

## **ENSAIOS DE CENTRIFUGAÇÃO: EXEMPLO DE APLICAÇÕES EM ÁREAS DE INTERESSE DE PETRÓLEO E GÁS**

*Vieira, L.D.<sup>1</sup>, Albuquerque Júnior, F.S.<sup>2</sup>, Santiago, P.A.C<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>UENF/ Laboratório de Engenharia Civil, larissadillem.uenf@gmail.com

<sup>2</sup>UENF/Laboratório de Engenharia Civil, saboya@uenf.br

<sup>3</sup>UENF/ Laboratório de Engenharia Civil, pcardoso\_eng@hotmail.com

**Resumo** - Os dutos de petróleo ou gás são, na maioria das vezes, enterrados para fornecer estabilidade ambiental, isolamento térmico e proteção mecânica. Em muitos casos os dutos submetidos a elevados níveis de temperatura e pressão, sofrendo, assim, deformações consideráveis. O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento dos dutos enterrados, em relação ao quanto de ancoragem é fornecida pelo solo de reaterro para evitar esses movimentos ascendentes que possa resultar em acidentes ambientais de graves consequências. Foram executados ensaios de arrancamento dos dutos, com dimensões reduzidas, a 1G e na centrífuga geotécnica a 10G, com diferentes densidades de areia e largura das geogrelhas.

**Palavras-chave:** Centrífuga, geotécnica, dutos.

**Área do Conhecimento:** Engenharia Civil - Geotecnia

### **Introdução**

Dutos que transportam gás ou óleo, sejam off-shore ou on-shore, são geralmente enterrados visando evitar problemas de isolamento térmico, proteção mecânica e em alguns casos, interferência em atividades pesqueiras. Esses dutos, geralmente sujeitos a operarem em temperaturas e/ou pressão elevadas, são leves em relação ao peso das camadas de reaterro e tendem a sofrer deformações verticais consideráveis, devido a forças advindas das pressões de bombeamento e da elevação de temperatura.

Existem muitos problemas relacionados à estabilidade de gasodutos quando sujeitos a subpressões, devido à subida do nível d'água do terreno. Neste caso, devem ser estudadas propostas para estabilização do gasoduto através de novas geometrias de lastro para aproveitar o peso do solo subjacente que preenche a vala.

O presente estudo realizado na oficina de modelagem física do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense, propôs uma análise comparativa da resistência ao levantamento entre dutos enterrados em areia ancorados a uma geogrelha e outro sem ancoragem.

### **Metodologia**

Para os ensaios foi utilizada uma caixa teste de alumínio aeronáutico pesando 160 Kg, com uma das faces em acrílico de modo a possibilitar a visualização do modelo. A caixa teste possui dimensões internas de 70 cm de comprimento, 25 cm de largura e 50 cm de altura.

Os dutos são representados por tarugos em alumínio aeronáutico, com diâmetro de 5 cm, 20 cm de comprimento e peso de 1096,38g.

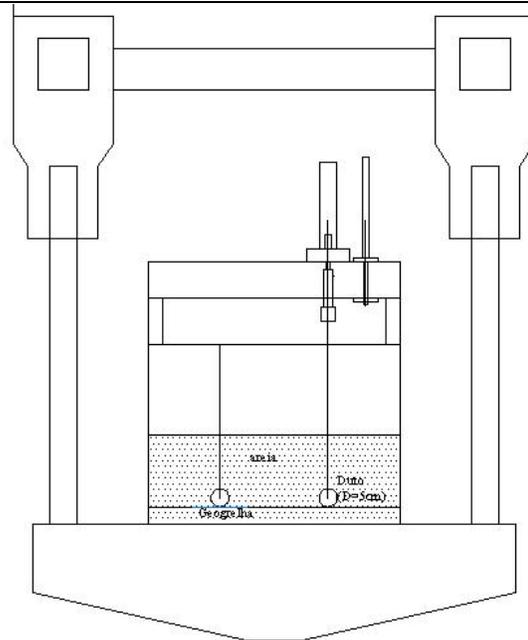
Os modelos foram preparados utilizando uma areia normatizada, comercializada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). A

areia foi lançada por gravidade na caixa teste antes do modelo ser acelerado na centrífuga, utilizando um pluviador, o que proporciona uma distribuição em camadas uniformes do material. Um sumário de algumas propriedades físicas do material é apresentado na tabela 1. A altura (H) de aterro utilizada em todos os testes foi de 3D (H=15cm) contando a partir do topo do duto.

