

ESTUDO EXPERIMENTAL DE ONDAS, NO ESCOAMENTO ESTRATIFICADO ÓLEO-ÁGUA EM TUBULAÇÃO LEVEMENTE INCLINADA.

Diego Oliveira de Mello

Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos
Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo
Avenida: Trabalhador São Carlense, 400. Cep: 13566-590
E-mail: dmello_7@hotmail.com .

Ricardo Amaral

E-mail: ricardofamaral@gmail.com

Oscar M. Hernandez Rodriguez

E-mail: oscarmhr@sc.usp.br

Resumo. Embora o escoamento estratificado óleo-água seja comum na Indústria do petróleo, existem poucos trabalhos na literatura sobre a estrutura ondulatoria encontrada no escoamento em dutos ascendentes ou descendentes. O objetivo deste trabalho é entender e caracterizar as estruturas interfaciais de onda em escoamentos estratificados óleo e água em dutos levemente inclinados. Uma primeira tentativa de modelar a onda interfacial óleo-água através da equação da energia é apresentada. Valores de comprimento de onda foram coletados para quatro ângulos de inclinação a partir da horizontal (-5°, -2°, 2° e 5°) e diversos pares de vazão de óleo e água. Os dados foram extraídos de *frames* de vídeos de alta resolução através de uma técnica manual. Um software baseado em LabView[®] foi desenvolvido para possibilitar a automação da obtenção do comprimento de onda e amplitude. Os comprimentos de onda obtidos com a técnica automática foram comparados com os dados obtidos através da técnica manual. O mensuramento é bem satisfatório e sugere que a ferramenta experimental proposta possa ser aplicada para o estudo de qualquer padrão de escoamento óleo-água, onde uma estrutura ondulatória possa ser identificada.

Palavras chave: Escoamento bifásico , Escoamento óleo-água, Escoamento estratificado, Estrutura ondulatória, Tubulações inclinadas.

1. Introdução

Na literatura existem diversos tipos de padrões de escoamento em dutos, são eles: estratificado, pistonado, anular, dispersão óleo-água e água-óleo (Bannwart *et al.*, 2004), porém a maior parte dos estudos realizados nessa área foram em escoamento gás-líquido. O padrão estratificado ondulado pode ser observado para velocidades relativas suficientemente altas e a estrutura geométrica da onda interfacial para o escoamento gás-líquido foi levantada por Li *et al.* (1997). Dentre os padrões citados acima, estaremos discutindo os diversos tipos de estruturas ondulatórias observadas no padrão estratificado óleo-água. A importância do estudo do padrão estratificado líquido-líquido consiste no fato de que frequentemente misturas de água em óleo ou óleo em água são de difícil separação no final da linha de transporte ou produção. A preservação do padrão de escoamento estratificado para uma ampla faixa de condições de escoamento facilitaria o processo de separação das fases. De fato, a estratificação dos líquidos tem sido sugerida como meio de separação de água do óleo em oleodutos (Haheim, 2001). Além disso, uma redução da perda de carga é também esperada.

No presente trabalho busca-se a compreensão das estruturas ondulatórias que ainda possuem uma forma média não conhecida, visto que grande parte dos escoamentos estratificados possui um padrão ondulatório não identificado. Por exemplo, suspeitamos que com uma variação, mesmo que pequena, das inclinações de uma tubulação, haveria mudanças significativas em seus comprimentos de onda. Faremos então uma bateria de análises comportamentais da mesma a fim de definir uma estrutura genérica. Wahaibi e Angeli (2006) apresentam um equacionamento baseado na teoria invíscida de Kelvin-Helmholtz para a previsão das características geométricas da onda interfacial. Entretanto, aqueles autores utilizam a velocidade da onda cinemática como referência e propõe o modelo deduzido por Wallis (1969) para sua determinação, o que está em desacordo com a teoria invíscida.

Apresentamos o desenvolvimento de uma equação para a previsão das propriedades geométricas da onda interfacial baseada na equação da energia bifásica unidimensional em regime permanente. Além dos termos de energia mecânica, a dissipação viscosa é modelada e poderá ser utilizada posteriormente como parâmetro de ajuste. O estudo dos efeitos da inclinação no padrão de fluxo líquido-líquido está em ordem (Ullmann *et al.*, 2003). Estes são investigados experimentalmente e teoricamente neste trabalho. Através da aquisição dos comprimentos de onda nas respectivas inclinações (-2), (-5), (5) e (2) graus para diferentes pares de vazão ou mantendo a vazão fixa com mudanças na inclinação, foi notado que tais alterações influenciavam diretamente no comportamento da estrutura

ondulatória, alterando, por exemplo, o comprimento de onda. A transição de padrão de fluxo de estratificado-liso para estratificado-ondulado é normalmente identificada através de uma condição de estabilidade baseada no crescimento exponencial de uma onda interfacial (Brauner, *et al.*, 1994, Trallero, 1995). Dessa forma, poderíamos atribuir ao estudo das transições de padrão de fluxo (Pf) mais uma variável, sendo elas: velocidades *in-situ* da água (U_w), do Óleo (U_o) e a inclinação, medida em graus (θ), devido ao fato de que a velocidade *in-situ* de um escoamento depende da inclinação dos dutos, logo $Pf = f(U_w, U_o, \theta)$. Suspeitamos que o padrão de fluxo estratificado ondulado seja influenciado significativamente pelo ângulo de inclinação. Consequentemente, a região estratificada das cartas de fluxo seria identificada não somente pelos pares de velocidades superficiais, mas também pelo ângulo de inclinação. Uma das características relevantes que temos observado é a de que não existe somente uma espécie de onda a ser analisada em um único escoamento, o mesmo pode possuir ondas curtas, intermediárias e longas. Para a obtenção dos comprimentos de onda dos filmes citados, foram usadas duas técnicas: em uma primeira aquisição, a coleta de comprimentos de onda foi feita de forma manual, sendo essa responsável pela determinação segura e bem definida de dados, servindo como base de informações e para validações de outras técnicas. Porém, trata-se de um processo limitado, que requer muito tempo de aquisição. Fomos então motivados a desenvolver um software baseado LabView® para coletar de forma segura e automática os comprimentos de onda. Propomos que o comprimento de onda interfacial possa ser visto como um sinalizador em um escoamento estratificado líquido-líquido, pois através dele podemos determinar, por exemplo, se no escoamento está havendo um deslizamento significativo entre as fases.

