

CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS TÉRMICOS E MICROESTRUTURA DE SOLIDIFICAÇÃO EM TIRAS PRODUZIDAS PELO PROCESSO TWIN-ROLL IPT-SP

José E. Spinelli - spinelli@ipt.br

João Pedro V. Tosetti - jptti@ipt.br

Flávio Beneduce Neto - fbeneduce@ipt.br

Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT – Divisão de Metalurgia – Laboratório de
Processamento Pirometalúrgico – São Paulo, S.P., Brasil.

Carlos A. dos Santos - alex@fem.unicamp.br

Jaime A. Spim Junior - spim@ct.lafun.ufrgs

Amauri Garcia - amaurig@fem.unicamp.br

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP – Faculdade de Engenharia Mecânica -
Departamento do Engenharia de Materiais - Caixa Postal 6122 - Campinas, S.P, Brasil

***Resumo.** O processamento de materiais, via técnicas denominadas Near-Net-Shape, pode envolver elevadas taxas de resfriamento, e vem crescendo no campo metalúrgico e ganhando consistência, no que diz respeito à melhoria de qualidade com redução dos custos de produção, devido, basicamente, à eliminação de etapas no processamento. Dentro desta filosofia, encontra-se o processo Twin-Roll para a fabricação de tiras de espessuras reduzidas (0,1 a 5,0 mm), diretamente a partir do metal líquido. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia para o cálculo do coeficiente de transferência de calor na interface entre os rolos refrigerados e o metal lingotado. O comportamento deste coeficiente realimenta um modelo numérico de transferência de calor, baseado na técnica de diferenças finitas, o qual simula as condições da solidificação do metal no interior da cavidade entre os rolos, possibilitando desta forma, a determinação das taxas de solidificação envolvidas ao longo de todo o processo. Os resultados do comportamento térmico obtidos pelo modelo matemático, foram utilizados para analisar o processo de solidificação da tira produzida, e os valores das taxas de resfriamento do sistema foram calculados por meio de expressões existentes na literatura, as quais correlacionam parâmetros térmicos com a microestrutura bruta de fusão (espaçamento dendrítico secundário), obtidos por análises metalográficas.*

***Palavras-chave:** Coeficiente de transferência de calor, Lingotamento contínuo de tiras, Modelo matemático, Microestrutura*

1. INTRODUÇÃO

O processo de lingotamento contínuo *Twin-Roll* consiste da produção, em estágio único, de tiras que podem ser diretamente bobinadas a partir da solidificação do metal líquido, justificando-se por dois fatores principais: redução das etapas de processo e melhoria da qualidade metalúrgica do produto final (Wolf, 1997).

Conhecendo-se as relações entre as taxas de resfriamento do sistema e as características microestruturais do material, como exemplo - espaçamento dendrítico primário e secundário (λ_1 e λ_2), é possível fazer uma análise de todo o processo de solidificação, e consequentemente, das propriedades mecânicas do produto obtido. No entanto, o comportamento da transferência de calor no sistema metal/rolos é fortemente dependente das condições de troca térmica nesta interface, sendo esta caracterizada por um coeficiente de transferência de calor hi . Assim, este coeficiente tem influência direta em λ_1 e λ_2 . Algumas relações foram determinadas para correlacionar parâmetros microestruturais com as condições de resfriamento do sistema, representadas pela taxa de resfriamento $\overset{\circ}{T}$, conforme mostra a Eq. (1):

$$\lambda_2 = k.T^{\overset{\circ}{-n}} \quad (1)$$

sendo λ_2 dado em [μm] e $\overset{\circ}{T}$ em [K/s], a qual pode ser determinada por:

$$\overset{\circ}{T} = \frac{T_L - T_S}{t_{SL}} = \frac{\Delta T}{t_{SL}} \quad (2)$$

onde ΔT é o intervalo de solidificação da liga [K] e t_{SL} é o tempo local de solidificação [s], determinado para um ponto qualquer, como sendo o intervalo de tempo entre a passagem da isoterma liquidus (ponta da dendrita) e a isoterma solidus (raiz da dendrita). k e n são constantes relacionadas ao tipo de material, sendo estas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros para cálculo de λ_2 para vários tipos de aço (Loser, 1993).

