

Modelagem física de uma linha de dutos submetida à sobrecarga de um aterro

José Renato M. S. Oliveira
UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, jrmso70@gmail.com

Khader I. Rammah
UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, khader.rammah@gmail.com

Márcio S. S. Almeida
UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, mssal@globlo.com

Maria Cascão F. Almeida
UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, mariacascasao@globo.com

RESUMO: O presente trabalho apresenta o resultado de ensaios de modelagem física efetuados na centrífuga geotécnica de tambor da COPPE/UFRJ para avaliar a influência da sobrecarga de um aterro no comportamento de uma linha de dutos enterrada em solo argiloso. Uma série de ensaios centrífugos foi realizada em um modelo reduzido de duto enterrado em um solo artificial composto de uma mistura de 75% de caulim e 25% de areia. As dimensões do modelo do duto foram calculadas de forma a guardar semelhança física com as dimensões de um modelo real submetido às mesmas tensões. O duto foi instrumentado com quatro strain-gages colados na sua parte central e ligados entre si através de uma ponte completa de wheatstone. O aterro foi modelado através de três camadas sucessivas não-saturadas de areia, de 15 kPa cada, sobrepostas à camada de argila, tendo cada camada sido colocada após a finalização do adensamento da camada anterior. Durante os ensaios foram medidas as deformações e forças desenvolvidas na linha de duto após a colocação da sobrecarga e também durante o adensamento da camada de argila. A influência do enterramento no comportamento das forças também foi avaliada através de ensaios com diferentes alturas de solo acima da geratriz superior do duto. Os resultados indicaram que a força transmitida à linha de duto é composta basicamente de duas parcelas: uma devida à sobrecarga propriamente dita e outra devida ao processo de adensamento. A primeira parcela se mostrou decrescente com a profundidade de enterramento do duto, enquanto a parcela devida ao adensamento permaneceu praticamente constante, isto é, quase independente da altura de solo acima do duto.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem Física, Centrífuga Geotécnica, Duto, Sobrecarga.

1 INTRODUÇÃO

De maneira geral, linhas de dutos de óleo e gás onshore são enterradas com o objetivo de prover estabilidade, isolamento térmico e proteção mecânica em relação ao meio ambiente externo. Em muitos casos, esses dutos podem ser submetidos a sobrecargas externas provocadas pela construção de aterros. Essas cargas podem causar deformações significativas e levar a estrutura do duto à ruptura. Portanto, estimativas confiáveis das tensões e deformações induzidas na linha de dutos nessas condições são essenciais para o engenheiro quando da elaboração do projeto estrutural e geotécnico.

Problemas de interação solo-estrutura em solos argilosos vem sendo estudados através de abordagens analíticas e numéricas por diversos pesquisadores. Alguns desses estudos conduziram a diretrizes voltadas a prover informações de projeto para avaliar a integridade de dutos para um conjunto de cargas aplicadas (ASCE, 2005). O'Rourke et al. (2005) apresentaram algumas das condições de carregamento que podem induzir tensões e deformações à linhas de dutos enterrados. Essas condições de carregamento provêm de terremotos, escorregamentos e escavações adjacentes à zona na qual o duto está enterrado. Os autores conduziram ensaios usando modelos em escala real e desenvolveram soluções analíticas que pudessem descrever a distribuição tridimensional de tensões que ocorrem em uma linha de dutos. Outros estudos apresentados na literatura, como aquele conduzido por Thusyanthan et al. (2008), focam na avaliação da resistência ao arrancamento de dutos enterrados.

A revisão bibliográfica realizada para este trabalho mostrou que não houve tentativas de avaliar o efeito combinado da profundidade de enterramento de um duto, o adensamento da argila em seu entorno, e a carga imposta pela construção de um aterro sobre a linha de duto. Portanto, os estudos citados anteriormente, ASCE (2005) e Thusyanthan (2008) foram considerados unicamente como referências mais próximas do problema.

