

## **Influência dos Parâmetros de Solidificação na Transição Colunar/Equiaxial de Ligas de Al-Si**

**M. D. Peres<sup>1</sup>, C. A. Siqueira<sup>2</sup>, A. Garcia<sup>3</sup>**

1- Departamento de Construção Civil/Universidade federal do Pará - UFPA;  
[peres@ufpa.br](mailto:peres@ufpa.br)

2-Departamento de Engenharia de Materiais/Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP;  
[claudio@fem.unicamp.br](mailto:claudio@fem.unicamp.br)

3-Departamento de Engenharia de Materiais/Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP;  
[amaurig@fem.unicamp.br](mailto:amaurig@fem.unicamp.br)

### ***Resumo***

A macroestrutura de solidificação de peças fundidas ou lingotes pode apresentar-se na forma de grãos completamente colunares ou totalmente equiaxiais, dependendo da composição química da liga e das condições de solidificação. Uma forma estrutural mais complexa, típica de solidificação em moldes de maiores difusividade de calor como moldes metálicos e refrigerados, é composta pelas duas zonas estruturais. Essa forma mista de solidificação ocorre quando os grãos equiaxiais encontram condições de nuclear e crescer no líquido, à frente da fronteira colunar de crescimento, provocando a transição colunar/equiaxial. A previsão da transição colunar/equiaxial é de grande interesse na programação das propriedades mecânicas de produtos solidificados. Peças com estrutura completamente equiaxiais são mais apropriadas para inúmeras aplicações, uma vez que apresentam isotropia de propriedades físicas e mecânicas. Por outro lado, a anisotropia das propriedades das estruturas colunares permite aplicações tecnológicas importantes, como por exemplo no crescimento de lâminas de turbinas de motores a jato. No presente trabalho realizou-se um estudo experimental da transição colunar/equiaxial em ligas Al-3%Si, Al-5%Si, Al-7%Si e Al-9%Si, as quais foram solidificadas unidirecionalmente em moldes refrigerados. Foi desenvolvida uma análise teórico-experimental para a determinação quantitativa de parâmetros térmicos da solidificação. Observou-se que a transição colunar/equiaxial ocorre quando a taxa de resfriamento da frente colunar dendrítica atinge um valor crítico abaixo do qual só há crescimento equiaxial.

Palavras Chaves: Transição Colunar/Equiaxial e Solidificação.

## INTRODUÇÃO

A macroestrutura de um metal fundido, geralmente consiste de três zonas distintas: uma coquilhada, uma colunar e uma equiaxial, e a origem de cada uma tem sido o assunto de intensa investigação experimental e teórica em função da correlação entre a estrutura dos grãos e propriedades. Todas as três zonas podem até não estar presente em um caso particular, entretanto quando um fundido contém grãos colunares e equiaxiais a transição colunar/equiaxial (TCE) ocorre em uma faixa estreita (Flood et al, 1988). A TCE, pode ser causada por um amontoado de cristais equiaxiais bloqueando o crescimento de grãos colunares ou por uma junção de cristais equiaxiais no líquido na frente da dendrita colunar (Burden et al, 1975), depende de parâmetros de fundição, tais como o sistema e a composição das ligas, dimensões do fundido, material do molde, temperatura do molde, superaquecimento, coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde, convecção no metal e presença de agentes nucleantes (Wang et al, 1994; Suri et al, 1991). Só recentemente a TCE tem sido objeto de estudos teóricos tendo em vista a modelagem deste fenômeno, como revisado por Flood e Hunt (1988). Esses estudos, bem como os modelos recentes, elucidam a importância do crescimento relativo de grãos equiaxiais e colunares, e o desenvolvimento de expressões ou procedimentos numéricos que descrevam os critérios para a transição colunar/equiaxial, geralmente em termos de velocidade de crescimento e gradiente de temperatura à frente das pontas das ramificações dendritas (Suri et al, 1991; Gandin, 2000).