Tipo de Aço	k [$\mu\text{m.K}^n / \text{s}^n$]	n
Aço carbono	143	0,41
Aço alto carbono	35	0,38
Aço ferramenta	92	0,42
Aço inoxidável	68	0,45

O objetivo deste trabalho consiste em analisar o processo de solidificação no sistema, utilizando uma ferramenta matemática e, estabelecer correlações entre os parâmetros térmicos e a microestrutura resultante. O modelo numérico proposto neste trabalho foi previamente aferido com resultados da literatura (Spim, 1997). As características do equipamento de *Twin-Roll* do IPT/SP têm sido utilizadas como parâmetros de entrada do modelo numérico, obtendo assim, resultados referentes às tiras analisadas em laboratório.

2. TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA INTERFACE METAL/ROLOS

O comportamento da extração de calor da poça é controlado pelo coeficiente de transferência de calor na interface metal/rolos. Pode-se distinguir três regiões distintas de contato térmico: (a) uma região de bom contato entre o metal ainda líquido e os rolos, (b) uma região de pobre contato, compreendendo a região onde coexistem tanto metal solidificado, quanto metal líquido no interior da poça; e finalmente (c) uma região final de ótimo contato térmico sólido/sólido, devido à pressão exercida pelos rolos sobre a tira. A extensão das regiões com diferentes taxas de transferência de calor na saída da tira é controlada pela fração sólida no centro da tira (Bagshaw, 1987), sendo este um importante parâmetro para cálculos matemáticos do processo de solidificação. Contudo, o conhecimento dinâmico do coeficiente de transferência de calor para o processo *Twin-Roll* é limitado por razões experimentais, mas em termos de aproximação para a modelagem numérica, ainda é prudente a utilização de valores constantes na faixa de 2.000 a 10.000 W/m².K, para o caso de aços em rolos de aço e cobre (Mehrabian, 1977). A Tabela 2 apresenta uma pequena compilação de alguns valores dos coeficientes e, as características operacionais para os sistemas adotados.

A variação do coeficiente de transferência de calor entre a tira e os rolos diminui com o aumento da espessura da tira ou com a diminuição na velocidade de lingotamento, e aumenta com o aumento da taxa do fluxo da água de refrigeração.

Tabela 2 - Valores estimados de h_i para diferentes condições de lingotamento.

Autores	Rolos	Largura [mm]	Material Lingotado	h_i [W/m ² .K]
Li, 1995	Cobre	-	Aço	2.800 – 5.800
Li, 1995	Cobre	-	Alumínio	4.000 – 47.000
Bagshaw, 1987	Cobre	36,6	Al 2 % Cu	*(a) 3.530
			Al 1 % Cu	*(b) 101
				*(c) 20.000
Kraus, 1986	Aço	25	Aço	2.830

* os índices a, b e c correspondem às regiões anteriormente descritas.

3. MODELOS DE CRESCIMENTO DENDRÍTICO

A possibilidade da imposição de uma ampla gama de condições operacionais em processos de fundição e lingotamento, tem como decorrência direta, a geração de uma diversidade de estruturas de solidificação. Parâmetros estruturais como tamanho de grão e espaçamentos interdendríticos são bastante influenciados pelo comportamento térmico do sistema metal/molde durante a solidificação, impondo conseqüentemente, uma correlação estreita entre este e a microestrutura resultante. Autores afirmam que o espaçamento dendrítico, mais predominantemente, o espaçamento dendrítico secundário (λ_2) tem maior influência sobre as propriedades mecânicas do que o tamanho de grão (Bouchard, 1996).

No trabalho desenvolvido por Loser *et al.* (Loser, 1993) para a solidificação de aço inoxidável em um equipamento de *Twin-Roll*, observou-se que a melhora do contato térmico metal/rolos (h_i) proporciona uma redução nos valores dos espaçamentos dendríticos secundários e, uma menor variação nos valores destes. Além de que o aumento da temperatura de vazamento (T_v) proporciona uma redução na diferença entre espaçamento

dendrítico secundário da superfície para o centro da tira. A Fig. 1 mostra a variação determinada pelos autores para λ_2 na seção transversal de uma tira de 1 mm de aço inox solidificado em rolos de aço C-35, assumindo diferentes valores de h_i (A), enquanto (B) ilustra o comportamento de λ_2 em função da distância da superfície da tira (espessura 3 mm), considerando $h_i = 7000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e T_V variável para aço inox 304.