Esse estudo apresenta resultados de

modelagem física conduzida em uma centrífuga geotécnica para investigar a influência da construção de um aterro no comportamento de uma linha de dutos enterrada em solo argiloso.

A modelagem de solo-estrutura tem sido o foco de estudos recentes conduzidos na centrífuga geotécnica de tambor da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Geralmente, esses estudos visam investigar o comportamento de dutos enterrados sujeitos a diferentes condições de contorno e carregamento.

2 PROPRIEDADES DO SOLO

O solo adotado na presente pesquisa foi uma argila artificial composta por 75% de caulim industrial e 25% de areia proveniente de São Francisco, em Niterói, no Estado do Rio de Janeiro.

A proporção escolhida da mistura de argila e areia foi baseada no resultado de uma série de ensaios oedométricos realizados no Laboratório de Geotecnia da COPPE. Diversas misturas de caulim e argila foram preparadas com proporções desta última variando entre 10% e 75%. Cada uma das amostras foi adensada em um oedômetro. A variação da umidade, e portanto da saturação, foi calculado em relação à profundidade de cada amostra. Observou-se uma menor variação da saturação com a profundidade para maiores proporções de caulim. Portanto, decidiu-se por utilizar a proporção de 75% de caulim e 25% de areia para os modelos de solo na centrífuga.

O limite de liquidez e o limite de plasticidade para a mistura adotada foi de 42% e 21%, respectivamente. O coeficiente de adensamento encontrado foi de $0,17 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ correspondente a tensões verticais entre 12,5 kPa e 25,0 kPa. O índice de compressão e a compressibilidade foram de 0,076 e 0,00134 kPa, respectivamente. O índice de vazios inicial da amostra foi de 0,83 e o grau de saturação obtido foi de 99,0%.

3 CONCEITO DO ENSAIO E MODELO DO DUTO

Os ensaios centrífugos tiveram como objetivo avaliar as forças verticais induzidas pela construção de uma faixa de aterro contínua sobre uma linha de dutos enterrada em solo argiloso, correspondente a uma típica situação de uma dutovia correndo sob uma rodovia construída posteriormente. Nessas condições, a linha de dutos será submetida a carregamentos verticais, momentos fletores e deformações induzidas pela sobrecarga de um aterro de altura h construído acima da camada de argila onde se encontra o duto. A Figura 1 apresenta um diagrama esquemático descritivo do conceito do ensaio. Os cenários de carregamento na linha de dutos foram definidos variando-se o número de camadas de aterro, i.e., a sobrecarga atuando na superfície da camada argilosa, considerando-se diversos valores de enterramento do duto (H/D), onde H é a distância entre a geratriz inferior do duto e a superfície da camada de argila, e D é o diâmetro do duto.

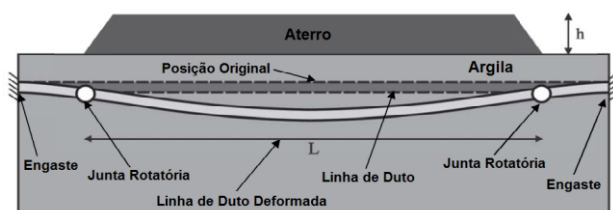


Figura 1. Diagrama esquemático do sistema estrutural do modelo de duto.

Um modelo de duto foi projetado para simular um duto real em termos de rigidez à flexão que é o parâmetro responsável pelo comportamento tensão-deformação da linha de dutos sujeita a uma carga distribuída em uma determinada faixa. As dimensões, incluindo diâmetro, espessura de parede e comprimento, do modelo de duto que simula as condições do duto real apresentado na Figura 1 foram calculadas como segue.

A força atuante em um duto é definida pela Equação (1), onde F , k e x são a força, rigidez e deslocamento, respectivamente. Os subscritos m e p se referem a modelo e protótipo, respectivamente

$$F_{p,m} = k_{p,m} \cdot x_{p,m} \quad (1)$$

Aplicando os fatores centrífugos de escala para converter de modelo para protótipo, e a equação da rigidez de uma viga bi-apoiada sujeita a um carregamento uniformemente distribuído, encontramos o fator de escala da modelagem $N = k_p/k_m = 50$.

