

Isolamento térmico de duto circular em escoamento laminar completamente desenvolvido de fluidos imiscíveis (Água-Óleo)

Circular duct thermal insulation in laminar flow completely developed in immiscible fluids (Water-Oil)

Artur Kimura¹
Élcio Nogueira²

Palavras-chave

Isolamento Térmico

Fluidos Imiscíveis
(água – óleo)

Transferência de
Calor

Escoamento
Laminar
completamente
desenvolvido

Perda de Carga

Resumo

O objetivo principal deste trabalho foi o de 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 (perda de carga), através da introdução de um filme de água entre o óleo e a parede do duto. Demonstrou-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. Nesse sentido, efetuou-se uma análise da espessura do isolante térmico necessário para manutenção da temperatura ótima de potência de bombeamento, em relação à variação da temperatura externa.

Abstract

The purpose of this paper is to analyze the thickness of insulation in the laminar regime of immiscible fluids (water-oil) in circular ducts. The oil-water is used in practice to reduce the pumping power by introducing a water film between the oil and the duct wall. It is shown that there is clearly a compromise between the problem of reducing the pumping power and the problem of maximum exchange of energy as heat. We propose, indeed, to analyze the thickness of thermal insulation required to maintain the optimum temperature pumping power in relation to the variation of external temperature.

Keywords

*Thermal
Insulation*

*Immiscible fluids
(water - oil)*

Heat Transfer

*laminar flow
completely
developed*

load waste

¹ Bacharel em Engenharia Mecânica - UniFOA

² Professor Doutor do Curso de Engenharia Mecânica - UniFOA

1. Introdução

Resultados experimentais disponíveis na literatura para sistemas gás-líquido e líquido-líquido foram apresentados por Brauner (2001), Angeli & Hewitt (2000), Prada & Bannwart (1999), 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. Resultados teóricos para escoamento e transferência de calor, neste tipo de sistema, foram apresentados por Nogueira e Cotta (1990), Bentwich & Sideman (1964), Hasson & Fink (1974) e Kimura & Nogueira (2011). Esses trabalhos demonstram 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 (2001) 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 termo 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), Kimura e Nogueira (2011), de que há uma espessura de filme adequada, que leva em consideração esses dois fatores com o objetivo de se obter o melhor desempenho em termos de dissipação de energia.

Neste trabalho efetuam-se análises da espessura de filme e do isolante térmico ne-

cessários 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 demonstrar que existe uma relação entre a espessura ótima de isolamento térmico e a potência de bombeamento mínima, em que ocorre o escoamento de fluidos newtonianos imiscíveis, em condições de regime laminar de escoamento anular completamente desenvolvido e termicamente desenvolvido. O objetivo principal é analisar a influência do isolamento térmico em duto circular, nas condições de escoamento enunciadas (líquido-líquido, anular, horizontal). As grandezas de interesse na análise são: espessura de filme, potência de bombeamento, transferência de calor e espessura de isolante térmico, através da variação dos coeficientes de transferência de calor interno e externo. A análise efetuada considera, como objetivo principal, a obtenção da espessura ideal do 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 Figura 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) e Kimura e Nogueira (2011):

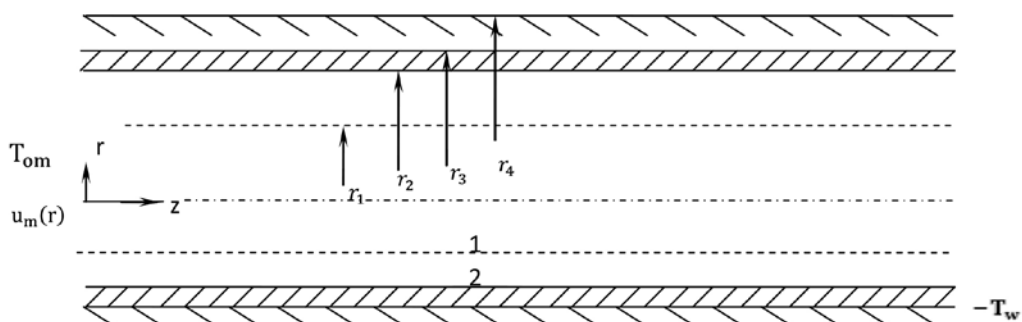


Figura 1: Representação esquemática de escoamento anular de fluidos imiscíveis e parede do duto com isolante térmico

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

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):

$$\bar{u}_1 A = \bar{u}^* A \quad (3)$$

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

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

Equações das quais se obteve a solução para a representação gráfica na Figura 2, que representa a relação entre as potências de bombeamento e a espessura de filme de água.