Hunt e co-autores (1984; 1987) desenvolveram um modelo para a TCE, baseado no superesfriamento do metal que qualitativamente revela a influência da composição da liga, densidade de pontos nucleantes, gradiente de temperatura no metal ( $G_L$ ) e velocidade de crescimento na ponta da dendrita ( $V_L$ ). Wang e Beckermann (1994) desenvolveram um modelo numérico para o cálculo da posição da TCE baseado em uma aproximação variada que calcula a temperatura e a difusão de soluto, bem como a nucleação, crescimento e morfologia dos grãos. Algumas investigações experimentais relatadas na literatura sugerem que a TCE ocorra quando o gradiente de temperatura no metal alcance um valor mínimo crítico. Mahapatra e Weinberg, 1987, encontraram valores de  $0,10^\circ \text{C/mm}$  e  $0,13^\circ \text{C/mm}$  para ligas Sn5%Pb e Sn15%Pb (Fredriksson et al, 1986), respectivamente e de  $0,06^\circ \text{C/mm}$  para a liga Al3%Cu (Ziv et al, 1989). Suri e outros (1991) analisando a solidificação direcional de uma liga Al4,5%Cu em molde de cobre e aço inoxidável e utilizando uma ampla faixa de superaquecimentos, depois comparando as posições da TCE com os correspondentes valores de  $G_L$  e  $V_L$ , sugeriram que a transição ocorre para  $G_L < 0,74 V_L^{0,64}$ . Mais recentemente, Ares e Chvezov (2000) realizaram experimentos com ligas Chumbo-Estanho solidificadas direcionalmente, e observaram que a TCE ocorre ao longo de uma zona e não de forma abrupta, e quando o gradiente de temperatura no metal decresce para valores em torno de  $-0,8^\circ \text{C/mm}$  a  $1^\circ \text{C/mm}$ . Gandin (2000) combinando simulações fornecidas por um modelo de solidificação numérica e resultados experimentais de solidificação direcional da liga Al-Si propôs um critério da TCE baseado na posição da velocidade máxima da interface colunar/dendritica, sugerindo um aumento contínuo da velocidade de crescimento até um valor máximo em torno de dois terços do comprimento do lingote, onde a transição deve ocorrer.

Este trabalho tem por objetivo principal analisar a influência de parâmetros térmicos na transição colunar/equiaxial das ligas Al-3%Si, Al-5%Si, Al-7%Si e Al-9%Si solidificadas em um forno unidirecional refrigerado a água. Uma abordagem teórico-experimental foi desenvolvida para determinar quantitativamente os parâmetros térmicos da solidificação como por exemplo: coeficientes transientes de transferência de calor, velocidade de crescimento, gradiente térmico e taxa de resfriamento, que afetam a transição colunar/equiaxial.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema utilizado na solidificação experimental é mostrado na Figura 1. O aparato de solidificação foi projetado de tal modo que a extração de calor é realizada somente pela parte inferior refrigerada a água, promovendo solidificação direcional vertical ascendente. O uso desta configuração experimental permite minimizar a convecção natural, bem como a convecção de soluto, se o soluto rejeitado tiver uma densidade maior do que a liga fundida. Utilizou-se um molde de aço inoxidável com diâmetro interno de 50 mm, altura de 150 mm e uma espessura de parede de 5 mm. A superfície vertical interna foi coberta com uma camada isolante de alumina para minimizar as perdas de calor radial, e uma cobertura na parte superior feita com material isolante foi usada para reduzir perdas de calor na superfície metal/ar. A parte inferior do molde é fechada com um disco fino de aço inox (5mm de espessura). As ligas são fundidas *in situ* e as resistências elétricas laterais têm sua potência controlada a fim de permitir a obtenção de níveis de superaquecimento desejados. Para começar a solidificação, a resistência elétrica é desligada e ao mesmo tempo o fluxo de água é iniciado. Os experimentos foram realizados para ligas Al-Si (3, 5, 7 e 9% em peso de Si) com temperaturas de vazamento próximas à temperatura de fusão.

As temperaturas no metal fundido são monitoradas durante a solidificação através de um conjunto de termopares tipo K (1,6 mm diâmetro) posicionados no lingote a 4, 8, 12, 17, 22, 38, 53, 68 e 88 mm da superfície de extração de calor. Todos os termopares foram conectados por um cabo coaxial a um registrador de dados interfaceado com um computador, e os dados de temperatura adquiridos automaticamente.

Os lingotes cilíndricos foram seccionados em um plano médio polidos mecanicamente usando papéis abrasivos e atacados com solução ácida (25 ml H<sub>2</sub>O; 20 ml HCl; 5 ml HF e 20 ml HNO<sub>3</sub>) para revelar a macroestrutura. A TCE, quando ocorreu, foi medida a partir da base do lingote.

