

Modelagem Centrífuga da Movimentação Lateral e Axial de Dutos em Leito Marinho Arenoso

Samuel F. M. Tarazona

PUC-RIO, Rio de Janeiro, Brasil, samuelfelipe23@gmail.com

Marcio S. S. Almeida

COPPE-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, mssal@globo.com

Celso Romanel

PUC-RIO, Rio de Janeiro, Brasil, romanel@puc-rio.br

RESUMO: A análise de susceptibilidade à flambagem em dutos de óleo e gás requer uma adequada modelagem do problema de interação solo-duto, particularmente em relação à restrição oferecida pelo solo face aos movimentos do duto. Esta pesquisa aborda uma análise da interação solo-duto através de modelagem em centrífuga da movimentação lateral e axial cíclica de dutos em modelos de areia submersa. Ensaios de caracterização com mini CPT em voo foram realizados em cada modelo centrífugo. A influência do enterramento do duto foi também investigada por meio de diferentes ensaios com diferentes razões de enterramento. A resposta do solo em relação aos movimentos lateral e axial do duto foi quantificada em termos das resistências lateral e axial e da evolução das forças resistentes durante a formação das bermas ao longo dos ciclos. Uma relação próxima entre as forças verticais e axiais foi observada nos ensaios centrífugos, o que permitiu determinar trajetórias de forças vertical-axial combinadas e uma possível envoltória de fluência. Os resultados revelam superfícies de fluência parabólicas em condições de carregamento vertical e axial combinado. Foi observado que as distâncias de mobilização das resistências axiais de *breakout* aumentaram em relação ao valor de enterramento do duto divergindo de valores estimados na prática *offshore* que propõem distâncias constantes.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem centrífuga, interação solo-duto, resistência *breakout*.

1 INTRODUÇÃO

Fluidos são constantemente transportados do solo marinho para estruturas flutuantes de armazenamento e transferência (e.g., FPSO e plataformas) por intermédio de dutos rígidos de 0,1 a 1,5 m de diâmetro, compostos de aço revestido interna e externamente, denominados de *SCRs* (*steel catenary risers*). No leito marinho, dutos usados para o transporte de produtos *offshore* são frequentemente colocados em trincheiras ou enterrados in situ para a proteção de possíveis danos mecânicos e para isolamento térmico. Com o avanço da exploração *offshore*, a natureza e tecnologia da

infraestrutura de redes de dutos em águas profundas vêm sendo modificada para adaptar-se a profundidades cada vez maiores e mais afastadas da superfície terrestre. Termos como *deep water* e *ultra deep water* são geralmente usados para referir-se a profundidades ao redor de 500m e 1500m, respectivamente. Esta tendência tem levado à instalação de maiores comprimentos de dutos e redes complexas em águas profundas onde a técnica de enterramento torna-se inviável, de modo que usualmente opta-se por colocar os dutos diretamente no leito marinho. Dutos assentes no leito marinho são denominados *on-bottom pipelines*.

Dutos de grande comprimento são

frequentemente colocados na superfície do solo marinho, expostos diretamente ao ambiente hidrodinâmico de ondas e correntes marinhas. A exceção de dutos auxiliares, mais curtos, *on-bottom pipelines* são raramente colocados ao longo de trajetórias retas, ficando consequentemente susceptíveis à ocorrência de flambagem, uma resposta estrutural que é fortemente influenciada pela resistência do solo ao redor.

A modelagem centrífuga tem se mostrado uma ferramenta de pesquisa confiável que permite esclarecer o comportamento geotécnico de uma ampla variedade de problemas de interação solo-duto. Este entendimento pode ser usado para desenvolver metodologias de projeto simplificadas ou para validar previsões determinadas pela aplicação de métodos numéricos.

Este artigo descreve uma série de ensaios centrífugos em modelos de areia submersa avaliando a movimentação lateral e axial cíclica de dutos assentes em leito marinho arenoso.

Os principais fundamentos teóricos são inicialmente descritos, seguidos da configuração dos ensaios experimentais, aspectos chave do comportamento observado, e das conclusões obtidas no presente trabalho.

