

ESTUDO DE MOVIMENTAÇÃO DE CORRENTE MULTIFÁSICA EM TUBOS UTILIZANDO FERRAMENTA CFD

F.C.S. SIQUEIRA¹, I.S. FARIAS², D. MORAES Jr.² e A.S. VIANNA Jr.¹

¹ Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Química

² Universidades Santa Cecília, Departamento de Engenharia Química

E-mail para contato: ardson@usp.br

RESUMO – A descoberta de petróleo na camada do Pré-Sal fez com que a Petrobras invista cerca de 240 bilhões de dólares. Por isso, o estudo de transporte água-óleo é de grande importância. O objetivo aqui é estudar uma corrente água-óleo em um tubo reto e em uma curva, com o intuito de gerar perfis de velocidades, pressões e densidades. Para as simulações desenvolvidas são considerados fluxo 2D, escoamento turbulento, isotérmico, incompressível e no estado estacionário. Foi realizado o estudo da convergência de malha. Os resíduos globais para pressão e velocidade caem pelo menos 2 ordens de grandeza. O modelo utilizado para representar a interação entre as fases foi o IPSA, que resolve as equações de Navier-Stokes para cada fase. A turbulência foi modelada utilizando o k- ϵ padrão e o k- ω . As densidades geradas nas simulações em CFD foram comparadas visualmente com os resultados experimentais obtidos em trabalho anterior para fluxo *core-flow*. As simulações podem ser consideradas como pré-validadas.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho visa o estudo de uma corrente multifásica onde há o escoamento de água-óleo, procurando reproduzir o padrão conhecido como *Core Annular Flow*, onde um anel de água envolve o óleo pesado. Existem registros de patentes com o intuito de reproduzir este fluxo desde 1904, porém a primeira linha de importância foi somente construída em 1970 pela *SHELL*, com aproximadamente 38 quilômetros de extensão e ficou em operação por 12 anos (Joseph *et al.*, 1997).

Alguns trabalhos prévios já foram feitos, tratando da modelagem de condições de operação como Perda de Carga e Fração Volumétrica. Prada (1999) constatou que o fluxo é estável para certas faixas de velocidades e que apresenta perdas de carga relativamente baixas, sendo assim uma possibilidade de redução de custos. Vara (2001) percebeu que uma das maiores dificuldades é manter a estabilidade do fluxo ao longo de grandes distâncias, com isso formulou um diâmetro mínimo estável para o *core annular flow*. Joseph *et al.* (1997) também observou que a estabilidade do fluxo é função da velocidade das fases.

A descoberta de petróleo na camada do Pré-Sal nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo fez com que a Petrobras invista cerca de 240 bilhões de dólares, até 2017, para que haja a produção de 1 milhão de barris/dia (Petrobras, 2014). Portanto, o estudo da movimentação de petróleo (óleo) é de grande importância para a situação atual do país.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. ESCOAMENTO MULTIFÁSICO

Escoamento multifásico é quando mais de uma fase está escoando simultaneamente (Rosa (2012)). Por fase subentende-se uma região do espaço delimitada por uma interface de espessura infinitesimal, que encerra em seu interior material com composição química homogênea, propriedades de transporte e de estado definíveis e que é separável por processos mecânicos.

A forma como a mistura escoar depende da velocidade dos fluídos. Joseph *et al.* (1997) estudaram diversos escoamentos bifásicos em tubulações horizontais e verticais, sendo possível observar diversos padrões: dispersão de óleo em água; gotas alargadas ou esféricas; bolhas alongadas; pistonado; estratificado; anular; *core-flow* ou *bamboo waves*; *wavy*; *core annular flow* com dispersão de bolhas e dispersão de água em óleo.

Óleos pesados são altamente viscosos e mais leves que a água, possuindo tipicamente viscosidades de 1000 Poise e uma densidade de 0,99 g/cm³ na temperatura de 25°C. Sendo assim, por diferença de densidade, a água tende a ficar nas paredes da tubulação lubrificando o fluxo. Óleos leves com viscosidades abaixo de 5 Poise só conseguem gerar fluxos lubrificados estáveis em emulsões água-óleo.

