

OBSERVAÇÕES DA DINÂMICA DAS INTERFACES EM ESCOAMENTO TRIFÁSICO ÓLEO PESADO-ÁGUA-GÁS

Alexandre M. S. Costa

UEM-DEQ, Av. Colombo, 5790 - Bloco D-90
Campus Universitário
CEP 87020-900 - Maringá - PR - Brasil
costa@deq.uem.br

Antonio C. Bannwart

UNICAMP-FEM-DEP - Rua Mendeleiev, s/n
Cidade Universitária – Barão Geraldo
C. Postal 6122
CEP 13083-970 - Campinas – SP - Brasil
bannwart@dep.fem.unicamp.br

Fernando F. Vieira

Petrobras UN-ES/ST/CER
Vitória – ES – Brasil
fabris.FCAA@petrobras.com.br

Carlos Henrique M. de Carvalho

PETROBRAS/CENPES/PDP/TE
Cidade Universitária - Quadra 7 - Ilha do Fundão
CEP 21949-900 - Rio de Janeiro – RJ
chmc@cenpes.petrobras.com.br

Resumo. No escoamento trifásico de óleos pesados coadjuvado por água em dutos, a presença mesmo de pequenas quantidades de gás dissolvido no óleo e seu desprendimento à medida que a pressão decresce ao longo da linha, justifica o estudo das configurações e deslocamentos das diferentes interfaces no escoamento trifásico de óleo pesado, água e gás. Neste trabalho são apresentadas visualizações referentes à dinâmica das interfaces em um escoamento vertical ascendente obtido a partir da injeção de ar a um escoamento de óleo pesado e água. A estabilidade hidrodinâmica do padrão anular óleo-água (*core flow*) e, portanto, sua viabilidade prática é dependente de diversos parâmetros, tais como vazões e propriedades das fases, orientação e geometria do duto. Em especial, a estabilidade é afetada pela presença de gás na tubulação, podendo romper a continuidade do núcleo de óleo, além de aumentar consideravelmente a queda de pressão por atrito, por um lado, e reduzir a fração volumétrica da fase líquida e correspondente queda de pressão gravitacional, por outro. Utilizando uma câmera de filmagem rápida foram realizados experimentos em escoamento trifásico, permitindo a visualização dos padrões de fluxo e da dinâmica das interfaces. Os padrões obtidos foram representados em mapas baseados nas velocidades superficiais das fases, permitindo um melhor entendimento da dinâmica do escoamento trifásico líquido-líquido-gás.

Palavras chave: escoamento trifásico, óleo pesado, escoamento anular, *core flow*, engenharia de petróleo

1. Introdução

As grandes reservas de óleo pesado, de alta viscosidade e densidade próxima à da água, existentes no Brasil e no mundo são estimadas em três trilhões de barris de óleo *in place*. As reservas de óleos leves tendem a decair progressivamente nas próximas décadas, sendo previsível um cenário de importância crescente dos óleos pesados. Assim, esses óleos representam um grande desafio a ser superado, havendo uma procura cada vez maior por novas tecnologias que possam tornar sua produção economicamente atraente.

Desde o trabalho pioneiro de Charles, Govier e Hodgson [1], diversos estudos têm demonstrado ser viável a adição de água ao óleo pesado, de tal forma a impedir seu contato com a parede do duto através da formação de um anel lubrificante de água ao redor do óleo [2,3]. Recentemente, a utilização da tecnologia *core flow* foi proposta como uma alternativa atrativa para a produção de óleos pesados em poços verticais através da adição de pequenas quantidades de água, de modo a lubrificar o escoamento [4]. Dessa forma, reduz-se drasticamente a perda de pressão por atrito no escoamento de um óleo pesado morto. A técnica do uso de escoamentos de óleos viscosos coadjuvados por água, entre os quais se destaca o escoamento anular (*core-flow*), pode ser estendida ao caso de óleo pesados contendo gás, e assim se constituir em alternativa interessante para a produção desses óleos em poços verticais.

A grande maioria dos trabalhos recentes encontrados na literatura refere-se ao escoamento óleo-água [5-7], onde o óleo nem sempre é de alta viscosidade. Praticamente não há estudos a respeito do escoamento trifásico de óleos

pesados. O trabalho de Chen & Guo [8] lida com óleos relativamente leves em tubos helicoidais, enquanto o trabalho de Bannwart, Rodrigues & Carvalho [9] estuda óleos pesados, porém aborda o assunto de forma qualitativa em tubos de pequeno diâmetro.

