


Determinacao Numerico Experimental do Coeficiente de Transferencia de Calor na Interface Metal Molde

Toni Lozano

Related papers

[Download a PDF Pack](#) of the best related papers 



[Análise Dos Modelos Utilizados Para a Previsão Dos Parâmetros Microestruturais Obtidos Du...](#)
Rodrigues Barbosa

[PARÂMETROS TÉRMICOS, MACROESTRUTURA E MICROESTRUTURA NA SOLIDIFICAÇÃO DIRECIONAL...](#)
noe garcia cruz

[ANÁLISES TEÓRICA E EXPERIMENTAL DA SOLIDIFICAÇÃO DA LIGA EUTÉTICA SN-MG EM DIFERENTES ...](#)
Clarissa Barros da Cruz

Determinação Numérico/Experimental do Coeficiente de Transferência de Calor na Interface Metal / Molde Durante a Solidificação do Aço Inoxidável AISI 304

Melo, M. L. N. M.¹, Santos, C.A.², Penhalber, C.A.L¹

1) Universidade São Francisco (USF) Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Rua Alexandre de Rodrigues Barbosa, 45 CEP 13251-900 Itatiba, SP,
e-mail: mirian.melo@saofrancisco.edu.br, penhacl@uol.com.br

2) Departamento de Engenharia de Materiais, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) – Campinas, SP
e-mail: alex@fem.unicamp.br

RESUMO

A solidificação de metais, envolvida nos processos de fundição, pode ser definida como um processo de extração de calor em regime transiente, com mudança de fase, no qual uma 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 extração de calor durante o processo depende, basicamente, das propriedades térmicas do metal, das características do molde (material, geometria 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). Com o intenso desenvolvimento observado na área de computação, os métodos numéricos têm adquirido uma crescente importância na análise dos processos de solidificação aplicada à fundição de metais e suas ligas. Entre os vários parâmetros necessários para a implementação de um modelo para simulações computacionais, um dos que têm recebido maior atenção por parte de pesquisadores é a determinação dos valores confiáveis para o coeficiente transitório de transferência de calor na interface metal/molde (h_i). Este trabalho tem como objetivo a aplicação do método de determinação de h_i baseado em dados experimentais obtidos da microestrutura bruta de solidificação, como os espaçamentos interdendríticos, em um aço inoxidável AISI 304 solidificado unidirecionalmente em um molde de cobre refrigerado. A confiabilidade e precisão do método empregado foi comprovada com a comparação dos resultados obtidos e de resultados determinados pelo método da comparação de perfis térmicos numéricos e experimentais, também conhecido como método inverso, para a determinação do coeficiente de transferência de calor para o Al-4,5% Cu. Neste método a temperatura calculada para a interface é comparada com a temperatura experimental a cada interação no tempo, e através de interações sucessivas, determina-se o valor numérico do coeficiente na interface metal/molde, o resultado é um perfil do coeficiente de transferência de calor no tempo. Os resultados obtidos pelo método utilizando informações da microestrutura bruta de fusão apresentaram ótima concordância com os valores obtidos pelo método inverso, demonstrando que o método de determinação de h_i a partir dos espaçamentos dendríticos pode ser uma alternativa viável em condições de dificuldade de monitorização térmica do metal durante o processo de solidificação.

Palavras chaves: Coeficiente de transferência de calor metal/molde, microestrutura, AISI 304, Al-4,5% Cu.

Experimental/ Numerical Determination of Heat Transfer Coefficient in Metal/Mould Interface during Stainless Steel AISI 304 Solidification

ABSTRACT

The present work focuses on the relationships between solidification thermal parameters and the dendritic microstructure of an AISI 304 stainless steel solidified in a directional solidification simulator. Experimental results concerning the solidification of Al-4.5wt% Cu alloy (thermal profile and secondary dendrite arm spacing) have permitted to compare the accuracy of the results obtained by microstructure method against inverse method for determination of the metal/mold heat transfer coefficient. In both cases, the surface of the substrates was similar. After solidification, the specimens were cut at different positions from the metal/mold interface and etched for metallographic examination. The results have shown that the microstructure method can be used in the determination of transient metal/mold interface coefficients (h_i).

Keywords: Metal/mold heat transfer coefficient, microstructure, 304 stainless steel, aluminium alloy.

1 INTRODUÇÃO

O assunto da transferência de calor interfacial metal/molde, devido a sua grande influência na taxa ou velocidade de solidificação de fundidos, tem sido alvo de estudo de inúmeros pesquisadores [1-9]. Com a formação do “gap” de ar nesta interface, o coeficiente de transferência de calor nessa região pode rapidamente decrescer, dificultando a retirada de calor na mesma e desacelerando o processo de solidificação do metal líquido. A estrutura, e conseqüentemente as propriedades de uma peça fundida dependem das condições térmicas durante a solidificação, ou mais precisamente das taxas de resfriamento, que por sua vez dependem da resistência térmica metal/molde.

Existem algumas formas para a determinação do h_i , entre elas podemos destacar:

1.1 Medidas de Dados Microestruturais e Parâmetros de Solidificação

Uma maneira indireta de determinação do coeficiente de transferência de calor metal/molde consiste no levantamento metalográfico dos espaçamentos dendríticos a partir da superfície da peça, e sua correlação com parâmetros térmicos da solidificação e leis de crescimento dendrítico. A transferência de calor na solidificação, que determina as condições de resfriamento impostas, é diretamente dependente do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde [10].

Como as microestruturas resultantes da solidificação, mais precisamente os espaçamentos dendríticos primários e secundários (λ_1 e λ_2) dependem das taxas de resfriamento (\dot{T}), é possível combinar as estruturas dendríticas com a história térmica durante o processo. Por exemplo, um aumento no coeficiente metal/molde causa uma diminuição nos valores de λ_2 , o qual pode ser também relacionado com o tempo local de solidificação ($t_{local} = t_{liq} - t_{sol}$). A obtenção do espaçamento dendrítico secundário (λ_2) permite então, determinar as condições de fluxo de calor quando o ponto analisado foi solidificado através de valores de t_{local} e, correlacioná-los com valores do coeficiente de transferência de calor metal/molde. Para o método de determinação de h_i a partir de dados microestruturais, os valores de λ_2 devem ser obtidos diretamente de medidas efetuadas nos produtos fundidos, e convertidos em valores de t_{local} através de relações existentes na literatura. Assim, os valores de h_i são ajustados no modelo matemático para que se obtenha numericamente os mesmo valores de t_{local} obtidos experimentalmente para a mesma posição considerada.

