



ESCOAMENTO OBLÍQUO NO INTERIOR DE FEIXES DE TUBOS: DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE ATRITO E DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Sérgio Said Mansur

Universidade Estadual Paulista - UNESP
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - FEIS
Departamento de Engenharia Mecânica - DEM
15385-000, Ilha Solteira, SP, Brasil

Pierre Mercier

Commissariat à l'Energie Atomique - CEA
Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble - CENG
Groupement pour la Recherche sur les Echangeurs Thermiques - GRETh
38041, Grenoble, França

Resumo: *Este trabalho investiga a perda de carga e a transferência de calor no interior de feixes tubulares, percorridos por escoamentos inclinados em relação a seu eixo longitudinal. Uma análise comparativa das principais formas de abordagem do problema propostas na literatura é realizada. Com base nela, uma metodologia permitindo o cálculo dos coeficientes de atrito e de transferência de calor em escoamento oblíquo, a partir de correlações válidas para escoamentos longitudinais ou transversais puros, é estabelecida. O método proposto é testado num programa voltado para a simulação de trocadores de calor multitubulares, onde o escoamento através do feixe de tubos é modelado por intermédio da técnica do meio poroso equivalente. Os resultados obtidos numericamente são confrontados com informações de laboratório, apresentando boa concordância.*

Palavras-chave: *Feixe tubular, escoamento oblíquo, perda de carga, transferência de calor.*

1. INTRODUÇÃO

A predição dos campos de velocidade, de pressão e de temperatura no interior de feixes de tubos é de fundamental importância no projeto de diferentes tipos de equipamentos térmicos, dentre os quais inserem-se os trocadores de calor multitubulares. Algumas análises envolvendo aparelhos deste tipo consideram, para efeito do cálculo dos coeficientes de atrito e troca de calor, o escoamento no interior da carcaça como sendo estritamente perpendicular ou estritamente paralelo ao feixe tubular. Esta condição evidentemente ideal, entretanto, só se

verifica em pequenas porções do aparelho, como sugere a Fig. 1, representando um trocador de calor multitubular em sua configuração mais usual, dotado de chicanas segmentadas. Mesmo nos aparelhos cujas estruturas de sustentação dos tubos foram concebidas para permitir um percurso globalmente longitudinal do fluido no interior da carcaça, o escoamento próximo às regiões de entrada e de saída mostra-se inclinado em relação ao feixe tubular. Este é o caso dos aparelhos equipados com suportes anelares grelhados (*rodbaffles* ou *gridbaffles*), abordados por Hessealgreaves (1988), Taborek (1989) e Gentry (1990) – Fig. 2. É, também, o caso dos trocadores munidos de fitas helicoidais (*twisted tapes*), estudados por Hessealgreaves *et al.* (1993), Mansur *et al.* (1994) e Mansur & Mercier (1998) – Fig. 3.

