⁾. Nesta técnica são utilizados susceptores, substâncias que possuem significativos valores de D_p e que absorvem facilmente a energia das micro-ondas, convertendo-a em calor e que é transferida

inicialmente para a carga pelos mecanismos de transferência (radiação, condução e convecção). No processamento de metais os susceptores mais utilizados são o carvão vegetal ($6 < D_p < 11\text{cm}$) e o carboneto de silício SiC ($D_p = 1,9\text{cm}$)⁽²⁾. Os susceptores permitem o aquecimento da carga metálica até uma temperatura crítica, na qual o metal começa a absorver a energia das micro-ondas, e também atuam como barreira térmica em altas temperaturas⁽³⁾.

A fusão de metais puros envolve o fornecimento de energia até a transformação de estado sólido-líquido, sendo estas energias definidas como calor sensível e calor latente. O calor sensível é a energia necessária para variar a temperatura da carga metálica e depende da massa e do calor específico, uma propriedade física do metal⁽⁵⁾. O calor latente é a energia necessária para a mudança do estado sólido para líquido, sem alteração de temperatura nos metais puros.

O propósito deste trabalho é investigar a fusão de metais não-ferrosos, como o estanho, o chumbo, o alumínio e o cobre, aplicando o aquecimento híbrido por micro-ondas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente foi feita a seleção dos materiais usados nos experimentos. Assim, foram empregados pesos para pescaria (“chumbadas”) como fonte de chumbo, lingotes de estanho, retalhos de peças de alumínio e cabos elétricos de cobre para as cargas metálicas. Uma balança digital com precisão 0,1g foi utilizada para a preparação das cargas metálicas de 50 e 100 gramas. Acredita-se que a pureza dos metais usados neste experimento seja superior a 95% em massa.

A preparação da mufla para o aquecimento híbrido envolveu a produção de um anel susceptor de carboneto de silício (SiC), com dimensões nominais 100mm de diâmetro externo, 50mm de altura e 5mm de espessura. Este anel foi produzido seguindo-se procedimentos similares ao apresentado em vídeo no Youtube⁽⁶⁾, sendo usado SiC com granulometria 200 μm aglomerado sobre um molde de gesso com a aplicação de spray de solução aquosa de silicato de sódio na razão 1 silicato: 2 água em massa. Após cuidadosa sinterização em forno de micro-ondas o anel SiC foi envolto por manta de fibras cerâmicas para alta temperatura (Fiberfrax), a fim de se promover o adequado isolamento térmico da mufla durante os experimentos.

As cargas metálicas foram acondicionadas em cadinho de grafite, com diâmetro externo 55,0mm e altura 60,0mm, com massa de 187g. O cadinho com a carga metálica foram posicionados na mufla e colocados no interior da cavidade do forno de micro-ondas doméstico, operando com tensão 127 volts, frequência 2,45GHz e potência nominal 1050W, Figura 1(a). Um termopar cromel-alumel (tipo K), isolado com bainha metálica de aço inoxidável de 1,5mm de diâmetro, foi conectado a um sistema de aquisição de dados para determinação das variações de temperatura, Figura 1(b). Foi necessário garantir o isolamento elétrico da junção de medida do termopar em relação ao campo eletromagnético espalhado no interior da cavidade e o aterramento da bainha metálica do termopar na carcaça do forno de micro-ondas⁽⁷⁻⁸⁾. A temperatura de processamento foi registrada com frequência de 1Hz. Ultrapassada a temperatura de fusão o forno de micro-ondas era desligado, retirando-se a mufla do seu interior. Com auxílio de uma tenaz o cadinho de grafite foi manuseado e a sua carga metálica fundida vazada em lingoteira feita de aço-carbono.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Fusão do estanho (Sn)