2 MODELOS E ABORDAGENS

2.1 Resistência Lateral

Três diferentes abordagens têm sido utilizadas na literatura para a avaliação da resistência lateral do solo:

1. um simples enfoque considerando um modelo baseado principalmente em um “fator de atrito”, onde a resistência é relacionada ao peso submerso do duto e ao tipo do solo;

2. um modelo composto por duas componentes que governam a resistência lateral: as forças de atrito e forças decorrentes do enterramento do duto (Wagner *et al*, 1987). Modificações no cálculo da componente das forças de enterramento procuram considerar mais rigorosamente a variação das forças verticais e as propriedades de engenharia do solo (Verley & Sotberg, 1994). A forma geral

desse modelo é apresentada na equação 1.

$$F_H = \mu(W_s - F_L) + F_R \quad (1)$$

Onde F_H é a resistência horizontal, μ um coeficiente de atrito, $(W_s - F_L)$ a força vertical líquida entre o duto e solo, e F_R a resistência do solo devida ao enterramento adicional do duto.

3. um modelo baseado na teoria da plasticidade (Zhang *et al.*, 1999, 2002) que permite incorporar as deformações plásticas decorrentes do enterramento do duto, de maneira similar aos estudos do comportamento elasto-plástico de fundações superficiais. A relação proposta por Zhang *et al.* (2001) que permite a estimativa de valores de resistência lateral é apresentada na Equação 2.

$$\frac{H}{\gamma' z^2} = \frac{m\mu(1+n)^2}{(1+m)^2} \left(\frac{k_{vp}}{\gamma' z} \right) \quad (2)$$

onde H é a resistência lateral residual para ensaios de arraste, m é um parâmetro associado à forma da superfície de potencial plástico, n um parâmetro que relaciona as forças verticais obtidas no intercepto com o eixo H , $\mu = 0,6$, k_{vp} o coeficiente de rigidez vertical plástica, obtida do enterramento do duto, γ' o peso submerso do solo e z a profundidade de enterramento do duto.

2.2 Resistência Axial

A interação axial solo-duto é um dos fenômenos mais complexos e pouco conhecidos no âmbito da indústria *offshore*. Investimentos consideráveis têm sido realizados com a finalidade de conseguir melhores previsões da magnitude das forças e deslocamentos esperados que permitam reduzir os requerimentos de estabilização e ancoragem no projeto de dutos submetidos a altas pressões e temperaturas (Hill e Jacob, 2008).

Utiliza-se, comumente, nos projetos da indústria *offshore*, o modelo de atrito de Coulomb para avaliar a resistência axial de dutos parcialmente enterrados para todo tipo de solos, mas que não leva em consideração a influência das condições de enterramento do

duto (Cathie *et al.*, 2005). Esta estimativa é governada pela escolha apropriada do fator de atrito axial, função do ângulo de atrito interno do solo e das propriedades da interface solo-duto. Esta abordagem é estritamente válida para condições drenadas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Solo

O solo utilizado nos ensaios corresponde a uma amostra de areia, amplamente estudada (Pacheco, 2006 e Guimarães, 2014) proveniente da praia de São Francisco Niterói (RJ). Esta areia foi inicialmente tratada, segundo a metodologia de Oliveira Filho (1987), separando a fração granulométrica compreendida entre as peneiras nº 100 (0,149 mm) e nº 50 (0,297 mm). A tabela 1 apresenta as principais características obtidas das análises físicas realizadas.

Tabela 1. Propriedades da areia de São Francisco.

Item	Valor	Unidades
Peso específico seco	13,68–15,88	kNm ⁻³
Índice de vazios	0,63–0,89	-
Densidade real dos grãos	2,642	-
Diâmetro efetivo (d_{10})	0,12	mm
Diâmetro médio (d_{50})	0,22	mm
Ângulo de atrito	35 - 38	°

3.2 Equipamentos e modelos centrífugos

Os ensaios centrífugos foram realizados na mini centrífuga de braço do Laboratório de Geotecnia do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Maiores detalhes e principais características encontram-se descritas em Almeida *et al.* (2014).

A centrífuga possui um sistema de aquisição que permite a obtenção de dados em tempo real por meio de um computador a bordo. Além disso, está equipada com um atuador bidirecional composto por dois eixos de movimentação que permitem aplicar aos modelos reduzidos deslocamentos verticais e horizontais controlados.