Joseph *et al.* (1997) citam que a viscosidade dessas emulsões pode ser bem menores que a do óleo e podem ser independentes para grandes valores. Isso tem motivado a consideração de bombear óleo bruto pesado através de tubulações como emulsões água-óleo e apresenta uma tubulação comercial na indonésia que produz 40 mil barris por dia de 70% emulsão óleo-água com 50 cm de diâmetro e 238 km de comprimento.

2.2. CFD

CFD *Computational Fluid Dynamics* é o nome dado para a ferramenta numérica e computacional que resolve as equações de conservação de grandezas físicas e assim predizer o comportamento de fluxos de gases e líquidos. A prática apresenta baixo custo, já que não requer a construção de experimentos ou plantas piloto (POLIS 2014). Com o auxílio dessa ferramenta,

O *software* utilizado foi o PHOENICS que é um código de CFD utilizado para o estudo de fluxos, empregando coordenadas Cilíndricas-Polares ou Cartesianas. Ele foi lançado comercialmente em 1981 pela *Concentration, Heat and Momentum Limited in Wimbledon*. O nome PHOENICS é um acrônimo para *Parabolic, Hyperbolic or Elliptic Numerical Integration Codes Series* (POLIS, 2014).

2.2. MODELOS

O PHOENICS possui diversos modelos para representar inúmeras condições operacionais. Para o presente estudo de caso foram avaliados modelos para turbulência e para sistema multifásico.

2.2.1 Multifásico

Os métodos de simulação presentes no software são o **IPSA** (*Inter-Phase-Slip Algorithm*), **ASLP** (*Algebraic SLip Model*), **SEM** (*Scalar Equation Method*), **HOL** (*Height Of Liquid*), **GENTRA** (*GENeral TRAcking*).

O IPSA é o método utilizado, onde se resolve as equações de Navier-Stokes para cada fase. Normalmente as duas fases possuem pressões iguais, porém, podem ser diferenciadas caso exista pressão de contato entre partículas sólidas. Também é computada uma fração de volume para cada fase e ainda cada fase pode possuir composição, tamanho de partícula e quantidade de turbulência (POLIS, 2014).

2.2.2 Turbulência

Turbulência é o estado do movimento do fluido caracterizado por aparentes vórtices caóticos tridimensionais (Souza *et al.* 2011). Quando a turbulência está presente no escoamento ela aumenta a dissipação energética, a mistura, a transferência de calor, entre outros. O estudo da turbulência é necessário para melhor compreensão do escoamento, por isso diversos modelos para turbulência foram desenvolvidos, porém os mais usados são os modelos do tipo RANS de duas equações, como o k- ϵ padrão e o k- ω .

O k- ϵ padrão possui a vantagem de ser de fácil implementação, tem boa convergência e apresenta bom funcionamento para escoamentos simples, como o escoamento em dutos ou escoamento em camada limite. O modelo não funciona muito bem para escoamentos complexos, como, por exemplo, escoamento em degrau (Silveira Neto, 2002).

O k- ω possibilita maior facilidade de integração na parede e, assim, outra gama de problemas são possíveis de serem solucionados. Mas o modelo apresenta alta sensibilidade a variações das propriedades nas zonas longe da parede e a tendência é uma maior necessidade computacional (Silveira Neto, 2002).

3. MÉTODO

O objetivo deste trabalho é estudar uma corrente água-óleo em um tubo reto e uma curva, com o intuito de quantificar parâmetros e estudar perfis de escoamento. As simulações em CFD foram primeiro realizadas para um tubo reto e depois para uma curva. Em todas as simulações foram atendidas a convergência de malha e a redução dos resíduos. Finalmente as simulações foram comparadas com fotos obtidas na unidade experimental previamente estudada (Farias, 2013) e uma validação preliminar foi observada.

Para simulação foi criado uma caixa sólida com propriedades simulares a do aço inoxidável, onde seu volume ocupa todo o sistema; tubos retos concêntricos de diâmetro 0,18 m e 0,12m preenchidos de água e óleo respectivamente; duas curvas concêntricas com diâmetro de 0,18m e 0,12m preenchidos de água e óleo respectivamente. A Figura 3 demonstra a geometria.