A temperatura de fusão do estanho é 232°C . A Figura 2(a) ilustra a variação de temperatura durante a fusão das cargas contendo 50g do metal. Verificou-se que foram necessários 289 e 290 segundos para atingir a temperatura de fusão do estanho. No aspecto comparativo nota-se bom ajuste aos resultados obtidos por Chandrasekaran et al⁽⁹⁾, que atingiram a temperatura de fusão após aproximadamente 270 segundos, e por Lingappa et al⁽¹⁰⁾ que atingiu esta temperatura após cerca de 260 segundos para a fusão do metal. O “atraso” da fusão neste experimento foi estimado em aproximadamente 10%. Possíveis explicações podem estar relacionadas com o posicionamento da mufla no interior da cavidade do forno de micro-ondas e também pela variação de potência entre os fornos de microondas usados. O mapeamento da intensidade do campo elétrico na cavidade do forno mostra significativas alterações, conforme reportado por Takahashi et al⁽¹¹⁾. O forno de micro-ondas utilizado por Chandrasekaran et al⁽⁹⁾ em seus experimentos dispunha de 1300W, potência aproximadamente 30% superior ao usado neste experimento. A taxa média de aquecimento foi estimada em $66^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

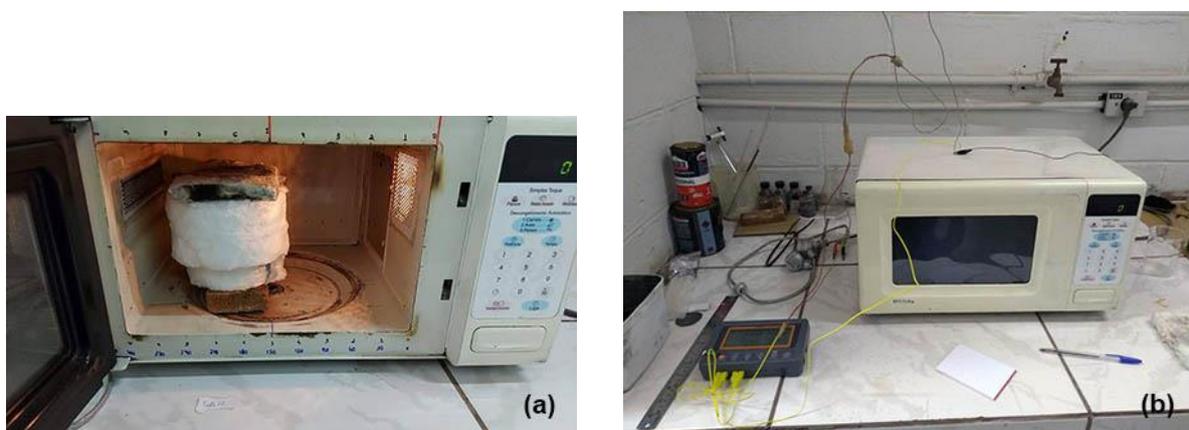


Figura 1: Mufla posicionada dentro da cavidade do forno de micro-ondas em (a) e arranjo experimental montado em (b).

A Figura 2(b) mostra a variação da temperatura para a carga de 100 gramas de estanho, quando foram necessários 194 e 330 segundos para atingir a temperatura de fusão. Esta variação de 41% no aquecimento entre os testes foi associado à mudança no posicionamento da mufla no interior da cavidade do forno de micro-ondas. No aspecto comparativo nota-se que o mais lento teve comportamento similar ao observado por Chandrasekaran et al⁽⁹⁾, que atingiu a temperatura de fusão após aproximadamente 285 segundos, e por Lingappa et al⁽¹⁰⁾ que atingiu esta temperatura após cerca de 283 segundos. As diferenças na cinética de aquecimento e fusão podem estar relacionadas aos mesmos fatores destacados anteriormente: posicionamento da mufla na cavidade do forno e variações de potência. Em todos os testes o metal fundido continha pouca ou nenhuma escória, já que o vazamento ocorreu pouco após constatada a fusão do estanho. Os resultados experimentais são compatíveis com valores correspondentes reportados na literatura. A fusão de estanho em pó em forno de micro-ondas foi investigada, obtendo-se uma taxa média de aquecimento de $62^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ($1,03^{\circ}\text{C}/\text{s}$), aquecimento 10 vezes mais rápido que o observado por Xu e colaboradores em um forno elétrico convencional usado para fundir uma carga de 1,5 kg⁽¹³⁾.