Foram adotados dois modelos centrífugos em escala 1:33 com diâmetro e comprimento de duto de 9 e 36 mm (300 e 1188 mm em protótipo). Estes modelos reproduziram o fenômeno de interação solo-duto através da movimentação lateral e axial de dutos em areia submersa. A configuração geral dos modelos é apresentada na figura 1.

Adicionalmente utilizou-se um modelo de CPT com diâmetro de 10 mm (Figura 2) para a caracterização dos modelos em voo. Empregou-se um arranjo de células de carga horizontal e vertical acoplado ao sistema de atuação com o duto preso na extremidade da célula vertical.

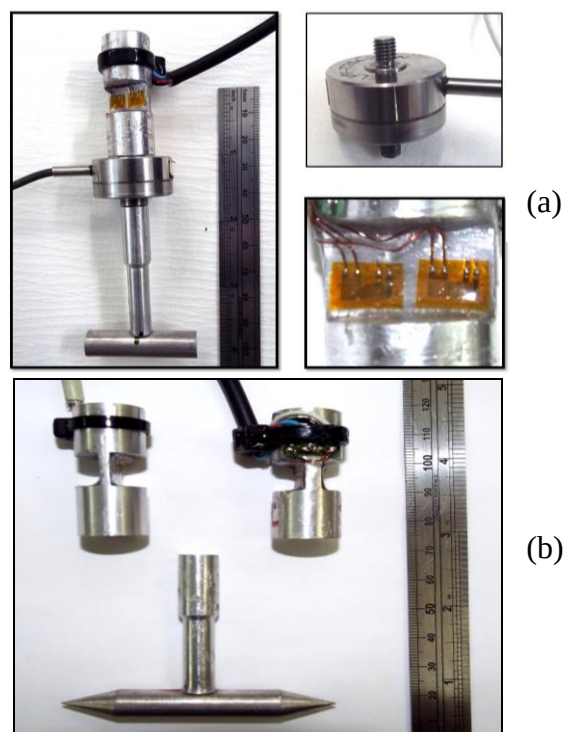


Figura 1. Configuração dos modelos de dutos para os ensaios laterais (a) e axiais (b).



Figura 2. Modelo utilizado nos ensaios de mini-CPT.

3.3 Procedimento e preparação dos modelos centrífugos

O método adotado para a preparação das amostras dos ensaios centrífugos foi o método de pluviação seca. Considerada a técnica mais estável para modelagem centrífuga de materiais granulares. (Madabhushi, 2015).

Os ensaios foram realizados em uma caixa de alumínio de alta resistência com dimensões internas de 0,10 m de largura, 0,30 m de comprimento e 0,18 m de altura. Inicialmente colocou-se a amostra de areia na caixa de ensaio por meio de um funil ligado a uma mangueira e um recipiente perfurado que desliza pelo trilho na parte superior da caixa da centrífuga (Figura 3). Em sequência, a areia passa pelos furos do recipiente e cai em duas malhas em série, colocadas na parte superior da caixa, possibilitando a pluviação. A superfície de areia obtida foi cuidadosamente nivelada utilizando uma lamina graduada. Finalmente foi realizada a submersão do modelo a 1G.



Figura 3. Colocação da areia no recipiente para a pluviação

Em seguida o mini cone e atuador foram montados sobre a caixa de ensaio. Acelerou-se o sistema até atingir o valor de 33g, quando então um ensaio CPT drenado foi executado. Após seu término, a centrífuga foi parada e o cone foi substituído por um segmento de duto de alumínio de 36 mm comprimento e 9 mm diâmetro. O atuador foi posicionado na superfície de areia no local de ensaio e a centrífuga foi novamente acelerada até 33g e o ensaio de interação foi realizado.

3.4 Ensaios Centrífugos

Foram realizados 32 ensaios de interação solo-duto representando as duas principais fases do comportamento do duto, a) enterramento, em consequência do processo de lançamento; b) arraste, ocasionado pelos ciclos de operação, após a estabilização das tensões geradas no processo de cravação, em direção lateral e axial independentemente. Foram impostas porcentagens de enterramento inicial (w/D) de 25, 50 e 75% (onde w é a profundidade de enterramento inicial e D o diâmetro do duto) com amplitudes de movimentação de três vezes o diâmetro do duto com 12 ciclos de movimentação.

