

# ESTUDO DA EVOLUÇÃO DO COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM FUNÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE LIGAS Al-Sn\*

Ádria Rocha Corrêa<sup>1</sup>  
Kléber Agustin Sabat da Cruz<sup>2</sup>

## Resumo

Durante a solidificação de ligas metálicas, o produto fundido se contrai, o qual provoca o surgimento de espaçamentos vazios na interface metal/molde chamados de “gaps”. Estes gaps causam o aumento da resistência térmica influenciando em toda a cinética da solidificação. A transferência de calor durante a solidificação depende do conhecido parâmetro chamado de coeficiente global de transferência de calor ( $h_g$ ). Este parâmetro é representado pela equação do tipo:  $h_g = C \cdot t^n$ , a qual indica que a eficiência térmica na interface metal/molde decai com o tempo. Muitos parâmetros podem influenciar o coeficiente global de transferência de calor ( $h_g$ ), neste estudo, os percentuais de Sn em ligas do sistema Al-Sn são analisados (10,20,30 e 40%Sn). Portanto, o principal objetivo deste estudo é propor uma relação matemática que descreva, para o sistema Al-Sn, a evolução  $h_g$  em função do teor de Sn. A relação matemática foi obtida através do método dos mínimos quadrados

**Palavras-chave:** Solidificação; Al-Sn; Coeficiente global de transferência de calor.

## THEORICAL RESEARCH ON THE EVOLUTION OF THE GLOBAL HEAT TRANSFER COEFFICIENT AS A FUNCTION OF THE Sn CONTENT IN Al-Sn ALLOYS

### Abstract

During the solidification of metallic alloys, the casting shrinks, which generates the rising of gaps at the metal/mold interface. These gaps cause the thermal resistance to become higher, influencing in all solidification kinetics. The heat transfer during solidification depends on the so-called global heat transfer coefficient ( $h_g$ ). This parameter is represented by the power function:  $h_g = C \cdot t^n$ , which indicates that the heat transfer efficiency falls down with the time. Many parameters can influence on the global heat transfer coefficient ( $h_g$ ), in this study, the Sn content in Al-Sn alloys (10, 20, 30 and 40wt%Sn) is analyzed. Therefore, this study has the main objective to find a mathematical relationship for Al-Sn alloy system that describes the evolution of the heat transfer coefficient ( $h_g$ ) as a function of the Sn content. The mathematical relationship was obtained by using the method of least squares that relates the coefficient  $h_g$  and the Sn content.

**Keywords:** Solidification; Al-Sn; Global heat transfer coefficient.

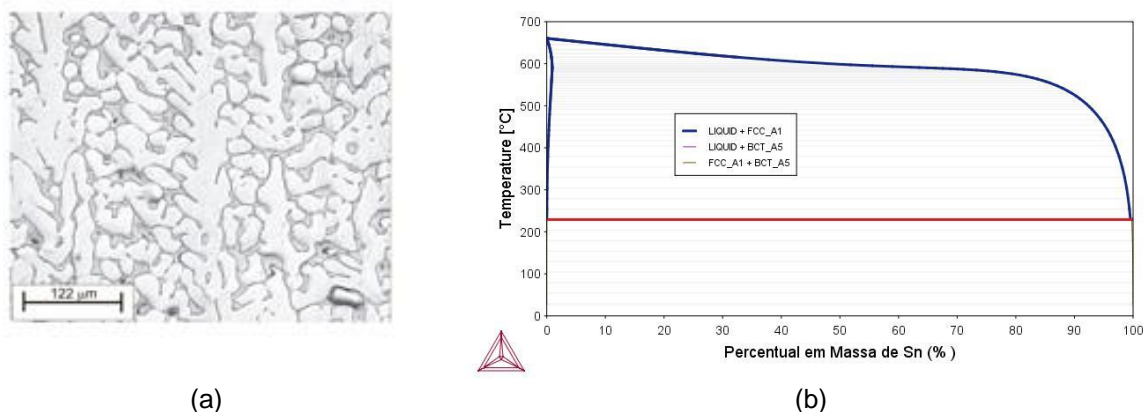
<sup>1</sup> Graduando do Programa de Ciência e Tecnologia, IEG-UFOPA. Bolsista do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PIBIC/FAPESPA. Santarém, Pará, Brasil.