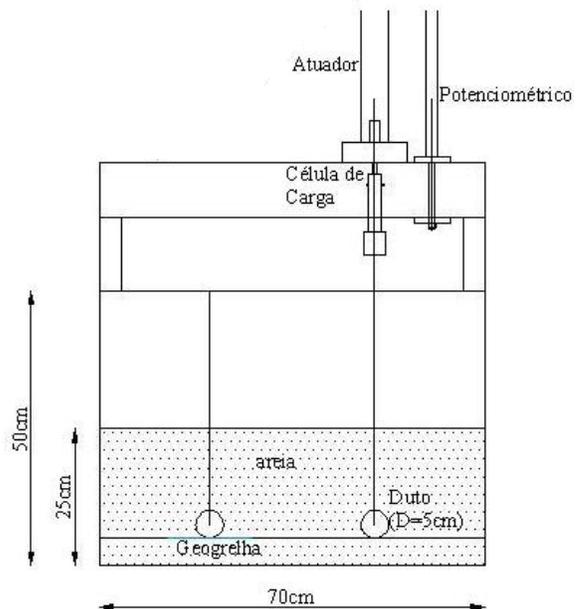
**Tabela 1 - Propriedades Físicas da Areia IPT**

Propriedade	Valor
Diâmetro Efetivo $D_{10}$	0,2776mm
Peso Específico dos grãos	2,67 g/cm <sup>3</sup>
Índice de vazios mínimo	0,725
$e_{min}$	
Índice de vazios máximo	1,063
$e_{max}$	
Ângulo de atrito	43°

Um esquema ilustrativo do ensaio é apresentado na Figura 1, mostrando a caixa de teste no cesto da centrífuga e na figura 2 mostrando o posicionamento dos dutos, a altura de aterro, a ancoragem da geogrelha, o posicionamento do atuador e da célula de carga.



**Figura 1 - Esquema do Ensaio na Centrífuga.**



**Figura 2 - Representação ilustrativa da montagem do modelo.**

Foram realizados oito testes de arrancamento acelerados a 10G, com o objetivo de se

determinar a resistência ao arrancamento de dutos enterrados. Um único duto era arrancado a cada rodada da centrífuga. Dois testes foram feitos com um duto ancorado a uma geogrelha de largura 3D, dois com um duto ancorado a uma geogrelha de largura 2D, e quatro somente com os dutos enterrados.

Os dutos foram arrancados por um atuador hidráulico controlado a uma velocidade constante, a força foi medida por uma célula de carga com capacidade máxima de 490,33N e o deslocamento vertical foi medido por um potenciômetro. Para as séries de ensaios foi utilizada areia normalizada como material de aterro em duas densidades relativas diferentes (70% e 23%). Um sumário dos testes é apresentado na tabela 2.

**Tabela 2 - Detalhamento de cada ensaio**

Ref. no.	Geogrelha	Densidade Relativa do Material
P1	3D	70%
P2	2D	70%
P3	-	70%
P4	-	70%
P5	3D	23%
P6	2D	23%
P7	-	23%
P8	-	23%

### Resultados

Muitos testes têm sido conduzidos para investigar a resistência ao levantamento e um mecanismo de ruptura correspondente. A resistência normalizada pode ser expressa por:

$$Q = F^*/L \quad (1)$$

onde Q é a resistência ao levantamento por unidade de comprimento do modelo duto durante os testes, F\* é a força de levantamento menos o peso dos mecanismos de levantamento e o peso do duto e L o comprimento do duto.

Por comparação com a equação (1) o Q\* pode ser rearranjado como:

$$Q^* = Q / (D \gamma H) \quad (2)$$

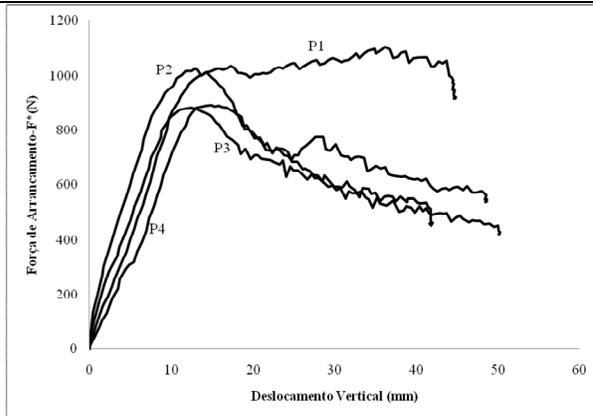
Onde D é o diâmetro do duto,  $\gamma$  é o peso específico do solo e H é a profundidade em que o modelo duto está enterrado medindo do topo até a superfície.

