



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA

VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING

18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil

August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

## ANÁLISE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM REGIME LAMINAR COMPLETAMENTE DESENVOLVIDO DE FLUIDOS IMISCÍVEIS (ÁGUA-ÓLEO)

Artur Kimura, [artur\\_kimura@hotmail.com](mailto:artur_kimura@hotmail.com)

Elcio Nogueira, [elcionogueira@hotmail.com](mailto:elcionogueira@hotmail.com)

Centro Universitário de Volta Redonda – Unifoa, Av. Paulo Erlei Alves Abrantes, nº 1325, Três Poços, Volta Redonda - RJ – CEP: 27240-560

### Resumo:

*O objetivo deste trabalho é efetuar uma análise relacionada com a espessura de isolamento térmico em regime laminar de fluidos imiscíveis (água-óleo) em dutos circulares. O sistema água-óleo é utilizado na prática para diminuição da potência de bombeamento, através da introdução de um filme de água entre o óleo e a parede do duto. Neste trabalho demonstra-se que a potência de bombeamento é função da temperatura global média dos fluidos utilizados, e que a mínima potência de bombeamento ocorre para 9.4 °C (petróleo; relação de densidade  $S=0.86$ ; relação de viscosidades  $\mu=0.168$ ), com uma redução da ordem de 64% em relação ao escoamento unifásico. Esta máxima redução de potência de bombeamento ocorre para uma espessura relativa de água igual a 0.153. Com relação à transferência de energia na forma de calor, a espessura relativa ótima de água ocorre em 0.062 (muito próximo da parede do duto, com número de Nusselt igual a 5.35; aproximadamente 1.5 vezes maior que o número de Nusselt na região termicamente desenvolvida em escoamento unifásico). Na espessura relativa ótima de filme para potência de bombeamento (0.153) a relação entre os números de Nusselt é da ordem de 1.3. Demonstra-se que existe, claramente, uma relação de compromisso entre o problema de redução da potência de bombeamento e o problema de máxima troca de energia na forma de calor. Propõe-se analisar a espessura do isolante térmico necessário para manutenção da temperatura ótima de potência de bombeamento, em relação à variação da temperatura externa. Efetua-se uma análise relacionada com a variação da temperatura global média dos fluidos, interna ao duto, alterando a condição externa através da variação do coeficiente de transferência de calor na extremidade do isolante. A situação física possibilita a variação da temperatura do óleo, alterando sua viscosidade e exigindo-se, em situações extremas, maior proteção térmica para que se possa obter uma vantajosa relação de potência de bombeamento.*

**Palavras chaves:** Fluidos Imiscíveis (água – óleo), Transferência de Calor; Escoamento Laminar Hidrodinamicamente Desenvolvido; Isolamento Térmico.

### 1. INTRODUÇÃO

Resultados experimentais disponíveis na literatura para sistemas gás-líquido e líquido-líquido foram apresentados por Brauner (2001), onde se demonstra que a forma mais interessante para transporte de óleo muito viscoso, em escoamento horizontal, consiste de injeção de água na forma de camada anular lubrificante. Neste trabalho, constata-se que a queda na pressão e a redução na potência de bombeamento, sob condições laminares, são maiores do que em condições de escoamento turbulento-turbulento. Brauner concluiu, também, que para um núcleo altamente viscoso o regime, no núcleo, é essencialmente laminar, evidenciando que o estudo de um escoamento bifásico líquido-líquido em

regime laminar é muito importante tanto em termos teórico quanto prático. Nogueira (2002) efetua um estudo de transferência de calor para sistemas líquido-líquido, demonstrando que há um significativo aumento da taxa de transferência de calor quando uma camada de fluido de maior condutividade é inserido no escoamento próximo à parede do duto.

Considerando aspectos relacionados com potência de bombeamento e transferência de calor, há evidências na literatura especializada, Nogueira (1988), de que há uma espessura de filme adequada, que leva em consideração estes dois fatores com o objetivo de se obter o melhor desempenho em termos de dissipação de energia.

Neste trabalho efetua-se uma análise da espessura de filme e do isolante térmico necessários para que se possa trabalhar em condições ideais de operação, na condução de petróleo circundado por um filme de água em dutos circulares.