A literatura apresenta uma série de modelos de crescimento dendrítico, que pode ser expressa de forma generalizada por [11]:

$$\lambda_2 = C t_{local}^n \quad (1)$$

onde C e n são constantes dependem da liga considerada.

O tempo local de solidificação, que é o intervalo de tempo entre a passagem da ponta e a raiz da dendrita, para o caso de solidificação direcional, pode ser simplificado para:

$$t_{local} = \frac{\Delta T}{\dot{T}} \quad (2)$$

onde:

- ΔT = diferença de temperatura ou intervalo de solidificação na zona pastosa, em [°C]
- \dot{T} = taxa de resfriamento, em [°C/s]

Para as ligas em estudo foram utilizadas as constantes indicadas na Tabela 1. Desta forma, pode-se determinar o tempo local de solidificação em função dos espaçamentos secundários experimentais.

Tabela 1: Equações para o espaçamento dendrítico secundário em função do tempo local de solidificação para as ligas.

Liga	C	n	Referência
Al-4,5%Cu	7,5	0,39	Bower [12]
AISI 304	5.48	0.50	Jaime [13]

A partir de medidas experimentais de λ_2 , modelos de crescimento dendrítico do tipo da Equação 1 permitem a determinação de valores de t_{SL} . Através de comparações sucessivas entre o tempo local obtido com os espaçamentos secundários experimentais e o perfil obtido numericamente do modelo numérico, pode-se obter um coeficiente de transferência de calor variável no tempo.

1.2 Comparação de Perfis Térmicos Experimentais e Numéricos

Outra forma indireta de determinação da condutância térmica metal/molde (h_i) consiste em mapear experimentalmente as temperaturas em determinados pontos no molde e no metal durante a solidificação e, posteriormente, confrontar os perfis de temperatura ou curvas de resfriamento experimentais com as curvas teóricas simuladas através de um modelo numérico de solidificação, que tenha sido aferido previamente [14].

Esse método de determinação de h_i , em função da atual maior disponibilidade de ferramentas numéricas e de facilidades computacionais, é extremamente conveniente, principalmente quando se dispõe de um sistema de aquisição de dados para o monitoramento experimental das temperaturas. Os métodos são baseados no conhecimento de temperaturas no molde e/ou metal por meio de dados obtidos experimentalmente, os quais serão considerados condições de contorno de um modelo matemático de solidificação.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram utilizadas duas ligas metálicas sendo uma ferrosa o aço inoxidável austenítico AISI 304, cuja composição está descrita na Tabela 2 e outra não-ferrosa a liga Al-4,5% Cu. Para a realização dos experimentos, as ligas foram refundidas em fornos de indução da divisão de metalurgia do DIMET-IPT-SP, e em seguida, vazadas nas cavidades cerâmicas alojadas dentro dos dispositivos para obtenção de solidificação direcional.

Tabela 2: Composição do AISI 304 em % peso.

Cr	Ni	Mn	Si	S	C	P	Co	Mo
18,3	8,51	1,94	0,37	0,032	0,032	0,030	0,20	0,38
W	Cu	Ti	Nb	Al	B	N2	V	-
0,57	0,030	0,005	0,05	0,005	0,0012	0,082	0,078	-

Estes dispositivos foram especialmente construídos, e possuem resistências elétricas para aquecimento das laterais dos moldes cerâmicos. Na parte inferior das cavidades cerâmicas, foram posicionadas coquilhas de cobre refrigeradas à água, forçando um fluxo de calor unidirecional ascendente. A Figura 1a apresenta um esquema dos aparatos experimentais utilizados para a realização da solidificação unidirecional, e as Figuras 1b e 1c apresentam fotos. A diferença principal entre os aparatos foi a faixa de temperaturas. Para o aparato utilizado na liga não-ferrosa, as temperaturas foram de no máximo 800°C e no caso da liga ferrosa, foram de até 1500°C, portanto foram utilizadas resistências de fio kantal e de oxycarbureto de silício, respectivamente.

Para a liga Al-4,5% Cu foram obtidos perfis de temperatura, em diferentes posições a partir da coquilha, através do emprego de termopares do tipo K (diâmetro de 1,6 mm) e de um sistema de aquisição de dados computadorizado. Os termopares no metal foram posicionados a 1, 17, 31, 62 e 96 mm da interface metal/molde. Também foram posicionados termopares na parede do molde de cobre e na saída do sistema de refrigeração à água.

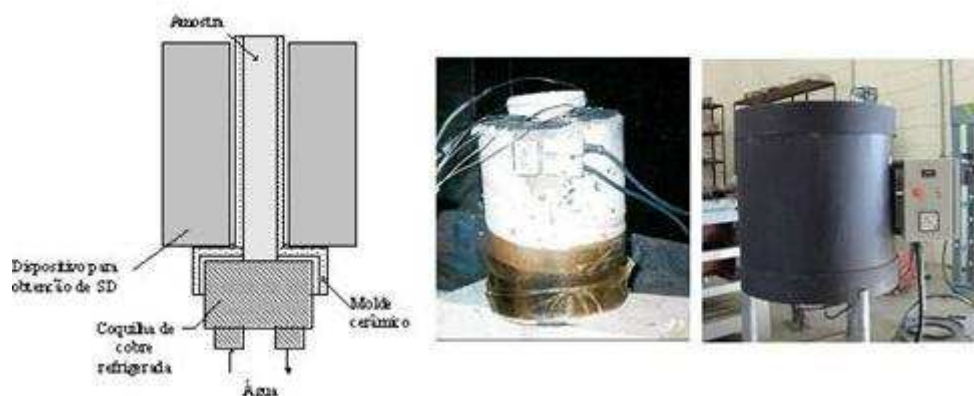


Figura 1: a) Representação esquemática do dispositivo tipo forno e sistema de refrigeração, b e c) fotos.