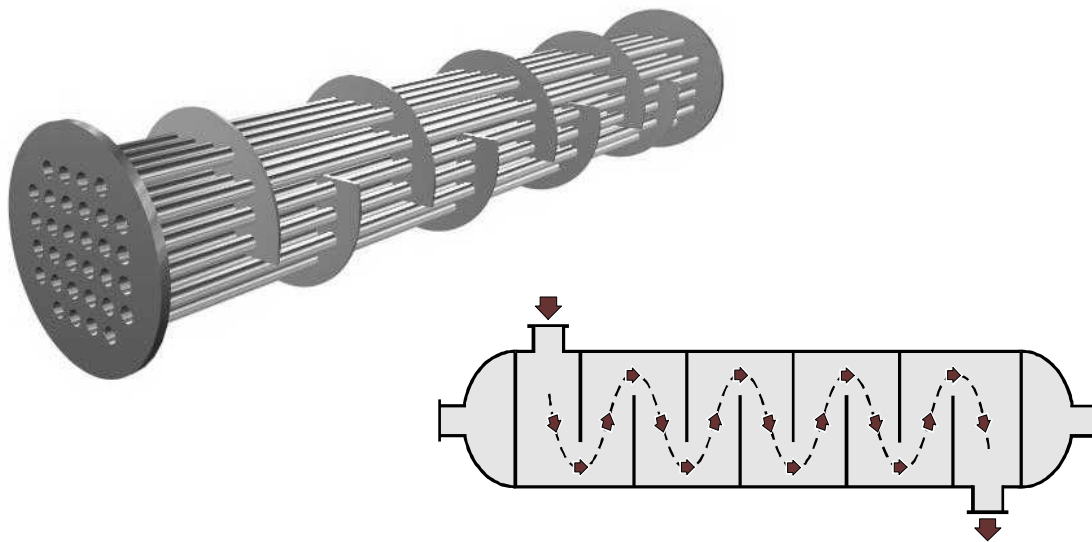


Figura 1: Trocador de calor multitubular clássico, munido de chicanas transversais segmentadas.

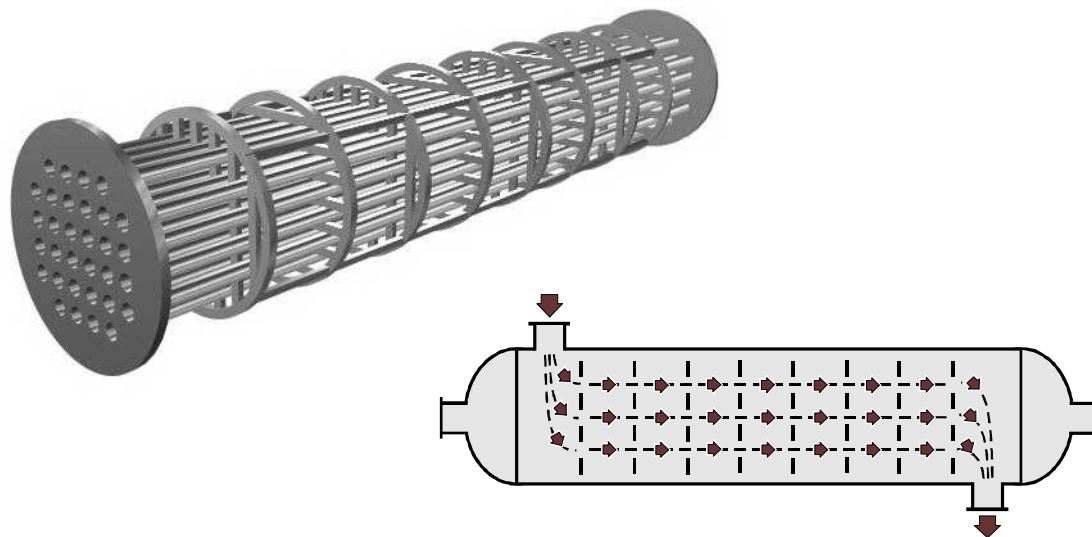


Figura 2: Trocador de calor multitubular, dotado de suportes anelares grelhados (*rodbaffles* ou *gridbaffles*).

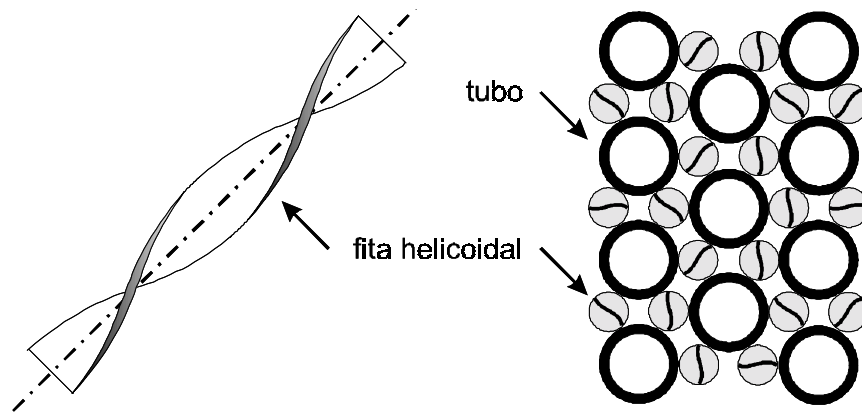


Figura 3: Feixe tubular equipado com fitas helicoidais (*twisted tapes*) externamente aos tubos.

