ANAIS PROCEEDINGS

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS UNICAMP

COBEM 79

V CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECANICA

CAMPINAS, 12-13-14 e 15 DEZEMBRO 1979

ABCM

TRABALHO DE PESQUISA
RESEARCH PAPER

Nº D-25 P.P. 321 - 330

MODELO NUMÉRICO DE ISOLAÇÃO TÉRMICA INTERNA TIPO FIBRA EM DUTOS DE GÁS QUENTE

Armin Nelson Urban Weiter
Pesquisador, IPEN
USP - São Paulo - SP - Brasil

Ahmet Aydin Konuk
Prof. Colabor.- Depto. de Eng. Química
UNICAMP - Campinas - SP - Brasil

SUMÁRIO

Foi desenvolvido um modêlo numérico para o estudo da convecção natural no isolamento térmico interno tipo fibras, para dutos cilíndricos nas posições horizontal e vertical. As distribuições de temperaturas e velocidades obtidas, permitem o cálculo da condutividade térmica efetiva global e ao longo da parede fria, que são necessários para o projeto do isolamento. O número de Nusselt global, foi correlacionado com o número de Rayleigh, para uma rápida avaliação.

SUMMARY

A numerical model has been developed to study natural convection in fibrous internal insulation for cylindrical ducts in horizontal and vertical positions. The computed velocity and temperature distributions yielded local cold wall and overall effective thermal conductivities, both necessary in the design of the insulation. The overall Nusselt number has been correlated with Rayleigh number for an immediate evaluation .

1. Introdução

Isolamento térmico em dutos, é normalmente utilizado para diminuir a perda de calor, sendo colocado externamente ao mesmo. Caso o fluido esteja nas condições de alta pressão e temperatura, além de diminuir a perda de calor, é necessário proteger a parede do duto da alta temperatura. Isto é conseguido, utilizando-se isolamento térmico interno, onde o material isolante é colocado entre o duto principal e um duto interno coaxial, conforme figura 1 .

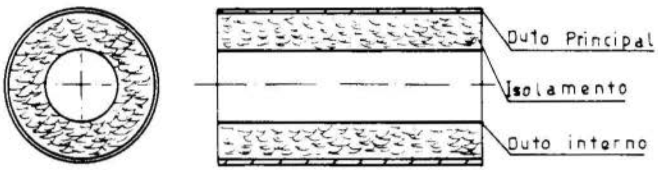


Figura 1 - Duto Isolado internamente

Este tipo de isolamento, está sendo estudado, para dutos de gás quente dos reatores nucleares à gás à alta temperatura (HTGR), onde o fluido se encontra à pressão e temperatura da ordem de 40 atm e 950 °C.

Foram testados em laboratório, vários tipos de materiais para isolamento interno [2], sendo que o isolante composto de fibras de material resistente à alta temperatura (Kaowool), apresentou maior viabilidade de utilização .

No isolamento externo, a pressão no interior do isolamento, é a atmosférica, enquanto que no interno, é a do gás, para que o duto interno, que suporte a alta temperatura, não fique submetido à esforços de pressão .

A combinação de alta pressão e alta diferença de temperatura (≃500 °C) entre o lado quente e frio da camada isolante, pode resultar no surgimento de convecção natural do gás, dentro do isolamento. Esta convecção natural, deteriora o efeito isolante do gás, que é ótimo quando este está parado .

Para o estudo da convecção natural no isolamento, foram feitos modêlos numéricos, somente para geometrias retangulares de interesse no HTGR [1]. Estes modelos atenderam satisfatoriamente aos resultados experimentais, mostrando a validade da formulação usada. Não se encontra porém, na literatura, modêlos para geometrias circulares.

O objetivo deste trabalho, é elaborar um modêlo para o estudo da convecção natural no isolamento térmico em dutos circulares, carregando gás a alta pressão e temperatura, nas posições, horizontal e vertical, seguindo uma formulação similar a da utilização para geometrias retangulares.