Este trabalho tem como foco o estudo experimental das configurações interfaciais e correspondentes padrões de fluxo formados por óleo cru pesado, água e ar em tubulação vertical de vidro com 28,4 mm d.i. O óleo tem viscosidade e densidade iniciais de 488 mPa.s e 925,5 kg/m³ a 20 °C, respectivamente. Os diferentes padrões de fluxo observados são descritos e analogias com escoamentos gás-líquido são exploradas.

2. Descrição do experimento

A montagem utilizada para os experimentos com óleo cru pesado e água foi instalada no Multilab da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP e compreende segmentos de tubulação vertical e horizontal, como mostrado na Fig. 1.

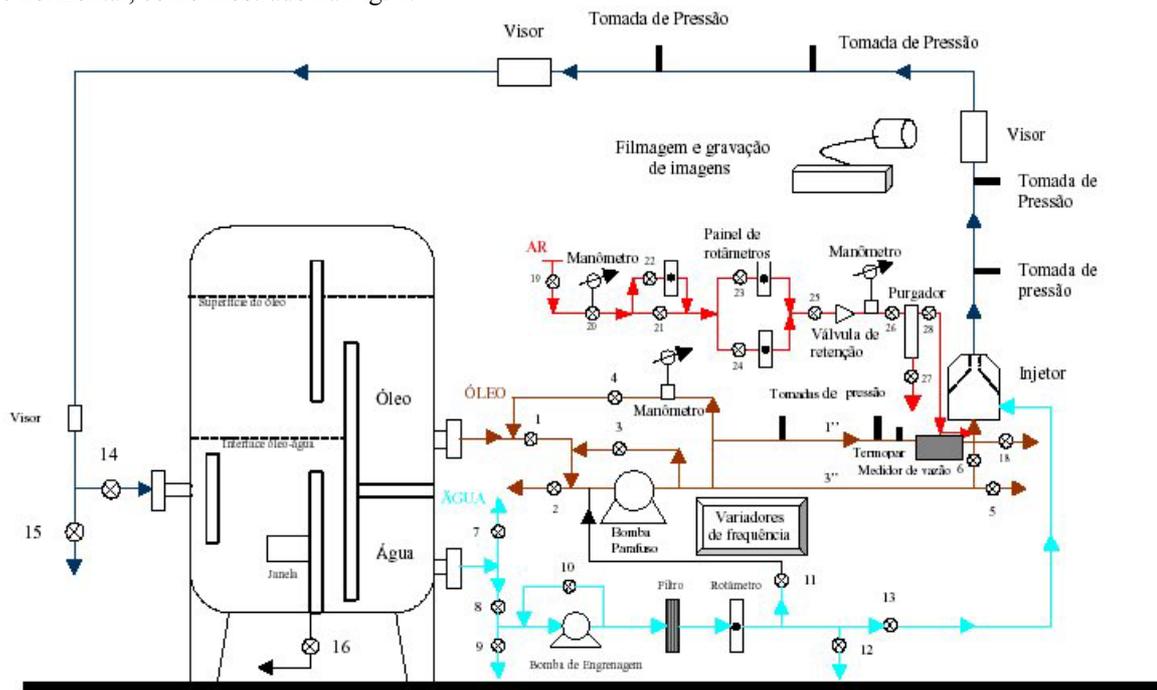


Figura 1. Aparato experimental

Conforme a Figura anterior, o óleo é impulsionado do tanque separador trifásico por uma bomba de deslocamento positivo do tipo parafuso, para o bocal de injeção, através de um tubo de PVC de 74,6 mm d.i. Tal bocal foi construído de modo a permitir as injeções lateral de água e central de óleo, visando evitar o contato do óleo com a parede do tubo e assim induzir mais rapidamente a lubrificação com água. O bocal reduz o diâmetro do tubo para escoamento de óleo de 74,6 para 25 mm, o que é suficiente para penetrar na seção de teste vertical em vidro, a qual tem 28,4 mm d.i. e 2,5 m de comprimento. Da parte inferior do tanque separador a água é impulsionada através de uma bomba de engrenagens para o bocal injetor. As vazões puderam ser independentemente controladas utilizando válvulas de *by-pass* ou inversores de frequência dos motores elétricos das bombas. A vazão de óleo foi medida através de um medidor mássico de efeito Coriolis (marca Danfoss). As medidas da vazão de água foram realizadas através de rotâmetro (marca Omega). Ar da rede pressurizado a 5 bar foi injetado no seio do óleo, sendo sua vazão dada por rotômetros.

Em seguida à seção de teste vertical a mistura óleo-água-ar se dirige para a seção de teste horizontal em vidro (28,4 mm d.i. e 5,43 m de comprimento) e posteriormente para um segmento vertical descendente, retornando ao tanque separador. Ambas seções de visualização estão distantes 70 diâmetros do bocal injetor e do ângulo reto (seção de teste horizontal).