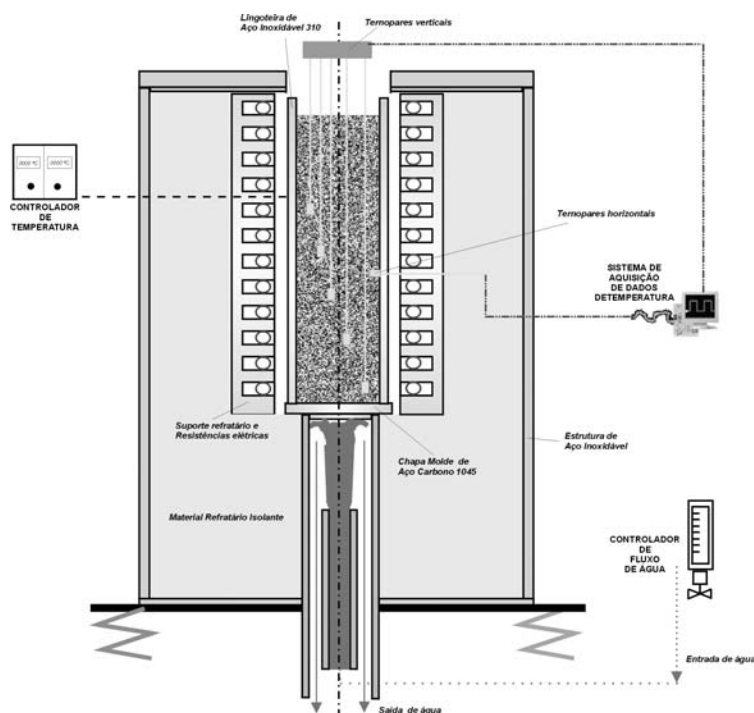


Figura 1. Esquema experimental utilizado no processo de solidificação unidirecional.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os arquivos contendo o monitoramento experimental das temperaturas foram usados para determinar o coeficiente de transferência de calor metal/molde,  $h_i$ , através de um programa de diferenças finitas apresentado em artigos anteriores (Spim et al, 2000; Spim et al, 2000). Os dados térmicos experimentais foram comparados com aqueles simulados numericamente usando o coeficiente  $h_i$ , que fornece o melhor ajuste de curva conforme analisado em artigo prévio (Santos et al, 2001). A Figura 2 apresenta os resultados de  $h_i$ , onde se vê que com maiores valores de concentração de soluto (de 3 a 9% em peso de Si) a solidificação é retardada em relação à situação de composição mais baixa. É importante destacar que o valor de  $h_i$  reflete nestes experimentos, a condutância térmica global entre a superfície do lingote e a água de refrigeração.

Os resultados da análise térmica no metal foram usados para determinar a velocidade da isoterma liquidus ( $V_L$ ) em função da posição. O gradiente térmico ( $G_L$ ) e a taxa de resfriamento ( $\dot{T}_L$ ) foram obtidas através de uma solução numérica do problema da solidificação que utilize o método de diferenças finitas (Spim et al, 2000; Spim et al, 2000), como descrito em artigo prévio (Santos et al, 2001). As Figuras 3 e 4 mostram os parâmetros térmicos calculados. A boa concordância entre os valores experimentais e numéricos de deslocamento da isoterma liquidus mostrado na Figura 3 (A), a exemplo do que foi observado em trabalho anterior (Quaresma et al, 2000) habilita a ferramenta numérica como instrumento de cálculo confiável na determinação dos demais parâmetros térmicos,  $G_L$  e  $\dot{T}_L$ , conforme mostrado na Figura 4.

Pode-se notar na Figura 4.a, que a transição colunar/equiaxial ocorre para posições com valores de gradiente térmico à frente da isoterma liquidus variando em torno de 0,07 e 0,10 °C/mm, como observado por outros autores (Fredriksson et al, 1986; Ares et al, 2000). Entretanto, conforme constatado em trabalhos anteriores com ligas Al-Cu (Siqueira et al, 2001) vê-se também que na Figura 4.b a taxa de resfriamento parece ser o parâmetro térmico mais realista para representar um critério de transição colunar/equiaxial. Vê-se que, para todas as curvas analisadas experimentalmente, independente da composição química, a transição ocorre sempre para uma taxa crítica de resfriamento em torno de 0,2 K/s. A Figura 6 mostra os exemplos típicos das macroestruturas dos lingotes obtidos por solidificação unidirecional, evidenciando a transição colunar/equiaxial para as ligas estudadas.