A incidência oblíqua do fluido sobre o feixe tubular modifica substancialmente as características do escoamento no interior da carcaça, influenciando sobremaneira as condições de perda de carga e de troca de calor do lado externo dos tubos. Por outro lado, a maioria das correlações empíricas disponíveis na literatura são válidas apenas para escoamentos longitudinais ou transversais puros, posto que se originaram de experimentos realizados nestas condições. Escoamentos inclinados, entretanto, podem ser tratados através de uma combinação adequada dessas correlações, fornecendo resultados satisfatórios e fisicamente consistentes, como mostra o estudo apresentado a seguir.

2. PERDA DE CARGA E TROCA DE CALOR NO ESCOAMENTO OBLÍQUO

Mahfoud *et al.* (1987) investigaram experimentalmente a perda de carga no interior de feixes de tubos dispostos em linha, estabelecendo uma forma de cálculo para o coeficiente de atrito em função do ângulo de ataque, a partir de correlações obtidas para o escoamento transversal puro. Os resultados apresentados concordam satisfatoriamente com dados de outros autores, notadamente com os oriundos do modelo de Butterworth (1978a).

No presente estudo, o escoamento no interior do feixe de tubos é simulado numericamente por intermédio de uma abordagem do tipo meio poroso equivalente, cujos detalhes são apresentados por Mansur & Mercier (1998). Neste caso, os coeficientes de atrito, necessários à determinação dos campos de velocidade e de pressão, são calculados a partir de correlações obtidas experimentalmente para escoamentos longitudinais ou transversais puros, utilizando-se as respectivas componentes da velocidade de ataque aos tubos em cada uma das direções coordenadas. A excelente aproximação entre os resultados numéricos e experimentais apresentados nas Fig. 4 e 5, referentes ao campo de pressão dentro de um trocador de calor desprovido de chicanas e contendo um feixe de tubos em arranjo triangular, atestam a validade desta metodologia de cálculo.

No que concerne à obtenção do coeficiente de transferência de calor por convecção, a questão torna-se algo mais complexa. Os autores que se dedicaram ao estudo do problema são pouco numerosos e, além disso, apresentam interpretações contraditórias ou conflitantes entre si, como revela uma análise comparativa entre os artigos de Butherworth (1978b) e de Jenkins & Noie-Baghban (1988).

Em seu trabalho, Butherworth (1978b) preconiza o cálculo do coeficiente de transferência de calor em escoamento oblíquo, h_θ , por intermédio de uma função do tipo:

$$h_\theta = \left(h_l^n \cos^2 \theta + h_t^n \sin^2 \theta \right)^{1/n} \quad (1)$$

onde θ representa o ângulo de ataque, formado entre a direção principal do escoamento e o eixo longitudinal dos tubos. Os coeficientes de transferência de calor em escoamento longitudinal, h_l , e em escoamento transversal, h_t , podem ser estimados através das correlações clássicas para o número de Nusselt, Nu , disponíveis na literatura, a maioria das quais apresentando a mesma forma geral:

$$Nu = A Re^b Pr^c \quad (2)$$

onde Re e Pr são, respectivamente, os números de Reynolds e de Prandtl. Neste caso, o número de Reynolds é calculado com base na projeção da velocidade de ataque nas direções principais definidas pelo feixe tubular, juntamente com o diâmetro hidráulico do sub canal – para o escoamento longitudinal – ou o diâmetro externo dos tubos – para o escoamento transversal. Os coeficientes A , b e c , por sua vez, podem variar significativamente, em função do regime de escoamento e das características geométricas do feixe tubular, dentre outros fatores, como mostram os artigos de Sparrow *et al.* (1961), Rieger (1969), Zukauskas & Ulinkas (1985) e Zukauskas (1987).

