

A INFLUÊNCIA DA CONVECÇÃO SOLUTAL NO COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR METAL/MOLDE EM LIGAS Sn-Pb

José NAZARENO (1); Daniel MOUTINHO (2); Otávio ROCHA (3); Antonio MOREIRA (4).

(1) CEFET-PA, Av. Almirante Barroso, 1155, (91) 320117-42, e-mail: : jo.nazareno@hotmail.com

(2) CEFET-PA, e-mail: djcmoutinho@hotmail.com

(3) CEFET-PA, e-mail: otvrocha@oi.com.br

(4) UFPA, e-mail: lmoreira@amazon.com.br

RESUMO

No processo de solidificação dos materiais a velocidade com que o calor é extraído do sistema tem relação direta com o coeficiente de transferência de calor da interface metal/molde (h_i). Por esse motivo, o estudo deste coeficiente é de elevada importância tecnológica. A diminuição do mesmo promove uma desaceleração no processo de solidificação possibilitando a formação de estruturas grosseiras influenciando, portanto, consideravelmente as propriedades mecânicas do material fundido. Assim, o principal objetivo deste trabalho, é avaliar a convecção natural em ligas do sistema Sn-Pb solidificadas unidirecionalmente em molde horizontal refrigerado devido o efeito do teor de soluto, com base nos valores obtidos para h_i . Para tanto, o método do confronto teórico-experimental de perfis térmicos será utilizado, o qual consiste em confrontar os perfis de temperatura experimentais levantados com as curvas teóricas simuladas através de um modelo numérico de solidificação proposto na literatura. Os resultados experimentais obtidos mostram que os teores de soluto variam de maneira inversa com os valores de h_i nas ligas analisadas.

Palavras-chave: solidificação unidirecional horizontal; convecção solutal, coeficiente de transferência de calor metal/molde.

1. INTRODUÇÃO

Na década de sessenta, o estudo dos materiais passou a ser considerado como ciência aplicada tendo como objetivos, entre outros, a análise das estruturas, composição, características, propriedades e desempenho dos mesmos quando empregados na obtenção de produtos utilizados pela indústria. Foram nessa década que se realizaram as primeiras experiências de solidificação rápida, quando através da mesma se chegou à descoberta das ligas amorfas Fortes (1992).

Por outro lado, a solidificação de metais, fenômeno envolvido no processo de conformação através da fundição, pode ser definida como sendo a extração de calor em regime transiente, com mudança de fase, no qual certa quantidade de energia térmica deve ser transferida por meio do molde da fase líquida para o meio ambiente, possibilitando a nucleação e o crescimento da fase sólida. A eficiência da retirada de calor durante o processo depende, basicamente, das propriedades térmicas do metal, das características do molde (material, geometria, dimensão e espessura da parede), das condições da interface metal/molde (contato térmico) e das características do meio que vai absorver o calor (água, ar, etc) Santos (2006).

Nos processos de fundição convencional e lingotamento contínuo o fluxo de calor através da interface metal/molde, definido como coeficiente de transferência de calor (h_i), é variável ao longo de todo o processo. Assim, a fim de possibilitar um melhor controle das estruturas de solidificação obtidas, além de compreender os mecanismos de fluxo de extração de calor envolvidos, é necessário conhecer o referido coeficiente de transferência de calor durante a solidificação. Devido a sua grande influência na taxa ou velocidade de solidificação, o mesmo tem sido objeto de estudo de vários pesquisadores. Com a formação do “gap” de ar nesta interface, o coeficiente de transferência de calor pode rapidamente decrescer, dificultando, portanto a retirada de calor e desacelerando o processo de solidificação do metal líquido. A estrutura, as propriedades e desempenho de uma peça fundida dependem das condições térmicas durante a solidificação, ou seja, das taxas de resfriamento que, por sua vez, dependem da resistência térmica metal/molde.

Inúmeros processos industriais que envolvem o fenômeno da solidificação são influenciados pelos modos de convecção térmica e constitucional. Quando o processo, por exemplo, é realizado na forma vertical ascendente, em condições de gradiente de temperatura positivo no líquido, a influência da convecção é minimizada quando o soluto é rejeitado para as regiões interdendríticas, proporcionando a formação de um líquido interdendrítico mais denso que o volume global de metal líquido. Na solidificação unidirecional horizontal, por outro lado, a convecção em função dos gradientes de composição no líquido sempre vai ocorrer. Solutos mais densos ou menos densos podem induzir correntes por decantação ou flutuação do líquido rico em soluto rejeitado Rocha (2003).

