

INFLUÊNCIA DO ESCOAMENTO INTERNO NO MOVIMENTO DE OSCILAÇÃO DE UM RISER RÍGIDO EM CATENÁRIA

César C. P. Cavalcante¹ (Unicamp), Sérgio N. Bordalo² (Unicamp), Celso K. Morooka³ (Unicamp),
Cynthia G. C. Matt (Petrobrás), Ricardo Franciss (Petrobrás).

¹ cesar@dep.fem.unicamp.br

² bordalo@dep.fem.unicamp.br

³ morooka@dep.fem.unicamp.br

A elevação dos preços do petróleo aliada ao esgotamento das reservas terrestres tornaram atraentes a exploração e a produção de reservatórios de petrolíferos em águas profundas e ultraprofundas. Vários estudos são necessários para desenvolver métodos e equipamentos apropriados para essas condições de operação. Dentre esses equipamentos, destacam-se os risers. Risers são dutos suspensos utilizados para movimentar os fluidos petrolíferos produzidos entre o fundo do mar e a plataforma. A flexibilidade estrutural das linhas de risers deve-se ao seu comprimento quando comparado com o seu diâmetro, caracterizando-as como estruturas esbeltas. Os risers estão submetidos a grandes esforços estáticos e dinâmicos provenientes do seu peso, das ondas, correntezas, da movimentação da plataforma e do escoamento em seu interior. Esses esforços ameaçam, por fadiga, a integridade estrutural do sistema, comprometendo a sua vida útil, e devem ser considerados no projeto dos risers. A literatura apresenta pesquisas abordando os efeitos do carregamento externo sobre esses sistemas, entretanto, o efeito do escoamento interno ainda foi pouco estudado. A variação da quantidade de movimento do escoamento dos fluidos petrolíferos no interior do riser impõe um carregamento dinâmico sobre esse sistema, originando um movimento oscilatório. Além disso, o escoamento bifásico gás-líquido pode assumir diferentes padrões de escoamento (bolhas, golfadas, intermitente e anular), cada qual com características distintas. Neste trabalho aborda-se a influência do escoamento interno no movimento de oscilação (chicoteamento) de risers delgados em catenária. Visando o entendimento desse fenômeno físico, foi proposta a montagem de um aparato experimental em escala reduzida. O material selecionado para confecção do modelo de riser foi um duto flexível de silicone, e os fluidos utilizados para gerar o escoamento bifásico foram ar e água. A instrumentação para a medição das vazões dos fluidos e da força de sustentação de topo foi instalada no aparato. Um sistema de filmagem e acelerômetros foram utilizados na determinação do deslocamento, aceleração e do espectro de frequências de pontos-alvo localizados ao longo do modelo para as diversas condições de escoamento. Os padrões de escoamento foram caracterizados através de observação. Os resultados obtidos indicam a existência de uma relação entre os padrões de escoamento, as vazões de cada fase e a intensidade das oscilações observadas.

Escoamento Bifásico, Escoamento Interno, Riser em Catenária, Riser Rígido, Movimento Oscilatório.

1. INTRODUÇÃO

A indústria do petróleo vem sofrendo mudanças significativas nas últimas décadas. O aumento da demanda por hidrocarbonetos e as sucessivas crises de abastecimento relacionadas a conflitos geopolíticos nas regiões de maior produção têm contribuído para elevação do preço internacional do petróleo. Por outro lado, verifica-se a cada ano uma tendência de declínio do número de reservas *onshore* descobertas. Neste cenário, a busca por reservatórios de petróleo localizados em águas profundas e ultraprofundas tem se tornado economicamente atrativa. Entretanto, diversos desafios tecnológicos devem ser superados de forma a viabilizar a produção nessas condições de operação.

Dentre os diversos equipamentos utilizados na produção de petróleo em águas profundas, os risers merecem especial destaque. Os *riser* são dutos suspensos utilizados para a movimentação dos fluidos petrolíferos produzidos entre o fundo do mar e a plataforma. Eles são essenciais para a produção de petróleo *offshore*, já que sua operabilidade está diretamente relacionada ao retorno econômico do campo. Os *risers* podem ser classificados como rígidos ou flexíveis, de acordo com sua concepção estrutural, e assumir diferentes configurações.

Durante a operação, os *risers* estão constantemente submetidos a diversos tipos de carregamentos dinâmicos (Figura 1). A ação das correntezas, dos ventos, das ondas, da movimentação da plataforma e do escoamento dos fluidos em seu interior origina um movimento oscilatório tridimensional que pode ocasionar a falha do equipamento por fadiga. Dessa forma, uma correta avaliação da contribuição de cada um dos fenômenos citados é essencial para o dimensionamento de *risers*.

Neste trabalho procurou-se avaliar a influência do escoamento interno no movimento de oscilação de um *riser* rígido em catenária, diferenciando-o dos demais fenômenos dinâmicos. Diversas pesquisas podem ser encontradas na literatura abordando o efeito do carregamento externo sobre o comportamento dinâmico de *risers* em catenária, entretanto, o fenômeno do escoamento interno ainda foi pouco estudado.

A variação da quantidade de movimento dos fluidos transportados no interior do *riser* impõe um carregamento dinâmico sobre esse sistema, originando um movimento de chicoteamento. Por outro lado, o escoamento bifásico gás-líquido pode assumir diferentes padrões de escoamento (bolhas, golfadas, intermitente e anular) ao longo da linha, cada qual com características distintas.

Este trabalho apresenta uma análise inicial do fenômeno mencionado. Com este propósito, um aparato experimental em escala reduzida foi montado para simular o escoamento bifásico de óleo e gás ao longo de uma linha de *riser* em catenária. A instrumentação utilizada consistiu de medidores de vazão para os fluidos de trabalho (ar e água), um dinamômetro para medição da força de sustentação no topo do modelo de *riser*, um sistema de filmagem para obtenção dos deslocamentos e acelerômetros para medição das acelerações. Os padrões de escoamento foram classificados através de observação durante os ensaios. Os dados obtidos foram condicionados e armazenados com o auxílio de um sistema de aquisição de dados para posterior processamento.