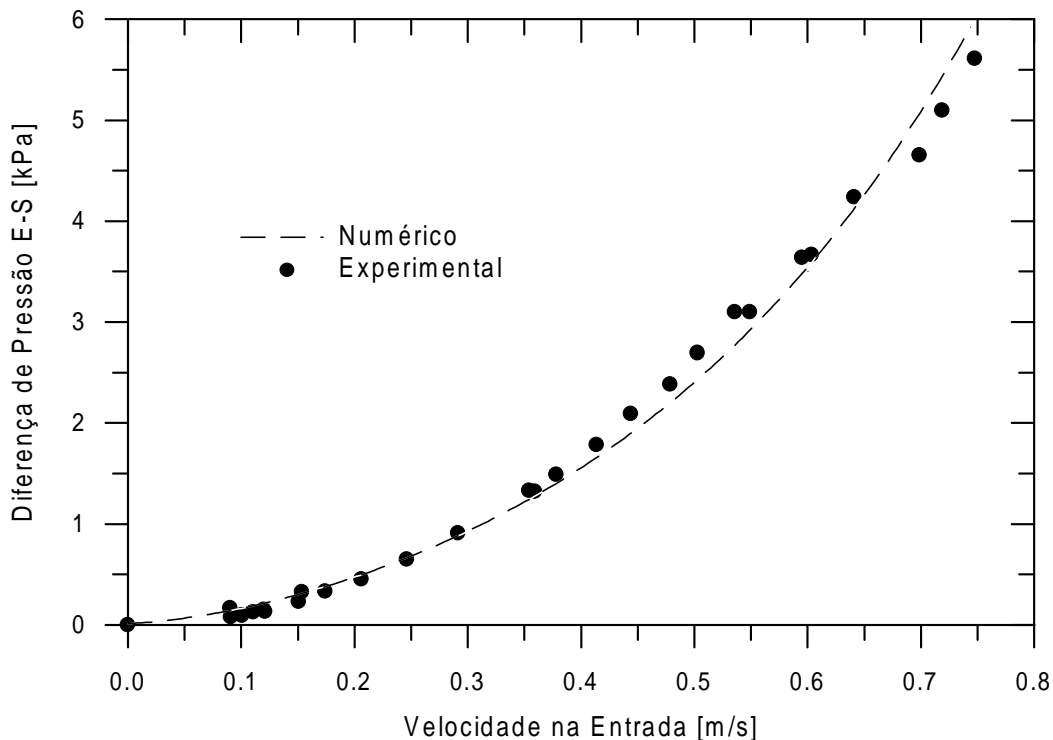


Figura 4: Diferença de pressão entre as extremidades de um trocador de calor desprovido de chicanas: comparação entre resultados numéricos e experimentais.

