

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE FLUIDOS IMÍSCIVEIS (ÁGUA-ÓLEO) EM DUTOS CIRCULARES E PLACAS PLANAS

Artur Kimura – artur_kimura@hotmail.com

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

Carolina Valente de Oliveira – carolina.voliveira@yahoo.com.br

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

Élcio Nogueira – elcionogueira@hotmail.com

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

Resumo: *Em muitas operações industriais encontram-se situações em que dois líquidos devem escoar simultaneamente por um mesmo duto. Nesse trabalho apresentamos um estudo analítico do comportamento do escoamento laminar completamente desenvolvido de fluidos imiscíveis (água-óleo) em placas planas e dutos circulares. O sistema empregado é o “Core Flow Lift”, que consiste em adicionar ao fluxo de óleo na tubulação um fluido de menor viscosidade, na forma de uma capa anular externa (água), o que reduz consideravelmente a resistência do óleo ao escoamento, conseguindo um ganho na relação de potência de bombeamento. Esse processo é de fácil aplicação, baixo custo e alto rendimento, possibilitando altas vazões, e já vem sendo utilizado no transporte à longa distância em algumas plantas no exterior, com sucesso. As situações físicas de escoamento entre placas planas paralelas e dutos circulares de seção circular, além de serem muito aplicadas na indústria, são as duas geometrias mais estudadas na literatura. Foram desenvolvidos os perfis de velocidades de cada fluido para diferentes campos de temperatura, partindo-se dos perfis de velocidade e das tensões viscosas na interface dos fluidos, considerando contato perfeito entre ambos os meios. Demonstra-se que existe uma temperatura ideal para redução na potência de bombeamento para duto de seção reta circular e uma temperatura limitante para sistema água-óleo em placas planas paralelas.*

Palavras-chave: *Escoamento laminar; Dutos circulares; Placas planas paralelas; Fluidos imiscíveis.*

1 INTRODUÇÃO

O estudo de sistemas água-óleo é de fundamental importância para diversos processos industriais. Procedimentos como a recuperação secundária de petróleo e o bombeamento de óleos de viscosidade elevada, mediante a injeção conjunta de água, exemplificam situações na indústria petrolífera em que o comportamento da interface água-óleo traz importantes conseqüências para a eficiência da produção, sob o ponto de vista energético [Angeli, P., &

Hewitt, G. F. (2000); Brauner, N., (2001); E. Nogueira, R. M. Cotta (1988); Hasson, D. Orell, A., & Fink, M. (1974); Vanegas Prada, J. W., & Bannwart, A. C. (1999)]. A água e o óleo, quando submetidos a processo de escoamento, formam um sistema heterogêneo composto por duas fases que apresenta entre elas uma fronteira chamada de interface, que é a superfície de separação entre as duas fases. A espessura da interface deve ser bem definida atingindo espessuras de poucos milímetros ou mesmo micron. Sendo que a disposição dos fluídos depende do tipo de escoamento. O fato de o petróleo ser, de um modo geral, mais viscoso e menos denso que a água faz com que, no escoamento simultâneo desses dois fluidos, a água apresente a tendência de se deslocar com maior velocidade em relação ao óleo. As propriedades dos fluídos (densidade, viscosidade e tensão superficial) e fenômenos físicos (temperatura, capilaridade, força gravitacional e velocidade de injeção do fluído) influenciam diretamente na resposta do sistema. Com isso constata-se que a queda na pressão e a redução na potência de bombeamento, em regime laminar, são maiores do que em condições de escoamento turbulento-turbulento. Além disso, 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 em termos teóricos quanto prático. Isto mostra um significativo aumento da taxa de transferência de calor quando uma camada de fluido de maior condutividade é inserido no escoamento [Bentwich, M. & Sideman, S. (1964); E. Nogueira, L. B. Dantas, R. M. Cotta (2002); E. Nogueira, R. M. Cotta (1990)].