Durante os ensaios foram simuladas diversas condições de escoamento correspondentes às obtidas em campo para avaliação da resposta dinâmica do modelo de *riser*. Os resultados obtidos demonstraram haver um forte relacionamento entre o padrão de escoamento e a intensidade do movimento de oscilação. Também foi possível verificar que o escoamento interno desempenha um papel importante no comportamento dinâmico de *risers* em catenária.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Caracterização dos Padrões de Escoamento Bifásicos

O escoamento simultâneo de dois fluidos com propriedades físicas distintas pode ser encontrado em diversas aplicações industriais. O fluxo de gás e óleo no interior das linhas de produção de petróleo, por exemplo, pode ser caracterizado como um escoamento bifásico. Nestas condições, diversas configurações entre as fases presentes, denominadas de padrões de escoamento, podem ser observadas.

Muitas pesquisas têm sido realizadas com o objetivo de prever os padrões de escoamento existente sob diversas condições de fluxo. A importância desse estudo deve-se ao fato de que os regimes de escoamento estão diretamente relacionados com as propriedades do escoamento e os esforços resultantes sobre os dutos de transporte.

Taitel et al (1980) desenvolveram um modelo mecanicista para a previsão dos padrões de escoamento bifásicos em tubos verticais. Os padrões de escoamento foram classificados como bolhas, golfadas, intermitente e anular (Figura 2). Eles mostraram que eram necessários apenas dois grupos adimensionais para descrever a transição entre dois regimes quaisquer. Baseados nestes parâmetros, eles desenvolveram um mapa de fluxo para identificação dos regimes de escoamento. Os resultados obtidos a partir do modelo foram confrontados com dados experimentais para validação.

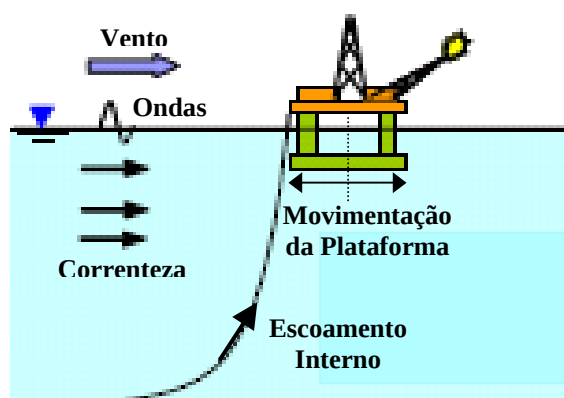


Figura 1. Carregamentos Dinâmicos sobre Risers.

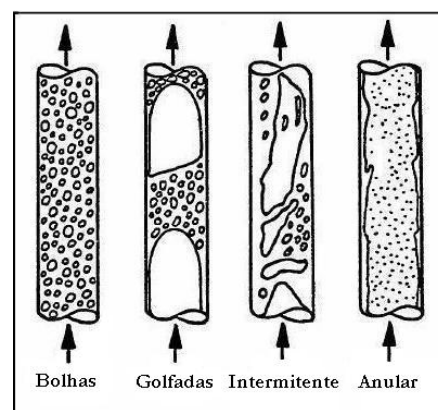


Figura 2. Padrões de Escoamento Vertical
Segundo Taitel e Dukler.

Beggs & Brill (1973) desenvolveram uma correlação empírica para o cálculo do gradiente de pressão em dutos rígidos posicionados em qualquer inclinação. Neste trabalho eles mostraram que o *holdup* de líquido (conteúdo de líquido em uma seção do tubo expresso como uma fração volumétrica da seção) e os padrões de

escoamento eram funções do ângulo de inclinação do duto. Portanto, os padrões observados em escoamento inclinados poderiam ser ligeiramente diferentes dos visualizados em fluxos verticais.

Silva (2006) estudou o movimento oscilatório de *risers* delgados verticais. Ele construiu um aparato experimental para simular o escoamento bifásico vertical ascendente através de um *riser* flexível submetido a diversas condições de carregamentos externos. Ele verificou que, para frequências de oscilações do *riser* menores que 1Hz, não houve variação do regime de escoamento bifásico observado, apesar de terem sido observadas alterações na perda de carga ao longo da linha.

2.2 Efeito do Escoamento Interno em Risers

A resposta dinâmica de *risers* quando submetidos a esforços ambientais é um fenômeno bastante pesquisado e, portanto, diversos modelos para dimensionamento destes carregamentos estão disponíveis na literatura. Entretanto, a influência do escoamento no interior destas estruturas é um assunto ainda pouco explorado e que vem recebendo maior atenção apenas nos últimos anos.

Um modelo numérico para simulação do comportamento dinâmico tridimensional de *risers* foi desenvolvido por Raman-Nair e Baddour (2003). Neste trabalho, além dos carregamentos externos, o efeito do fluxo interno sobre a estrutura foi levado em consideração.

Patel e Seyed (1989) realizaram um trabalho teórico-experimental no qual analisaram o efeito do fluxo interno na dinâmica de *risers* flexíveis de produção. Eles modificaram as equações governantes do movimento bidimensional de *risers* flexíveis para levar em conta grandes ângulos de inclinação em relação à vertical. As equações obtidas foram utilizadas para fornecer soluções numéricas para o deslocamento de pontos ao longo da linha de *riser*. Os resultados foram comparados com dados experimentais e mostraram boa concordância.

Apesar do efeito da variação da quantidade de movimento do fluxo interno ter sido considerado em ambos os trabalhos mencionados, nenhuma análise relacionando os padrões de escoamento e a intensidade dos deslocamentos dos *risers* foi realizada.