<sup>2</sup> Prof. Dr. Kléber Agustin Sabat da Cruz, IEG-UFOPA. Santarém, Pará, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 O Sistema Al-Sn:

O sistema binário Al-Sn é caracterizado por uma miscibilidade extremamente baixa do Sn no Al, e que se situa abaixo de 0,09 % em peso como pode ser visto na Figura 1-b. Nestas condições, as ligas com concentrações de Sn maiores do que 0,09% são constituídas de uma estrutura metalográfica heterogênea caracterizada por uma matriz de alumínio com partículas de estanho disseminadas ao longo da matriz. Este tipo de arranjo estrutural determina o comportamento tribológico da liga, com a matriz tenaz sendo responsável pela resistência mecânica, enquanto as partículas de Sn atuam como um lubrificante sólido [7]. Esta classe de ligas apresenta um longo histórico de aplicações na fabricação de mancais, em função da combinação de resistência mecânica, boa conformabilidade e boas características de superfície. A liga mais comumente usada para este tipo de aplicação é a Al 20%Sn, em peso, que reúne este conjunto de características mencionadas embora tenha um custo relativamente alto [5]. Embora as ligas Al-Sn aplicadas em mancais exibam as características acima mencionadas, com o desenvolvimento de motores cada vez mais velozes e submetidos a esforços crescentes e sobrecargas, o nível de resistência destas ligas não tem sido suficiente para atender estas novas necessidades de resistência à fadiga e ao desgaste. Uma das tendências nos estudos atuais consiste na adição de terceiros elementos na busca de um melhor compromisso entre estas propriedades, como é o caso da adição de Si [12]. Também para esta classe de ligas inexitem na literatura trabalhos que correlacionem parâmetros de microestrutura dendrítica (Figura 1-a) com propriedades mecânicas e resistência ao desgaste.



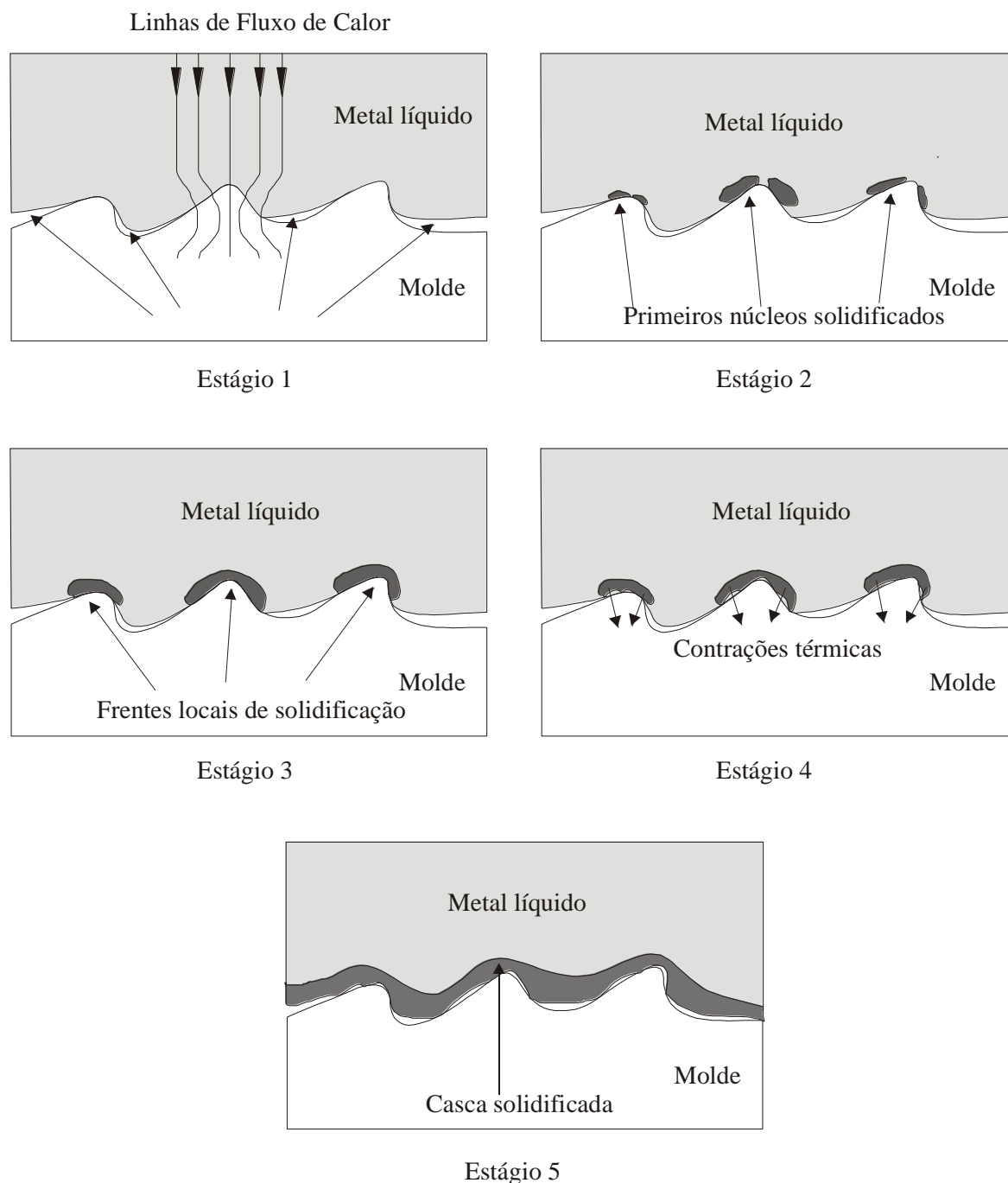
**Figura 1.** A- Microestrutura dendrítica de uma liga Al-40%Sn solidificada unidirecionalmente [4,5]; B – Diagrama de fases Al-Sn [11]