O presente trabalho é uma extensão dos resultados apresentados por Nogueira (1988), com relação ao escoamento em regime laminar horizontal de fluidos imiscíveis. Nele se explora a variação da temperatura de mistura dos meios e sua influência na relação de viscosidade, água-óleo, e as conseqüentes variações em parâmetros associados ao regime laminar horizontal de fluidos imiscíveis em escoamento anular. É de grande interesse, teórico e prático, a obtenção da espessura do fluido externo para a condição de mínima potência de bombeamento, uma vez que esta espessura afeta significativamente a taxa de transferência de calor entre os fluidos e a parede do duto. Deve haver, evidentemente, uma relação de compromisso entre a mínima potência de bombeamento e a máxima transferência de calor para o regime de escoamento em análise.

2 OBJETIVOS

Este trabalho visa estudar o comportamento de fluidos newtonianos imiscíveis, em condições de escoamento em regime laminar anular horizontal completamente desenvolvido (água-óleo), variando-se a temperatura de mistura, e considerando-se a conseqüente variação da relação de viscosidades. As grandezas de interesse, na análise efetuada, são: perfis de velocidade, gradientes de pressão, vazões mássicas totais constantes e vazão mássica do fluido interno constante, e as conseqüências na variação da potência de bombeamento.

3 DESENVOLVIMENTO

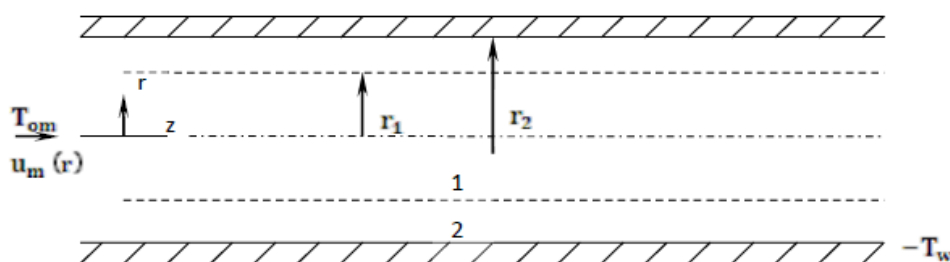


Figura 1: Representação esquemática de escoamento anular de fluidos imiscíveis

O escoamento laminar desenvolvido de fluidos Newtonianos imiscíveis em um duto (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)]:

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

$$r_{m-1} < r < r_m, m = 1, 2$$

$n = 0$ (Placas Planas Paralelas) e $n = 1$ (Duto de Seção Circular)

Definindo-se

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

Para condição de trabalho de vazões volumétricas interna e total, (Q_1 e Q^*), iguais, temos:

$$\bar{u}_1 A_1 = \bar{u}^* A \quad (2)$$

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

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

Considerando-se condições de trabalho Gradientes de pressão (K e K^*) iguais, temos as seguintes relações:

$$\frac{w}{w^*} = \frac{Q}{Q^*} \quad (5)$$

$$\frac{w}{w^*} = \delta^{n+1} \frac{\bar{u}_1}{\bar{u}^*} (1 - \delta^{n+1}) \frac{\bar{u}_2}{\bar{u}^*} \quad (6)$$

$$\frac{\bar{u}_1}{\bar{u}^*} = \frac{(n+3)[1+\delta^2(\hat{\mu}-1)] - (n+1)\hat{\mu}\delta^2}{2\hat{\mu}} \quad (7)$$

$$\frac{\bar{u}_2}{\bar{u}^*} = \frac{(n+3)(1-\delta^{n+1}) - (n+1)(\delta^{n+3}-1)}{2\hat{\mu}\delta^{n+1}} \quad (8)$$