3. METODOLOGIA

3.1 Redução de Escala

As dimensões do protótipo de *riser* em catenária utilizado como referência para esta pesquisa são mostradas na Figura 3. O equipamento encontra-se locado a uma lâmina d'água de 900 metros de profundidade. O comprimento total da linha de *riser* é de aproximadamente 2066 m.

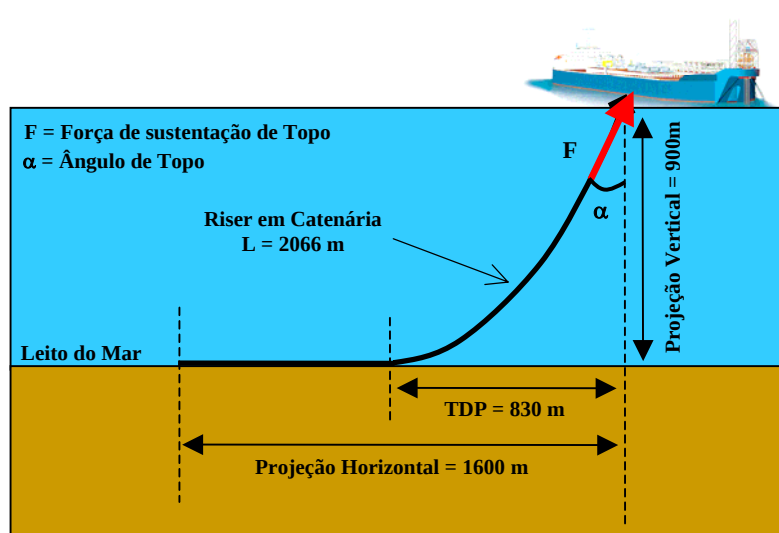


Figura 3. Propriedades Geométricas do Protótipo de Riser.

Devido às grandes dimensões envolvidas e o alto custo de fabricação, a utilização do protótipo para a análise do fenômeno em questão seria inviável. Dessa forma, optou-se pela construção de um modelo experimental em escala reduzida.

O processo de redução de escala foi realizado através do teorema dos Pi's de Buckingham (Fox & McDonald, 1998). Esse método visa fornecer parâmetros adimensionais governantes do fenômeno estudado a partir da seleção de variáveis descritivas do mesmo. Dessa maneira, a completa reprodutibilidade do fenômeno pode ser assegurada correlacionando os parâmetros obtidos no modelo e no protótipo por meio de um fator de redução de escala λ (ou múltiplos deste).

Na prática, porém, é bastante difícil a obtenção de uma semelhança perfeita devido à complexidade dos fenômenos envolvidos. Dessa maneira, uma possível alternativa consiste em trabalhar apenas com os parâmetros adimensionais mais relevantes, descartando os demais. Assim, uma semelhança incompleta pode ser obtida. Apesar dessa metodologia impossibilitar o relacionamento imediato dos resultados experimentais com os dados de campo, ela permite importantes inferências a respeito do fenômeno físico analisado e fornece dados para validação de modelos numéricos.

A correlação dos parâmetros geométricos no modelo e no protótipo é feita através da seguinte expressão:

$$L_{\text{modelo}} = \frac{L_{\text{protótipo}}}{\lambda} \quad (1)$$

onde L_{modelo} e $L_{\text{protótipo}}$ representam dimensões equivalentes no modelo e no protótipo, respectivamente. Os parâmetros inerciais estão correlacionados através do quadrado do fator de redução de escala por

$$m_{\text{modelo}} = \frac{m_{\text{protótipo}}}{\lambda^2} \quad (2)$$

onde m é a massa linear do duto. Por fim, considerando as elasticidades estruturais,

$$EI_{\text{modelo}} = \frac{EI_{\text{protótipo}}}{\lambda^5} \quad (3)$$

sendo o módulo de rigidez à flexão, EI , dado pelo Módulo de Young, E , e pelo momento de inércia I .

A determinação do fator λ foi baseada nas limitações físicas das instalações disponíveis para a montagem do modelo de riser. A altura máxima do laboratório é de 12,5 m. Logo, como a projeção vertical do protótipo possui 900 m, então um fator de redução de escala $\lambda = 72$ foi utilizado. A Tabela 1 apresenta as principais propriedades do protótipo e os correspondentes valores calculados para o modelo de riser.

Tabela 1. Propriedades do Protótipo e do Modelo de Riser

Propriedades	Protótipo	Modelo
Comprimento Total	2066 m	28,70 m
Comprimento Horizontal	1600 m	22,22 m
Comprimento Vertical	900 m	12,50 m
Touch Down Point - TDP	830 m	11,50 m
Diâmetro Interno - DI	230 mm	3,2 mm
Diâmetro Externo - DE	270 mm	3,7 mm
Massa Linear - m	128,5 Kg/m	0.024 Kg/m
Módulo de Rigidez à Flexão - EI	$27,3 \times 10^6 \text{ Nm}^2$	$14,1 \times 10^{-3} \text{ Nm}^2$
Módulo de Rigidez Axial - EA	$3,4 \times 10^9 \text{ N}$	$9,11 \times 10^3 \text{ N}$

Como pode ser verificado na tabela, o diâmetro calculado para o modelo de riser deveria ser muito pequeno, inviabilizando condições realísticas de fluxo. Dessa forma, optou-se por realizar a escolha do diâmetro a partir da manutenção da similaridade dos escoamentos no protótipo e no modelo. Os valores de m , EI e EA foram guiados pelos valores encontrados na tabela.

3.2 Similaridade do Escoamento

As vazões de ar e água utilizadas para simular o fluxo bifásico ao longo do modelo de riser foram determinadas a partir de vazões obtidas em campo, por meio da equivalência dos números de Froude (Fr) no protótipo e no modelo. Este procedimento buscou assegurar a similaridade dos escoamentos. O número de Froude é definido da seguinte maneira:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad (4)$$

onde V_m é a velocidade superficial da mistura bifásica, g é a aceleração da gravidade e D é o diâmetro interno da tubulação.