Considerando o exposto acima, bem como o fato de que a grande maioria dos estudos desenvolvidos sobre o assunto refere-se a sistemas verticais ascendentes (Siqueira 2002; Rocha 2003; Sá 2005), onde a convecção devido o efeito do soluto na formação das estruturas de solidificação é praticamente eliminado, este trabalho apresenta como objetivo principal a determinação dos valores de h_i , devido à convecção natural provocada pelo teor de soluto, das ligas Sn-5%Pb, Sn-15%Pb, e Sn-20%Pb. Para tanto, o método do confronto teórico-experimental de perfis térmicos será utilizado, o qual consiste em confrontar os perfis de temperatura experimentais com as curvas teóricas simuladas através de um modelo numérico de solidificação proposto na literatura.

A transformação líquido/sólido é acompanhada por liberação de energia térmica com uma fronteira móvel separando as duas fases de propriedades termofísicas distintas. Para melhor compreender a análise em questão a Figura 1, evidencia todos os modos de transferência de calor que podem ocorrer ao longo da solidificação unidirecional: condução térmica no metal e no molde, transferência newtoniana na interface metal/molde, convecção no metal líquido e na interface molde/ambiente e, finalmente, radiação térmica do molde para o meio ambiente.

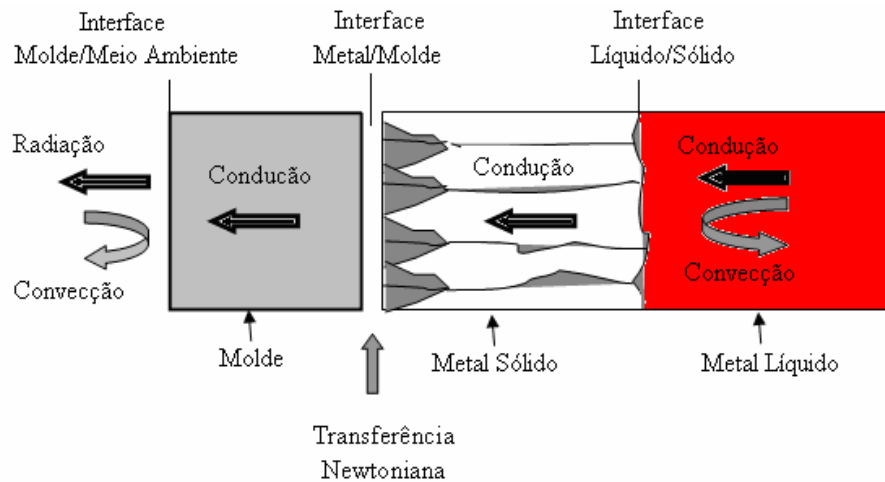


Figura 1 - Modos de transferência de calor atuantes no sistema metal/molde (Garcia, 2001)

2. METODOLOGIA

A metodologia experimental utilizada durante a realização deste trabalho considerou basicamente quatro etapas:

- Preparação das ligas Sn-5%Pb, Sn-15%Pb e Sn-20%Pb;
- Caracterização térmica das ligas para acerto dos teores e solutos correspondentes.
- Análise química das ligas para confirmação dos teores de soluto e verificação dos demais elementos químicos presente, através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) acoplado a um sistema de análise por energia dispersiva (EDS);
- Obtenção dos perfis de temperatura para cinco posições de termopares em relação à interface metal/molde inseridos no metal líquido e posterior determinação do hi.

A técnica empregada para a determinação experimental desse parâmetro foi apresentada recentemente (Ferreira, 2004).

A Figura 2 mostra o esquema completo do dispositivo de solidificação unidirecional horizontal refrigerado à água utilizado neste trabalho.

2.1. Obtenção das ligas Sn-5%Pb, Sn-15%Pb, Sn-20%Pb e levantamento das curvas de resfriamento.

As ligas estudadas foram fundidas em um forno elétrico tipo mufla. Inicialmente, foram colocados manualmente os respectivos materiais constituintes na proporção exata no cadinho de carvão de silício, revestido internamente por uma camada protetora de tinta à base de caulim. A temperatura do forno foi programada para garantir um superaquecimento de 10 % acima da temperatura líquida das ligas. Logo após, o cadinho foi retirado do forno e o metal líquido homogeneizado durante um tempo de aproximadamente 3 min. Em seguida, retirou-se uma amostra de metal para análise química das ligas.

As curvas de resfriamento das ligas foram levantadas através do registro de temperaturas a cada segundo até a sua completa solidificação. Os dados foram armazenados em um registrador de temperaturas do tipo AMR-CONTROL, marca ALMEMO, modelo 2290-8. Os dados armazenados no mesmo foram tratados em software específico para plotagem das curvas de cada liga analisada como indicado na Figura 3.