2. Procedimento e técnicas experimentais.

2.1. Aparato experimental.

Os experimentos reportados neste artigo foram conduzidos nas instalações experimentais multifásicas da Shell Exploration and Production B.V., Rijswijk, Holanda. Escoamento óleo (Shell Vitrea 10, densidade média 830 kg/m^3 e viscosidade $7.5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)-água (salgada, densidade média 1060 kg/m^3 e viscosidade $0.8 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) foi investigado em uma tubulação de aço inoxidável de $8,28 \text{ cm}$ d.i. e $15,5 \text{ m}$ de comprimento. Na linha havia uma seção de teste transparente de $1,15 \text{ m}$ em acrílico para visualizações. Entre a seção de mistura e a seção de teste um comprimento de 250 d.i. foi deixado para o desenvolvimento do escoamento bifásico. A linha estava fixada a uma mesa inclinável que podia ser desviada pneumaticamente da horizontal. Para a identificação dos padrões de escoamento foram utilizadas imagens digitais obtidas via câmera filmadora digital (Sony digital video recorder DSR-20P) em conjunto com informações de frações volumétricas *in-situ* obtidas via densímetro de raios gama (Berthold LB 444). O leitor pode se referir a Rodriguez e Oliemans (2006) para uma descrição detalhada da montagem experimental e técnicas experimentais empregadas.

Ondas interfaciais estáveis foram detectadas em escoamento ascendente e descendente. Uma seção de filmagem consistindo de uma caixa retangular de acrílico cheia d'água foi montada em torno do tubo de acrílico. Os comprimentos de onda foram determinados da análise das imagens digitais capturadas dos filmes gravados. Efeitos de lente e paralaxe foram corrigidos através de calibração. Uma escala calibrada foi inserida no tubo de acrílico cheio d'água. O comprimento da escala foi então comparado com uma outra escala montada do lado de fora sobre a caixa de acrílico. Para as análises pretendidas, foram feitas capturas de 25 (vinte e cinco) *frames* aleatoriamente, dentro de aproximadamente 1 (um) minuto de intervalo de filmagem. Para a captura dessas imagens foi utilizado o software Adobe Premiere® 6.0.

2.2. Técnicas experimentais.

2.2.1. Coleta manual de dados.

Para obter os pontos que representam as amplitudes das ondas analisadas, fora desenvolvido um software de aquisição de coordenadas. Dada uma imagem, o mesmo é capaz de fornecer as ordenadas e abscissas de pontos distintos, dentro da mesma figura. Em cada *frame* analisado havia uma estrutura ondulatória formada entre as fases com a parte de baixo da tubulação contendo água e a parte de cima contendo óleo, como representado na Fig. 1 abaixo:



Figura 1. Ondas interfaciais observadas; (a) inclinação de 5 graus negativos; (b) 2 graus positivos.

A Fig.1 foi extraída dos filmes, via Adobe Premiere 6.0. Existem diferentes estruturas ondulatórias para serem estudadas em tipos distintos de escoamentos, cada uma com sua particularidade. Utilizando o software de aquisição de coordenadas, foi possível determinar o comprimento de onda (λ), definido como a distância entre duas cristas ou vales. Para identificar duas cristas de onda consecutivas utilizamos o fato de que deve existir uma inversão do valor da derivada; teríamos duas cristas consecutivas somente quando a derivada em uma posição determinada no espaço possuir valor igual a 0 (zero), passar a resultados negativos, em seguida positivos e voltar a 0 (zero) novamente. Com a coleta de pontos e medições, relativas a cada *frame*, foi possível extrair a média do comprimento de onda interfacial para um único *frame*. Posteriormente, foi feito o cálculo do comprimento de onda médio de todos *frames* com a mesma inclinação e mesmo par de vazões. Finalmente, foi possível agrupar os resultados obtidos e calcular o comprimento médio global para cada par de vazões e sua respectiva inclinação. Na Figura 2 o comprimento médio global (λ_m) está representado nessa distribuição tipicamente gaussiana.

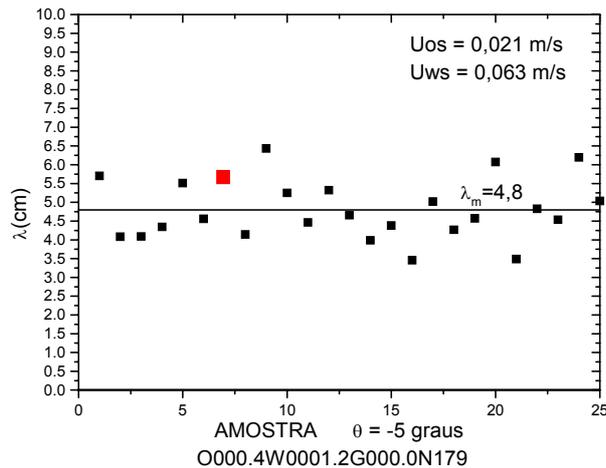


Figura 2. Representação das médias de cada *frame* analisado e valor médio (λ_m).

A média do *frame* da Fig. 1a está representada pelo ponto de cor vermelha na Fig. 2 e $\lambda_m = 4,8$ cm representa a média global de todos os comprimentos de onda médios extraídos de cada *frame* que possuíam a inclinação (-5°) e os mesmos pares de vazão da Fig. 1a.