Uma vez que o modelo de riser possui uma longa seção horizontal apoiada no solo, e outra, suspensa, em forma de catenária, diferentes padrões de escoamento são observados ao longo de seu comprimento. Dessa forma, foram necessárias duas correlações para a determinação dos regimes de fluxo.

A correlação de Beggs & Brill (1986) foi aplicada ao trecho horizontal. Segundo essa correlação, três regimes distintos podem ser observados: distribuído (bolha ou névoa), intermitente (golfada ou plugue) ou segregado (estratificado, ondulado ou anular) dependendo das vazões de cada fase escoando.

A correlação de Taitel & Dukler para escoamento em dutos verticais, foi utilizada para previsão dos padrões de escoamento no segmento em catenária. De acordo com esta correlação, as velocidades superficiais das fases são os parâmetros determinantes dos padrões de escoamento. A velocidade superficial é definida como a vazão de cada fase (Q_{fase}) dividida pela área total da seção do duto (A_{duto}),

$$V_{\text{sf}} = \frac{Q_{\text{fase}}}{A_{\text{duto}}} \quad (5)$$

Ao longo deste trabalho, V_{sl} e V_{sg} referem-se às velocidades superficiais das fases líquida e gasosa, respectivamente. Uma vez que não foram encontradas na literatura referências a respeito de correlações para previsão dos regimes de escoamento no interior de catenárias, a correlação de Taitel & Dukler foi utilizada como mera aproximação para os regimes esperados.

4. DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

As instalações do LabPetro, localizado na Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, foram utilizadas para a montagem do aparato experimental. A Figura 4 apresenta as dimensões do laboratório. A área construída é de aproximadamente 350 m². No salão localizado na parte posterior do prédio estão dispostos dois mezaninos de forma que o pé-direito principal chega a 12,5 m de altura. Escadas dão acesso ao terraço, o qual também é habitável.

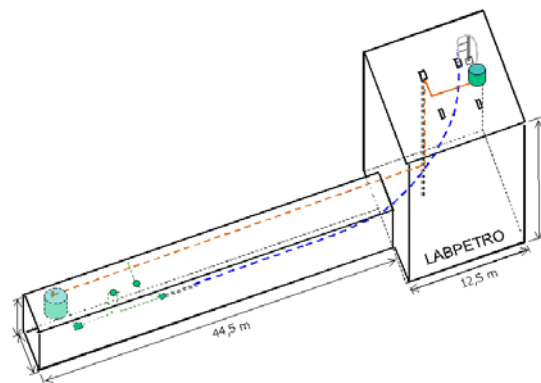


Figura 4. Dimensões do LabPetro

Conforme pode ser observado na Figura 5, um tanque de água com capacidade para 1000 L localizado no terraço do laboratório é utilizado para fornecer água ao sistema. A água escoar através de uma tubulação chegando até o ponto mais baixo do circuito (térreo do LabPetro), onde encontra-se posicionada uma bomba centrífuga. Ao passar pela bomba, o escoamento é pressurizado e prossegue pela tubulação até chegar ao sistema de medição de vazão.

Neste ponto estão localizados dois medidores de vazão de líquido, de forma a abranger toda a faixa de trabalho. Um medidor é utilizado para baixas vazões, na faixa de 0,8 à 8,0 L/min, enquanto o outro aplica-se a vazões maiores, entre 3,6 à 36,0 L/min. Válvulas de controle de fluxo são posicionadas de forma que o escoamento atravesse apenas um dos medidores. Posteriormente, o fluxo é encaminhado para a entrada do sistema de injeção.

Um compressor rotativo é responsável pelo abastecimento de ar comprimido, o qual é introduzido no sistema através de uma válvula de restrição de fluxo que se encontra acoplada a um manômetro. O fluxo de ar é mensurado em um medidor de vazão de gás com faixa nominal de 0 à 67 L/min. A seguir o escoamento de ar é direcionado para o injetor.

No interior do injetor os fluxos de ar e água são misturados, originando um escoamento bifásico. Uma janela de acrílico foi instalada na saída do injetor de forma a possibilitar a observação do escoamento. Após o sistema de injeção o fluxo bifásico adentra o modelo de riser.

A seleção do material para fabricação do modelo de *riser* foi baseada na necessidade de manter a relação de escala, de 1:72⁵, entre os módulos de rigidez à flexão do protótipo e do modelo. Vários materiais foram analisados e um tubo flexível de silicone foi escolhido. A Tabela 2 mostra as principais propriedades do modelo de *riser*.

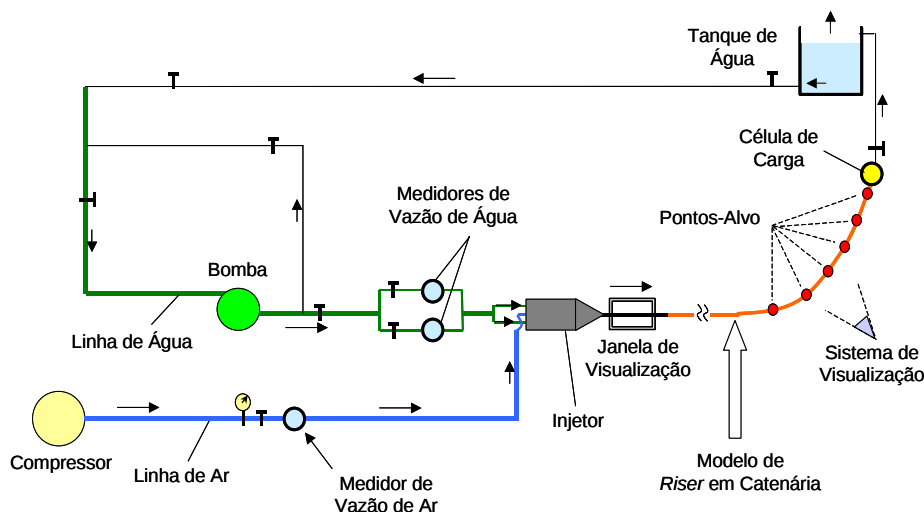


Figura 5. Esquema do Aparato Experimental

O escoamento através do modelo varia de inclinação desde a horizontal até a vertical. A montante do ponto de contato com o solo (touch down point) há uma longa seção horizontal apoiada no solo; a jusante, o riser eleva-se em forma de catenária até a estrutura de sustentação localizada no terraço do laboratório.