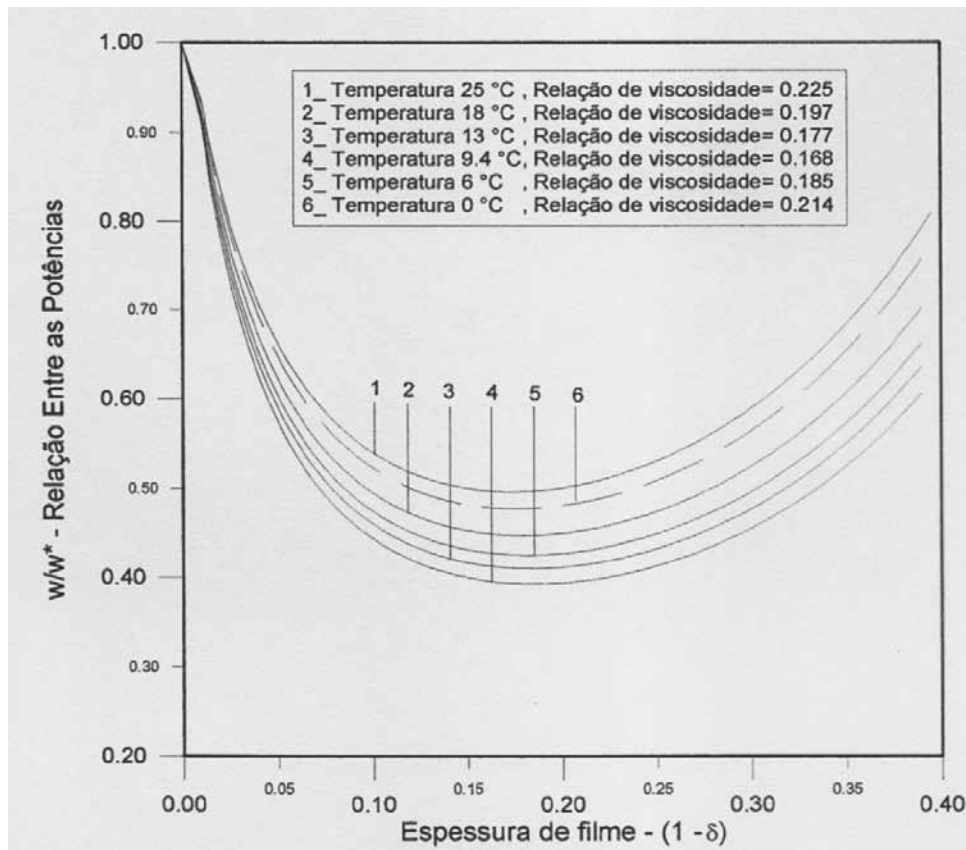


Figura 2: Gráfico da relação entre as potências com relação à espessura de filme e variação da relação de viscosidades

A partir dos resultados representados através da Figura 2, determinou-se a menor relação entre as potências de bombeamento, considerando-se a variação da relação entre

as viscosidades. Neste trabalho, Figura 3, obteve-se o ponto de mínimo, demonstrando-se que a menor relação entre as potências ocorre à temperatura de 9.4 °C ($\hat{\mu} = 0.168$).