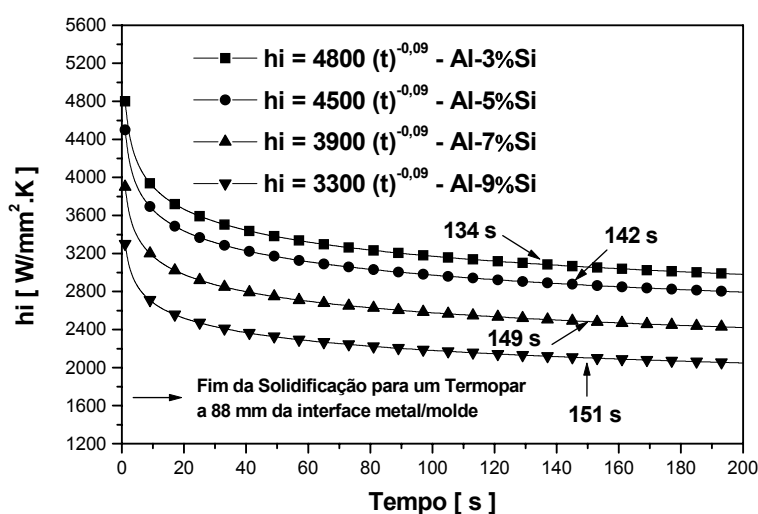


Figura 2. Comportamento de  $h_i$  com o tempo para as ligas Al-3%Si, Al-5%Si, Al-7%Si e Al-9%Si

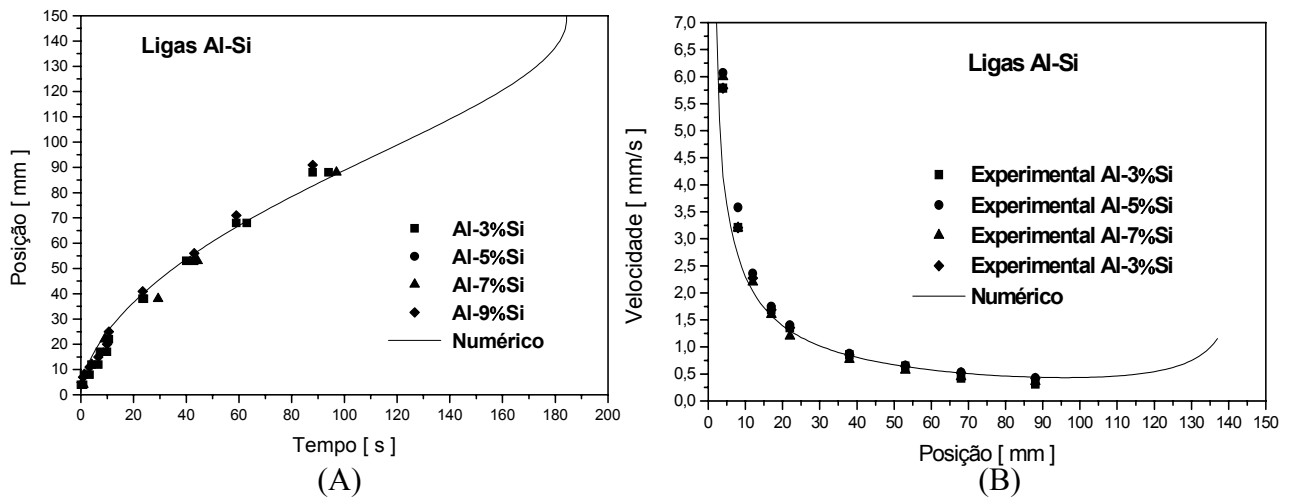


Figura 3. (A) Posição da isoterma liquidus em função do tempo e (B) Variação da velocidade de crescimento da isoterma liquidus experimental e numérico ( $V_L$ ) em função da posição (P) na interface metal/molde para as ligas Al-3%Si, Al-5%Si, Al-7%Si e Al-9%Si.