2.2.2. Coleta automática de dados.

Para a obtenção de dados através dos *frames* dos filmes verificou-se a necessidade do desenvolvimento de um software que tratasse esses *frames* automaticamente, de uma maneira rápida e repetitiva. Buscou-se, assim, implementar esse software desenvolvido na plataforma LabView®, que processa as imagens automaticamente identificando nelas a onda correspondente à interface água-óleo e fornece os dados desejados tal como o comprimento de onda. A coleta automática de dados foi realizada com o software desenvolvido. Um exemplo de uma imagem analisada está na Fig. 3, onde na parte superior pode ser visto o óleo e na parte inferior água, bem como a onda resultante da interação entre as duas fases.

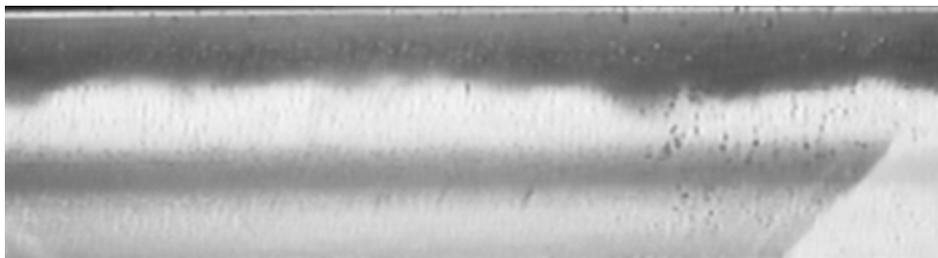


Figura 3. Exemplo de imagem analisada pelo software.

Para o processamento dessas imagens (*frames* do vídeo) o algoritmo utilizado seguiu os seguintes passos:

- Segmentação da imagem (binarização e operações morfológicas).
- Detecção da onda através do gradiente

- Identificação de picos e vales.
- Filtragem dos picos e vales obtidos.

O objetivo da segmentação da imagem é diferenciar o objeto de interesse do plano de fundo da imagem, sendo este o óleo e aquele a água. Verifica-se que a região correspondente ao óleo apresenta tons de cinza com uma intensidade bem menor que a região correspondente à água. Sendo assim, utilizou-se a binarização para a segmentação da água, o que consiste em calcular o histograma dos tons de cinza da imagem e a partir dele determinar-se um valor limiar para o qual *pixels* da imagem que apresentarem um valor menor serão classificados como plano de fundo e os que possuírem um valor maior como objeto. Feitas a binarizações, são realizadas operações morfológicas na imagem, sendo estas três dilatações seguidas de três erosões, buscando assim eliminar regiões pequenas de uma classe (objeto ou plano de fundo) que estão isoladas na outra, denominadas partículas. Na dilatação o objeto é expandido, fazendo assim com que partículas pequenas de plano de fundo imersas no objeto sejam encobertas. Analogamente a erosão expande o plano de fundo eliminando partículas de objeto imersas no plano de fundo. Como o objeto é primeiramente expandido e depois contraído ele não muda sua área na imagem, não alterando, assim, significativamente a forma da onda. Na imagem segmentada, onde o objeto corresponde à fase de água, obter a onda interfacial entre a água e o óleo corresponde a localizar a borda de cima do objeto. Para isso foi utilizado o gradiente. Nesse método analisado para cada pixel na imagem o gradiente deste, assim, para *pixels* na fronteira de regiões o radiante será alto, pois há uma variação grande dos tons de cinza em um pequeno espaço. Logo, obtido o gradiente da imagem inteira, é realizada uma limiarização, onde aos *pixels* com gradiente baixo é atribuída à classe plano de fundo, enquanto que para *pixels* com intensidade alta é atribuída à classe objeto. Com isso, é obtida a onda presente na interface água-óleo. A onda obtida para a Fig. 3 pode ser vista na Fig. 4 juntamente com os picos e vales obtidos.

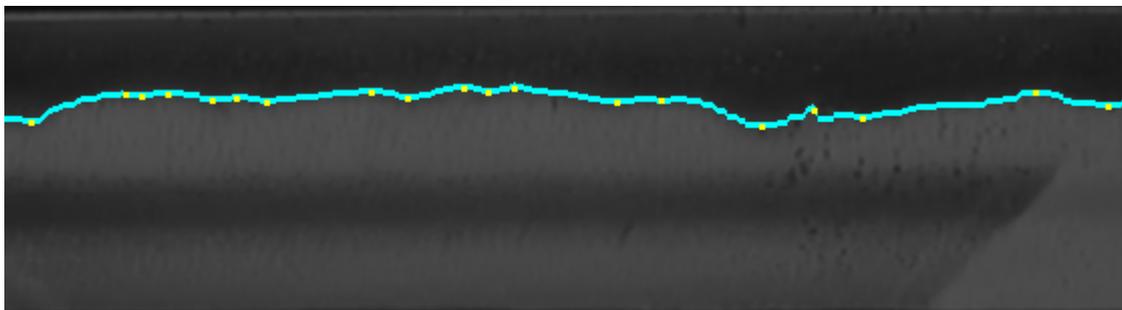


Figura 4. Onda obtida (azul) sobreposta à imagem original.

Para a identificação dos picos e vales da onda foi utilizado o critério da primeira e da segunda derivada. Assim, foi calculada a derivada espacial de cada ponto da onda através de uma discretização descentrada de primeira ordem, localizando os pontos onde há uma variação no sinal dessa derivada, o que corresponde a um extremo local. Da mesma maneira calculando-se a segunda derivada para os pontos de extremos locais é possível saber se esse ponto corresponde a um pico ou um vale. Após a localização dos picos e vales da onda, é feita uma filtragem baseada nos comprimentos de onda, visando eliminar ruídos no processamento da imagem que interferem na determinação do comprimento de onda.