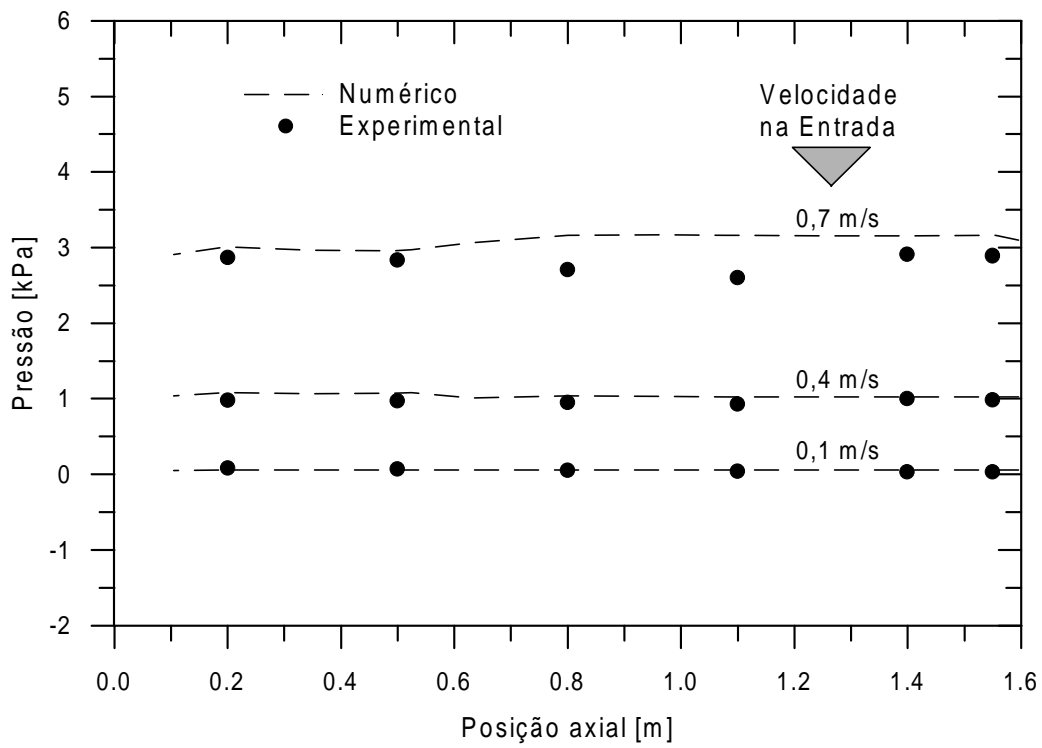
É interessante observar que a Eq. (1), contínua e derivável no intervalo $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$, reproduz naturalmente as condições extremas do problema, representadas pelos escoamentos paralelo e perpendicular ao feixe de tubos. Entretanto, o expoente n depende do regime de escoamento, da disposição geométrica dos tubos e da relação h_l/h_t , devendo ser ajustado empiricamente para cada situação particular que esteja sendo investigada, o que pode constituir um sério inconveniente à sua utilização generalizada.

Uma outra forma de abordagem aparece na literatura para a solução deste tipo de problema. Grohen (1982) e Zukauskas *et al.* (1983) conduziram experimentos com diferentes configurações de feixes tubulares, posicionados com ângulos de ataque compreendidos entre 15° e 90° . Seus resultados demonstram claramente a aplicabilidade do princípio da independência, segundo o qual a transferência de calor em escoamento inclinado pode ser avaliada a partir de relações constitutivas válidas para o escoamento transversal puro, desde que a componente da velocidade perpendicular ao eixo dos tubos seja utilizada na determinação do número de Reynolds. Esta constatação experimental é confirmada por Yanes-Moreno & Sparrow (1987), notadamente para o caso de feixes tubulares configurados em quincôncio. Os autores colocam, entretanto, em dúvida a aplicabilidade deste princípio para o caso de feixes contendo tubos dispostos em linha.