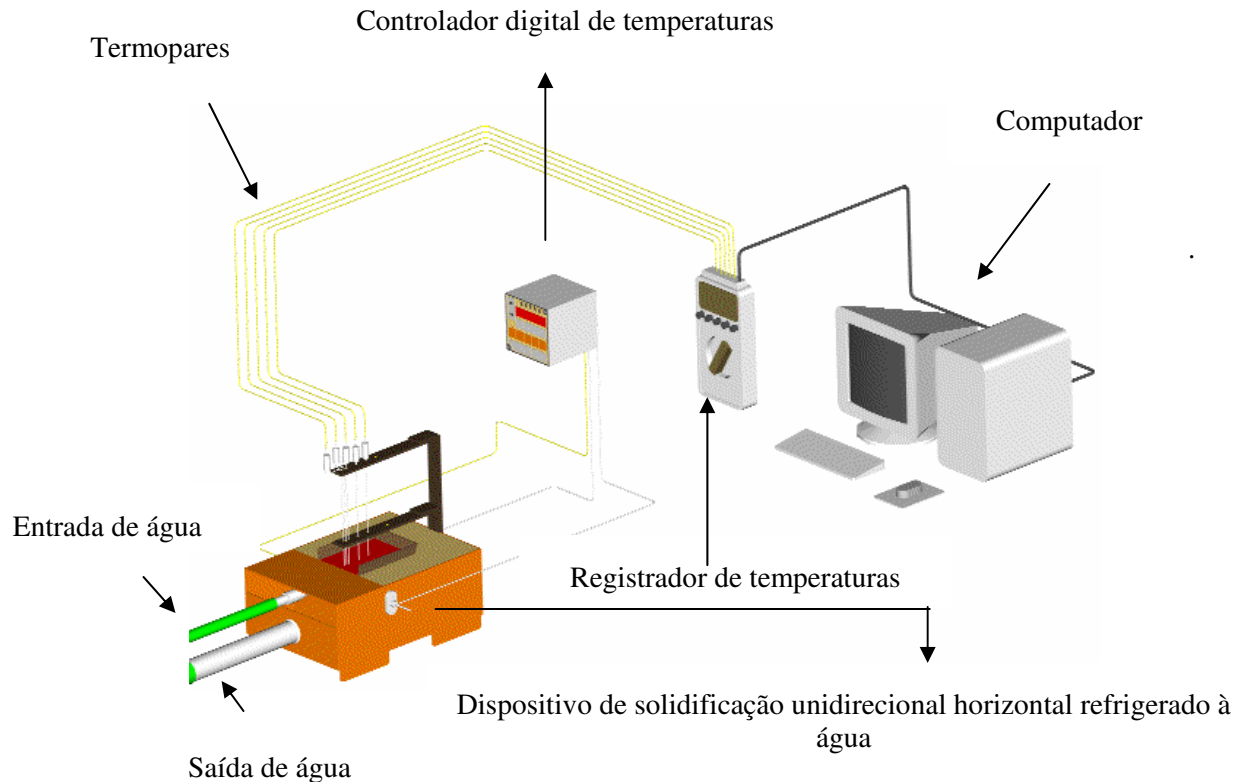


Figura 2 - Esquema completo do dispositivo de solidificação mostrando sua interface com o sistema de registro de temperaturas

Para a correta formulação das ligas em estudo foram empregados dois critérios. O primeiro diz respeito à correção do teor de soluto desejado tomando como referência as linhas de transformação solidus e liquidus fornecidas pelo diagrama de fases do sistema Sn-Pb, ou seja, a liga foi calculada através de um balanço de massa prévio, e seria corrigida posteriormente em função da maior proximidade com a temperatura de referência gerada a partir do diagrama de fases da liga analisada, o que não foi necessário.

O segundo critério retirou-se uma amostra de cada liga para ser analisada segundo a técnica da microscopia eletrônica de varredura (MEV) acoplado a um sistema de análise por energia dispersiva (EDS)

2.2. Determinação do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde (h_i)

O processo para a determinação de h_i consistiu no vazamento das ligas em um molde de chapa de aço 1020, posicionado na parte superior do dispositivo, devidamente aquecido por resistências elétricas a uma temperatura muito próxima da temperatura de fusão. Uma vez atingida a temperatura de vazamento estabelecida, 10% acima da temperatura liquidus das respectivas ligas, o dispositivo foi desligado iniciando-se o processo de refrigeração através de um fluxo de água constante na parte frontal do mesmo. A Figura 4 mostra um dos momentos do vazamento das ligas estudadas.

As propriedades termofísicas das liga estudadas neste trabalho encontram-se na literatura (Rocha, 2003).

As temperaturas no metal fundido foram monitoradas durante a solidificação através de um conjunto de cinco termopares tipo K (1,6 mm diâmetro) localizados no metal líquido nas seguintes posições em relação à interface metal/molde: 6 mm, 10 mm, 15 mm, 36 mm e 54 mm. Todos os termopares foram conectados por um cabo coaxial em um registrador de dados interfaceados com um computador e os dados de temperatura foram adquiridos automaticamente.