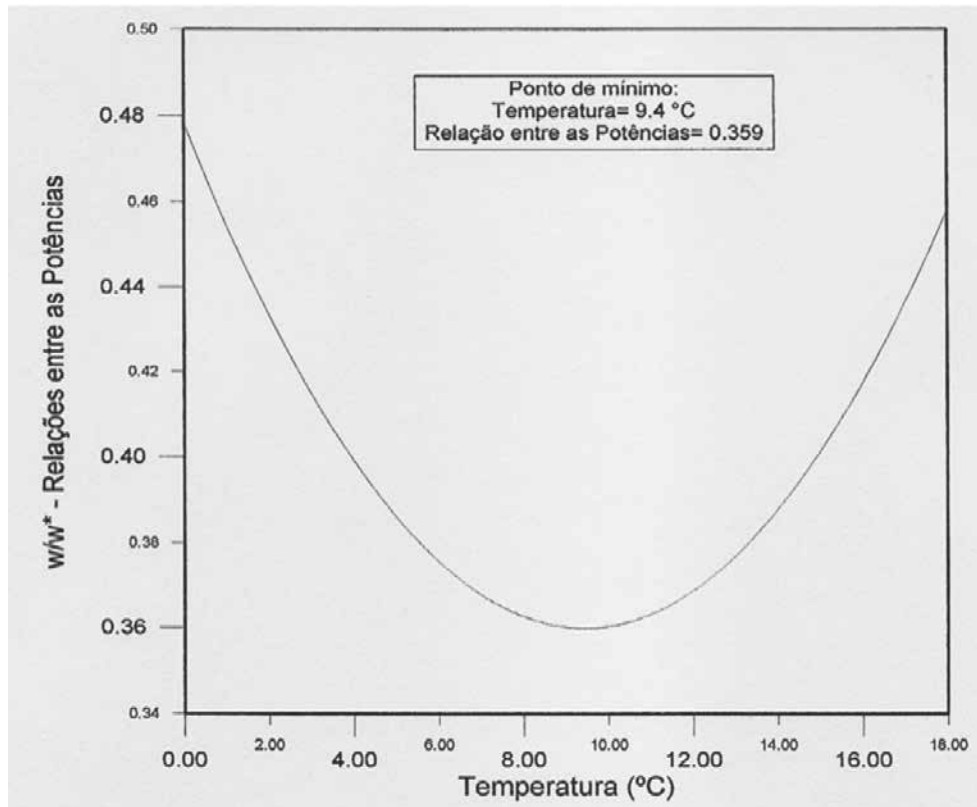


Figura 3: Ponto de mínimo para menores relações entre as potências, em função da relação entre as viscosidades.

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):

$$\vartheta = \frac{\mu}{\rho} \quad (6)$$

$$\delta = \frac{D_1}{D_2} \quad (7)$$

$$R_e = \frac{\rho D_1 \bar{u}_1}{\mu} \quad (8)$$

$$\bar{u}_1 = \frac{K r_2^2}{2\mu_2(n+1)(n+3)} \{(n+3)[1 + \delta^2(\hat{\mu} - 1)](n+1)\hat{\mu}\delta^2\} \quad (9)$$

Tabela 1: Valores para o petróleo [Pitts e Sisson (1981)]

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

A Figura 4, abaixo, demonstra a consistência do modelo de escoamento apresentado, para escoamento em regime laminar ($R_e \leq 2300$). Observa-se que a maior velocidade média é aproximadamente 1,4 m/s para água e 0,3 m/s

para óleo, como esperado fisicamente. Esses valores diminuem quando baixamos o valor do número de Reynolds (R_e). Resultados similares, de forma aproximada, foram encontrados por Bentwich e Sideman (1964).