Os lingotes solidificados unidirecionalmente foram seccionados ao longo da seção longitudinal, sendo retirada uma fatia de uma das metades cortadas para obtenção da macroestrutura de solidificação. Da outra metade foram retiradas amostras ao longo da altura para caracterização dos espaçamentos dendríticos secundários. Vale ressaltar que para a correta determinação das posições nas amostras e conseqüentemente no lingote original, deve-se levar em consideração a porção de material retirado durante o corte das amostras na seção transversal, o que representa aproximadamente 1 mm. Para a análise dos aspectos macro e microestruturais, as amostras foram preparadas obedecendo o seguinte procedimento:

- preparação para a macrografia: utilizou-se lixas de grana 180, 220, 400 e 600, em seguida, as amostras foram submetidas a ataque com reagente Keller, para a liga Al-4,5% Cu e com o reagente Marble, para o aço AISI 304.
- preparação para micrografia: além das etapas descritas acima, foram também usadas pastas de diamante de 15, 6, 1 e 0,25 μm de granulometria e por último, em alguns casos, foi feito um polimento com sílica coloidal.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 apresenta os resultados da aquisição de temperaturas, para diferentes pontos dentro da amostra da liga Al-4,5%Cu solidificada unidirecionalmente. As Figuras 3 e 4 apresentam as macrografias e micrografias das amostras, sendo possível observar a direcionalidade das estruturas resultantes, o que comprova a eficiência dos aparatos utilizados para obtenção de solidificação direcional ascendente.

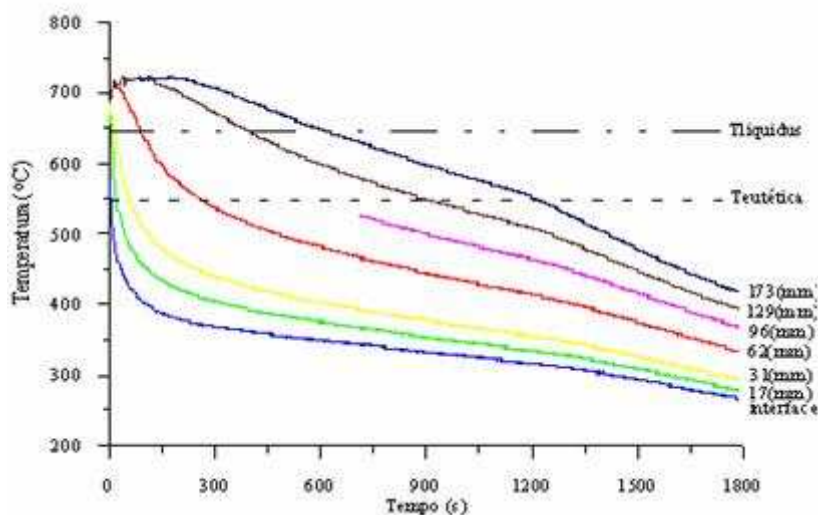


Figura 2: Curvas de resfriamento experimentais da liga Al-4,5%Cu utilizando termopares tipo K a partir da interface metal/coquilha.

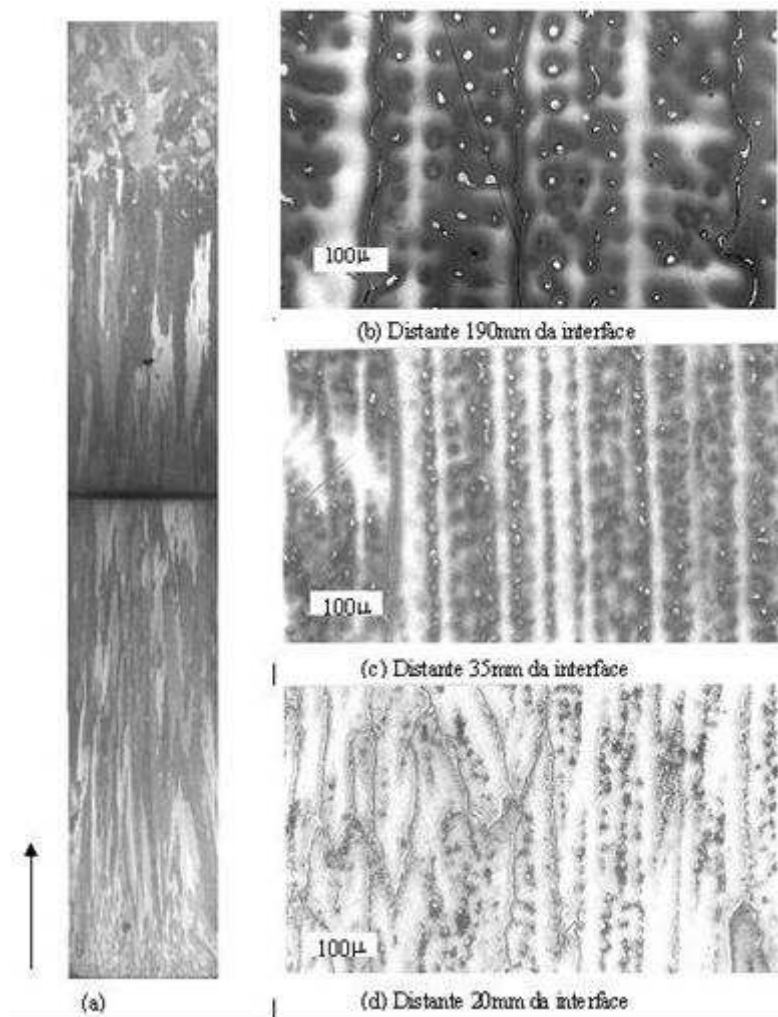


Figura 3: Liga Al-4,5% Cu solidificada direcionalmente (700°C) e resfriamento com coquilha de cobre refrigerada à água na parte inferior: a) Macrografia ataque Keller, aumento 1x. b,c,d) Corte longitudinais apresentando a variação dos espaçamentos com a distância da coquilha. Ataque Keller, aumento 100x. (a) Macrografia; (b) Distante 190mm da interface metal/coquilha; (c) Distante 35mm da interface metal/coquilha; (d) Distante 20mm da interface metal/coquilha.