Ensaios de caracterização em voo, com mini CPT adaptado para a modelagem centrífuga (Almeida *et al.*, 2011), foram executados previamente aos ensaios de interação solo-duto, com medições da resistência mobilizada do solo por meio de células de carga horizontal e vertical, em resposta à aplicação dos deslocamentos prescritos.

Utilizaram-se como referência os valores de velocidade de enterramento e arraste de 0,05 mm/s definidos por Zhang *et al.* (2001) para areias.

4 RESULTADOS DOS ENSAIOS E INTERPRETAÇÃO

4.1 Caracterização do solo

Os resultados de oito ensaios CPT realizados em duas amostras de areia preparadas pelo método de pluviação são apresentados na Figura 4.

Observou-se que a resistência de ponta máxima atingida em todos os ensaios foi de aproximadamente 1,5 MPa a 1,5 m de profundidade equivalente a 5 diâmetros do duto. Verifica-se que os perfis obtidos dos ensaios CPT apresentam pouca dispersão considerando que o máximo enterramento dos ensaios corresponde a uma profundidade de 0.2 m (protótipo).

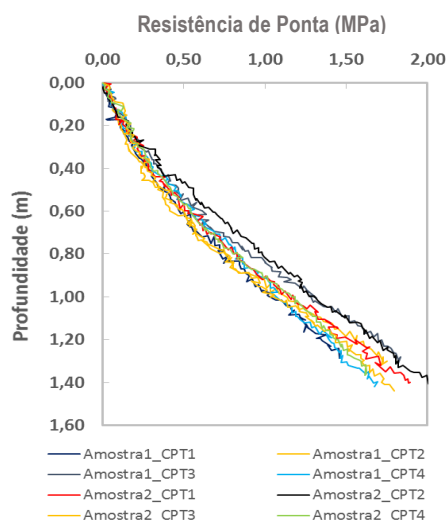


Figura 4. Comparação dos perfis de resistência dos ensaios CPT nas amostras 1 e 2.

4.2 Ensaios Laterais

4.2.1 Resultados

Para a análise conjunta dos ensaios laterais com diferentes taxas de enterramento utilizou-se o conceito de índice de sobrecarregamento R , definido como o quociente entre a força vertical máxima e a força vertical no início da movimentação (Equação 3), em analogia à definição da razão de pre-adensamento de argilas (Zhang *et al.*, 2001).

$$R = \frac{V_{\text{máx}}}{V_0} \quad (3)$$

onde R é o índice de sobrecarregamento da amostra, V_0 é a força vertical na movimentação do duto e $V_{\text{máx}}$ a força vertical máxima decorrente do enterramento do duto.

Este parâmetro permitiu identificar a influência da estabilização das forças verticais após o enterramento do duto.

Os resultados de 6 ensaios de deslocamento lateral, para o primeiro ciclo, são mostrados na Tabela 2. Apresentam-se valores de enterramento inicial do duto em termos de protótipo (w_p) e valores de força vertical máxima ($V_{\text{máx.}}$), força vertical máxima relativa à força vertical na movimentação do duto ($V_{\text{máx.}} / V_0$), força resistente de *breakout* ($H_{\text{máx.}}$) por unidade de comprimento de duto.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de deslocamento lateral cíclico.

Ensaio	w_p (cm)	$V_{\text{máx.}}$ (kN/m)	V_0 (kN/m)	$V_{\text{máx.}} / V_0$ (R)	$H_{\text{máx.}}$ (kN/m)
E07	7,4	25,1	4,1	6,1	2,4
E08	7,4	28,8	3,5	8,3	2,3
E09	14,8	36,8	5,8	6,3	2,9
E10	14,8	42,4	24,8	1,7	4,6
E11	22,3	51,8	18,1	2,9	5,0
E12	22,3	39,5	22,7	1,7	5,9

Os registros das forças verticais dos ensaios laterais com $w/D=25, 50$ e 75% , para valores de $R=8,3; 6,3$ e $2,9$ respectivamente, relativas ao *breakout* são mostrados na Figura 5. Pode ser constatado que as forças verticais atingiram o valor residual aproximado de $2,4$ kN simultaneamente. Identificou-se também que a queda das forças verticais aconteceram para um mesmo valor aproximado de deslocamento lateral de $0,05$ m.

