

DESENVOLVIMENTO DE ROTINAS PARA DETERMINAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR AO LONGO DE UM MOLDE DURANTE O LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE AÇOS ¹

Vinicius Karlinski²

Wilson Fogazzi³

Carlos Raimundo Frick Ferreira⁴

Carlos Alexandre dos Santos⁵

Jaime Alves Spim⁶

Resumo

O presente trabalho trata da determinação dos coeficientes de transferência de calor na interface de contato metal/molde (h) durante a solidificação no lingotamento contínuo e seu comportamento em função da distância do menisco. A determinação dos h's é realizada por algoritmos de busca. O modelo desenvolvido permitiu avaliar a influência de parâmetros de processo, como velocidade de lingotamento, qualidade do aço e temperatura no distribuidor na evolução da casca solidificada. O método inverso de condução de calor é utilizado para a determinação dos h's ao longo do molde, confrontando temperaturas geradas pelo simulador e medidas experimentais. As medidas de temperatura foram realizadas em planta com a inserção de termopares em diferentes pontos de três faces do molde de seção interna quadrada de 240mm. No desenvolvimento do simulador, a malha numérica foi acoplada sobre o metal e molde partindo do menisco até a base do molde, assumindo solidificação unidirecional. Os algoritmos buscam a partir de iterações os h's que melhor representam o inverso da resistência à transferência de calor na interface metal/molde. O simulador desenvolvido foi aferido com dados reais de temperatura obtidos no molde e na superfície do lingote e com dados reais da espessura de solidificação obtidos através de macrografias Baumann. Os resultados gerados em diversas seqüências de corridas para aços de baixo e médio carbono, permitiram avaliar a influência dos parâmetros de processo e condições de contorno no comportamento térmico durante a solidificação do tarugo.

Palavras-chave: Lingotamento contínuo de aços; Coeficiente de transferência de calor; Solidificação. Simulação.

DEVELOPMENT OF ROUTINES TO DETERMINE AND EVALUATE HEAT TRANSFER COEFFICIENTS ALONG THE MOLD LENGTH DURING STEEL CONTINUOUS CASTING Abstract

The present work regards the determination of heat transfer coefficients (HTC) in the metal/mold interface (h) during continuous casting solidification and their behavior along the mold length. The determination of heat transfer coefficients was made by search algorithms. The model developed was used to evaluate the influence of process parameters, such as casting speed, steel grade and tundish temperature in the solidified shell. The inverse heat conduction method was used to find the HTC where the experimental results were compared with simulated data and HTC was adjusted until it could find its best agreement. Experimental results were obtained in a square mold where thermocouples were directly inserted in the mold wall in three different faces. In the simulator developed the numerical mesh was coupled with the metal mold from its interior and the simulation ran from the meniscus to the mold foot. The solidification was assumed to happen on heat transfer path. The simulation was checked with real temperature data obtained in the mold, in the billet surface and with data of the solidified thickness observed on Baumann macrographies. The results generated for low and high carbon had allowed the understanding of the influences of the process parameters and thermal behavior in the mold during the solidification in continuous casting process.

Key words: Continuous casting; Heat transfer coefficient; Solidification; Simulation

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Mestrando LAFUN / PPGEM / UFRGS - vkbeng@yahoo.com.br

³ Doutorando LAFUN / PPGEM / UFRGS - wilsonfogazzi@hotmail.com

⁴ MSc. Pesquisador LAFUN / PPGEM / UFRGS - frick@vortex.ufrgs.br

⁵ Prof. Dr. Adjunto - PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL – PUCRS, FENG/DEMM/NUCLEMAT, Av. Ipiranga, 8166 Parternon - Porto Alegre – RS/Brasil, – carlos.santos@puccrs.br

⁶ Prof. Dr. Adjunto - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL – UFRGS, Centro de Tecnologia (CT)/Laboratório de Fundação (LAFUN), Av. Bento Gonçalves, 9500 / Cx.P. 15.021 CEP 91501-970 - Porto Alegre - RS / Brasil Fone / FAX: (0xx51) 3316-6142 - spim@ct.ufrgs.br

INTRODUÇÃO

Uma das mais recentes tendências na indústria de aços tem sido o foco no desenvolvimento de processos para a produção de aços o mais próximo do produto final. No lingotamento contínuo tem-se estudado os fenômenos de solidificação com o principal objetivo de aumentar a velocidade do processo.^(1,2) O molde é o componente mais crítico, pois é no início da solidificação do aço que ocorrem os principais fenômenos que determinam a qualidade superficial do produto fundido. Temperaturas na parede do molde têm sido monitoradas para analisar o comportamento térmico no molde e sua correlação com diferentes parâmetros do processo e composições de aços.⁽¹⁻⁴⁾ Diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para investigar a transferência de calor pelo molde e buscando alguma relação com defeitos que são gerados durante a solidificação do aço no molde.

