

Influência de Reforço Geossintético no Comportamento de Dutos Enterrados

David Fernando Bernal Acosta

Coordenador de projetos, Bogotá, Colômbia, daferbernal@gmail.com

Ennio Marques Palmeira

Professor Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, palmeira@unb.br

RESUMO: A utilização de dutos enterrados vem sendo uma das técnicas mais adotadas na solução do transporte de hidrocarbonetos. A demanda do mercado global de óleo e gás nas áreas offshore e onshore precisa de sistemas e linhas de transporte que possam garantir segurança e confiabilidade, evitando que os diferentes esforços que atuam nas tubulações enterradas gerem fenômenos que produzam danos e/ou rupturas, com elevados custos ambientais e econômicos. O presente trabalho visou estudar a utilização de geossintéticos como elementos para a ancoragem de dutos enterrados. Foram utilizados diferentes elementos de reforço simulando geogrelhas em ensaios em modelos físicos. Os reforços foram caracterizados e posteriormente utilizados em testes de ancoragem em dutos enterrados. Foram avaliadas diferentes configurações geométricas de ancoragem do reforço. Os resultados obtidos mostraram que a utilização de reforço geossintético aumentou significativamente a resistência à movimentação vertical do duto (em alguns casos mais que dobrou).

PALAVRAS-CHAVE: Geossintéticos, Ancoragem de Dutos Enterrados, Reforço de tubulações

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda de hidrocarbonetos no mundo tem levado o homem a desenvolver metodologias e sistemas de exploração de óleo em bacias no mar. O Brasil conta com grandes reservas de petróleo que vêm sendo exploradas em todo o país. Neste contexto, a indústria brasileira precisa de métodos e ferramentas para melhorar o transporte e armazenamento de hidrocarbonetos, tanto na área offshore (atividades no mar) como onshore (atividades em terra firme).

A demanda do mercado global de óleo e gás requerem sistemas de transporte por dutos que possam garantir segurança e confiabilidade, evitando que os diferentes esforços que atuam nas tubulações enterradas gerem fenômenos que produzam danos e/ou rupturas, com elevados custos ambientais e econômicos.

Atualmente, dependendo da distância a ser percorrida desde o ponto de extração até o ponto de armazenamento, a utilização de dutos

enterrados é uma das técnicas mais empregadas na indústria petrolífera. Uma correta instalação das tubulações vai ser um fator chave para garantir a segurança. A Figura 1 apresenta os problemas que podem afetar os dutos enterrados. Os dutos enterrados podem movimentadas verticalmente por mecanismo de flambagem ou flutuação. Tais movimentos podem provocar danos a tais dutos.

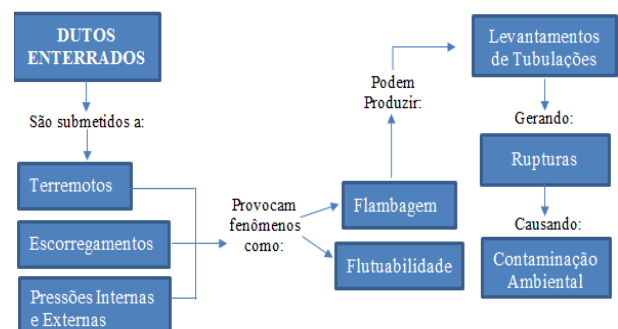


Figura 1 Fenômenos deletérios a dutos enterrados, Bernal (2014)

Segundo Trautmann *et al.* (1985), o mecanismo de ruptura de um maciço não reforçado por movimentação vertical pode ser

aproximadamente considerado como ocorrendo ao longo de duas superfícies de ruptura verticais paralelas e tangentes à tubulação. A capacidade última de carregamento numa seção de duto enterrado num maciço foi estudado por vários autores (Meyerhof e Adams 1968, Trautmann *et al.* 1985, Friedmann 1986, Schaminée *et al.* 1990 e Byrne *et al.* 2012), com mecanismos de ruptura simplificados similares ao apresentado na Figura 2. Entretanto, tais trabalhos versaram sobre dutos enterrados sem a presença de reforço.

