



FUNDIÇÃO DE ESTANHO, CHUMBO, ALUMÍNIO E COBRE EMPREGANDO FORNO DE MICRO-ONDAS DOMÉSTICO

Luís Otávio P. Pechoto, Vitor S. Rolin e Juno Gallego*

Universidade Estadual Paulista (UNESP), Departamento de Engenharia Mecânica.
Grupo de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais e Processos Tecnológicos
(MaProTec). Avenida Brasil Centro, 56 – Ilha Solteira/SP – CEP 15385-007

* 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 susceptor 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: fundição, metais não-ferrosos, aquecimento híbrido, susceptor, 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 μm 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 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. O calor latente é a energia necessária para a mudança do estado sólido para líquido, sem alteração de temperatura nos metais puros. A Tabela 1 apresenta algumas propriedades físicas para o estanho, o chumbo, o alumínio e o cobre, como a temperatura de fusão T_f , a densidade d , o calor específico C_p , o calor latente de fusão L_f e a condutividade térmica λ .

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.

Tabela 1. Propriedades físicas dos metais investigados neste trabalho.

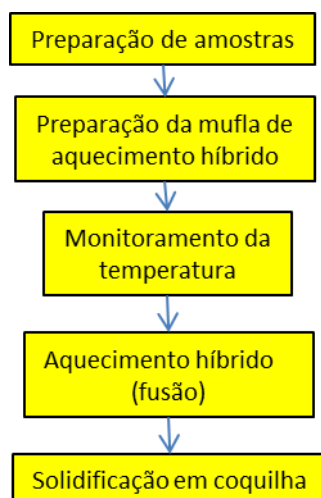
	T_f (°C)	d (g/cm ³)	C_p (J/(g.°C))	L_f (J/g)	λ (W/(m.°C))
Sn	232	7,26	0,227	60	67
Pb	327	11,34	0,129	23	35
Al	660	2,70	0,987	397	237
Cu	1084	8,96	0,385	209	401

Fonte: ref. [5]

MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma apresentado na Figura 1 mostra as etapas desenvolvidas para o arranjo experimental. 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.

Figura 1. Fluxograma do arranjo experimental desenvolvido.