Durante a solidificação do metal, a resistência à transferência de calor na interface entre o metal e o molde depende de muitos fatores, como pressão metalostática exercida pelo metal líquido, camada de óxidos e lubrificantes na interface, rugosidade da superfície, camada de revestimento do molde, formação de “gap” devido às deformações do metal e do molde, movimento de oscilação do molde, geometria do molde, tipos de materiais em contato, entre outros. Devido a grande dificuldade de se determinar experimentalmente esses fatores citados, são utilizados coeficientes para representar a resistência térmica à transferência de calor pela interface metal/molde. Como já visto em diversos trabalhos,^(1,2,4) os coeficientes de transferência de calor variam ao longo do comprimento de um molde de lingotamento contínuo. Muitos métodos para o cálculo de h existentes na literatura são baseados em históricos térmicos de medidas experimentais de temperaturas em pontos conhecidos e correlacionados com resultados obtidos com modelos matemáticos de solidificação. O objetivo do presente trabalho é determinar os coeficientes de transferência de calor ao longo do comprimento do molde e em três diferentes faces, a partir dos dados de temperaturas obtidos por termopares estrategicamente posicionados nas paredes do mesmo.

MODELO MATEMÁTICO DE SOLIDIFICAÇÃO

O desenvolvimento de modelo é baseado em uma equação unidimensional de condução de calor, dado por:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \dot{q} \quad (1)$$

onde ρ é densidade (kg/m^3), c o calor específico (J/kg K), k a condutibilidade térmica (W/mK), T a temperatura (K), t o tempo (s), $\delta T/\delta t$ é a taxa de resfriamento (K/s), x a direção (mm) e \dot{q} é a fonte de calor associado à mudança de fase dado:

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

onde f_s é a fração sólida durante a mudança de fase (%) e L é o calor latente de fusão (J/kg).

A variação da fração sólida é função apenas da temperatura, isto é: $f_s = F(T)$ para $T_S < T < T_L$. Utilizou-se a formulação proposta pela regra da alavanca para representar a região pastosa da solidificação, dada por:

$$f_s = \left(\frac{1}{k_0 - 1} \right) \left(\frac{T_L - T}{T_f - T} \right) \quad (3)$$

onde T_L é a temperatura liquidus (°C), T_f é a temperatura de fusão do metal base (°C) e k_0 é o coeficiente de partição ou redistribuição de soluto.

Se considerarmos a liberação de calor latente gerado internamente na transformação de fase, o calor específico do material pode ser substituído na eq.(1) pelo chamado pseudocalor específico, dado por:

$$c' = \left(c - L \frac{\partial f_s}{\partial T} \right) \quad (4)$$

Em relação à variação das propriedades físicas do material nos diferentes estados: sólido(s), líquido(l) e pastoso(sl), é suficientemente aceitável a aproximação do seu valor, quando no estado pastoso, como sendo uma relação percentual entre a quantidade de sólido e líquido relativo aos seus valores quando líquido ou sólido, a exceção do calor específico, que deve ser balanceado com o calor latente, conforme a Equação 7:

$$k_{sl} = (k_s - k_l) \cdot f_s + k_l \quad (5)$$

$$\rho_{sl} = (\rho_s - \rho_l) \cdot f_s + \rho_l \quad (6)$$

$$c_{sl} = (c_s - c_l) \cdot f_s + c_l - L \cdot \frac{\partial f_s}{\partial T} \quad (7)$$

Aplicando-se a técnica de diferenças finitas na eq.(1), com a analogia de sistemas térmicos e elétricos⁽⁵⁾, chega-se na equação discretizada do MDF na forma explícita de trabalho, para um sistema unidimensional:

$$T_i^{n+1} = \frac{\Delta t}{C_{t_i}} \left(\frac{T_{i-1}^n}{R_{t_{i-1}} + R_{t_i}} + \frac{T_{i+1}^n}{R_{t_i} + R_{t_{i+1}}} \right) + \left[1 - \frac{\Delta t}{C_{t_i}} \left(\frac{1}{R_{t_{i-1}} + R_{t_i}} + \frac{1}{R_{t_i} + R_{t_{i+1}}} \right) \right] T_i^n \quad (8)$$

Sendo o subscrito i a posição, o sobrescrito n é um contador que corresponde ao tempo atual e Δt é o incremento de tempo.

O acúmulo de energia do elemento finito 'i' é caracterizado pela capacidade térmica C_{t_i} (J/Kg), dado pela relação:

$$C_{t_i} = \Delta x_i \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot \rho_i \cdot c'_i \quad (9)$$

onde $\Delta x_i \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ são corresponde ao volume finito do elemento 'i' (m^3), conforme mostrado na Figura 1.