Para situação onde as vazões volumétricas Q e Q^* são definidas iguais, temos as seguintes relações:

$$\frac{w}{w^*} = \frac{K}{K^*} \quad (9)$$

$$\frac{K}{K^*} = \frac{\hat{\mu}}{\delta^{n+3}(\hat{\mu}-1) + 1} \quad (10)$$

Fator de atrito na parede é definido por:

$$\bar{\tau}_n = -\bar{f} \frac{\rho \bar{u}^2}{2Dh} \quad (11)$$

Tal que:

$$\bar{f} = \frac{2KDh}{\rho \bar{u}^2} \quad (12)$$

Encontra-se a seguinte expressão para o fator de atrito:

$$\bar{f} \overline{Re} = \frac{8(n+1)(n+3)(2-n)^2}{\left[\delta^{n+3} \left(\frac{1}{\hat{\mu}} - 1 \right) + 1 \right] \left[\delta^{n+3} (\hat{\mu} - 1) + 1 \right]} \quad (13)$$

De forma similar defini-se o fator de atrito interfacial como:

$$\tau_i = -\mu \left. \frac{dv}{dr} \right|_{r=\delta} \quad (14)$$

$$f_i = \frac{2KDh_1}{\rho_1 \bar{u}_1^2} \quad (15)$$

Considerando a condição de trabalho como sendo vazão mássica interna constante obteve-se:

$$f_i \overline{Re}_i = \frac{16\hat{\mu}(n+1)(n+3)\delta(2-n)^2}{(n+3)[1 + \delta^2(\hat{\mu} - 1)] - (n+1)\hat{\mu}\delta^2} \quad (16)$$

4 RESULTADOS GRÁFICOS

4.1 Duto Circular (n=1)

No sistema água-óleo para duto circular (Figura 2), quando se mantém constante a vazão mássica total, percebe-se que, à medida que se adiciona o fluido menos viscoso na parede, a potência de bombeamento vai diminuindo até alcançar o valor da relação entre as viscosidades $\hat{\mu}=0.168$, função da temperatura de trabalho.

Para gradiente de pressão constante, em certo comprimento de duto, nota se que, à medida que se adiciona o fluido menos viscoso na parede, a potência de bombeamento aumenta até o inverso da relação entre as viscosidades.

No caso em que se mantém constante a vazão do fluido interno, ocorre uma queda na potência de bombeamento quando se adiciona o fluido menos viscoso na parede. Observa-se que, à medida que se vai reduzindo a área disponível para o escoamento, a potência de bombeamento cresce, após passagem por um valor mínimo, de forma que, no limite, quando a área de escoamento tende a zero esta razão tende ao infinito.

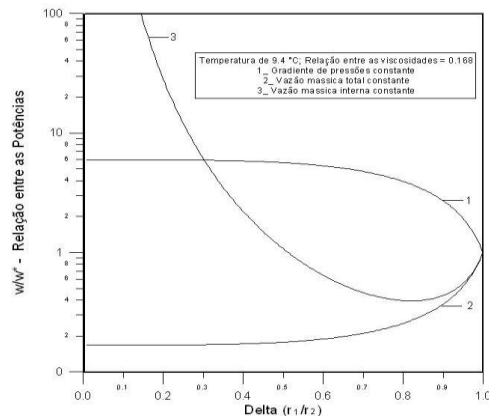


Figura 2– Relação entre as potências de bombeamento à medida que se adiciona água entre o óleo e a parede

Efetuuou-se uma análise, (Figura 3), a partir da condição de trabalho: vazão mássica do fluido interno constante. Como a relação entre as viscosidades depende da temperatura, efetuou-se uma análise para a potência de bombeamento para diferentes valores de temperatura; condição em que foi efetuado o levantamento e cálculo das diferentes relações entre as viscosidades. Observou-se que, em todos os casos, qualquer que seja a temperatura, ocorre ponto de mínimo para o valor da espessura do fluido externo. Esta espessura mínima, para uma dada temperatura, é, em tese, o valor mais adequado para a espessura do filme de água entre o óleo e a parede do duto, com relação à potência de bombeamento. O aspecto mais interessante e expressivo desta análise, observado através dos resultados da Figura 3, é que há um ponto de inflexão para a temperatura, com relação ao ponto de mínimo na potência de bombeamento, ou seja, a potência de bombeamento tem, também, um ponto de mínimo com relação à variação da temperatura (Figura 4).