O centro do duto foi instrumentado com uma ponte completa de Wheatstone com quatro strain gauges com o objetivo de medir o momento fletor máximo atuando no duto, bem como a deformação máxima. Os quatro strain gauges foram colados na face externa central do duto, separados por 90 graus um do outro. Dessa forma, o conjunto de sensores é capaz de medir os esforços verticais e horizontais, separadamente e simultaneamente.

O duto instrumentado foi montado dentro da caixa da centrífuga utilizando-se duas juntas rotatórias e então foi calibrado aplicando-se diversos carregamentos distribuídos (q) ao longo do seu vão. O processo de calibração foi repetido quatro vezes, rotacionando-se o duto em 90 graus para cada uma. O fator de calibração obtido nos quatro processos foram bastante próximos, com pequenas variações, tendo-se optado por adotar o valor médio para os cálculos de conversão dos ensaios.

4 PROGRAMA DE ENSAIOS

Quatro ensaios centrífugos foram realizados, cada um contendo os três estágios de carregamento mencionados anteriormente. Cada ensaio foi executado com uma condição de enterramento diferente. A Tabela 1 resume os parâmetros dos quatro ensaios. Cabe lembrar que a razão de enterramento (H/D) foi calculada como sendo a altura medida da geratriz inferior do duto até a superfície da argila. A Tabela 1 ainda resume os valores de $(H/D)_i$ e $(H/D)_f$ que correspondem às razões de enterramento antes e após o primeiro adensamento, i.e., antes da colocação das sobrecargas. Também introduziu-se $(H/D)_e$ para indicar a razão de enterramento correspondente à condição após o adensamento devido à sobrecarga dos três estágios de carregamento. A Figura 2 ilustra as diferentes razões de enterramento comentadas.

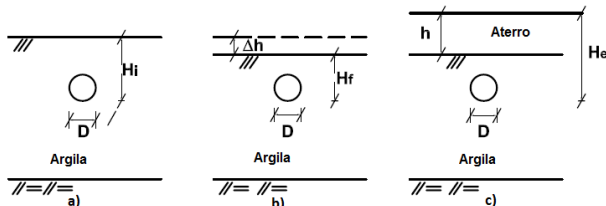


Figura 2. Diagrama esquemático mostrando as diversas razões de enterramento consideradas.

Tabela 1. Parâmetros dos ensaios centrífugos para fase de adensamento antes dos carregamentos.

Ensaio	Umidade Inicial	$(H/D)_i$	$(H/D)_f$
2	40,5%	378%	167%
3	43,6%	406%	256%
4	39,6%	244%	111%
5	39,7%	400%	194%

5 RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 Fase 1 (Fase de adensamento inicial)

A camada de argila foi adensada em uma aceleração centrífuga de 50g por um período de 2,5 horas ao longo do qual mediu-se a dissipação de poro-pressões bem como as forças transmitidas ao duto. Todas as curvas foram traçadas e comparadas entre si. Os valores das razões de enterramento inicial e final obtidos nesta fase já foram apresentados na Tabela 1.

Pode-se observar na Figura 3 que as forças transmitidas ao duto durante a fase de adensamento podem ser divididas em dois componentes: um imediato, devido ao peso do solo colocado sobre o duto, e outro de adensamento, devido ao processo de adensamento propriamente dito. A Figura 4 mostra os dois componentes das forças bem como a força total, todas em escala de protótipo para os quatro ensaios.

Pode-se observar que as forças imediatas decrescem com o aumento de $(H/D)_i$, enquanto que as forças de adensamento apresentam uma tendência diferente, i.e., permanecendo praticamente constantes. A Figura 4 também apresenta uma comparação entre as forças obtidas em escala de protótipo e as forças calculadas segundo ASCE (2005) e Thusyanthan et al. (2008). A comparação

mostra que os valores obtidos pela ASCE (2005) são inferiores àqueles observados nos testes, particularmente para valores menores de enterramento.