## 2. OBJETIVOS

Este trabalho visa estudar a transferência de energia na forma de calor de fluidos newtonianos imiscíveis, em condições de regime laminar de escoamento anular completamente desenvolvido e termicamente desenvolvido. As grandezas de interesse são: espessura de filme, potência de bombeamento e transferência de calor, através da variação do coeficiente de transferência de calor interno, relacionado com o regime de escoamento e a espessura do filme de água, e do coeficiente de transferência de calor do meio externo, considerando-se uma determinada espessura de isolante térmico na parede do duto. A análise efetuada leva em consideração a obtenção da espessura ideal de isolante, uma vez que esta espessura afeta significativamente a taxa de transferência de calor.

## 3. DESENVOLVIMENTO

### 3.1. Análise de escoamento

O escoamento laminar desenvolvido de fluidos Newtonianos imiscíveis em um duto circular Fig. (1), sem estratificação e com propriedades constantes, é analiticamente descrito pela seguinte forma já simplificada da equação de quantidade de movimento na direção axial, Nogueira (1988):

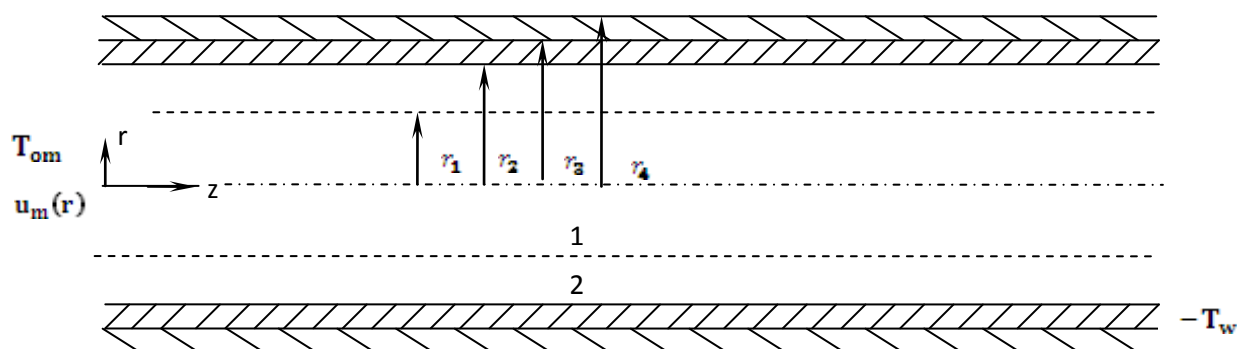


Figura 1: Representação esquemática de escoamento anular de fluidos imiscíveis e parede do duto com isolante térmico

$$\frac{\mu_m}{r^n} \frac{d}{dr} \left[ r^n \frac{du_m}{dr} \right] = -K \equiv \frac{dp}{dz}, \quad m = 1,2, \quad n = 1 \quad (1)$$

Definindo-se

$$R = \frac{r}{r_2}, \quad \delta = \frac{r_1}{r_2}, \quad \hat{\mu} = \frac{\mu_2}{\mu_1} \quad (2)$$

Quando se considera a vazão interna e total,  $Q_1$  e  $Q$ , iguais, tem-se as seguintes equações, de acordo com o desenvolvimento apresentado em Nogueira (1988):

$$\bar{u}_1 A = \bar{u}^* A \tag{3}$$

$$\frac{K}{K^*} = \frac{2\hat{\mu}}{\delta^{n+1} \{ (n+3)[1 + \delta^2(\hat{\mu} - 1)] - (n+1)\hat{\mu}\delta^2 \}} \tag{4}$$

$$\frac{w}{w^*} = \frac{K}{K^*} \left[ 1 + \frac{(n+3)(1 - \delta^{n+1}) + (n+1)(\delta^{n+3} - 1)}{\delta^{n+1} \{ (n+3)[1 + \delta^2(\hat{\mu} - 1)] - (n+1)\hat{\mu}\delta^2 \}} \right] \tag{5}$$

Equações das quais tirou-se a solução para a representação gráfica na Fig. (2), que representa a relação entre as potências de bombeamento e a espessura de filme de água.