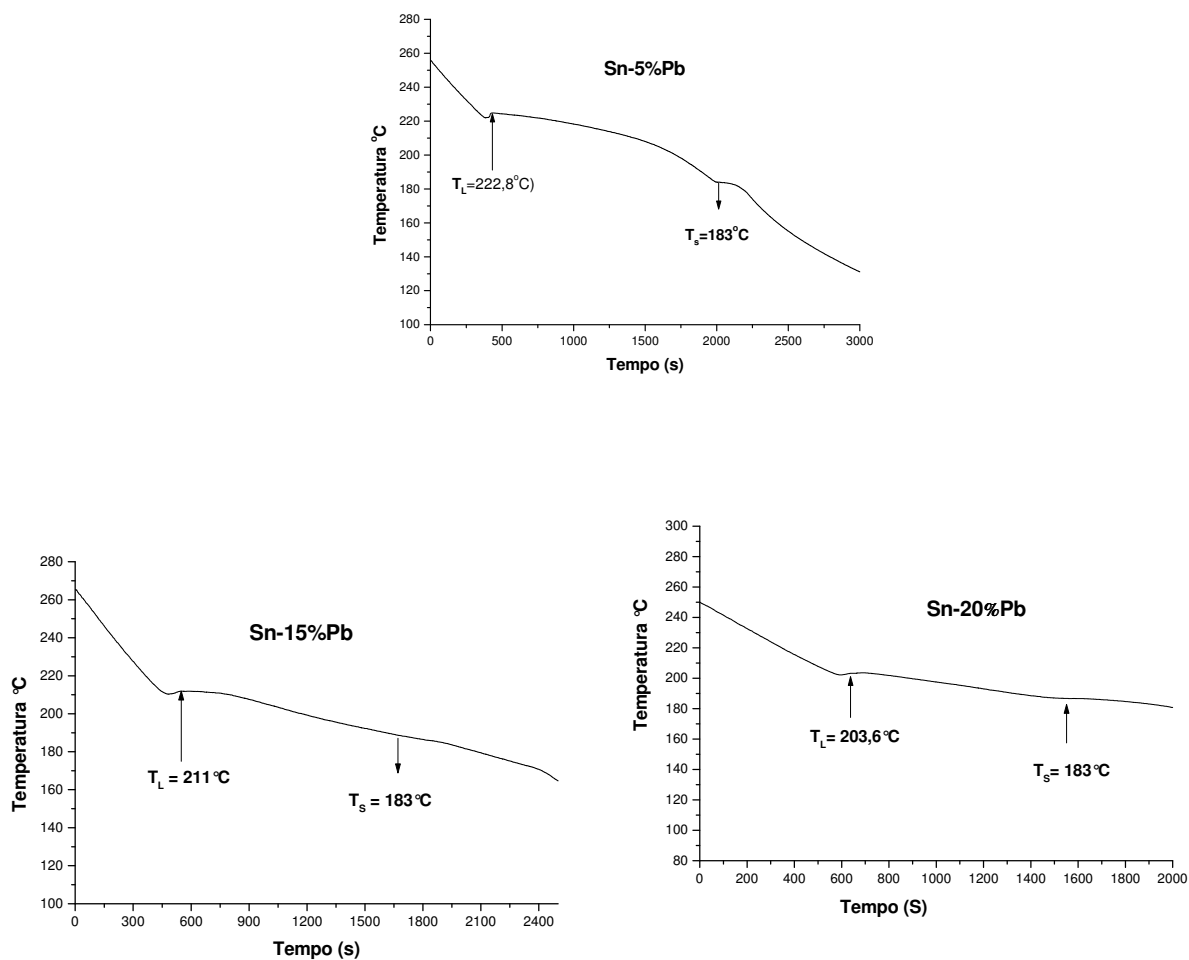


Figura 3 - Curvas de resfriamento das ligas Sn-5%Pb, Sn-15%, e Sn-20%Pb respectivamente



Figura 4 - Vazamento do metal líquido na lingoteira do dispositivo de solidificação

3. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

A Figura 5 apresenta o mapeamento de temperaturas obtido durante os experimentos para as ligas do sistema Sn-Pb. Quando atingidas as temperaturas liquidus e solidus, ocorre o início da liberação de calor latente de fusão e da recristalização, nesta ordem. A linha liquidus representa o início da solidificação ao passo que a linha solidus representa o final da mesma. Os tempos totais de solidificação registrado para as ligas Sn-5%Pb, Sn-15%Pb e Sn-20%Pb, considerando o termopar a 54 mm da superfície refrigerada, foram pela ordem 659, 667 e 750 segundos.