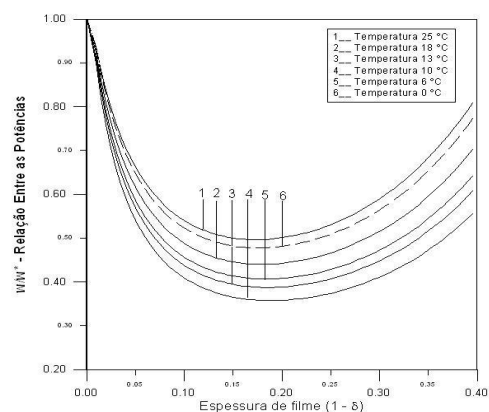


Figura 3 – Relação entre as potências de bombeamento em função da relação entre as viscosidades (água/óleo), considerando-se a fração de água entre o óleo e a parede do duto (Espessura de filme)

Portanto, a partir da Figura 3, foi efetuado o cálculo dos valores de mínima potência em função da temperatura, gerando-se a (Figura 4). Demonstra-se que a relação entre as potências é mínima próxima da temperatura de 9.4° C. Há, neste caso, uma redução de aproximadamente 64% na potência de bombeamento.

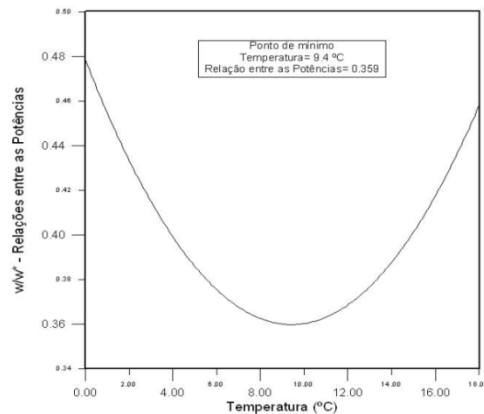


Figura 4 - Relação entre as potências de bombeamento em função da temperatura (o ponto de mínimo entre as potências de bombeamento ocorre à temperatura de 9.4 °C)

Efetuuou-se um estudo do fator de atrito ($\bar{f} \cdot \overline{Re}$) na parede do duto circular ao longo de delta (Figura 5), para diferentes valores de temperatura, onde se percebe que existe um ponto de mínimo para cada temperatura. Como esperado, para delta igual a zero ou delta igual a um, escoamento unifásico, temos o valor clássico da literatura ($f \cdot Re = 64$). Os resultados, neste caso, refletem os valores qualitativos obtidos para a potência de bombeamento e demonstram a consistência do modelo desenvolvido para duto de seção reta circular.

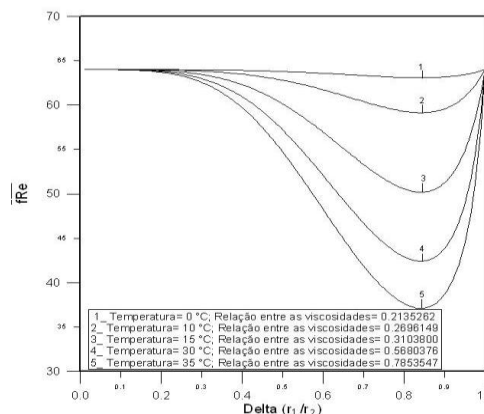


Figura 5 - Fator de atrito em função da fração do óleo no escoamento ($\delta = \frac{r_1}{r_2}$)

