

# SOLIDIFICAÇÃO DE METAL LÍQUIDO

**Aluno: Raphael Luiz Pais**

**Orientador: Angela Ourivio Nieckele**

## Introdução

A fabricação de peças metálicas envolve o processo de solidificação de metais líquidos. Visando aperfeiçoar o processo é fundamental ter completa compreensão do fenômeno físico, assim como ser capaz de prever o processo.

Alguns trabalhos tanto numéricos como experimentais podem ser encontrados na literatura tratando da solidificação acoplada com a convecção natural. Dentre os mais recentes, vale ressaltar os trabalhos de Zhang, Liu e Wang, (1995) e Rocha (2000) que simularam numericamente o problema utilizando coordenadas móveis e compararam com os resultados experimentais de Wolff e Viskanta (1988), referente à solidificação do estanho.

## Objetivos

Prever a solidificação do estanho, utilizando o software comercial FLUENT, em um domínio com malha fixa e comparar com os resultados disponíveis na literatura. Utilizou-se exatamente as mesmas propriedades e geometria que Wolff e Viskanta (1988).

## Metodologia

A geometria e malha foram criadas utilizando o software Gambit. Para determinar o campo de velocidade e temperatura dentro da cavidade é necessário resolver de forma acoplada as equações de conservação de massa, quantidade de movimento linear e energia, tendo sido utilizado o software comercial FLUENT.

Selecionou-se a técnica de solução transiente, implícita, segregada, com o algoritmo SIMPLEC para resolver o acoplamento velocidade pressão e o algoritmo de Mutigrad para resolver o sistema algébrico.

Após um teste de malha, definiu-se uma malha de 90601 pontos nodais. Uma grande influência para o resultado é a densidade da malha utilizada, pois quanto maior o número de pontos nodais dessa malha mais precisos serão os resultados, um fator que limita a quantidade de pontos é o esforço computacional que aumenta consideravelmente com o aumento dos mesmos, consumindo um considerável tempo do CPU.

Considerou-se uma cavidade retangular com altura  $H = 6,663$  cm e largura  $L = 8,884$  cm. O material utilizado é Estanho, sendo a temperatura de mudança de fase  $T_F$  igual a  $231,9^\circ\text{C}$ , o coeficiente de expansão volumétrica  $\beta$  igual a  $106 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , calor latente  $Dh_f$  igual a  $60.600$  J/kg. A massa específica  $\rho$  é  $7,175 \text{ kg/m}^3$ ; calor específico  $c_p$  é  $277 \text{ J/kg }^\circ\text{C}$ ; condutividade térmica  $k_1$  é  $61,1 \text{ W/m }^\circ\text{C}$ ; difusividade térmica  $\alpha_1$  é  $3,074 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ; viscosidade cinemática  $\nu_l$  é  $2,81 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ . Inicialmente o estanho encontra-se na fase líquida com temperatura uniforme de  $T_C = 233 \text{ }^\circ\text{C}$ . A cavidade entra-se isolada na superfície superior e inferior. A temperatura do lado esquerdo é mantida constante e do lado direito é diminuída para  $T_f = 229 \text{ }^\circ\text{C}$ , dando início ao processo de mudança de fase acoplado ao fenômeno de convecção natural.

Os parâmetros adimensionais que governam o problema são: número de Prandtl,  $Pr$ , razão de aspecto  $AR$ , fator de sub-resfriamento  $S_T$ , número de Rayleigh  $Ra_H$  e número de Stefan  $Ste_l$  definidos pela Eq. (1) e foram fixados em:  $Pr = 0,0157$ ;  $AR = 0,75$ ,  $S_T = 2,6364$ ,  $Ra_H = 1,59 \times 10^5$  e  $Ste_s = 1,32 \times 10^{-2}$ .