Fusão do chumbo (Pb)

A temperatura de fusão do chumbo é 327°C . A Figura 3(a) ilustra a variação de temperatura durante a fusão das cargas contendo 50g do metal. Nos testes foram necessários 257 e 400 segundos para se atingir a temperatura de fusão. A taxa média de aquecimento foi estimada

em 66°C/min. Notou-se grande variação no aquecimento entre os testes, possivelmente provocado pela mudança no posicionamento da mufla no interior da cavidade do forno de micro-ondas. No aspecto comparativo nota-se que o teste mais lento teve comportamento similar ao observado por Chandrasekaran et al (2011)⁽⁹⁾, que atingiu a temperatura de fusão após aproximadamente 340 segundos. Em relação aos testes realizados neste trabalho o atraso máximo na fusão foi estimado em aproximadamente 15% e também pode ser justificado pelo posicionamento da mufla no interior da cavidade do forno de micro-ondas e na maior potência do aparelho usado (1300W).

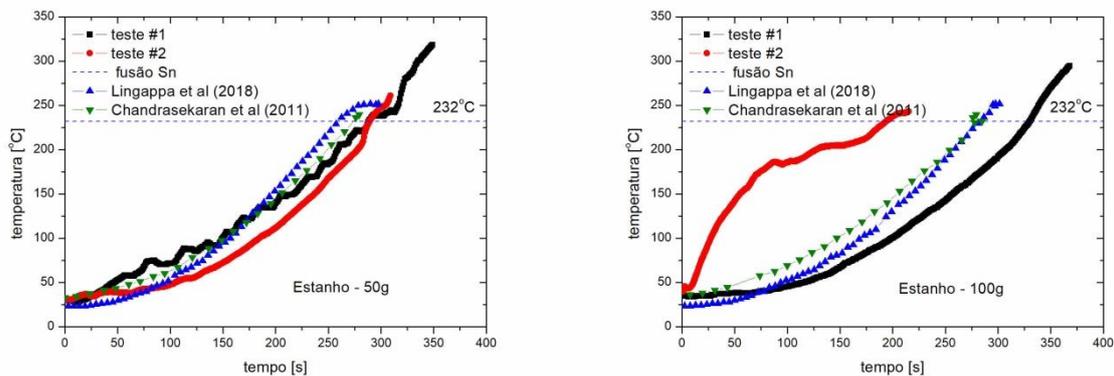


Figura 2: Variação da temperatura para a fusão de estanho no micro-ondas. Carga de 50g em (a) e 100g em (b).

A Figura 3(b) indica a variação de temperatura para a fusão das cargas com 100 gramas de chumbo. Nos testes desenvolvidos foram necessários 295 e 513 segundos para atingir a temperatura de fusão. Novamente notou-se o efeito do posicionamento da mufla dentro do micro-ondas. Chandrasekaran et al⁽⁹⁾ obteve a fusão do chumbo após aproximadamente 340 segundos, em um ciclo térmico intermediário entre os resultados experimentais deste trabalho. Em relação aos testes realizados neste trabalho o atraso máximo na fusão foi estimado em aproximadamente 34% em relação ao resultado de Chandrasekaran et al⁽⁹⁾. Essas diferenças na cinética de aquecimento e fusão podem estar relacionadas aos mesmos fatores destacados anteriormente: posicionamento da mufla na cavidade do forno e variações de potência. Em todos os testes o metal fundido continha pouca ou nenhuma escória, já que o vazamento ocorreu pouco após constatada a fusão do chumbo.

Fusão do alumínio (Al)

O alumínio é um metal com baixa densidade (2,7 g/cm³) e conseqüentemente maior volume é ocupado para uma dada massa. Assim, devido as limitações dimensionais do cadinho de grafite, não foi possível testar a fusão de uma carga de 100 gramas de alumínio. Os testes com este metal foram realizados apenas com a carga de 50 gramas.

A temperatura de fusão do alumínio é 660°C. A Figura 4(a) ilustra a variação de temperatura durante a fusão das cargas metálicas. Nos testes foram necessários 670 e 900 segundos para atingir a temperatura de fusão. A taxa média de aquecimento foi estimada em 63°C/min. No aspecto comparativo nota-se boa similaridade com os resultados obtidos por Lingappa et al⁽¹⁰⁾ que atingiu esta temperatura após cerca de 690 segundos. Chandrasekaran et al⁽⁹⁾ fundiram 25 gramas de alumínio em aproximadamente 510 segundos empregando um forno de micro-ondas com potência de 1300W. As discrepâncias entre os testes experimentais e os resultados da literatura podem estar novamente associados ao binômio posicionamento da mufla-potência do forno. Mishra e colegas⁽¹⁴⁾ fundiram uma carga de 100g da liga de alumínio 7039 em forno

de micro-ondas com 1400W, levando 930s para atingir temperatura de 750°C e obtendo uma taxa de aquecimento média de 48,4°C/min (0,8°C/s).