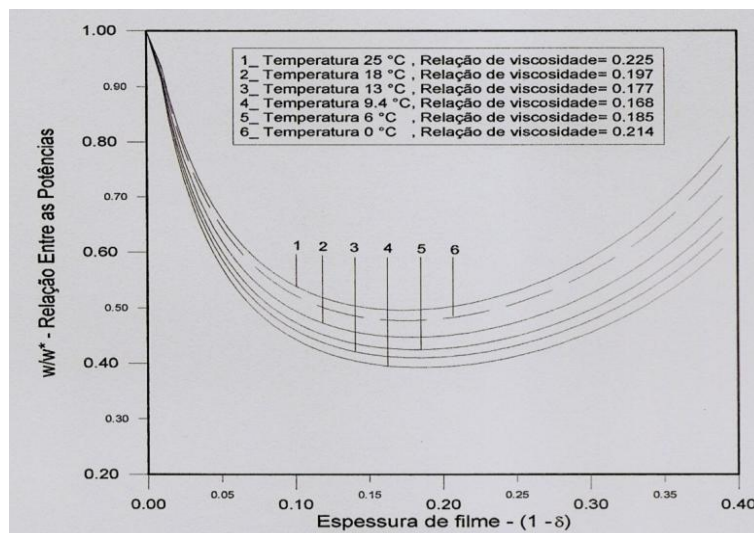


Figura 2: Gráfico da relação entre as potências com relação à espessura de filme e variação da relação de viscosidades

A partir dos resultados representados através da Fig. (2) determinou-se a menor relação entre as potências de bombeamento, considerando-se a variação da relação entre as viscosidades. Neste caso, Fig. (3), obteve-se o ponto de mínimo, demonstrando-se que a menor relação entre as potências ocorre à temperatura de 9.4 °C ( $\hat{\mu} = 0.168$ ).

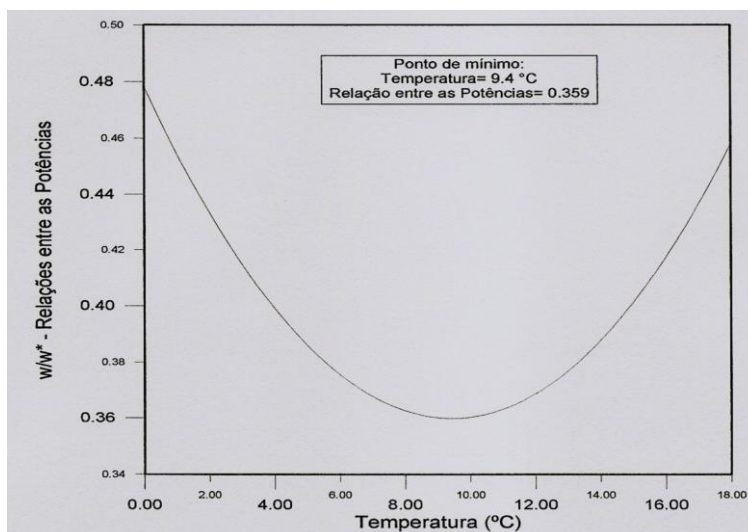


Figura 3: Ponto de mínimo para menores relações entre as potências, em função da relação entre as viscosidades.

Com a escolha do material do duto e conhecendo-se suas dimensões físicas, realizou-se uma análise para garantir escoamento laminar a partir das seguintes equações e dados abaixo (Tabela 1):

$$v = \frac{\mu}{\rho} \tag{6}$$

$$\delta = \frac{D_1}{D_2} \tag{7}$$

$$Re = \frac{\rho D_1 \bar{u}_1}{\mu} \tag{8}$$

$$\bar{u}_1 = \frac{Kr_2^2}{2\mu_2(n+1)(m+3)} \{(n+3)[1 + \delta^2(\hat{\mu} - 1)](n+1)\hat{\mu}\delta^2\} \tag{9}$$

Tabela 1: Valores para o petróleo

Temperatura [°C]	Viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) [Kg/ms]	Viscosidade cinética ( $v$ ) [m <sup>2</sup> /s]	Peso específico ( $\rho$ ) [Kg/m <sup>3</sup> ]	Relação entre as viscosidades ( $\hat{\mu}$ )
9.4	0.00606	0.00000712	851.12	0.168