A resistência térmica na direção do fluxo de calor no interior de cada elemento até a interface com o elemento adjacente é dada por:

$$R_{t_{i-1}} = \frac{\Delta x_{i-1}}{2 \cdot k_{i-1} \cdot \Delta y \cdot \Delta z} \quad R_{t_i} = \frac{\Delta x_i}{2 \cdot k_i \cdot \Delta y \cdot \Delta z} \quad R_{t_{i+1}} = \frac{\Delta x_{i+1}}{2 \cdot k_{i+1} \cdot \Delta y \cdot \Delta z} \quad (10)$$

Para o cálculo da resistência térmica nas interfaces metal/molde e molde/ambiente é somada a resistência newtoniana que leva em consideração o coeficiente de transferência de calor (h), dado por:

$$R_{NW} = \frac{1}{h \cdot \Delta y \cdot \Delta z} \quad (11)$$

Mais detalhes do uso e aplicação do modelo matemático descrito acima pode ser obtido na literatura.⁽⁵⁻⁷⁾

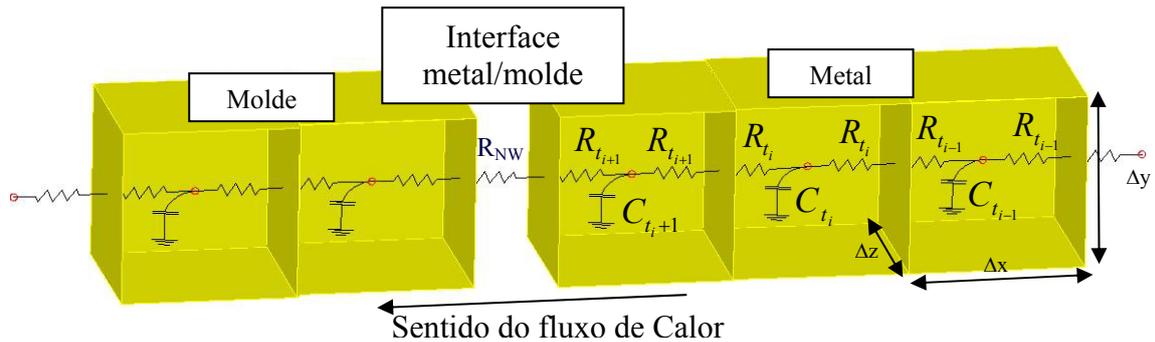


Figura 1. Representação esquemática da malha dos elementos do MDF aplicado ao fenômeno de transferência de calor.

ACOPLAMENTO DA MALHA NUMÉRICA

Para aplicação do modelo de solidificação foi necessário o acoplamento de uma malha numérica unidimensional ao longo da espessura do molde e ao longo da metade do comprimento da seção, como representado na Figura 2. Devido ao fato do molde ter sua forma parabólica definiu-se as faces do molde como: face raio superior, face raio inferior e face lateral. Na malha as únicas incógnitas a serem encontradas serão os valores numéricos dos coeficientes de transferência de calor. Para a simulação as condições de contorno assumidas são:

- Fluxo unidimensional de calor;
- Ausência de correntes convectivas no metal líquido;
- Propriedades termo físicas da liga variando com a temperatura somente na região pastosa;
- Propriedades constantes para o material do molde;
- Velocidade de lingotamento constante;
- $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1\text{mm}$;
- Temperatura inicial do metal na altura do menisco no molde ao longo da seção é considerada igual à temperatura de vazamento;
- A temperatura da água de refrigeração adotado nos cálculos é assumida como constante ao longo do comprimento do molde e é dado por $T_a = 30^\circ\text{C}$;
- Efeito de oscilação do molde, deformações do molde, segregação e flutuação do nível do metal no menisco foram ignoradas.

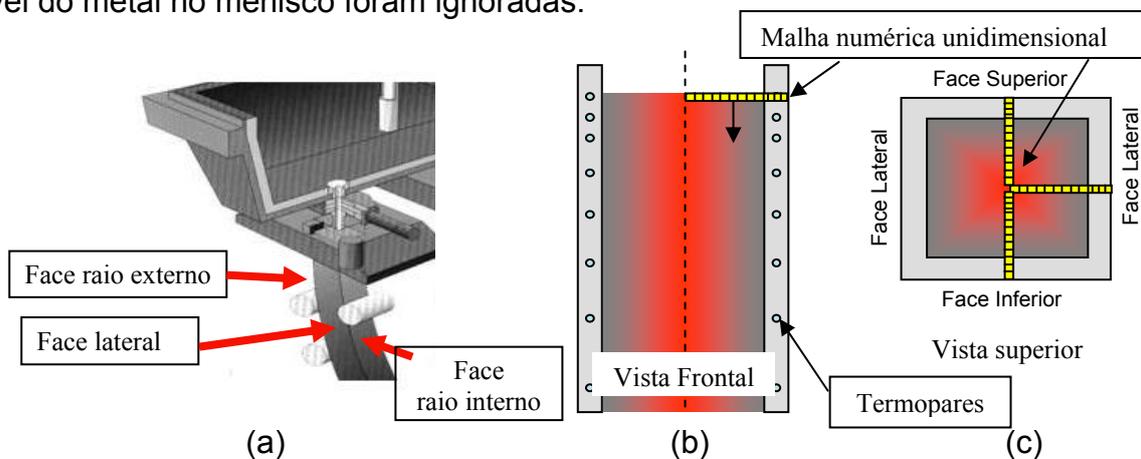


Figura 2. Desenho representativo do molde da máquina de lingotamento contínuo. (a) mostra as faces do molde. (b) e (c) mostram a representação da malha acoplada ao sistema físico.