Na (Figura 6), estudamos o fator de atrito na interface dos fluidos para diferentes valores de temperaturas. O valor do fator de atrito vai diminuindo conforme a temperatura diminui até atingir o ponto de mínimo que é de 9.4 °C. A partir deste valor, como esperado, volta a subir conforme vai ocorrendo a queda de temperatura. Para valor de delta igual a zero o fator de atrito é zero, em função da derivada da velocidade ser igual à zero no centro da tubulação. Para delta igual a 1.0 (um) temos o valor clássico do escoamento unifásico ($f \cdot Re = 64$), o que corrobora para a consistência do modelo.

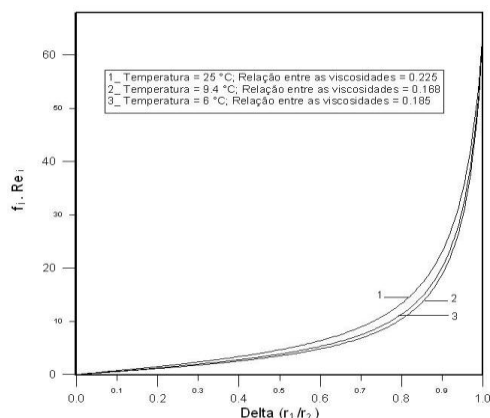


Figura 6 - Fator de atrito interfacial

4.2 Placas planas paralelas (n=0)

No sistema água-óleo para placas planas paralelas (Figura 7), quando se mantém constante a vazão mássica total, percebe-se que, à medida que se adiciona o fluido menos viscoso na parede, a potência de bombeamento vai diminuindo até alcançar o valor da relação $\hat{\mu} = 0.365$, função da temperatura de trabalho.

Para gradiente de pressão constante, em certo comprimento de duto, nota-se que, à medida que se adiciona o fluido menos viscoso na parede, a potência de bombeamento aumenta até o inverso da relação entre as viscosidades. Comportamento também observado para a geometria de duto circular.

No caso em que se mantém constante a vazão do fluido interno, ocorre uma queda na potência de bombeamento quando se adiciona o fluido menos viscoso na parede. Observa-se, ainda, que, à medida que se vai reduzindo a área disponível para o escoamento, a potência de bombeamento cresce, após passagem por um valor mínimo, de forma que, no limite, quando a área de escoamento tende a zero, esta razão tende ao infinito.

Estes resultados, em termos qualitativos, já eram esperados, em função dos resultados obtidos para duto de seção reta circular.

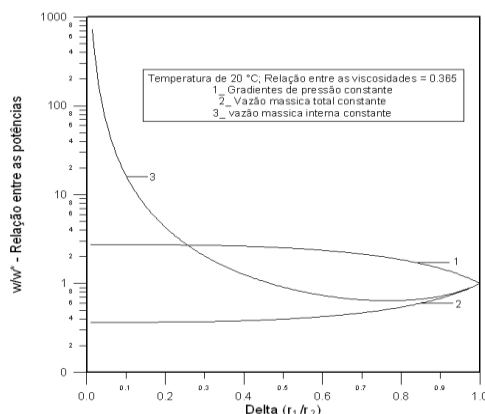


Figura 7 – Relação entre as potências para várias condições de operação

Demonstra-se, na (Figura 8), que quando se utiliza a condição de trabalho de vazão mássica interna constante, para diferentes temperaturas, temos diferentes pontos de mínimo (delta), onde se tem a maior redução de potência de bombeamento. Determinou-se o ponto de mínimo, ($\delta' = \frac{r_1}{r_2}$), para diferentes temperaturas (Figura 9).