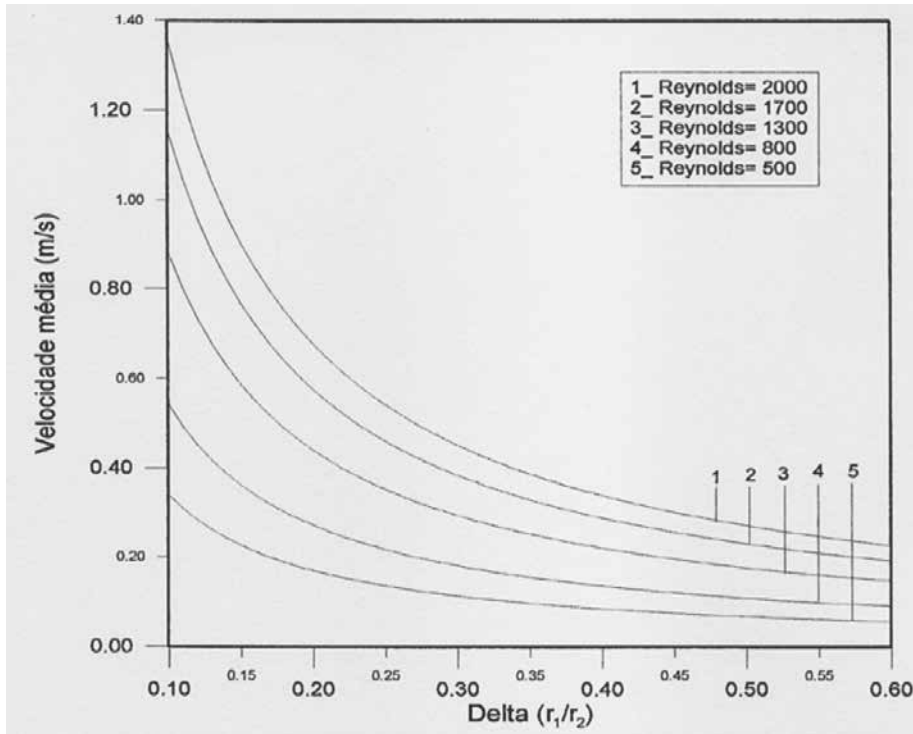


Figura 4: Relação entre a velocidade média do fluido interno com o Delta (δ) para diversos valores de Reynolds na temperatura de mistura 9,4 °C.

3.2. Análise da transferência de calor em função da espessura do isolante térmico

Determinada a situação física onde ocorre a menor relação entre a potência de bombeamento [9,4 °C], é de extremo interesse determinar a taxa de transferência de calor para essa situação específica, e a espessura de isolante térmico na parede, necessário para que essa situação se mantenha estável. Nesse caso, efetuou-se um estudo relacionado com o comportamento do número de Nusselt para escoamento completamente desenvolvido. Os resultados para número de Nusselt médio encontram-se representados na Figura 5, abaixo.

Os resultados da Figura 5 foram obtidos através de interpolação, a partir de tabelas numéricas apresentadas por Nogueira (1988).

Foram escolhidos para o desenvolvimento do trabalho dutos circulares de aço da norma API 5L (API: American Petroleum Institute). São tubos para oleodutos e gasodutos (line pipes) que variam, 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/mm²) até o grau X80 com 80.000 psi (56,2 Kg/mm²).