2.2.3. Análise no domínio da frequência.

Verificou-se que na imagem existiam três tipos de ondas superpostas com comprimentos de ondas longos, intermediários e curtos. Devido ao tamanho da janela de visualização não há como medir as ondas longas. Com o intuito de separar as ondas intermediárias das curtas foi realizada uma análise no domínio da frequência através da transformada de Fourier. Utilizando o algoritmo da transformada rápida de Fourier (FFT) obtém-se o espectro de frequência da onda. Com isso é possível estabelecer dois valores de corte, um para as frequências baixas (ondas intermediárias) e outro para frequências médias (ondas curtas). As frequências altas correspondem a ruído e são eliminadas. A partir dos valores de corte, é possível separar o espectro em frequência em duas faixas, como anteriormente descrito, e considerando-se apenas essa faixa, fazer a transformada inversa, obtendo assim a onda apenas com a faixa de comprimentos de onda desejados. Um exemplo do resultado obtido pode ser visto nas Fig. 5, 6 e 7. A Fig. 5 mostra as ondas intermediárias obtidas para a onda mostrada na Fig. 4, a Fig. 6 mostra as ondas curtas e a Fig. 7 mostra a soma das duas ondas.

3. Modelagem da onda interfacial.

Apresenta-se uma primeira tentativa no desenvolvimento de uma equação, onde as amplitudes e comprimentos de onda interfacial estão em função das velocidades *in-situ* do óleo e da água, juntamente com o ângulo de inclinação. Quando há um aumento considerável das velocidades *in-situ*, em especial da velocidade relativa entre as fases, é normalmente visível o aparecimento de estruturas ondulatórias na interface do escoamento. As observações

experimentais sugerem instabilidades possivelmente do tipo Kelvin-Helmholtz, entretanto um termo viscoso é incluído para a modelagem da perda de carga. Quando as frações volumétricas do óleo e da água variam localmente e periodicamente, aparecem na interface do fluido estruturas ondulatórias mal definidas. Essas podem apresentar amplitudes que por ventura podem interromper o fluxo de uma das fases no duto. Esses comprimentos serão chamados de (λ) e suas amplitudes de (α) . O escoamento está sendo analisado unidimensionalmente, na direção x , ou seja, num plano cartesiano x representa as forças que atuam na direção axial; ambos os fluidos são incompressíveis.

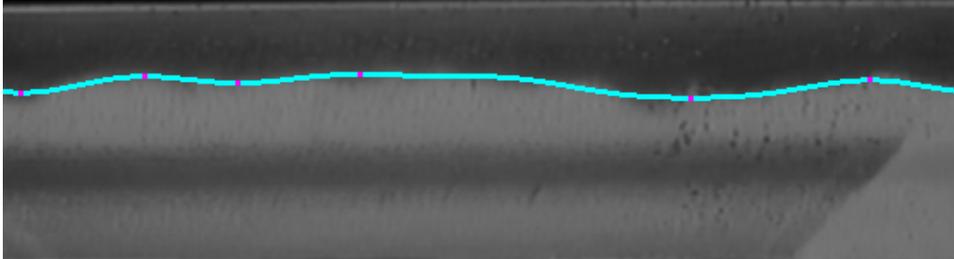


Figura 5. Onda intermediária sobreposta com a imagem original.

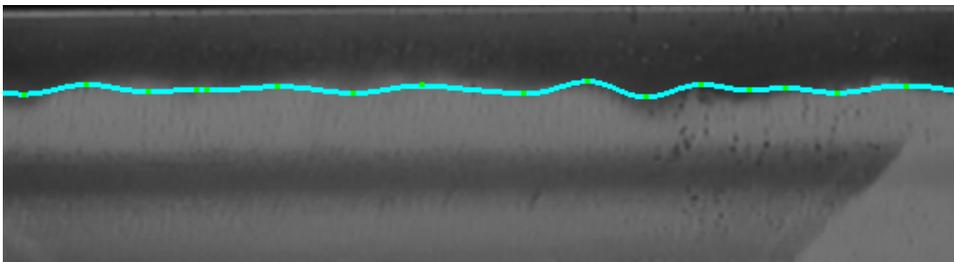


Figura 6. Ondas curtas sobrepostas com a imagem original.

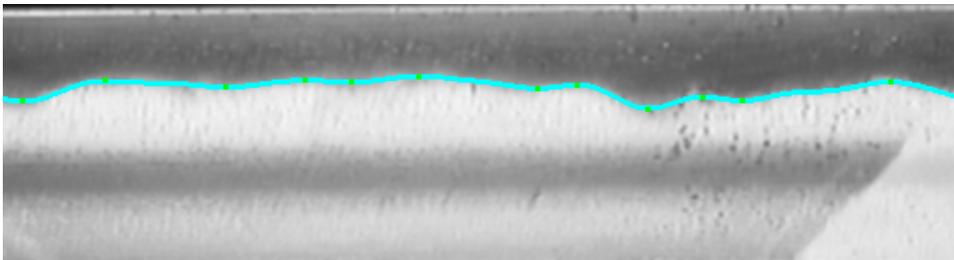


Figura 7. A soma das duas ondas obtidas sobreposta com a imagem original.