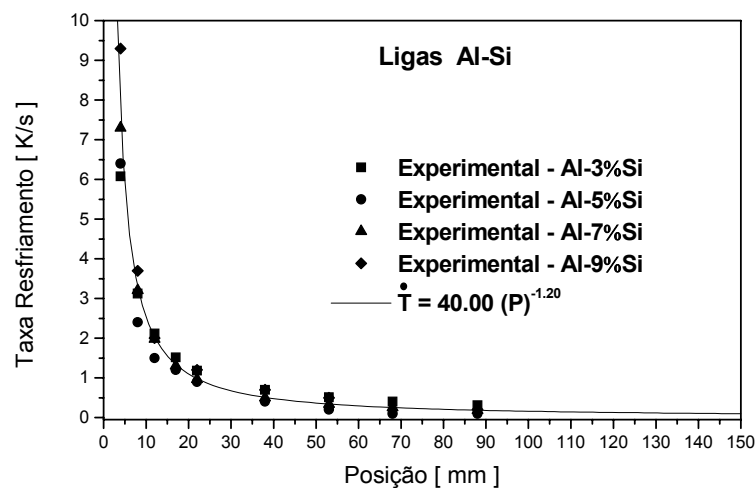
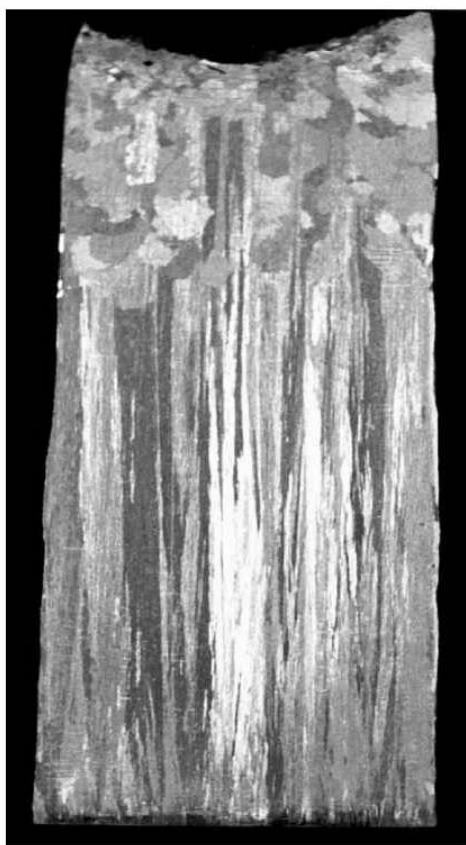
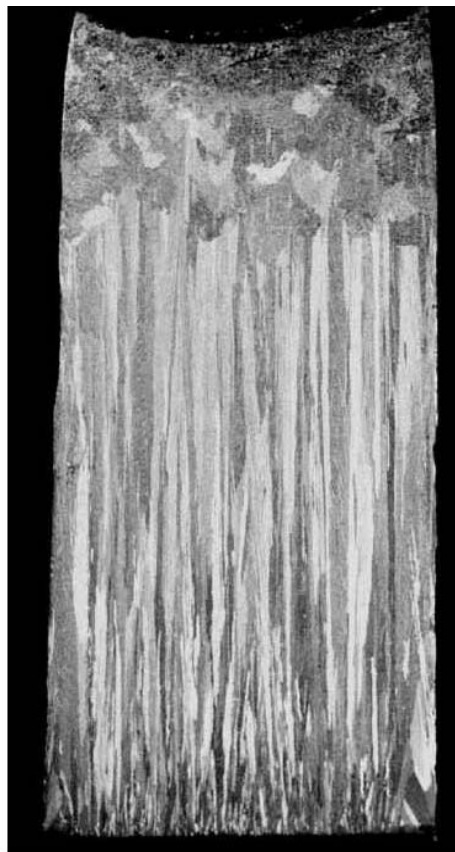


Figura 4. Variação da taxa de resfriamento  $\dot{T}_L$  em função da posição para a interface metal/molde.



(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 5. Macroestruturas: (A) Al-3%Si; (B) Al-5%Si, (C) Al-7%Si e (D) Al-9%Si, molde de aço inoxidável. Aumento 0,70X.

## CONCLUSÃO

Os resultados experimentais obtidos neste trabalho, juntamente com as simulações desenvolvidas com um método numérico permitiram a quantificação de parâmetros térmicos da solidificação de significativa influência sobre aspectos da macroestrutura dos lingotes. Neste sentido, verificou-se que a transição colunar/equiaxial, para as ligas estudadas depende de uma taxa crítica de resfriamento, a exemplo do observado em trabalho prévio com ligas de Al-Cu e Sn-Pb.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da FAPESP e CNPq.

