

CONVECÇÃO NATURAL SOBRE CILINDROS AQUECIDOS EM MEIO INFINITO: EFEITOS DA MALHA NÃO UNIFORME (TANGENCIAL)

Dáglis Shilton Silva Ferreira, MFlab, dalglishilton@yahoo.com.br
Elie Luis Martínez Padilla, MFlab, epadilla@mecanica.ufu.br
Aristeu da Silveira Neto, aristeus@mecanica.ufu.br

Resumo. Problemas envolvendo a dinâmica dos fluidos com transferência de calor são cada vez mais presentes nos diversos ramos industriais. Desta forma, compreender e quantificar corretamente os processos de transferência de calor nestes ambientes são de suma importância pois, implica em economia energética e melhor aproveitamento dos recursos naturais. O presente trabalho visa promover uma análise numérica bidimensional sobre o problema de transferência de calor por convecção natural ao redor de cilindros aquecidos, imersos em meio infinito (ar). Simulações foram realizadas utilizando um código numérico em coordenadas cilíndricas, discretizado utilizando a técnica dos volumes finitos e esquemas temporais e espaciais de segunda ordem, onde o acoplamento pressão-velocidade é feito através do método do passo fracionado. Visando uma maior estabilidade e melhores resultados, modificou-se a malha na direção tangencial, promovendo um refino localizado entre 60° e 120° . Todos os resultados foram obtidos utilizando o Prandtl igual a 0,7 (ar) compreendendo uma faixa do número de Rayleigh modificado entre 1000 e 100000. Observou-se qualitativamente o desenvolvimento da pluma térmica. O número de Nusselt médio foi calculado, obtendo uma boa concordância com as diferentes correlações encontradas na literatura.

Palavras chave: Transferência de Calor, Convecção Natural, Cilindro Aquecido.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, nas indústrias é notória a presença de problemas envolvendo a transferência de calor por convecção natural sobre cilindros aquecidos, tais como: no resfriamento de máquinas rotativas, trocadores de calor, fornos horizontais rotativos, na refrigeração de equipamentos eletrônicos, na troca de calor em aquecedores solares, no resfriamento do núcleo de reatores nucleares, em caldeiras supercríticas e no resfriamento das partes rotativas como as pás do rotor de turbinas a gás, etc. (Mohammed e Salman, 2006).

A convecção natural sobre cilindros aquecidos vem sendo tratada ao longo dos anos por vários autores tanto experimentalmente quanto numericamente visando sobretudo compreender e quantificar corretamente este fenômeno.

Na Figura (1), tem-se o fluxo por convecção natural sobre cilindros horizontais, onde θ representa o ângulo medido desde o fundo do cilindro (Chung et al., 2011). O fluxo devido ao empuxo inicia-se no fundo do cilindro e sobe ao longo da superfície do mesmo. Nota-se que no cilindro de menor diâmetro, há a formação de uma camada limite totalmente laminar ao seu redor e observa-se também a pluma no topo do cilindro. Neste cilindro a taxa de transferência de calor local é afetada pelo desenvolvimento da camada limite e atinge um máximo na base e um mínimo no topo. A medida que o diâmetro D aumenta (cilindro da direita), o fluxo na parte superior do cilindro torna-se instável e finalmente a transição à turbulência acontece. A taxa de transferência de calor decresce gradualmente desde $\theta = 0$ para a parte superior do cilindro, aumenta na região de transição e torna-se constante na região turbulenta.

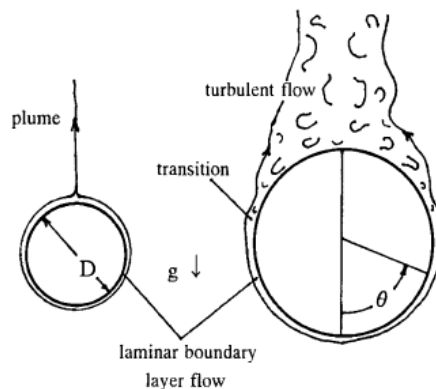


Figura 1. Representação esquemática da convecção natural ao redor de cilindros, Chung, et al. (2011).

