ISSN: 2594-6153

Modelagem Numérica do Processo de Lingotamento Contínuo Horizontal de Tarugos de Cobre

Edson Fouad Beck Filho, Felipe Bertelli

Universidade Santa Cecília (UNISANTA), Santos-SP, Brasil

E-mail: bertelli@unisanta.br

Resumo: A obtenção de tubos de cobre para as mais diversas aplicações em engenharia passa invariavelmente por uma etapa de fundição, cuja microestrutura refletirá nas propriedades mecânicas e, consequentemente, na posterior conformação. O presente trabalho objetiva apresentar um modelo numérico unidimensional em diferenças finitas simplificado que represente o processo de lingotamento contínuo horizontal de tubos de cobre em tarugos com um furo central. Com o modelo proposto foi possível observar, para diferentes velocidades de lingotamento, a distribuição de temperatura na região interna ao longo da secção longitudinal do tarugo bem como a formação da camada solidificada antes da saída do molde refrigerado, demonstrando a aplicabilidade do modelo simplificado para controle do processo em ambiente industrial, com um baixo custo computacional e fácil identificação dos parâmetros térmicos envolvidos.
Palavras chave: Solidificação, Lingotamento, Simulação Numérica, Cobre.

Numerical Modeling of Horizontal Continuous Casting process of Copper Hollow billets

Abstract: The obtaining of copper pipes for the most diverse engineering applications invariably goes through a casting step, whose microstructure will reflect in the mechanical properties and consequently in the subsequent conformation. The present work aims to present a simplified one-dimensional finite difference numerical model that represents the continuous horizontal casting process of pure copper hollow billets (tubes). It was possible to observe, for different casting velocities, the temperature distribution in the internal region along the longitudinal section of the billet as well as the formation of the solidified layer before the exit of the cooled mold, demonstrating the applicability of the proposed process control model in industrial environment, with a low computational cost and easy identification of the solidification and cooling conditions during the process.
Keywords: Solidification, Continuous casting, Numerical Simulation, Copper.

Introdução

A obtenção de tarugos, perfis, blocos ou placas de cobre passa, em sua grande maioria, pela complexa etapa de solidificação por lingotamento contínuo. Este processo precede as etapas de conformação mecânica, tais como laminação, trefilação, extrusão ou estampagem. As estruturas dos grãos cristalinos em tarugos cilíndricos obtidos por lingotamento contínuo são caracterizadas tipicamente pela presença de grãos equiaxiais refinados próximos à interface de troca térmica com o molde, seguida de grãos alongados na zona intermediária no sentido radial e, por fim, grãos equiaxiais aleatórios na região mais central [1]. No caso de equipamentos de lingotamento horizontal, a ação da força gravitacional atua ao longo da secção transversal de um lingote, aumentando a eficiência do contato e troca térmica na parte inferior de contato com o molde e, de maneira oposta, na região superior na formação

de um gap de ar que impede a troca térmica de maneira mais efetiva [2] . O resultado é a obtenção de lingotes com estruturas colunares na região superior e equiaxial ou colunar refinada na parte inferior. Esta diferença pode impor ao material diferentes comportamentos mecânicos em cada secção, o que é indesejável para a conformação mecânica posterior em um processo de laminação ou extrusão para obtenção de tubos.