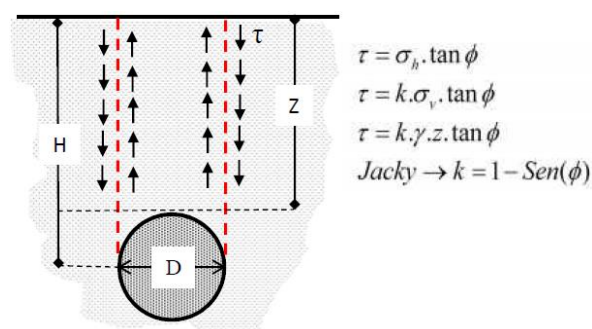


Figura 2 Mecanismo de ruptura simplificado admitido por alguns métodos num maciço granular sem reforço.

2 EQUIPAMENTO E MATERIAIS

Foi desenvolvida uma campanha de ensaios em modelos físicos em laboratório. A seguir são descritos os materiais e equipamento utilizado no programa de ensaios.

2.1 Equipamento

Para a realização dos testes foi necessário empregar uma caixa de ensaios e uma estrutura de reação que permitisse aplicar o carregamento sobre o duto. O equipamento é apresentado na figura 3. O sistema de carga empregado nesta pesquisa baseia-se num sistema similar aos desenvolvidos por Trautmann *et al.* (1985) e Byrne *et al.* (2008). Este incluiu: duas vigas, sendo uma fixa que serve de estrutura de reação e outra móvel que desloca-se para cima ao longo de duas barras guias. A caixa de ensaios possui uma face de vidro transparente na qual foi desenhada uma malha com elementos quadrados 5 cm x 5 cm que auxiliaram na medição de deslocamentos do solo. O volume da caixa é de aproximadamente 0,375 m³.

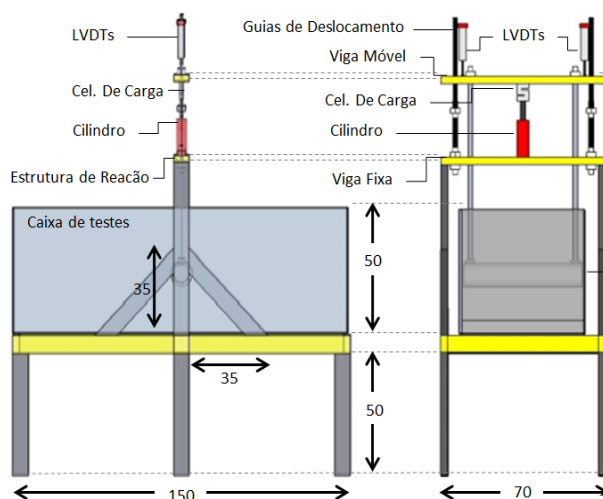
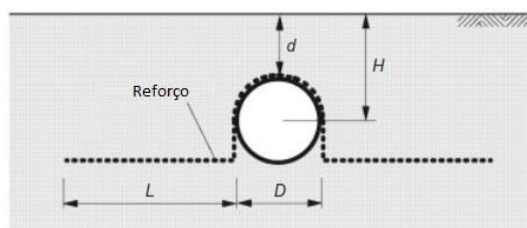


Figura 3 Equipamento utilizado nos ensaios (Bernal, 2014)

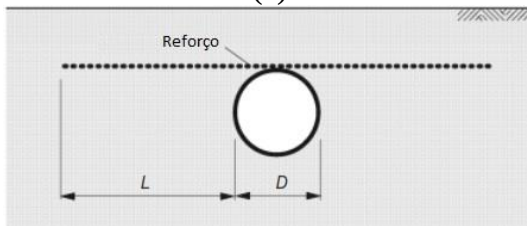
Foram utilizadas linhas horizontais de areia (mesma areia do ensaio) colorida para a identificação de mecanismos de ruptura na massa de solo. Para a colocação da areia colorida aproveitou-se a face transparente da caixa de ensaios e isto permitiu simetria nas camadas finas de areia colorida nas diferentes profundidades.