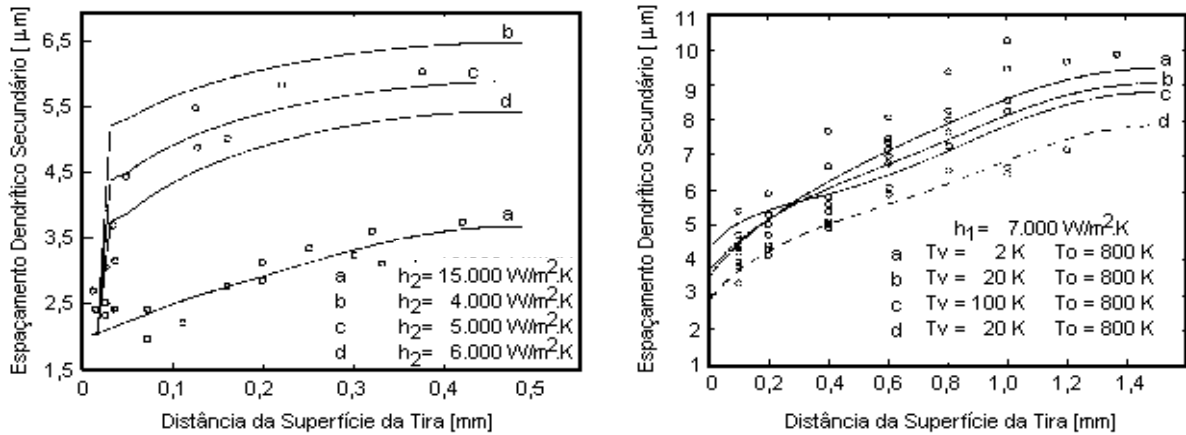


Figura 1 - Variação de λ_2 com a espessura da tira (A) Aço X5CrNi18.10 - h_i variável e (B) Aço Inox 304 - h_i constante

Assim, conclui-se que h_i é fator determinante em λ_2 , a qual exerce influência direta em λ_2 ao longo da distância.

4. MODELO MATEMÁTICO DE SOLIDIFICAÇÃO PROPOSTO

O modelo matemático possibilita o acompanhamento da evolução das isothermas solidus e liquidus, e o comportamento térmico ao longo do processo (Spim, 1997). As considerações para a formulação do modelo numérico foram: (a) rolos não se deformam e giram com velocidades constantes; (b) condução ao longo da direção z pode ser desprezada, uma vez que considera-se um volume de controle posicionado próximo ao centro longitudinal da poça, conforme pode ser visto na Fig. 2, e considera-se que a seção longitudinal apresente dimensões bem maiores quando comparadas às dimensões da tira; (c) as variações de temperatura são simétricas em relação à linha de centro, formada entre os rolos, (d) as condições de temperatura e velocidade do metal líquido na superfície superior da poça líquida são: $T = T_V$, $v_x = 0$ e $v_y = w \cdot t_{in}$, onde V corresponde à componente da velocidade na direção x e y [m/s], w é a velocidade de rotação dos rolos [rad/s] e t_{in} é o tempo correspondendo à rotação dos rolos até a poça líquida, a partir do referencial inicial; (e) as condições até a saída da tira são: $v_x = 0$ e $v_y = w \cdot f(t)$; (f) propriedades termofísicas do metal (ρ : densidade [kg/m^3], k : condutividade [$\text{W/m}\cdot\text{K}$], c : calor específico [$\text{J/kg}\cdot\text{K}$]) são variáveis com a temperatura dentro da região do intervalo de transformação de fase sólido-líquido, (g) o nível de metal líquido na piscina é mantido constante; (h) a liberação do calor latente durante a transformação de fase líquido-sólido é calculada como função da temperatura, através da Equação de Scheil para o caso de aço inoxidável (Brooks, 1991).

A Figura 2 apresenta um esboço da poça líquida, indicando o sistema de eixos utilizado no desenvolvimento do modelo, destacando o volume de controle considerado e as malhas numéricas utilizadas para os cálculos.