Nossos objetivos estarão focados na construção de uma função, onde dada a inclinação, as vazões das fases e a fração volumétrica *in situ*, ou as velocidades *in situ*, teremos como calcular as amplitudes médias e os comprimentos de onda interfaciais desse escoamento, lembrando que em um escoamento dado temos mais de um tipo de comprimento de onda interfacial. A Figura 8 representa os parâmetros geométricos médios e volume de controle adotado:

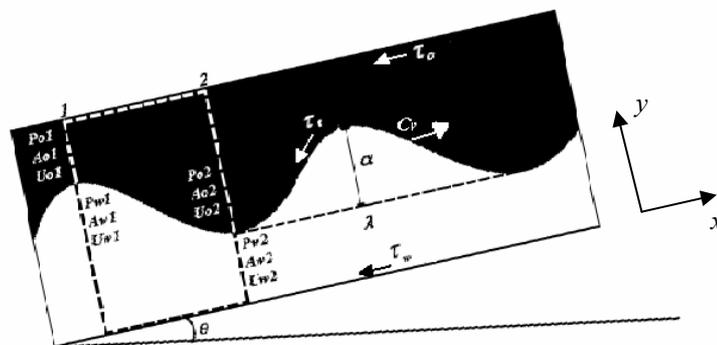


Figura 8. Representação do escoamento levemente inclinado.

Da Equação da Continuidade temos:

$$U_w \cdot A_w = U_{w1} \cdot A_{w1} = U_{w2} \cdot A_{w2} \quad , \quad U_o \cdot A_o = U_{o1} \cdot A_{o1} = U_{o2} \cdot A_{o2} \quad (1)$$

$$U_w = U_{w1} \cdot \frac{A_{w1}}{A_w} \quad , \quad U_w = U_{w2} \cdot \frac{A_{w2}}{A_w} \quad (2)$$

$$U_o = U_{o1} \cdot \frac{A_{o1}}{A_o} \quad , \quad U_o = U_{o2} \cdot \frac{A_{o2}}{A_o} \quad (3)$$

onde:

$$A_{o1} = A_o - A_{onda} \quad , \quad A_{o2} = A_o + A_{onda} \quad (4)$$

$$A_{w1} = A_w + A_{onda} \quad , \quad A_{w2} = A_w - A_{onda} \quad (5)$$

A equação de onda senoidal está escrita em função dos termos de (α) e (λ) , as velocidades U_x estarão sendo analisadas sempre na direção axial x . Os termos ondulatórios são inseridos através da seguinte equação, supondo uma estrutura senoidal por simplicidade:

$$y = \alpha \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (6)$$

Aplicamos a equação da energia acima e abaixo da interface óleo-água para a modelagem da diferença de pressão encontrada no óleo e na água; notemos que esta aplicação está sendo realizada entre picos e vales consecutivos, vide Fig. 8, temos, então, para o óleo e para a água, respectivamente:

$$\frac{P_o}{\rho_o} = -\frac{1}{2}(U_o)^2 - yg \cos(\theta) + f(h_o) \quad , \quad \frac{P_w}{\rho_w} = -\frac{1}{2}(U_w)^2 - yg \cos(\theta) + f(h_w) \quad (7)$$

Procuramos agora a diferença de pressão que existe entre o pico da onda e o vale, formado pela mesma, na parte onde contém apenas óleo, P_{o1} é a pressão no pico da onda e P_{o2} no Vale:

$$P_{o1} - P_{o2} = \frac{1}{2} \rho_o \left[(U_{o2} - C_v)^2 - (U_{o1} - C_v)^2 \right] - 2g \cos(\theta) \alpha \rho_o + f(h_o) \rho_o \quad (8)$$

O mesmo será feito com a parte inferior do duto, onde existe somente água, porém P_{w1} está abaixo do Pico e P_{w2} está situado abaixo do Vale.

$$P_{w1} - P_{w2} = \frac{1}{2} \rho_w \left[(U_{w2} - C_v)^2 - (U_{w1} - C_v)^2 \right] - 2g \cos(\theta) \alpha \rho_w + f(h_w) \rho_w \quad (9)$$

Note que para duas fases, os $f(h_o)$ e $f(h_w)$ foram mantidos sem variações, pois uma das variáveis que compõem a perda de carga, variação de energia por transferência de calor $\left(-\frac{\delta q_e}{dm}\right)$, depende exclusivamente do caminho percorrido pela função e essa é calculada através de uma integral de linha, diferentemente dos outros termos que são variações que independem do caminho percorrido e podem ser obtidos simplesmente através de uma integral de Riemann. Utilizando a equação de Laplace-Young, para acoplamento das equações das fases, dada a condição de salto, temos no pico da onda:

$$P_{o1} - P_{w1} = -\sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (10)$$

E no vale é descrita dessa forma:

$$P_{o2} - P_{w2} = +\sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (11)$$

Onde R_1 e R_2 são os raios de curvatura médios principais; porém supõe-se que R_2 é muito grande e isso faz com que o seu inverso torne-se igual a zero.

$$\frac{1}{R_1} = \frac{\left| \frac{d^2 y}{dx^2} \right|}{\left(1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right)^{3/2}}, \quad \frac{1}{R_2} = 0 \quad (12)$$

K é a Curvatura, assim temos:

$$K = \frac{\left| -\frac{4\pi^2 \alpha}{\lambda^2} \cdot \text{sen} \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right) \right|}{\left(1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \cos \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right) \right)^2 \right)^{3/2}}, \quad (13)$$

Fazendo $x = \frac{\lambda}{4}$, obtemos K_{\max} :

$$K_{\max} = \frac{4\pi^2 \alpha}{\lambda^2}, \quad (14)$$

Subtraindo a equação (11) na equação (10), obtemos:

$$(P_{o1} - P_{o2}) - (P_{w1} - P_{w2}) = -\frac{2\sigma}{R_1}, \quad (15)$$

Agora se substituirmos as equações (8) e (9) na equação (15), obtemos:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{1}{2} \rho_o \left[(U_{o2} - C_v)^2 - (U_{o1} - C_v)^2 \right] - 2g \cos \theta \alpha \rho_o \right] - \left[\frac{1}{2} \rho_w \left[(U_{w2} - C_v)^2 - (U_{w1} - C_v)^2 \right] - 2g \cos \theta \alpha \rho_w \right] = \\ & = [g(h)] (\rho_o - \rho_w) - 2 \frac{\sigma}{R} \end{aligned} \quad (16)$$