ROTINA DE BUSCA DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR AO LONGO DO MOLDE

O método usado para determinar os coeficientes de transferência de calor nas interfaces metal/molde ($h_{m/m}$) e molde/água de refrigeração ($h_{m/a}$) é baseado na solução do problema inverso de condução de calor (PICC)⁽⁸⁾. Este método utiliza-se da medida de temperatura experimentais obtidas por termopares acoplados ao molde em posições conhecidas, e comparadas com temperaturas calculadas pelo modelo de diferenças finitas nas correspondentes posições da malha numérica. Aplicações do PICC são descritas em prévia de artigos.^(9,10)

Estratégia de Otimização de Busca

As rotinas de busca para a determinação dos coeficientes de transferência de calor na interface metal/molde, ao longo do comprimento de molde, foram desenvolvidas aplicando estratégias de otimização para o aumento da velocidade de processamento e maior precisão nos resultados gerados pelo modelo matemático de solidificação. A Figura 3 mostra o fluxograma do algoritmo de otimização para determinação dos coeficientes de transferência de calor na interface metal/molde.

A rotina atua de forma iterativa e inicialmente a malha determina um perfil de temperatura no metal e no molde na região do menisco, e compara a temperatura simulada com a experimental no ponto monitorado a partir de um valor inicial conveniente de $h_{m/m}$ assumido. São aceitas variações nas temperaturas comparadas em 2°C. O teste é feito quando a malha numérica, ao se deslocar a partir do menisco, encontra-se na posição do ponto monitorado seguinte. Neste momento, é verificado se o $h_{m/m}$ utilizado no cálculo é representativo, neste caso as temperaturas simulada e experimental se igualam ou está dentro de uma faixa de temperatura limite, ou divergem do limite tolerável. Caso necessário o sistema pode realizar um incremento ou decremento no valor de h_i (dh_i) e repetir novamente os cálculos retornando do ponto monitorado anterior com novo valor de h_i . O processo em cada passo segue até a distância do próximo termopar, e assim por diante ao longo do comprimento do molde. O dh_i é calculado por três diferentes métodos de otimização, que buscam valores de h_i que mais irá aproximar a temperatura simulada da experimental. O primeiro método utilizado é o chamado Busca 1, este método aproxima o próximo valor de h_i levando em conta a variação percentual das temperaturas experimentais do ponto corrente e posterior. Já o segundo método, chamado de Busca 2, utiliza-se dos resultados gerados da busca anterior para prever o próximo h_i . Se por acaso os métodos anteriores não determinarem o valor correto de h_i , o terceiro método chamado de Busca 3, faz um incremento ou decremento em 5% do valor do h_i corrente.

O coeficiente de transferência de calor na interface metal/água de refrigeração é calculado na distância de 120 mm do menisco e considerado constante ao longo do molde. A estratégia para determinar o $h_{m/a}$ é realizada por comparações de temperaturas experimentais e simulada dos pontos correspondentes aos termopares Tp4 e Tp5 de monitoramento. Para início dos cálculos é atribuído um valor inicial de $h_{m/a} = 45000 \text{ W/m}^2\text{K}$, se necessário é feito um incremento ou decremento no valor de $5000 \text{ W/m}^2\text{K}$ do $h_{m/a}$ corrente.