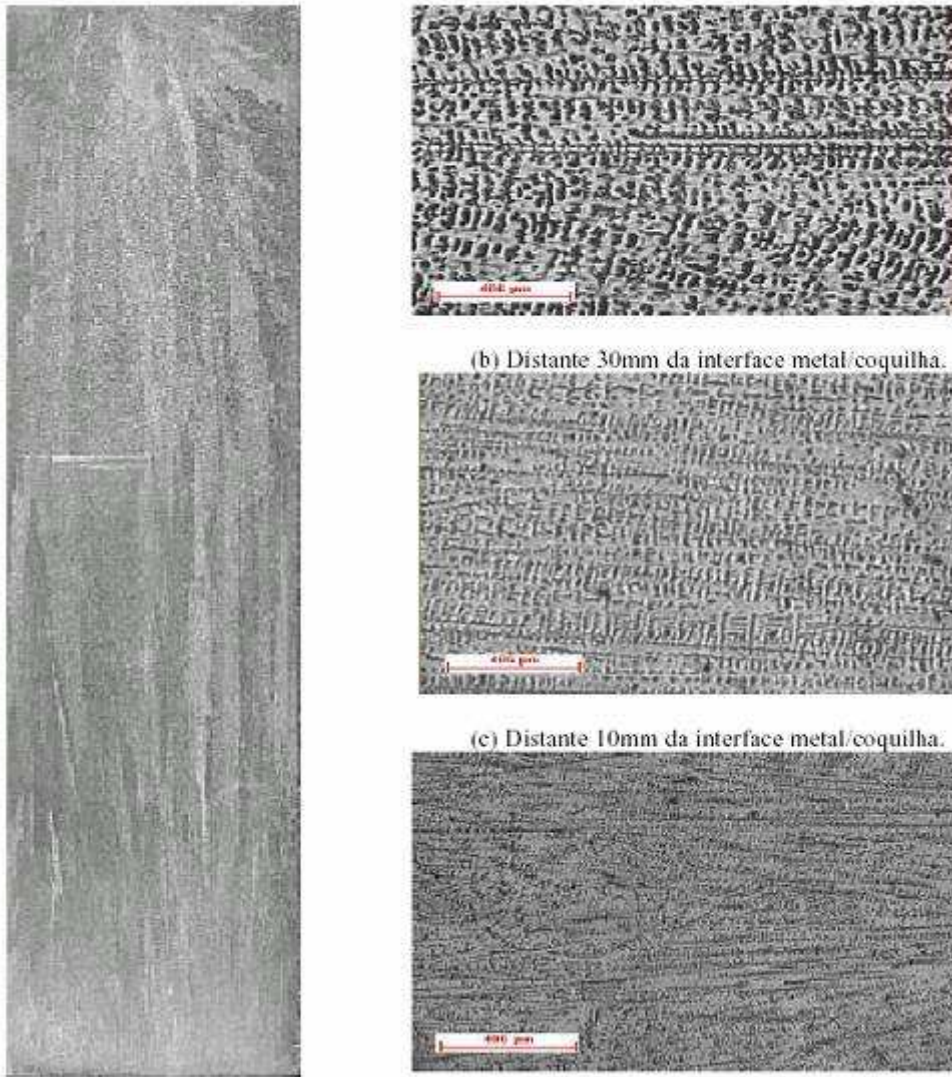


Figura 4: Aço inoxidável AISI 304 solidificado direcionalmente (1500°C) e resfriamento com coquilha de cobre refrigerada à água na parte inferior: a) Macrografia Ataque Nital, aumento 1x. b,c,d) Cortes longitudinais apresentando a variação dos espaçamentos com a distância da coquilha. Ataque Marble, Aumento 100x (a) Macrografia; (b) Distante 30mm da interface metal/coquilha; (c) Distante 10mm da interface metal/coquilha; (d) Distante 1mm da interface metal/coquilha.

As Figuras 5 e 6 apresentam as medidas experimentais do espaçamento dendrítico secundário para as duas ligas em estudo em função da distância da coquilha. As medidas dos espaçamentos dendríticos secundários foram realizadas em amostras ao longo da seção longitudinal, sendo realizadas 20 medidas em cada região ou posição.

As medidas foram efetuadas segundo norma ASTM e procedimentos relatados na literatura especializada [15-17], sendo determinados os valores médios dos espaçamentos dendríticos secundários, máximo e mínimo para cada posição. Os dados obtidos são apresentados nas Figuras 5a e 6 a em função da distância da coquilha. Com os dados experimentais dos espaçamentos secundários e as equações da Tabela 1 foram determinados os tempos locais de solidificação, sendo os resultados apresentados nas Figuras 5b e 6b.

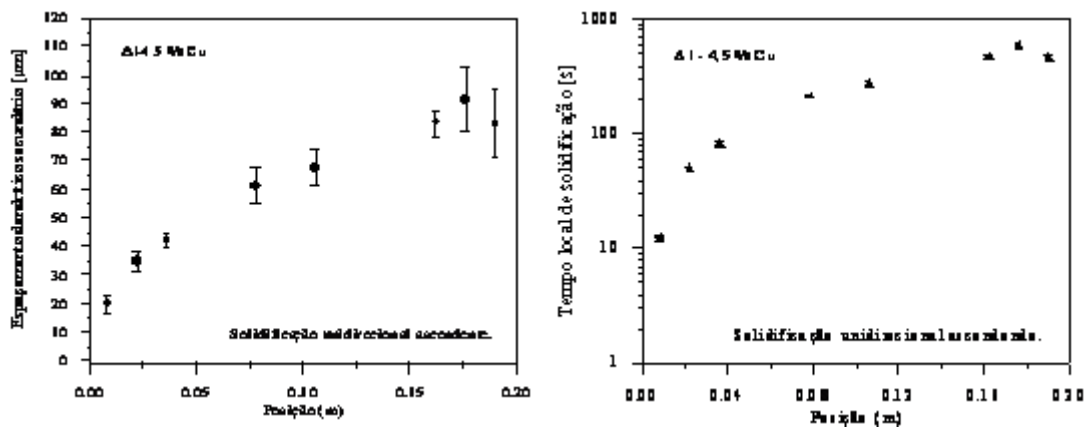


Figura 5: a) Espaços dendríticos secundários em função da distância da interface metal/molde e b) tempo local de solidificação em função da distância da coquilha utilizando a Equação 1 [12]: Al-4,5% Cu.