Cinco câmeras (Figura 6) focalizando pontos-alvo fixados ao longo do comprimento do modelo estão dispostas com a finalidade de capturar imagens que, depois de processadas, fornecem valores de frequência e amplitude das oscilações. Esse sistema de aquisição de imagens possui uma taxa máxima de amostragem de 30 fps (frames por segundo).

A medição da força de sustentação no topo do modelo de riser é feita através de uma célula de carga, a qual encontra-se fixada a uma gaiola de aço especialmente projetada para permitir variações do ângulo de topo. Após passar pela célula de carga, o escoamento bifásico sai do modelo de riser e retorna ao tanque de água por meio de uma tubulação. Neste ponto, o ar é liberado para a atmosfera e a água é recirculada pelo sistema.

Todos os sinais captados pelos instrumentos são transmitidos através de cabos para o sistema de aquisição de dados. Neste sistema os sinais recebidos são condicionados, tratados e armazenados em arquivos. Posteriormente os dados obtidos são processados e analisados.

Tabela 2. Propriedades do Modelo de Riser

Propriedades	Valores
Comprimento Total	28,70 m
Diâmetro Interno	19,05 mm
Diâmetro Externo	25,40 mm
Massa Linear	0,254 Kg/m
Módulo de Rigidez à Flexão - EI	$16,04 \times 10^{-3} \text{ Nm}^2$

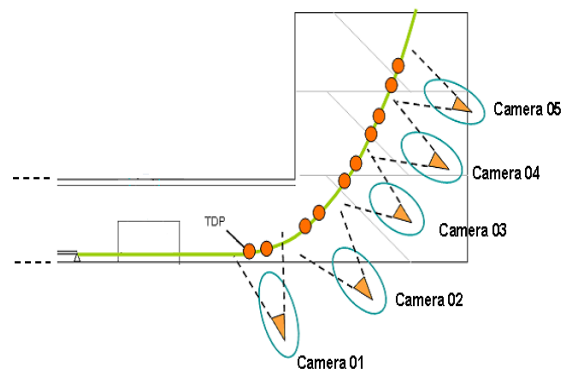


Figura 6. Sistema de Aquisição de Imagens.

5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A Figura 7 apresenta o mapa de Taitel & Dukler utilizado para previsão dos padrões de escoamento no escoamento vertical ascendente. O eixo horizontal representa os valores de velocidade superficial da fase gasosa, enquanto a velocidade superficial da fase líquida encontra-se no eixo vertical.

A faixa de vazões de interesse para esta pesquisa encontra-se delimitada pela área sombreada na figura. Pode-se observar que essa região abrange os padrões bolhas, golfadas e intermitente do mapa de Taitel & Dukler. Conforme mencionado anteriormente, os valores de vazões para o modelo foram obtidos por meio de uma análise de redução de escala a partir das vazões de gás e líquido do protótipo.

Dezesseis pares de vazões de ar e água, representados pelos círculos mostrados na figura, foram escolhidos para a realização dos ensaios experimentais de forma a mapear toda a região de trabalho. Os valores de vazões e as respectivas velocidades superficiais para os dezesseis casos são mostrados na Tabela 3. Os casos foram divididos em quatro grupos com base na vazão da fase líquida. Em cada grupo, a vazão da fase líquida é mantida constante enquanto a vazão da fase gasosa é aumentada.

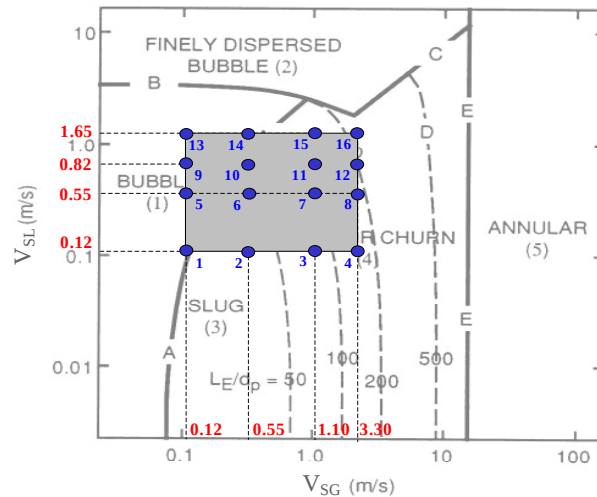


Figura 7. Mapa de Taitel & Dukler para Escoamento Vertical Ascendente.

Tabela 3. Valores de Vazões e Velocidades Superficiais.

Grupo	Caso	Fase Líquida		Fase Gasosa	
		Vazão (L/min)	Velocidade Superficial (m/s)	Vazão (L/min)	Velocidade Superficial (m/s)
1	1	2.05	0.12	2.05	0.12
	2	2.05	0.12	9.41	0.55
	3	2.05	0.12	18.81	1.10
	4	2.05	0.12	56.43	3.30
2	5	9.41	0.55	2.05	0.12
	6	9.41	0.55	9.41	0.55
	7	9.41	0.55	18.81	1.10
	8	9.41	0.55	56.43	3.30
3	9	14.02	0.82	2.05	0.12
	10	14.02	0.82	9.41	0.55
	11	14.02	0.82	18.81	1.10
	12	14.02	0.82	56.43	3.30
4	13	28.22	1.65	2.05	0.12
	14	28.22	1.65	9.41	0.55
	15	28.22	1.65	18.81	1.10
	16	28.22	1.65	56.43	3.30

O primeiro ciclo de testes experimentais consistiu de ensaios de caráter qualitativos. Nesses ensaios realizou-se uma classificação qualitativa do grau de oscilação do modelo de riser para cada um dos pontos estudados. Também foi determinada a banda de frequências dominantes do fenômeno. O objetivo desse estudo preliminar foi explorar a influência das diversas variáveis do sistema no comportamento dinâmico do modelo de *riser*.