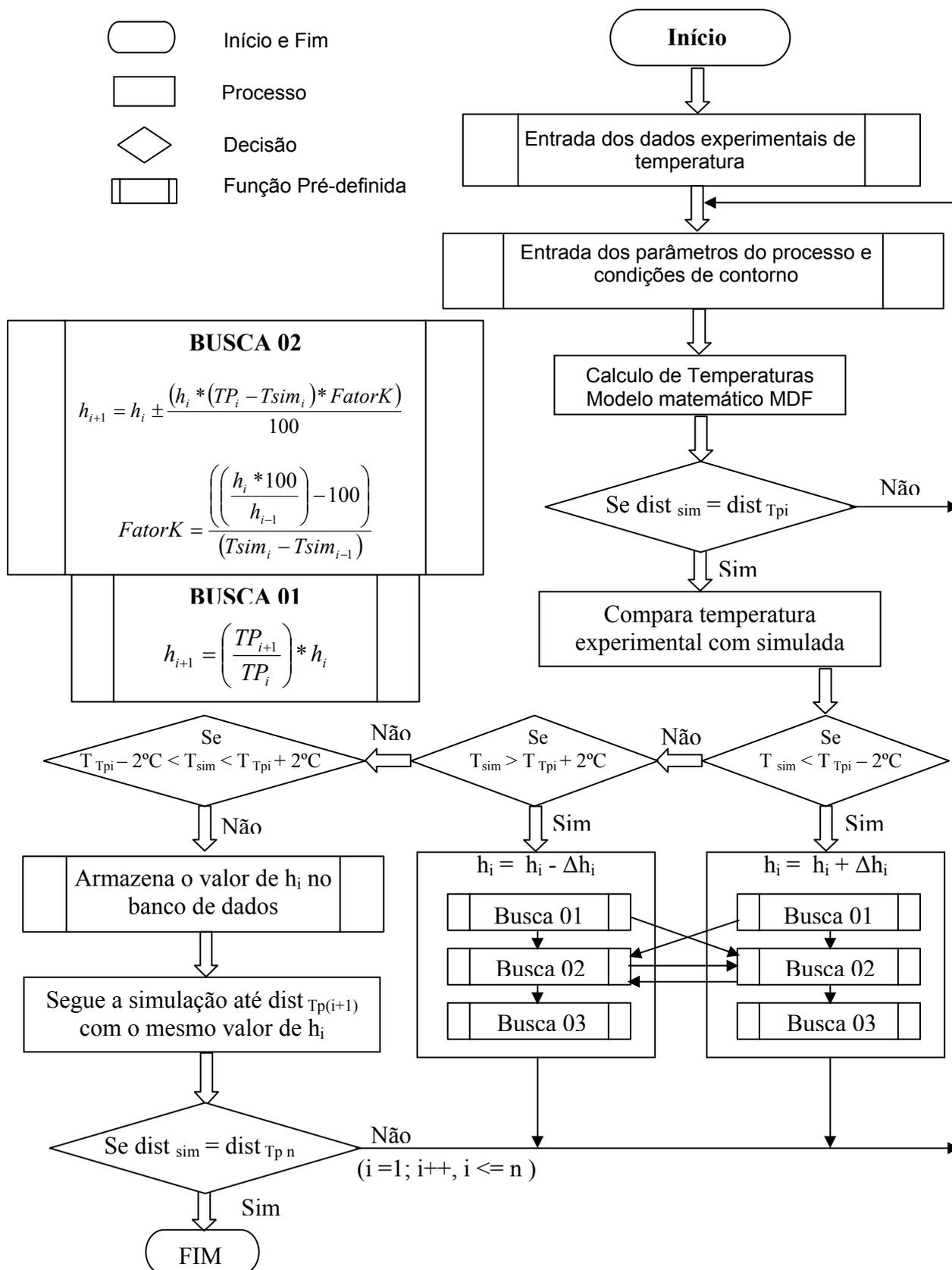


Figura 3. Fluxograma do algoritmo de otimização para determinação dos coeficientes de transferência de calor na interface metal/molde.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os dados experimentais foram obtidos em uma planta industrial com medidas de temperaturas em um molde da máquina de lingotamento contínuo. As especificações relevantes à máquina e as condições operacionais experimentais estão listados na Tabela 2. O molde foi instrumentado com a colocação de 30 termopares tipo K (Cromel – Alumel) instalados na região central de três faces do molde, dispostos do seguinte modo: 10 termopares no centro da face de raio externo, 10 termopares no centro da face de raio interno e 10 termopares no centro da face lateral.

A disposição dos termopares ao longo do molde foi dada conforme a Figura 4, desde a região do menisco (nível do metal líquido na parte superior do molde) a 170 mm do topo do molde, até 31 mm acima da saída do molde, resultando em um total de 10 (dez) pontos estratégicos de monitorização nas faces. Os termopares Tp1, Tp2, Tp3, Tp4, Tp6, Tp7, Tp8 e Tp10 foram posicionados a uma distância de 7 mm da face quente do molde (interface metal/molde), sendo Tp1 a referência da temperatura do menisco. Os termopares Tp5 e Tp9 foram localizados a uma distância de 17 mm da interface metal/molde, e estes auxiliam na aferição do modelo numérico ao longo da espessura do molde e determinação do coeficiente de transferência de calor na face fria (interface molde/sistema de refrigeração).

Tabela 1. Especificações da máquina e condições operacionais experimentais.