## REFERENCES

- [1] S. C. Flood and J. D. Hunt : in *Metals Handbook*, vol. 15, ASM International, Materials Park, OH, 1988, pp. 130-36.
- [2] M. H. Burden and J. D. Hunt: *Metall. Trans. A*, 1975, vol. 6A, pp. 240-41.
- [3] C. Y. Wang and C. Beckermann: *Metall. Mater. Trans. A*, 1994, vol. 25A, pp.1081-93.
- [4] L. A. Tarshis, J. L. Walker and J. W. Rutter: *Metall. Trans.* , 1971, vol. 2, pp.2589-97.
- [5] R. D. Doherty, P. D. Cooper, M. H. Bradbury and F. J. Honey: *Metall. Mater. Trans. A*, 1977, vol. 8A, pp.397-402.
- [6] S. Witzke and J. P. Riquet: *Acta Metall.*, 1982, vol. 30, pp. 1717-22.
- [7] V. K. Suri, N. El-Kaddah and J. T. Berry: *AFS Trans.*, 1991, vol. 99, pp. 187-91.
- [8] H. Fredriksson and A. Olsson: *Mat. Sci. Tech*, 1986, vol. 2, pp. 508-16.
- [9] R. B. Mahapatra and F. Weinberg: *Metall. Trans. B*, 1987, vol. 18B, pp.425-32.
- [10] I. Ziv and F. Weinberg: *Metall. Trans. B*, 1989, vol. 20B, pp. 731-34.
- [11] A. E. Ares and C. E. Schvezov: *Metall. Mater. Trans. A*, 2000, vol. 31A, pp. 1611-25.
- [12] Ch-A. Gandin: *Acta Mater.*, 2000, vol. 48, pp. 2483-501.
- [13] J. D. Hunt: *Mater. Sci. Eng.*, 1984, vol. 65, pp. 75-83.
- [14] S. C. Flood and J. D. Hunt: *Appl. Sci. Res.*, 1987, vol. 44, pp. 27-42.
- [15] S. C. Flood and J. D. Hunt: *J. Cryst. Growth.*, 1987, vol. 82, pp. 543-51.
- [16] S. C. Flood and J. D. Hunt: *J. Cryst. Growth.*, 1987, vol. 82, pp. 552-60
- [17] C. Siqueira e A. Garcia: *56<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM* 2001, pp.352-59.
- [18] J. A. Spim and A. Garcia: *Mater. Sci. Eng. A*, 2000, vol. 277, pp. 198-05.
- [19] J. A. Spim and A. Garcia: *Numerical Heat Transfer-B*, 2000, vol. 38, pp. 75-92.
- [20] C. A. Santos, J. M. V. Quaresma and A. Garcia: *J. Alloys Compounds*, 2001, vol. 319, pp. 174-86.
- [21] J. M. V. Quaresma, C. A. Santos and A. Garcia: *Metall. Mater. Trans.*, 2000, vol. 31A, pp. 3167-78.

# **Solidification Parameters Influence During The Columnar-to-Equiaxed Transition in AL-Si Alloys**

M. D. Peres<sup>1</sup>, C. A. Siqueira<sup>2</sup> and A. Garcia<sup>2</sup>

1 - Department of Civil Construction, Federal University of Pará –UFPA  
PO Box 8611 - 66075-110 - Belém, PA, Brazil

2 - Department of Materials Engineering, State University of Campinas –UNICAMP  
PO Box 6122 - 13083-970 – Campinas, SP, Brazil

## ***Abstract***

The macrostructure of cast ingots can be characterized by either a completely columnar structure or an equiaxed structure, depending on alloy composition and solidification conditions. A more complex structure, typical of solidification in molds of high heat diffusivity, like chill and cooled molds is composed by, both structural forms. This mixed mode of solidification occurs when equiaxed grains can nucleate and grow ahead of the columnar front provoking the columnar to equiaxed transition. The prediction of such transition is of great interest for the evaluation and design of the mechanical properties of casting products. On the other hand, the anisotropy of mechanical properties, typical of columnar structures, enables technological applications of great importance like growing of blades for jet engines.

In the present work an experimental analysis concerning the columnar to equiaxed transition has been developed with Al-3%Si, Al-5%Si, Al-7%Si e Al-9%Si alloys directionally solidified in cooled molds. A theoretical/experimental analysis has been performed to quantify the solidification thermal parameters. It has been observed that the columnar/equiaxed transition occurs during solidification when a critical cooling rate is attained, i.e., for values lower than this critical one, an equiaxed growth is expected to prevail.

## ***Key Words***

Columnar-to-Equiaxed Transition and Solidification