

DETERMINAÇÃO DO REFINO DE GRÃO UTILIZANDO A TERMO-ANÁLISE

Autores : Tarcila Pedrozo BENEMANN, Mario WOLFART Junior, Diego Rodolfo Simões de LIMA

Identificação autores: Bolsista PIBIC-Af/CNPq; Orientador IFC-Campus Luzerna; Pesquisador IFC-Campus Luzerna

Introdução

A técnica de refino de grão consiste na adição de um inoculante, comumente pertencente ao sistema ternário Al-Ti-B e utilizado na forma de ligas mãe. Ao ser adicionado ao metal líquido, através da nucleação heterogênea obtêm-se pequenos cristais responsáveis por melhorar as características do metal através da predominância da zona equiaxial – zona que apresenta pequenos grãos (SILVA, 2012).

Para avaliar o material após passar pelo processo de refino de grão os métodos mais usuais são: análise metalográfica e análise térmica, sendo que a análise metalográfica requer a preparação de amostras e um profissional especializado na área de análise de materiais.

Já a análise térmica é feita através da observação da curva de resfriamento da liga fundida obtida por meio de um sistema basicamente composto por termopar tipo k e um *software* que salva os dados de tempo e temperatura. Segundo Haq, Shin e Lee (2004) através da análise da curva de resfriamento pode-se: determinar a quantidade das fases formadas, as temperaturas nas quais as fases são formadas, e especificamente para ligas Al-Si realizar o monitoramento da qualidade do metal fundido em termos de modificação do silício eutético, do refino de grão e inoculação.

Com o auxílio de métodos numéricos pode-se obter a equação que descreve a curva e conseqüentemente suas derivadas, ferramentas importantes que ajudam a validar ou não o refino de grão, através da acentuação de algumas regiões que representam eventos significativos no decorrer da solidificação (SILVA, 2012).

Conforme pode ser observado na Figura 1, a derivada da curva de resfriamento evidencia picos e mudanças de concavidades, tornando maiores os pequenos eventos térmicos que encontram-se numerados sob a curva.

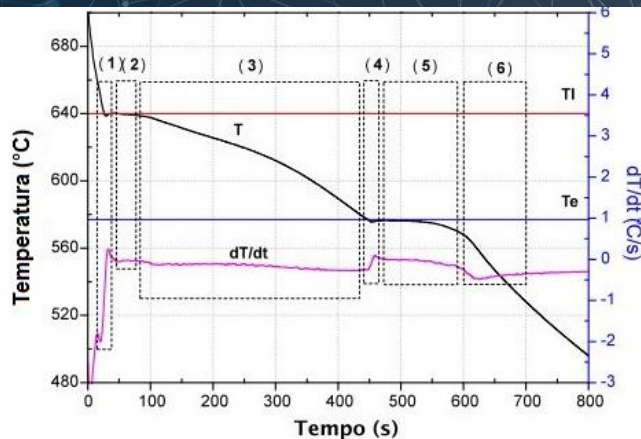


Figura 1: Curva de resfriamento típica de um sistema Al-Si e sua respectiva derivada (ARANGO; MARTORANO, 2009)

Segundo Arango e Martorano (2009), cada região numerada representa um determinado fenômeno: (1) nucleação e livre crescimento dos grãos de alumínio, (2) desenvolvimento e crescimento da rede dendrítica da parede em direção ao centro, (3) espessamento das dendritas de alumínio, (4) nucleação do silício indicando o início da solidificação do eutético, (5) continuação do crescimento do silício e também do alumínio contido no eutético e (6) término da solidificação.

Ao adicionar o inoculante dois parâmetros tendem a ser alterados na curva de resfriamento estimando o tamanho de grão: a diferença entre as temperaturas mínima e máxima durante a recalescência e o período que separa essas temperaturas (ARANGO; MARTORANO, 2009). Conseqüentemente, a derivada da curva tende a diminuir seu pico (correspondente a região 1 da Figura 1), conforme ilustra a Figura 2.