Cada teste era iniciado pelo escoamento monofásico de água pela seção de teste. Após a checagem feita tendo a perda de pressão da água como referência (medida pelo transdutor de pressão diferencial) o óleo era progressivamente inserido. Em seguida, introduzia-se progressivamente o ar, ajustando-se as vazões até os valores desejados por meio de válvulas e inversores de frequência. Após a checagem do regime permanente, o padrão trifásico era filmado com a câmera de filmagem rápida (500 quadros/s), bem como eram coletados outros dados como pressões, temperaturas, queda de pressão na seção de teste, etc.

Na seção de visualização foi instalada uma caixa de acrílico, completada com água para diminuir a distorção da imagem devido à curvatura do tubo. A classificação final do padrão de fluxo foi determinada pela observação dos filmes gravados com a câmera de alta velocidade e reproduzidos em câmera lenta (30 quadros/s).

Ao longo de todo o experimento, o aparato utilizado permitiu variar as velocidades superficiais das três fases ($J =$ vazão volumétrica / área da seção transversal do tubo) nas faixas especificadas na Tab. 1.

Tabela 1: Faixas discretizadas de valores de velocidade superficial

	J_o [m/s]	J_w [m/s]	J_g [m/s]
mínima	0,02	0,04	0,03
máxima	1,20	0,53	9,6

3. Padrões de fluxo observados

Os testes enfocaram os padrões trifásicos que têm a água como fase contínua, em vista de seu interesse prático para aplicações em produção e transporte de óleos viscosos. Assim, a classificação finalmente adotada consistiu em indicar o padrão óleo-água e o padrão ar-água conjuntamente, através da observação de como as fases óleo e ar estavam individualmente configuradas em relação à água. Constatou-se que tanto o óleo quanto o ar podiam estar nas seguintes configurações:

- A - Anular
- B - Bolhas
- I - Intermitente

Combinando-se esses padrões individuais, obteve-se uma designação concisa e completa para os padrões trifásicos visualizados, os quais são apresentados na Figura 2.