$$Pr = \frac{u_\ell}{a_\ell} ; S_T = \frac{DT_s}{DT_\ell} = \frac{T_F - T_C}{T_H - T_F} ; Ste_\ell = \frac{c_{p_\ell}(T_H - T_F)}{Dh_f} ; Ra_H = \frac{g b (T_H - T_F) H^3}{a_\ell u_\ell} \quad (1)$$

A Figura 1 apresenta o campo de fração de sólido obtida no presente trabalho, para  $t = 1,462$  hr, onde a parte da esquerda, que esta mais escura, corresponde a parta líquida, enquanto na direita temos a fase sólida, entre elas podemos ver uma curva, que indica a posição da frente de solidificação, cujo formato é definido pela velocidade que o fluido gira e pela quantidade de pontos nodais.

O movimento do fluido ocorre devido à diferença de temperatura, enquanto a parede da esquerda está com uma temperatura constante e maior do que a temperatura de fusão, a temperatura na linha de solidificação está mais fria, sendo assim o fluido próximo à parede se esquentam e tende a subir, enquanto o fluido próximo à curva de solidificação esfria e tende a descer, criando então um movimento radial, que fará a solidificação ocorrer com mais facilidade na parte inferior do que na parte superior que é constantemente exposta ao fluido mais quente.

A Figura 2 apresenta a posição da frente de solidificação para diferentes instantes de tempo, obtidas por Rocha (2000) e Zhang et al (1996) comparando com os dados de Wolff e Viskanta (1988). Pode-se observar uma concordância razoável, porém uma curvatura mais acentuada foi obtida experimentalmente, não tendo sido bem capturada por ambos os modelos numéricos. Observa-se que o presente trabalho apresentou a mesma concordância qualitativa que os outros métodos, e apesar de manter o mesmo formato da frente de solidificação, apresentou uma solidificação mais lenta ao longo do tempo.

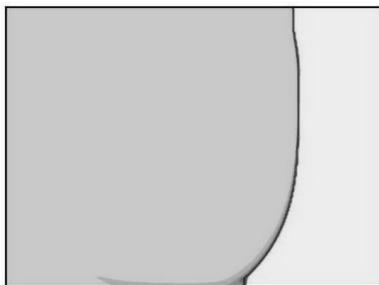


Figura 1 – Fração de sólido,  $t = 1,462$  hr

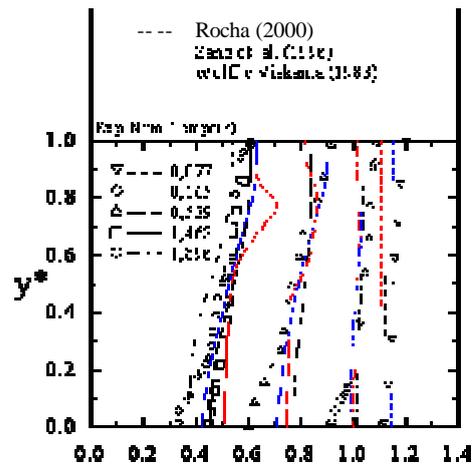


Figura 2 – Frente de solidificação.

## Conclusões

A modelagem do problema utilizando malha fixa apresentou uma concordância razoável com dados disponíveis na literatura. Para melhorar a concordância com os dados experimentais, deve-se incorporar de novos fenômenos, como turbulência na fase líquida

## Referências

- 1 – ROCHA L.J.C., Solidificação e Fusão de Substâncias Puras Sob a Influência da Convecção Natural Laminar e Turbulenta, *Tese de Doutorado*, Dpet. Eng. Mecânica, PUC/Rio, 2000.
- 2 - WOLFF, F.; VISKANTA, R.; Solidification of a Pure Metal at a Vertical Wall in the Presence of Liquid Superheat, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 31, No. 8, pp. 1735-1744, 1988.
- 3 - ZHANG, H., PRASAD, V. e MOALLEMI, Numerical Algorithm Using Multizone Adaptive Grid Generation for Multiphase Transport Processes with Moving and Free Boundaries, *Numerical Heat Transfer, Part B*, Vol 29, pp.399-421, 1996.