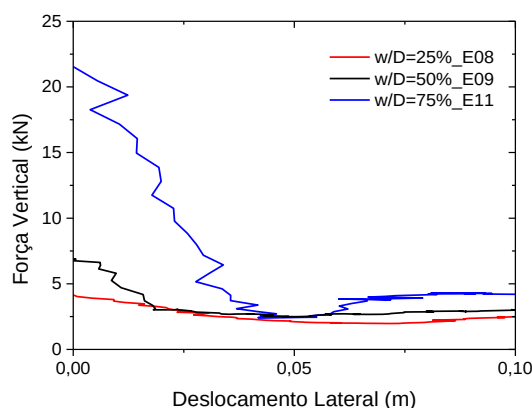


Figura 5. Comparação das forças verticais relativas à mobilização do *breakout* dos ensaios laterais E08, E09 e E11.

A evolução das forças laterais relativas ao *breakout* para o primeiro ciclo dos ensaios com porcentagens de enterramento de $25, 50$ e 75% é apresentada na Figura 6. Nota-se que a distância de mobilização da resistência lateral de pico foi similar para todos os ensaios, em torno de $0,025$ m (protótipo). Esta distância de mobilização da máxima resistência lateral é similar à obtida por Zhang *et al.* (2001), de $0,025$ m aproximadamente.

O maior valor de *breakout* foi relativo ao ensaio com $w/D=75\%$, devido ao maior valor de força vertical e menor índice de sobrecarregamento ($R=2,9$). Pode-se verificar também que as forças resistentes de *breakout*

para os ensaios E08 e E09 foram diferentes, com magnitudes de 2,7 e 3,5 kN, as quais guardam correspondência com os respectivos valores de $R = 8,3$ e $6,3$. Isto evidenciou que, possivelmente, valores elevados de R conduzem a baixas resistências de *breakout*, próximas ao valor residual.

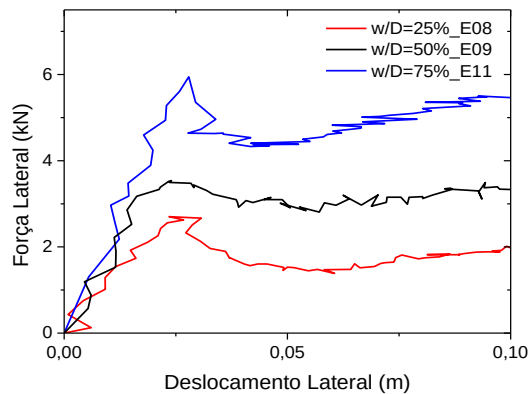


Figura 6. Comparação das forças laterais relativas à mobilização do *breakout* dos ensaios 8, 9 e 11.

4.2.2 Análise dos Resultados

A relação entre as forças horizontais e verticais é comumente representada por meio de trajetórias de forças (Figura 7), que definem uma possível superfície de fluência (Zhang *et al.*, 2001; Sandford, 2012).

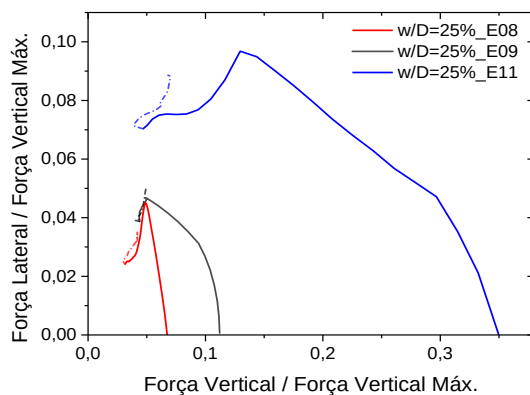


Figura 7. Comparação das superfícies de fluência normalizadas dos ensaios laterais 8, 9 e 11.