Experiencias [3] mostram, que o isolamento tipo fibras se comporta como um meio poroso. Para este meio, são escritas as equações de conservação de massa, momentum e energia, que são resolvidas pelo método das diferenças finitas. Obtem-se as distribuições das temperaturas e velocidades no isolamento, sendo então, possível, a avaliação do seu desempenho .

As equações de conservação usadas, bem como os resultados calculados, são apresentados nos ítens seguintes. O trabalho com maiores detalhes se encontra em [4].

2. Formulação das Equações, Condições de Contorno e Método de Solução

Para meio poroso, a equação de conservação de momentum, é simplificada para a lei Darcy, i.é, o gradiente de pressão, é função linear de velocidade. Assume-se, que a temperatura local da fibra é a mesma da do gás .

Cilindro Horizontal

É considerado para a formulação, metade da secção transversal do cilindro (conforme Figura 2), devido a simetria existente .

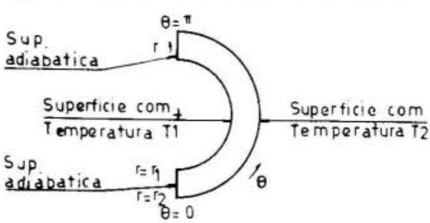


Figura 2 Geometria do cilindro horizontal considerada no modêlo

O equacionamento é feito em coordenadas polares r e θ. A direção axial não é considerada, pois as distribuições de temperaturas e velocidades, não se alteram nesta direção.

A equação de conservação de massa é dada por :

$$\frac{\partial}{\partial r}(r\rho v_r) + \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho v_\theta) = 0 \tag{1}$$

onde, ρ é a densidade do gás e v a sua velocidade no isolamento.

A equação de conservação de momentum, i.é, a lei Darcy, é dada na direção radial, por :

$$v_r = \frac{K}{\mu}\left(\rho g_r - \frac{\partial p}{\partial r}\right) \tag{2}$$

e na direção angular por :

$$v_\theta = \frac{K}{\mu}\left(\rho g_\theta - \frac{\partial p}{r\partial \theta}\right) \tag{3}$$

onde, K é a permeabilidade das fibras do isolamento, μ a viscosidade dinâmica do gás, g a aceleração da gravidade e P a pressão do gás.

É definida uma função de corrente, de modo que satisfaça a equação de massa, ela é dada por :

$$v_r = \frac{1}{r\rho}\frac{\partial \psi}{\partial \theta} \tag{4}$$

$$v_\theta = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \psi}{\partial r} \tag{5}$$

Combinando as equações 2 e 3, eliminando a pressão e considerando a definição da função corrente (4 e 5), a equação da conservação de momentum resulta em :

$$\frac{1}{rK}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\nu\frac{\partial \psi}{\partial \theta}\right) + \frac{1}{K}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\nu\frac{\partial \psi}{\partial r}\right) = g\left(\cos\theta\ \frac{\partial \rho}{\partial \theta} + r\sin\theta\ \frac{\partial \rho}{\partial r}\right) \tag{6}$$

onde, ν é a viscosidade cinemática do gás ($\nu = \mu/\rho$)

A equação de conservação de energia, considerando a função corrente, é dada por :

$$\frac{\partial\psi}{\partial\theta}\frac{\partial}{\partial r}(C_pT) - \frac{\partial\psi}{\partial r}\frac{\partial}{\partial\theta}(C_pT) - \frac{\partial}{\partial r}(r\lambda\frac{\partial T}{\partial r}) - \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial\theta}(\lambda\frac{\partial T}{\partial\theta}) = 0 \qquad (7)$$

onde T é a temperatura, Cp o calor específico a pressão constante do gas e λ o coeficiente de condutividade térmica do gás mais fibras .

No contorno, a função corrente é nula, as temperaturas de parede quente e fria são dadas e para $\Theta = 0$ e $\Theta = \pi$, não há fluxo de calor, devido a simetria ($\partial T/\partial\Theta = 0$)

Cilindro Vertical

As equações de conservação e condições de contorno, são formuladas para isolamento entre dois cilindros coaxiais (Figura 3) .