Para se obter estruturas mais homogêneas, o controle dos parâmetros operacionais do equipamento de lingotamento se faz importante para que os parâmetros térmicos da solidificação, como taxa de resfriamento, velocidade de avanço da interface líquido/sólida e gradiente térmico sejam os mais adequados para homogeneidade estrutural [3,4]. Para que seja possível este controle é necessário identificar o comportamento da transferência de calor na interface metal/molde, podendo esta ser quantificada pelo coeficiente global de troca térmica denominado h_g [4]. Numericamente, este coeficiente pode ser determinado pelo modelamento matemático através de uma somatória de resistências, como em um circuito elétrico, onde cada região reflete uma parcela nas componentes da resistência à troca térmica na interface metal/molde. Sendo assim, considerando uma geometria cilíndrica com extração de calor pela parte externa, a água apresenta uma resistência à troca térmica associada, bem como a espessura e material do molde, além do tamanho do gap de ar formado após o começo da solidificação do material fundido. Este conjunto de resistências podem ser associados a um coeficiente global h_g, o qual pode ser descrito como uma somatória em série destas resistências, sendo que $1/h_g = 1/h_a + e/(k_mA) + 1/h_{ar}$, onde e é a espessura do molde (m), k_m a condutividade do molde ($W.m^{-1}K^{-1}$), h_{ar} o coeficiente de transferência de calor entre a água e o molde ($W.m^{-2}K^{-1}$) e A é a área de contato. Os mecanismos de troca térmica envolvidos no coeficiente global h_g são a condução, onde há contato físico molde/metal fundido e também convecção e radiação térmica, na região de formação de gap de ar.

Objetivo: O presente trabalho tem por objetivo apresentar um modelo numérico que represente a solidificação de cobre puro em um equipamento de lingotamento contínuo horizontal, a fim de prever a formação de uma camada sólida ao longo de uma secção longitudinal e o perfil de distribuição interna de temperatura.

Materiais e métodos

Foi proposto um modelo simplificado unidimensional utilizando-se do Método de Diferenças Finitas que represente o lingotamento contínuo de cobre em uma planta industrial, cujas dimensões são apresentadas na Figura 1. Foi modelada a solidificação dentro do molde de refrigeração, destacada pela linha pontilhada em vermelho, onde o metal entra inicialmente

em contato com molde, a fim de prever a distância e o tempo necessários para que a secção transversal se solidifique integralmente antes da saída do molde. A modelagem foi implementada em linguagem C++ e a plotagem bidimensional apresentada nos resultados reflete a somatória de cada instante de tempo simulado ao longo do lingotamento, utilizando-se para isso o programa MatLab.

O modelo matemático unidimensional proposto é baseado na equação geral de condução de calor em coordenadas cilíndricas que, desprezando-se a troca térmica no sentido angular e longitudinal, é dada pela equação (1), onde k é a condutividade térmica [W/m.K], c é o calor específico [J/kg.K], ρ é a massa específica [kg/m3], $\dot{q}$ é a geração de calor [W/m3], T é a temperatura [K], t é o tempo [s] e r, z e ϕ são as coordenadas cilíndricas.

$$\frac{1}{r}.\frac{\partial}{\partial r}.\left(k.r.\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\dot{q}=\rho.c.\frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

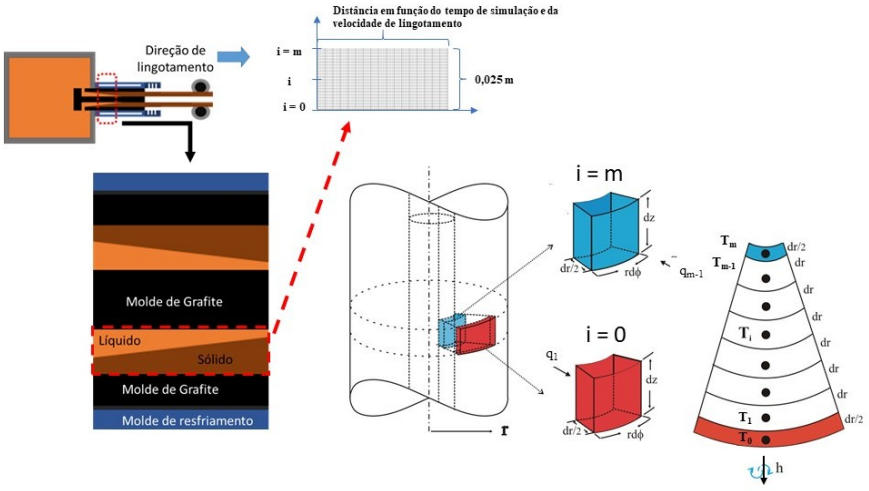

Figura 1 – Detalhe esquemático da região modelada no lingotamento e do balanço térmico realizado em cada elemento de malha.