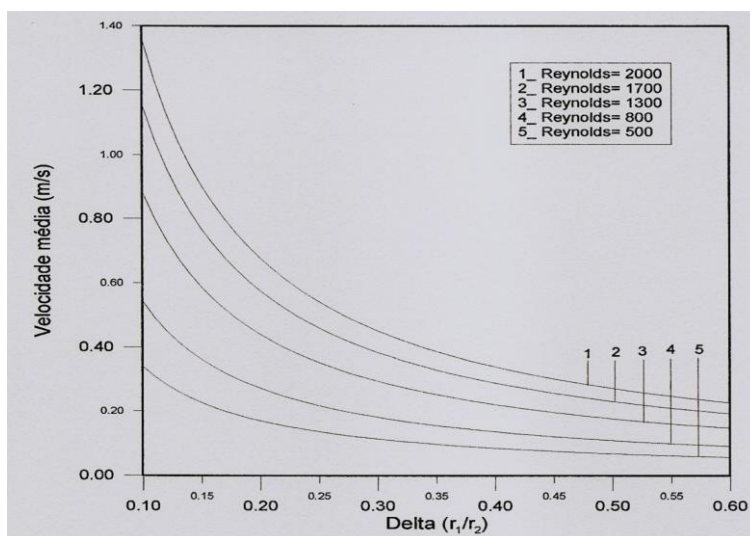


Figura 4: Relação entre a velocidade média do fluido interno com o Delta ( $\delta$ ) para diversos valores de Reynolds na temperatura de mistura 9,4 °C.

### 3.2. Análise da transferência de calor

Conhecendo-se o ponto onde ocorre a menor relação entre a potência de bombeamento, é de extremo interesse determinar a taxa de transferência de calor. Neste caso, efetuou-se um estudo relacionado com o comportamento do número de Nusselt para escoamento completamente desenvolvido a partir dos dados retirados de Nogueira (1988), de onde obteve-se dados numéricos para a seguinte representação gráfica, Fig. (5).

Foi escolhido para o desenvolvimento do trabalho um duto circular de aço da norma API 5L (API: American Petroleum Institute), que são tubos para oleodutos e gasodutos (line pipes) que vão a partir de 1/8” até 30” ou mais, com espessuras variadas. As resistências à tração variam desde o grau A, com limite de escoamento mínimo de 30.000 psi (21,1 Kg/mm<sup>2</sup>) até o grau X80 com 80.000 psi (56.2 Kg/mm<sup>2</sup>).

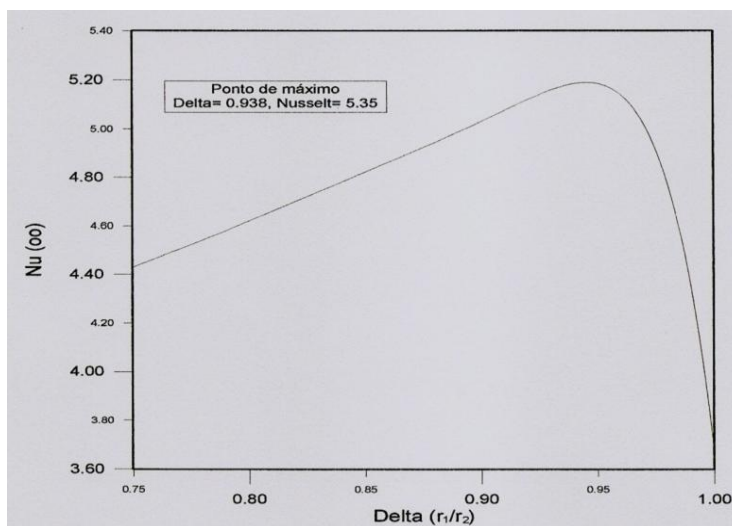


Figura 5. Número de Nusselt em função da espessura de filme, representando a ocorrência do ponto de máximo

A partir da Fig. (5) obteve-se a seguinte expressão do número de Nusselt em função de espessura de filme, ( $Nu = -8638.89\delta^4 + 293730.7\delta^3 - 38294.9\delta^2 + 21885\delta - 4678.21$ ), cujo ponto de máximo ocorre em Nusselt igual a 5.35 (Delta= 0.938, Nusselt= 5.35).