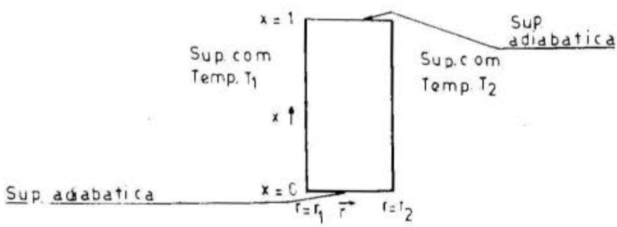


Figura 3 Geometria do cilindro vertical considerada no modêlo

O equacionamento é feito em coordenadas cilindricas r e x. Não é considerada a direção angular, uma vez que as velocidades e temperaturas não se alteram nessa direção .

A equação de conservação de massa é dada por :

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(\rho r v_r) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) = 0 \qquad (8)$$

A equação de conservação de momentun, i.é, a Lei de Darcy, é dada, na direção radial e axial por :

$$v_r = \frac{K}{\mu}(\rho g_r - \frac{\partial p}{\partial r}) \qquad (9)$$

$$v_x = \frac{K}{\mu} (\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x}) \qquad (10)$$

A função corrente é definida por :

$$v_r = \frac{1}{\rho r} \frac{\partial \psi}{\partial x} \qquad (11)$$

$$v_x = - \frac{1}{\rho r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \qquad (12)$$

Procedendo-se analogamente ao cilindro horizontal, a equação de conservação de momentun resulta em :

$$\frac{1}{rK} \frac{\partial}{\partial x} (\nu \frac{\partial \psi}{\partial x}) + \frac{1}{K} \frac{\partial}{\partial r} (\frac{\nu}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}) = g \frac{\partial \rho}{\partial r} \qquad (13)$$

A equação de conservação de energia, considerando a função corrente, é dada por :

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial r} (c_p T) - \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial}{\partial x} (c_p T) - \frac{\partial}{\partial r} (r\lambda \frac{\partial T}{\partial r}) - r \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) = 0 \qquad (14)$$

As condições de contorno, são análogas as do cilindro horizontal, sendo que o fluxo de calor é nulo para $x=0$ e $x=L$ $(\partial T/\partial x=0)$

Método e Solução Numérica

As equações 6,7,13 e 14 que são equações diferenciais parciais não lineares, são transformadas em dois sistemas de equações algébricas não lineares pelo método das diferenças finitas. Estas,são resolvidas sucessivamente, por programas e Fortran [4], uma vez que é necessário a solução da equação 6 (12), obtendo ψ, para linearizar a equação 7 (13) e a solução da equação 7 (13), obtendo T, para linearizar a equação 6 (12). As soluções sucessivas dos sistemas linearizados é feita, até que as temperaturas convirjam, dentro de um critério de convergencia, obtendo-se a distribuição de ψ e T dentro da isolação. É utilizado para a solução dos sistemas linearizados, uma subrotina de eliminação de Gauss, por técnica de matrizes esparças [5] .

3. <u>Resultados</u>

Os programas foram executados, para cilindros na posição horizontal e vertical, considerando a presença de 1,2 e 3 cilindros internos equidistantes. Os fluidos utilizados no modêlo foram, hélio e ar variando as pressões de 1 a 100 atm, temperaturas de 50 a 800 ^{o}C e permeabilidade de 10^{-5} a 10^{-12} m^2 .

As funções corrente, bem como a distribuição de temperaturas para casos típicos, são mostrados nas Figuras 4 e 5 .