### 1.2 O Coeficiente Global de Transferência de Calor ( $h_g$ ):

Os resultados abordados neste estudo foram obtidos de um sistema de solidificação unidirecional projetado de tal modo que a extração de calor é realizada somente pela parte inferior refrigerada a água, promovendo solidificação direcional vertical [2]. O uso desta configuração experimental permite minimizar a convecção natural, bem como a convecção de soluto devido a correntes convectivas se o soluto rejeitado induzir uma massa específica do líquido interdendrítico maior do que a do volume global da liga fundida.

A parte inferior do molde em contato com o metal, apresenta uma interface caracterizada por um coeficiente de transferência de calor metal/molde. Este coeficiente de transferência de calor representa um coeficiente de transferência de calor global que compreende todas as resistências térmicas entre o metal em solidificação e a água de refrigeração. A existência deste coeficiente de transferência de calor demanda a formulação de uma nova condição de contorno além da limitada pela fase pastosa.

O comportamento do coeficiente de transferência de calor global é traduzido como uma curva em decaimento exponencial ao longo do tempo (t) [3], comportamento este influenciado pela evolução da formação do gap mostrado na Figura 2.



**Figura 2.** Processo de Formação do “gap” na interface metal/molde [4].

## 2 METODOLOGIA

Os resultados deste estudo foram baseados nos experimentos obtidos para ligas do sistema Al-Sn [1,2]. O modelo matemático se baseia no método de diferenças finitas que simula as condições de solidificação unidirecional. Este modelo foi introduzido inicialmente por Spim e Garcia [9] e utilizado posteriormente por Siqueira et al. [8]. Neste modelo, faz-se uma estimativa das constantes (multiplicador e expoente) que formam a equação (tipo potência  $h_g = C \cdot t^{-n}$ ) transitória do coeficiente  $h_g$ , a qual resulta em um perfil térmico calculado que é confrontado com o perfil experimental, no caso de concordância chega-se ao resultado que representa o coeficiente que atuou durante a solidificação da liga, de acordo com a Figura 3.