Em todos os ensaios utilizou-se uma célula de carga e dois medidores de deslocamentos verticais cujas posições foram as mesmas em todos os testes. Os registros fornecidos ao longo de todos os testes permitiram comparar o deslocamento num maciço com e sem reforço geossintético. Para coletar os dados fornecidos por cada um dos instrumentos utilizados nesta pesquisa empregou-se um sistema de aquisição de dados.

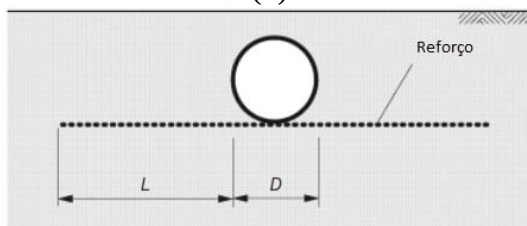
Tendo em vista os diferentes processos construtivos para os dutos enterrados *offshore* e *onshore*, ensaiaram-se configurações possíveis para a instalação do reforço. A Figura 4 apresenta as configurações utilizadas para os reforços de modo a aumentar a resistência à movimentação vertical do duto enterrado. As 5 configurações apresentadas na Figura 4 foram testadas com diferentes tipos de reforço.



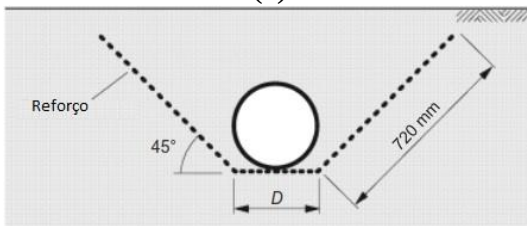
(a)



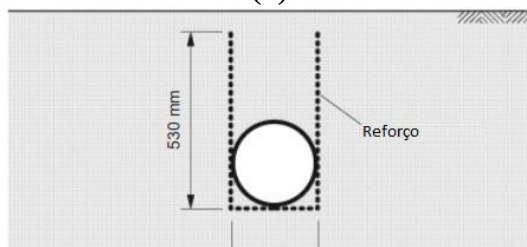
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4 Arranjos e configurações geométricas do reforço (a) Configuração 1, (b) Configuração 2, (c) Configuração 3, (d) Configuração 4, (e) Configuração 5.

2.2 Materiais

2.2.1 Solo

O solo empregado nos testes foi uma areia fina uniforme. A escolha da areia utilizada foi efetuada de tal forma a diminuir o efeito de escala no que se refere à relação entre o diâmetro do duto utilizado e o diâmetro médio dos grãos de areia. Os ensaios foram realizados sob

condições secas, levando-se em conta os resultados e recomendações apresentadas por Byrne *et al.* (2008).

O solo foi submetido a ensaios de granulometria por peneiramento (NBR 7181), obtendo-se um coeficiente de uniformidade (CU) igual a 1,8. Para sua caracterização mecânica foram realizados ensaios de resistência ao cisalhamento com tensões normais que permitiram obter a envoltória de resistência compatível com as tensões esperadas nos ensaios em modelos.

Tabela 1 Propriedades do solo, (Bernal, 2014).

PARÂMETRO	RESULTADO
D ₁₀ (mm)	0,16
D ₅₀ (mm)	0,27
D ₈₅ (mm)	0,39
CU	1,8
Peso específico (kN/m ³)	16,1
Ângulo de atrito (°)	35

Empregou-se o método da chuva de areia na confecção do aterro para cada um dos testes, de forma a se obter uma massa de areia no estado fofo.