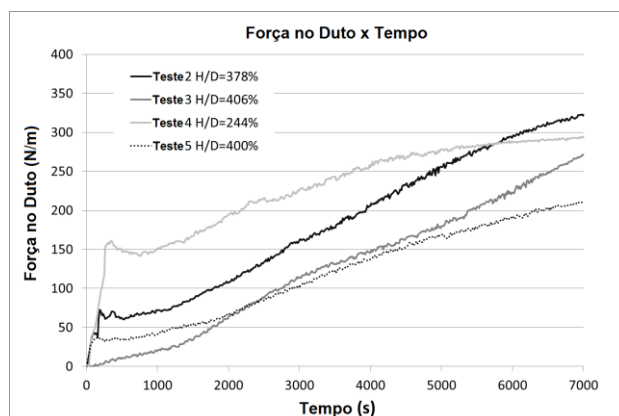


Figura 3. Força medida no duto durante a fase de adensamento.

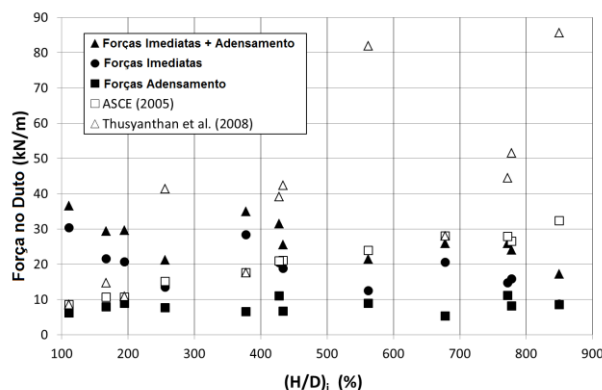


Figura 4. Componentes imediata e de adensamento das forças no duto em protótipo para fase de adensamento.

As forças imediatas atuantes no duto (F_i), apresentadas na Figura 4, foram normalizadas ($\bar{F}_i$) usando a Equação (2), baseando-se na variação da tensão vertical efetiva ($\Delta\sigma_v$) e na razão de enterramento inicial $(H/D)_i$. Os resultados foram traçados na Figura 5.

$$\bar{F}_i = \frac{F_i}{\Delta\sigma_v \cdot D} (H/D)_i \quad (2)$$

As forças de adensamento (F_c) atuantes no duto, apresentadas na Figura 4, foram normalizadas ($\bar{F}_c$) usando a Equação (3), baseada nos mesmos parâmetros da Equação (2), mais na resistência não-drenada na

profundidade correspondente ao centro do duto (S_u) e na compressibilidade da argila (m_v). Os resultados também foram traçados na Figura 5.

$$\overline{F_C} = \text{LN} \left(\frac{F_C}{\Delta\sigma_v \cdot D \cdot S_u \cdot m_v} (H/D)_i \right) \quad (3)$$

A Figura 5 mostra uma tendência de redução da força imediata normalizada à medida que a razão de enterramento aumenta, como esperado. Por outro lado, os valores da força de adensamento normalizada permaneceram praticamente constantes.

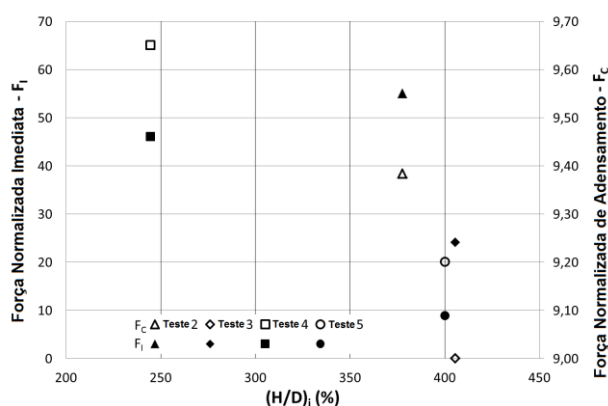


Figura 5. Forças imediatas e de adensamento normalizadas.