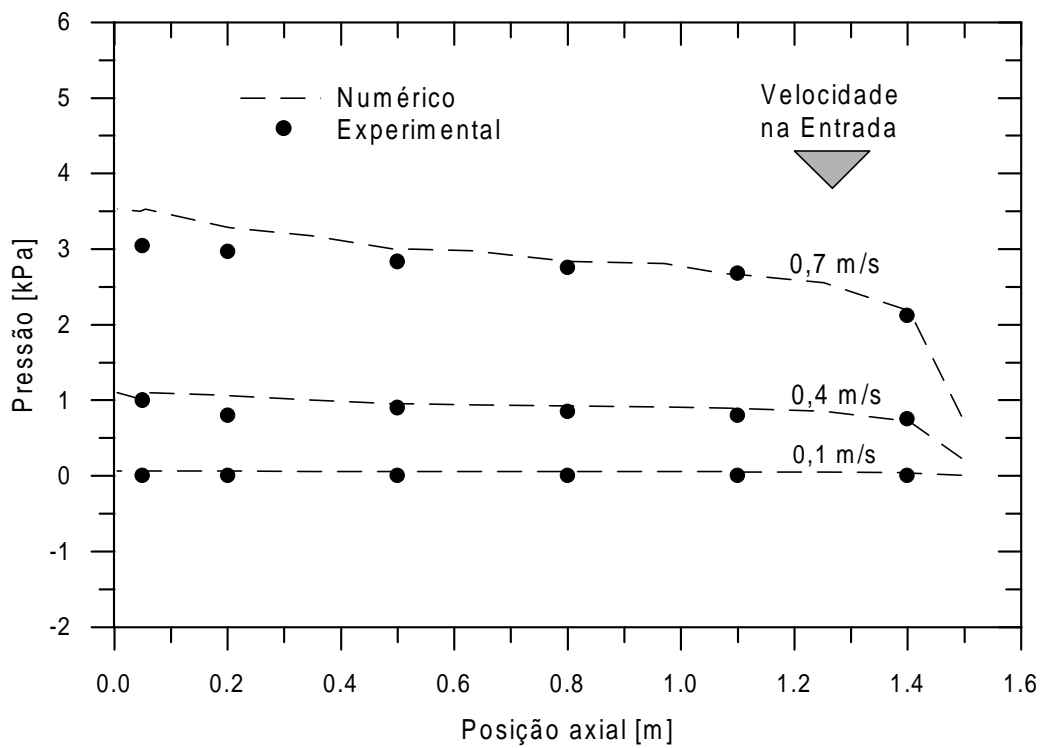
A Fig. 6 compara graficamente as duas formas de cálculo do coeficiente de transferência de calor em escoamento inclinado, h_θ , para um regime de escoamento representativo das condições de funcionamento do trocador de calor estudado no trabalho de Mansur & Mercier (1998). A linha pontilhada representa o resultado obtido através da aplicação do princípio da independência ao problema em questão, enquanto que as linhas contínuas traduzem os dados fornecidos pela Eq. (1), para diferentes valores do expoente n . A linha identificada por ponto-traço define o coeficiente de troca de calor obtido por intermédio de uma correlação válida para escoamento paralelo ao eixo dos tubos, empregando-se a correspondente componente da velocidade naquela direção.

Os pontos experimentais de Zukauskas *et al.* (1983) mostram claramente que ambos os métodos são igualmente capazes de fornecer resultados satisfatórios, pelo menos do ponto de vista do feixe tubular considerado no âmbito deste trabalho. É fácil observar que, no caso em pauta, o valor do expoente n da Eq. (1) que melhor se ajusta aos dados de Zukauskas *et al.* (1983) situa-se na faixa compreendida entre 2 e 3.

Evidentemente, é muito mais simples e vantajoso o cálculo do coeficiente de troca de calor mediante a aplicação do princípio da independência, do que pela utilização do método proposto por Butterworth (1978b), já que este último exige a disponibilidade de dados experimentais para o ajuste do expoente n . Por outro lado, observa-se na Fig. 6 que, pelo princípio da independência, o coeficiente h_θ não converge para o valor de h_l , como seria desejável, na medida em que o ângulo θ se aproxima de zero. Este fato, entretanto, não constitui um problema maior, posto que, segundo as conclusões de Grohen (1982), o coeficiente de troca de calor em escoamento oblíquo permanece praticamente constante, para ângulos de ataque variando entre 0° e 15° . Assim, pode-se estabelecer a partir da análise da Fig. 6 que, se os coeficientes de transferência de calor longitudinal, h_l , e transversal, h_t , são calculados a partir das componentes u_l e u_t da velocidade de ataque \mathbf{u} , o coeficiente resultante, h_θ , pode ser adotado como sendo o de maior valor entre os dois. Este critério foi incorporado ao programa de simulação apresentado por Mansur & Mercier (1998), gerando resultados fisicamente consistentes, conforme observa-se na análise comparativa da eficiência termohidráulica de diferentes tipos de aparelhos realizada pelos autores.



(a) Parede Superior



(b) Parede Inferior

Figura 5: Perfil de pressão ao longo das paredes superior e inferior de um trocador de calor desprovido de chicanas: comparação entre resultados numéricos e experimentais.