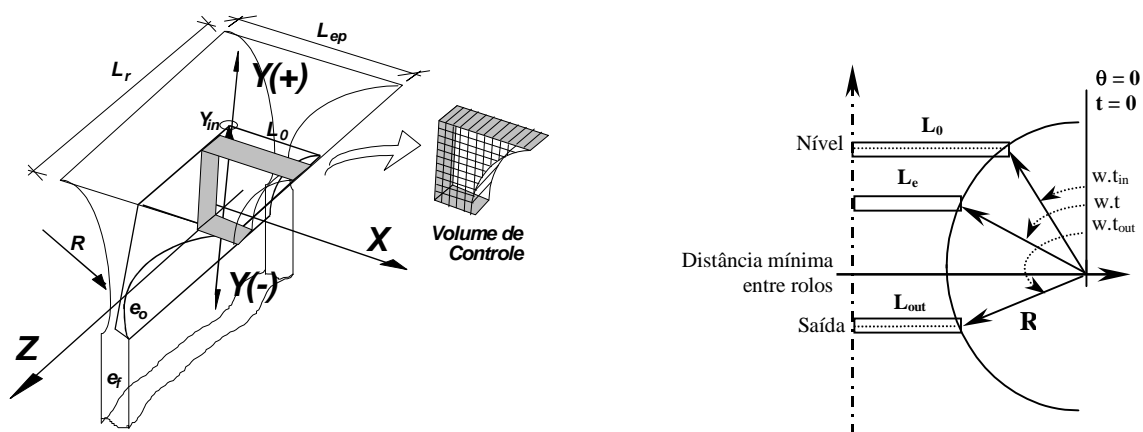


Figura 2 - Esboço do sistema físico e representação do volume de controle, com as divisões dos elementos da malha numérica utilizada no modelo matemático.

Como parâmetros de entrada do modelo numérico, procurou-se definir esses em função de dados mensuráveis no equipamento de *Twin-Roll*, ou seja, dados de entrada do sistema físico real, objetivando aproximar ao máximo a realidade do modelo matemático ao equipamento piloto instalado no IPT. Assim, como variáveis de entrada, temos as propriedades termofísicas da liga fundida, as condições de operação da corrida e as dimensões do sistema, conforme pode ser visto nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Propriedades termofísicas da liga e parâmetros de entrada do modelomatemático (Há, 1997, Kang, 1997).

Metal		Modelo	
Propriedade Física		Parâmetro	
Condutividade térmica (sólido) [W/m.K]	31.0	Diâmetro do rolo [mm]	496
Condutividade térmica (líquido)	30.3	Temperatura da superfície rolo	30
Calor específico (sólido) [J/kg.K]	679	Comprimento da poça em XY	100
Calor específico (líquido)	670	Largura poça em YZ	51
Densidade (sólido) [kg/m ³]	7400	Ângulo entre a poça e "outlet"	77°
Densidade (líquido)	7600	Temperatura do metal líquido no nível da piscina	1650
Calor Latente [J/kg]	260000		
Temperatura Liquidus [°C]	1460		
Temperatura Solidus	1399		

Tabela 4 – Características do equipamento piloto de Twin-Roll instalado no IPT.

Equipamento	Medidas
Tipo de Máquina	Duplo Rolo
Diâmetro dos Rolos	496 mm
Material do Rolos	Aço
Capacidade da Panela (Forno)	500 kg
Capacidade do Tundish	100 kg
Espessura das Tiras	0.5- 10 mm
Largura das Tiras	100 mm
Material Lingotado	Aço Inox 304
Velocidade de Lingotamento	20 – 100 m/min

5. METODOLOGIA

Os resultados apresentados neste trabalho referem-se à experimentos realizados no equipamento piloto de *Twin-Roll*, instalado no IPT, e em um aparato experimental de solidificação unidirecional com molde refrigerado (Fig. 3), o qual simula as condições de solidificação no equipamento. Os ensaios realizados utilizaram aço inoxidável AISI 304, o qual após fundido em forno de indução, foi vazado a temperaturas próximas de 1650 °C em substrato de aço. Para a determinação do coeficiente de transferência de calor metal/molde, empregou-se a metodologia de comparação entre perfis térmicos obtidos experimentalmente, com perfis térmicos obtidos via modelos matemáticos. As amostras analisadas, quanto à microestrutura resultante do processo de solidificação, foram retiradas de regiões transversais das tiras produzidas. O ataque químico utilizado para revelar a microestrutura consistiu de uma mistura de 10 g de CuSO_4 , 50 ml de HCl e 50 ml de água destilada, conhecido como Marble (Metals Handbook).

