



**VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DA CORRELAÇÃO ENTRE AS TAXAS  
E AS DIREÇÕES DE RESFRIAMENTO EM SISTEMAS DE GEOMETRIA  
CILÍNDRICA COM A ESTRUTURA BRUTA DE FUSÃO DA LIGA  
Al-3,5%Cu**

**Alexandre Pitol Boeira**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Departamento de Metalurgia – Laboratório de  
Fundição – Av. Bento Gonçalves, 9500 - CEP 91501-970 - Porto Alegre – RS – Brasil  
pitol@vortex.ufrgs.br

**Vitor Hugo Perdomo Coral**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Departamento de Metalurgia – Laboratório de  
Fundição

**Carlos Raimundo Frick Ferreira**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Departamento de Metalurgia – Laboratório de  
Fundição – frick@vortex.ufrgs.br

**Jaime Alvares Spim**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Departamento de Metalurgia – Laboratório de  
Fundição – spim@vortex.ufrgs.br

**Resumo:** *O conhecimento da formação de estruturas metalúrgicas obtidas após a solidificação de peças da indústria de fundidos, é fundamental para a compreensão do comportamento mecânico, térmico e elétrico dos produtos, além de permitir a melhoria da qualidade dos fundidos. Nas últimas duas décadas, inúmeros estudos têm concentrado esforços na obtenção de relações entre o sistema global de solidificação (tipo de molde, metal, resfriadores, posicionamento de massalotes e canais de alimentação, etc.) com a qualidade final do produto.*

*O presente trabalho tem como objetivo relacionar a formação da estrutura bruta de fusão da liga Al-3,5%Cu com as taxas de resfriamento, velocidades de solidificação e direção do fluxo de calor envolvido em sistemas cilíndrico. Para isto, compara-se os resultados gerados por um modelo numérico baseado na técnica de diferenças finitas, com a análise térmica de curvas de resfriamento experimentais e com a análise metalográfica dos lingotes solidificados. O sistema de solidificação composto por um conjunto de moldes de areia, cobre e aço, acopladas em bases de areia, cobre e aço, permitiu o estudo de diferentes taxas e direções de crescimento da frente de solidificação. Os resultados indicam uma correlação entre taxas e direções de resfriamento do sistema em questão, com as estruturas observadas.*

**Palavras-chave:** *solidificação, modelo numérico, análise térmica, estrutura de fusão.*

## **INTRODUÇÃO**

A constante busca pela maximização da produção, resumida na melhora da qualidade e produtividade, exige um perfeito equacionamento do comportamento das variáveis que interferem diretamente no processo. Logicamente, a qualidade final de produtos oriundos de processos que se

valem de operações de fusão e solidificação também depende do entendimento de suas variáveis intrínsecas. A compreensão da evolução e comportamento dos mecanismos de formação das diferentes estruturas metalúrgicas torna-se um fator primordial uma vez que, destaca-se em relação ao custo agregado ao produto, pois numa análise geral, define a necessidade e tipo de trabalho termo/mecânico posterior. As microestruturas são uma relação estratégica entre o processamento e o comportamento dos materiais e seu controle é essencial para qualquer atividade de processamento (Boettinger, 2000). Desta definição, conclui-se que, tanto a qualidade, como o custo final, estão intimamente relacionados com a estrutura obtida após a solidificação, ou estrutura bruta de fusão. Na busca pelo entendimento do mecanismo de solidificação, determinam-se algumas variáveis importantes, tais como: tipo e característica do molde, liga de trabalho, parâmetros de transferência de calor e massa, posicionamento de canais e massalotes e adições de elementos de liga ao banho. Do ponto de vista térmico, estas variáveis compilam-se em parâmetros das condições de transferência de calor global, induzindo assim, o relacionamento direto entre evolução microestrutural e taxas térmicas características, tais como solidificação e resfriamento. Conforme Velasco et al (1999), a evolução microestrutural em um fundido depende da taxa de solidificação e, já que a taxa de solidificação depende da taxa de fluxo de calor na interface metal/molde, é possível estabelecer uma relação direta entre a microestrutura e o tipo e característica do molde empregado para produzir a peça. Porém, estas condições de transferência de calor entre a peça e o molde são complexas, pois suas condições de contorno variam significativamente com o tempo. Segundo Bellet et al (1996), esta complexidade torna a modelagem numérica uma poderosa ferramenta na previsão do estado final da peça. Técnicas de modelagem numéricas e analíticas, bem desenvolvidas nas últimas duas décadas (Santos, 2001), têm auxiliado no entendimento do fenômeno de transferência de calor envolvido num processo de solidificação, ou seja, na visualização dos padrões de resfriamento em sistemas de solidificação.