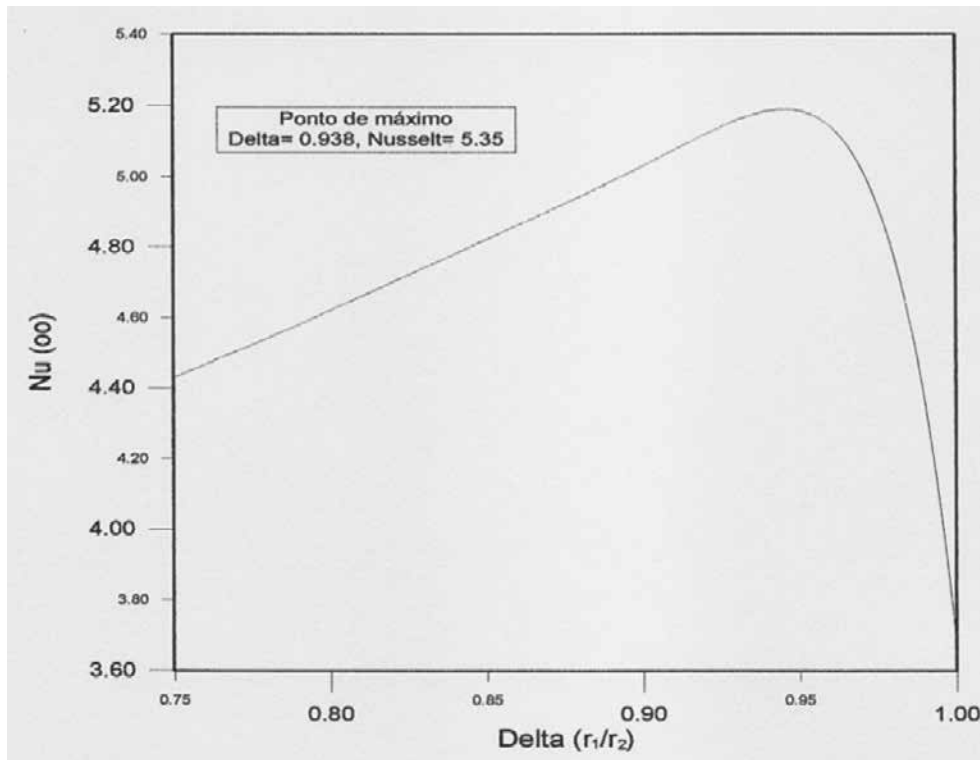


Figura 5. Número de Nusselt em função da espessura de filme, representando a ocorrência do ponto de máximo

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

Tabela 2: Dimensões do duto utilizado e suas propriedades

Diâmetro		Espessura da parede		Condutividade térmica (C_3)
mm	polegada	mm	Polegada	W/mK
101.60	4	5.74	0.226	45.8

Optou-se a trabalhar com o isolante térmico do tipo lã de vidro, cujas propriedades encontram-se representados através da Tabela 3.

Tabela 3: Propriedades do isolantes térmico – Lã de Vidro

Tipo	C_4 [W/mK]	Norma	Fonte
Lã de vidro	0.054	Petrobrás N - 1618	Pitts, Sisson, 1981

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 e Sisson (1981)].

$$h_f = \frac{Nu C_f}{D_h} \quad (10)$$

em que, o diâmetro hidráulico é definido por:

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

Para o duto considerado e, neste caso, podemos determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção (h_f , Equação 10), em função do número de Nusselt.

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:

$$\frac{d}{dr} \left[C_s r \frac{dT_s}{dr} \right] = 0 \quad (12)$$

s=3, aço da tubulação (vide Figura 1)

s=4, isolante térmico (vide Figura 1)

Condições de contorno e de interface para o problema térmico:

$$r = r_2, \quad -C_3 \frac{dT_3(r_2)}{dr} = h_f [T_f - T_3(r_2)] \quad (13)$$

$$r = r_3, \quad T_3(r_3) = T_4(r_3) \quad (14)$$

$$r = r_3, \quad -C_3 \frac{dT_3(r_3)}{dr} = -C_4 \frac{dT_4(r_3)}{dr} \quad (15)$$

$$r = r_4, \quad -C_4 \frac{dT_4(r_4)}{dr} = h_\infty [T_4(r_4) - T_\infty] \quad (16)$$

Neste caso, temos 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 () por:

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

Abaixo, na Figura 6 e Figura 7, apresentam-se as temperaturas internas e o fluxo de calor 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. Nesse

caso, uma espessura de aproximadamente 10 mm de lã de vidro possibilita um isolamento térmico adequado, permitindo-se, dessa forma, uma temperatura de mistura conveniente para um bom desempenho em relação à potência de bombeamento.