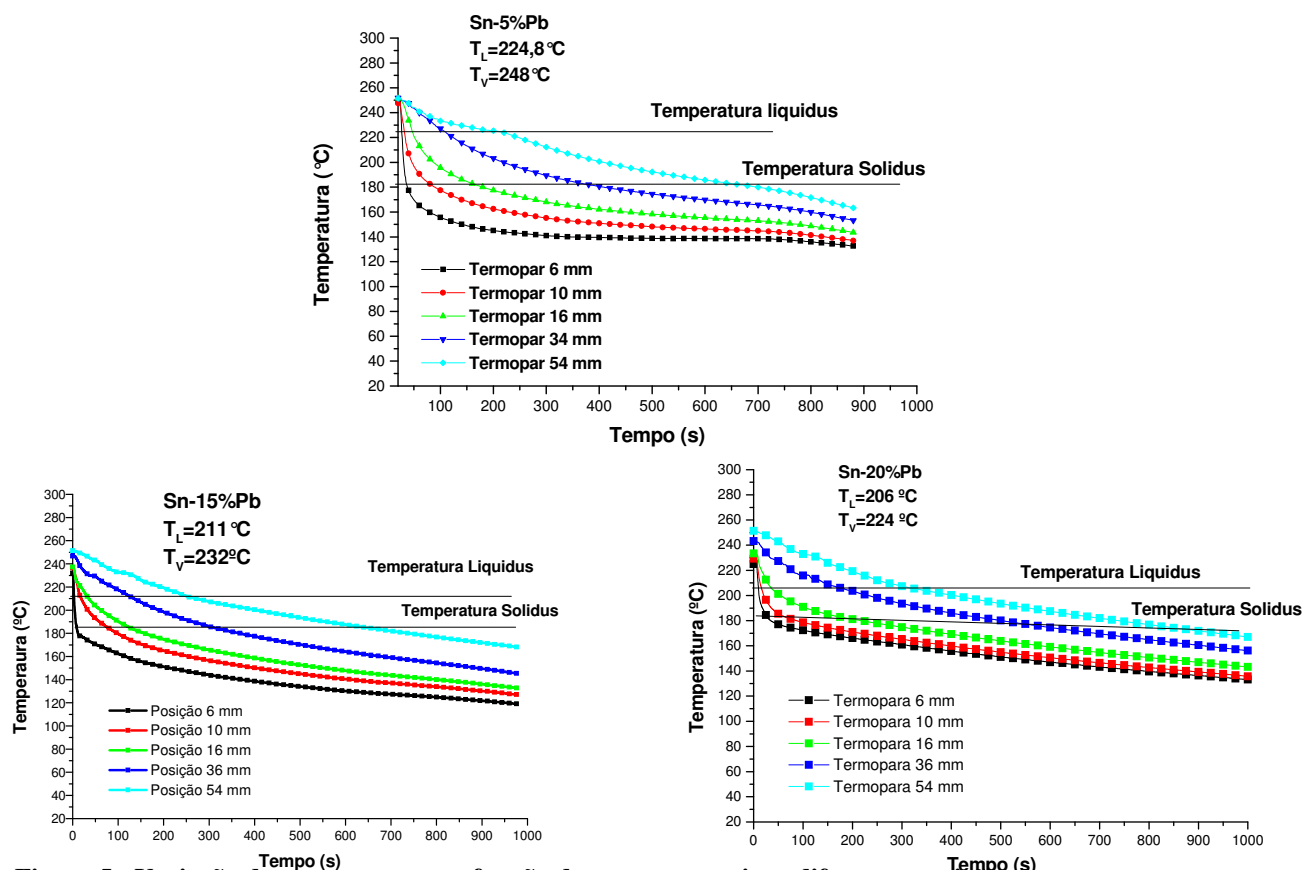


Figura 5 - Variação da temperatura em função do tempo para cinco diferentes posições de termopares em relação à interface metal/câmara refrigerada das ligas Sn-5%Pb, Sn-15%Pb e Sn-20%Pb

O método aplicado para determinar o coeficiente de transferência de calor metal/molde (h_i), utiliza arquivos contendo o monitoramento experimental das temperaturas e um programa numérico que simula as condições de solidificação unidirecional horizontal, apresentado recentemente (Ferreira, 2004). Os dados térmicos experimentais são então comparados com aqueles simulados numericamente por meio de um processo iterativo.

A operação de simulação resulta num gráfico de temperatura em função do tempo, conforme mostra a Figura 6, que apresenta os valores de h_i obtidos respectivamente para as ligas Sn-5%Pb, Sn-15%Pb e Sn-20%Pb considerando o termopar localizado a 6 mm da interface metal/câmara refrigerada, posição na qual eventuais perdas de calor pelas paredes laterais da lingoteira são menos prováveis, o que assegura condições mais completas de unidirecionalidade do fluxo de calor.