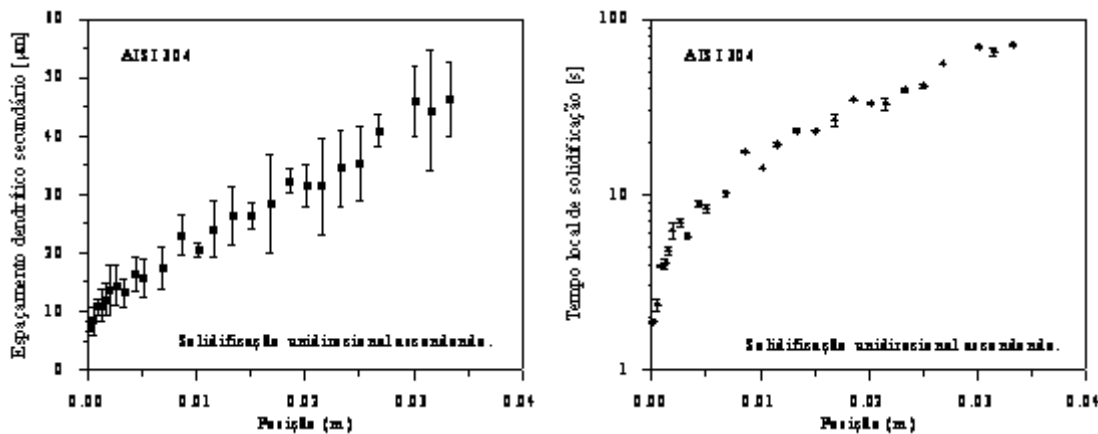


Figura 6: a) Espaços dendríticos secundários em função da distância da interface metal/molde e b) tempo local de solidificação em função da distância da coquilha utilizando a Equação 1 [13]: AISI 304.

Para a simulação da solidificação foi utilizado um modelo numérico, baseado em diferenças finitas, que utiliza o método da entalpia [18]. Este modelo considera que a solidificação é governada principalmente por condução térmica, e permite obter os perfis térmicos, as frações de sólido e as posição das isoterms *solidus* e *liquidus*. Determina também os principais parâmetros do processo de solidificação como gradientes térmicos, taxas de resfriamento, velocidade de deslocamento das isoterms e tempo local de solidificação. Permite também, através da introdução de equações adequadas, a determinação dos parâmetros estruturais como espaçamento interdendrítico primário e secundário. As propriedades termofísicas adotadas no modelo numérico para simulação da solidificação e determinação do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde estão nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3: Propriedades termofísicas da liga Al-4,5%Cu utilizadas nas simulações numéricas.

Símbolo	Propriedade	Valor	Unidade	Referência
$T_{liquidus}$	Temperatura liquidus	645	°C	[19]
$T_{solidus}$	Temperatura solidus	548	°C	[19]
k	condutividade térmica	129,77 (548°C) 92,09 (650°C)	(W/mK)	[20]
c_p	calor específico	0,47	(kJ/kgK)	[20]
L	calor latente de fusão	385000	(J/kg)	[20]
ρ	densidade	2800	kg/m ³	[19]
k	Coef. de partição do soluto	0,14	-	[19]

Tabela 4: Propriedades termofísicas do aço inoxidável AISI 304 utilizadas nas simulações numéricas.

Símbolo	Propriedade	Valor	Unidade	Referência
$T_{liquidus}$	Temperatura liquidus	1454	°C	[21]

T _{solidus}	Temperatura solidus	1399	°C	[21]
k	condutividade térmica	Função 01	(W/mK)	[22]
c _p	calor específico	Função 02	(kJ/kgK)	[22]
L	Calor latente	290.000	kJ/kg	[21]
ρ	densidade	8.000	kg/m ³	[21]
k	Coef. de partição do soluto	0,84	-	[22]

Função 01 – Condutividade térmica (W/mK)	
K= 10.717 + 0.014955 T	T =< 780
K=12.076 + 0.013213 T	780 =< T = < 1672
K=217.12 - 0.1094 T	1672 =< T = < 1727
K=8.278 + 0.0115 T	1727 =< T
Função 02 – Calor específico (kJ/kgK)	
C _p = 0.43895+ 1.98 x 10 ⁻⁴ T	T = < 353
C _p = 0.13793-5.9 x 10 ⁻⁴ T	773 =< T =<873
C _p = 0.87125- 2.5 x 10 ⁻⁴ T	873 =< T =<973

Foram realizadas simulações para as condições de solidificação direcional ascendente para as ligas Al-4,5%Cu e AISI 304 com altura da peça de aproximadamente de 200 mm com um diâmetro de 40 mm. Para a liga Al-4,5%Cu a temperatura de vazamento foi de 750°C e de aquecimento do molde de 700°C. Para o aço AISI 304 a temperatura de vazamento foi de 1630°C e de aquecimento do molde 1500°C. Todas as simulações foram com número de malhas de 200 e intervalos de tempo de 0,001 s. Como já descrito anteriormente, o perfil do coeficiente de transferência de calor no tempo é muito alto no início com uma queda abrupta com o decorrer do tempo, podendo ser expresso por equações do tipo:

$$h_i(t) = A.t^{-B} \quad (3)$$

onde a constante A esta relacionada com a altura da curva e a constante b, que deve ser menor que a unidade, com a inclinação da curva. Portanto, para a determinação do coeficiente de transferência de calor através da comparação de dados experimentais microestruturais inicialmente foram testadas quatro condições limites na Equação 3, conforme Tabela 5.

Tabela 5: Constantes A e B utilizadas como condições iniciais limites na Equação 3.

	A	B
Condição 1	10000	0,50
Condição 2	1000	0,50
Condição 3	10000	0,05
Condição 4	1000	0,05

A Figura 7 apresenta os perfis dos coeficientes de transferência de calor (h_i) para o Al-4,5% Cu obtidos através do modelo de simulação da solidificação para as quatro condições. A Figura 8 apresenta os resultados obtidos das simulações para os perfis do tempo local de solidificação para estas condições de h_i impostas. Ainda na Figura 8, são apresentados os tempos locais de solidificação obtidos dos espaçamentos experimentais através da Equação 1. Conforme pode ser observado, os perfis do tempo local são fortemente influenciados pelo h_i imposto. Como já esperado, quanto maior o h_i menor o tempo local de solidificação, e que o h_i a ser determinado está entre as condições limites 3 e 4.