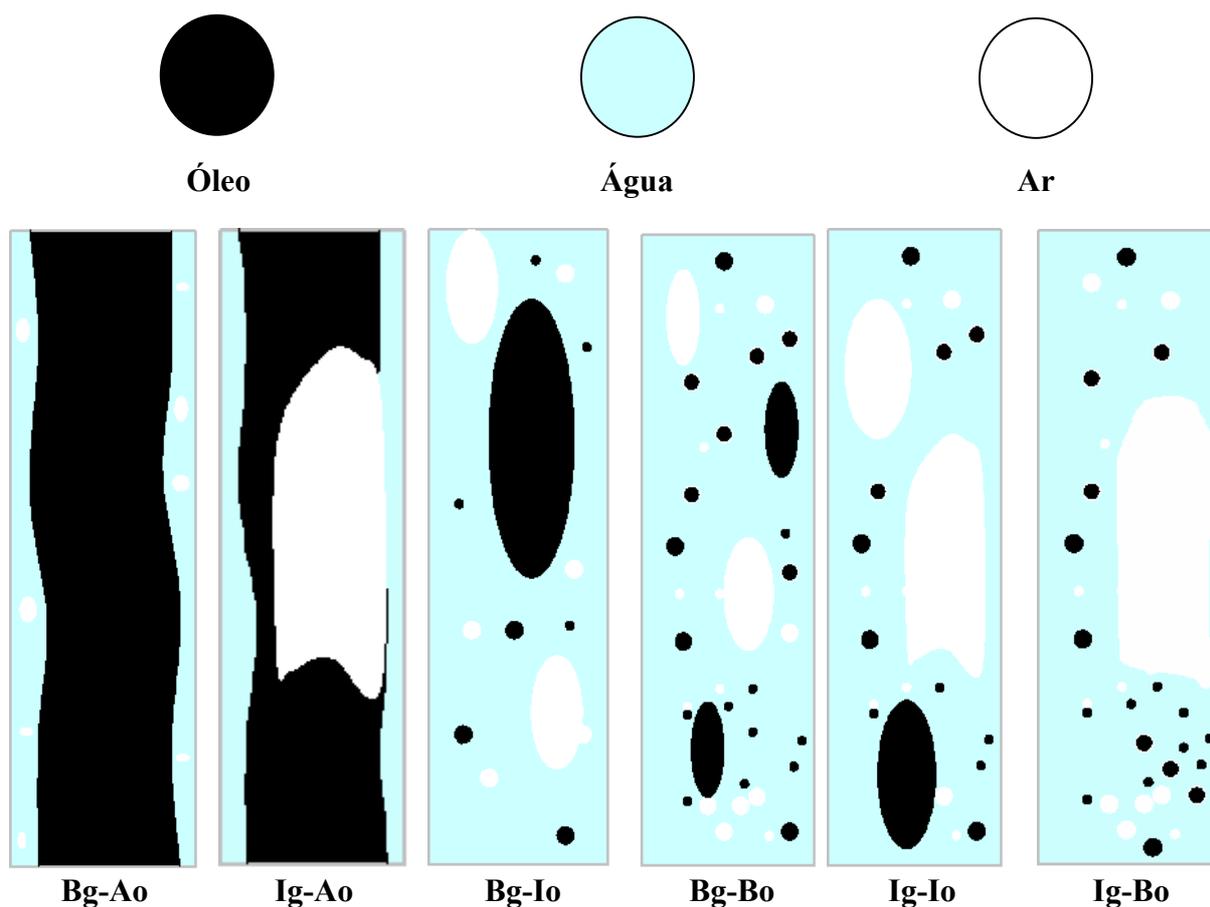


Figura 2. Padrões de fluxo trifásico óleo viscoso-água-ar vertical ascendente com água como fase contínua

Usando-se a Tabela 1 para qualificar as vazões das fases em altas, moderadas e baixas, esses padrões podem ser assim descritos:

1) **Bg-Ao: Gás em Bolhas com Núcleo Contínuo de Óleo**

Ocorre para altas vazões de óleo e baixas vazões de gás. Assemelha-se ao padrão anular observado em escoamento óleo pesado-água (*core flow*). A interface água-óleo é sinuosa e são vistas pequenas bolhas de ar no anel de água.

2) **Ig-Ao: Gás Intermitente com Núcleo Contínuo de Óleo**

Ocorre para altas vazões de óleo e moderadas vazões de gás. Este último forma grandes bolhas ao redor do núcleo de óleo, que ainda se mantém contínuo. Na Figura 3 pode-se observar a passagem de uma bolha ao longo do núcleo de óleo, em instantes consecutivos.

3) **Bg-Io: Gás em Bolhas com Óleo Intermitente**

Ocorre para baixas vazões de gás e moderadas vazões de óleo, insuficientes para garantir a continuidade do núcleo de óleo.

4) **Bg-Bo: Gás em Bolhas com Óleo em Bolhas**

Este padrão foi observado para baixas vazões de óleo e de gás, mas apenas quando a vazão de água é alta o suficiente para dispersar o óleo em forma de bolhas.

5) **Ig-Io: Gás Intermitente com Óleo Intermitente**

Ocorre para altas vazões de gás e óleo, ou para moderadas vazões de gás e óleo, caracterizando-se pela formação de grandes bolhas de gás e de óleo.

6) **Ig-Bo: Gás Intermitente com Óleo em Bolhas**

Ocorre para altas vazões de gás e moderadas ou altas vazões de óleo, quando o gás forma grandes bolhas e o óleo fica disperso na água em forma de pequenas bolhas. Este padrão tem o aspecto de um padrão agitante, e o escoamento apresenta-se pulsante.

O aparato utilizado não permitiu observar com certeza a formação do padrão anular de núcleo gasoso, visto que a máxima velocidade superficial do gás foi inferior a 10 m/s, inferior ao usualmente necessário para formação de padrão anular gás-líquido estável, em condições de pressão e temperatura ambientes [10].

Observou-se também que a vazão de água teve importância secundária na caracterização dos padrões, exceto no padrão Bg-Bo.