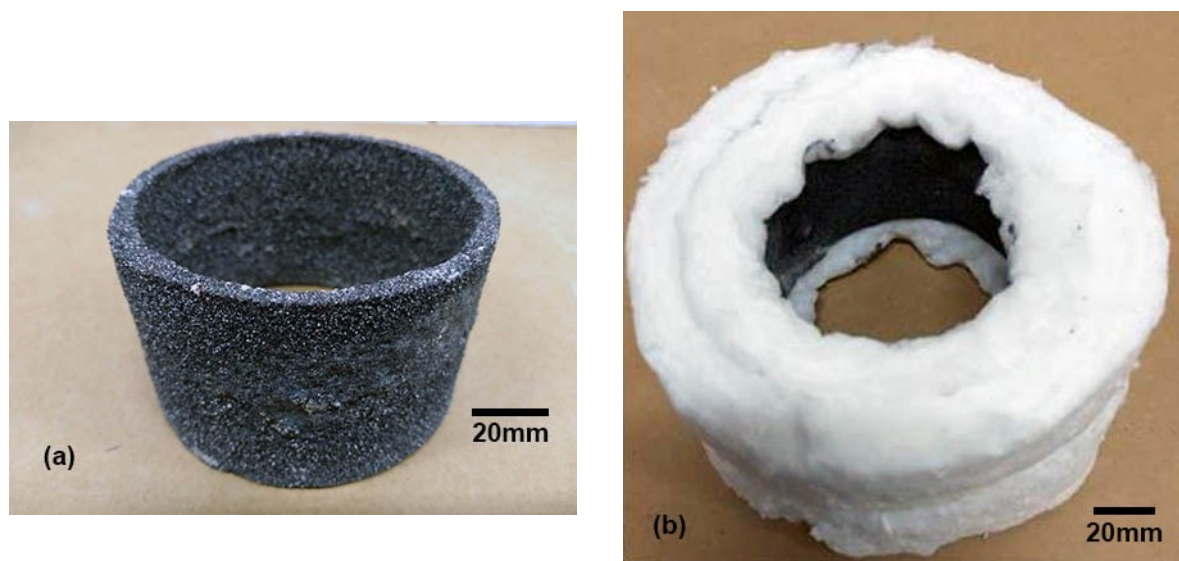


Uma balança digital com precisão 0,1g foi utilizada para a preparação das cargas metálicas de 50 e 100 gramas, com tolerância de $\pm 1\%$. Considera-se que a pureza dos metais usados neste experimento seja superior a 95% em massa.

A preparação da mufla para o aquecimento híbrido envolveu a produção de um anel suscepter 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 250 μ m 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. A Figura 2 mostra o anel suscepter e o isolamento com manta cerâmica que foram usados para a mufla de aquecimento híbrido.

Figura 2. Anel suscepter de SiC em (a) e isolamento térmico com manta cerâmica isolante para a mufla de aquecimento em (b).



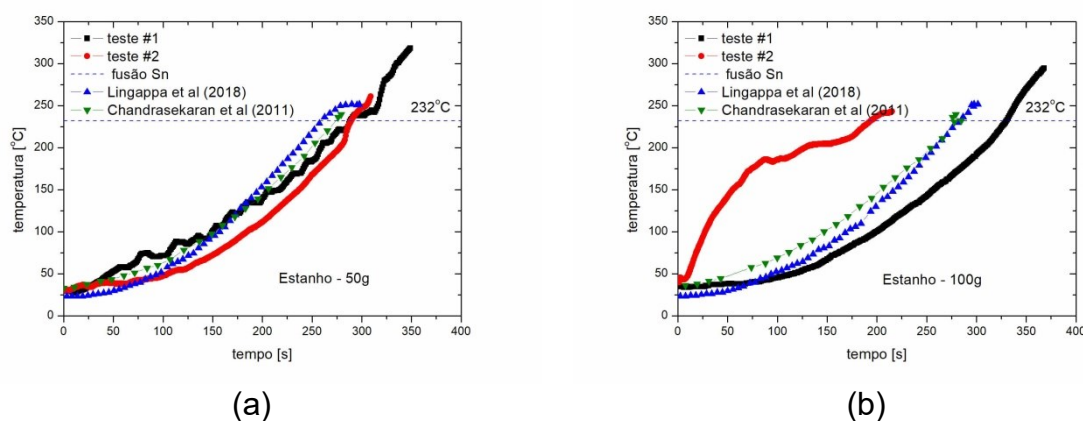
O cadinho com a carga metálica foi posicionado na mufla e colocados no interior da cavidade do forno de micro-ondas doméstico, operando com tensão 127 volts, frequência 2,45GHz e potência nominal 1050W. Um termopar cromel-alumel (tipo K), isolado com bainha metálica de aço inoxidável de 1,5mm de diâmetro, foi conectado a um sistema de aquisição de dados para determinação das variações de temperatura. 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 a carga metálica fundida foi vazada em lingoteira usinada em aço-carbono.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

FUSÃO DO ESTANHO (Sn)

A temperatura de fusão do estanho é 232°C. A Figura 3(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 (2011) [9], que atingiram a temperatura de fusão após aproximadamente 270 segundos, e por Lingappa et al (2018) [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 (2020) [11]. O forno de micro-ondas utilizado por Chandrasekaran et al (2011) [9] em seus experimentos dispunha de 1300W, potência aproximadamente 30% superior ao deste experimento.