Dentre os diferentes parâmetros que compõem o fenômeno de transferência de calor que ocorre num sistema de fundição (metal/molde/ambiente), destaca-se o coeficiente de transferência de calor newtoniano entre o metal e o molde,  $h_i$ . Este coeficiente associa parâmetros físicos e térmicos, tais como: coeficiente de expansão térmica, superaquecimento, propriedades térmicas da coquilha ou molde e espessura do *gap* de ar entre o metal que se solidifica e o molde ou coquilha (Mahallawy, 1993). A literatura mostra uma drástica escassez de informações referentes ao desenvolvimento deste *gap* de ar. Segundo Sergey (2001) e Spim (2000), a espessura do *gap* de ar varia em função do tempo em que o metal se solidifica e depende da geometria, tamanho e condições superficiais do molde, do superaquecimento e do fluxo de líquido no vazamento e preenchimento do molde. A influência da evolução do *gap* de ar na microestrutura aumenta na medida que se utilizam sistemas que envolvam altos valores de difusividade térmica tais como, fundição sobre pressão, molde permanente e fundição em coquilha (Santos, 2001).

No presente trabalho, objetiva-se correlacionar numérica e experimentalmente as condições (taxas e direções) de resfriamento com a estrutura bruta de fusão da liga Al-3,5%Cu em sistemas de coquilhas e moldes cilíndricos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O material de trabalho, liga Al-3,5%Cu, foi obtido da fusão de cobre e alumínio, ambos comercialmente puros, em um forno a indução com cadinho de grafite. O vazamento da liga nas coquilhas e moldes foi realizado através do auxílio de um cadinho de vazamento pré-aquecido (500°C). Na Tabela (1) são descritas algumas propriedades termo-físicas da liga Al-3,5%Cu. A análise química da liga foi realizada em um espectrômetro de emissão ótica.

Na Figura (1) visualiza-se a geometria dos moldes. O controle das taxas e direções de extração de calor, viabilizado pelo acoplamento de moldes cilíndricos de diferentes materiais as suas respectivas bases, possibilitou condições de extração de calor unidirecional e bidirecional. Em relação as taxas diferenciadas de extração de calor, alcanças pelo emprego de materiais

diferenciados na construção das bases e dos moldes, utilizou-se Areia, 50/60 AFS seca, obtida pelo processo de cura frio PEP SET® e catalisador 3595, Aço AISI1020 e Cobre Eletrolítico (99,45%). A Tabela (2) mostra algumas propriedades térmicas e físicas dos materiais empregados na construção dos moldes e bases.

Tabela 1. Propriedades termo-físicas da liga Al-3,5%Cu (Metals, 1998; Pehlke, 1982)

Calor específico do líquido J/kg.K	1.059
Calor específico do sólido J/kg.K	1.092
Densidade do líquido kg/m <sup>3</sup>	2.480
Densidade do sólido kg/m <sup>3</sup>	2.680
Condutividade térmica do líquido W/m.K	85
Condutividade térmica do sólido W/m.K	193
Calor Latente J/kg.K	381.900
Temperatura solidus°C	548
Temperatura liquidus°C	645

Tabela 2. Propriedades termo-físicas dos materiais dos moldes e bases ( Spim, 2000; Metals, 1998)

	Areia	Cobre	Aço Baixo Carbono
Condutividade Térmica (W/m.K)	12,55	397,48	50,2
Calor Específico (J/kg.K)	1.050	419	490
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	1.540	8.960	7.850
Difusividade (m <sup>2</sup> /s)	3e-7	9,8e-5	1,2e-5

Em relação as curvas experimentais, utilizou-se termopares Chromel/Alumel estrategicamente colocados nos moldes e nas bases, conforme mostra a Fig. (1).