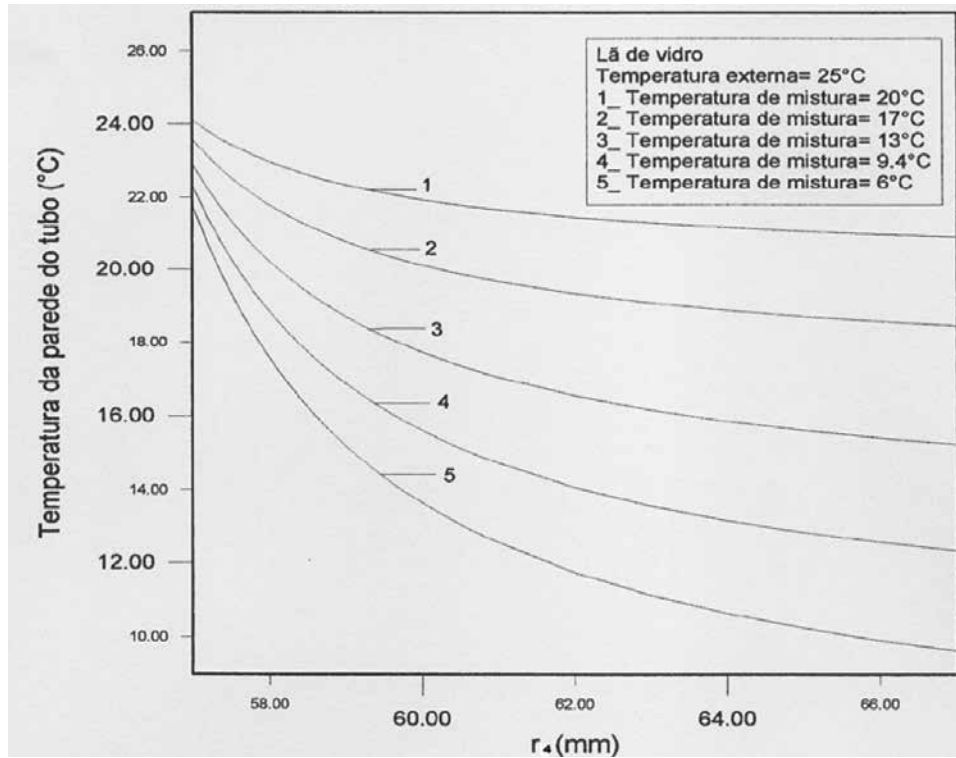


Figura 6: Relação da temperatura na parede do tubo em relação à espessura do isolante térmico (r_4)

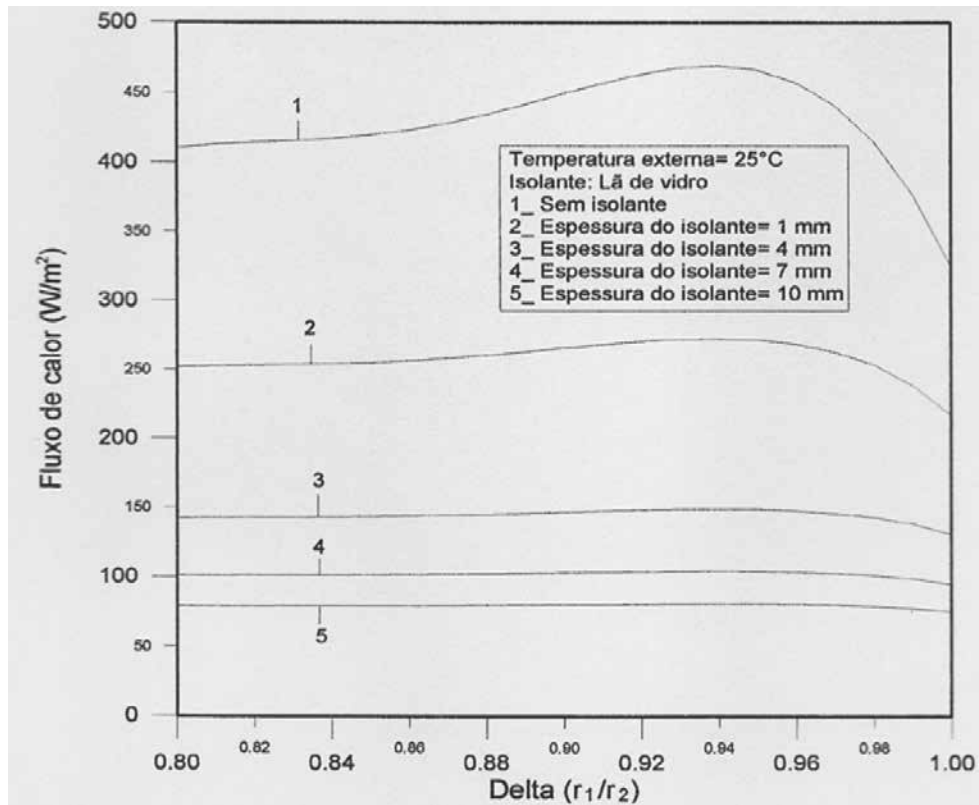


Figura 7: Fluxo de calor em relação à variação do número de Nusselt, função da espessura de filme, para temperatura externa prescrita igual a 25° C e temperatura de mistura igual a 9,4° C