2. CARACTERIZAÇÃO

O processo de convecção natural é um fenômeno de transporte de calor que ocorre naturalmente, promovido pelas diferenças de densidade do meio e mantido pela força da gravidade. Para o caso da convecção natural em um cilindro aquecido em meio infinito (ar), observa-se uma diferença de densidades entre o ar aquecido próximo ao cilindro (menos denso) e o ar mais distante em uma temperatura menor (mais denso). Esta diferença de densidade induz um fluxo de ar quente ascendente, também conhecido como pluma térmica a qual, permite que ocorra o transporte de calor através do movimento do fluido. Desta forma, o processo de convecção é então mantido devido à força da gravidade. (Khanpara, 1990).

O presente trabalho analisou numericamente o fluxo gerado por convecção natural em cilindros aquecidos imerso em meio infinito (ar), através da adequação do código numérico tridimensional CCCil3D (Padilla, 2004) ao problema em questão. Na Figura (2), a seguir, ilustra de maneira esquemática o escoamento estudado.

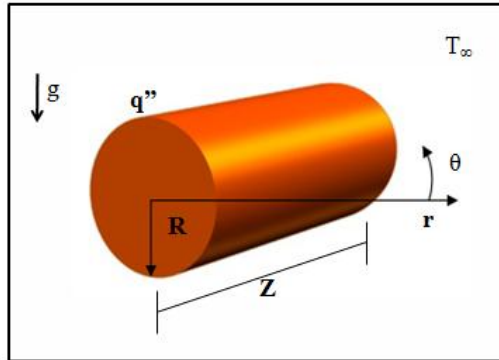


Figura 2. Esquema do escoamento sobre um cilindro horizontal em meio infinito (ar).

Conforme Fig. (2) o cilindro, de raio R, tem sua superfície aquecida com fluxo de calor constante q'' , o meio fluido (ar) encontra-se a uma temperatura T_∞ e possui como propriedades termofísicas especificadas: viscosidade cinemática (ν) = 0,000162 m²/s e difusividade térmica (α) = 0,0000229 m²/s. Tais propriedades resultam em um número de (Pr) calculado através da Eq. (1), igual a 0,7074.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (1)$$

3. METODOLOGIA

O modelo matemático utilizado para descrever os escoamentos com transferência de calor em cilindros aquecidos, baseia-se nos princípios fundamentais que regem os fenômenos de transporte, ou seja: a conservação da massa, a conservação da quantidade de movimento e a conservação da energia. Abaixo tem-se as equações em coordenadas cilíndricas, já considerando a aproximação de Boussinesq:

Equação da Conservação da Massa

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

Equação do Balanço da Quantidade de Movimento

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_j} - \beta \Delta T g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu_\epsilon \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3)$$

Equação da Conservação da Energia

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\epsilon \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

O código numérico é tridimensional desenvolvido em coordenadas cilíndricas, discretizado utilizando a técnica dos volumes finitos e esquemas temporais e espaciais de segunda ordem, onde o acoplamento pressão-velocidade é feito através do método do passo fracionado. O escoamento é considerado incompressível com propriedades físicas constantes, exceto para o termo de empuxo, o qual está ligado com a variação de densidade. As variações de densidade são provocadas principalmente pela expansão térmica do fluido. Fato que é resolvido modelando a densidade no termo de empuxo através da aproximação de Boussinesq.

Visando uma maior estabilidade e melhores resultados, modificou-se a malha original (Padilla, 2004) na direção tangencial, promovendo um refino localizado entre 60° e 120°. Conforme Fig. (3). A nova malha utilizada é não uniforme na direção radial, refinada nas proximidades da superfície do cilindro (sendo a variação baseada no arco formado por $\Delta\theta$) e refinada tangencialmente (sendo a células refinadas compreendidas entre 60° e 120° igual a metade da células não refinadas presentes no restante do domínio).