2.2.2 Geossintéticos

Para a pesquisa foram empregados três tipos de materiais de reforço para a ancoragem do duto no maciço. Para a caracterização destes materiais foram realizados ensaios de tração de faixa larga. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 2 Propriedades do Reforço, (Bernal, 2014).

REFORÇO	J _{5%} (kN/m)	ε _{max} (%)	T _{max} (kN/m)
GG1	250	7,3	17
GG2	129	9,2	11,1
GG3	5	50	0,99

J = Rigidez secante a 5% de deformação; ε_{máx.} = Deformação na ruptura; T_{máx.} = Resistência à tração. Os resultados obtidos dos ensaios de tração de faixa larga para cada tipo de reforço foram realizados segundo a norma NBR 12824.

Os reforços se assemelharam a geogrelhas e as suas aberturas variaram de 1 mm x 1 mm a 20 mm x 20 mm. Os materiais foram escolhidos levando em conta propriedades que permitissem

simular reforços usais no caso de protótipos, face ao fator de escala dos ensaios.

2.2.3 Duto

O tubo empregado nesta pesquisa foi escolhido pensando na escala do ensaio e nas propriedades principais dos dutos empregados na indústria de transporte de petróleo e gás. Segundo Telles (1997), entre todos os materiais industriais existentes, o aço carbono é o que apresenta menor relação custo/resistência mecânica, além de ser um material fácil de soldar, sendo também fácil de ser encontrado no comércio.

O diâmetro (D) do duto dos testes foi de 76,5 mm. Na maioria dos casos, o diâmetro de dutos empregados na indústria de petróleo variam entre 200 mm e 500 mm. No caso do presente trabalho o fator escala adotado foi de 4, o que simularia um duto de diâmetro 300 mm em uma situação real.

3 RESULTADOS

2.3 Maciço não reforçado

Foram feitos três (3) ensaios avaliando a condição sem reforço. Como se pode observar na Figura 4, os resultados dos testes feitos sem reforço visando obter a capacidade última de arrancamento do duto apresentou repetibilidade muito boa. Estes resultados permitem inferir que a metodologia adotada na preparação dos ensaios foi adequada.

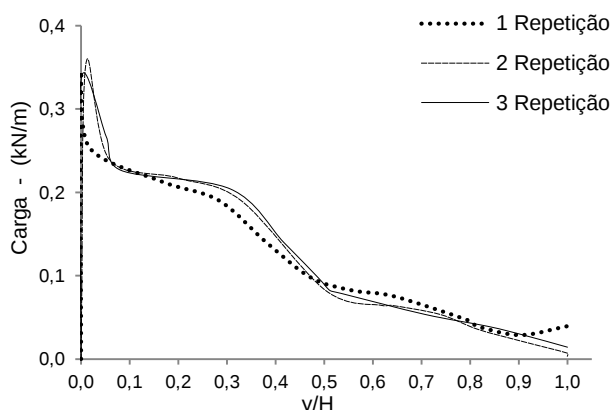


Figura 4 Ensaios Sem Reforço

A carga máxima média de arrancamento do duto obtida a partir dos três ensaios da Figura 5 foi de 0,34 kN/m, obtida para a relação $y/H = 0,01$, onde y é o deslocamento vetical do duto e H é a profundidade do centro do duto.

Foram realizadas estimativas de carga máxima de arrancamento teóricas para a situação sem reforço, utilizando-se métodos presentes na literatura. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3. O resultado obtido no ensaio sem reforço com um duto enterrado a uma profundidade de 15 cm foi de 0,34 kN/m. Comparando as previsões teóricas (Tabela 3) com os dados obtidos experimentalmente, se observa uma diferença de apenas 4% entre as previsões pelos métodos de Trautmann *et al.* (1985) e de Byrne *et al.* (2012) e o resultado experimental.