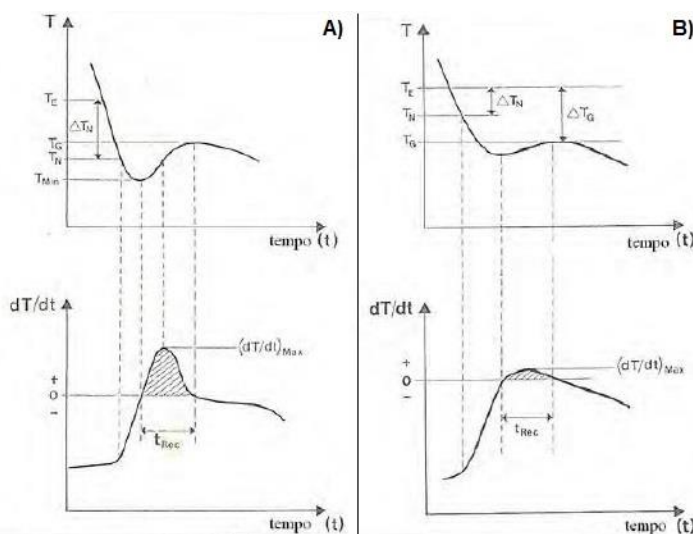


Figura 2: A) Início da curva de resfriamento e sua derivada para um metal fundido e B) Início da curva de resfriamento e sua derivada para um metal fundido com adição de refinador de grão (Adaptado de SILVA (2012))

Material e Métodos

Aquisição dos dados

Como a termo-análise depende dos dados obtidos da curva de resfriamento da liga foi imprescindível a utilização de um pequeno sistema de aquisição de dados incluindo sensor de temperatura, módulo amplificador de sinal, placa microcontrolada e uma interface.

O sensor de temperatura (termopar tipo K) envia sinal de tensão em milivolts que não é lido pela placa microcontrolada (Arduino Mega 2560) sem que haja uma amplificação do sinal realizado por um módulo de expansão (nanoshield) dedicado a esta função. Conforme ilustra a Figura 3.

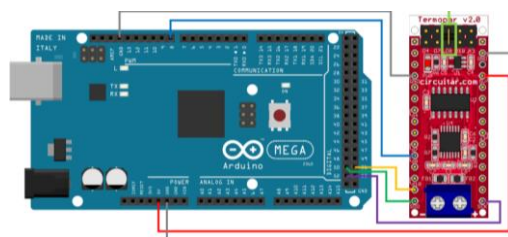


Figura 3: Ligação do nanoshield ao Arduino (Circuitar, 2016)

A placa microcontrolada comunica-se com o computador por meio de um cabo USB e a interface realiza a interação com o usuário. Esta interface foi desenvolvida para esta aplicação em linguagem de programação Java, utilizando como plataforma de desenvolvimento NetBeans IDE.

Ensaio para obter a curva de resfriamento

A liga utilizada foi a ASTM A269, adquirida na forma de lingotes por meio da doação da empresa SUMESA. Para cada refusão, uma porção de em média 300 g da liga foi transferida para um cadinho de grafite e este introduzido no forno para que fosse aquecido até a temperatura de 850°C a fim de que ocorresse a fusão completa do material.

Posteriormente, a liga foi vazada em um cadinho pré aquecido, onde um termopar tipo k encontrava-se posicionado no centro do molde e por meio do sistema de aquisição fornecia os dados de temperatura à interface.

Análise numérica

Apesar do método de Newton-Raphson oferecer maior velocidade de processamento e maior precisão em seus resultados, os polinômios de Lagrange constituem um modo de interpolar sem a necessidade de resolver um sistema de equações lineares (GUIMARÃES; NASCIMENTO, 2016), simplificando a programação.

O método de interpolação de Lagrange, é descrito por: sendo f uma função tabelada em $(n + 1)$ pontos distintos x_0, x_1, \dots, x_n e sendo $L_i(x)$ polinômios de Lagrange de grau n , onde L_i é dado por $L_i(x) = \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j}$ (BARROSO, 1987).

$$L_i(x) = \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j} \quad (1)$$

De tal forma que:

$$L_i(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } i = k \\ 0, & \text{se } i \neq k \end{cases}$$

Resultados e discussão

Após o desenvolvimento do sistema de aquisição de dados, a análise numérica precisava ser inserida no processo. A fim de avaliar o método numérico de interpolação de Lagrange, este foi testado com o auxílio de uma planilha eletrônica.

A interpolação foi realizada para um polinômio de quarta ordem, ou seja, o baixo grau do polinômio não representa a melhor aproximação da curva, porém como pode ser observado na Figura 4, este método numérico pode ser eficaz aumentando o número de interpolações e consequentemente a ordem.