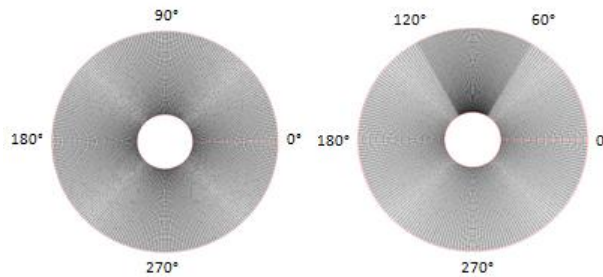


Figura 3. Esquema ilustrativo do refino tangencial da malha utilizada.

4. RESULTADOS

O presente trabalho utiliza-se de dois parâmetros adimensionais como fator de comparação entre os diferentes trabalho na literatura, são eles o número de Rayleigh modificado (Ra^*) representado na Eq. (5) e o número de Nusselt médio ($\{Nu\}$) representado pela Eq. (6).

$$Ra^* = \frac{g\beta D^4 q''}{k\nu\alpha} \quad (5)$$

$$\{Nu\} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{hD}{k} d\theta \quad (6)$$

As simulações foram realizadas utilizando duas malhas: 30x168x1 e 46x252x1 ambas com um domínio correspondente a 4 diâmetros e a razão de aspecto (D/Z) igual a 1. Na Figura (4) tem-se o desenvolvimento do campo térmico para uma faixa de Ra^* de 10^3 a 10^5 , correspondente a um fluxo imposto de calor na faixa de $9,992 \times 10^{-2}$ [w/m²] a 9,992 [w/m²]. Nota-se nesta figura que a camada limite térmica e a pluma do fluido aquecido tornam-se cada vez mais finas conforme aumenta-se o fluxo de calor (aumento do Ra^*), este fato retrata a realidade física do problema, pois quanto maior for o fluxo de calor imposto no cilindro, maior será a força de empuxo correspondente e como consequência, maiores serão as velocidades alcançadas.

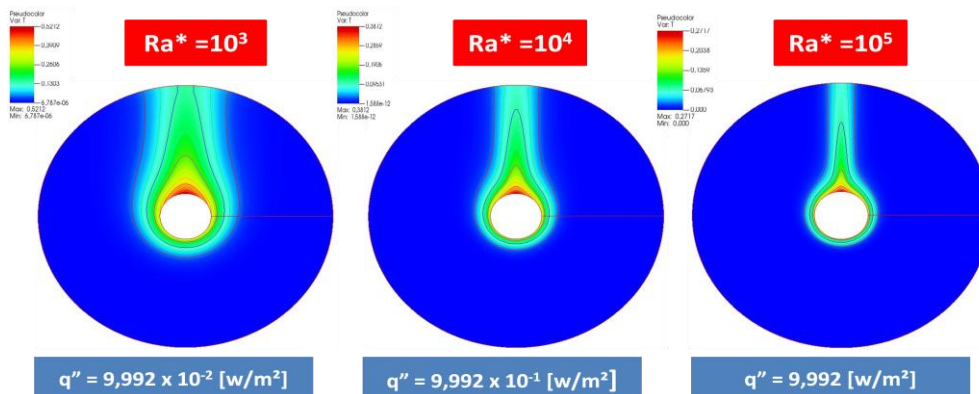


Figura 4. Evolução dos campos de temperatura para uma faixa de Ra^* de 10^3 a 10^5 .