Tabela 3 Resultados Analíticos de cargas picos em dutos enterrados em aterros sem reforço

AUTOR	EQUAÇÃO	
Meyerhof e Adams	$F_{ult} = \gamma ZDL \left(1 + \frac{H}{D} \cdot K \cdot \tan(\phi) \right)$	0,39
Ladanyi e Hoyaux	$F_{ult} = \gamma HDL \left(1 + \frac{H}{2D} \cdot \text{Sen}(2\phi) \right)$	0,49
Trautmann <i>et al.</i>	$F_{ult} = \left[1 - \frac{\pi D}{8H} + \frac{H}{D} K \tan \phi' \right] \gamma' HDL$	0,36
Byrne <i>et al.</i>	$F_{ult} = \gamma' HDL - \gamma' \frac{\pi D^2}{8} L + \gamma' H^2 L K \tan \phi'$	0,36

2.4 Avaliação da influência do comprimento do reforço

Após conhecer a resistência do teste de referencia (sem reforço), foi avaliada a influência do comprimento do reforço geossintético (L). No caso deste trabalho foram testados três valores de L, sendo $L = D$, $L = 2D$ e $L = 3D$, onde D é o diâmetro do duto.

A Figura 5(a) mostra que as cargas de arrancamento em ensaios com reforço na Configuração 1 (Fig. 4) chegaram a ser mais do dobro da resistência do ensaio sem reforço, dependendo do comprimento de reforço utilizado para o arranjo ensaiado.

Embora também se observe ganhos de resistência ao arrancamento em relação à situação sem reforço, a contribuição deste foi menor no caso de reforço horizontal sobre o duto (Fig. 6b).

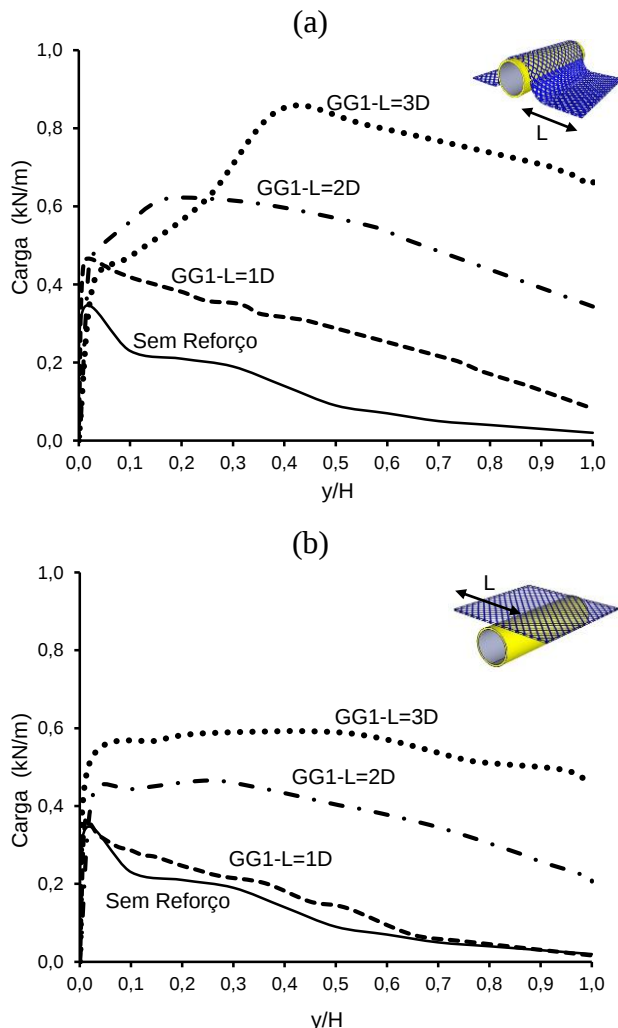


Figura 5 Avaliação do comprimento de reforço (a) Configuração 1 (b) Configuração 2.

A Figura 6 apresenta uma relação aproximadamente linear entre a carga máxima de arrancamento e o comprimento do reforço para os dois arranjos de instalação do reforço esquematizados nas Figuras 4 e 6.