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



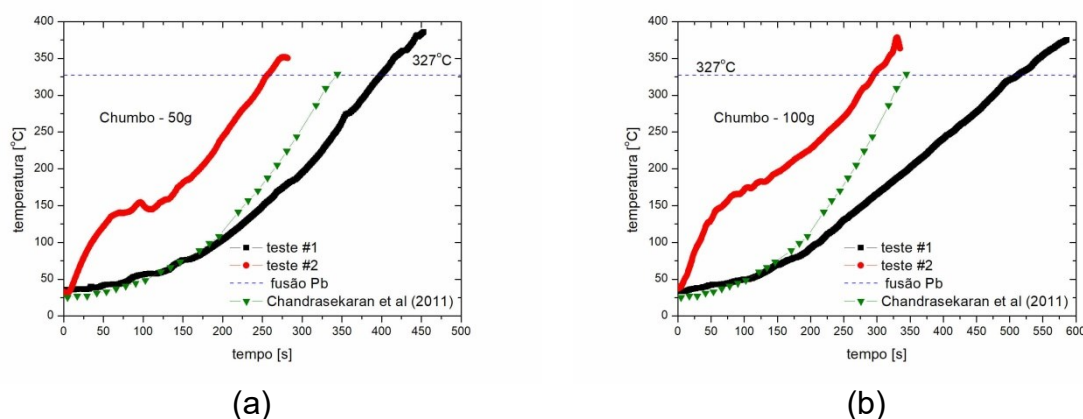
A Figura 3(b) mostra a variação de temperatura para a carga de 100 gramas de estanho, quando foram necessários 194 e 330 segundos para atingir a temperatura de fusão. Esta variação de 41% no aquecimento entre os testes foi associada à mudança no posicionamento da mufla no interior da cavidade do forno de micro-ondas. No aspecto comparativo nota-se que o mais lento teve

comportamento similar ao observado por Chandrasekaran et al (2011) [9], que atingiu a temperatura de fusão após aproximadamente 285 segundos, e por Lingappa et al (2018) [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.

FUSÃO DO CHUMBO (Pb)

A temperatura de fusão do estanho é 327°C. A Figura 4(a) ilustra a variação de temperatura durante a fusão de 50g do metal. Nos testes foram necessários 257 e 400 segundos para se atingir a temperatura de fusão. 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 4. Variação de temperatura para a fusão de estanho no micro-ondas. Carga de 50g em (a) e 100g em (b).



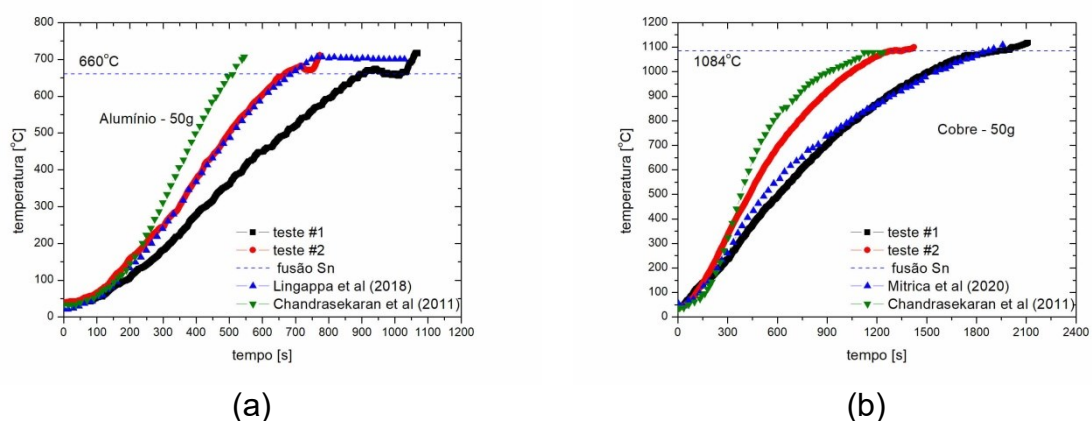
A Figura 4(b) indica a variação de temperatura para a fusão das cargas com 100 gramas de chumbo. Nos testes desenvolvidos foram necessários 295 e 513

segundos para atingir a temperatura de fusão. Novamente notou-se o efeito do posicionamento da mufla dentro do micro-ondas. Chandrasekaran et al (2011) [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 (2011) [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.

