

OBTENÇÃO DAS TEMPERATURAS DE INÍCIO E FIM DE SOLIDIFICAÇÃO DE LIGAS CHUMBO-ESTANHO

Henrique Naim Finianos Feliciano¹, Júlio César Dutra²

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Universitário FEI

² Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Universitário FEI

henrique.naim@gmail.com, jdutra@fei.edu.br

Resumo: O trabalho consiste na determinação de temperaturas de início e fim de solidificação (*liquidus* e *solidus*) de sete ligas de composição variada contendo apenas chumbo e estanho, com resfriamento à temperatura ambiente ou dentro do forno. Destas, duas são hipoeutéticas, uma é de composição eutética, duas são hipereutéticas, uma possui chumbo não solúvel em estanho e outra possui estanho não solúvel em chumbo. Foi feito o estudo da viabilidade dos experimentos para demonstração em laboratório e concluiu-se que o resfriamento rápido oferece maior propósito didático.

1. Introdução

Ligas metálicas binárias que possuem diagramas de fase com ponto eutético (isto é, tendo uma devida composição que só possui uma temperatura de fusão) são comumente usadas na indústria e, justamente por possuírem compreensão razoavelmente simples, são usualmente utilizadas como exemplos em aulas experimentais para demonstração dos efeitos de solidificação. Além disto, é conhecido que a velocidade de resfriamento influi nas temperaturas de início e fim de solidificação, devido ao efeito da segregação. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi analisar a solidificação de sete ligas chumbo-estanho em duas diferentes velocidades de resfriamento e investigar o seu efeito para fins didáticos.

2. Metodologia

Para a determinação da curva de resfriamento experimental, foi empregado o método de Wakil [1], que envolve uma pequena amostra da liga experimentalizada com a inserção de um termopar na mistura em fase líquida. Desta forma, puderam ser levantadas todas as curvas experimentais desejadas.

Para a obtenção de tais curvas com resfriamento à temperatura ambiente, foi empregado um copo para análise térmica que possui um termopar do tipo K, ilustrado na Figura 1. Deste, saem dois terminais que, conectado a um conector de Chromel-Alumel, com a compensação desejada para tal instrumento, são finalmente ligados a um computador que, por sua vez, realiza a aquisição de dados em função do tempo.



Figura 1 – Copo utilizado para análise térmica em alta velocidade de solidificação.

Para os experimentos com baixa velocidade de resfriamento, foi utilizado um cadinho de alumina com a amostra examinada. Como este recipiente não possui um termopar próprio como o anterior, foi utilizado um termopar tipo K com 0,5m de comprimento, como ilustra a Figura 2.



Figura 2 – Montagem utilizada para os experimentos com baixa velocidade de resfriamento.

Os termopares utilizados foram calibrados conforme o sensor de temperatura Pt-100, que possui resistência elétrica sensível à temperatura. Desta forma, com o auxílio de um forno de alto controle e um multímetro, foi levantada a curva de calibração dos termopares.

A massa das amostras foi dimensionada para um volume de 20cm³ de forma a otimizar o consumo de material e seu descarte.

As curvas foram analisadas por diversos métodos: o mais primitivo destes era o da derivada dos próprios pontos experimentais. Porém, este nem sempre se provou o melhor, já que o aparato experimental possuía oscilação em variações muito pequenas de temperatura, principalmente com velocidades mais baixas de resfriamento. O segundo foi o ajuste da curva derivada através de uma função polinomial, útil em certos casos. O terceiro método foi o de ajuste da curva experimental por uma função polinomial por meio do MatLab®. Tendo a expressão do polinômio que representa a curva, esta pode ser derivada facilmente e plotada. Assim, segundo Wakil [1], as temperaturas de início e fim de solidificação correspondem aos pontos de mudança de concavidade das curvas de resfriamento. Desta forma, segundo Apostol [2], a mudança de concavidade em uma função corresponde ao valor onde sua segunda derivada se anula e ainda, um ponto de máximo em uma função coincide com o ponto em que sua primeira derivada é nula. Portanto, pode-se concluir que o ponto de mudança de concavidade de uma função corresponde ao ponto onde sua primeira derivada tem valor máximo.

Segundo esta lógica, foram plotadas as primeiras derivadas de todas as curvas de resfriamento estudadas.

As curvas experimentais foram comparadas com outras obtidas através de métodos numéricos que utilizam a equação de Scheil, levantadas através do software Thermocalc®, utilizando a base de dados SSOL6: Alloy Solutions Database v6.0.

3. Resultados

A Tabela I mostra as temperaturas de início e fim de solidificação de todas as ligas submetidas às diferentes taxas de resfriamento, bem como dados obtidos através do software Thermocalc® por meio de simulações de solidificação utilizando a equação de Scheil e a base de dados SSOL6: Alloy Solutions Database v6.0.

Tabela I: Temperaturas de início e fim de solidificação das sete ligas estudadas.