A simulação baseia-se em um fluxo multifásico de água com densidade de 0,988 Kg/L e óleo com densidade de 917Kg/L, em um tubo com uma curva em uma das pontas. Foi aceito convergência quando se tem uma somatória de resíduos em ordem negativa e valores constantes das variáveis ao longo da simulação (Rosa, 2001).

A malha que melhor atendeu o sistema é composta por 408.482 células hexaédricas. A técnica *PARSOL (Partial Solids)* foi usada para melhorar a precisão da simulação de fluxo para as situações em que há um cruzamento oblíquo sólido/líquido nas células da grade cartesiana, assim as células são divididas em duas, onde em uma estará o sólido e na outra o líquido.

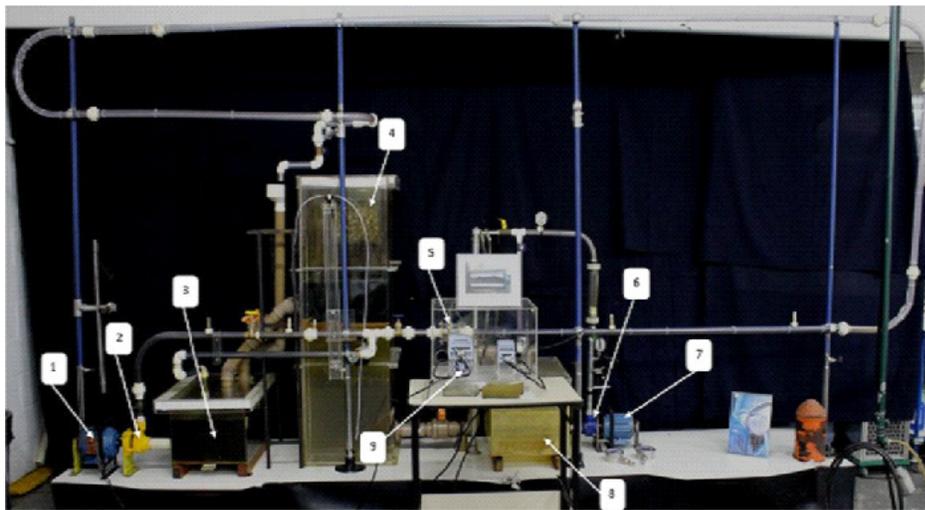


Figura 1 – Planta em escala de laboratório. Legenda: 1 – Motor, 2 – Bomba Regenerativa, 3 – Tanque de óleo, 4 – Tanque água/óleo, 5 – Injetor, 6 – Bomba, 7 – Motor de 1HP, 8 – Tanque de água, 9 – Inversor de frequência para os motores.

A unidade experimental apresentada na Figura 1 é composta por um motor WEG 22 Plus de 2 HP com rotação nominal de 3385 RPM, ligado à bomba regenerativa Ferrari modelo IDB de 1 CV, com rotação de 3500 RPM e altura manométrica de 50 metros de coluna de água (mca) (Farias, 2013).

6. DISCUSSÕES E RESULTADOS

6.1 Simulações no tubo reto

Nas simulações foi adotado fluxo 2D, escoamento turbulento, isotérmico, incompressível e no estado estacionário, velocidade de entrada do óleo de 1 m/s e da água de 2 m/s. Para a interface foi aceito que não há transferência de calor e massa, somente transporte de quantidade de movimento. A convergência foi atingida utilizando a ferramenta *CONWIZ* do *Phoenix* (2014). Para as simulações utilizando o modelo de turbulência k- ω , o *software* apresentou convergência após 15 min e para o k- ϵ 5 min. Os resultados para o primeiro modelo de

turbulência podem ser vistos nas Figuras 2A e B para velocidade e pressão respectivamente; já para o segundo modelo, as Figuras 2C e D apresentam os resultados.