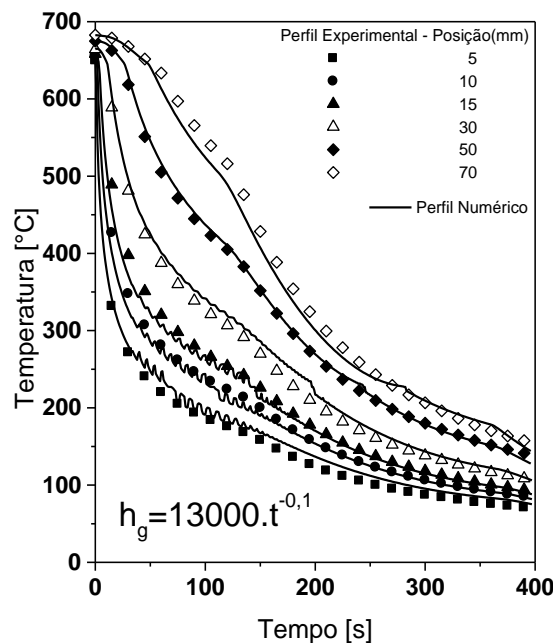
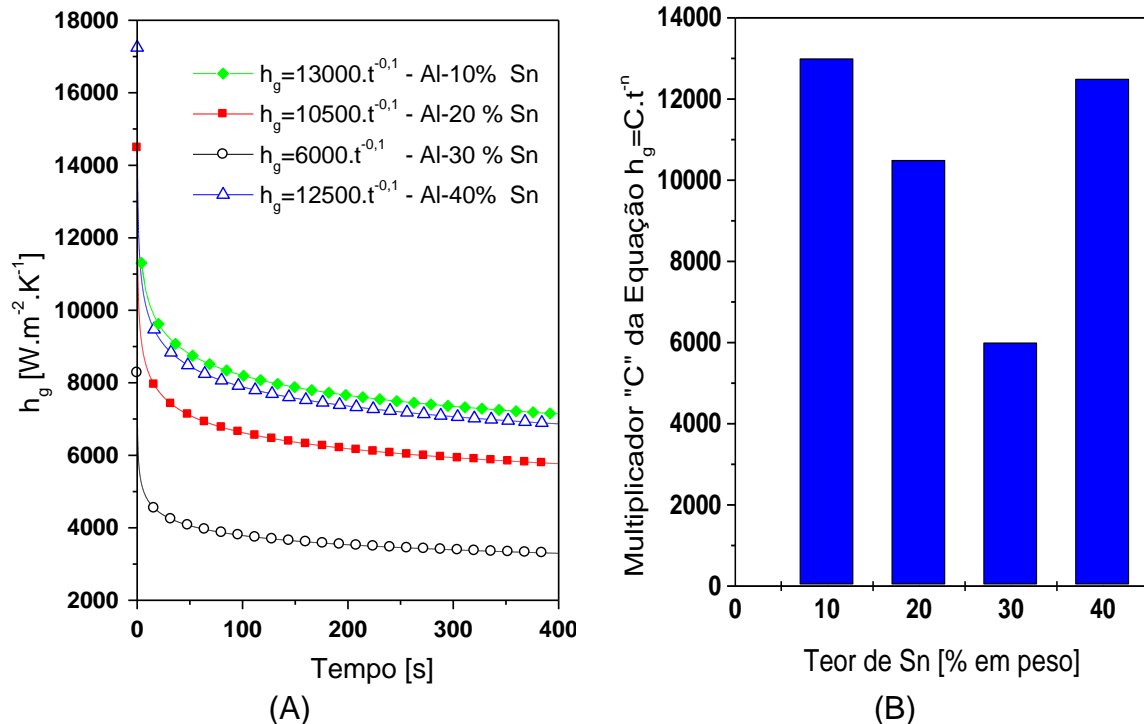


Figura 3. Confronto entre o perfil térmico experimental e calculado pelo método de diferenças finitas.

## 3 RESULTADOS

Na Figura 4, apresentam-se os resultados experimentais utilizados neste estudo [1,2]. O coeficiente  $h_g$ , tem uma tendência de reduzir seu valor até o percentual de 30%Sn e posteriormente aumentar. Provavelmente este comportamento deve estar relacionado à imiscibilidade entre o Al e o Sn, o que é característico das ligas do sistema Al-Sn. Comportamento diferente foi encontrado em ligas hipoeutéticas do sistema Al-Si, onde a medida que o percentual de Si se aproximou da concentração eutética, houve a redução do multiplicador do coeficiente  $h_g$  [10].