Uma comparação das superfícies de fluência obtidas dos ensaios com $w/D = 25, 50$ e 75% mostra que, para os ensaios de $w/D = 25$ e 50% , as forças laterais de *breakout* e as correspondentes forças verticais relativas atingiram o pico para o mesmo valor de 5% da

força vertical máxima. Já no ensaio com $w/D = 75\%$ a força lateral pico e a força vertical relativa foram atingidas entre 10 a 13% da força vertical máxima decorrente da fase de enterramento do duto.

A Figura 8 apresenta uma análise comparativa dos resultados experimentais obtidos no presente estudo, para diversas taxas de enterramento do duto, com aqueles determinados experimentalmente por outros autores (Almeida *et al.*, 2007; Guimarães, 2014) ou previstos analiticamente (Almeida *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 1999, 2001).

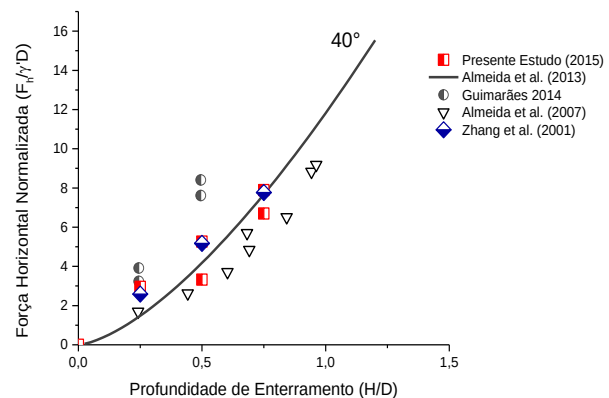


Figura 8. Comparação das forças normalizadas obtidas experimentalmente e modelos propostos na literatura (modificado de Almeida *et al.*, 2007).

Verifica-se que os resultados do presente estudo apresentam boa concordância com a previsão teórica proposta por Almeida *et al.* (2013) para um ângulo de atrito de 40° . A diferença entre os ângulos de atrito medidos nos perfis de resistência (com valor médio de $36,5^\circ$) e o valor teórico estimado (40°) pode ser atribuída ao método de estimativa do ângulo de atrito nos ensaios CPT e a variabilidade do método de preparação das amostras.

Os valores calculados com a Equação 2 (Zhang *et al.*, 2001) apresentaram uma boa precisão na estimativa dos valores de resistência lateral normalizada.

4.3 Ensaios Axiais

4.3.1 Resultados

Os resultados de 6 ensaios de deslocamento axial, para o primeiro ciclo, são mostrados na Tabela 2. Apresentam-se valores de

enterramento inicial do duto em termos de protótipo (w_p) e valores de força vertical máxima ($V_{m\acute{a}x.}$), força vertical máxima relativa à força vertical na movimentação do duto ($V_{m\acute{a}x.} / V_o$), força resistente de *breakout* ($H_{m\acute{a}x.}$) por unidade de comprimento de duto.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de deslocamento axial cíclico.

Ensaio	w_p (cm)	$V_{m\acute{a}x.}$ (kN/m)	V_o (kN/m)	$V_{m\acute{a}x.} / V_o$ (R)	$H_{m\acute{a}x.}$ (kN/m)
E07	7,4	27,5	6,7	4,1	0,6
E08	7,4	24,4	21,5	1,1	0,7
E09	14,9	39,3	17,0	2,3	1,6
E10	14,9	30,8	9,3	3,3	0,7
E11	22,3	62,2	34,2	1,8	3,0
E12	22,3	58,5	24,1	2,4	2,7

Os registros das forças axiais e verticais relativas à ocorrência do *breakout* para os ensaios com $R \geq 2$ são apresentados na Figura 9 e Figura 10.

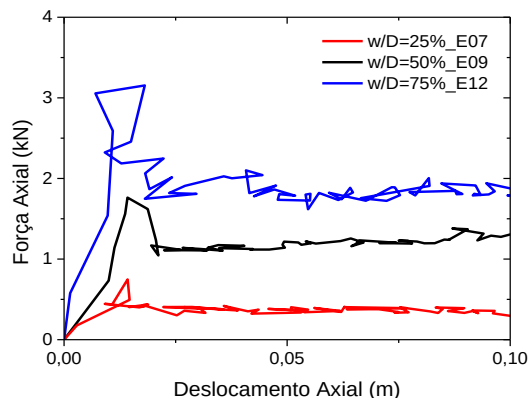


Figura 9. Comparação das forças axiais relativas à mobilização do *breakout* dos ensaios 7, 9 e 12.