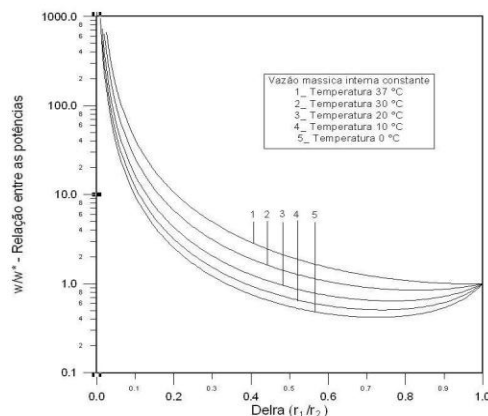


Figura 8– Relação entre as potências em função da fração de óleo no escoamento, para diferentes temperaturas.

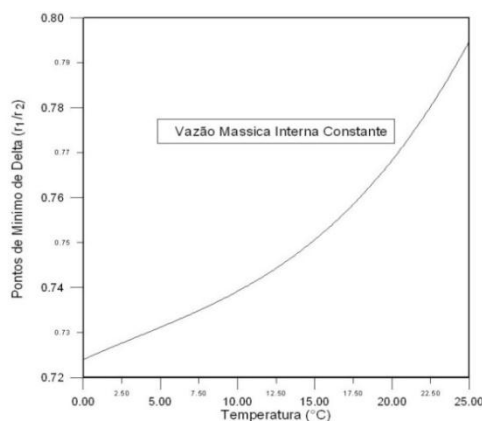


Figura 9 - Pontos de mínimo para fração de óleo no escoamento, em função da temperatura.

Efetou-se um estudo para o fator de atrito na parede, para diferentes temperaturas de trabalho (Figura 10). Observou-se que existe um ponto de mínimo para cada temperatura, e que para delta igual a zero (0.0) ou igual a um (1.0) obteve-se, novamente, como esperado, o valor de fator de atrito para escoamento unifásico ($f.Re = 96$).

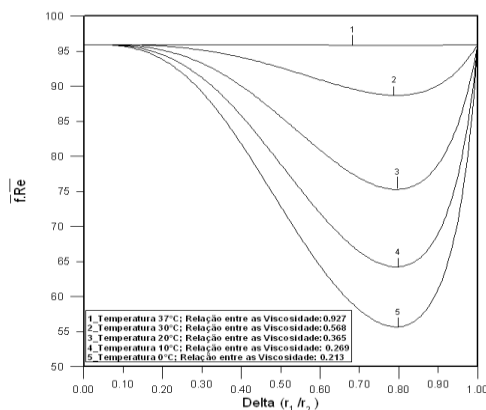


Figura 10 - Fator de Atrito em função da fração de óleo no escoamento ($\delta = \frac{r_1}{r_2}$)

Na (Figura 11), analisou-se o fator de atrito na interface dos fluidos para diferentes valores de temperaturas. O valor do fator de atrito vai diminuindo conforme a temperatura diminui. O comportamento qualitativo é similar ao já observado para duto circular. Para valores de delta igual a zero ou delta igual a um, o resultado numérico coincide com unifásico para placas planas paralelas ($f.Re = 96$). Observa-se que acima de 36 °C, em placas planas paralelas, não há nenhuma vantagem na utilização de água como filme, pois não há redução na potência de bombeamento.

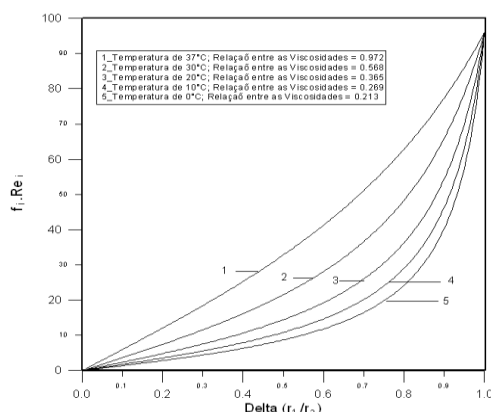


Figura 11 - Fator de Atrito interfacial em função da fração de óleo no escoamento ($\delta = \frac{r_1}{r_2}$).

