

# SOLIDIFICAÇÃO NA PRESENÇA DE INVERSÃO DE DENSIDADE

**Alunos: Raphael Luiz Pais e Bruno Bretas De Macedo Silva**

**Orientador: Angela Ourivio Nieckele**

## Introdução

Equipamentos de armazenagem de energia baseados no calor latente possuem um papel importante na economia, devido a alta capacidade de armazenar energia por unidade de volume [1]. No entanto a presença da inversão da densidade dificulta a obtenção da solução devido a complexibilidade do escoamento [2]. O principal objetivo dos diversos trabalhos relacionados a sistemas de armazenagem de energia é a determinação da máxima capacidade de armazenar energia por unidade de volume, associado com a condutividade térmica do material de mudança de fase [3].

## Objetivos

Análise numérica da estrutura do escoamento e da transferência de calor por convecção natural da água, em uma cavidade cilíndrica, na presença da inversão de densidade durante um processo de carregamento de um equipamento de armazenagem de energia (formação de gelo). Investiga-se a influência no escoamento do raio interno da cavidade, mantendo os outros parâmetros geométricos constantes.

## Metodologia

O tanque de armazenagem de energia é considerado como uma cavidade cilíndrica de altura  $L=12,84$  cm, espaço anular  $W=4,48$  cm e raio interno  $R_{in}$ . Três valores diferentes foram considerados:  $R_{in} = 6,35$  mm;  $9,525$  mm e  $12,7$  mm. Inicialmente considera-se uma cavidade com temperatura uniforme e igual a  $T_{in} = +6^{\circ}\text{C}$ . As paredes lateral, superior e inferior da cavidade são isoladas e a parede interna é resfriada a  $T_c = -6^{\circ}\text{C}$ . Os parâmetros físicos adimensionais que governam este escoamento são: Prandtl = 8,4; Grashof  $Gr= 3,98 \times 10^6$ , Stefan do líquido e do sólido,  $Ste_l = 0,075$  e  $Ste_s=0,037$ . Considerou-se igualdade entre todas as propriedades termofísicas da água e gelo com exceção da massa específica da água governada pela seguinte expressão que leva em conta a inversão da mesma com a temperatura  $T$ .

$$\rho_{\ell} = \rho_{\ell, \max} \left[ 1 - r_{sp} \left| T - T_{\max} \right|^b \right] \quad (1)$$

onde  $\rho_{\ell, \max} = 999,972$  kg/m<sup>3</sup>,  $r_{sp} = 9,297 \times 10^{-6}$  (°K)<sup>-b</sup>,  $T_{\max} = 4,029$  °C e  $b = 1,895$ .

O campo de velocidade, pressão e temperatura foi determinado através da solução das equações de conservação de massa, quantidade de movimento linear e energia. Utilizou-se a técnica de volumes finitos, juntamente com o esquema Power-Law e algoritmo SIMPLE [4]. O sistema algébrico foi resolvido com o Algoritmo TDMA linha por linha [4]. Utilizou-se uma malha com 280 x 280 pontos nodais e passo de tempo de 1 s.

## Resultados

A Fig 1 ilustra as linhas de corrente e isoterms para 25% do tempo total para congelar totalmente a cavidade. Pode-se observar na Fig. 1, uma grande célula girando no sentido anti-horário, na qual o fluido frio escoava para cima adjacente a interface sólido líquido. O tamanho desta célula diminuiu com o aumento do raio interno, devido a formação de uma célula menor no topo girando no sentido horário. Estas células são separadas pelo contorno da densidade

máxima, como pode ser notado nos gráficos das isothermas. A medida que o tempo passa, o gelo vai se formando, a temperatura vai caindo, restando somente uma célula girando no sentido horário, dando origem a uma menor espessura do gelo na base da cavidade pois as temperaturas mais altas encontram-se em baixo.

A Figura 2 apresenta o comportamento transiente da massa de gelo, energia sensível e latente. Observa-se que o tubo interno menor necessita de um tempo maior para congelar toda a água, o que é um aspecto positivo, pois reduz a perda de calor para o meio. Porém, observa-se uma resposta no tempo mais lenta com relação a energia armazenada sensível e latente, o que é pode ser prejudicial uma demanda rápida de energia.