Observou-se que a mobilização das resistências axiais de *breakout* dos ensaios com $w/D = 25, 50$ e 75 atingiram valores de 0,8; 1,8 e 3,2kN respectivamente (Figura 9). Estes valores tendem a aumentar com o acréscimo da porcentagem de enterramento (w/D), o que evidencia que a resistência axial de dutos enterrados superficialmente é fortemente influenciada pelas condições de enterramento. Observou-se também que as distâncias de mobilização da resistência axial máxima dos ensaios foram aproximadamente iguais a 18mm, que correspondem a valores superiores aos propostos em relação a solos de textura grosseira (ALA, 2001), onde se relatam valores

constantes de 3 mm para areias densas e 5 mm para areias fofas.

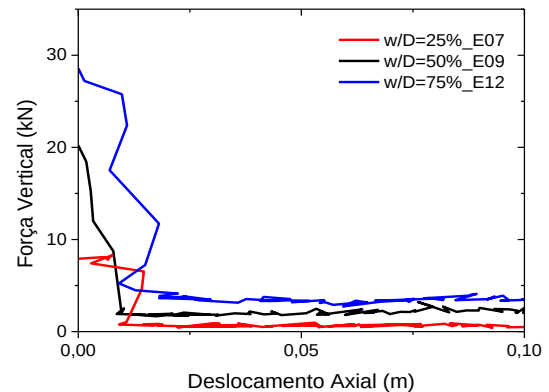


Figura 10. Comparação das forças verticais relativas à mobilização do *breakout* dos ensaios axiais 7, 9 e 12.

As forças verticais decaem durante a movimentação axial do duto até atingirem um valor residual que corresponde à distância em que todas as forças axiais atingiram o pico *breakout* (Figura 10).

4.3.2 Análise dos Resultados

As trajetórias das forças verticais e axiais combinadas, que delimitam uma possível superfície de fluência dos ensaios 7, 9 e 12 ($w/D = 25, 50$ e 75) são mostradas na Figura 11.

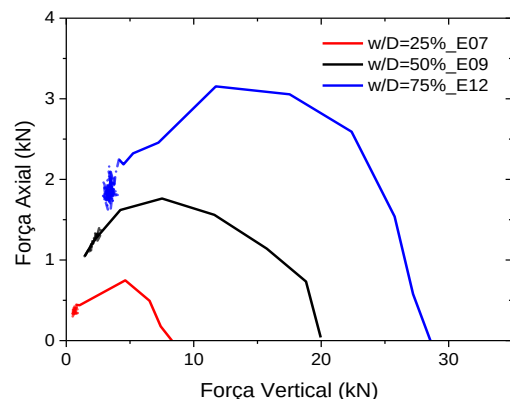


Figura 11. Comparação das superfícies de fluência normalizadas dos ensaios axiais 7, 9 e 12.

Observou-se que estas curvas apresentam uma configuração aproximadamente parabólica, mantendo um acréscimo relativamente proporcional conforme aumenta o enterramento do duto (w/D).

5 CONCLUSÕES

O método de pluviação, utilizado na preparação das amostras, foi eficiente e permitiu alcançar boa repetibilidade e homogeneidade em todos os ensaios centrífugos. Ensaios de mini cone permitiram verificar a repetibilidade e homogeneidade das amostras dos ensaios centrífugos.

A modelagem centrífuga permitiu avaliar aspectos importantes do fenômeno de interação solo-duto, incluindo: a) mobilização da resistência lateral e axial em termos do *breakout* para pequenos deslocamentos; b) trajetórias das forças vertical-lateral e vertical-axial combinadas, relativas à ocorrência do *breakout*, que definem a envoltória de fluência.

Foi evidenciada uma estreita relação entre as forças verticais e laterais ao longo dos ensaios centrífugos e também verificada a sensibilidade da resistência lateral de *breakout* frente à variabilidade do índice de sobrecarregamento R , em relação ao alívio de tensões.