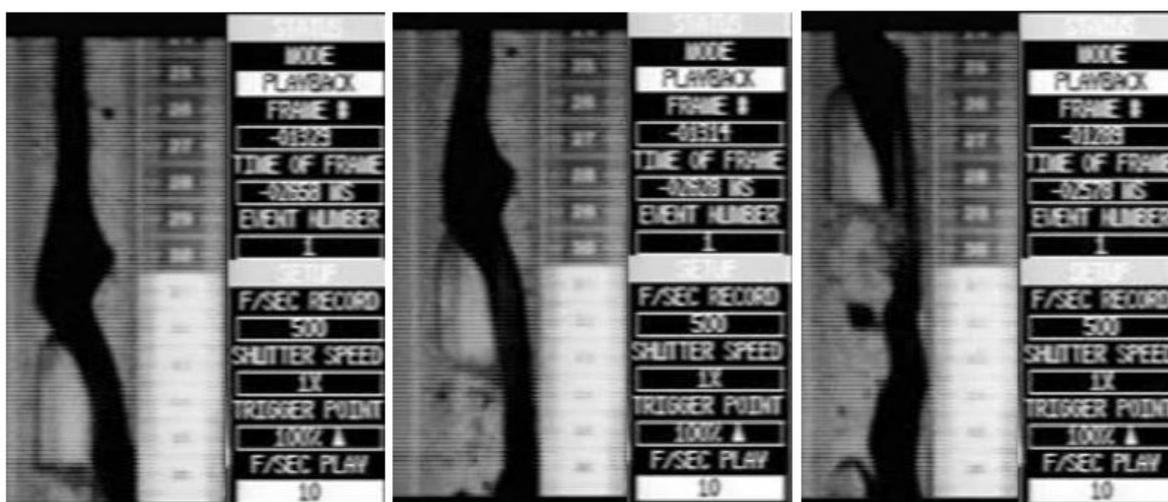


Figura 3. Detalhes da passagem de uma bolha de gás para o padrão anular com óleo no núcleo (Ig-Ao)

Na Figura 4 pode-se observar a passagem de uma grande bolha de gás, com o formato típico de uma bolha de Taylor, em condições tais que o óleo não forma uma fase contínua (padrões Ig-Io e Ig-Bo). Nota-se claramente que a

bolha desloca o óleo viscoso para as laterais. Este, por sua vez, se torna disperso na esteira que antecede a bolha, resultado daquela deixada pela bolha que passara anteriormente.

As Figuras 5 a 8 mostram os mapas de fluxo trifásico em termos das velocidades superficiais do óleo e do gás, a diferentes velocidades superficiais da água.