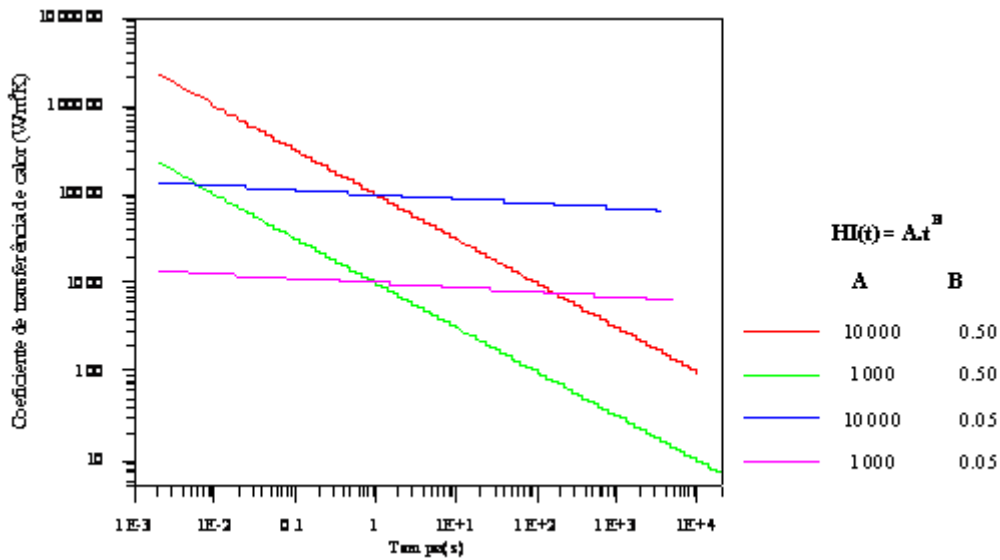


Figura 7: Simulações do coeficiente de transferência de calor na interface metal/coquilha para diferentes condições impostas através das constantes A e B.

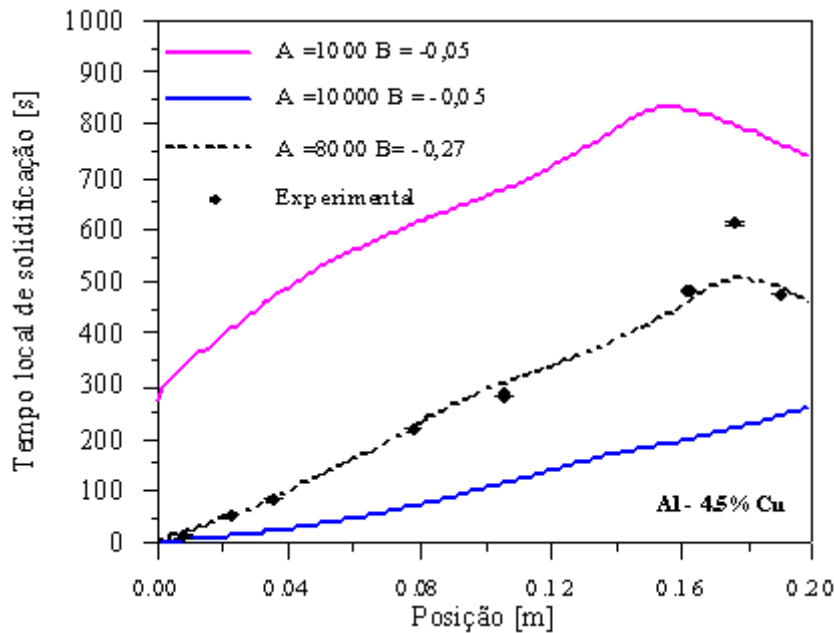


Figura 8: Variações do tempo local de solidificação em função da distância da coquilha determinados com os coeficientes de transferência impostos comparados com o experimental.

Em seguida foram realizadas interpolações sucessivas entre estes valores, ou seja, o programa foi executado com o valor médio entre $A_{máx}$ e A_{mim} , e assim sucessivamente. De forma semelhante a constante B também foi sendo interpolada até que fosse encontrado o perfil de tempo local muito próximo ao experimental, conforme Figura 8. Com este procedimento foram obtidas as constantes A e B da Equação 3, neste caso $A = 8000$ e $B = -0,27$, resultando em:

$$h_i = 8000 \cdot t^{-0,270} \quad (4)$$

Um inconveniente do método de obtenção do h_i através da comparação do tempo local é que o resultado depende da existência e da exatidão/acuidade da equação de espaçamento dendrítico secundário.

Ainda para a liga Al-4,5% Cu, foi determinado o coeficiente de transferência de calor através da comparação dos perfis térmicos. Este método consiste em introduzir o perfil experimental da posição referente a interface metal/molde, no modelo numérico. A temperatura da interface é comparada com a temperatura obtida numericamente a cada instante. Se a diferença entre as temperaturas for menor do que um ΔT admissível, o cálculo das temperaturas continua para as demais posições. Caso contrário, um novo h_i é testado até que se obtenha uma temperatura calculada dentro da faixa desejada. Como este procedimento é feito a cada iteração o resultado é um perfil de h_i em função do tempo. Os resultados obtidos através do método de comparação de

perfis térmicos foram colocados na forma da Equação 3, e os coeficientes A e B encontrados, $A = 8663$ e $B = 0,277$, resultando em:

$$h_i = 8660.t^{-0,277} \tag{5}$$

Como pode ser observado na Figura 9, os perfis dos coeficientes de transferência de calor, para a liga Al-4,5%Cu, determinados pelos dois métodos são muito próximos.

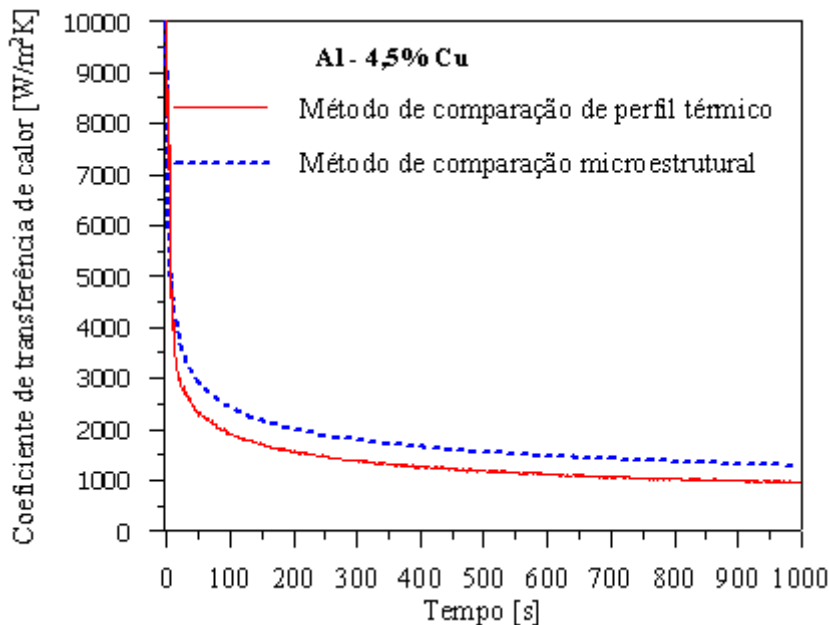


Figura 9: Coeficiente de transferência de calor na interface metal coquilha em função do tempo obtido por dois métodos distintos: comparação de perfis térmicos e comparação de perfis microestruturais (tempo local).