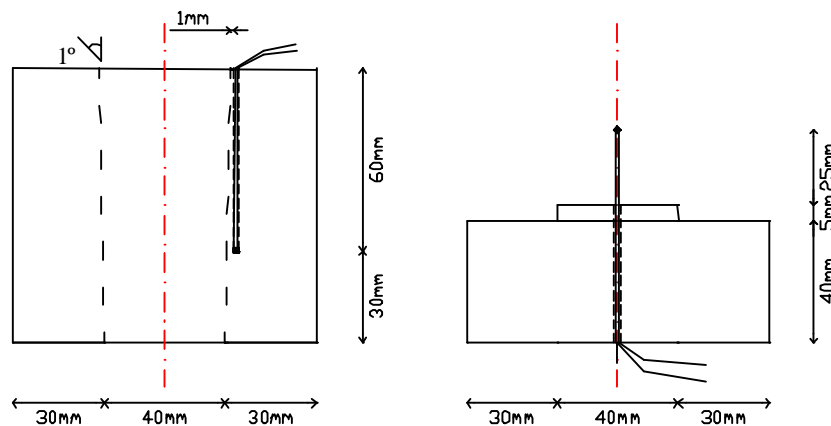


Figura 1: Desenho esquemático do molde e da base, com seus respectivos termopares

O modelo numérico empregado na simulação dos sistemas é baseado na resolução numérica da equação geral de transferência de calor em regime transitório, dada pela Eq. (1), Spim (2000).

$$\rho.c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial T^2}{\partial y^2} + \frac{\partial T^2}{\partial z^2} \right) + \dot{q} \quad (1)$$

onde:

- $\rho$  = densidade do material [ $\text{kg/m}^3$ ];
- $c$  = calor específico do material [ $\text{J/kg.K}$ ];
- $T$  = temperatura [ $\text{K}$ ];
- $x, y$  e  $z$  = coordenadas do espaço vetorial [ $\text{m}$ ];
- $k$  = condutibilidade térmica do material [ $\text{W/m.K}$ ];
- $\dot{q}$  = o termo associado a liberação de calor latente proveniente da transformação de fase e varia em função da fração solidificada, conforme Eq. (2).

$$\dot{q} = \rho \cdot L \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (2)$$

sendo:

- $L$  = calor latente do material [ $\text{J/kg}$ ];
- $f_s$  = fração sólida [%], que varia de acordo com a equação de Scheil;
- $t$  = tempo [ $\text{s}$ ];

As condições de contorno assumidas são:

- Desconsideração da dinâmica de vazamento e enchimento;
- Ausência de correntes convectivas no metal líquido;
- Fluxo bidirecional de calor;
- Coeficiente de transferência de calor newtoniano constante;
- Propriedades termo-físicas da liga, no intervalo de solidificação, variando de acordo com a equação de Scheil;
- Propriedades diferentes no metal sólido e líquido;
- Ausência de difusão no sólido;
- Mistura completa no líquido.

Da inserção da Eq. (2) e das condições de contorno na Eq. (1), obtém-se:

$$\rho \left( c - L \frac{\partial f_s}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

A expansão dos termos da Eq. (3) em diferenças finitas resulta:

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} \left[ \rho \left( c - L \frac{\partial f_s}{\partial T} \right) \right] = k \left\{ \left[ \frac{(T_{i+1,j}^{n+1} - 2 \cdot T_{i,j}^{n+1} + T_{i-1,j}^{n+1})}{\Delta x^2} \right] + \dots + \left[ \frac{(T_{i,j+1}^{n+1} - 2 \cdot T_{i,j}^{n+1} + T_{i,j-1}^{n+1})}{\Delta y^2} \right] \right\} \quad (4)$$

onde  $n$  representa o instante de tempo e  $n+1$  o incremento  $\Delta T$ .

As curvas experimentais foram filtradas através da utilização da média móvel quadrática e transferidas para uma planilha de cálculos. Os lingotes, após solidificados e resfriados, foram cortados longitudinalmente, lixados e atacados com água régia fluorada.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tab. (3) mostra o resultado da análise química realizada na liga, comprovando a adequação desta com a liga proposta de Al-3,5%Cu. Na Tab. (4) são descritos alguns parâmetros experimentais do vazamento, dos resultados macrográficos e os valores de coeficientes de transferência de calor newtoniano utilizados no programa numérico. Também determina os três diferentes sistemas de acoplamentos utilizados.

Tabela 3: Composição química dos lingotes

Sistema	1	2	3
Corrida	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>
Al	96,3	96,3	96
Cu	3,3	3,3	3,7
Si	0,1	0,1	0,1
Fe	0,3	0,3	0,2
Mn	0,01	0,01	<0,01
Mg	0,01	0,01	<0,01
Zn	0,02	0,02	0,02
Ni	0,02	0,02	<0,01
Cr	0,02	0,02	<0,05
Pb	<0,01	<0,01	<0,01
Sn	<0,01	<0,01	0,01
Ti	<0,005	<0,005	<0,005
P	0,001	0,001	0,001

Tabela 4: Parâmetros experimentais e configurações características das análises macrográficas dos lingotes.