FUSÃO DO ALUMÍNIO (Al)

Devido à baixa densidade do alumínio (2,7 g/cm³) e a capacidade do cadinho de grafite somente foram realizados apenas com a carga de 50 gramas. A temperatura de fusão do alumínio é 660°C. A Figura 5(a) ilustra a variação de temperatura durante o aquecimento das cargas. Nos testes foram necessários 670 e 900 segundos para atingir a temperatura de fusão. No aspecto comparativo nota-se boa similaridade com os resultados obtidos por Lingappa et al (2018) [10] que atingiu esta temperatura após cerca de 690 segundos. Chandrasekaran et al (2011) [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.

Figura 5. Variação de temperatura para a fusão no micro-ondas. Carga: 50g. Alumínio em (a) e cobre em (b).



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 5(b) ilustra a variação de temperatura da carga metálica, onde foram necessários 1350 e 1925 segundos para atingir a temperatura de fusão. No aspecto comparativo nota-se muito boa similaridade com os resultados obtidos por Mitrică et al (2020) [12] que atingiu esta temperatura após cerca de 1840 segundos. Chandrasekaran et al (2011) [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.

FUSÃO DOS METAIS NO MICRO-ONDAS

A Figura 6 mostra exemplares dos lingotes obtidos após a fusão das cargas metálicas de 50 gramas. Considerando que não foi utilizada proteção gasosa ou aplicação de fluxos nota-se o típico acabamento metálico brilhante nas peças solidificadas, um indicativo que a oxidação não foi intensa durante o processamento. Isto pode estar também associado ao fato que o vazamento na lingoteira tenha se iniciado logo após a fusão e em temperaturas de superaquecimento não elevadas.

As curvas de aquecimento para a fusão das cargas de 50 gramas podem ser observadas na Figura 7(a). A variação de temperatura na fase inicial do aquecimento híbrido por micro-ondas, Figura 7(b), teve um ótimo ajuste ao modelo de crescimento exponencial (exponential growth), com as temperaturas $T(t)$ dos metais podendo ser expressas em °C pela equação (A)

$$T(t) = T_0 + A \cdot e^{kt} \quad (A)$$

Onde T_0 é uma constante inicial, A é a amplitude, k é a taxa de crescimento e t é o tempo. A Tabela 2 apresenta os parâmetros experimentais do crescimento exponencial da temperatura da eq.(1), bem como os respectivos coeficientes de determinação R^2 .

Figura 6. Lingotes produzidos após a solidificação das cargas metálicas (50g) fundidas com aquecimento híbrido. (a) Estanho; (b) Chumbo; (c) Alumínio; (d) Cobre

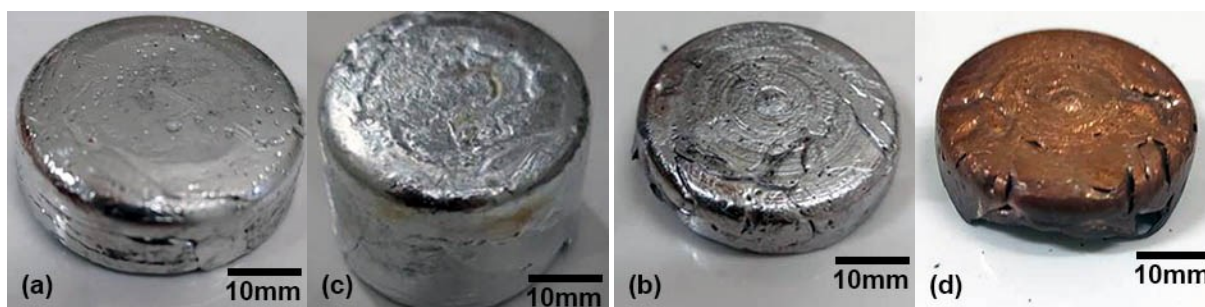


Figura 7. Aquecimento híbrido para fusão das amostras metálicas (50g) em (a) e detalhe do estágio inicial do processamento térmico em (b).