Onde $g(h) = [f(h_w) + f(h_o)]$ corresponde à dissipação viscosa total, parietal e interfacial. Propomos sua modelagem da seguinte forma (maiores detalhes quanto à metodologia empregada para o tratamento dos fatores de atrito no Apêndice):

$$g(h) = \frac{\lambda}{4} \left[\frac{f_w U_w |U_w|}{D_{hw}} + \frac{f_o U_o |U_o|}{D_{ho}} + \frac{f_i (U_w - U_o)^2}{D_{hi}} \right] \quad (17)$$

Rearranjando a Eq. 16, temos:

$$g(h) = \frac{\left\{ \frac{1}{2} \rho_w [(U_{w2} - C_v)^2 - (U_{w1} - C_v)^2] + \frac{1}{2} \rho_o [(U_{o1} - C_v)^2 - (U_{o2} - C_v)^2] + 2g \cos \theta \alpha (\rho_w - \rho_o) - 2 \frac{\sigma}{R} \right\}}{(\rho_o - \rho_w)} \quad (18)$$

Substituindo as Eqs. (2) e (3) na Eq. (18) obtemos a Eq. (19), onde conhecendo-se as velocidades *in-situ* (ou vazões e fração volumétrica *in situ*), a inclinação, e a perda de carga obtemos uma relação entre comprimento de onda e amplitude.

$$\frac{\left\{ \frac{1}{2} \rho_w \left[\left(U_w \left(\frac{A_w}{A_{w2}} \right) - C_v \right)^2 - \left(U_w \left(\frac{A_w}{A_{w1}} \right) - C_v \right)^2 \right] + \frac{1}{2} \rho_o \left[\left(U_o \left(\frac{A_o}{A_{o1}} \right) - C_v \right)^2 - \left(U_o \left(\frac{A_o}{A_{o2}} \right) - C_v \right)^2 \right] \right\}}{(\rho_o - \rho_w)} + \frac{2g \cos(\theta) \alpha (\rho_w - \rho_o) - \frac{8\pi^2}{\lambda^2} \sigma}{(\rho_o - \rho_w)} = g(h) \quad (18)$$

O termo C_v é a velocidade da onda cinemática, podendo ser calculada através do Modelo de Dois Fluidos para escoamento estratificado (Wallis, 1969).

4. Resultados

Uma das características relevantes observada nos experimentos é a de que não existe somente uma espécie de onda em um único escoamento, o mesmo pode possuir ondas curtas, intermediárias e longas. As ondas curtas possuem comprimentos que vão de (D)/5 a (D), intermediárias de (D) a 4x(D) e as longas de 4x(D) a 10x(D), onde (D) é o diâmetro interno da tubulação.

A Tabela 1 apresenta os comprimentos de onda médios medidos através da técnica manual (λ_m) e automática (λ_a), para nove pares diferentes de vazões e quatro inclinações da horizontal (-5, -2, +2 e +5 graus), onde U_{os} e U_{ws} são as velocidades superficiais e U_o e U_w são as velocidades *in-situ* ou locais de óleo e água, respectivamente. C_w/ϵ_w é a razão de deslizamento (fração de injeção de água sobre fração volumétrica *in-situ* de água); um valor acima da unidade indica que água possui uma velocidade maior ou óleo acumula na tubulação e um valor menor do que a unidade indica que óleo possui uma velocidade maior ou água acumula na tubulação. Um valor igual à unidade indica que não há deslizamento entre as fases, i.e., as fases viajam à mesma velocidade *in situ*. A última coluna da Tab. 1 apresenta o erro apresentado pela técnica automática relativo à técnica manual.

Tabela 1. Resultados obtidos das diferentes técnicas de obtenção de comprimentos de onda.

Inclinação (graus)	Teste	U_{os} (m/s)	U_{ws} (m/s)	U_o (m/s)	U_w (m/s)	C_w/ϵ_w	λ_m (cm)	λ_a (cm)	Erro = $\frac{ \lambda_a - \lambda_m }{\lambda_m} 100$ (%)
+5	1	0,072	0,021	0,25	0,03	0,32	5,4	5,1	5,6
	2	0,072	0,098	0,27	0,13	0,79	4,9	4,5	8,1
	3	0,072	0,296	0,33	0,38	1,03	4,7	4,5	4,3
-5	4	0,021	0,041	0,02	0,46	7,35	4,0	4,2	5,0
	5	0,022	0,062	0,03	0,52	6,15	5,0	4,5	10,0
	6	0,072	0,099	0,08	0,66	3,87	6,6	5,3	19,7
+2	7	0,078	0,022	0,22	0,03	0,34	4,8	4,7	2,0
	8	0,074	0,098	0,26	0,14	0,79	6,7	5,7	14,9
-2	9	0,022	0,202	0,04	0,45	2,0	7,9	--	--

A influência do deslizamento no comprimento de onda pode ser verificada na Tab. 1. Segundo a teoria inviscida de Kelvin-Helmholtz (Drazin e Reid, 1981), instabilidades ocorrem quando há uma velocidade relativa alta entre as fases,