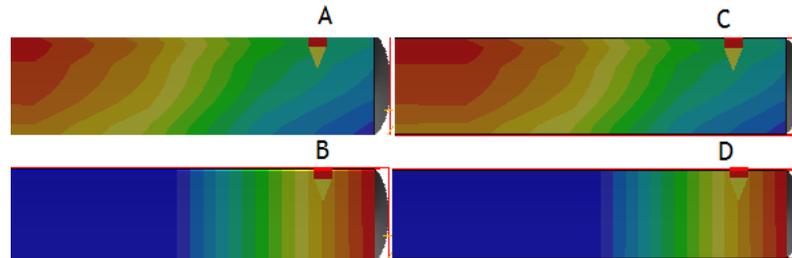


Figura 2 – A) Velocidade para k- ω ; B) Pressão para k- ω ; C) Velocidade para k- ϵ ; D) Pressão para k- ϵ .

Os resíduos para as simulações no tubo reto podem ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 – Resíduos da simulação usando os modelos k- ω e k- ϵ

	P1	U1	V1	W1	R2	K	$\hat{\Omega}$
k- ω	$4,4 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$9,6 \cdot 10^{-6}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$	$8,7 \cdot 10^{-6}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$
k- ϵ	$8,6 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$8,9 \cdot 10^{-6}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$8,6 \cdot 10^{-4}$	$8,7 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$

6.2 Simulações no trecho curvo

Para as simulações aqui apresentadas foram considerados fluxo 2D, escoamento turbulento, isotérmico, incompressível e no estado estacionário, velocidade de entrada do óleo de 1 m/s e da água de 2 m/s. Para a interface foi considerado que não há transferência de calor e massa, somente transporte de quantidade de movimento. A convergência foi atingida utilizando a ferramenta *CONWIZ* do *Phoenix* (2014).

Para as simulações utilizando o modelo de turbulência k- ω , o *software* alcançou convergência após 1 hora. Os perfis de velocidade e pressão podem ser vistos nas Figuras 4A e B.

A curvatura da tubulação resulta em modificações tanto no perfil de velocidade quanto na pressão. No raio interno da curva, as pressões são menores do que no raio externo. Observa-se uma região de maior velocidade junto ao raio interno (regiões vermelhas nas Figuras 4A e C).

As velocidades foram reduzidas junto à parede, provavelmente devido à condição de contorno de não deslizamento.

Os resíduos das variáveis para essa simulação estão presentes na Tabela 2. Estes foram menores que o da simulação anterior, para o tubo reto.

Tabela 2 – Resíduos da simulação com os modelos k- ω e k- ϵ

	P1	U1	V1	W1	R2	K	$\hat{\Omega}$
k- ω	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$9,9 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-1}$
k- ϵ	$6,8 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$