A resposta força - deslocamento na atuação lateral cíclica é dependente do histórico de tensões decorrentes das forças de enterramento, ocorrendo um aumento das forças resistentes de *breakout* com o acréscimo da profundidade de enterramento do duto.

Os valores obtidos de distância de mobilização axial de *breakout* são superiores aos recomendados na prática *offshore* por não considerar os efeitos de enterramento (w/D).

AGRADECIMENTOS

À CAPES, FINEP, TECHNIP e ao Laboratório de Geotecnia da COPPE.

REFERÊNCIAS

- Almeida M.S.S.; Oliveira, J.R.M.S.; Motta, H.P.G.; Almeida, M.C.F. e Borges, R.G. (2011) "CPT and T-bar penetrometers for site investigation in centrifuge tests" – *Journal Soil and Rocks*; V. 34 (1); p. 79-88.
- Almeida, M. C. F.; Almeida, M. S. S.; Pacheco, L. A.; Oliveira, J. R. M. S. e Borges, R. G. (2007). Physical and Numerical Modelling of a Pipeline Shallowly Buried in Sandy Soil Subjected to Lateral Load, *XIII Pan American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Almeida, M. S. S.; Almeida, M. C. F. e Oliveira, J. R. M. S. e Borges, R. G. (2013). Lateral Response of Pipelines Shallowly Buried in Sandy Soil, *32nd International Conference on Ocean , Offshore and Arctic Engineering*.
- Almeida, M.S.S.; Almeida, M.C.F.; Trejo, P.C.; Lukiantchuki, J.A.; Guimarães, M.P.P. & Oliveira, J.R.M.S. (2014) "The Geotechnical Beam Centrifuge at COPPE Centrifuge Laboratory" *8th International Conference Physical Modelling in Geotechnics*, Perth-Austrália.
- American Lifelines Alliance (ALA) - ASCE. Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe, July 2001.
- Cathie, D. N.; Jaek, C.; Ballard, J. C. e Wintgens, J. F. (2005). Pipeline Geotechnics State of the Art, *Frontiers in Offshore Geotechnics, ISFOG 2005 – Proceedings of the 1st International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics*, p. 95-114.
- Guimarães, M. P. P. (2014). *Modelagem Centrífuga da Movimentação Lateral de Dutos em Areia*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Hill, A. J. e Jacob, H. (2008). In-situ Pipe-Soil Interaction Measurement in Deep Water, *Proceedings of Offshore Technology Conference*.
- Madabhushi, G. (2015). *Centrifuge Modelling for Civil Engineers*, Boca Raton - London - New York. p. 285.
- Motta, H. P. G. (2008). *Comportamento de um Rejeito de Transição em Centrífuga Geotécnica*, Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Oliveira Filho, W. L. (1987). *Considerações Sobre Ensaios Triaxiais em Areia*, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Pacheco, L. DE A. (2006). *Modelagem Física e Numérica de um Duto Enterrado em Areia Sujeito a Deslocamento Lateral*, Dissertação M.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Sandford, R. J. (2012). *Lateral Buckling of High Pressure/High Temperature On-Bottom Pipelines*, PhD Thesis, Oriel College, Oxford.
- Verley, R. L. P. e Sotberg, T. (1994). A Soil Resistance Model for Pipelines Placed on Sandy Soils, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. 116, p. 145.
- Wagner, D. A.; Murff, J. D.; Brennodden, H. e Evæggen, O. (1987). Pipe-Soil Interaction Model, *Proceedings of Offshore Technology Conference*.
- Zhang, J., Stewart, D. P., & Randolph, M. F. (2002). Modeling of Shallowly Embedded Offshore Pipelines in Calcareous Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, p. 363–371.
- Zhang, J.; Randolph, M. F. e Stewart, D. P. (1999). An Elasto-Plastic Model for Pipe-Soil Interaction of Unburied Pipelines, *Proceedings of the Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference*, V. 2, p. 185-192.
- Zhang, J.; Stewart, D. P. e Randolph, M. F. (2001). Centrifuge Modelling of Drained Behaviour For Pipelines Shallowly Embedded in Calcareous Sand, *IJPMG – International Journal of Physical Modelling in Geotechnics* 1, p. 15.