Durante a etapa de ensaios quantitativos, os dezesseis casos de vazões foram simulados ao longo do modelo visando possibilitar a medição dos valores do deslocamento do riser, do espectro de frequência das oscilações e da força de sustentação no topo. Para cada uma das condições de escoamento, as vazões foram ajustadas e esperou-se que o sistema atingisse o estado de regime permanente. A aquisição das imagens do deslocamento dos diversos pontos ao longo do modelo foram realizadas simultaneamente a uma taxa de captura de 5 Hz durante um intervalo de tempo de 120 segundos. Durante o processamento das imagens, os cinco primeiros e os cinco últimos segundos da captura foram descartados. Os testes foram repetidos várias vezes e os resultados foram comparados. Os resultados obtidos são mostrados na próxima seção.

6. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para os deslocamentos (δ), os espectro de frequência das oscilações e os padrões de escoamento em cada uma das dezesseis condições de fluxo analisadas. Devido às limitações de espaço, a discussão a seguir estará focada apenas nos resultados obtidos para o grupo 3 (casos 09 à 12). Entretanto, as considerações a seguir podem ser estendidas aos demais conjuntos de casos estudados.

6.1 Deslocamentos e Padrões de Escoamento

Os gráficos do deslocamento do modelo de *riser* contra o tempo são apresentados na Figura 8. No eixo vertical são mostrados os valores das amplitudes das oscilações normalizadas pelo diâmetro externo do modelo de riser (δ/D). O eixo horizontal apresenta o intervalo de tempo, em segundos.

As amplitudes dos deslocamentos foram mensuradas com referência à posição estática de equilíbrio do modelo quando totalmente preenchido com água.

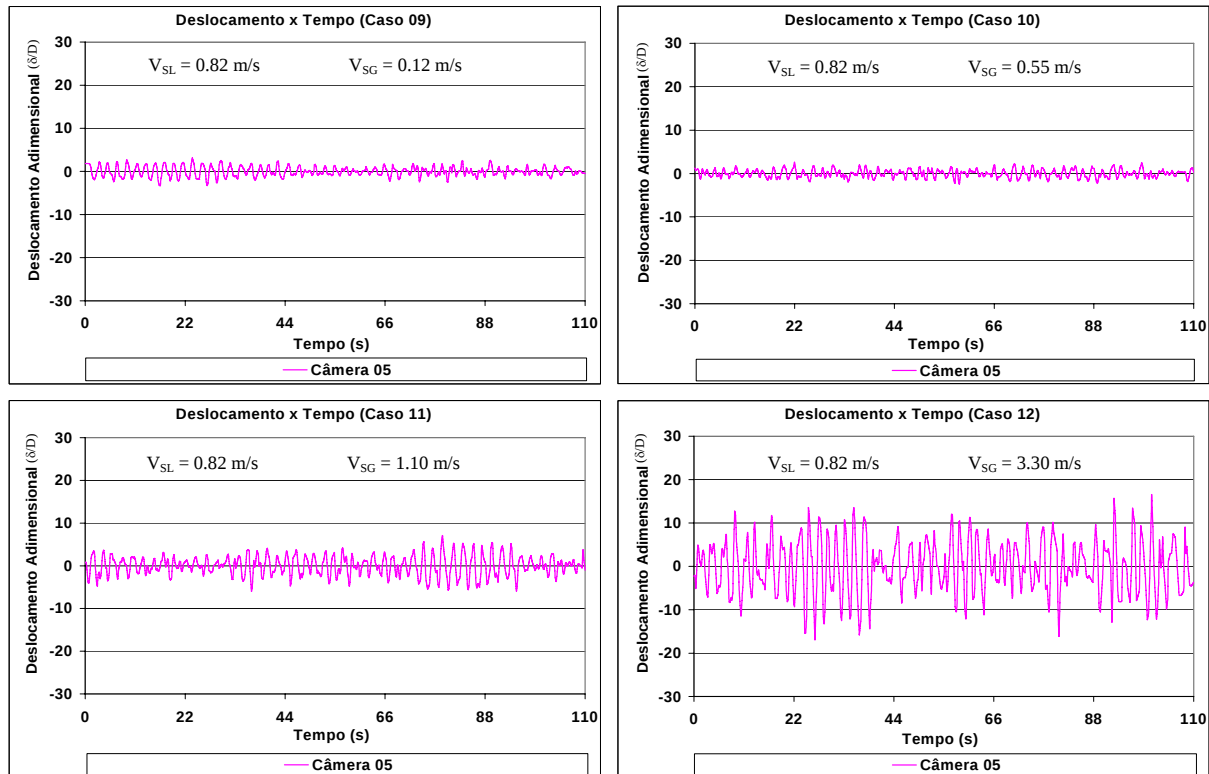


Figura 8. Gráficos de Deslocamento do Modelo de Riser.

Considerando que nos quatro casos mostrados a vazão da fase líquida é mantida constante enquanto a vazão da fase gasosa é aumentada, percebe-se que existe uma tendência de crescimento das amplitudes das oscilações do modelo de riser com o incremento da vazão de ar. Este comportamento pode ser explicado a partir da variação da quantidade de movimento do fluxo bifásico no interior do riser.