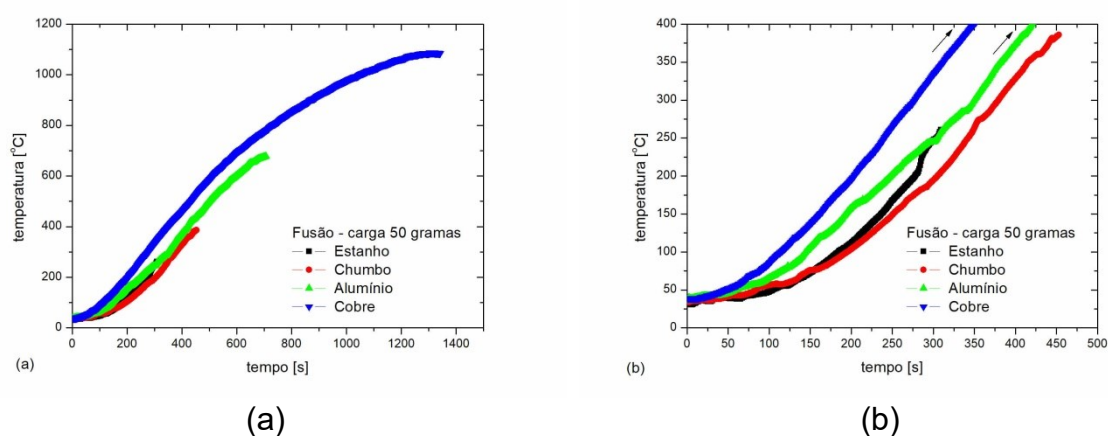


Tabela 2. Parâmetros do crescimento exponencial da temperatura, eq. (A), e os respectivos coeficientes de determinação R^2 durante o aquecimento híbrido.

metal	T_0	A	k	R^2
Sn	9,846	17,856	0,008626	0,9974
Pb	-51,308	71,428	0,004124	0,9951
Al	-173,74	193,257	0,002595	0,9969
Cu	-574,27	581,410	0,001443	0,9957

Apesar da massa ser idêntica entre os ensaios mostrados na Figura 8(b) verificou-se que a variação de temperatura foi peculiar para cada metal. A derivada da equação (A) corresponde à taxa de aquecimento $\dot{T}(t)$, expressa em $^{\circ}\text{C/s}$ pela equação (B).

$$\dot{T}(t) = A \cdot k \cdot e^{kt} \quad (\text{B})$$

O produto $A \cdot k$ da eq.(B) indica a taxa de aquecimento mínima para o aquecimento híbrido, de forma que este parâmetro incrementa com a temperatura de fusão. Assim, determinou-se que a taxa de aquecimento mínima T_{min}' do estanho,

chumbo, alumínio e cobre foram, respectivamente, 0,16; 0,30; 0,50 e 0,84°C/s, conforme mostra a Tabela 3 onde também estão indicadas as taxas de aquecimento máxima $T_{max}^{\cdot}$ e média $T_{med}^{\cdot}$.

Tabela 3. Taxas de aquecimento determinadas durante aquecimento híbrido em forno de micro-ondas.

metal	$T_{min}^{\cdot}$	$T_{max}^{\cdot}$	$T_{med}^{\cdot}$	$T_{med}^{\cdot} (*)$
Sn	0,16	2,10	1,10	66
Pb	0,30	1,90	1,10	66
Al	0,50	1,60	1,05	63
Cu	0,84	1,4	1,12	67

Obs.: $T_{min}^{\cdot}$; $T_{max}^{\cdot}$; $T_{med}^{\cdot}$ em °C/s. $T_{med}^{\cdot} (*)$ em °C/min.

A Tabela 3 indica boa uniformidade da taxa de aquecimento média $T_{med}^{\cdot}$ durante o aquecimento híbrido, que pode ser associada a aplicação do mesmo conjunto mufla-cadinho aquecendo a mesma massa de diferentes metais. 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°C/min (1,03°C/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]. Chandrasekaran e outros [9] determinaram uma taxa de aquecimento média de 42°C/min (0,7°C/s) para a fusão de estanho em forno de micro-ondas com potência de 1300 watts. Lingappa et al (2017) precisaram de 300 segundos para fundir cargas de até 150 gramas de estanho, resultando em taxa de aquecimento média de 50°C/min (0,83°C/s) [10].