**Figura 4.** (A) Coeficientes transitórios de transferência de calor para ligas Al-Sn solidificadas na forma vertical ascendente em molde de aço carbono 1020 refrigerado a água, com espessura de 3 mm e superaquecimento de 2°C; (B) Gráfico mostrando a evolução do multiplicador "C" com o aumento do teor de Sn [1,2].

Inicialmente, calculou-se os parâmetros de qualidade do ajuste de mínimos quadrados à função  $h_g=f(\%C)$ . Os dados foram também submetidos a escalas logarítmicas e semilogarítmicas de y para verificação da qualidade dos ajustes exponencial e potência ( $y=b \cdot x^m$ ;  $y=b \cdot 10^{mx}$ ). Notou-se que a linearidade dos dados não existiu, fato este que indica que estas funções não representam a função  $h_g=f(\%Sn)$ . Os parâmetros de qualidade de ajuste são apresentados na tabela 1.

**Tabela 1.** Parâmetro de qualidade de ajuste por mínimos quadrados

Grau do polinômio de ajuste	Soma do quadrado dos desvios (S)	Soma do quadrado dos resíduos (J)	Coefficiente de determinação $r^2$
1	$3,05 \times 10^7$	$2,87 \times 10^7$	0,059
2	$3,05 \times 10^7$	$8,45 \times 10^7$	0,723
3	$3,05 \times 10^7$	$9,06 \times 10^{-22}$	0,998

Na Figura 5 tem-se o ajuste polinomial cúbico para a relação entre o coeficiente  $h_g$  e o teor de Sn. Com base na Tabela 01, os melhores parâmetros foram para o ajuste cúbico, portanto pode-se propor que na faixa de composição entre 10 a 40%Sn a função que melhor descreve a evolução do coeficiente  $h_g$  em função do teor de Sn é a equação 01.

$$y = 2,2 \cdot x^3 - 1,4 \cdot 10^2 \cdot x^2 + 2,4 \cdot 10^3 \cdot x + 5 \cdot 10^2 \quad (01)$$

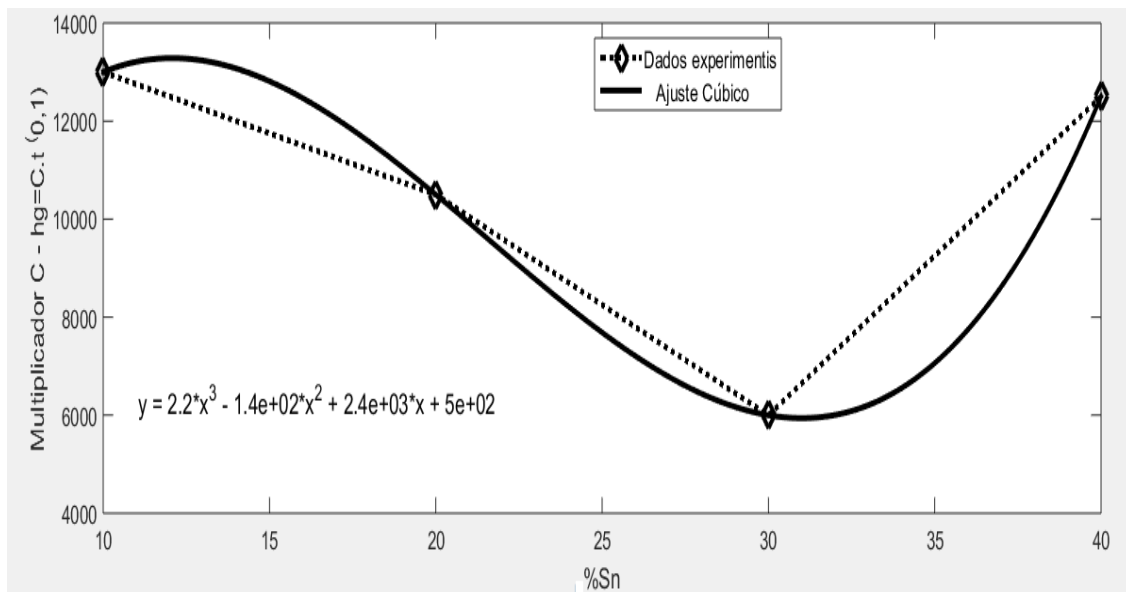


Figura 5. Curva do ajuste cúbico para a função  $h_g=f(\%Sn)$ .