i.e., uma razão de deslizamento alta. Essas instabilidades podem ser detectadas pelo surgimento de ondas interfaciais de alta amplitude e curto comprimento de onda. Para escoamento ascendente (+2 graus) (testes 7 e 8), com o distanciamento da razão de deslizamento (C_w/ε_w) da unidade (de 0,79 para 0,34) percebemos uma queda significativa do comprimento de onda médio (de 6,7 cm para 4,8 cm), o que denota um aumento da instabilidade com o aumento do deslizamento interfacial, como esperado. Para escoamento descendente (-5 graus) (testes 4, 5 e 6), notamos novamente uma diminuição significativa do comprimento de onda (de 6,6 cm para 4 cm) com o distanciamento da razão de deslizamento da unidade (de 3,87 para 7,35). Para o escoamento ascendente (+5 graus) não percebemos variação significativa no comprimento de onda entre os testes 2 e 3. Tal resultado não é surpreendente, pois ambos os casos possuem razão de deslizamento próxima da unidade. Entretanto, o teste 1 apresenta um resultado aparentemente contraditório: com o distanciamento da razão de deslizamento da unidade (de 0,79 para 0,32) percebemos um aumento do comprimento de onda (de 4,9 para 5,4). Entretanto, no caso específico do teste 1, o escoamento bifásico se encontrava numa situação hidrodinâmica particular. Havia uma recirculação intensa de água próxima à interface, onde foram detectados vórtices de grande intensidade. Suspeitamos que efeitos viscosos foram significativos nessa região e assim sendo a análise do problema invíscido seria incompleta nesse caso.

Quanto à influência do ângulo de inclinação, de forma global percebemos da análise da Tab. 1 que há uma diminuição do comprimento de onda com o aumento do ângulo de inclinação, tanto para escoamento descendente, quanto ascendente. Essa tendência fica clara quando comparamos, por exemplo, os testes 8 e 2 (de 6,7 cm para 4,9 cm). Esse resultado está de acordo com o esperado. Tenhamos em mente que a diferença de densidades das fases é significativa, portanto com o aumento da inclinação esperamos, obviamente, um aumento do deslizamento.

Analisando a Tab. 1 notamos que o erro global entre a técnica manual e a automática é da ordem de 10 %. Porém, notamos que existem dois valores bem acima da média (testes 6 e 8). Nesses testes a interface possuía uma dispersão significativa de água em óleo e/ou óleo em água. Nesses casos a técnica automática apresentou limitações, pois o software não conseguia definir corretamente onde estava situada a interface, ou seja, a identificação da estrutura ondulatória ficou comprometida. Notem que para a inclinação (-2) apresentamos somente comprimento de onda (λ_m), pois a interface possuía muita dispersão. Por outro lado, excluindo os testes 6 e 8, o erro global é da ordem de 5%, o que consideramos suficiente para a validação da técnica automática proposta para a análise de estruturas ondulatórias em escoamento estratificado ondulado óleo-água.

Nesta pesquisa, que ainda está em desenvolvimento, ainda não foi possível comparar o modelo matemático proposto com os dados. Pretendemos comparar os resultados futuramente.

5. Conclusões.

São apresentadas duas técnicas experimentais para a coleta de comprimentos de onda de estruturas ondulatórias interfaciais em escoamento bifásico água-óleo em tubulação inclinada. Um método manual de aquisição é utilizado para a determinação dos comprimentos de onda da forma mais acurada possível. A limitação do método manual é o tempo de aquisição, tratamento e análise requerido. É proposto um método de captura e processamento automático das imagens, sendo responsável pela identificação das ondas interfaciais e fornecimento das propriedades geométricas desejadas. O método automático mostrou-se eficaz, sendo que o erro relativo global na obtenção do comprimento de onda foi da ordem de 5% para escoamento estratificado ondulado sem dispersão na interface, o que foi considerado suficiente para a validação da técnica automática.

Uma primeira tentativa de modelagem matemática é apresentada no intuito de compreender melhor a física por trás das ondas formadas na interface de um escoamento óleo-água estratificado. Uma expressão baseada na equação da energia bifásica unidimensional em regime permanente é proposta para o cálculo das amplitudes e comprimentos de onda em função das velocidades *in-situ* do óleo e da água, do ângulo de inclinação e da perda de carga. Entretanto, ainda não foi possível, nesta primeira etapa, comparar os dados experimentais com as previsões do modelo.

São oferecidos dados inéditos de comprimento de onda interfacial em escoamento óleo-água estratificado em tubulação de aço de 8,28 cm d.i. (D) para quatro inclinações da horizontal (-5, -2, +2 e +5 graus). Da análise dos dados, percebemos que o comprimento de onda médio variou entre (D) e (D/2). Além disso, o comprimento de onda diminui com o aumento do deslizamento interfacial e com o aumento do ângulo de inclinação da horizontal, seja descendente ou ascendente.

6. Agradecimentos.

Os autores agradecem à Shell International Exploration and Production B.V., Rijswijk, Holanda, pelo financiamento do trabalho experimental e à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de São Paulo), Proc. 04/13374-7, pelo suporte financeiro dado ao projeto em curso na Universidade de São Paulo em São Carlos (EESC-USP).

7. Referencias.

- Al-Wahaibi, T., Angeli, P., 2005., Predictive model for critical wave amplitude at the onset of entrainment in oil-water flow, 12th International Conference on Multiphase Production Technology, Barcelona, Espanha, 25-27 maio.
- Bannwart, A.C., Rodriguez, O.M.H., de Carvalho, C.H.M., Wang, I.S., Obregon Vara, R.M., 2004. Flow patterns in heavy crude oil-water flow. Journal of Energy Resources Technology-Transactions of the ASME 126, 184-189.
- Brauner, N., Maron, D.M., 1994., Stability of 2-phase stratified flow as controlled by laminar turbulent transition, International communications in heat and mass transfer. Vol. 21, pp. 25-74.
- Drazin, P.G., Reid, W.H., 1981. Hydrodynamic Stability. Cambridge University Press, Cambridge.
- Haheim, S.A., 2001. Oil-water slip in inclined pipes and application to downhole separation. Proc. 10th Int. Conf. Multiphase, Cannes, France.
- Li G.J., Guo L., Chen X.J., 1997., An Experimental investigation on the interfacial waves in air-water two-phase flow within horizontal pipelines., Chinese journal Chem. Eng. Vol. 5(4), pp 316-324.
- Lopes Roma, W. N., 2003, Fenômenos de transporte para engenharia.
- Rodriguez, O.M.H., Oliemans, R.V.A., 2006., Experimental study on oil-water flow in horizontal and slightly inclined pipes., International Journal of multiphase flow. Vol. 32, 323-343.
- Trallero J. L., 1995, Oil-water flow patterns in horizontal pipes, Ph.D. thesis, The University of Tulsa, Tulsa, Oklahoma.
- Ullmann, A., Zamir, M., Ludmer, Z., Brauner, N., 2003. Stratified laminar countercurrent flow of two liquid phases in inclined tubes. International journal of multiphase flow. Vol. 29, pp. 1583-1604.
- Wallis, G.B., 1969. One dimension Two-Phase Flow. McGraw-Hill, New York

Nomenclatura.