Na fusão do chumbo Chandrasekaran e colegas [9] reportaram uma taxa de aquecimento média de 51°C/min (0,85°C/s). Para o processamento do alumínio por aquecimento híbrido com micro-ondas Lingappa e colaboradores precisaram de 800s para fundir cargas de até 150g, resultando em uma taxa de aquecimento média de 50°C/min (0,83°C/s) [10]. Mitrică e outros [12] reportaram a fusão de retalhos de alumínio em forno de micro-ondas, atingindo temperatura de 677°C em 41 minutos, resultando numa taxa de aquecimento média de 16,5°C/min (0,275°C/s). 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).

Amostras com 25g de cobre foram fundidas por aquecimento híbrido em forno de micro-ondas por Chandrasekaran e colaboradores [9], que determinaram uma taxa de aquecimento média de 84°C/min. Sucata de cobre foi fundida com aquecimento híbrido com uma taxa média de 26,3°C/min [12]. Xu e colegas [15] determinaram uma taxa de aquecimento de 25,6°C/min na fusão de cobre em pó, utilizando forno de micro-ondas com 1,3kW de potência. As taxas médias de aquecimento obtidas com o micro-ondas são, comparativamente, superiores às determinadas pelo processo de aquecimento com fornos elétricos convencionais [13].

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo permitiram obter as seguintes 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 teve um crescimento exponencial (*exponential growth*).
- O aquecimento híbrido é fortemente influenciado pelo posicionamento da carga no interior da cavidade do forno de micro-ondas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e a 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. A review on the susceptor assisted microwave processing of materials. Energy, v. 97, pp. 306-338, 2016.
- [3] A. Amini, M. Latifi, J. Chaouki. Electrification of materials processing via microwave irradiation- A review of mechanism and applications. Applied Thermal Engineering, v. 193, e. 117003, 2021.
- [4] B. Yahaya, S. Izman, M. Konneh, N. Redzuan. Microwave Hybrid Heating of Materials Using Susceptors- A brief review. Advanced Materials 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=rAlyLWEKt8U>

- [7] F.R. van de Voort, M. Laureano, J.P. Smith, G.S.V. Raghavan. A Practical Thermocouple for Temperature Measurement in Microwave Ovens. 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. Feed-back Temperature Control System for Microwave Ovens Using a Shielded Thermocouple. Journal of Food Science, v. 56, No. 2, pp. 550-552, 1991.
- [9] S. Chandrasekaran, Tanmay Basak, S. Ramanathan. Experimental and theoretical investigation on microwave melting of metals. Journal of Materials Processing Technology, v. 211, pp. 482–487, 2011.
- [10] S.M. Lingappa, M.S. Srinath, H.J. Amarendra. Melting of bulk non-ferrous metallic materials by microwave hybrid heating (MHH) and conventional heating. J. 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. Mapeamento da Energia Irradiada na Cavidade de um Forno de Micro-ondas Adaptado para o Processamento de Materiais Metálicos. 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. Modelling of the energy transfer during scrap melting in microwave furnace. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, v. 916, e. 012068, 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/916/1/012068>
- [13] L. Xu et al. Application of Microwave Melting for the Recovery of Tin Powder. Engineering, v. 3, pp. 423–427, 2017.
- [14] R.R. Mishra, A.K. Sharma. On mechanism of in-situ microwave casting of aluminium alloy 7039 and cast microstructure. Materials and Design, v. 112, pp. 97–106, 2016.
- [15] L. Xu et al. Study on characteristics of microwave melting of copper powder. Journal of Alloys and Compounds, v. 701, pp. 236-243, 2017.

MELTING OF TIN, LEAD, ALUMINUM AND COPPER USING A 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.

Key-words: melting, non-ferrous metals, microwave hybrid heating, susceptor.