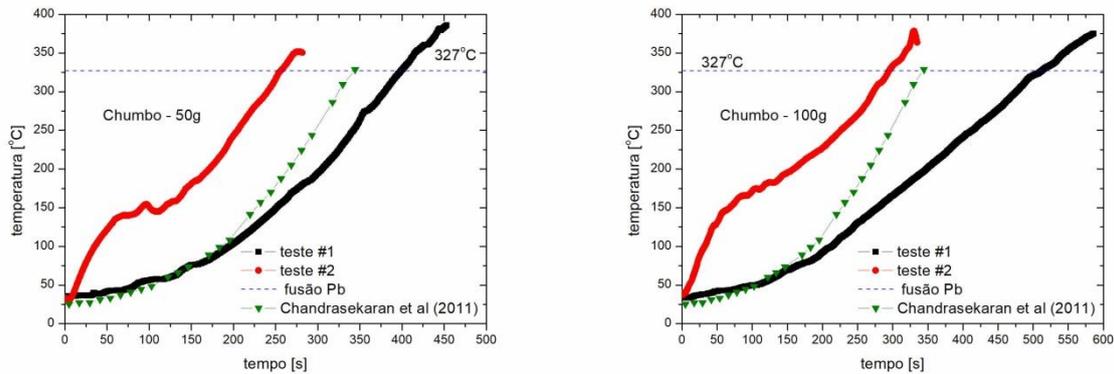


Figura 3: Variação da temperatura para a fusão do chumbo no micro-ondas. Carga de 50g em (a) e 100g em (b).

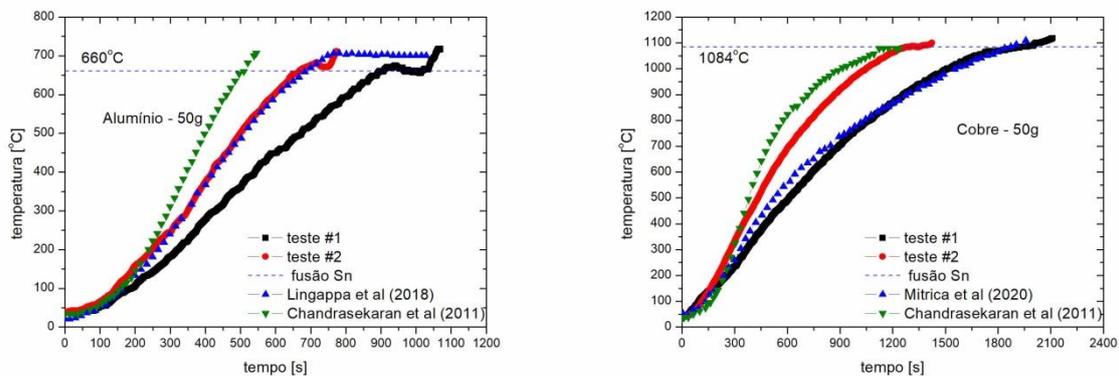


Figura 4: Variação da temperatura para a fusão de alumínio (a) e do cobre (b) no micro-ondas.