#### 4 CONCLUSÃO

A função que melhor se adequou para representar a evolução do coeficiente  $h_g$  em função do teor de Sn, foi:

$$y = 2,2 \cdot x^3 - 1,4 \cdot 10^2 \cdot x^2 + 2,4 \cdot 10^3 \cdot x + 5 \cdot 10^2 \quad (02)$$

O método usado para o ajuste de curva foi o método dos mínimos quadrados, após a verificação em escalas semilogarítmica de  $y$  e logarítmica que as funções potência e exponencial não descrevem a relação  $h_g=f(\%Sn)$ , devido a falta de linearidade dos dados.

#### Agradecimentos

Agradeço a FAPESPA pelo apoio financeiro dado para o desenvolvimento deste trabalho no ano de 2015.

#### REFERÊNCIAS

- 1 CRUZ, Kleber Agustin Sabat da,. *Microestrutura de solidificação, resistência mecânica e ao desgaste de ligas Al-Sn e Al-Si* – Tese de doutorado – UNICAMP/FEM - Campinas - SP,2008.
- 2 CRUZ, K.S., et al. *Dendritic arm spacing affecting mechanical properties and wear behavior Al-Sn and Al-Si alloys directionally solidified under unsteady-state conditions*, *Metallurgical and Materials Transactions*, v.41A, p. 972-984, 2010.
- 3 KRISHNAN, M. & SHARMA, D. G. R. *Determination of the interfacial heat transfer coefficient  $h$  in unidirectional heat flow by Beck's nonlinear estimation procedure*–*International Communications in Heat Mass Transfer*”, v. 23, n. 2, pp. 203-214, 1996.
- 4 LOLOU, T.; Artyukhin, E.A.; BARDON, J. P. *Estimation of thermal contact resistance during the first stages of metal solidification process: II- experiment principle and modelisation*, *International Journal of Heat Mass Transfer*, v.42, 1999b, pp.2129-2142.



- 5 PATHAK, J. P.; MOHAN, S. *Tribological Behavior of Conventional Al-Sn and Equivalent Al-Pb Alloys Under Lubrication*, *Bulletin on Materials Science*, vol. 26, pp. 315-320, 2003.
- 6 PERES, M. D.; SIQUEIRA, C. A.; GARCIA, A. *Macrostructural and microstructural development in Al-Si alloys directionally solidified under unsteady-state conditions*. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 381, pp. 168-181, 2004.
- 7 PERRONE, A. et al. *Al-Sn Thin films Deposited by Pulsed Laser Ablation*, *Materials Science and Engineering C*, vol. 22, pp. 465-468, 2002.
- 8 QUARESMA, J. M. V.; SANTOS, C.A.; SPIM Jr., J.A. & GARCIA, A. *Influência do Material e da espessura da Parede do Molde nos Coeficientes de Transferência de Calor nas Interfaces Metal/Molde e Molde/Ambiente*, CD do II Congresso Internacional de Tecnologia Metalúrgica e de Materiais - ABM 97, São Paulo- SP, 1997.
- 9 SANTOS, C. A.; QUARESMA J. M. V.; GARCIA A.; *Determination of transient interfacial heat transfer coefficients in chill mold casting*, *Journal of Alloys and Compounds*, v. 319, pp. 174-186, 2001.
- 10 SPIM, J. A.; GARCIA A.; *A modified network approach for modeling solidification of complex-shaped domains*, *Numerical Heat Transfer – B*, v. 38, pp. 75-92, 2000.
- 11 Thermo-calc software, v.4, Stockholm, Sweden, 2008.
- 12 YUAN, G.C.; LI, Z.J.; LOU, Y.X.; ZHANG, X.M. *Study on Crystallization and Microstructure for New Series of Al-Sn-Si Alloys*, *Materials Science and Engineering A*, vol. 280, pp. 108-115, 2000.