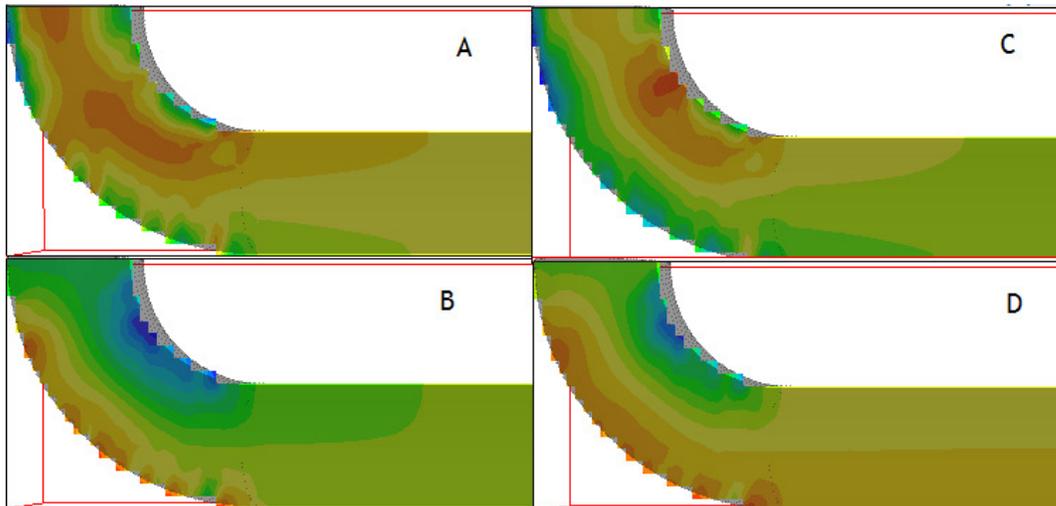


Figura 4 – A) Perfil de Velocidade $k-\epsilon$; B) Perfil de Pressão $k-\epsilon$; C) Perfil de Velocidade $k-\omega$; D) Perfil de Pressão $k-\omega$.

Para as simulações utilizando o modelo de turbulência $k-\epsilon$, o *software* alcançou convergência após 10 min. Os perfis de velocidade e pressão podem ser vistos nas Figuras 4C e D. O perfil de velocidades no centro do tubo e ao longo da posição axial, ponto 0 m até 2,1 m, que corresponde ao meio da curva estão na Figura 5. Observa-se que a velocidade máxima atingida pelo sistema é de aproximadamente 4 m/s, sem diferenças significativas para os dois perfis.

O perfil de densidades para as simulações com $k-\epsilon$ e $k-\omega$ foram muito similares. As Figuras 6 e 7 apresentam os resultados das simulações, onde o óleo (azul) está no centro da tubulação e a água (vermelho) ao seu redor.

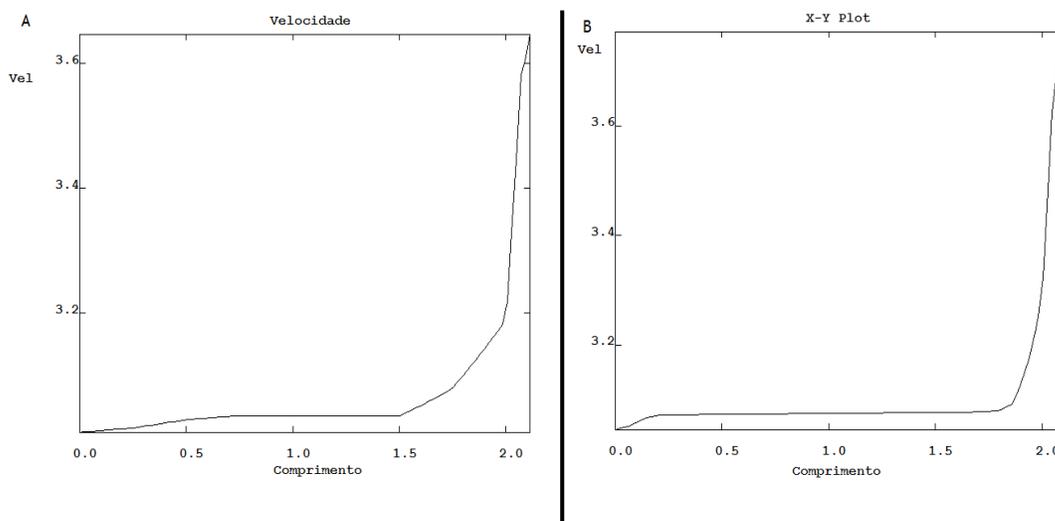


Figura 5 – A) Velocidades usando modelo $k-\epsilon$; B) Velocidades usando modelo $k-\omega$.