Tabela 2: Dimensões do duto e suas propriedades

Diâmetro		Espessura da parede		Condutividade térmica (C)
mm	polegada	mm	Polegada	W/mK
101.60	4	5.74	0.226	45.8

Decidimos trabalhar com o isolante térmico do tipo lã de vidro, que possui a seguinte propriedade Tab. (3).

Tabela 3: Propriedades do isolantes térmico – Lã de Vidro

Tipo	C [W/mK]	Norma	Fonte
Lã de vidro	0.054	Petrobrás N - 1618	Pitts, Sisson, 1981

Figura 6: Representação esquemática do duto circular com o isolante térmico

Para a determinação do valor do coeficiente de transferência de calor interno  $h_f$  utilizou-se o valor da condutividade térmica da água  $C_f = 0.604 \text{ W/mK}$ , Pitts, Sisson (1981).

$$h_f = \frac{Nu C_f}{Dh} \tag{10}$$

onde utilizou-se a definição do diâmetro hidráulico:

$$Dh = \frac{4A}{P} \quad (11)$$

Para  $Dh = 101.60$  mm.

Para análise do fluxo de transferência de calor, através da parede do duto e do isolante térmico, utilizou-se a equação de condução de calor para regime permanente abaixo:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[ C_s r \frac{\partial T_s}{\partial r} \right] = 0 \quad (12)$$

s=3, aço da tubulação

s=4, isolante térmico

Impomos as seguintes condições de contorno e de interface:

$$r = r_2, \quad -C_1 \frac{\partial T_1(r_2)}{\partial r} = h_f [T_f - T_1(r_2)] \quad (13)$$

$$r = r_3, \quad T_1(r_3) = T_2(r_4) \quad (14)$$

$$r = r_3, \quad -C_1 \frac{\partial T_1(r_3)}{\partial r} = -C_2 \frac{\partial T_2(r_3)}{\partial r} \quad (15)$$

$$r = r_4, \quad -C_4 \frac{\partial T_4(r_4)}{\partial r} = h_\infty [T_4(r_4) - T_\infty] \quad (16)$$

De onde se determinou os seguintes perfis de temperatura para os meios sólidos:

$$T_3(r) = \frac{h_f r_2}{C_3} [T_f - T_3(r_2)] \ln \left( \frac{r_3}{r} \right) + \frac{h_f r_2}{C_4} [T_f - T_3(r_2)] \ln \left( \frac{r_4}{r_3} \right) + \frac{h_f r_2}{h_\infty r_4} [T_f - T_3(r_2)] + T_\infty \quad (17)$$

$$T_4(r) = \frac{h_f r_4}{C_4} [T_f - T_3(r_2)] \ln \left( \frac{r_4}{r} \right) + \frac{h_f r_2}{h_\infty r_4} [T_f - T_3(r_2)] + T_\infty \quad (18)$$

Logo, temos:

$$T_3(r_2) = \frac{T_\infty + h_f r_2 T_f \left[ \frac{1}{C_3} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \frac{1}{C_4} \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right) \right] + \frac{1}{h_\infty r_4}}{1 + \left\{ h_f r_2 \left[ \frac{1}{C_3} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \frac{1}{C_4} \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right) + \frac{1}{h_\infty r_4} \right] \right\}} \quad (19)$$

e

$$Q = h_f [T_3(r_2) - T_f] \quad (20)$$

Para condições genéricas na região externa, demonstra-se que o fluxo de calor é obtido em função do coeficiente de transferência de calor externo ( $h_\infty$ ) por:

$$Q = \frac{T_f - T_\infty}{\frac{1}{2\pi r_2 L h_f} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi L C_3} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi L C_4} + \frac{1}{2\pi r_2 L h_\infty}} \quad (21)$$

Abaixo, Fig. (6), apresenta-se a temperatura interna do duto em função da espessura do isolante térmico, considerando-se temperatura prescrita externa igual a 25° C, com relação à variação da temperatura de mistura dos fluidos. Neste caso, uma espessura de aproximadamente 10 mm de lã de vidro possibilita um isolamento térmico adequado, permitindo-se, desta forma, uma temperatura de mistura conveniente para um bom desempenho em relação à potência de bombeamento.