Desta forma, a partir destes resultados obtidos para a liga Al-4,5%Cu o método de comparação dados microestruturais para a determinação do coeficiente de transferência de calor foi aplicado ao aço inoxidável AISI 304. Foi realizado o mesmo procedimento, inicialmente foram realizadas simulações para as condições limites apresentadas na Tabela 5.

Destas simulações foram obtidos diferentes perfis para o tempo local de solidificação, conforme Figura 10. Em seguida foram realizadas interpolações sucessivas, até que fosse encontrado um perfil numérico muito próximo do experimental apresentado na Figura 11. Com este procedimento foram obtidas as constantes A e B da equação do coeficiente de transferência de calor variável no tempo, que neste caso são $A = 3250$ e $B = 0,19$.

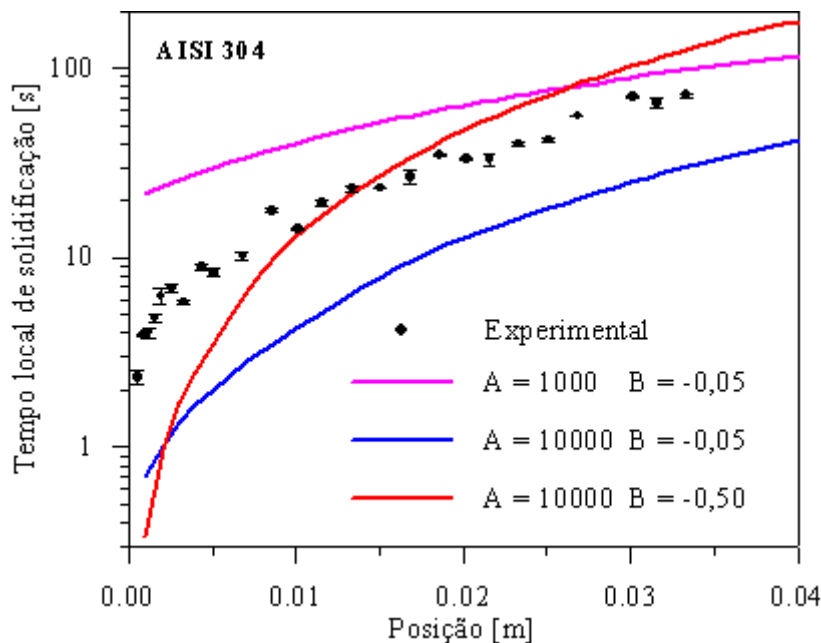


Figura 10: Variações do tempo local de solidificação devido aos diferentes coeficientes de transferência de calor impostos (constantes A e B) em função da distância da coquilha.

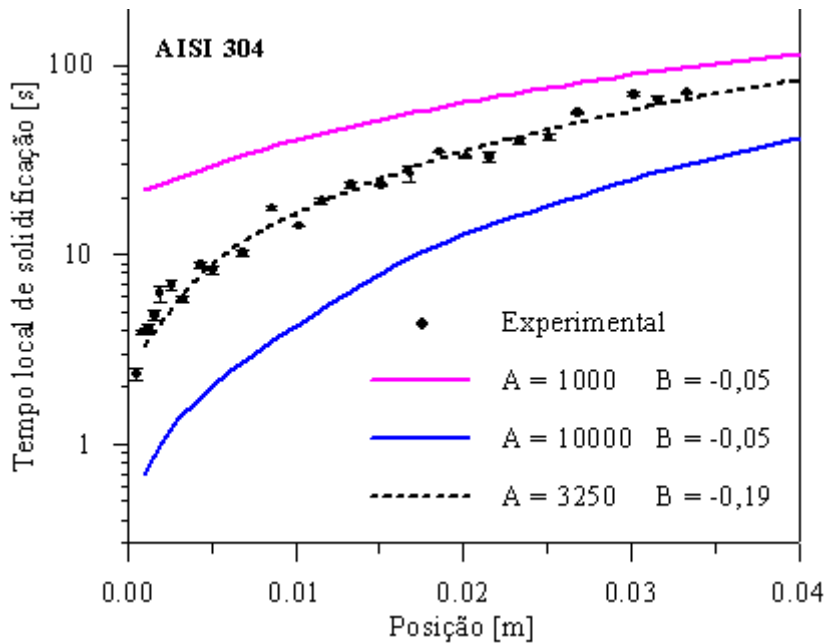


Figura 11: Variações do tempo local de solidificação em função da distância da coquilha determinados com os coeficientes de transferência impostos comparados com o experimental

A Figura 12 apresenta a comparação entre os perfis do coeficiente de transferência de calor para as duas ligas estudadas Al-4,5%Cu e AISI 304, calculadas através do método de comparação de perfis microestruturais.

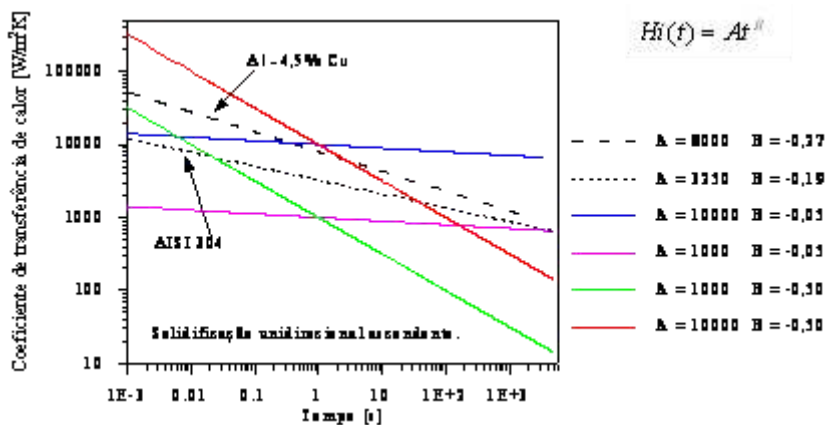


Figura 12: Simulações do coeficiente de transferência de calor na interface metal/coquilha para diferentes condições impostas através das constantes A e B juntamente com os resultados encontrados para as ligas em estudo.