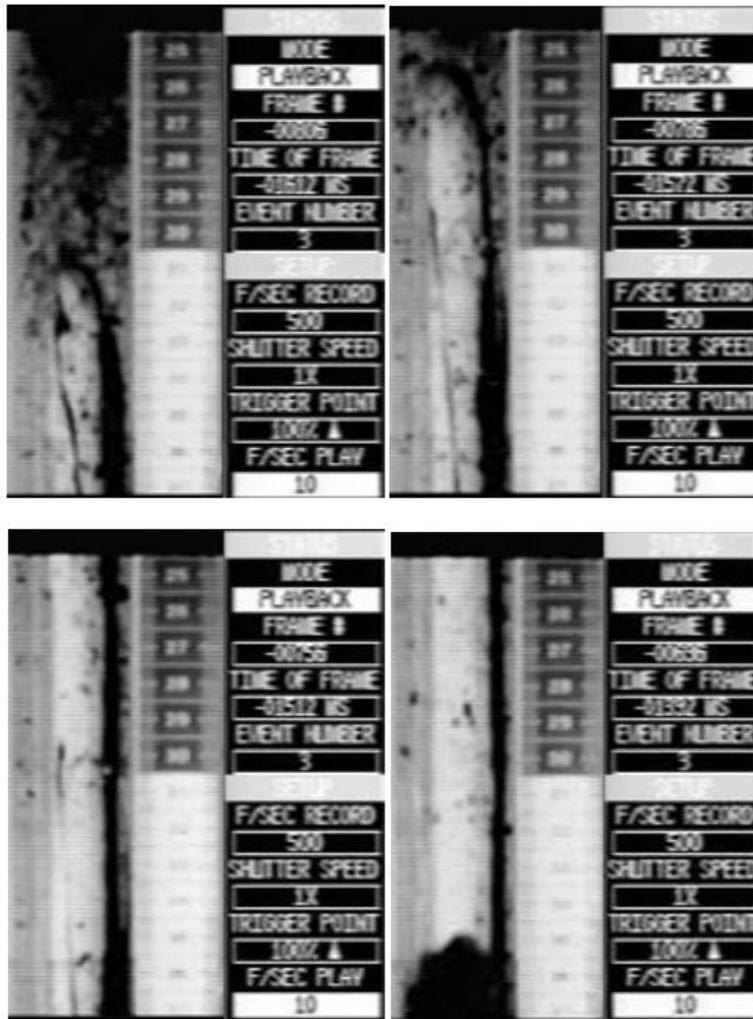


Figura 4. Detalhes da passagem do gás para os padrões Ig-Io e Ig-Bo

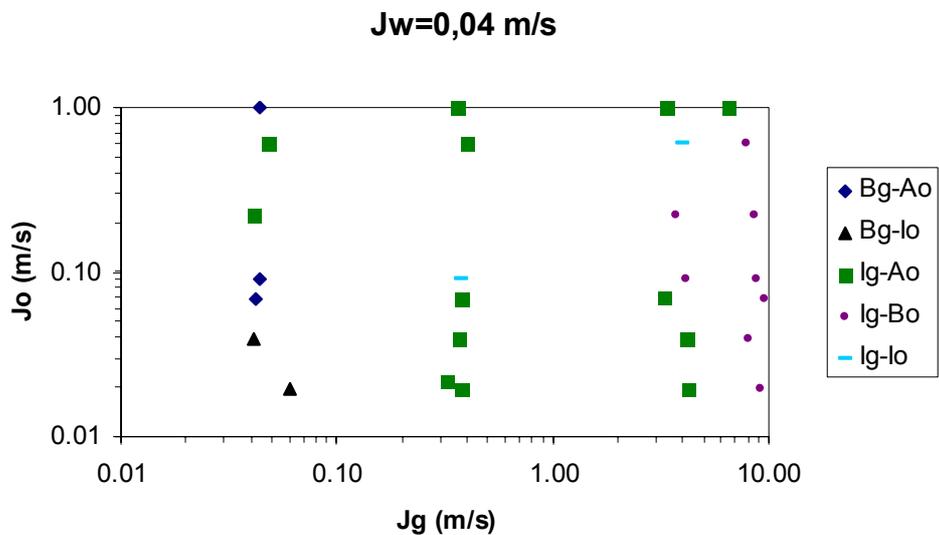


Figura 5. Mapa de fluxo para escoamento trifásico vertical óleo pesado-água-ar para $J_w = 0,04 \text{ m/s}$

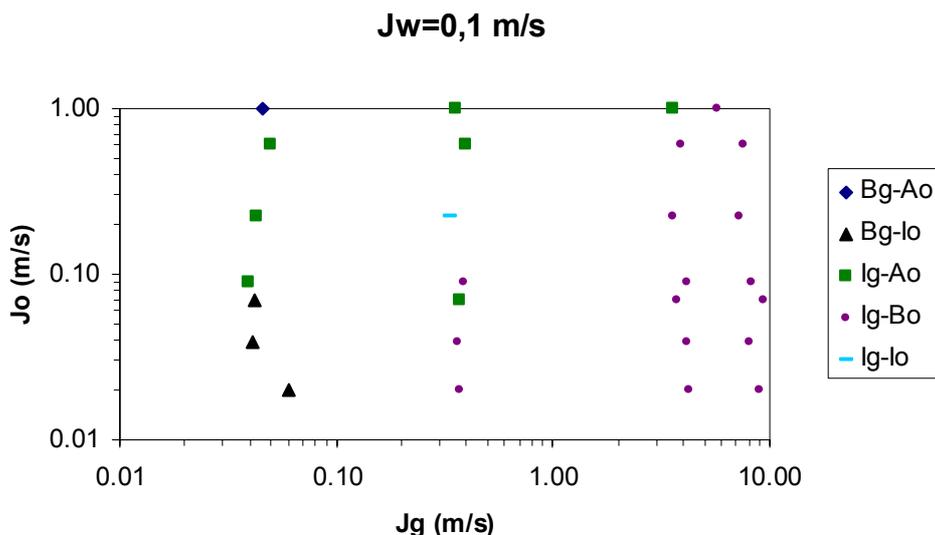


Figura 6. Mapa de fluxo para escoamento trifásico vertical óleo pesado-água-ar para $J_w = 0,1 \text{ m/s}$

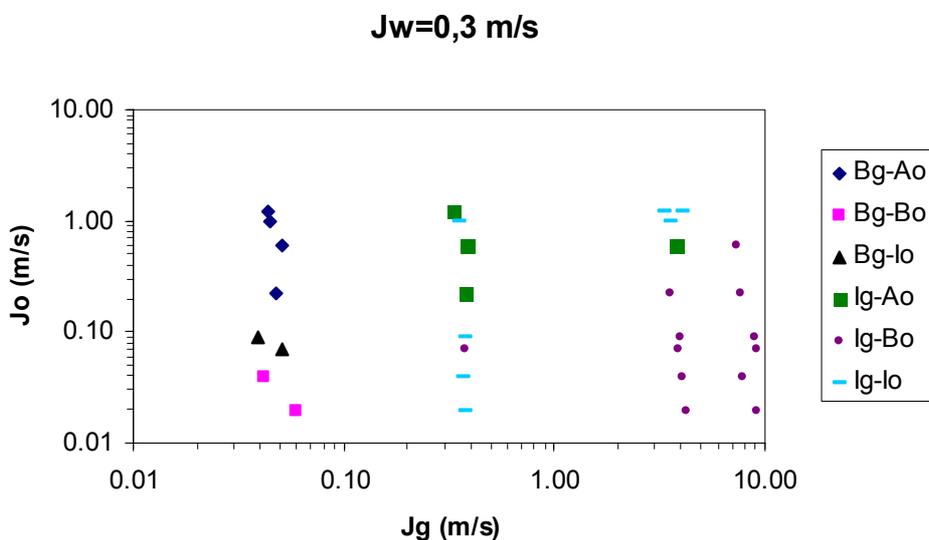


Figura 7. Mapa de fluxo para escoamento trifásico vertical óleo pesado-água-ar para $J_w = 0,3 \text{ m/s}$