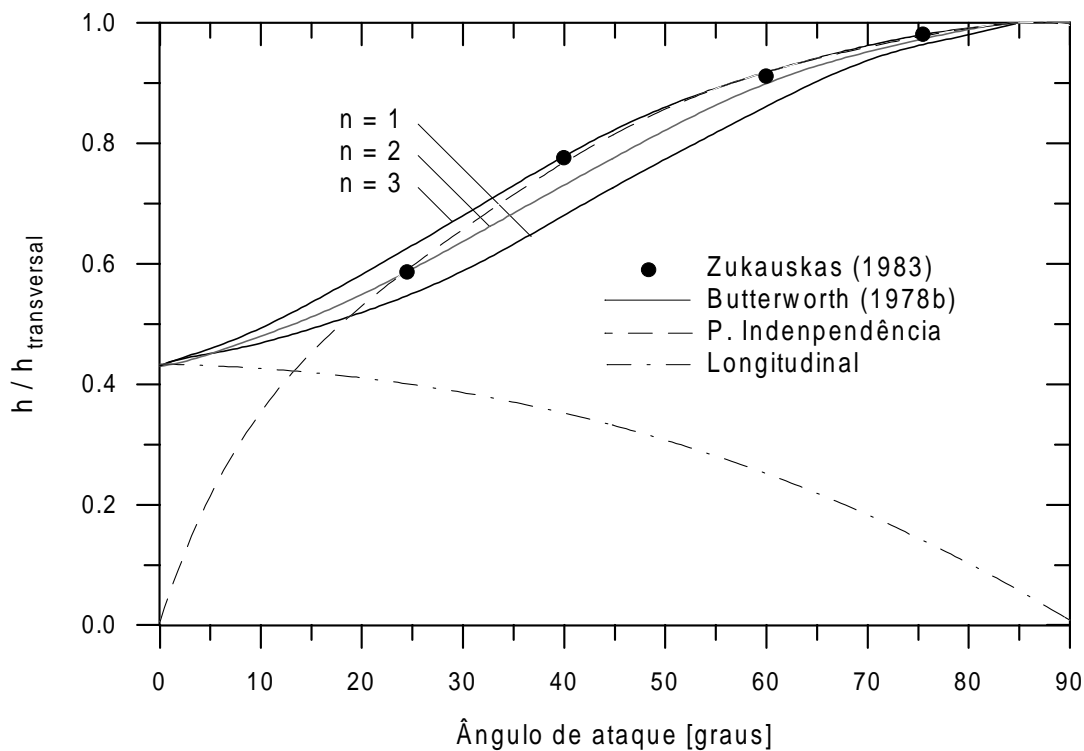


Figura 6: Transferência de calor no interior de um feixe de tubular, para ângulos de ataque variando entre 0 e 90°: comparação entre os resultados fornecidos pelo princípio da independência e pela lei de Butterworth (1978b).

3. CONCLUSÃO

No presente trabalho, a questão do escoamento oblíquo no interior de feixes tubulares utilizados em trocadores de calor do tipo casco-tubo foi investigada. Uma metodologia para o cálculo dos coeficientes de atrito e de transferência de calor, a partir de correlações obtidas para escoamentos longitudinais ou transversais puros, foi proposta e testada, através da utilização de um programa de simulação que modela o feixe de tubos como um meio poroso.

Do ponto de vista hidrodinâmico, a comparação entre resultados numéricos e experimentais deixa claro que os coeficientes de atrito, necessários à determinação dos campos de velocidade e de pressão, podem ser convenientemente estimados a partir de correlações válidas para escoamentos longitudinais ou transversais puros, utilizando-se as respectivas componentes da velocidade de ataque aos tubos em cada uma das direções coordenadas. Além disso, a análise comparativa dos diferentes métodos propostos na literatura para o cálculo do coeficiente de transferência de calor coloca em evidência as vantagens e a aplicabilidade do princípio da independência ao estudo de problemas deste tipo.

Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio financeiro do *CNPq* e da *Comunidade Econômica Européia*, contrato *JOUE-0016-C Joule Program*.