4 CONCLUSÕES

Para as condições experimentais realizadas os resultados obtidos para o coeficiente de transferência de calor em função do tempo para a liga Al-4,5% Cu são:

- Método de comparação numérico/experimental da temperatura na interface metal/coquilha:

$$[W/m^2K]$$

- Método de comparação numérico/experimental do tempo local de solidificação, oriundo do espaçamento dendrítico secundário:

[W/m²K]

A partir destes resultados obtidos o método de comparação dados microestruturais para a obtenção do coeficiente de transferência de calor para a interface metal/coquilha foi aplicado para o aço inoxidável AISI 304, conduzindo ao seguinte resultado:

[W/m²K]

A obtenção do coeficiente de transferência de calor através da utilização de dados microestruturais experimentais, abre a possibilidade para situações onde é difícil a introdução de termopares, como no caso de lingamento contínuo sobre placas ou sobre roletes.

5 AGRADECIMENTOS

À FAPESP pelo apoio com o projeto 02/02060-6 e ao DIMET/IPT.

6 REFERÊNCIAS

- [1] HO, K., PEHLKE, R.D., *Mechanisms of Heat Transfer at a Metal-Mold Interface*, AFS Transactions, v.92, pp.587, 1984.
- [2] HO, K., PEHLKE, R.D., *Metal-Mold Interfacial Heat Transfer*, Metallurgical Transactions, v.16B, pp.585, 1985.
- [3] EVANS, J.F., KIRKWOOD, D.H., BEECH, J., *The Determination of Metal-Mold Interfacial Heat Transfer Coefficients and the Prediction of Gross Shrinkage Cavities in Chill Mold Castings*, Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes V. Edited by M. Rappaz, M.R. Ozgu, K.W. Mahin, The Minerals, Metals & Materials Society, pp.531, 1991.
- [4] KUMAR, T.S.P., PRABHU, K.N., *Heat Flux Transients at the Casting/Chill Interface During Solidification of Aluminum Base Alloys*, Metallurgical Transactions, v. 22B, pp.717, 1991.
- [5] TAHA, M.A., EL-MAHALLAWY, N.A., ASSAR, A.W.M., HAMMOUDA, R.M., “Effect of Melt Superheat and Chill Material on Interfacial Heat Transfer Coefficient in End-Chill Al and Al-Cu Alloys Casting”, *Journal of Materials Science*, v. 27, pp. 3467, 1992.
- [6] REDDY, A.V., BECKERMANN, P., *Measurements of Metal-Mold Interfacial Heat Transfer Coefficients During Solidification of Sn and Sn-Pb Alloys*, Experimental Heat Transfer, v. 6, pp. 111, 1993.
- [7] KRISHNAN, M., SHARMA, D.G.R., “Determination of the Interfacial Heat Transfer Coefficients h in Unidirectional Heat Flow by Beck’s Nonlinear Estimation Procedure”, *International Communications on Heat Mass Transfer*, v. 23, pp. 203, 1996.
- [8] MARTORONO, M.A., CAPOCCHI, J.D.T., “Heat Transfer Coefficient at the Metal Mould Interface in the Unidirectional Solidification of Cu-8% Sn Alloys”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 43, pp. 2541, 2000.
- [9] SANTOS, C.A., QUARESMA, J.M.V., GARCIA, A., “Determination of Transient Interfacial Heat Transfer Coefficients in Chill Mold Castings”, *Journal of Alloys and Compounds*, v. 319, n. 1-2, pp.174, 2001.
- [10] CARAM, R., GARCIA, A., *The Use of Dendritic Microstructure Growth to Evaluate the Metal-Mold Heat Transfer Coefficient in the Foundry Process*, In: IMechE Conference Transactions, The Institution of Mechanical Engineers, London, v. 2, pp. 555-559, 1995.
- [11] GARCIA, A., *Solidificação dos Metais: Fundamentos e Aplicações*, Editora da Unicamp, 2000.
- [12] BOWER, T.F., BRODY, H.D., FLEMINGS, M.C., *Measurements of Solute Redistribution in Dendritic Solidification*, Trans. Metall. Soc. AIME, v. 236, pp. 624–634, 1966.
- [13] JAIME, M.A., “Avaliação e Otimização de Processos de Fundição a Partir do Uso de Técnicas Computacionais de Simulação”, dissertação Ph.D, FEM Unicamp, Campinas, 2002.
- [14] BECK, J.V., *Combined Parameter and Function Estimation in Heat Transfer With Application to Contact Conductance*, Transactions of the ASME, v.110, pp. 1046, 1988.

- [15] ASTM E 3–95, *Practice for Preparation of Metallographic Specimens*, 1980.
- [16] ASTM E 407-95, *Practice for Microetching Metals and Alloys*, 1995.
- [17] Jernkontoret, *A Guide to the Solidification of Steels*, Stockholm, 1977.
- [18] MELLO, S.S.A., MELO, M.L.M.M., SANTOS, R.G., “Analytical Modelling of Solidification in Twin-Roll Casting process. In: *Proceedings of the 4th Decennial International Conference on Solidification Processing*, pp. 175-177, July 1997.
- [19] KURZ, W., FISHER, D.J., *Fundamentals of solidification*, Ed. Trans Tech Publications, 1986.
- [20] PEHLKE, R.D., JEYARAJAN, A., WADA, H., *Summary of Thermal Properties for Casting Alloys and Mold Materials*, The University of Michigan, December, 1982.
- [21] LOSER, W., THIEM, S., JURISH, M., “Solidification Modeling of Microstructures in Near-Net-Shape Casting of Steels”, *Materials Science and Engineering A*, v. 173, pp. 323-326, 1993.
- [22] KIM, S.K., SHIN, Y.K., KIM, N.J., “Distribution of Ferrite Content in Continuously Cast Type 304 Stainless Steel Slabs”, *Ironmaking & Steelmaking*, v. 22, pp. 316-325, 1995.