5 CONCLUSÃO

Todos os resultados qualitativos e quantitativos encontrados neste trabalho estão compatíveis com o esperado fisicamente, e demonstram que o modelo desenvolvido tende para os resultados clássicos da literatura para escoamento unifásico.

A conclusão mais relevante do trabalho encontra-se no fato de que há, para escoamento em seção reta circular, uma temperatura onde a relação entre as potências de bombeamento é mais vantajosa. A temperatura, neste caso, é 9.4 °C, e a redução na potência de bombeamento é de aproximadamente 64%.

Outro ponto relevante na análise efetuada está relacionado com o fato de que há uma temperatura limitante para o uso de água como filme, para a redução da potência de bombeamento, em escoamento entre placas planas paralelas. Esta temperatura limite, para sistema água-óleo, é aproximadamente igual a 36 °C.

As situações de um mínimo valor de temperatura adequada para o melhor desempenho hidrodinâmico em dutos circulares, e uma máxima temperatura em que é desvantajoso utilizar o escoamento anular para placas planas paralelas, são absolutamente inusitadas e demandam uma análise de transferência de calor para as situações críticas, com o objetivo de se obter uma relação custo/benefício entre a potência de bombeamento e o processo de transferência de calor.

Agradecimentos

Agradecemos ao Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA pela bolsa de incentivo a pesquisa e o apoio para o desenvolvimento deste trabalho

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Angeli, P., & Hewitt, G. F. (2000). Flow structure in horizontal oil-water flow. *Int. J. Multiphase Flow*, 26, 1117-1140.

Bentwich, M. & Sideman, S. (1964). Temperature distribution and heat transfer in annular two-phase (liquid-liquid) flow, *Canad. J. Chem. Eng.*, 9-13.

Brauner, N., (2001), The prediction of dispersed flows in liquid-liquid and gás-liquid systems. *Int. J. Multiphase Flow*, 27, 59-76.

É. Nogueira (1988). Escoamento laminar e transferência de calor em fluidos imiscíveis sem estratificação. Tese de Mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA

E. Nogueira, L. B. Dantas, R. M. Cotta. “Heat Transfer in Liquid-Liquid Annular Two-Phase Flow in a Vertical Duct”. *Hybrid Methods in Engineering*, Vol. 4, pp. 1-19, 2002

E. Nogueira, R. M. Cotta. “Heat Transfer Solution in Laminar Cocurrent of Immiscible Liquids”. *Warme-Ünd Stoffübertagung*, Vol. 25, pp. 361-367, Springer-Verlag 1990

E. Nogueira, R. M. Cotta. “Thermohydraulic Performance in Cocurrent Laminar Flow of Immiscible Liquids”. *II Encontro de Ciências Térmicas – ENCIT*, 12/88, pp. 307-310, Águas de Lindóia – S.P

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.

Vanegas Prada, J. W., & Bannwart, A. C. (1999). Pressure drop in vertical core annular flow, XV COBEM, Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Águas de Lindóia, SP, CD-ROM.

Analysis of the behavior of immiscible fluids (water-oil) in flat plates and circular ducts

Abstract: *In many industrial operations are flows of immiscible liquids flowing simultaneously from a single duct. We present an analytical study of the behavior of fully developed laminar flow of immiscible fluids (water-oil) in flat plates and circular ducts. The system used is the “Core Flow Lift”, which adds to the flow of oil to a lower viscosity fluid in the form of an annular outer layer (water), which considerably reduces the flow resistance, with a gain on the pumping power compared with single phase flow of oil. This process is easy to use, low cost and high performance, enabling high flow rates, and is already being successfully used in long distance transport in some plants overseas. Physical situations of flow between parallel flat plates and circular duct, are applied in industry, and are the most studied in the literature of fluid mechanics.*

Key-words: *Laminar flow, circular ducts; flat parallel plates; immiscible fluids.*