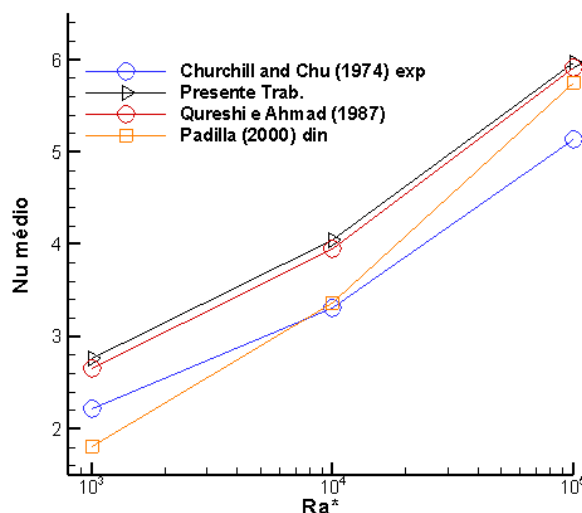


Figura 5. Comparação do Nusselt médio entre os dados experimentais e numéricos para uma faixa de Ra^* de 10^3 a 10^5

Nota-se na Fig. (5) que os dados obtidos no presente trabalho se comportam muito bem perante ao trabalho numérico de (Qureshi e Ahmad, 1987) os valores encontrados são praticamente iguais, já com relação aos numérico de Padilla (2000) e ao trabalho empirico de (Churchill e Chu, 1974) há uma uma pequena discrepância nos dados, principalmente para os valores abaixo de Ra^* de 10^4 . Entre os possíveis fatores que contribuem para este fato estão: a diferença entre os métodos numéricos, erros relativos devido as aproximações numéricas e a confiabilidade dos dados experimentais antigos.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho demonstrou que o código numérico tridimensional desenvolvido utilizando a técnica dos volumes finitos, retrata de forma satisfatória o comportamento qualitativo e quantitativo do fluxo correspondente ao processo de transferência de calor por convecção natural em cilindros aquecidos imersos em meio infinito. A não uniformidade na direção tangencial promoveu uma melhor estabilidade numérica ao código, fato que proporcionou ao mesmo simular casos para Ra^* acima de 10^4 . Os dados encontrados apresentaram uma boa concorradância com a literatura, sobretudo perante ao trabalho numérico mais recente, porém com relação ao trabalho experimental (mais antigo) há uma discrepância nos valores de Ra^* , evidenciando assim a carência de dados experimentais mais atuais para comparação.

6. REFERÊNCIAS

- Chung, B.J., Eoh, J.H. and Heo, J.H., 2011, "Visualization of Natural Convection Heat Transfer on Horizontal Cylinders", *Int J Heat Mass Transfer* 47:1445-1452.
- Churchill, S.W. and Chu, H.H.S., 1974, "Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Horizontal Cylinder", *I. J Heat and Mass Transfer*, vol. 18, pp. 1049-1053.
- Fand, R.M., Morris, E.W. and Lum, M., 1977, "Natural Convection Heat Transfer From Horizontal Cylinders to Air, Water and Silicone Oils for Rayleigh Numbers", *I. J Heat and Mass Transfer*, vol. 20, pp. 1173-1184.
- Khanpara, J.C., 1990, "Natural Convection Heat Transfer From a Horizontal Cylinder Survey of Measurements, Analysis, and Experience – Part I", *Journal of Thermal Insulation, Technomic Publishing Co., Inc.*, vol. 13
- Mohammed, H.A. and Salman, Y.K., 2006, "Experimental Investigation of Mixed Convection Heat Transfer for Thermally Developing Flow in a Horizontal Circular", *Numerical Heat Transfer, Selangor, Malaysia*.
- Padilla, E.L.M., 2000, "Simulação de Grandes Escalas com Modelagem Dinâmica, Aplicada à Convecção Mista", *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia-MG, Brasil*.
- Padilla, E.L.M., 2004, "Simulação de Grandes Escalas da Transição à Turbulência em Sistemas Rotativos com Transferência de Calor", *Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia-MG, Brasil*.
- Qureshi, Z.H. and Ahmad, R., 1987, "Natural Convection From a Uniform Heat Flux Horizontal Cylinder at Moderate Rayleigh Numbers", *Numerical Heat Transfer*, vol. 11, pp. 199-212.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são responsáveis por todas as informações contidas neste trabalho.