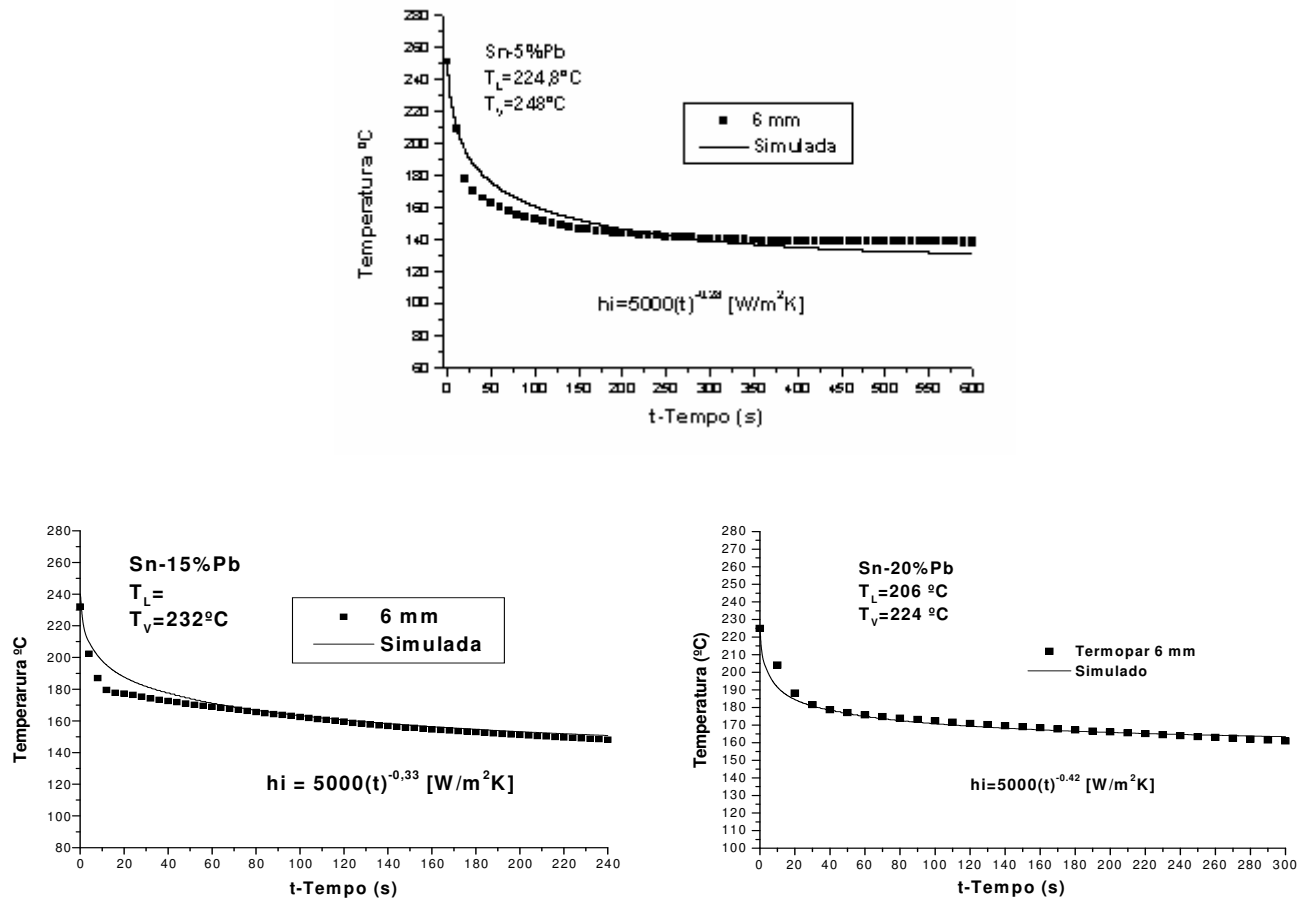


Figura 6 - Curvas de resfriamento experimental e simulada para determinação do h_i das ligas Sn-5%Pb, Sn-15%Pb e Sn-20%Pb

A Figura 7 ilustra a comparação entre as curvas características de h_i em função do tempo para as ligas analisadas. Observa-se que a convecção proporcionada pelo efeito do soluto, nas ligas estudadas promove uma diminuição nos valores de h_i à medida que aumenta o teor de soluto. Provavelmente, o comportamento aqui analisado se deve ao fato da convecção produzir um maior “gap” na interface metal/molde, sendo o mesmo mais intenso para maiores teores de soluto reproduzindo, portanto, nesta interface, uma resistência térmica maior e tempos totais de solidificação maiores para altas composições. Nota-se, ainda, para todas as composições uma diminuição acentuada dos valores de h_i (cerca de 50%) nos instantes iniciais da solidificação, principalmente nos primeiros vinte segundos, tempo que representa aproximadamente 3% do tempo total de solidificação correspondente à posição de 54 mm. A partir deste tempo até os 200 segundos do processo ocorre uma diminuição gradativa nos valores de h_i e, após este tempo, permanecem praticamente constantes até o final da solidificação.