Os resultados apresentados na Figura 5 devem ser considerados apenas como uma referência geral do comportamento de interação entre solo e duto, uma vez que a camada inicial de argila era composta de grumos, i.e., com macro vazios entre os grumos, o que afeta a forma como o adensamento se processa. A utilização de grumos de argila para construir a camada inicial é uma técnica conhecida e regularmente usada em ensaios centrífugos e produz camadas de argila bastante regulares e homogêneas. Adicionalmente, o adensamento nesta primeira fase não é promovido pela colocação de uma sobrecarga, como nas fases subseqüentes, mas pelo peso próprio da camada de argila.

5.2 Fases 2, 3 e 4 (Fases de sobrecarga)

Cada uma das três camadas de aterro foi simulada através de uma camada de areia correspondente a 15 kPa de sobrecarga,

totalizando uma sobrecarga final de 45 kPa. Uma umidade de 15% na camada de areia foi necessária para prover uma sucção mínima entre os grãos de modo a manter a camada íntegra durante o processo de inclinação da centrífuga de tambor, da posição de eixo de rotação na horizontal (preparação de modelos) para a vertical (centrifugação).

Ensaio de penetração com T-bar foram realizados de modo a se obter o perfil de S_u da camada de argila depois do adensamento ocorrido para cada uma das fases de sobrecarga.

A camada de argila foi adensada em cada um dos três estágios de sobrecarga com uma aceleração de 50g por um período de 45 min durante os quais a dissipação de poro-pressão, recalques e as forças desenvolvidas no duto foram lidas e traçadas em gráficos para comparação. Resultados típicos das forças no duto mostram que, para uma mesma razão de enterramento, os valores transmitidos para o duto durante o processo de adensamento aumenta à medida que as sobrecargas sucessivas são colocadas.

As forças transmitidas para o duto para cada fase de sobrecarga foram divididas em dois componentes: imediatas e de adensamento, da mesma forma que na fase anterior.

A Figura 6 apresenta as duas componentes de força em escala de protótipo contra a razão de enterramento ($H/D)_e$, conforme obtido de cada ensaio após a aplicação da 1ª, 2ª e 3ª sobrecargas de aterro. A Figura 6 também apresenta uma comparação das forças em escala de protótipo com as forças calculadas segundo os critérios estabelecidos por ASCE (2005) e Thusyanthan et al. (2008). Pode-se observar que em cada sobrecarga de aterro, independente do estágio do ensaio, as forças imediatas diminuíram com o aumento de ($H/D)_e$, enquanto as forças de adensamento não apresentaram praticamente nenhuma variação. Esse comportamento é consistente com o observado na prática, uma vez que a influência do adensamento apresenta uma dependência direta com a sobrecarga, que é constante para cada um dos estágios de carga neste trabalho.

Conforme mostra a Figura 6, esses resultados são claramente diferentes daqueles obtidos com as propostas de ASCE (2005) e Thusyanthan et

al. (2008), onde uma clara tendência de aumento nos valores pode ser observada. As previsões da ASCE (2005) são inferiores que os valores da força total nas fases 2 e 3, ficando mais próximos dos dados experimentais na fase 4. Os valores obtidos por Thusyanthan et al. (2008) são inferiores que os valores de força total na fase 2, e maiores nas fases 3 e 4.

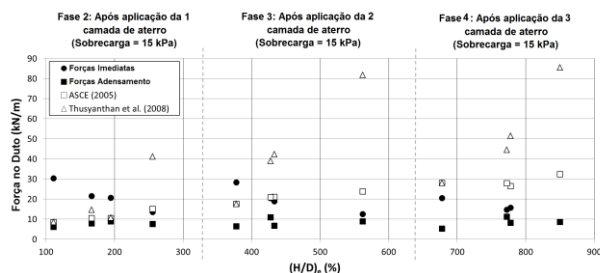


Figura 6. Componentes imediata e de adensamento das forças no duto em protótipo para fase de sobrecarga.