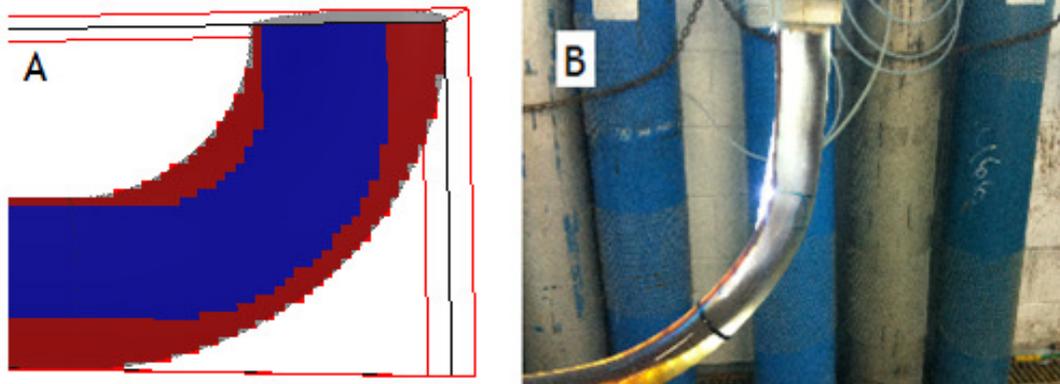


Figura 6 – A) Simulação das densidades na curva; B) Foto do Trecho Curvo do Equipamento.



Figura 7 – A) Simulação das densidades no trecho reto; B) Foto do Escoamento no trecho reto.

6.3 Validação preliminar

Prada (1999) avaliou uma unidade experimental em escala de laboratório com tubulação vertical de 2,76 cm de diâmetro e utilizou um óleo de 17,6 Pa.s. O *core annular flow* permitiu reduzir a perda de carga por atrito em mais de 100 vezes, sendo a perda de carga reduzida 93 vezes em comparação ao escoamento monofásico de óleo (Farias, 2013). Nas simulações foi possível observar que a perda de carga para o sistema Água – Óleo foi de 2688 Pa com uma velocidade máxima de 4,17 m/s, enquanto que para o sistema bombeando somente óleo, a perda de carga foi de 23.811 Pa e a velocidade máxima atingida foi de 1,13 m/s.

Para a efetiva validação dos resultados, seria necessária a utilização de equipamentos sofisticados. Neste trabalho, fez-se uma validação preliminar comparando-se as simulações obtidas aqui e fotos da unidade experimental (Figuras 6 e 7). Pode-se afirmar que houve uma concordância satisfatória tanto para o trecho reto quanto para o trecho curvo.

7. CONCLUSÕES

As simulações obtidas neste trabalho geraram perfis de velocidade, pressão e densidades consistentes com o fenômeno físico. A figura do *core annular flow*, com água nas bordas e óleo no centro, foi reproduzida.

Em todas as simulações foram observadas a convergência de malha e a redução dos resíduos para todas as variáveis, o que indica que foram atendidas as boas práticas de simulação.

Foi possível observar que no tubo reto a velocidade manteve-se constante ao longo de todo percurso, enquanto que para a curva houve aumento da velocidade no acessório. Houve redução significativa da perda de carga no *core annular flow* em comparação com o fluxo monofásico de óleo.

As simulações foram previamente validadas com valores da queda de pressão dos estudos prévios de Prada (1999) e com a observação experimental feita por Farias (2013).

8. REFERÊNCIAS

FARIAS, I. S., Determinação teórica e experimental do ponto de operação de uma unidade de bombeamento com escoamento monofásico e bifásico (água-óleo), IPT, São Paulo, 2013.

JOSEPH, R., CHEN, K., RENARDY, Y., Core-Annular flows. Annu. Rev. Fluid Mechanics, Vol. 29, pp 65-90, 1997;

PETROBRAS. Plano de Negócios. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br>>. Acesso em: 15 abril 2014;

PHOENICS On-Line Information System (POLIS), Models. London, England. Disponível em: <<http://www.cham.co.uk/>>. Acesso em 15 Abril 2014;

PRADA, J. W. V., Estudo experimental do “core annular flow” na Elevação de Óleos Ultraviscosos, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999;

ROSA E. S. Escoamento Multifásico Isotérmico. Porto Alegre: Bookman, 2012;

SILVEIRA NETO A., Fundamentos da Turbulência nos Fluidos. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2002.

SOUZA, J. F. A. Uma revisão sobre turbulência e sua modelagem. Revista Brasileira de Geofísica. v. 29, p. 21-41, 25 mar. 2010.

VARA, R. M. O. Hidrodinâmica do Escoamento Bifásico Óleo Pesado - Água em um Tubo Horizontal. Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2001.