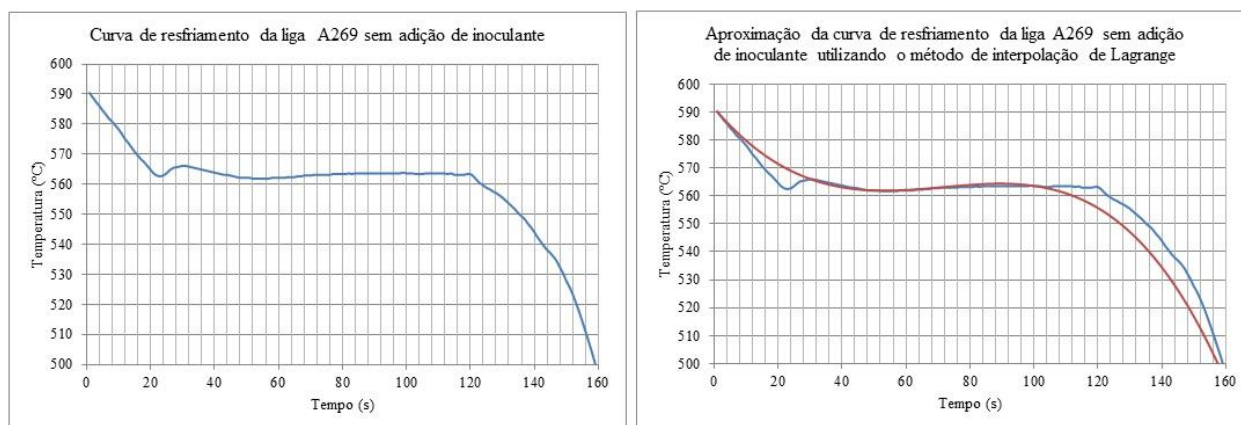


Figura 4: Comparação da curva de resfriamento da liga A269 sem adição de inoculante com sua aproximação utilizando o método de interpolação de Lagrange (Elaborada pela autora)

Confirmando a possibilidade de realizar a interpolação pelo método de Lagrange os esforços foram voltados a integralizar o método numérico a interface que já cumpria com os principais requisitos de aquisição de dados, sendo encontrados alguns pacotes direcionados à área matemática e alguns exemplos de interpolação de Lagrange em linguagem de programação Java, porém até a presente data estava sendo avaliada a melhor forma de realizar

a ação de coletar os dados e tratá-los matematicamente de forma totalmente independente do operador.

Conclusão

- A termo-análise ou análise térmica pode ser aplicada na determinação do refino de grão;
- O sistema de aquisição de dados e interface executam ações de coleta e exibição da curva de resfriamento;
- O método de interpolação de Lagrange pode ser aplicado para a realização da aproximação da curva;
- O método de interpolação de Newton-Raphson deve ser futuramente analisado;
- Trabalhos futuros requerem a criação de um banco de dados permitindo a geração de relatórios;
- Outra forma de avaliação do refino de grão que calcula a evolução da fração de sólido com o tempo deve ser analisada futuramente.

Referências

ARANGO, Juan Marcelo Rojas; MARTORANO, Marcelo Aquino. **Estudo do refino de grão de ligas Al-Si através de inoculantes do sistema Al-Ti-B**. In: CONGRESSO DE FUNDIÇÃO (CONAF), 14., 2009, São Paulo. Disponível em: <<http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/Publicacoes/CONAF 2009 - Refino.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2015.

CIRCUITAR (Brasil). **Termopar**. Disponível em: <<https://www.circuitar.com.br/nanoshields/modulos/termopar/>>. Acesso em: 21 jul. 2016.

BARROSO, Lêonidas C., et. all. **Cálculo Numérico: Com aplicações**. 2 ed.. São Paulo: Harbra LTDA, 1987.

GUIMARÃES, Bianca Costa; NASCIMENTO, Luiz Thomaz de. **Análise de Complexidade de Métodos Numéricos para Interpolação**. Disponível em: <<http://homepages.dcc.ufmg.br/~nivio/cursos/pa02/seminarios/seminario6/seminario6.html>>. Acesso em: 30 ago. 2016.

HAQ, I.; SHIN, J.-S.; LEE, Z. -H. **Computer-aided cooling curve analysis of A356 aluminum alloy**. Metals and Materials International. v. 10, n. 1, p. 89-96, 2004.

SILVA, C. C. **Utilização da curva de resfriamento na análise do refino de grão da liga AA 356**. 2012. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.