As tendências gerais observáveis nesses diagramas são:

- Para uma dada vazão de água, o aumento da vazão de gás causa a mudança de sua configuração de bolhas para intermitente/agitante tendendo para anular; esta última não foi observada mas é previsível para altas vazões;
- Para uma dada vazão de água, o aumento da vazão de óleo causa a mudança de sua configuração de bolhas para intermitente e anular, desde que a vazão de gás não seja significativa; para altas vazões de gás o padrão do óleo se torna o de bolhas dispersas, mesmo para altas vazões de óleo;
- O efeito da vazão de água no padrão de fluxo trifásico não se mostrou significativo; entretanto, altas vazões de água podem causar dispersão da fase óleo em bolhas.

4. Conclusões

Este trabalho apresentou os padrões de fluxo observados no escoamento de um óleo cru pesado, água e ar em tubulação vertical de 28,4 mm d.i. Através de um dispositivo injetor especial, vários padrões diferentes puderam ser observados. Devido à alta viscosidade do óleo não foi possível observar padrões de fluxo com o óleo como fase contínua, os quais têm pouco interesse prático.

Para escoamento trifásico vertical ascendente de óleos pesados, onde a água é a fase contínua, concluiu-se que as fases óleo e gás podem estar individualmente configuradas como bolhas, intermitente ou anular. Isto resulta em 9 padrões trifásicos, dos quais 6 foram observados nos experimentos. Devido a limitações no separador utilizado, não foi possível trabalhar com altas vazões de gás, o qual assim não chegou a atingir a configuração anular.

Foi criada uma designação do padrão trifásico que, através da combinação dos arranjos individuais óleo-água e ar-água, permite um pronto entendimento do padrão observado.

Foi observado que a vazão de água tem um pequeno efeito nos padrões de fluxo qualitativos; em comparação com as vazões de óleo e ar. Conseqüentemente, os padrões de fluxo trifásicos podem ser caracterizados apenas pelas vazões de óleo e ar. O aumento da vazão de gás causa a mudança de seu padrão, de bolhas para intermitente/agitante tendendo para o anular. O aumento da vazão de óleo provoca a mudança de seu padrão de bolhas para intermitente e anular. Altas vazões de água podem causar a dispersão do óleo em bolhas, sendo o mesmo efeito observado para altas vazões de gás.

Deve, por fim, ser observado que, para o material do tubo (vidro borossilicato), a fase água manteve-se sempre em contato com a parede, garantindo o processo de lubrificação e evitando a aderência do óleo na parede.

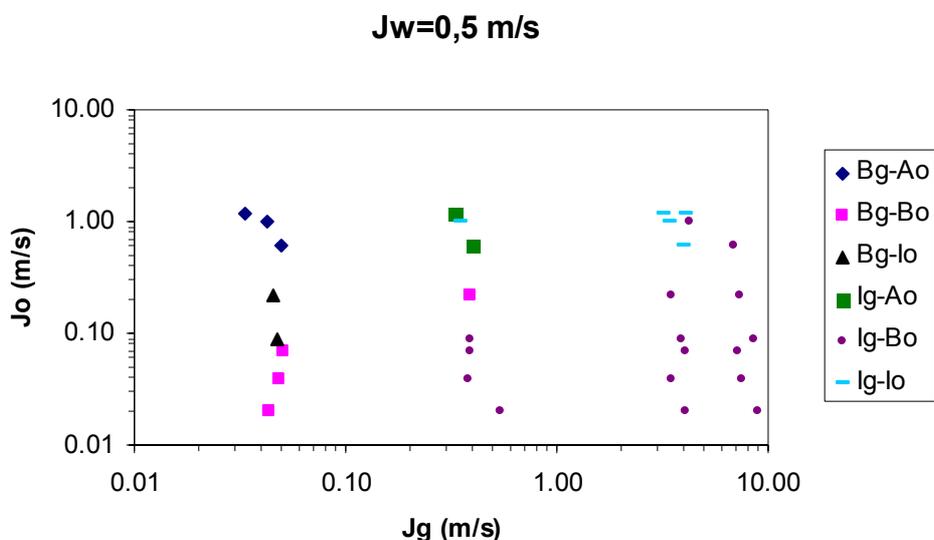


Figura 8. Mapa de fluxo para escoamento trifásico vertical óleo pesado-água-ar para $J_w = 0,5 \text{ m/s}$

Agradecimentos

O presente trabalho contou com o apoio financeiro da FINEP e da PETROBRAS.