Seção Tarugo	240 x 240 mm
Tipo de molde	Parabólico
Material do molde	Cobre
Dimensões do molde	801 mm de comprimento e 22 mm de espessura
Comprimento da máquina	20 m
Fluxo de água	2400 l/min
Temperatura da água	25 °C

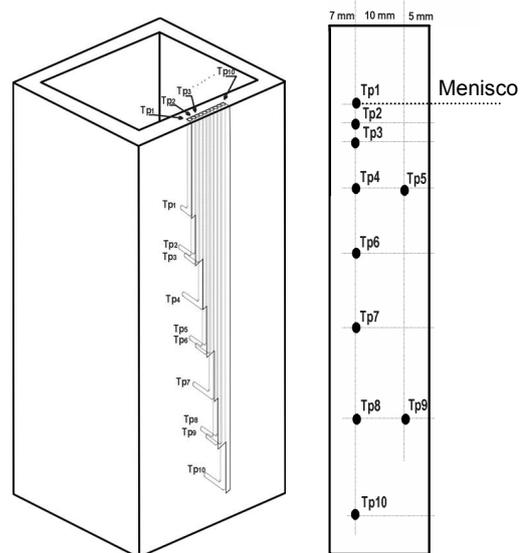


Figura 4. Disposição dos termopares no interior da espessura do molde de cobre da máquina de lingotamento contínuo.

As temperaturas monitoradas para diversas corridas de lingotamento de aços com diferentes composições foram processadas e filtradas. Estes arquivos de temperaturas são dados que alimentam o programa de simulação para determinação dos coeficientes de transferência de calor ao longo do comprimento do molde.

RESULTADOS

Para aferição do software foram comparadas as temperaturas simuladas e experimentais na parede do molde de corridas monitoradas de um aço baixo carbono e um aço médio carbono. Os dados referentes as corridas e aos aços

lingotados estão descritos na Tabela 2. A Figura 5 mostra os resultados da comparação das temperaturas referente a face lateral na parede do molde, na qual se observa boa concordância do modelo.

Tabela 2. Dados da corrida monitorada na máquina de lingotamento contínuo para o aço baixo e médio carbono.

Aço Baixo Carbono			Potencial Ferrítico = 0,95 (Tipo A)		
Composição química (%)					
C	Si	Mn	Mo	Ni	Cr
0,07	0,02	1,01	0,02	0,12	0,11
Dados Operacionais					
Temperatura Liquidus:		1528 °C	Velocidade de Lingotamento:		0,6 m/min
Temperatura Solidus:		1420 °C	Secção:		240x240 mm
Temperatura saída do distribuidor:		1577 °C			
Aço Médio Carbono			Potencial Ferrítico = 0,42 (Tipo B)		
Composição química (%)					
C	Si	Mn	Mo	Ni	Cr
0,33	0,20	0,74	0,03	0,06	0,14
Dados Operacionais					
Temperatura Liquidus:		1510 °C	Velocidade de Lingotamento:		0,68 m/min
Temperatura Solidus:		1425 °C	Secção:		240x240 mm
Temperatura saída do distribuidor:		1545 °C			

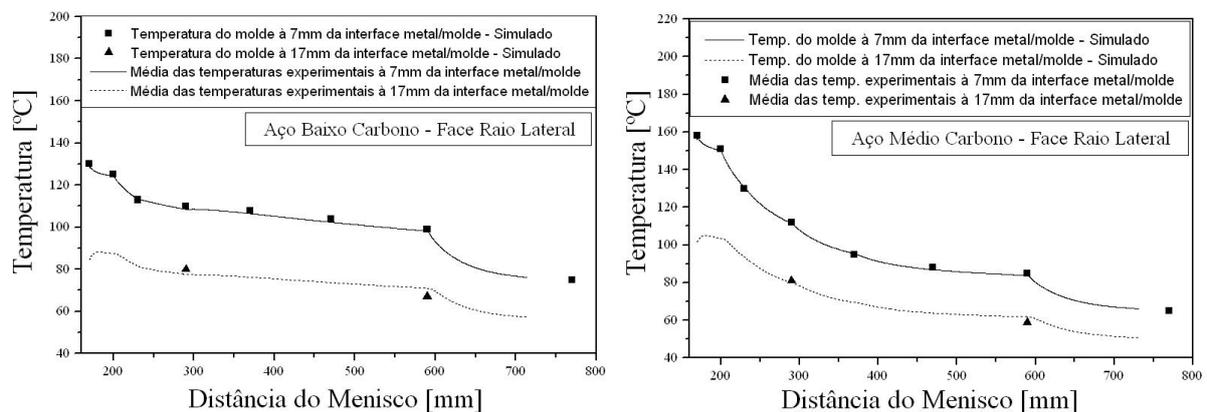


Figura 5. Perfis de temperaturas simuladas e experimentais no molde à 7mm e à 17mm da interface metal/molde de um aço baixo e um médio carbono.