Tanto a massa quanto a velocidade da mistura bifásica estão variando, em módulo, em cada seção da linha de riser ao longo do tempo. Além disso, devido à configuração em forma de catenária, a velocidade do escoamento varia continuamente de direção. Dessa forma, essa intermitência na quantidade de movimento do escoamento resulta no aparecimento de uma excitação dinâmica sobre a parede do duto e, conseqüentemente, numa resposta oscilatória do mesmo.

A medida em que a vazão de ar (ou velocidade superficial do ar) é aumentada, ocorre também um aumento da magnitude das intermitências do fluxo e, portanto, maiores amplitudes das oscilações do modelo de riser devem ser observadas.

A Tabela 4 apresenta as faixas de valores de amplitudes dos deslocamentos adimensionais obtidos para cada uma das condições de escoamento estudadas. Os respectivos padrões de escoamento também podem ser observados nesta tabela.

A partir de análise da Tabela 4, verifica-se que os padrões de escoamento e a magnitude do movimento de oscilação estão estritamente relacionados. Os casos onde o padrão golfada foi observado, de maneira geral, apresentaram magnitudes de oscilações entre 0 e 6 diâmetros. Os casos classificados como uma transição entre os regimes golfada e intermitente apresentaram, predominantemente, magnitudes na ordem de 6 à 9 diâmetros. As maiores magnitudes de oscilações, entre 12 e 15 diâmetros, foram observadas para os casos 8, 12 e 16, correspondendo a uma transição entre os regimes intermitente e anular.

O caso 4, que apresenta padrão de escoamento anular, deve ser analisado com cuidado. Pelo que foi exposto anteriormente, seria esperado que este caso apresentasse a maior magnitude de oscilação entre os casos do grupo 1, uma vez que possui a maior vazão de ar. Entretanto, uma baixa magnitude de oscilação foi observada. Este comportamento pode ser explicado considerando que no padrão anular a velocidade superficial da fase gasosa é bastante superior à da fase líquida e, portanto, o escoamento comporta-se de maneira similar a um fluxo monofásico. Assim, baixos níveis de intermitência da quantidade de movimento do escoamento são verificados resultado em pequenas oscilações do modelo.

Tabela 4. Padrões de Escoamento e Amplitudes de Deslocamento.

Grupo	Caso	Padrões de Escoamento	Magnitude do Movimento de Oscilação (δ/D)
1	1	Golfada	3 - 6
	2	Golfada	3 - 6
	3	Golfada / Intermitente	6 - 9
	4	Anular	0 - 3
2	5	Golfada	0 - 3
	6	Golfada	3 - 6
	7	Golfada / Intermitente	6 - 9
	8	Intermitente / Anular	9 - 12
3	9	Golfada	0 - 3
	10	Golfada / Intermitente	0 - 3
	11	Golfada / Intermitente	6 - 9
	12	Intermitente / Anular	12 - 15
4	13	Golfada	0 - 3
	14	Golfada	3 - 6
	15	Golfada / Intermitente	6 - 9
	16	Intermitente / Anular	12 - 15

6.2 Espectro de Frequências

Os espectros de frequências para os dezesseis casos estudados foram determinados a partir dos dados de deslocamento do modelo de riser. A metodologia da Transformada Rápida de Fourier (FFT) foi utilizada para esta finalidade. Esta ferramenta possibilita a transformação de um conjunto de dados do domínio do tempo para o domínio da frequência.

A Figura 9 apresenta os gráficos de FFT para os casos 9 à 12. O eixo horizontal representa a frequência em hertz. No eixo vertical são mostrados os valores das magnitudes da FFT, a qual fornece uma idéia da relevância de um determinado valor de frequência no espectro total de frequências.

Pode-se notar que não existem frequências significantes acima de 1,5 Hz. Este resultado foi observado para todos os casos analisados. Além disso, verifica-se ainda que a banda de frequências dominantes encontra-se compreendida na entre 0,2 e 0,6 Hz, mostrando que, provavelmente, a frequência natural do modelo de riser encontra-se situada nesta região do espectro.