O ponto limite mostrado na Figura 7 indica o comprimento abaixo do qual o reforço não contribui mais para o aumento da resistência ao arrancamento do duto. Este ponto foi obtido a partir dos resultados do ensaio sem reforço.

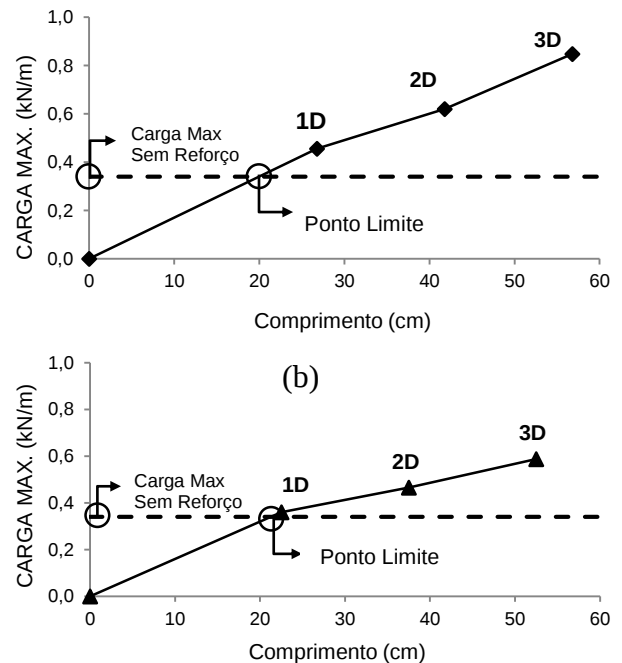
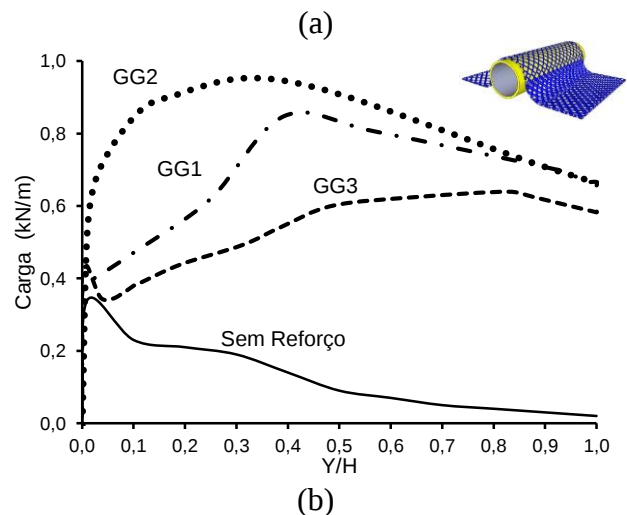


Figura 6 Relação comprimento dos reforços – carga de arrancamento máxima (a) Configuração 1 (b) Configuração 2 (ver Fig. 6).

2.5 Influência da configuração do reforço

As Figuras 9(a) a (e) apresentam resultados de ensaios para diferentes configurações do reforço. O valor da carga máxima na configuração 1 com o reforço GG2 (Figura 7 – (a)) foi 2,8 vezes maior que o obtido na situação sem reforço. A forma da curva para o reforço GG2 sugere que a interação solo – reforço e mobilização de força no reforço neste caso ocorreu desde o início do ensaio. Observa-se também que as cargas de arrancamento ao final dos ensaios reforçados na configuração 1 foram muito superiores à do ensaio sem reforço.