REFERÊNCIAS

- Butterworth, D., 1978a, Development of a model for three-dimensional flow in tube bundles, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v.21, pp.253-256.
- Butterworth, D., 1978b, A model for heat transfer during three-dimensional flow in tube bundles, in: *Proc. 6th International Heat Transfer Conference*, v.4, pp.219-224, Toronto.
- Gentry, C.C., 1990, Rodbaffle heat exchanger technology, *Chemical Engineering Progress*, v.86, n.7, pp.48-57.
- Grohen, G.H., 1982, Influence of de angle on heat transfer and pressure drop of tube bundles heat exchangers, in: *Proc. 7th International Heat Transfer Conference*, v.6, pp.203-208, Munich.
- Hesselgreaves, J.E, Mercier, P., Moros, T., Mansur, S.S. & McCourt, M., 1993, New concept in longitudinal flow shell and tube heat exchangers. in: *Energy Efficiency in Process Technology*, Pilavachi, P.A. (ed.), pp.641-652, Elsevier Applied Science, Londres.
- Hesselgreaves, J.E., 1988, A mechanistic model for heat transfer and pressure drop in rod baffle heat exchangers, in: *Proc. 2nd UK National Conference on Heat Transfer*, v.1, pp.787-800, Glasgow.
- Jenkins, J.D., 1988, Heat transfer in inclined tube banks, in: *Proc. 2nd UK National Conference on Heat Transfer*, v.2, pp.1663-1674, Glasgow.
- Mansur, S.S., Mercier, P. & Hesselgreaves, J., 1994, Thermal efficiency of industrial tubular heat exchangers with a new concept of longitudinal flow, *Eurotherm: Heat Exchanger Technology - Recent Developments*, v.33, pp.172-178.
- Mansur, S.S. & Mercier, P., 1998, Simulação numérica de trocadores de calor multitubulares equipados com fitas helicoidais externamente aos tubos, *Revista Brasileira de Ciências Mecânicas, ABCM*, v.20, n.1, pp.79-90.
- Rieger, M., 1969, Etude Expérimentale du Transfert de Chaleur dans des Faisceaux Tubulaires en Ecoulement Parallèle pour une Densité de Flux Thermique Constante dans le Domaine des Nombres de Prandtl Moyens, *Rapport C.E.A. R-3599*, Saclay.
- Sparrow, E.M., Loeffler Jr, A.L. & Hubbard, H.A., 1961, Heat transfer to longitudinal laminar flow between cylinders, *Transactions of the ASME: Journal of Heat Transfer*, v.83, pp.415-422.
- Taborek, J., 1989, Longitudinal flow in tube bundles with grid baffles, *AICHE Symposium Series Heat Transfer*, v.85, n.269, pp.72-78.
- Yanes-Moreno, A.A & Sparrow, E.M., 1987, Heat transfer, pressure drop, and fluid flow patterns in yawed tube banks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v.30, pp.1979-1995.
- Zukauskas, A., Katinas, V.I. & Perednis, E.E., 1983, Average heat transfer coefficients of tube bundles in flows of viscous fluids at different angles of attack, *Heat Transfer Soviet Research*, v.15, pp.22-30.
- Zukauskas, A. & Ulinkas, R., 1985, Efficiency parameters for heat transfer in tube banks, *Heat Transfer Engineering*, v.6, pp.19-25.
- Zukauskas, A., 1987, Heat transfer from tubes in crossflow, *Advances in Heat Transfer*, v.18, pp.87-159.

PRESSURE DROP AND HEAT TRANSFER IN YAWED TUBE BUNDLES HEAT EXCHANGERS

***Abstract:** The present paper is concerned with the prediction of pressure drop and heat transfer in tubular bundles of heat exchangers, under conditions of inclined flow. A comparative analysis of the main methods proposed by other authors is carried out. A methodology for hydraulic resistance and heat transfer calculation is proposed, based on friction factor and heat transfer coefficient for purely longitudinal or transversal flows. The method is tested within a general CFD code, improved to simulate tubular heat exchangers using the porous media approach. Numerical results have been compared with experimental data, reaching a very good agreement.*

***Key-words:** Tube bundles, inclined flow, pressure drop, heat transfer.*