Sistema	1	2	3
Molde	Areia	Areia	Cobre
Base	Areia	Aço	Cobre
Coefficiente de transferência de calor metal/molde ( $W/m^2K$ )	100	100	2000
Coefficiente de transferência de calor metal/base ( $W/m^2K$ )	100	500	2000
Temperatura de Vazamento ( $^{\circ}C$ )	762	762	752
Direção de avanço dos grãos colunares	-	vertical	horizontal

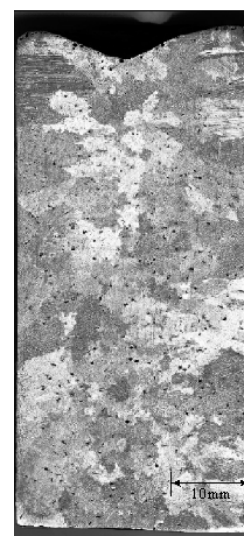
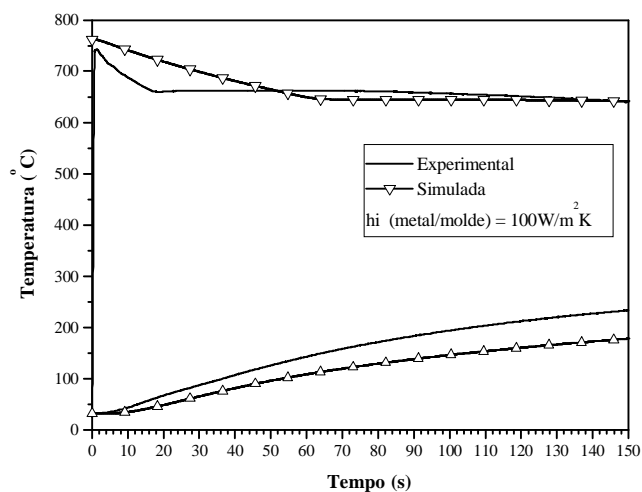


Figura 2: Resultado experimental e simulado mostrando as curvas de resfriamento e aquecimento do metal e do molde, respectivamente ao sistema 1, molde e base de areia, bem como, a estrutura bruta de fusão resultante.

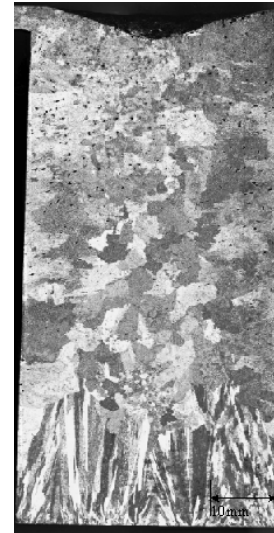
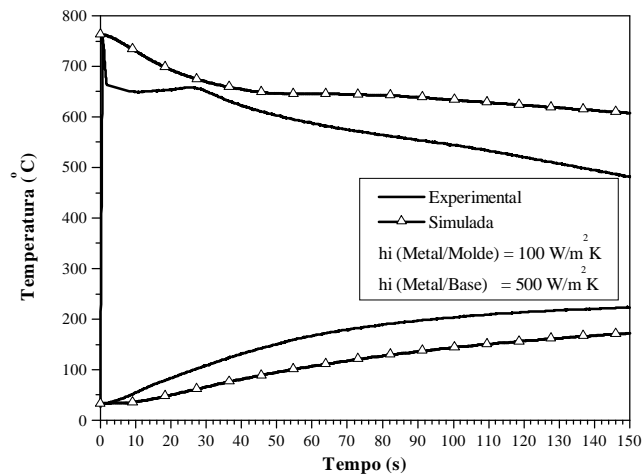


Figura 3: Resultado experimental e simulado mostrando as curvas de resfriamento e aquecimento do metal e do molde, respectivamente ao sistema 2, molde de areia e base de aço, bem como, a estrutura bruta de fusão resultante.