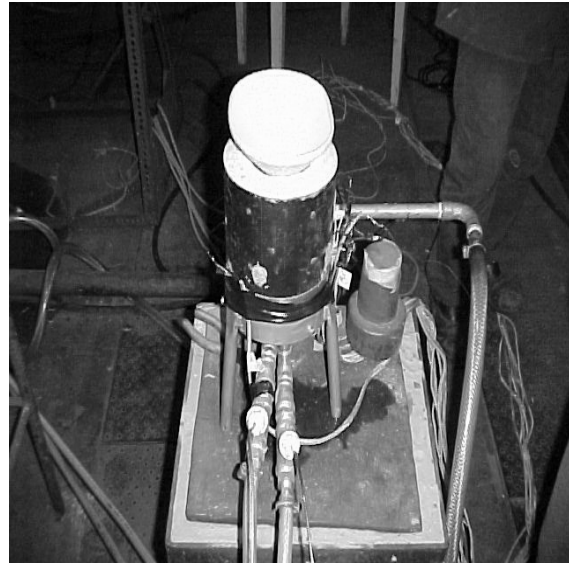


Figura 3 – Aparato experimental

6. RESULTADOS E DISCUSSOES

A Fig. 4 apresenta as microestruturas obtidas ao longo da espessura das tiras, observando-se uma região central correspondente ao encontro das frentes de solidificação que partem das superfícies em contato com os rolos e, formação de uma região equiaxial central. No caso de taxas de resfriamento iguais para as duas direções (rolos), é de se esperar que esta união aconteça na região intermediária entre as superfícies dos rolos. A Fig. 5 apresenta destaques das regiões onde foram efetuadas as medidas dos espaçamentos dendríticos secundários, os quais foram utilizados para os cálculos das taxas de resfriamento ao longo da espessura da tira.

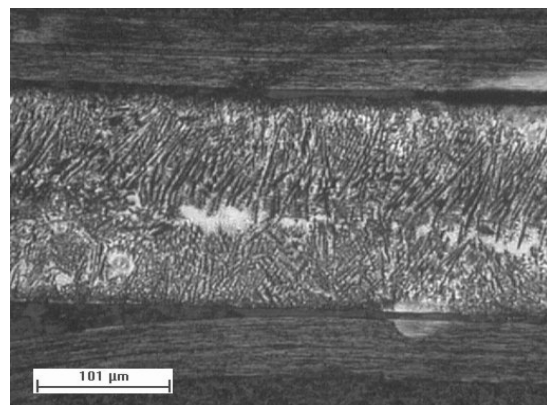
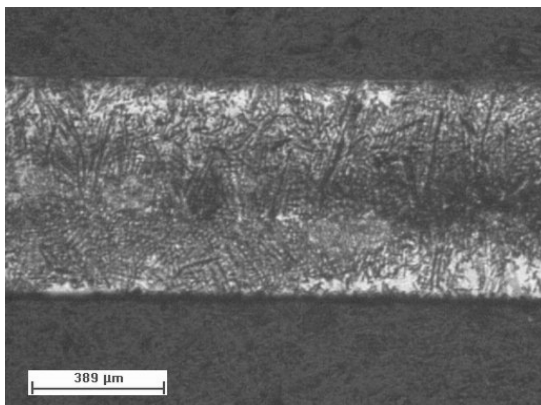


Figura 4 - Micrografias das seções longitudinais das tiras de Inox-304.