Em termos de forças imediatas, que são relacionadas ao peso de solo sobre o duto, os valores obtidos por Thusyanthan et al. (2008) são menores que os dados experimentais para pequenas razões de enterramento $(H/D)_e$ e maiores para enterramentos mais profundos. As forças desenvolvidas como resultado do processo de adensamento não são consideradas nem pela ASCE (2005) nem por Thusyanthan (2008).

Em relação às forças imediatas atuando no duto em cada teste, em todos os estágios de carregamento, os valores também diminuem à medida que as sobrecargas de aterro são colocadas, como esperado. Por outro lado, as forças de adensamento mostram um comportamento praticamente estável, com muito pouca variação, o que é consistente com os valores constantes de sobrecarga aplicados.

As forças imediatas atuando no duto, apresentadas na Figura 6, foram normalizadas utilizando-se a Equação (4), similar à Equação (2) e os resultados são mostrados na Figura 7. Os valores foram calculados utilizando-se $(H/D)_e$, uma vez que as sucessivas camadas de areia têm um importante papel no comportamento de distribuição de tensões. Assim sendo, a razão de enterramento $(H/D)_e$ vai sendo atualizada considerando-se a

espessura da camada de aterro sobreposta na etapa anterior.

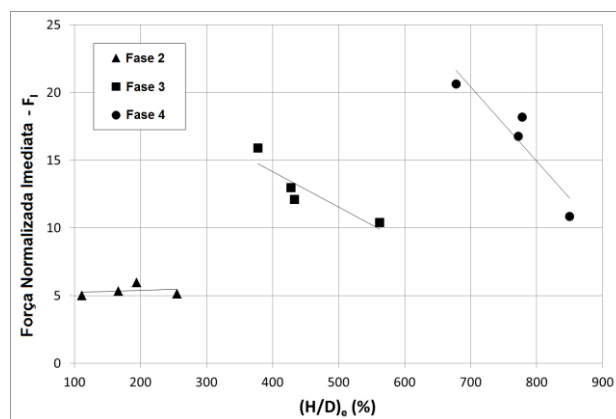


Figura 7. Forças imediatas normalizadas versus a razão de enterramento.

A normalização proposta por Thusyanthan et al. (2008) também foi testada mas se mostrou pouco adequada para o presente caso, uma vez que os dados ficaram espalhados e próximos a um valor nulo. A normalização baseada na Equação (4) mostrou uma tendência basicamente linear, com os valores para fase 2 apresentando um resultado praticamente constante de $F_1 \sim 5$, enquanto fases 3 e 4 com comportamento de forças imediatas normalizadas decrescente com a razão de enterramento. Cabe mencionar que a distribuição das forças imediatas nas fases 3 e 4 são altamente dependentes da influência da camada anterior de aterro. Essa mudança no sistema de camadas pode explicar o comportamento diferente para as três fases.

$$\overline{F}_1 = \frac{F_1}{\Delta\sigma_v \cdot D} (H/D)_e \quad (4)$$

As forças de adensamento normalizadas foram calculadas através da Equação (3) e traçadas na Figura 8. Para os valores de $(H/D)_i$ foram adotados os valores de $(H/D)_e$ correspondentes à primeira fase de carregamento, i.e., os valores de $(H/D)_i$. Esse critério foi utilizado tendo em vista que a referência para o processo de adensamento deve ser sempre o enterramento imediatamente anterior à colocação da primeira sobrecarga. Os resultados mostraram uma tendência

praticamente linear à medida que a razão de enterramento aumenta. Em relação às fases sucessivas, as forças normalizadas diminuíram, também mantendo a mesma tendência da fase 2, com pequena diferença entre as fases 3 e 4.

