

ANÁLISE DA CORRESPONDÊNCIA DAS TEMPERATURAS LIQUIDUS E SOLIDUS DA LIGA Pb–50%Sn OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE COM AS DETERMINADAS PELO SOFTWARE THERMOCALC®

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.com¹, jdutra@fei.edu.br²

Resumo: O trabalho consiste na comparação do diagrama de fases da liga chumbo-estanho obtido experimentalmente por meio de métodos numéricos computadorizados com aquele obtido pelo software Thermocalc®. Para a obtenção do diagrama de fases experimental, serão solidificadas onze ligas com composição variando de chumbo puro a estanho puro a um passo de 10%. Também será examinado o efeito da velocidade de resfriamento na obtenção dessas curvas. A primeira investigação, feita com a liga Pb-50%Sn mostrou que as temperaturas *liquidus* e *solidus* diferem daquelas de equilíbrio.

1. Introdução

Diagrama de fase é um mapa que contém situações termodinâmicas nas quais há fases em equilíbrio. Ele também serve para obter as temperaturas de início e final de solidificação de ligas. Ao realizar a solidificação de uma amostra de determinada liga, é possível monitorar o seu resfriamento com um sensor de temperatura (termopar) em função do tempo, obtendo-se uma curva de resfriamento. Essa, portanto, apresenta dados da temperatura da amostra em função do tempo. Através dos pontos de inflexão desta curva, é possível identificar as temperaturas de início e final de solidificação [1].

Por ser um projeto de iniciação didática, um dos principais objetivos é fazer com que no futuro alunos compreendam melhor o conceito de fase e que seja mais eficiente o aprendizado ao observar e interpretar o diagrama de fases, comparando-o com uma curva de resfriamento obtida experimentalmente. É geralmente de fácil compreensão a diferença entre as fases líquida e sólida, mas a questão de duas fases sólidas coexistirem é, na visão do aluno, pouco explorada. Também é interessante a aproximação do aluno com equipamentos tais como o forno, microscópio e instrumentos de medida e finalmente a comparação dos resultados experimentais com aqueles propostos pelo software de simulação Thermocalc®.

2. Diagrama de Fases

Fase é uma substância fisicamente única, não necessariamente de composição química estável como por exemplo uma solução sólida [2]. Em ligas metálicas, ao apresentar fase sólida, elas possuem, em geral, maior resistência mecânica em relação aos elementos puros [3], com estrutura cristalina, diferentemente de sua fase líquida, em que boa parte de suas ligações químicas são quebradas e se desfaz a estrutura cristalina [3].

O diagrama de fases apresenta informações das fases presentes em uma mistura dependendo da temperatura e da composição da liga, como mostra a Figura 1, a seguir, obtido pelo software Thermocalc®. Ele apresenta no eixo

horizontal a fração mássica de Estanho (Sn) e no eixo vertical a temperatura absoluta da mistura. Ao analisá-lo, é possível identificar três fases distintas: uma fase rica em chumbo do lado esquerdo, denominada α , e outra fase rica em estanho do lado direito do diagrama, denominada β , além da fase líquida L, presente nas temperaturas mais elevadas, qualquer que seja a composição. As áreas com diversas isothermas (linhas horizontais), por sua vez, apresentam misturas de duas fases: no meio, na parte inferior, uma mistura das fases sólidas ricas nos dois metais puros α e β ; à esquerda, acima da linha vermelha, uma mistura da fase sólida rica em chumbo e a fase líquida da mistura α e L e finalmente à direita e acima da mesma linha, a mistura entre a fase rica em estanho e a fase líquida, β e L.

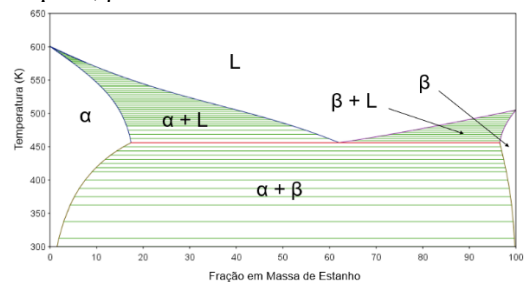


Figura 1 – Diagrama de fases da liga chumbo-estanho. Base de Dados: TC BIN: TC Binary Solutions v1.1

Também pode-se observar pela Figura 1 que a fase líquida aparece na mesma temperatura para todas as ligas que possuem mistura de fase sólida com líquida. Essa temperatura, para o binário chumbo-estanho, é de 183°C e a linha é também conhecida como patamar eutético [3], já que possui a mesma temperatura e composição do ponto eutético. Por outro lado, a curva que delimita a fase líquida é aquela que divide a parte branca superior do diagrama das isothermas, diretamente inferiores a ela e possui temperaturas diferentes para cada liga; ela é chamada curva *liquidus*. Além destas, há também a curva *solidus*, que separa as regiões com fase única (α ou β) da região com mistura sólida e líquida. Esta é denominada curva *solidus*.

Além das curvas e das regiões de uma fase e suas misturas, pode se identificar um ponto no diagrama que apresenta as três fases em equilíbrio, α , β e L, o ponto eutético do diagrama. Para a liga chumbo-estanho, ele só é obtido na composição de 61,9% em massa de estanho e na temperatura de 183°C [4]. A regra das fases de Gibbs determina o número de fases presentes em determinadas condições termodinâmicas como a temperatura, pressão e a composição química. O número de fases P somado ao número de graus de liberdade F deve ser igual ao número de componentes somado a N (N=1 para pressão constante). Assim, vem:

$$P + F = C + N \quad (1)$$

Para uma região com apenas uma fase no diagrama de fases de um sistema binário ($C=2$), há dois graus de liberdade ($F=2$); são estes a temperatura e a composição, ou seja, há diversos valores de temperatura e composição nos quais há uma fase em equilíbrio. Para um campo de duas fases ($P=2$), no entanto, o número de graus de liberdade será igual a 1, ou seja, a composição das duas fases é dada pela temperatura em que o sistema se encontra, no equilíbrio ou, para uma dada composição, somente uma temperatura será possível para que isso ocorra. Para o ponto eutético, cujo número de fases em equilíbrio é igual a 3, $F=0$, não há grau de liberdade e, portanto, somente a uma dada temperatura e composição isso é possível [5].