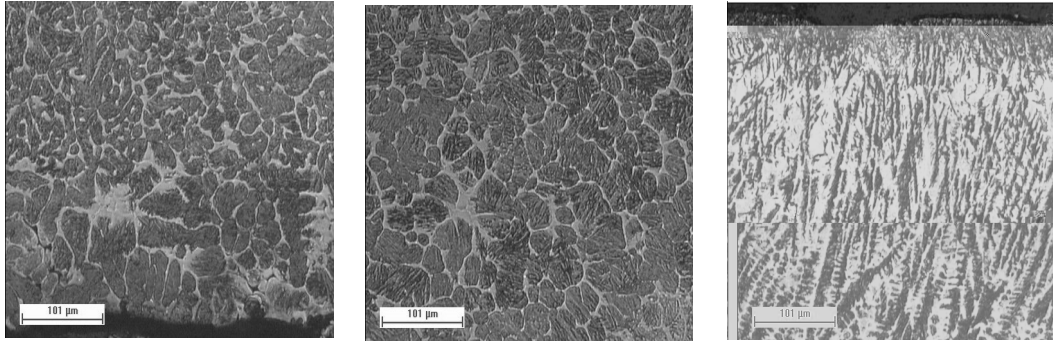


Figura 5 - Micrografias dos espaçamentos dendríticos secundários ao longo da espessura das tiras (superfície, centro, superfície).

A Tabela 5 apresenta os valores médios para λ_2 e os valores das taxas de resfriamento calculadas por meio da Eq. (2) e dos coeficientes apresentados na Tab. 1 e, a Fig. 6 apresenta essa variação.

Tabela 5 - Média dos valores de λ_2 e das taxas de resfriamento calculadas.

λ_2 [μm]	$\frac{\circ}{\text{T}}$ [K/s]
1	11809
4	542.4
5,5	269.4
10	70,6

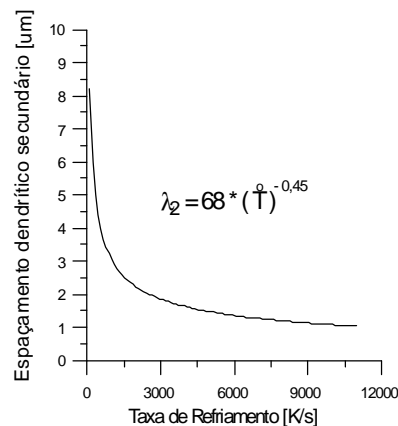


Figura 6 - Variação de λ_2 e das taxas de resfriamento

Por meio do confronto entre os perfis térmicos obtidos no aparato experimental, através de termopares, e os perfis gerados por um modelo matemático unidirecional, aferido previamente (Santos, 1997, Santos, 2000), determinou-se o comportamento do coeficiente de transferência de calor metal/molde ao longo da solidificação. A Fig. 7 mostra a comparação e a Eq. (3) expressa a variação de h_i determinado para o processo, o qual foi implementado no modelo matemático do processo *Twin-Roll*, obtendo os resultados gerados por simulação apresentados a seguir. As diferenças observadas para o termopar a 10 mm da interface devem-

se, principalmente ao fato do modelo matemático não levar em conta a dinâmica do preenchimento da cavidade do molde no vazamento, o que ocorre na prática experimental.

$$h_i = 2700 \cdot t^{-0.1} \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]} \quad (3)$$

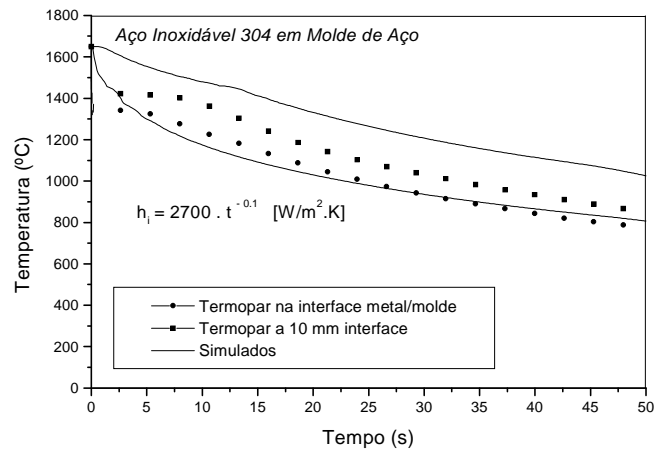


Figura 7 - Comparação de curvas térmicas experimentais e simuladas para a condição de solidificação unidirecional em molde de aço refrigerado.

A Figura 8 apresenta o comportamento térmico para pontos específicos dentro da cavidade, entre rolos, possibilitando a determinação de parâmetros térmicos inerentes ao processo de solidificação, como velocidade de solidificação. Como pode-se observar, de acordo com a simulação realizada, a tira completou sua total solidificação até o ponto de mínima distância entre rolos, já que o ponto monitorado na superfície da tira atingiu a temperatura solidus. Mas é interessante notar que a espessura solidificada é extremamente pequena, o que pode levar a tira a sofrer um *breakout*, ou seja, romper na saída dos rolos devido ao peso próprio.