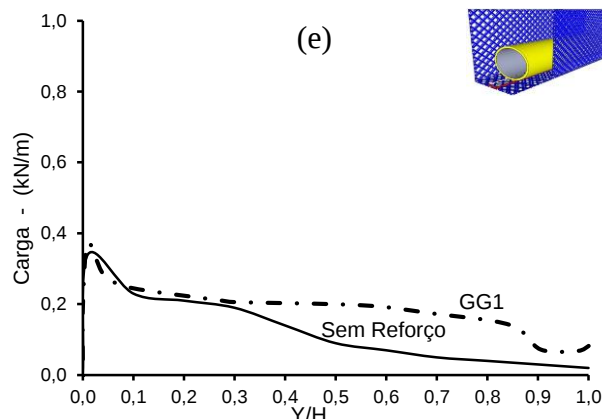
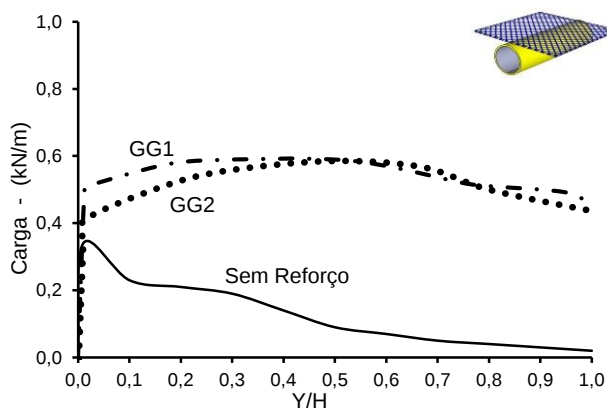
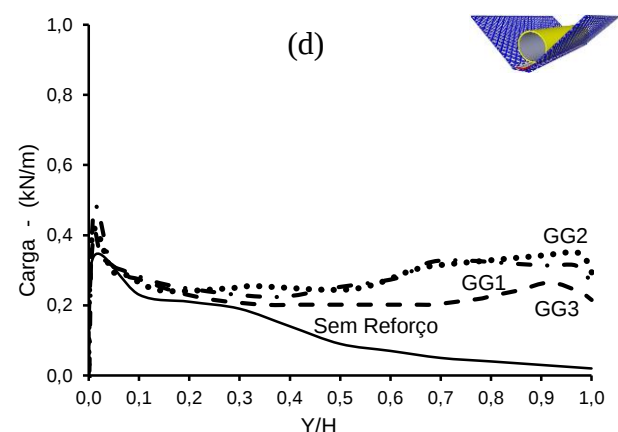
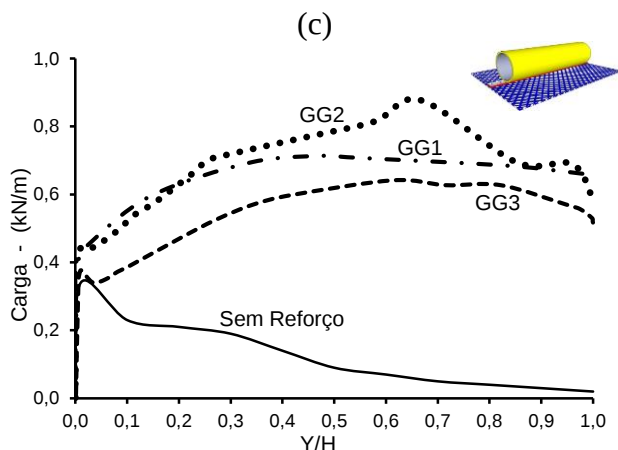


Figura 7 Resultados da avaliação da configuração geométrica e arranjo do reforço (a) Configuração 1, (b) Configuração 2, (c) Configuração 3, (d) Configuração 4, (e) Configuração 5



Na configuração 2 (Figura 7b), os resultados apresentam um comportamento semelhante para os dois reforços testados, GG1 e GG2.

Na configuração 3 (Figura 7c) a carga máxima no ensaio com o reforço GG2 ocorreu para um deslocamento normalizado y/H igual a 0,7. Ao final do ensaio os três reforços apresentam resultados semelhantes.

Para a configuração 4 (Figura 7d) só se observou contribuição mais significativa do reforço ao final do ensaios, para elevados valores de y/H .

A configuração 5 foi a que apresentou a menor contribuição para o aumento da carga de arrancamento do duto. Entretanto, também se observam maiores valores de carga de arrancamento ao final do ensaio em relação à situação sem reforço.