Fusão do cobre (Cu)

Os testes com este metal foram realizados apenas com a carga de 50 gramas. A temperatura de fusão do cobre é 1084°C. A Figura 4(b) ilustra a variação de temperatura da carga metálica, onde foram necessários 1350 e 1925 segundos para atingir a temperatura de fusão. A taxa média de aquecimento foi estimada em 67°C/min. No aspecto comparativo nota-se muito boa similaridade com os resultados obtidos por Mitrică et al⁽¹²⁾ que atingiu esta temperatura após cerca de 1840 segundos. Chandrasekaran et al⁽⁹⁾ fundiram 25 gramas de cobre em aproximadamente 1230 segundos empregando um forno de micro-ondas com potência de 1300W. Em relação aos testes realizados neste trabalho as diferenças nos tempos para fusão foram também relacionadas ao binômio posicionamento da mufla e potência do forno. Em todos os testes realizados a variação de temperatura na fase inicial do aquecimento híbrido por micro-ondas teve um ótimo ajuste ao modelo de crescimento exponencial (*exponential growth*), com taxas médias de aquecimento comparativamente superiores às normalmente obtidas com fornos elétricos convencionais⁽¹³⁾

CONCLUSÕES

- O aquecimento híbrido em forno de micro-ondas foi capaz de fundir pequenas quantidades de estanho, chumbo, alumínio e cobre.

- A variação inicial de temperatura no aquecimento híbrido dos metais não-ferrosos investigados tiveram ótimo ajuste ao modelo de crescimento exponencial (*exponential growth*).
- A taxa média de aquecimento variou entre 63 a 67°C/min, superior àquelas reportadas na literatura para o aquecimento/processamento convencional com forno elétrico.
- O aquecimento híbrido é fortemente influenciado pelo posicionamento da carga no interior da cavidade do forno de micro-ondas, devido a heterogeneidades na distribuição do campo elétrico (*hot spots*).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio do CNPq e da CAPES pelo suporte dado a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

1. M. Gupta, E.W. Leong. *Microwave and Metals*. Singapore: John Wiley & Sons, 2007, 232p.
2. M. Bhattacharya, T. Basak. *Energy*, v. 97, pp. 306-338, 2016.
3. A. Amini, M. Latifi, J. Chaouki. *Applied Thermal Engineering*, v. 193, e. 117003, 2021.
4. B. Yahaya, S. Izman, M. Konneh, N. Redzuan. *Adv. Mat. Research*, v. 845, pp. 426-430, 2014.
5. W. M. Haynes. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 97th edition, pp. 216-217, 2017.
6. Shake the Future. *Diy Microwave Kiln: Melt Glass in the Microwave*. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=rAiyLWEKt8U>
7. F.R. van de Voort, M. Laureano, J.P. Smith, G.S.V. Raghavan. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, v. 20, No. 4, pp. 279-284, 1987.
8. H. Ramaswamy, F.R. Van De Voort, G.S.V. Raghavan, D. Lightfoot, G. Timbers. *Journal of Food Science*, v. 56, No. 2, pp. 550-552, 1991.
9. S. Chandrasekaran, Tanmay Basak, S. Ramanathan. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 211, pp. 482-487, 2011.
10. S.M. Lingappa, M.S. Srinath, H.J. Amarendra. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 40, 2018. <https://doi.org/10.1007/s40430-017-0921-7>
11. L. Takahashi, G.I. Pontin, L.O.P. Pechoto, J. Gallego. In. *Anais do I Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia*. Diamantina: Even3, 2020. v. 1. p. 1-5.
12. D. Mitrică, B.A. Șerban, M. Olaru, M. Burada, D. Dumitrescu, C.I. Bănică. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, v. 916, e. 012068, 2020
13. L. Xu et al. *Engineering*, v. 3, pp. 423-427, 2017.
14. R.R. Mishra, A.K. Sharma. *Materials and Design*, v. 112, pp. 97-106, 2016.
15. L. Xu et al. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 701, pp. 236-243, 2017.

MELTING OF NON-FERROUS METALS USING DOMESTIC MICROWAVE OVEN

ABSTRACT

Metal smelting is one of the most traditional and important manufacturing processes for the modern industry. The aim of this work is to investigate the application of microwave irradiation for melting of some pure non-ferrous metals, such as tin, lead, aluminum and copper. The tests were carried out in a common domestic microwave oven, operating at 2.45GHz with a nominal power of 1050W. Samples of 50 and 100 grams, with 95%wt minimum metal purity, were melted in a graphite crucible with the aid of a susceptor ring made of silicon carbide. The temperature variation was indicated during heating by type K thermocouple. The results obtained showed that hybrid heating through microwave irradiation can be an alternative, simple and viable technique for a sustainable casting processing of metal parts on a small scale.

Keywords: *melting; metals; hybrid heating; microwaves.*