Referências

- [1] Charles, M. E., Govier, G. W., Hodgson, G. R., 1961, "The horizontal pipeline flow of equal density oil/water mixture". *Can J. Chem. Eng.* 39, 27-39.
- [2] Oliemans, R.V.A., 1986, "The lubricating-film model for core-annular flow", PhD Thesis, Technische Hogeschool Delft, Delft University Press, The Netherlands.
- [3] Joseph, D.D., Renardy, Y.Y., 1993, *Fundamentals of two-Fluid Dynamics. Part II: Lubricated Transport, Drops and Miscible Liquids*, New York: Springer-Verlag.
- [4] Vanegas Prada, J.W., Bannwart, A.C., 2000, "Modeling of vertical core annular flows and application to heavy oil production", ETCE2000 & OMAE2000 Joint Conference, CD-ROM, February 14-17, New Orleans, LA.
- [5] Flores, J.G., Chen, X.T., Sarica, C., Brill, J.P., 1997, "Characterization of oil-water flow patterns in vertical and deviated wells", paper SPE 38810, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, 5-8 October.
- [6] Brauner, N., Moalem Maron, D., 1999, "Classification of liquid-liquid two-phase flow systems and the prediction of flow pattern maps", 2nd International Symposium on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation - ISTP'99, vol. 2, pp.747-754, Pisa, Italy.
- [7] Valle, A., Utvik, O.H., 1997, "Pressure drop, flow pattern and slip for two phase crude oil/water flow: experiments and model Predictions". In: *Int Symp on Liquid-Liquid Two-Phase Flow and Transport Phenomena*, Antalya, Turkey, November 3-7.

- [8] Chen, X., Guo, L., 1999, "Flow patterns and pressure drop in oil-air-water three-phase flow through helically coiled tubes". *Int. J. Multiphase Flow.*, v. 25, 1053-1072.
- [9] Bannwart, A. C., Rodrigues, O. M. H., Carvalho, C. H. M., 2002, Multiphase flow patterns in heavy oil production and transportation. *Petro & Química.*, v.240, p. 132-142.
- [10] Taitel, Y., Barnea, D., Dukler, A. E., 1980, "Modeling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes", *AIChE Journal*, vol. 26, pp. 345-354.

OBSERVATIONS OF THE INTERFACE DYNAMICS IN THREE PHASE FLOW OF HEAVY OIL, WATER AND GAS

Alexandre M. S. Costa
UEM-DEQ, Av. Colombo, 5790 - Bloco D-90
Campus Universitário
CEP 87020-900 - Maringá - PR - Brasil
costa@deq.uem.br

Antonio C. Bannwart
UNICAMP-FEM-DEP - Rua Mendeleiev, s/n
Cidade Universitária – Barão Geraldo
C. Postal 6122
CEP 13083-970 - Campinas – SP - Brasil
bannwart@dep.fem.unicamp.br

Fernando F. Vieira
Petrobras UN-ES/ST/CER
Vitória – ES – Brasil
fabris.FCAA@petrobras.com.br

Carlos Henrique M. de Carvalho
PETROBRAS/CENPES/PDP/TE
Cidade Universitária - Quadra 7 - Ilha do Fundão
CEP 21949-900 - Rio de Janeiro – RJ
chmc@cenpes.petrobras.com.br

Abstract

During the water-assisted flow of heavy oil in pipes, the existence of even low amounts of soluble gas in the oil and its release as pressure decreases along the pipe, justifies the study of flow configurations and interface (gas-liquid and liquid-liquid) displacements in three phase flow of heavy oil, water and gas. In this work we present visualizations of the interface dynamics in a vertical upward flow pattern obtained from the injection of gas into a initial heavy oil-water flow. The hydrodynamic stability of heavy oil-water annular flow (core flow) and, therefore, its feasibility depends on several parameters, such as flow rates, phase properties, pipe inclination and geometry. In particular, the core flow stability is affected by the presence of gas in the line, which can break up the continuity of the oil core, increase considerably the frictional pressure drop and decrease oil volume fraction with the correspondent decrease in the gravitational pressure drop. Using a high speed camera we run experiments in three-phase flow of heavy oil, water and air, for visualization of flow patterns and interface dynamics. The flow patterns were represented in superficial velocity flow maps, allowing a better understanding of three-phase liquid-liquid-gas flow.

Keywords: three phase flow, heavy oil, annular flow, core flow, petroleum engineering