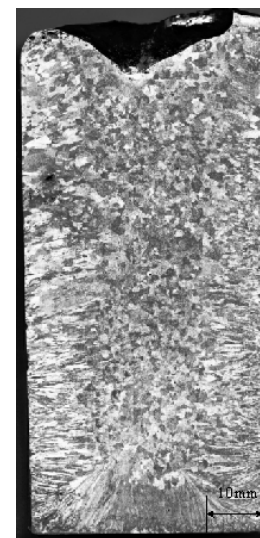
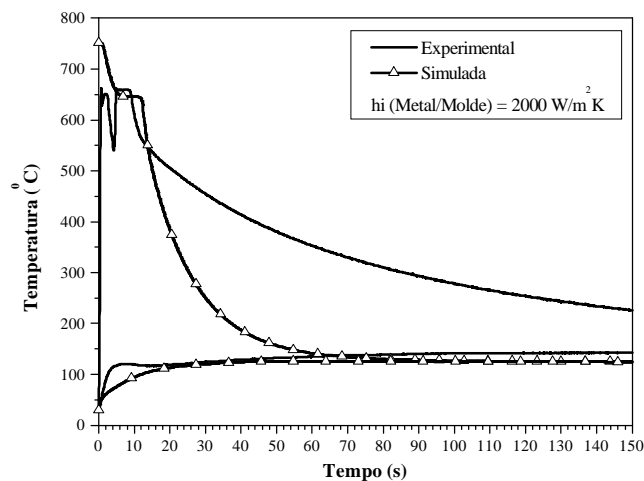


Figura 4: Resultado experimental e simulado mostrando as curvas de resfriamento e aquecimento do metal e do molde, respectivamente ao sistema 3, molde e base de cobre, bem como, a estrutura bruta de fusão resultante.

Na análise das curvas da Fig. (2), observa-se que o resultado do processamento numérico apresentou-se bastante satisfatório a partir de um determinado instante após o vazamento, aproximadamente 50 segundos, para o termopar no interior da cavidade do molde. Porém, esta boa concordância não se verifica no caso do termopar inserido na coquilha. Interessante observar que nas curvas obtidas no sistema constituído inteiramente de cobre, ou seja, situação extrema de velocidade de extração de calor, sistema 3, ocorre justamente o contrário da situação descrita anteriormente, até um determinado instante do vazamento, aproximadamente 13s, a análise numérica se mostra bastante coerente com a experimental porém, a curva resultante da simulação numérica decai drasticamente comparada ao decaimento suave da curva experimental obtida pelo

termopar inserido no seio do líquido. Para o termopar inserido na coquilha, o confronto da curva simulada com a experimental mostrou-se bastante coerente na evolução temporal. Na Fig. (3), sistema 2, molde de areia e base de aço, ocorre uma situação aproximadamente intermediária entre os sistemas 1 e 3.

Nas medições referentes ao termopar localizado no centro do líquido no molde de areia, Fig. (2), o elevado desvio atingido pela curva simulada em relação a curva experimental nos instantes iniciais, 50s, pode estar relacionado as baixas taxas de extração de calor envolvidas em sistemas de moldes de areia e ao fato de que o modelo numérico empregar um valor constante para o coeficiente de transferência de calor,  $100 \text{ W/m}^2\text{.K}$ , e desconsiderar a dinâmica de vazamento. Ou seja, o modelo numérico considera a solidificação progressiva em todo o percurso e, na prática, sabe-se que a solidificação em moldes de areia é extensiva, conforme visualizado na macrografia do lingote, na Fig.(2). Já no sistema 3, Fig. (4), observa-se que o modelo numérico representa de forma coerente os instantes iniciais. Esta adequação inicial esta provavelmente relacionada ao fato de que a solidificação ocorrida neste sistema é progressiva, conforme visto na macroestrutura da Fig. (4). O desvio ocorrido a partir de um dado instante mostra que a formação e evolução de um *gap* de ar na interface de contato metal/molde reduziu drasticamente a eficiência de extração de calor do sistema, atingindo várias centenas de graus Celsius de diferença entre o experimental e o simulado no tempo aproximado de 50s. Isto é satisfatório, uma vez que, o modelo considera o coeficiente de transferência de calor newtoniano constante ao longo de toda a solidificação, explicando assim, o decaimento acentuado da curva simulada em relação a experimental. Já no sistema 2, Fig. (3), um volume de controle mais adequado, no caso transferência de calor bidirecional, tornou o modelo mais representativo.