Em cada elemento de malha foi feito um balanço energético, considerando as seguintes condições: O elemento i=0 troca calor com o molde refrigerado e com o elemento i=1 imediatamente a frente; o elemento i=m troca calor apenas com o elemento i=m-1 imediatamente atrás, pois não há troca térmica com o interior do molde; todos os outros elementos i trocam calor com o elemento anterior e posterior. Sendo assim, a determinação da temperatura em todo o sistema pode ser descrita pela utilização de três equações, que discretizadas em diferenças finitas, tem a seguinte formulação:

Para i = 0, tem-se que $T_0^{n+1}=\frac{2.\Delta t}{\rho_0.c_0.r_0.\Delta r}.\left[h_g.r_0.(T_a-T_0^n)+k.\left(r_0-\frac{\Delta r}{2}\right).\left(\frac{T_1^n-T_0^n}{\Delta r}\right)\right]+T_0^n$ (2)

Para i = m, tem-se que $T_m^{n+1}=\frac{2.\Delta t}{\rho_m.c_m.r_m.\Delta r}.\left[k.\left(r_m+\frac{\Delta r}{2}\right).(T_m^n-T_{m-1}^n)\right]+T_m^n$ (3)

ISSN: 2594-6153

Para 0 < i < m, tem-se que $T_i^{n+1} = \frac{\Delta t}{\rho_i . r_i . c_i . \Delta r^2}\left[k_{eq_{i-1}} . (r_i - \frac{\Delta r}{2}) . (T_{i-1}^n - T_i^n) + k_{eq_{i+1}} . (r_i + \Delta r2).(Ti+1n-Tin)+Tin\right.$ (4)

Foram consideradas as propriedades termofísicas do cobre puro [5] no estado sólido e líquido: k_s = 330 e k_l = 166W.m^{-1}K^{-1} (condutividade), c_s = 490 e c_l = 494 J.m^{-1}K^{-1} (calor específico), ρ_s= 8382 e ρ_l = 7938 kg.m^{-3} (densidade), calor latente = 205000 J.K^{-1}, temperatura de fusão = 1083°C. A temperatura da água foi mantida em 25°C, a temperatura de vazamento do cobre 1167°C. Para a malha temporal e espacial, respectivamente, Δt = 0,00005s e Δx = 0,0001m. O raio do tarugo foi considerado com 0,0508m, com um furo central de 0,0250m, de acordo com uma planta industrial [6].

Uma primeira simulação para se determinar o coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde (h_g) foi feita (Equação 2), considerando-se que na saída do molde refrigerado a superfície externa do tarugo encontra-se à 650°C (elemento i=m na malha de diferenças finitas), adotando-se uma velocidade de lingotamento de 230mm/min. Após esta estimativa, 4 velocidades de lingotamento (209, 254, 300 e 330 mm/min), próximas às praticadas em plantas industriais [6], foram simuladas com este mesmo valor de h_g (constante) para se avaliar a formação da camada solidificada e também da distribuição interna de temperatura ao longo da secção longitudinal.

Resultados

A partir do valor adotado para simulação, ou seja, velocidade de lingotamento de 230 mm/min e temperatura na saída do molde de 650°C, o valor do coeficiente de troca térmica h_g calculado foi de 5464 W.m^{2}K^{-1}. Posteriormente, adotando-se este valor de coeficiente como constante na Equação 2 para as 4 velocidades propostas, a Figura 2 apresenta a distribuição de temperatura ao longo da secção longitudinal de lingotamento. É possível notar que após aproximadamente 30s de lingotamento, a camada solidificada (linha preta) atinge a posição superior da imagem indicando que toda a secção se solidificou.