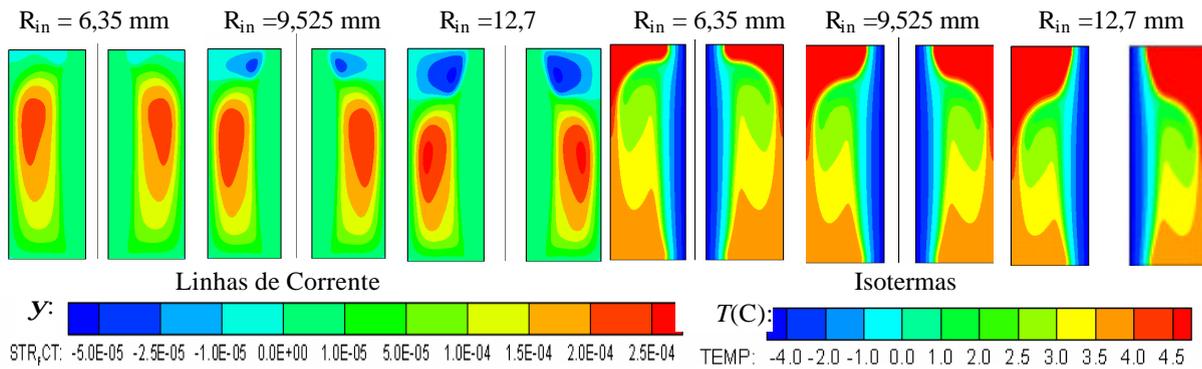


Figura 1. Linhas de corrente  $y$  e isothermas  $T$  para 25% do tempo total de congelamento  $Fo_{max}$

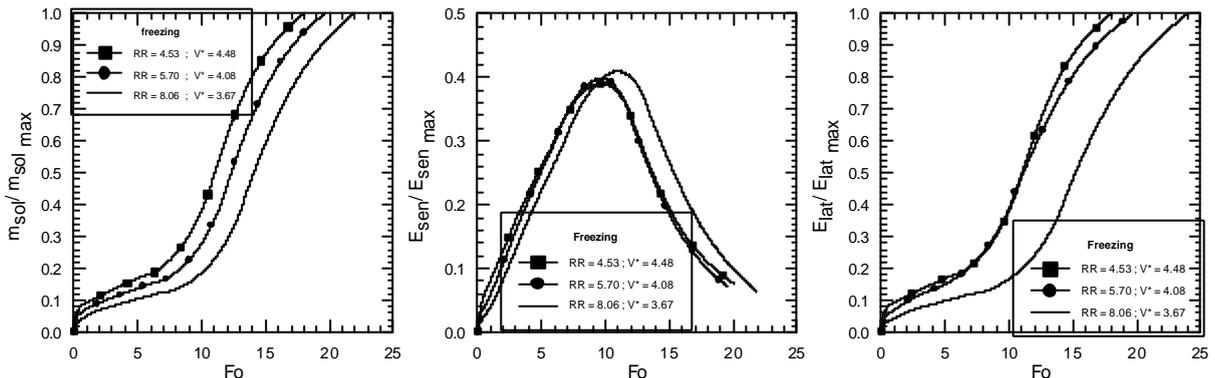


Figura 2. Comportamento transiente da massa de gelo, energia sensível e latente

## Conclusões

A modelagem do problema permite uma maior compreensão do comportamento da água onde há inversão de densidade. Mostrou-se que para o processo de carregamento (congelamento) o melhor arranjo geométrico consiste em utilizar cavidade com grandes razões de aspecto, isto é, pequeno raio interno da cavidade.

## Referências

- 1 - FARID, M.M., KHUDHAIR, A.M., RAZACK, S.A.K. AND HALLAJ, S. AL-, 2004, A review on phase change energy storage: Materials and applications, **Energy Convers. Manag.**, Vol. 45, pp. 1597–1615.
- 2 - KAYANSAYAN, N. AND ACAR, M. ALI, 2006, Ice formation around a finned-tube heat exchanger for cold thermal energy storage, **Int. J. of Thermal Sciences**, Vol. 45, pp. 405-418.
- 3 - STAMPA, C. S., NIECKELE, O. A., 2006, Numerical Analysis Of Indirect Ice Storage Systems Performance”, **Thermal Engineering**, Vol. 5 (1), pp. 84-89.
- 4 - PATANKAR, S. V., 1980, **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**, Hemisph.Pub, NY.