## CONCLUSÕES

O modelo numérico mostrou-se coerente com as curvas de resfriamento obtidas experimentalmente e com as macroestruturas observadas nos lingotes. Esta associação viabiliza a previsão da estrutura bruta de fusão da liga utilizada neste trabalho através da correlação entre as taxas e as direções de resfriamento, traduzidas aqui, em diferentes tipos de materiais de molde. No incremento da qualidade de resposta da simulação numérica, torna-se necessária a inserção de condições de cálculo que considerem o coeficiente de transferência de calor newtoniano variável ao longo do resfriamento e a dinâmica de vazamento e enchimento da cavidade do molde.

## REFERÊNCIAS

- ASM International, *Metals Handbook*, V.15, Casting, Metals Park, OH, 1998
- Bellet, M., Decultieux, F., Ménaï, M., Bay, F., Levallant, C., Chenot, J.-L., Schmidt, P., Svensson, I.L., 1996, "Thermomechanics of the cooling stage in casting processes: three-dimensional finite element analysis and experimental validation", *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 27B, pp. 81-100.
- Boettinger, W.J., Coriel, S.R., Greer, A.L., Karma, A., Kurz, W., Rappaz, M., Trivedi, R., 2000, "Solidification Microstructures: Recent Developments, Future Directions", *Acta Materialia*, Vol. 48, pp. 43-70.
- El-Mahallawy, N.A., Taha, M.A., Assar, A.M., Hamouda, R.M., 1993, "Aluminium and Al-4.5Cu alloy end chill: structural observation and heat flow analysis", *Materials Science and Technology*, Vol. 9, pp. 691-697.
- Pehlke, R.D., 1982, "Summary of Thermal Properties for Casting Alloys and Mold Materials", University of Michigan.
- Santos, C.A., Quaresma, J.M.V., Garcia, A., 2001, "Determination of transient heat transfer coefficients in chill mold castings", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 319, pp. 174-186.
- Sergey, S.V., Paolucci, S., 2002, "Numerical simulation of filling and solidification of permanent mold castings", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 22, pp. 229-248.

- Spim Jr. J.A., Garcia, A., 2000, "Numerical analysis of solidification of complex shaped bodies: coupling of mesh elements of different geometries". Materials Science and Engineering A, Vol. 277, pp. 198-205.
- Velasco, E., Talamantes, J., Cano, S., C., Valtierra, S., Mojica, J.F., Colas, R., 1999, "Casting-chill interface heat transfer during solidification of na aluminium alloy". Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 30B, pp. 773-778.

## **DIREITOS AUTORAIS**

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## **EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE CORRELATION BETWEEN THE RATES AND THE DIRECTIONS OF COOLING IN CYLINDRICAL GEOMETRY SYSTEMS WITH SOLIDIFICATION CAST STRUCTURE OF THE Al-3,5Cu ALLOY.**

### **Alexandre Pitol Boeira**

Federal University of Rio Grande do Sul – Department of Metallurgy - Foundry Laboratory - Av. Bento Gonçalves, 9500 - CEP 91501-970 - Porto Alegre – RS – Brazil - pitol@vortex.ufrgs.br

### **Vitor Hugo Perdomo Coral**

Federal University of Rio Grande do Sul – Department of Metallurgy - Foundry Laboratory

### **Carlos Raimundo Frick Ferreira**

Federal University of Rio Grande do Sul – Department of Metallurgy - Foundry Laboratory  
frick@vortex.ufrgs.br

### **Jaime Alvares Spim**

Federal University of Rio Grande do Sul – Department of Metallurgy - Foundry Laboratory  
spim@vortex.ufrgs.br

**Abstract:** *It is fundamental the understanding of the metal structure formation obtained after the casting solidification in the casting industry. The mechanical, thermal and electric behavior of the products depends on the way how the castings are produced. In the last two decades, a lot of studies have concentrate efforts to obtain the relationships among the global system of solidification (mold type, metal, coolers, riser and gating position, etc.) with the final quality of the product.*

*The present work aims relating the formation of the solidification cast structure of Al-3.5%Cu alloy with cooling rates, solidification speed and heat flux path involved in cylindrical systems. Therefore, the results generated by a numerical model, based on the finite difference technique are compared to the thermal analysis of experimental results and with metallography analysis of the solidified ingots. The solidification system is composed by a group of sand, copper and steel molds, coupled in sand, copper and steel bases. It allowed the study of different rates and directions of the solidification front. The results check the existence of critical values of the growth speed and cooling rates in the transitions of the observed structures.*

**Keywords:** *solidification, numerical model, thermal analysis, solidification cast structure.*