

ESCOLA DE ENGENHARIA DA UFMG
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
EME 887 - MODELAMENTO TÉRMICO E FLUIDO-DINÂMICO APLICADO A
SISTEMAS METALÚRGICOS.

TERCEIRO TRABALHO - PRAZO DE ENTREGA: 23 / 11 / 2017

Uma máquina de lingotamento contínuo de tarugos ou placas está operando no estado estacionário. Nestas condições, o perfil de temperatura ao longo da seção transversal do tarugo e ao longo do veio pode ser expresso por:

$$\rho v_z \frac{\partial}{\partial z} (C_p T) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

(equação análoga pode ser escrita em termos da entalpia)

onde v_z é a velocidade do veio de lingotamento. A equação acima considera que o transporte de calor por convecção na direção z é mais importante que a condução de calor nesta direção.

Assumindo que v_z é constante, pode-se escrever que:

$$v_z = \frac{dz}{dt} \quad (2)$$

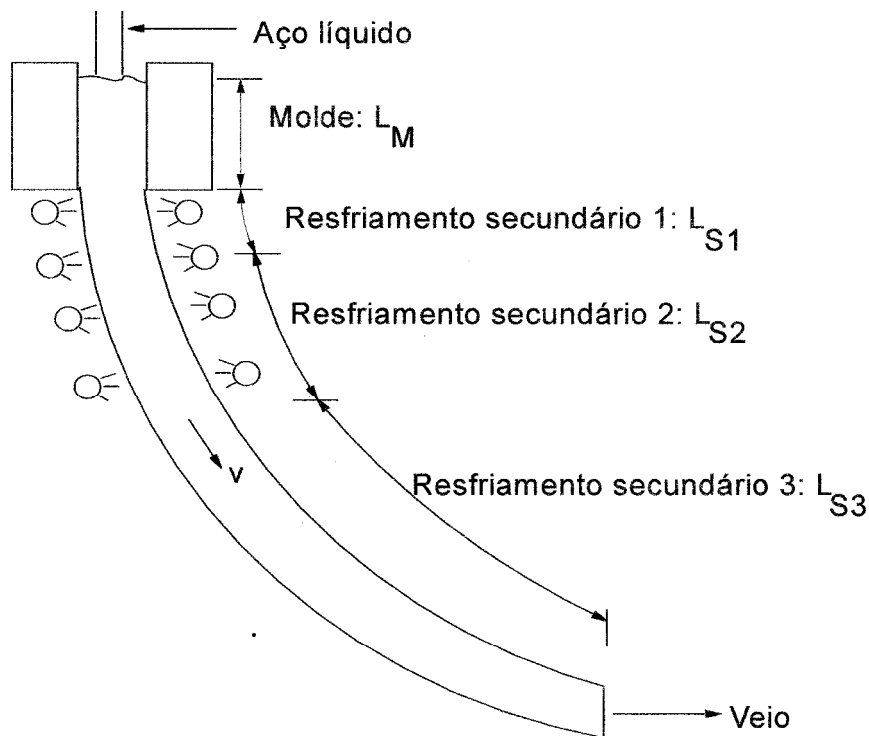
e, assim, a equação (1) pode ser escrita na forma:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} (C_p^{eq} T) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3)$$

que representa a variação de temperatura que seria determinada por um observador movendo-se junto com o veio.

A partir da formulação acima (método do calor específico equivalente), desenvolva um programa de computador que permita calcular o perfil de temperatura ao longo da seção transversal do tarugo ou placa, sofrendo solidificação em uma máquina de lingotamento contínuo, como uma função do tempo (ou distância após o menisco). Este programa deve determinar também a espessura da camada solidificada em função do tempo.

Considerar a configuração abaixo:



Assumir que na região do molde (comprimento L_M), o fluxo de calor é dado como uma função do tempo após o menisco⁽¹⁾:

$$q = 2680 - 220\sqrt{t} \quad (q [=] kW/m^2, t [=] s)$$

Na três regiões de resfriamento secundário, tem-se dois coeficientes de transferência de calor por convecção devido aos "sprays" d'água e um por convecção natural para o ar. Estes coeficientes são dados por⁽²⁾:

$$h_1, h_2 = 708 W^{0,75} T_s^{-1,2} + 0,116 \quad (h [=] kW/m^2 \text{ } ^\circ C, W [=] l/m^2 s, T_s [=] K)$$

$$h_3 = 15 W/m^2 \text{ } ^\circ C$$

onde W é a vazão específica de água nos "sprays" e T_s é a temperatura superficial do tarugo. Nestas três regiões há também perda de calor por radiação.

Usar as propriedades do aço como função da temperatura, segundo Pereira⁽³⁾. Considerar densidade constante. Corrigir a condutividade térmica no líquido e na zona pastosa, para indiretamente introduzir o efeito da convecção no líquido.

As temperaturas *liquidus* e *solidus* do aço são dadas por ⁽⁴⁾ :

$$T_L = 1536 - \Delta T_L$$

$$\Delta T_L = 78 \%C + 7,6 \% Si + 4,9 \% Mn + 34,4 \% P + 38 \% S + 3,6 \% Al$$

$$T_S = 1536 - \Delta T_S$$

$$\Delta T_S = 415,5 \%C + 12,3 \% Si + 6,8 \% Mn + 124,5 \% P + 183,9 \% S + 4,1 \% Al$$

Pode-se, então, definir um coeficiente global de partição, dado por:

$$K = \Delta T_L / \Delta T_S .$$

Testar o programa com os seguintes dados:

- $L_M = 0,8 \text{ m}$; $L_{S1} = 0,21 \text{ m}$; $L_{S2} = 1,85 \text{ m}$; $L_{S3} = 13,26 \text{ m}$;
- $W_{S1} = 5,56 \text{ l/m}^2 \text{ s}$; $W_{S2} = 0,83 \text{ l/m}^2 \text{ s}$;
- emissividade do aço = 0,8
- composição do aço: % C = 0,08 , % Mn = 0,42 , % Si = 0,05 , % P = 0,008 , % S = 0,005
- dimensões do tarugo ou placa: escolher.

Analisar o efeito da forma adotada na avaliação da fração de líquido, regra da alavanca ou variação linear com a temperatura (ou entalpia) na região entre as temperaturas *liquidus* e *solidus*.

- 1- Continuous Casting. Heat flow, solidification and crack formation. The Continuous casting mould. AIME, 1984, p. 29
- 2- J. K. Brimacombe, L.A. Batista. Continuous Casting. Heat flow, solidification and crack formation. Spray cooling in the continuous casting of steel, 1984, p. 109-123.
- 3- Pereira, R.O.S. Modelamento matemático do escoamento turbulento, da transferência de calor e da solidificação no distribuidor e na máquina de lingotamento contínuo. Tese. CPGE, 2004 (disponível *on-line* no site do PPGE/UFMG)
- 4- A.A. Howe. Estimation of liquidus temperatures for steels. Ironmaking and Steelmaking, Vol. 15, No.3, 1988, p. 134-142.