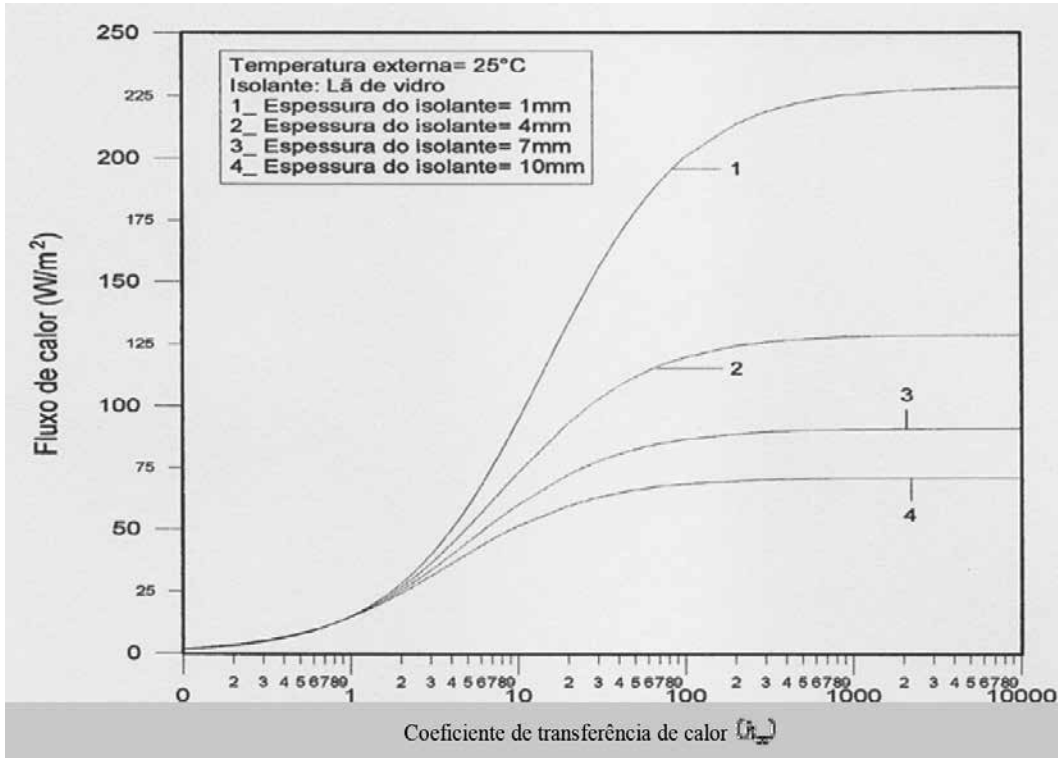


Figura 8: Fluxo de calor com a condutividade externa tendendo ao infinito (h_e) e temperatura externa igual a 25°C

A Figura 7 e Figura 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 analisado, quando o coeficiente de transferência de calor externo tende para infinito, caso de temperatura prescrita, Figura 7.

4. Conclusão

Comprovou-se, neste trabalho, que existe uma relação entre a espessura ótima de isolamento térmico e a potência de bombeamento mínima para o sistema sobre análise. Os argumentos abaixo permitem concluir que há uma espessura de isolante térmico adequada para o sistema na temperatura ideal de desempenho hidrodinâmico (9.4°C).