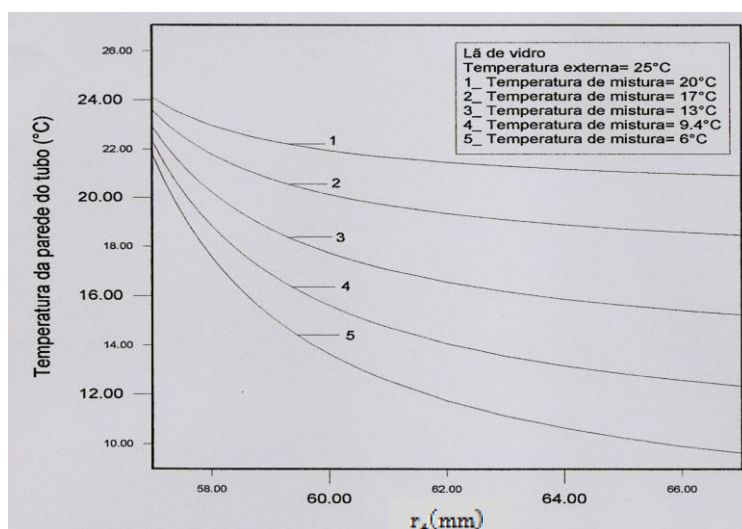


Figura 6: Relação da temperatura na parede do tubo em relação à espessura do isolante térmico ( $r_4$ )

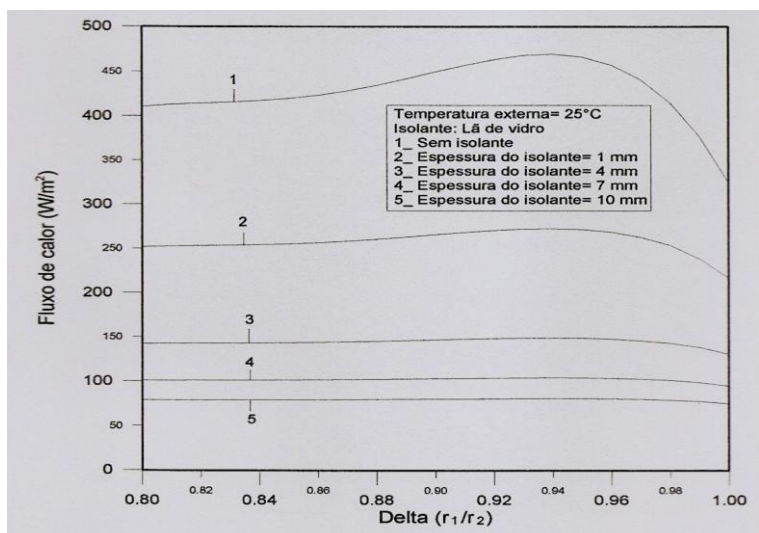


Figura 7: Fluxo de calor em relação à variação do número de Nusselt, função da espessura de filme, para temperatura externa prescrita igual a 25° C e temperatura de mistura igual a 9.4° C

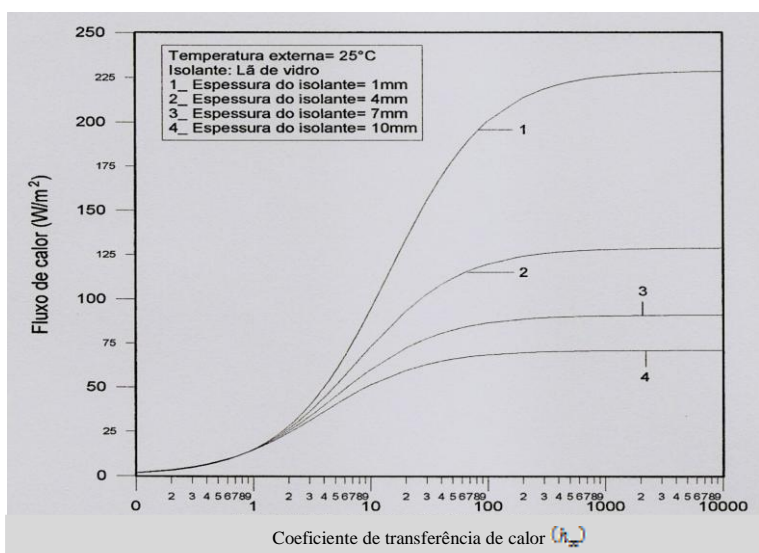


Figura 8: Fluxo de calor com a condutividade externa tendendo ao infinito ( $h_{\infty}$ ) e temperatura externa igual a 25° C

