

CONVECÇÃO NATURAL SOBRE CILINDROS AQUECIDOS

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

Resumo. Atualmente nas indústrias é notória a presença de problemas envolvendo a dinâmica dos fluidos com transferência de calor. Neste contexto, problemas onde a transferência de calor ocorre sobre cilindros aquecidos, merece um destaque especial. 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). O código numérico foi 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. As simulações numéricas foram realizadas compreendendo uma faixa do número de Rayleigh modificado entre 10 e 1000000 e Prandtl igual a 0,7. Verificou-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

Escoamentos envolvendo a transferência de calor por convecção natural sobre cilindros aquecidos são encontrados em muitas aplicações industriais, 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).

Ao longo dos anos vários autores estudam a convecção natural sobre cilindros aquecidos experimentalmente e numericamente visando sobretudo compreender e quantificar corretamente este fenômeno. Chung et al. (2011) verificou experimentalmente que o fluxo laminar ou turbulento na convecção natural em cilindros horizontais apresentam diferenças significativas. Na Figura (1), tem-se o fluxo por convecção natural sobre cilindros horizontais, onde θ representa o ângulo medido desde o fundo do cilindro. 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 (cilindro da esquerda) há a formação de uma camada limite totalmente laminar ao redor do cilindro 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.

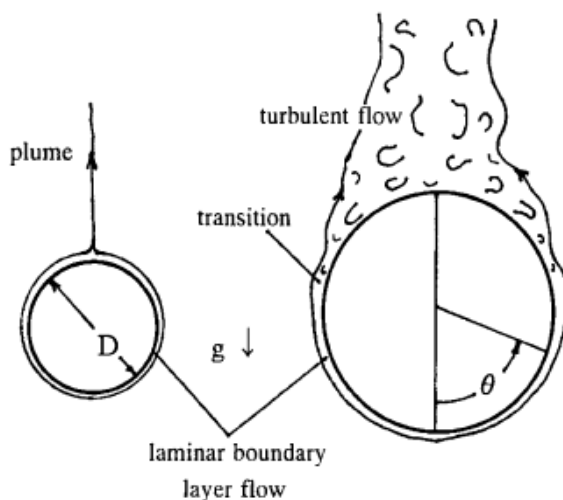


Figura 1. Representação esquemática da convecção natural ao redor de cilindros, Chung, et al. (2011).

2. CARACTERIZAÇÃO

Em convecção natural o escoamento do fluido é induzido pelo aquecimento uniforme da superfície do cilindro. Desta forma, 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.

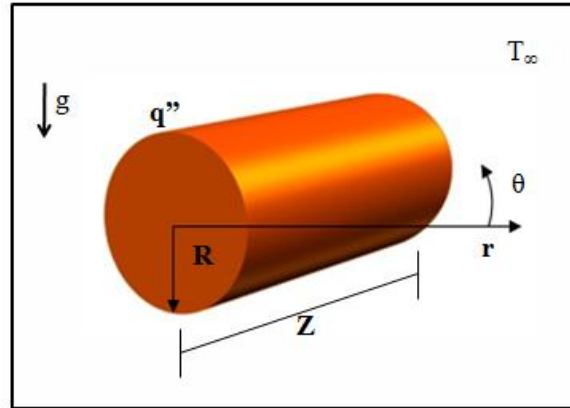


Figura 2. Esquema do escoamento sobre um cilindro horizontal em meio infinito (ar).

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 suas propriedades termofísicas especificadas na Tab. (1). Os dados desta tabela resultam em um número de (Pr) calculado através da Eq. (1), igual a 0,7074.

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

Tabela 1. Propiedades Termofísicas do Ar

Propriedades Termodinâmicas	Valor	Unidade
Viscosidade cinemática: ν	0,0000162	m ² /s
Difusividade térmica: α	0,0000229	m ² /s
Coefficiente de Expansão Térmica: β	0,003335	1/K
Condutividade Térmica: k	0,026238	W/mK

3. METODOLOGIA

O modelo matemático que descreve os escoamentos com transferência de calor, em especial a transferência de calor em cilindros rotativos aquecidos, tem por base os 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

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

Equação da Conservação da Energia

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

O presente trabalho adaptou o código numérico CCCil3D (Padilla, 2004) às novas condições de contorno que permitiram ao mesmo, simular adequadamente o fenômeno da convecção natural sobre um cilindro aquecido em meio infinito. 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.

Conforme realizado por (Padilla, 2004), a malha correspondente para o sistema de cilindro em meio infinito, é não uniforme na direção radial, refinada nas proximidades da superfície do cilindro (sendo a variação baseada no arco formado por $\Delta\theta$) e uniforme na direção tangencial. A Figura (3) ilustra a malha utilizada.

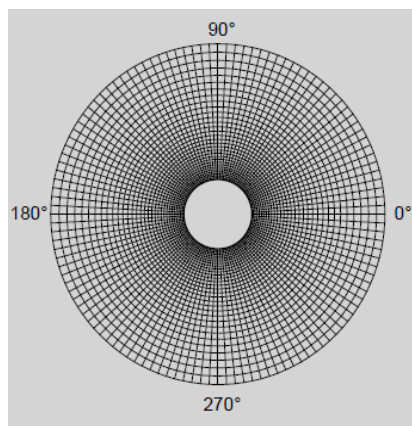


Figura 3. Malha utilizada para representar o cilindro em meio infinito (Padilla, 2004).