Os resultados do fluxo de calor no molde obtido pelo PICC (Figura 6) mostram um pico no fluxo de calor na região do menisco para ambos os aços. Segundo Wolf⁽¹¹⁾ no início da solidificação o aço tipo A (PF = 0,95) apresenta maior tendência à contração e o aço tipo B (PF = 0,42) apresenta maior tendência ao agarramento à parede do molde. Tais características são confirmadas pelos valores de $h_{m/m}$ calculados, mostrados na Figura 6. Abaixo do menisco o fluxo de calor decresce devido à contração da casca solidificada e formação de um “gap” de ar entre a casca e o molde. Após a distância de 230 mm, para o aço Tipo A, observa-se uma reação do fluxo de calor com pequeno aumento, provavelmente devido à ação da pressão metalostática que atua sobre a casca pressionando-a sobre a parede interna do

molde, e para o aço tipo B não apresentou esta característica, mantendo uma redução contínua do fluxo de calor ao longo do molde.

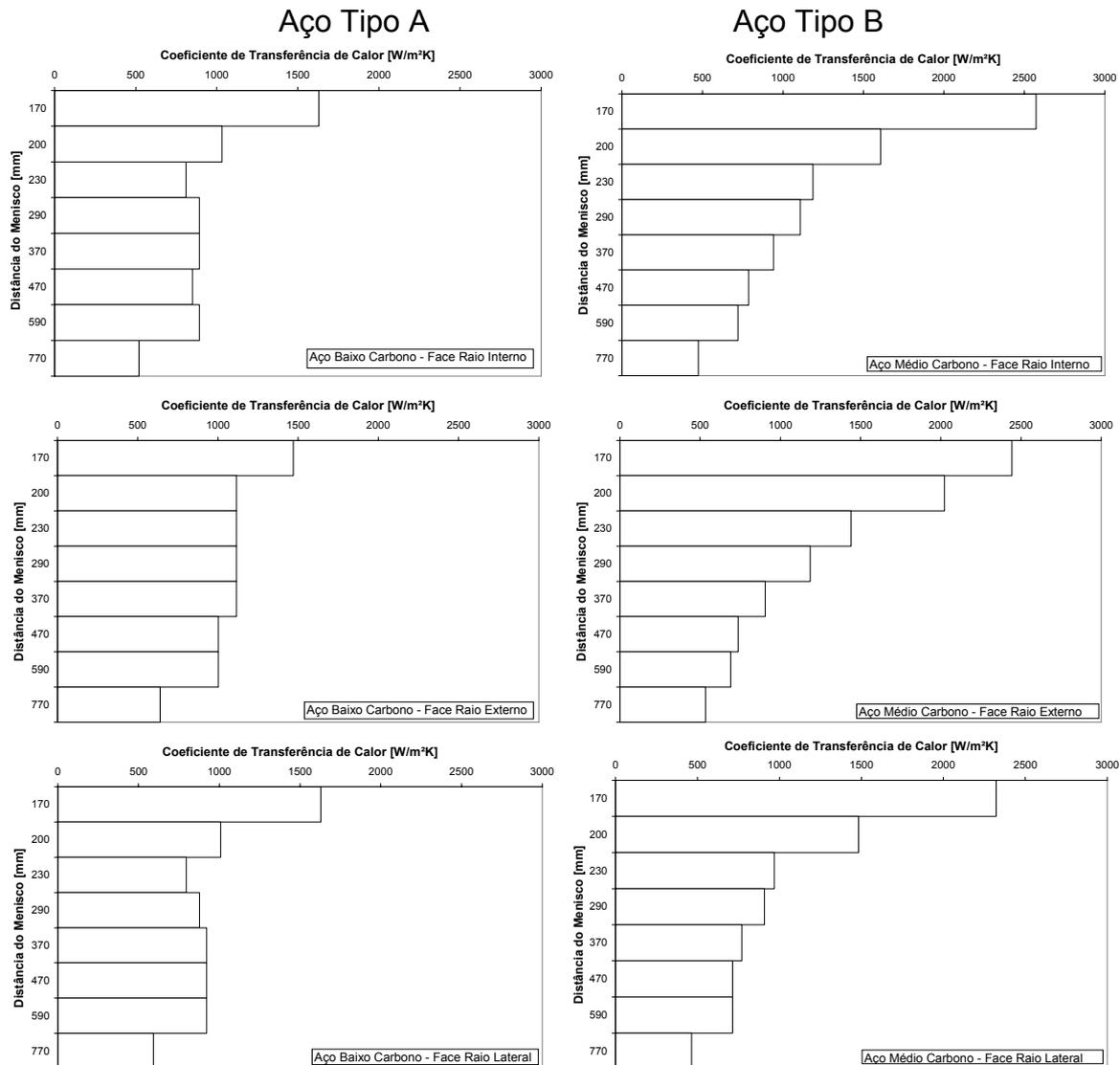


Figura 6. Coeficientes de transferência de calor da interface metal/molde de um aço baixo e um médio carbono, das faces raio interno, raio externo e raio lateral.