As Figuras (7) e (8) representam o fluxo de calor para duas condições de contorno externas: temperatura prescrita e variação do coeficiente de transferência de calor externo. Há uma evidente consistência entre os dois resultados apresentados, para as espessuras do isolante térmico analisadas, quando o coeficiente de transferência de calor externo tende para infinito [caso de temperatura prescrita – Fig. (7)].

#### 4. CONCLUSÃO

Demonstrou-se, neste trabalho, que há uma variação significativa da relação de bombeamento entre escoamento unifásico de óleo e uma mistura anular de água-óleo, com um filme de água próximo à parede do duto. Esta redução na potência de bombeamento depende da temperatura de mistura dos fluidos e passa por um mínimo à temperatura aproximada de 9.4° C, para os fluidos analisados. Uma espessura aproximada de 10 mm de lã de vidro possibilita a manutenção desta temperatura interna para uma condição de temperatura externa igual a 25° C, para espessuras de filme de água relativamente elevadas, de acordo com os resultados apresentados na Fig. (7). Resultados similares são obtidos para diferentes temperaturas externas (15° C, 30° C, 40° C), de acordo com o estudo efetuado.

A espessura de filme ideal para melhor desempenho hidrodinâmico, no caso analisado, é da ordem de 0,26, de acordo com resultados apresentados através da Fig. (3). Nesta situação, de acordo com resultados apresentados nas Figuras (6) e (7), a espessura adequada de lã de vidro, como isolante térmico, é de aproximadamente 10 mm, conforme discutido acima.



## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Administração do Centro Universitário de Volta Redonda – UNIFOA, que possibilitou que este trabalho fosse efetuado fornecendo uma bolsa de Iniciação Científica ao aluno do Curso de Engenharia Mecânica Artur Kimura.

## 6. REFERÊNCIAS

- Nogueira, E., 1988, “Escoamento Laminar e Transferência de Calor em Fluidos Imiscíveis sem Estratificação”, São José dos Campos, Brasil, pp. 131-134.
- Nogueira, E., Cotta, R. M., 1990 “Heat Transfer Solution in Laminar Cocurrent of Immiscible Liquids”. *Warme-Und Stoffübertagung*, Vol. 25, Springer-Verlag, Alemanha, pp. 361-367
- Nogueira, E., Dantas, L. B., Cotta, R. M., 2002, “Heat Transfer in Liquid-Liquid Annular Two-Phase Flow in a Vertical Duct”. *Hybrid Methods in Engineering*, Vol. 4, pp. 1-19
- Nogueira, E., Cotta R. M., 1988 “Thermohydraulic Performance in Cocurrent Laminar Flow of Immiscible Liquids”. II Encontro de Ciências Térmicas – ENCIT, Águas de Lindóia, Brasil, pp. 307-310
- Prada, V., Bannwart, J. W., 1999 “Pressure drop in vertical core annular flow” XV COBEM, Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Águas de Lindóia, Brasil
- Angeli, P., & Hewitt, G. F. (2000). Flow structure in horizontal oil-water flow. *Int. J. Multiphase Flow*, 26, 1117-1140
- Brauner, N., 2001, “The prediction of dispersed flows in liquid-liquid and gás-liquid systems. *Int. J. Multiphase Flow*”, 27, 59-76.
- Pitts, D. R., Sisson, L. E., 1981, “Fenômenos de Transporte”, São Paulo, Brasil, pp. 319 – 328.  
[http://www.isar.com.br/index.php?produtos\\_sub/isolantes-termicos/poliuretano](http://www.isar.com.br/index.php?produtos_sub/isolantes-termicos/poliuretano)