3. RESULTADOS

O presente trabalho utiliza-se de dois parâmetros adimensionais como fator de comparação entre os diferentes trabalhos 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).

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

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

Apesar do código suportar a terceira dimensão (z), os resultados do presente trabalho foram obtidos bidimensionalmente (r e θ). Todas as simulações foram realizadas usando uma malha $16 \times 72 \times 2$, 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 a 10^3 , correspondente a um fluxo imposto de calor na faixa de $9,992 \times 10^{-4}$ [W/m²] a $9,992 \times 10^{-2}$ [W/m²]. Observa-se nesta figura que com o aumento do fluxo de calor (aumento do Ra^*) a camada limite térmica e a pluma do fluido aquecido tornam-se cada vez mais finas, evidenciando 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.

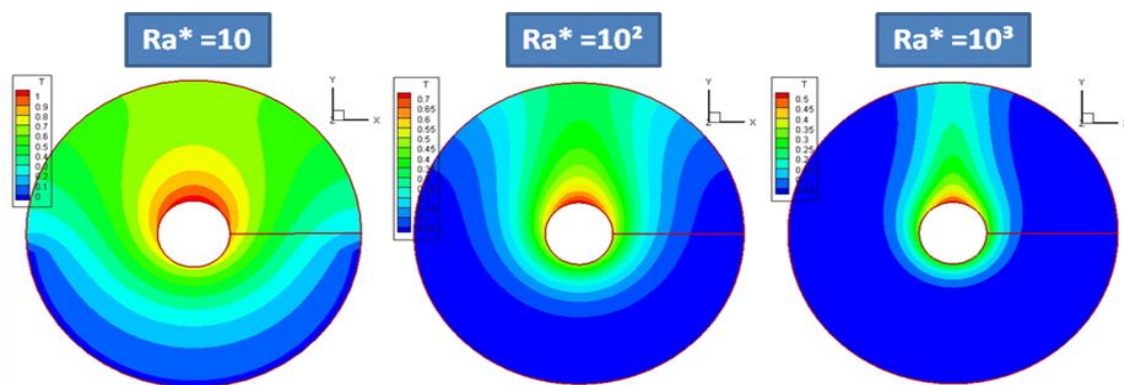


Figura 4. Evolução dos campos de temperatura para uma faixa de Ra^* de 10 a 10^3 .

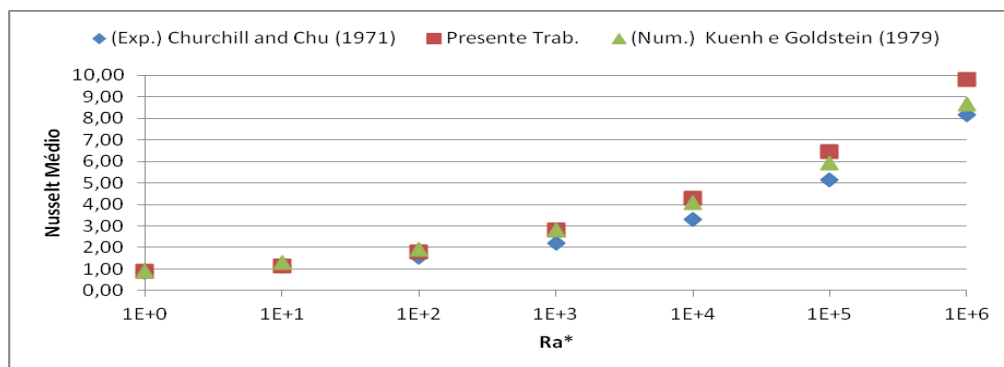


Figura 5. Comparação do Nusselt médio entre os dados experimentais e numéricos para uma faixa de Ra^* de 10 a 10^6

Nota-se na Fig. (5) que os dados obtidos no presente trabalho se comportam muito bem com os trabalhos numérico (Kuenh e Goldstein, 1979) e experimental (Churchill e Chu, 1979) para baixos Ra^* . Já para Ra^* acima de 10^4 , há uma discrepância nos dados, principalmente com relação o trabalho experimental. Há varios fatores que contribuem para este fato: a baixa resolução da malha numérica aplicada, a diferença entre os métodos numéricos e a confiabilidade dos dados experimentais antigos.

4. CONCLUSÃO

No presente trabalho evidenciou-se o comportamento qualitativo e quantitativo do fluxo correspondente ao processo de transferência de calor por convecção natural em cilindros aquecidos imersos em meio infinito através de um código numérico tridimensional desenvolvido em coordenadas cilíndricas, discretizado utilizando a técnica dos volumes finitos. Os dados encontrados apresentaram uma boa concordância com a literatura, sobretudo para uma faixa de Ra^* abaixo de 10^4 contudo, contudo para Ra^* maiores os resultados demonstraram uma ligeira discrepância, evidenciando assim a necessidade de refinamento da malha.

4. 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.
- Chrchill, S.W. and Chu, H.H.S., 1975, "Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Horizontal Cylinder", *I. J Heat and Mass Transfer*, vol. 18, pp. 1049-1053.
- Kuehn, T.H. and Goldstein, R.J., 1979, "Numerical Solution of the Navier-Stokes Equations for Laminar Natural Convection About a Horizontal Isothermal Circular Cylinder", *Int. J Heat Mass Transfer*, 23, pp. 971-979.
- 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., 2004, "Simulação de Grandes Escalas da Transição à Turbulência em Sistemas Rotativos com Transferência de Calor", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil.

4. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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