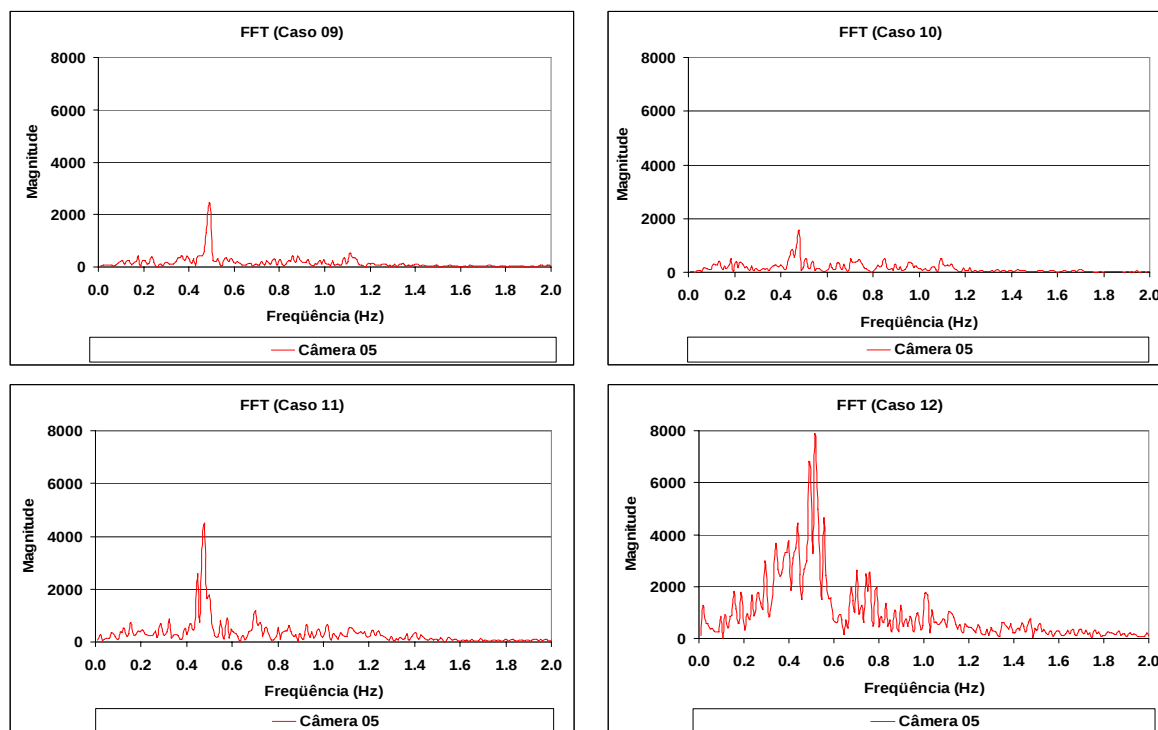


Figura 9. Gráficos do Espectro de Frequências.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um estudo inicial sobre o efeito do escoamento interno no movimento oscilatório de risers rígidos em catenária. Este assunto é ainda pouco explorado na literatura necessitando, portanto, de um

maior entendimento do fenômeno físico envolvido. Com esse objetivo, foi realizada a montagem de um aparato experimental em escala reduzida para simulação do fenômeno.

Valores dos deslocamentos do modelo de risers, os padrões de escoamento e o espectro de frequência das oscilações foram determinados para diversas condições de escoamento similares às obtidas em campo. Os resultados mostraram que o efeito do escoamento interno pode desempenhar um importante papel na dinâmica de risers em catenária. Deslocamentos de até cerca de 15 vezes o diâmetro externo do modelo foram observado. Além disso, verificou-se uma estrita relação entre os padrões de escoamento observados e a magnitude do movimento de oscilação do riser. Os espectros de frequência das oscilações indicaram frequências dominantes na faixa de 0.2 à 0.6 Hz para o modelo em estudo.

Com base no conhecimento adquirido ao longo desta pesquisa, espera-se que seja possível desenvolver futuramente um modelo para simulação numérica da dinâmica de risers devido ao efeito do escoamento interno.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho gostariam de agradecer à Capes, Finep/CTPetro e à Petrobrás pelo financiamento desta pesquisa, bem como, às valorosas contribuições do Prof. Dr. Paulo Kurka, do Msc. Luiz Menezes, do Engº. Paulo Valdívnia e de toda a equipe do LabPetro/CEPETRO.

9. REFERÊNCIAS

- Baddou, R. E., Raman-Nair, W., Abril de 2003, “Three-Dimensional Dynamics of a Flexible Marine Riser Undergoing Large Elastic Deformations”, *Multibody System Dynamics*, Vol. 10, pp. 393-423.
- Barnea, D., Dukler, A. E. and Taitel, Y., 1980, “Modeling Flow Pattern Transitions for Steady Upward Gas-liquid Flow in Vertical Tubes”, *AIChE Journal*, Vol. 26, pp. 345-354.
- Beggs, H.D. and Brill, J. P., Maio de 1973, “Study of Two-phase Flow in Inclined Pipes”, *Journal Petroleum Tech.*, pp. 607-617.
- Beggs, H.D. and Brill, J. P., 1986, “Two-phase Flow in Pipes”, 5 Edição, Tulsa, USA.
- Fox, R. W. and McDonald, A. T., 1998, “Introdução à Mecânica dos Fluidos”, 5 Edição, John Wiley & Sons.
- Patel, M. H. and Seyed, F. B., Outubro de 1989, “Internal Flow-Induced Behavior of Flexible Risers”, *Engineering Structures*, Vol 11, pp. 266–280.
- Silva, E. S., 2006, “Estudo do Escoamento Bifásico em Risers em Movimento na Produção Marítima de Petróleo em Águas Profundas”, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 87 p., Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo), Orientador: Bordalo, S.N.

INFLUENCE OF THE INTERNAL FLOW ON THE OSCILLATORY MOTION OF A RIGID CATENARY RISER

The elevation of petroleum prices combined with the exhaustion of onshore reserves has turned the exploration and production of petroleum reservoirs on deeper and ultradeeper waters attractive. Several researches are necessary to develop appropriated methods and equipments to those operational conditions. Among these equipments, risers are distinguished. Risers are suspended pipes used to transport the petroleum fluids between the seabed and the floating production unit. The structural flexibility of riser's lines is conferred by its length when compared with the diameter, characterizing it as a slender body. The risers are submitted to large static and dynamic loads originated from its own weight, waves, currents, platform motions and the internal flow. These loadings may threaten, by fatigue, the structural integrity of the system, compromising its useful life, and so they must be considered in the riser's project. The literature presents some researches about the effect of external loadings on these systems, but the effect of internal flow remains unexplored. The variation of the flow momentum inside the riser causes a dynamic loading on this system, originating an oscillatory motion. Furthermore, the gas-liquid two-phase flow may assume several flow patterns (bubble, slug, intermittent or annular), each one possessing completely different characteristics. In this work, the influence of the internal flow on the oscillatory motion (whipping motion) of slender catenary risers is analyzed. To provide a better comprehension of the physical phenomenon, a scaled apparatus was designed. The material used to manufacture the riser's model was a flexible silicone tube, and air and water were used to simulate the two-phase flow. The instrumentation used to measure the fluids flow rates and the sustaining force at the top of model was installed in the apparatus. A video acquisition system and accelerometers were used to determine the displacements, accelerations e frequency spectrum of color marks positioned throughout the model for several flow conditions. The flow patterns were identified by visual observations. The results indicate that there is a relationship among the flow patterns, the fluids flow rates and the magnitude of observed oscillations.

Two-phase Flow, Internal Flow, Catenary Risers, Rigid Risers, Oscillatory Motion.