- A_o Seção transversal da área onde do óleo está, acima da interface ondulada.
- A_{o1} Seção transversal da área do óleo acima da interface e acima do pico de onda.
- A_{o2} Seção transversal da área do óleo acima da interface e dentro do vale formado pela onda.
- A_w Seção transversal da área da água abaixo da interface.
- A_{w1} Seção transversal da área da água abaixo da interface e abaixo do pico de onda.
- A_{w2} Seção transversal da área da água abaixo da interface e abaixo do vale formado pela onda.
- A_{onda} Seção transversal da área formada pelo pico e vale da onda.
- C_v Velocidade da onda formada na interface do fluido.
- D Diâmetro.
- D_{hw} Diâmetro hidráulico da água.
- D_{ho} Diâmetro hidráulico do óleo.
- D_{hi} Diâmetro hidráulico da interface.
- f_w Fator de atrito da água.
- f_o Fator de atrito do óleo.
- f_i Fator de atrito na interface do fluido.
- $f(h_o)$ Perda de carga acima da interface.
- $f(h_{o1})$ Perda de carga acima da interface, acima do pico de onda.
- $f(h_{o2})$ Perda de carga acima da interface, dentro do vale formado pela onda.
- $f(h_w)$ Perda de carga abaixo da interface
- $f(h_{w1})$ Perda de carga abaixo da interface, abaixo do pico de onda..
- $f(h_{w2})$ Perda de carga abaixo da interface, abaixo do vale de onda..
- g Aceleração das forças gravitacionais.
- K Curvatura.
- U_{sw} Velocidade superficial da água.
- U_{so} Velocidade superficial do óleo.
- U_w Velocidade *in-situ* da água.
- U_{w1} Velocidade *in-situ* da água e abaixo do pico de onda.
- U_{w2} Velocidade *in-situ* da água e abaixo do vale formado pela onda.
- U_o Velocidade *in-situ* do óleo.
- U_{o1} Velocidade *in-situ* do óleo e acima do pico formado pela onda.
- U_{o2} Velocidade *in-situ* do óleo e formado dentro do vale formado pela onda.
- P Pressão acima da interface ondulada.
- P_{o1} Pressão acima da interface ondulada e acima do pico de onda.
- P_{o2} Pressão acima da interface ondulada e dentro do vale formado pela onda.
- P_{w1} Pressão abaixo da interface ondulada e abaixo do pico de onda.
- P_{w2} Pressão abaixo da interface ondulada e abaixo do vale formado pela onda.
- K Curvatura.
- R Raio de curvatura.
- R_1 Raio de curvatura na direção do fluxo do escoamento.

- R₂ Raio de curvatura na direção ortogonal ao fluxo do escoamento.
- Re Número de Reynolds.
- S_w Perímetro molhado pela água.
- S_o Perímetro molhado pelo óleo.
- S_i Perímetro molhado pela interface.

Simbologia grega.

- α Amplitude da onda.
- ε Rugosidade.
- ρ_o Densidade do óleo.
- ρ_w Densidade da água.
- λ Comprimento de onda.
- σ Tensão interfacial óleo-água.

Subscritos.

- o Fase do óleo.
- w Fase da água.
- x Indicador de fase.

Apêndice.

Temos na Eq. (17) os fatores de atrito (*f*). Aplicamos a correlação de Churchill (Lopes Roma, 2003), válida para toda gama de números de Reynolds (Re), inclusive a região de transição.

$$g(h) = \frac{\lambda}{4} \left[\frac{f_w U_w |U_w|}{D_{hw}} + \frac{f_o U_o |U_o|}{D_{ho}} + \frac{f_i (U_w - U_o)^2}{D_{hi}} \right]$$

onde:

$$f_x = 8 \left[\left(\frac{8}{Re_x} \right)^{12} + \frac{1}{(A + B)^{3/2}} \right]^{1/12} \tag{19}$$

e:

$$A = \left\{ 2,457 \ln \left[\frac{1}{\left[\left(\frac{7}{Re_x} \right)^{0,9} + 0,27 \left(\frac{\varepsilon}{D_{hx}} \right) \right]} \right] \right\}^{16} \tag{19.1}$$

$$B = \left[\frac{37530}{Re_x} \right]^{16} \tag{19.2}$$

e o número de Reynolds da fase é dado por:

$$Re_x = \rho_x D_{hx} U_x / \mu_x$$

sendo que o subscrito x denota a fase, água (w) ou óleo (o). Para $U_w > U_o$ temos que $f_i = f_w$ e:

$$D_{hw} = \frac{4A_w}{(S_w + S_i)} \quad \text{e} \quad D_{ho} = \frac{4A_o}{S_o}; \tag{20}$$

Para $U_w < U_o$ temos que $f_i = f_o$ e:

$$D_{hw} = \frac{4A_w}{S_w} \text{ e } D_{ho} = \frac{4A_o}{(S_w + S_i)}; \quad (21)$$

A Eq. 19 (correlação de Churchill) não tem restrições quanto ao regime de escoamento, funcionando bem para escoamentos laminares, turbulentos, inclusive na região de transição, e para diferentes rugosidades.