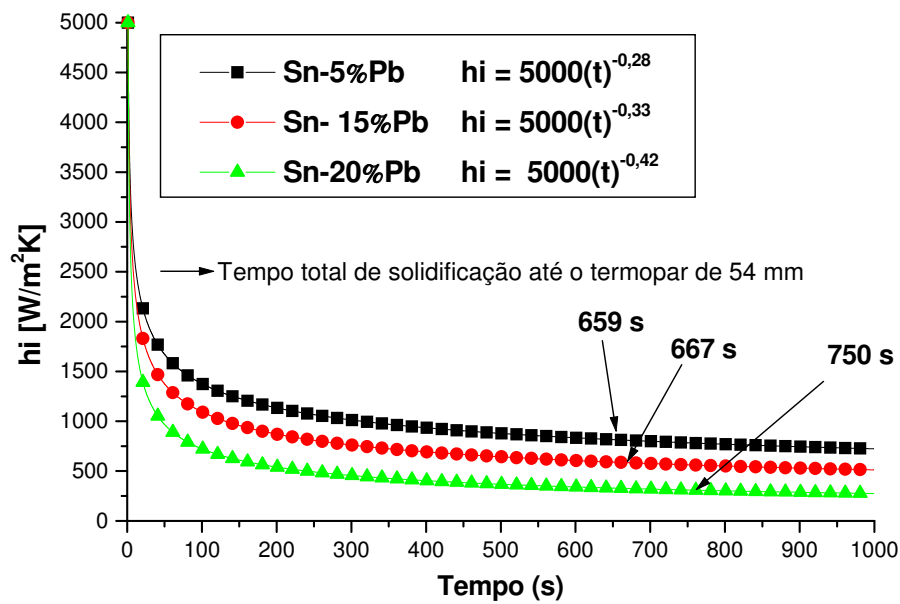


Figura 7 - Coeficientes de transferência de calor na interface metal/molde para ligas do sistema Sn-Pb

3.1. Comparação do valor de h_i para a liga Sn-15%Pb com aqueles obtidos para o caso da solidificação unidirecional vertical ascendente e descendente

A Figura 8 apresenta uma comparação entre o perfil do coeficiente de transferência de calor (h_i) para a liga Sn-15%Pb solidificada segundo as condições utilizadas neste estudo com outros perfis do coeficiente de transferência de calor para a mesma liga, obtidos em trabalhos recentemente desenvolvidos nos sistemas vertical ascendente (Rocha, 2003) e descendente (Spinelli, 2005), nas mesmas condições de solidificação assumidas neste trabalho, ou seja, ambos refrigerados à água e com extração de calor em regime transiente.

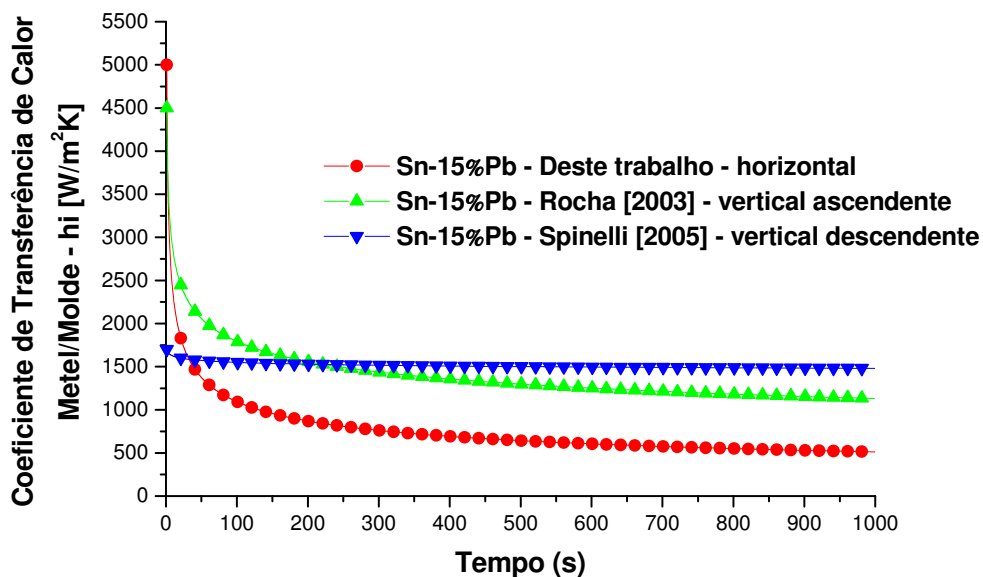


Figura 8 - Comparação de valores para o perfil do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde levantados para a liga Sn-15%Pb em diferentes sistemas de solidificação unidirecional refrigerados à água

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste trabalho permitem que sejam extraídas as seguintes conclusões:

- A curva de resfriamento permitiu verificar termicamente a composição da liga pela comparação das temperaturas liquidus e solidus obtidas experimentalmente com aquelas especificadas teoricamente pelo diagrama de equilíbrio de fases do sistema Sn-Pb;
- Os resultados experimentais encontrados neste trabalho apresentam-se coerentes com aqueles obtidos sobre o assunto na literatura (Siqueira 2002; Rocha 2003; Sá 2005), ou seja, as curvas obtidas para os coeficientes de transferência de calor na interface metal/molde, para o caso das ligas analisadas, mostram que a convecção natural proporcionada pelo aumento do teor de soluto promove uma diminuição nos valores dos coeficientes em questão;
- Os tempos totais de solidificação em função dos efeitos proporcionados pelos diferentes valores do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde apresentaram-se menores para maiores valores do referido coeficientes;
- O perfil do coeficiente de transferência de calor obtido por Rocha (2003) para a liga Sn-15%Pb apresenta um comportamento semelhante àquele deste trabalho, no entanto, os valores de h_i do referido autor ao longo do processo, com exceção do instante inicial, são mais elevado devido à configuração do Dispositivo utilizado ser vertical com solidificação ascendente, o que proporciona um maior contato térmico metal/câmara de refrigeração. Por outro lado, com relação ao perfil obtido por Spinelli (2005), observa-se que os valores de h_i são menores no instante inicial do processo, em relação aos encontrados neste trabalho, devido à configuração do sistema ser vertical descendente que, ao contrário do sistema utilizado por Rocha, promove um menor contato térmico do metal com a parede refrigerada.

REFERÊNCIAS

FERREIRA, I. L.; SANTOS, C. A.; VOLLER, V. R.; GARCIA, A. **Analytical, numerical and experimental analysis of inverse macrosegregation during upward unidirectional solidification of Al-Cu alloys**. Metallurgical and Materials Transactions B, v.35B, p. 285- 297, 2004, disponível em: <http://www.tms.org/pubs/journals/MT/MT.html>.

FERREIRA, I. L. **Análises numérica, analítica e experimental da macrosegregação inversa na solidificação**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2004.

FORTES, M. A. **História da ciência dos materiais em portugal**. II Centenário da Academia das Ciências de Lisboa, pp 1-3, 1994.

GARCIA, A. **Solidificação: Fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora da Unicamp, 2001.

ROCHA, O. F. L.; SIQUEIRA, C. A.; GARCIA, A. **Theoretical-experimental analysis of the cellular/dendritic transition during unidirectional solidification**. Materials Research, v. 5, n. 3, p.391-397, 2002, disponível em: <http://www.periodicos.capes.gov.br/portugues/index.jsp>.

ROCHA, O. L.; SIQUEIRA C. A.; GARCIA, A. **Cellular/dendritic transition during unsteady-state unidirectional solidification of Sn-Pb alloys**. Materials Science Engineering A, v. 347, nº 1-2, p. 59 - 69, 2003, disponível em: <http://www.periodicos.capes.gov.br/portugues/index.jsp>.

ROCHA, O. L.; SIQUEIRA C. A.; GARCIA, A. **Heat flow parameters affecting dendrite spacings during unsteady state solidification of Sn-Pb and Al-Cu alloys**. Metallurgical and Materials Transactions A, v. 34A, p. 995 - 1006, 2003, disponível em: <http://www.tms.org/pubs/journals/MT/MT.html>.

ROCHA, O. F. L. **Análise teórico-experimental da transição celular/dendrítica e da evolução da morfologia dendrítica na solidificação unidirecional em condições de fluxo de calor transitório**. Tese

(Doutorado em Engenharia) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2003.

SA, F.; ROCHA, O.L.; SIQUEIRA, C.A.; GARCIA, A. **The effect of solidification variables on tertiary dendrite arm spacing in unsteady-state directional solidification of Sn-Pb and Al-Cu alloys.** Materials Science Engineering A, v. 373, pp. 131-138, 2004, disponível em: <http://www.periodicos.capes.gov.br/portugues/index.jsp>.

SANTOS, R. G, **Transformações de fases em materiais metálicos** – Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2006.

SANTOS, R.G, PALMIERI, W; MELO, M.L.N.M; **Utilização do método de elementos finitos para a simulação da solidificação da liga Al-4,5% Cu**, VI Seminário de Tecnologia da Indústria do Alumínio, 1, 341-354, 1997.

SIQUEIRA, C. A; CHEUNG, N.; GARCIA, A. **Solidification thermal parameters affecting the columnar- equiaxed transition.** Metallurgical and Materials Transaction A, v. 33, p. 2107-2118, 2002, disponível em: <http://www.tms.org/pubs/journals/MT/MT.html>

SIQUEIRA, C. A. **Influência de parâmetros térmicos de solidificação na transição colunar/equiaxial.** Tese (Doutorado em Engenharia) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2002.

SPINELLI, E. **The Influence of melt convection on dendritic spacing of downward unsteady-state directionally solidified Sn-Pb alloys.** Materials Research, v. 9, n. 1, p.51-57, 2006, disponível em: <http://www.periodicos.capes.gov.br/portugues/index.jsp>.

SPINELLI, E. **Influência da convecção no líquido nas variáveis térmicas e estruturais na solidificação descendente de ligas Sn-Pb.** Tese (Doutorado em Engenharia) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2005.

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho somente foi possível devido o apoio financeiro fornecido pelo CEFET-PA e a parceria de cooperação técnico-científica entre o CEFET-PA, UFPA e UNICAMP.