A Tabela 4 sumaria os resultados obtidos e os ganhos de resistência ao arrancamento nas situações com reforço em relação a situação não reforçada.

Tabela 4 Resumo dos resultados atingidos com as diferentes configurações propostas

CONFIGURAÇÃO										
REFORÇO	1		2		3		4		5	
	Carga kN/m	Aumento %	Carga kN/m	Aumento %	Carga kN/m	Aumento %	Carga kN/m	Aumento %	Carga kN/m	Aumento %
GG1	0,85	150	0,59	73	0,71	110	0,47	37	0,37	10
GG2	0,95	180	0,59	72	0,88	158	0,42	23	---	---
GG3	0,64	88	---	---	0,64	89	0,40	19	---	---

3 CONCLUSÕES

Com relação ao desempenho de dutos enterrados sem e com reforço no maciço, pode-se concluir que:

- A presença de reforços melhora significativamente os valores de carga necessária para a movimentação vertical do duto enterrado. As cargas máximas foram linearmente dependentes do comprimento do reforço empregado.
- A efetividade da ancoragem do material geossintético dependeu do tipo de geossintético e configuração de instalação. A Configuração 1 foi a que resultou em maiores cargas para a movimentação vertical do duto.
- O geossintético que melhor se comportou foi aquele em que não se verificou a passagem de grãos de solo por suas aberturas durante o ensaio.
- Os resultados obtidos sugerem que a utilização de reforço geossintético pode melhorar o desempenho de dutos enterrados no que se refere a evitar ou minimizar a sua movimentação vertical provocada por flutuação ou flambagem.

REFERÊNCIAS

BERNAL, D. F. A (2014). Estudo em Modelos do Comportamento de Dutos Enterrados Ancorados por Geossintéticos. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-238/2014, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 87 p

BYRNE, B.W.; SHUPP, J.; MARTIN, C.M.; MACONOCHIE, A.; OLIPHANT, J.; & CATHIES, D. (2008). Experimental Modeling of the Unburial Behaviour of Pipelines. Offshore Technology Conference OTC 19573, Houston, Texas, U.S.A. 13 p.

BYRNE, B.W.; SHUPP, J.; MARTIN, C.M., MACONOCHIE, A.; OLIPHANT, J.; & CATHIES, D. (2012). Uplift of shallowly buried pipe sections in saturated very loose sand. *Géotechnique*, 9 p.

FRIEDMANN, Y. (1986) Some aspects of the Design of Buried Hot Pipelines, European Seminar, Offshore Oil

and Gas Pipeline Technology.

LADANYI, B. & HOYAUX, B. (1969). A study of the Trap-Door problem in a granular mass. *Canadian Geotechnical Journal*, 6: 1-14.

MANUAL BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS (2004). Coordenador José Carlos Vertematti. Editora: Edgard Blucher, São Paulo SP 413 p.

MEYERHOF, G.G. & ADAMS, J.I. (1968). The ultimate uplift capacity of foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, 5: 225-244.

SCHAMINÉE, P.E.L.; ZORN, N.F. & SCHOTMAN, G.J.M. (1990). Soil Response for Pipeline upheaval buckling analyses: Full-Scale Laboratory and Modelling. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, U.S.A. 10 p.

TELLES, P.C.S. (1997). *Tubulações Industriais*. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, RJ, 9a Edição, 251 p.

TRAUTMANN, C.H.; O'ROURKE, T.D. & KULHAWY, F.H. (1985). Uplift Force-Displacement Response of Buried Pipe. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(9), 1061–1076.

PALMEIRA, E.M. & MILLIGAN, G.W.E. (1989). Scale and other factors affecting the results of pullout test of grids buried in sand, *Geotechnique*, 39(3): 511-524.

PALMEIRA, E.M. & BERNAL, D.F. (2015). Uplift resistance of buried pipes anchored with geosynthetics, *Geosynthetics International*, volume 22 issue 2, 149-160.