Demonstrou-se no trabalho de Kimura e Nogueira (2011) 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 e que esta redução na potência de bombeamento depende da temperatura de mistura dos fluidos. O principal resultado observado por Kimura e Nogueira (2011) é

que existe uma relação de compromisso entre a potência de bombeamento e a taxa de transferência de calor no duto, uma vez que a taxa altera a temperatura de mistura dos fluidos. Neste trabalho demonstrou-se que a potência de bombeamento passa por um mínimo à temperatura aproximada de 9.4°C, para os fluidos analisados. Demonstrou-se, ainda, que há um máximo de transferência de calor para espessuras de filme relativamente pequenas, de acordo com Figura 5. Nas situações analisadas, uma espessura aproximada de 10 mm de lâ de vidro possibilita manutenção da temperatura interna, de 9.4°C, para uma condição de temperatura externa igual a 25°C. O mesmo ocorre para espessuras de filme de água relativamente elevadas, de acordo com os resultados apresentados na Fig. (7). Além disso, de acordo com o estudo efetuado, resultados similares são obtidos para diferentes temperaturas externas (15°C, 30°C, 40°C).

A espessura de filme ideal para melhor desempenho hidrodinâmico, na situação analisada, é da ordem de 0,26. Nessa situação, de acordo com resultados apresentados nas Figuras 6 e 7, a espessura adequada de lâ de vidro, como isolante térmico, é de aproximadamente 10 mm, conforme discutido no parágrafo anterior. Como síntese geral de nossas conclusões, apresentamos os resultados mais relevantes dos estudos efetuados:

1- a potência de bombeamento é função da temperatura global média dos fluidos utilizados; 2- 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; 3- a máxima redução de potência de bombeamento ocorre para uma espessura relativa de água igual a 0.153; 4- 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); 5- 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; 6- a espessura ideal para isolamento térmico, quando utilizado lã de vidro, é de 10 mm.

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 Bibliográficas

1. KIMURA, Artur; OLIVEIRA, Carolina Valente de; NOGUEIRA, Elcio. “**Hidrodinâmica de Líquidos Imiscíveis (Água-Óleo) em escoamentos internos: Seção Reta Circular e Placas Planas Paralelas**”. Cadernos UniFOA. Volta Redonda, Ano VI, n. 17, dezembro 2011. Disponível em: <http://www.unifoa.edu.br/cadernos/edicao/17/17.pdf>
2. Nogueira, E., 1988, “**Escoamento Laminar e Transferência de Calor em Fluidos Imiscíveis sem Estratificação**”, São José dos Campos, Brasil, pp. 131-134.
3. Nogueira, E., Cotta, R. M., 1990 “**Heat Transfer Solution in Laminar Cocurrent of Immiscible Liquids**”. *Warme-Ünd Stoffübertagung*, Vol. 25, Springer-Verlag, Alemanha, pp. 361-367.
4. 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.
5. 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.
6. Prada, V., Bannwart, J. W., 1999 “**Pressure drop in vertical core annular flow**” XV COBEM, Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Águas de Lindóia, Brasil.
7. Angeli, P., & Hewitt, G. F. (2000). “**Flow structure in horizontal oil-water flow**”. *Int. J. Multiphase Flow*, 26, 1117-1140.
8. Brauner, N., 2001, “**The prediction of dispersed flows in liquid-liquid and gás-liquid systems**”. *Int. J. Multiphase Flow*, 27, 59-76.
9. Hasson, D. Orell, A., & Fink, M. (1974). “**A study of vertical annular liquid-liquid flow – Part I: Laminar conditions**”. Paper No. 5, Multiphase Flow Systems Symp., Inst. Chem Engng. Symp., Ser. No. 38, 1-15.
10. Bentwich, M. & Sideman, S. (1964). “**Temperature distribution and heat transfer in annular two-phase (liquid-liquid) flow**”. *Canad. J. Chem. Eng.*, 9-13.
11. Pitts, D. R., Sisson, L. E., 1981, “**Fenômenos de Transporte**”. São Paulo, Brasil, pp. 319 – 328.

Endereço para Correspondência:

Élcio Nogueira - Professor Dr. UniFOA
 elcionogueira@hotmail.com

Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA
 Campus Universitário Olezio Galotti
 Av. Paulo Erley Abrantes, 1325
 Três Poços - Volta Redonda - RJ
 CEP: 27.240-560