

# Método Computacional para Cálculo de Parâmetros Térmicos e Microestruturais de uma Liga Al-Mg-Ni

Milena P. A. Oliveira<sup>1</sup>, Denilson P. S. Santos<sup>2</sup>, Crystopher C. C. Brito<sup>3</sup>  
FESJ/UNESP. São João da Boa Vista - SP

Nas últimas décadas as ligas de alumínio têm sido um dos principais materiais de componentes estruturais de aeronaves, com suas características consolidadas em desempenho, métodos de projeto, fabricação e técnicas de inspeção que as tornaram confiáveis. Ao analisar um processo de fabricação, a microestrutura final depende fundamentalmente dos parâmetros de processo utilizados. Correlacionar parâmetros microestruturais com as propriedades finais de aplicação é imprescindível para a pré-programação metalúrgica de um componente metálico. O trabalho objetiva o uso de métodos computacionais para otimizar e reduzir o tempo operacional utilizado para a obtenção dos parâmetros térmicos e microestruturais sem comprometer a precisão do experimento. Os parâmetros térmicos de solidificação, e sua correlação com os parâmetros microestruturais foram calculados empregando a linguagem Python para cálculo dos valores e obtenção das regressões lineares parametrizadas pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ). O código reduziu o tempo de cálculo desses parâmetros em até 90%, mostrando-se operacional. O modelo foi aferido usando valores experimentais de ligas de alumínio solidificadas em regime transiente de extração de calor.

**Determinação dos parâmetros térmicos de solidificação:** O tempo de passagem da isoterma **liquidus** ( $t_L$ ) por cada posição dos termopares inseridos nos lingotes, velocidade de deslocamento da isoterma **liquidus** ( $V_L$ ) e taxa de resfriamento ( $\dot{T}$ ) são obtidos a partir de análises das curvas de resfriamento obtidas durante os experimentos [1, 2].

**Tempo de passagem da isoterma liquidus** ( $t_L$ ): Os resultados dos pares ordenados, posição do termopar em relação à base refrigerada do lingote e tempo ( $P, t$ ), obtidos a partir do procedimento experimental permitem, que sejam traçados gráficos experimentais da posição da isoterma **liquidus** com o tempo. Esses tempos são obtidos a partir da intersecção de uma horizontal indicativa de cada temperatura **liquidus** ( $T_L$ ) com as curvas de resfriamento para cada posição dos termopares ( $P$ ), ou seja, a partir da  $T_L$  da liga analisada traça-se uma reta paralela ao eixo dos tempos. Através das intersecções dessa reta com as respectivas curvas de resfriamento, em cada uma das seis posições, obtêm-se os tempos correspondentes. Esses tempos definem-se como sendo os tempos de passagem da isoterma **liquidus** em cada posição monitorada pelo termopar. Os resultados dos pares ordenados obtidos são interpretados pelo software que, para cada coluna de dados de um termopar, reconhece o tempo em que a temperatura **liquidus** foi atingida durante a solidificação e cria um novo arquivo de dados de tempo e posição ( $t$ , posição). A obtenção das coordenadas permite que seja traçado o gráfico experimental para a posição da isoterma **liquidus** em função do tempo durante o processo de solidificação. Para gerar uma curva que represente o deslocamento desta isoterma em todo o lingote solidificado, os dados são ajustados matematicamente pelo programa computacional através do método dos mínimos quadrados, gerando uma função  $P(t) = at^b$ .

**Velocidade de Deslocamento da Isoterma liquidus** ( $V_L$ ): As velocidades experimentais de

<sup>1</sup>milena.poletto.aero@gmail.com

<sup>2</sup>denilson.santos@unesp.br

<sup>3</sup>crystopher.brito@unesp.br

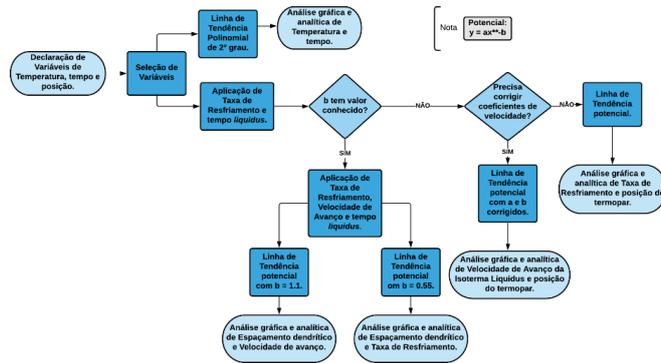


Figura 1: Código para o cálculo de parâmetros térmicos e microestruturais.

deslocamento da isoterma **liquidus** ( $V_L$ ), para todas as ligas, são determinadas pela derivada da função experimental  $P(t)$  ajustada anteriormente pelo programa, isto é,  $V_L = \frac{dP}{dt}$ . A derivada da função  $P$  é aplicada em cada instante de tempo de passagem da isoterma **liquidus** correspondente a cada termopar, gerando outro arquivo de dados em bloco de notas com as derivadas pontuais tabeladas com seus respectivos tempos (tempo,  $P'(t)$ ).

**Taxa de resfriamento ( $\dot{T}$ ):** As taxas de resfriamento,  $\dot{T} = \frac{dT}{dt}$ , à frente da isoterma **liquidus** são calculadas através da derivada de uma pequena curva suave ajustada na região próxima ao instante de tempo onde o perfil térmico atinge a temperatura **liquidus**. Para cada perfil de resfriamento foi ajustada uma curva polinomial de segunda ordem através do ajuste de um pequeno intervalo de pontos experimentais imediatamente anteriores e posteriores ao tempo experimental de passagem da isoterma, de forma que seja obtida uma curva suave. Como a derivada dessa curva proposta pelo programa computacional é sensível na região de inclinação do gráfico onde ocorre o início da transformação líquido/sólido, calculando através do procedimento do ajuste de uma região de pontos como apresentado evita-se o erro de se utilizar um tempo que não corresponda ao tempo de passagem da isoterma **liquidus**.

**Código computacional:** implementou-se um código computacional com o intuito o cálculo de parâmetros térmicos e microestruturais. Este código foi implementado de forma a diminuir o tempo manual de cálculos e otimizá-lo. A Figura 1 descreve a metodologia seguida para a modelagem em que apenas os valores experimentais de posição dos canais de termopares, temperatura e tempo, a temperatura **liquidus** das ligas, os perímetros obtidos pelo método do triângulo e suas respectivas posições de análise foram necessários [2]. Os valores dos coeficientes de linha de tendência e a determinação ( $R^2$ ) dos métodos distintos foram comparados para a validação computacional.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq (Bolsa #407871/2018 – 7).

## Referências

- [1] Crystopher Brito et al. “Cellular/dendritic arrays and intermetallic phases affecting corrosion and mechanical resistances of an Al–Mg–Si alloy”. Em: **Journal of Alloys and Compounds** 673 (2016), pp. 220–230. ISSN: 0925-8388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.02.161>.
- [2] A. Garcia. **Fundamentos e Aplicações**. Vol. 2<sup>o</sup>. Unicamp, 2007.