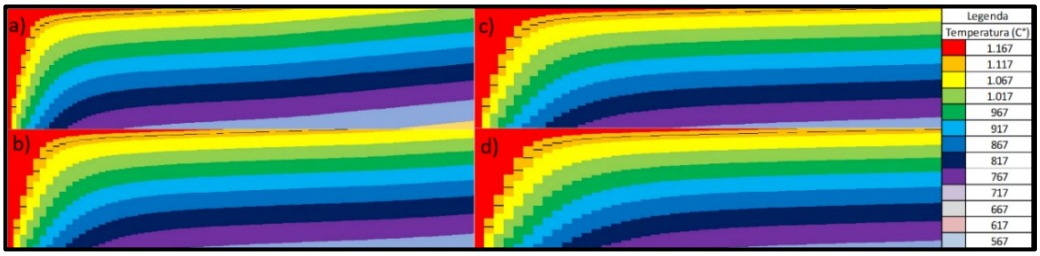

Figura 2 – Distribuição de temperatura durante o lingotamento e isoterma de solidificação para velocidades de: a) 209 mm/min, b) 254 mm/min, c) 300 mm/min e d) 330mm/min.

ISSN: 2594-6153

Discussão

A Figura 2 apresenta os resultados obtidos a partir das diferentes velocidades de lingotamento no tarugo, sendo possível observar o comportamento da isoterma referente à temperatura de solidificação, evidenciando a camada solidificada após aproximadamente 30s para todas as simulações. O modelo considerou como coeficiente h_g um valor constante, que posteriormente foi aplicado para todas as velocidades. Em todos os casos, a camada solidificada se formou antes da saída do molde, como esperado, o que indica que a operação de lingotamento nessas condições seria segura. Considerando os efeitos gravitacionais, o modelo poderia ser utilizado para determinar o coeficiente h_g em diferentes posições ao longo da secção transversal, desde que conhecida a temperatura das paredes do lingote experimentalmente. Também, o coeficiente h_g pode ser ampliado em futuras simulações para funções variáveis ao longo do lingotamento ao invés de ser considerado constante, uma vez que, em movimento e resfriamento contínuo, as paredes do tarugo tendem a possuir dimensões menores pela contração do material, aumentando o GAP de ar entre o molde e o lingote.

Conclusões

O modelo unidimensional representou bem o sistema de lingotamento horizontal de cobre, com destaque para o baixo custo computacional. É possível confirmar a camada solidificada sendo formada antes da saída do molde refrigerado. Uma vez que a temperatura de vazamento do cobre foi considerada próxima à temperatura de fusão, os efeitos convectivos puderam ser negligenciados sem prejudicar a resposta do modelo. O coeficiente h_g precisa ser melhorado, considerando-se em futuras aplicações a sua variação em função do tempo, de acordo com a evolução do gap de ar formado pela contração do metal solidificado, além de sua variação em diferentes posições ao longo da secção transversal.

Referências

1. Straffelini, G., Lutterotti, L., Tonolli, M. and Lestani, M. Modeling Solidification Microstructures of Steel Round Billets Obtained by Continuous Casting, ISIJ International, Vol. 51 (2011), No. 9, pp. 1448–1453.
2. Yan, Z., Li, X., Cao, Z., Zhang, X., Li, T. Grain refinement of horizontal continuous casting of the CuNi10Fe1Mn alloy hollow billets by rotating magnetic field (RMF). Materials Letters 62 (2008) 4389–4392.
3. Han Y., Xiao-Bo Z., Yu E., Sun L., Gao Y. Numerical analysis of temperature field and structure field in horizontal continuous casting process for copper pipes, 2017.

4. Bertelli, F., Brito, C., Meza, E.S., Cheung, N., Garcia, A. Inward and outward solidification of cylindrical castings: The role of the metal/mold heat transfer coefficient. Materials Chemistry and Physics, v. 136, p. 545-554, 2012.
5. Garcia, A. Solidificação: Fundamentos e Aplicações, Editora da Unicamp, São Paulo, Brasil, 2ª. Edição, 2007.
6. Aniceto, P.J. Influência da velocidade de lingotamento no crescimento de grãos colunares em tarugos ocos de cobre e correlações com a qualidade de tubos acabados. Dissertação de mestrado: Ano de publicação: 2017.