Os resultados da espessura da casca formada foram obtidos mediante a macrografia Baumann. Essas macrografias correspondem à secção transversal localizada a uma determinada distância do menisco, posição esta que possui um agitador eletromagnético, a qual permitiu verificar a espessura da casca solidificada na respectiva distância, lembrando que estas serão significativas, quando o tarugo na distância do agitador eletromagnético, ainda se encontrar na condição de líquido em seu interior. Caso contrário, a macrografia não apresentará nenhum tipo de resultado considerável. A técnica de medida da espessura seguiu as normas internas da empresa, sendo os resultados posteriormente comparados com os resultados apresentados pelo modelo numérico. Os resultados obtidos se mostraram aceitáveis.⁽¹²⁾

CONCLUSÃO

O modelo numérico associado a dados experimentais mostrou-se eficiente da determinação dos coeficientes de transferência de calor para cada face do molde em diferentes distâncias do menisco, o que gerou informações importantes para entender o fenômeno de solidificação e o comportamento térmico no molde para diferentes qualidades dos aços lingotados. Observou-se que a influência da variação de temperatura em cada face do molde resulta em uma distribuição de temperatura do tarugo na saída do molde não simétrico e diferente para cada face.

O modelo desenvolvido e aplicado se mostrou como uma poderosa ferramenta para a avaliação e previsão da formação de defeitos oriundos do processo de lingotamento contínuo, e em particular a aplicação em aços especiais, como aço ferramenta, aço mola e outros.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao suporte financeiro provido da CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e a GERDAU Aços Especiais Piratini (AEP).

REFERÊNCIAS

- 1 CHOW, C.; SAMARASEKERA, I. V.; WALKER, B. N.; LOCKHART, G.; High Speed Continuous Sacting of Steel Billets Part 1: General Overview, Ironmaking and Steelmaking, Vol. 29 No. 1, pp 61-69. 2002.
- 2 FUKADA, N; MARUKAWA, Y.; ABE, K.; ANDO, T.; Development of Mold (HS – Mold) for High Speed Casting, Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 38, nº 5, pp. 337-346. 1999.
- 3 PINHEIRO, C. A. M.; SAMARASEKERA, I. V.; BRIMACOMBE, j.k.; BAKSHI, I.A.; WALKER, B. N. Mould Heat Transfer and Continuously Cast Billet Quality with Mould Flux Lubrification: Part 1 Mould Heat Transfer, Ironmaking and Steelmaking, Vol. 27, No. 1, pp. 37. 2000.
- 4 CHANDRA, S.; ET AL., On Line Monitoring of Mould-Shell Interaction during Continuous Casting of Steel Billets, Ironmaking and Steelmaking, Vol. 23, No. 6, pp 512-521. 1996.
- 5 SPIM, J. A; et al; An optimization of The finite difference method for modeling solidification of complex shaped domains, Revista Brasileira de Ciências Mecânicas, São Paulo, V.XIX, No. 3, p. 392-409, 1997.
- 6 SPIM Jr., J.A.; GARCIA, A.; Numerical analysis of solidification of complex shaped bodies: coupling of mesh elements of different geometries, Materials Science & Engineering A277, p.198-205, 2000.
- 7 SANTOS, C.A.; SPIM JR., J.A., GARCIA, A., Mathematical modeling and optimization strategies(generic algorithm and knowledge base) applied to the continuous casting of steel, Engineering Applications of Artificial Intelligence 16, p. 511-527, 2003.
- 8 HO, K.; PEHLKE, R.; Mechanisms of Heat Transfer at a Metal–Mold Interface, AFS Transactions. V 92, p. 587-598. 1985.
- 9 SPINELLI, J.E.; TOSETTI, J.P.; SANTOS, C.A.; SPIM, J.A.; GARCIA, A., Microstructure and solidification thermal parameters in thin strip continuous

casting of a stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*. V 150, p. 255–262. 2004.

- 10 SANTOS, C. A. ; FORTALEZA, E. L. ; FERREIRA, C. R. F. ; SPIM JR, J. A. ; GARCIA, A. . A Solidification Heat Transfer Model and A Neural Network Based Algorithm Applied to the Continuous Casting of Steel Billets and Blooms. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Grã-Bretanha, v. 13, p. 1071-1087, 2005.
- 11 WOLF, M.M., Initial Solidification and Strand Surface Quality of Peritectic Steels, In: *Continuous Casting*. V. 9, ISS. 1997.
- 12 KARLINSKI, V. de B.; FERNANDES, P.C.; FOGAZZI, W.; COLEMBERGUE, L.A.K.; FERREIRA, C. R. F.; COCIAN, L.F.E.; SANTOS, C.A.; SPIM, J.A.; “Aferição do Software InALC+ com Dados Experimentais de Lingotamento Contínuo (LC) da Aços Especiais Piratini (AEP – GERDAU)”; Trabalho a ser apresentado no XXXVII Seminário de Aciaria Internacional da ABM, 2006.