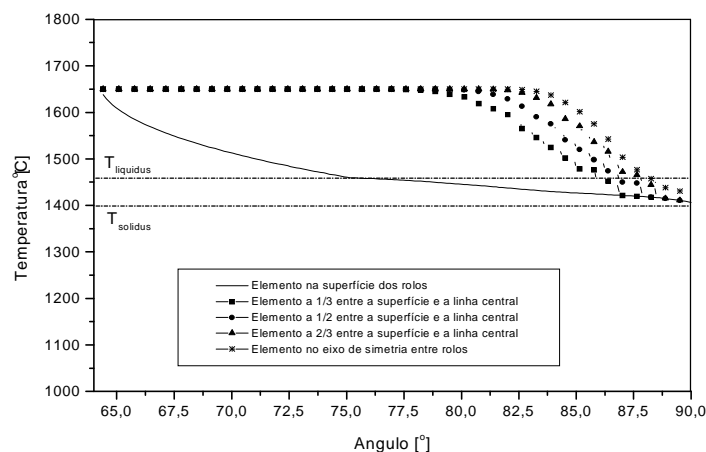


Figura 8 - Comportamento térmico na cavidade formada entre rolos obtida por simulação numérica.

Determinou-se o ponto de fechamento da poça líquida, ou seja, o ponto de encontro das frentes de solidificação ou das isothermas solidus, sendo esse apresentado na Fig. 9. Conforme calculado, esse ponto situa-se a aproximadamente 10 mm do ponto de saída da tira. Esses

resultados demonstram que a eficiência da retirada de calor do sistema está baixa, o que implica em melhorias na refrigeração dos rolos ou mudança do material dos rolos, como por exemplo, cobre.

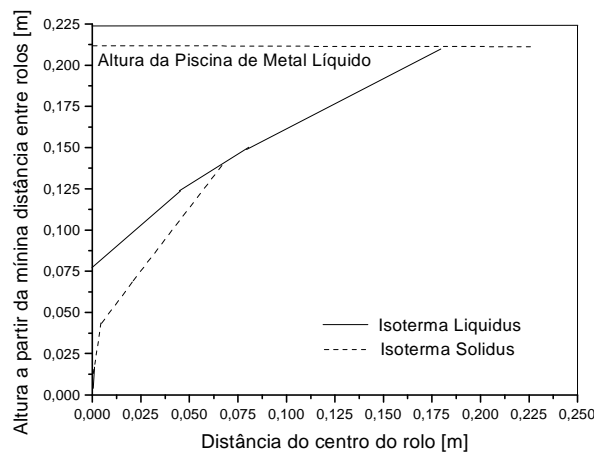


Figura 9 - Ponto de encontro das isothermas solidus e liquidus.

7. CONCLUSÕES

A metodologia de confronto de perfis térmicos experimentais e simulados apresenta-se confiável e flexível, possibilitando a confecção de experimentos simples para retratar processos complexos que envolvem a solidificação de metais. As microestruturas obtidas nos experimentos apresentaram-se semelhantes às aquelas obtidas nas tiras produzidas no equipamento piloto, o que indica que as condições de resfriamento nos dois sistemas são semelhantes. Como pode-se observar pela Equação (3), h_i apresenta valores altos nos instantes iniciais ($4000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$), decaindo para valores na faixa de $2000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

Agradecimentos

Os autores agradecem a UNICAMP, ao IPT-SP e à FAPESP.