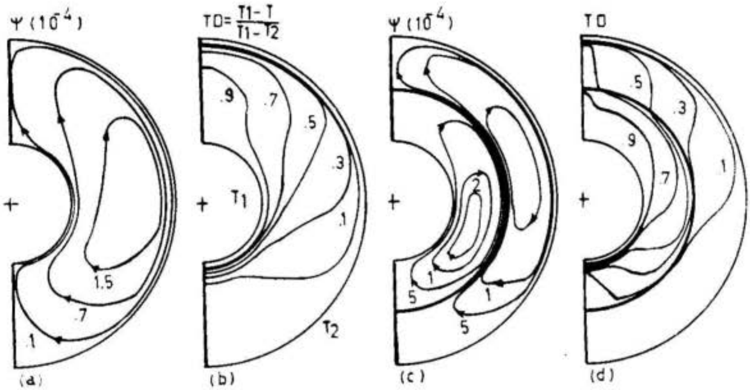


Figura 4 - Cilindro horizontal, linhas de corrente e temperaturas adimensionais (Ra = 500, Nu = 3)

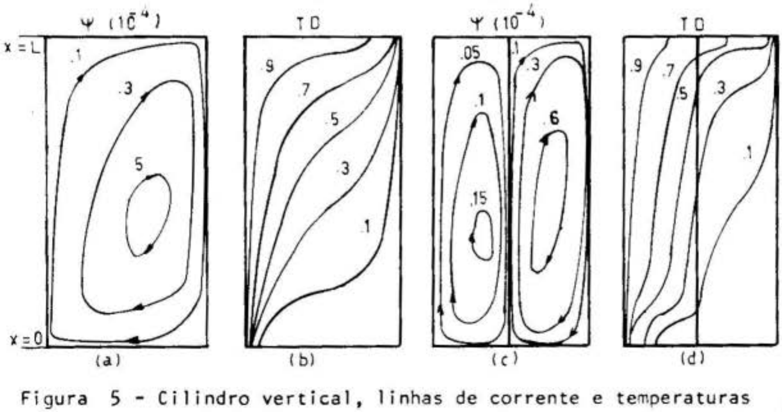


Figura 5 - Cilindro vertical, linhas de corrente e temperaturas adimensionais (Ra=498, Nu=2.9). Escala na radial, é 7 vezes a da vertical .

O gás dentro do isolamento, flui para cima ao longo da parede quente e para baixo, ao longo da parede fria (Figuras 4-a,c e 5-a,c) conduzindo energia do lado quente para o frio, o que deteriora o efeito isolante. As isotermas (Figuras 4-b e 5-b) são consideravelmente distorcidas em relação a condução (para condução as isotermas são concentricas) .

Considerando dois cilindros internos (Figuras 4-c e 5-c), a convecção é confinada entre eles, o que contribui para a melhoria do efeito isolante. As isotermas (Figuras 4-d e 5-d) são menos distorcidas, aproximando-se do caso de condução. Aumentando o número de cilindros internos, observou-se que o efeito isolante tende ao ótimo.

A condutividade térmica efetiva λ_{ef} é definida por :

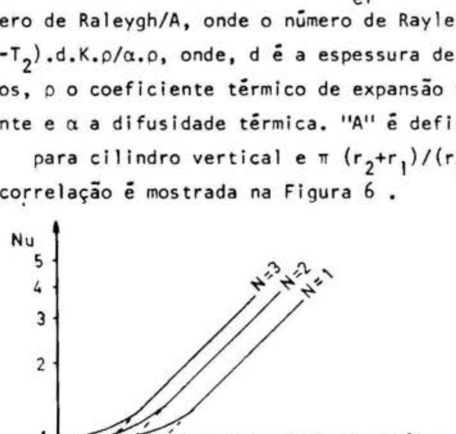
$$\lambda_{ef} = \frac{Q \ln (r_2/r_1)}{(T_1 - T_2) \pi} \qquad (15)$$

para cilindro horizontal e para cilindro vertical é :

$$\lambda_{ef} = \frac{Q \ln(r_2/r_1)}{2 (T_1 - T_2) L \pi} \qquad (16)$$

onde Q é o fluxo de calor através da isolação .

O número de Nusselt, definido por $Nu = \lambda_{ef}/\lambda$, foi correlacionado com o número de Raleygh/A, onde o número de Rayleigh é definido por : $Ra=g.(T_1-T_2).d.K.\rho/\alpha.\rho$, onde, d é a espessura de isolamento entre os cilindros, ρ o coeficiente térmico de expansão volumétrica a pressão constante e α a difusidade térmica. "A" é definido por $L/(r_2 - r_1)$ para cilindro vertical e $\pi (r_2+r_1)/(r_2-r_1).2$ para o horizontal. A correlação é mostrada na Figura 6 .