3. Metodologia

Para a análise comparativa das temperaturas *liquidus* e *solidus* oriundas da curva de resfriamento com as respectivas temperaturas *liquidus* e *solidus* obtidas pela simulação com o software Thermocalc®, serão fundidas e subsequentemente resfriadas onze amostras em duas diferentes velocidades, uma com o cadinho de monitoramento na temperatura ambiente e outro dentro do próprio forno.

Uma curva de resfriamento é um gráfico que apresenta a evolução da temperatura de uma amostra a partir do estado líquido em função do tempo de resfriamento durante a transformação de fase para o sólido, ou seja, durante a solidificação [1].

O procedimento consistirá na fundição da amostra em um forno para os dois tipos de resfriamento. Em seguida, após a amostra estar completamente líquida, será feito o vazamento em um cadinho descartável provido de um termopar do tipo K para monitoramento da temperatura que por sua vez está conectado a um computador com um sistema de aquisição de dados Spider8®. O arquivo obtido pode ser lido no software Microsoft Excel® enquanto a análise da concavidade envolve a primeira e segunda derivadas da curva de resfriamento no Excel®, permitindo a identificação das temperaturas *liquidus* e *solidus*. Pode-se então fazer a comparação com as respectivas temperaturas obtidas pelo software Thermocalc® para em seguida se verificar o quanto há de desvio entre os resultados experimentais e aquele de equilíbrio obtido pela simulação.

4. Resultados e Discussão

Até o momento, somente a liga Pb-50%Sn foi analisada cuja condição de resfriamento foi a mais rápida, ou seja, com o cadinho na temperatura ambiente, como pode ser visto na Figura 2. A análise das concavidades permitiu chegar às temperaturas *liquidus* e *solidus* de, respectivamente, 280 e 170°C.

Para a liga Pb-50% Sn, a simulação em Thermocalc® mostra que as temperaturas *liquidus* e *solidus* são, respectivamente, de 212 e 183°C. A diferença entre os resultados experimentais e o da simulação é certamente a falta de estabelecimento das condições de equilíbrio, traduzida no resfriamento bastante rápido com o cadinho na temperatura ambiente. Nota-se também pela Figura 2 que a solidificação terminou em menos de 350 segundos,

o que corrobora para o aludido anteriormente. O patamar presente na temperatura mais baixa corresponde à transformação eutética. Além disto, percebe-se o início da solidificação em uma temperatura muito acima da esperada, o que pode ter acontecido devido ao pequeno superaquecimento da liga e do possível baixo aquecimento do aparato de leitura, que corrobora para uma taxa de transferência de calor mais elevada. Nota-se também o aumento da temperatura da mistura ao atingir o patamar eutético, devido à nucleação da composição eutética que requer um superresfriamento da liga.

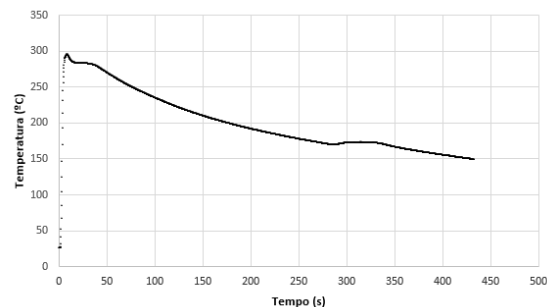


Figura 2 – Curva de resfriamento da liga Pb-50%Sn obtida experimentalmente no Centro de Laboratórios Mecânicos da FEI.

5. Conclusões

O presente trabalho permitiu chegar às seguintes conclusões: o método de monitoramento da temperatura com o tempo pelo aparato foi bem-sucedido e permitiu a comparação com o diagrama de fases determinado pelo software Thermocalc®;

A solidificação da liga Pb-50%Sn apresentou a temperatura de início de solidificação superior à de equilíbrio e a de final de solidificação inferior à de equilíbrio.

6. Referências

- [1] WAKIL, Sherif D El. **Materials Science and Engineering Lab Manual**. 4. ed. Massachusetts: PWS Publishing Company, 1993. 78 p.
- [2] GOTTSTEIN, Günter. **Physical Foundations of Materials Science**. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 502p.
- [3] A PORTER, David; EASTERLING, Kenneth e; SHERIF, Mohamed y. **Phase Transformation in Metals and Alloys**. 3. ed. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2008. 520 p.
- [4] CALLISTER JUNIOR, William D; RETHWISCH, David G.. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8. ed. Utah: LTC, 2013. 817 p. Tradução de Sergio Murilo Stamilo Soares.
- [5] REED-HILL, Robert E.; ABBASCHIAN, Reza. **Physical metallurgy principles**. 3rd. ed. Boston: PWS, c1994. 926 p.

Agradecimentos

Ao Centro Universitário FEI pelo financiamento do projeto de iniciação didática PRO-BID 10-18 e os recursos necessários para o projeto.

¹ Aluno de ID do Centro Universitário FEI, PRO-BID 010-18. Projeto com vigência de 05/18 a 04/19.

² Professor Doutor do Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Universitário FEI.