Assumindo um valor de $\overline{F}_1 = 5$ para os dados apresentados na Figura 7 referentes à fase 2, a Equação (5) pode ser escrita como:

$$F_1 = 5 \frac{\Delta\sigma_v \cdot D}{(H/D)_e} \quad (5)$$

Adotando-se uma regressão linear para os dados referentes à fase 2 apresentados na Figura 8, chega-se à Equação (6). Substituindo a Equação (3) na Equação (6), chega-se à Equação (7).

$$\overline{F}_C = 0,0083(H/D)_i + 3,65 \quad (6)$$

$$F_C = 38,61 \frac{\Delta\sigma_v \cdot D \cdot S_u \cdot m_v}{(H/D)_i} e^{0,0083(H/D)_i} \quad (7)$$

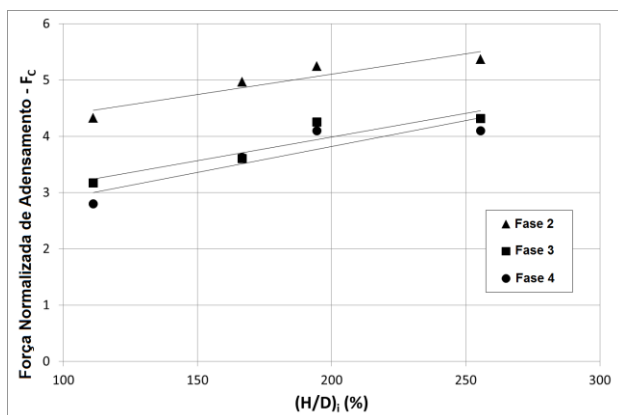


Figura 8. Forças de consolidação normalizadas versus a razão de enterramento.

As Equações (6) e (7) podem ser usadas para se obter os valores das forças imediatas (FI) e de adensamento (FC) em situações semelhantes àquelas apresentadas na fase 2 do presente trabalho, i.e., no caso de um aterro arenoso construído sobre uma camada de argila compressível. Contudo, camadas de aterro sucessivas (fases 3 e 4) requerem outras equações.

Finalmente, as equações apresentadas nesse trabalho foram baseadas nos resultados de

ensaios em uma mistura de caulim e areia. Maiores investigações são necessárias para validar o seu uso em outros tipos de argila.

6 CONCLUSÕES

De maneira geral, os métodos simplificados apenas consideram o peso de solo acima da geratriz do duto, o que não considera o fato de que, quanto mais profundo o duto está, menor a influência dos esforços induzidos na superfície do terreno. Além disso, as forças de adensamento também não são consideradas, o que pode ser bastante relevante em muitos casos.

Duas equações são propostas para a estimativa das forças imediatas e de adensamento devidas à sobrecarga de aterros arenosos.

Finalmente, as equações apresentadas aqui foram baseadas em resultados em um solo composto de uma mistura de caulim e areia e devem ser utilizadas com as devidas reservas. Maiores investigações são necessárias para validar seu uso em outros tipos de argila.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Pablo Cesar Trejo Noreña pelo apoio na realização dos ensaios, bem como ao CENPES-PETROBRAS pelo apoio financeiro e suporte ao longo da realização dos presentes ensaios.

REFERÊNCIAS

- ASCE (2005): Guidelines for the design of buried steel pipe. In: A.L. Alliance (Editor), American Society of Civil Engineers, pp. 76.
- O'Rourke, T.D., Turner, J.E., Jeon, S-S., Stewart, Y., Wang, Y. & Shi, P. (2005) Soil-structure interaction under extreme loading conditions. In: T.A.M. University (Editor), The Thirteenth Spencer J. Buchanan Lecture. November 2005, USA, pp. 9-35.
- Thusyanthan, N.I., Ganesan, S.A., Bolton, M.D. & Allan, P. (2008) Upheaval buckling resistance of pipelines buried in clayey backfill. The Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference 2008, Vancouver, Canada, pp. 174-180.