.Figura 6 Correlação entre Nu e Ra/A, para N cilindros internos.

Para valores de Ra/A menores que 10,6,4 para 1,2 e 3 cilindros internos respectivamente, não ocorre a convecção. Para valores maiores que estes, a correlação obedece a equações do tipo $Nu=c.(Ra/A)^n$, onde n é .5 e c, .4, .5, .6 para 1,2 e 3 cilindros internos.

Para valores de Ra maiores que 2000, observou-se a divergencia nas temperaturas.

A variação local do número de Nusselt (Nu_{loc}), na direção angular para cilindro horizontal e ao longo do comprimento para vertical, é mostrada na figura 7 .

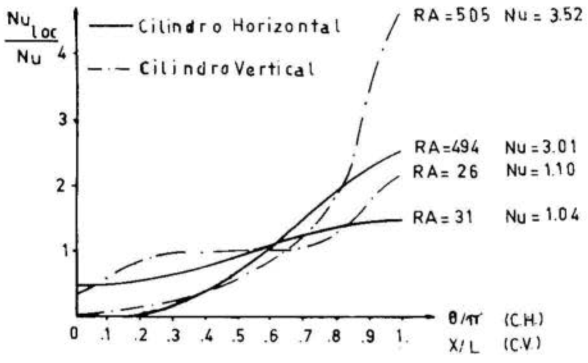


Figura 7 Variação local do número de Nusselt sobre a parede fria.

A relação Nu_{loc}/Nu, é definida por : $Nu_{loc}/Nu = q_{loc}/Q$, onde q_{loc} é obtido pelo produto da condutividade térmica local pelo gradiente local da temperatura na parede fria. Observa-se que a variação da relação aumenta ao longo da parede fria .

4. Conclusão

Foi obtido um modêlo numérico, que permite o cálculo das distribuições de temperatura e velocidades, para o estudo da convecção natural em isolamento térmico interno tipo fibra, em dutos cilindricos conduzindo gás a alta pressão e temperatura, na posição horizontal e vertical.

A correlação entre o numéro de Nusselt e o de Rayleigh, é parti cularmente útil, pois permite uma avaliação imediata da eficiência da isolação, sem utilizar o modêlo numérico.

A distribuição de temperaturas e a variação de Nu_{loc} obtidos pelo modêlo, fornecem dados para uma avaliação detalhada de isolação, evitando testes experimentais, que levam muito tempo para fornecer resultados, além de terem um custo muito elevado.

Para tanto, é necessário termos conhecimento da permeabilidade K e da condutividades térmica das fibras, contudo, estes valores podem ser obtidos com experiencias simples para o isolamento de interesse particular [6].

Bibliografia

[1] Baxi, C.B. et alii., Permeation flow and heat transfer in the HTGR thermal barrier. Philadelphia, Pa. American Society of Mechanical Engineers, (1974).(ASME paper 74-WA/HT-9)

[2] Broeckerhoff, P., Insulation system for the hot gas duct of high temperature reactor and their behavior at high pressure and temperature, J. of Nonequilibrium thermodynamics , (1978)

[3] Jannot, M. et alii., Convection en milieux poreus. Int, J. Heat Mass Transfer, Oxfort, 16:395-410, (1973)

[4] Welter, A., Modelo numérico de isolação térmica interna tipo fibra, em dutos de gás quente, Tese de Mestrado, IPEN , (1979)

[5] Rodriguez, F.A., Subrotinas em FORTRAN, para solução de sistemas de equações algébricas lineares, Tese de Mestrado , IPEN, (1979)

[6] Skoda, S., Estudo experimental da permeabilidade e da condutividades térmica para isolamento térmico interno tipo fibra, Tese de Mestrado, IPEN, (1979)