Liga	10 % Sn		30% Sn		50% Sn		61,9% Sn	70% Sn		80% Sn		99% Sn	
Temperatura	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim	Eutético	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim
RL	304 °C	-	-	-	221 °C	185 °C	-	-	-	200 °C	185 °C	232 °C	221 °C
RR	300 °C	-	261 °C	183 °C	211 °C*	182 °C	181 °C	186 °C	182 °C	200 °C	181 °C	231 °C	223 °C
Scheil	297 °C	183 °C	251 °C	183 °C	212 °C	183 °C	183 °C	192 °C	183 °C	204 °C	183 °C	231 °C	183 °C

Dois das curvas levantadas são mostradas nas Figuras 3 e 4. Trata-se da liga Pb-50% Sn, cuja curva de resfriamento está apresentada em cor preta e cuja temperatura pode ser lida no eixo vertical da esquerda (em °C). Em vermelho mostra-se sua primeira derivada, cujo valor (em °C s⁻¹) pode ser lido no eixo vertical da direita. As mudanças de concavidade são nítidas no resfriamento rápido e muito mais sutis no resfriamento lento. No primeiro caso, a análise pode ser feita até mesmo pela própria curva original. Nota-se que o super-resfriamento mostrado pela região 2 na Figura 3 é decorrente do final da solidificação, onde a queda de temperatura, inferior a final de solidificação, foi decorrente das condições experimentais (alta taxa de variação de temperatura em função do tempo). O mesmo fenômeno é mostrado por Pelton [3] e Backerud [4]. Além disto, o patamar eutético também é facilmente observável, em ambas as curvas.

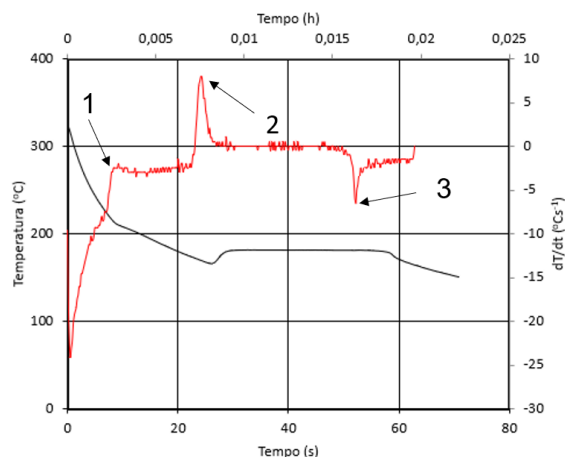


Figura 3 – Curva de resfriamento da liga Pb-50% Sn resfriada rapidamente e sua primeira derivada.

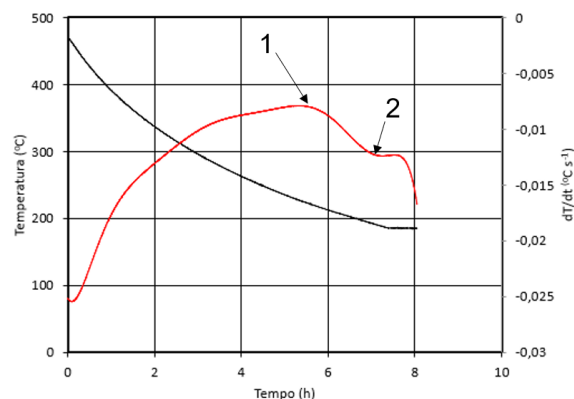


Figura 4 – Curva de resfriamento da liga Pb-50% Sn resfriada lentamente e sua primeira derivada.

4. Conclusões

Através da Tabela I e das Figuras 3 e 4, é possível concluir que experimentos com alta velocidade de resfriamento possuem propósito didático superior aos com baixa velocidade de resfriamento. Primeiramente, o primeiro possui duração de aproximadamente setenta segundos no caso da liga estudada e o segundo possui duração de oito horas ou mais, dependendo da liga. Além disto, nota-se até mesmo que o experimento com resfriamento rápido obteve resultados mais próximos das simulações realizadas no Thermocalc®. Outro ponto muito importante é o do aspecto visual das curvas: é muito impactante observar a aquisição dos dados em tempo real, o que não é possível com maior tempo total de experimento. Além disto, há também uma certa carga de métodos para levantamento de curvas experimentais que é interessante para o aluno, especialmente pelo uso aplicado do Microsoft Excel® ou do MatLab®.

5. Referências

- [1] WAKIL, Sherif D El. Materials Science and Engineering Lab Manual. 4. ed. Massachusetts: PWS Publishing Company, 1993. 78 p.
- [2] APOSTOL, Tom M. Cálculo I: Cálculo com funções de uma variável, com introdução à Álgebra Linear. 2. ed. Rio de Janeiro: Editorial Revertè, 1994. 771 p.
- [3] PELTON, Arthur D. Physical Metallurgy. 4. ed. Amsterdam, Lausanne, New York, Oxford, Shannon, Tokyo: North-Holland, 1996. 3010 p. 3 v. (Physical Metallurgy).
- [4] BACKERUD, Lennart. Solidification Characteristics of Aluminium Alloys. Stockholm: AFS, 1990. 2 v.

Agradecimentos

À instituição Heraeus Electro-Nite pela doação de copos para análise térmica.

¹ Aluno de Iniciação Didática do Centro Universitário FEI. Projeto com vigência de 05/18 a 04/19.