8. REFERÊNCIAS

- Bagshaw, M.J.; Hunt, J.D.; Jordan, R.M., 1987, Heat Line Formation in a Roll Caster. Applied Scientific Research, vol. 44, pp. 161-174.
- Bouchard, D. & Kirkaldy, J. S., 1996, Scaling of Intragranular Dendritic Microstructure in Ingot Solidification. Metallurgical and Materials Transactions B, vol. 27B, pp. 101-113.
- Brooks, J.A.; Baskes, M.I. & Greulich, F.A., 1991, Solidification Modeling and Solid-State Transformations in High-Energy Density Stainless Steel Welds. Metallurgical Transactions A, vol. 22, pp. 915-926, (1991).
- Há, M.Y.; Kim, K.; Kim, K.C. & Lee, S.W., 1994, Transient Analysis of Thermo-Fluid Phenomena in Twin-Roll Continuous Casting. Int. Journal of Heat Mass Transfer, vol. 37, n. 14, pp. 2059-2068.
- Kang, C.G. & Kim, Y.D., 1997, A Thermal Elastic-Plastic Finite-Element Analysis to Roll-Life Prediction on the Twin Roll Strip Continuous Casting Process. Metallurgical and Materials Transactions B, vol. 28B, pp. 1213-1225.

- Kraus, H. G., 1986, Finite Element and Feasibility Study of Thin Strip Continuous Casting of Steel. Numerical Heat Transfer, vol.10, pp. 63-77.
- Li, B. Q., 1995, Producing Thin Strips by Twin-Roll Casting - Part I: Process Aspects and Quality Issues. Journal of Metals, pp. 29-33.
- Loser, W.; Thiem, S.; Jurish, M., 1993, Solidification Modeling of Microstructures in Near-Net-Shape Casting of Steels. Materials Science and Engineering A, vol. 173, pp. 323-326.
- Mehrabian, R., 1977, Relationship of Heat Flow to Structure in Rapid Solidification Processing. I International Conference in Rapid Solidification Processing, U.S.A., pp. 9-27.
- Mehrabian, R., 1982, Rapid Solidification. International Metals Reviews, vol. 24, n. 4, pp. 185-208.
- Metal Handbook – Metallography, Structures and Phase Diagrams, vol. 8, 8th Ed., ASM.
- Santos, C.A., 1997, Influência das Taxas Direcionais de Resfriamento na Evolução da Solidificação em Sistemas Metal/Molde. Dissertação de Mestrado, Unicamp/FEM/DEM.
- Santos, C.A., Quaresma, J.M.V. & Garcia, A., 2000, Determination of Transient Interfacial Heat Transfer Coefficients in Chill Mold Castings. submetido Journal of Alloys and Compounds.
- Spim Jr., J.A.; Santos, C.A.; Cau, E.; Garcia, A., 1997, Modelagem Matemática do Lingotamento Contínuo de Tiras pelo Processo Twin-Roll. Anais: 2^o Congresso Internacional de Tecnologia Metalúrgica e de Materiais - ABM, São Paulo.
- Wolf, M.M., 1997, Solidification Control in the Near Net Shape Casting of Sheet Steel Products. Proceedings of the 4th Decennial International Conference on Solidification Processing, pp. 1-4.

CORRELATION BETWEEN THERMAL PARAMETERS AND SOLIDIFIED MICROSTRUCTURE IN THE THIN STRIP CONTINUOUS CASTING BY TWIN ROLL AT IPT/SP

Abstract. *O processamento de materiais, via técnicas denominadas Near-Net-Shape, podem envolver elevadas taxas de resfriamento, e vêm crescendo no campo metalúrgico e ganhando consistência no que diz respeito a melhoria de qualidade com redução dos custos de produção, devido basicamente a eliminação de etapas no processamento. Dentro desta filosofia, encontra-se o processo Twin-Roll para a fabricação de tiras de espessuras reduzidas (0,1 a 5,0 mm) diretamente a partir do metal líquido. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia para o cálculo do coeficiente de transferência de calor na interface entre os rolos refrigerados e o metal lingotado. O comportamento deste coeficiente realimenta um modelo numérico de transferência de calor, baseado na técnica de diferenças finitas, o qual simula as condições da solidificação do metal no interior da cavidade entre os rolos, possibilitando desta forma, a determinação das taxas de solidificação envolvidas ao longo de todo o processo. Os resultados do comportamento térmico obtidas pelo modelo matemático, foram utilizados para analisar o processo de solidificação da tira produzida, e os valores das taxas de resfriamento do sistema foram calculados por meio de expressões existentes na literatura, as quais correlacionam parâmetros térmicos com a microestrutura bruta de fusão (espaçamento dendritico secundário) obtidos por análises metalográficas.*

Key-words: *Heat transfer coefficient, Thin strip continuous casting, Mathematical model, Microstructure*