### Testes P1-4

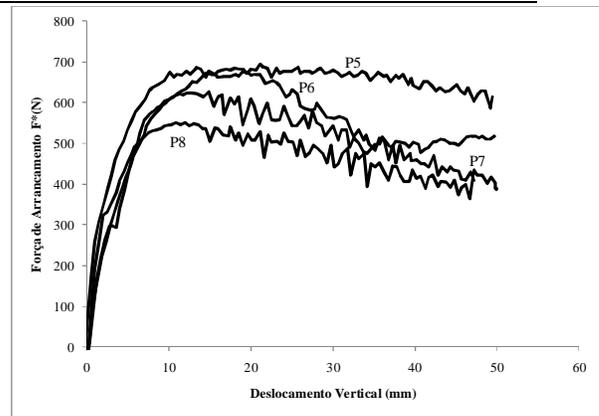
Os testes P1-4 foram executados com o solo na densidade relativa de 70%. O teste P1 apresenta uma força de levantamento de pico (F\*) de 1106,66 N enquanto que no teste P2 a força de levantamento de pico (F\*) foi de 102614 N. As geogrelhas ancoradas aos dutos favoreceram um ganho de resistência, sendo que para a geogrelha de largura 3D o ganho foi de aproximadamente 7,8% em relação a geogrelha de largura 2D, para esta configuração de solo denso. Em relação aos dutos simplesmente enterrados sem ancoragem o ganho de resistência foi de aproximadamente 25%. Os resultados destes testes são apresentados na tabela 3 e na figura 3.

**Tabela 3 - Resumo dos Resultados**

Ref. no.	Pico F* (N)	Pico Q*	$\delta w/D$
P1	1106,66	0,505	0,765
P2	1026,14	0,468	0,296
P3	882,92	0,403	0,278
P4	892,07	0,407	0,335



**Figura 3 - Curvas de Força Vertical Normalizada.**



**Figura 4 - Curvas de Força Vertical Normalizada.**

Testes P5-8

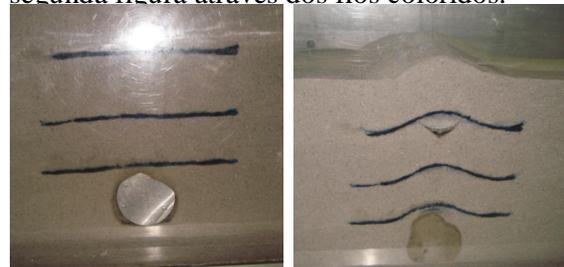
Os testes P5-8 foram executados em solo com a densidade relativa de 23%. O teste P5 apresenta uma força de levantamento de pico ( $F^*$ ) de 695,2 N enquanto que o teste P6 apresenta uma força de levantamento de pico ( $F^*$ ) de 685,86 N. Nesta configuração de solo fofo, a ancoragem da geogrelha de largura 3D tem um ganho de resistência de aproximadamente 1,5% em relação a ancoragem da geogrelha de largura 2D. Com relação aos dutos simplesmente enterrados sem ancoragem, o ganho de resistência foi de aproximadamente 26%. Os resultados destes testes são apresentados na tabela 4 e na figura 4.

**Tabela 4 - Resumo dos Resultados**

Ref. no.	Pic o $F^*$ (N)	Pico $Q^*$	$\delta w/D$
P5	695,2	0,345	0,431
P6	685,86	0,341	0,285
P7	627,33	0,312	0,312
P8	551,54	0,274	0,272

**Discussão**

A figura 5 mostra o deslocamento do solo durante o ensaio de arrancamento do duto. A primeira figura mostra o duto em repouso antes do início do ensaio, já a segunda figura mostra todo deslocamento de solo por onde o duto passou. Durante o arrancamento, o duto mobiliza uma superfície de ruptura bem característica que pode ser observada na segunda figura através dos fios coloridos.

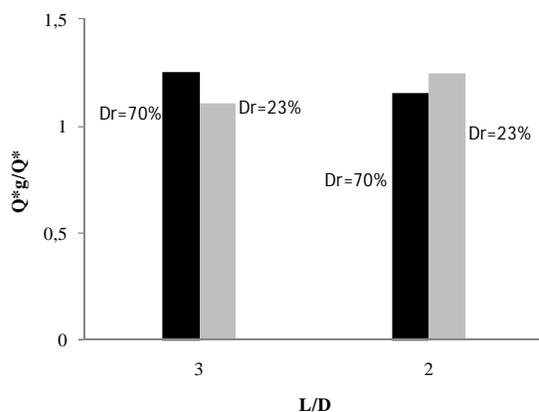


**Figura 5 – Deslocamento do solo.**

Na figura 6 é apresentado o resultado da relação entre a resistência normalizada do duto com  $Q_g^*$  e sem ancoragem  $Q^*$ . Esta figura demonstra a eficiência da ancoragem da geogrelha em dois estados da areia, ou seja, fofo e densa. Pode-se observar que quando se utiliza a resistência de pico  $F^*$ , a geogrelha ancorada na base dos dutos, melhora a resistência ao arrancamento.

Para a geogrelha de largura 3D a melhor eficiência se encontra para o solo no estado denso, enquanto que para a geogrelha de largura 2D a melhor eficiência se encontra no solo em estado fofo. Esta diferença de resultados entre as geogrelhas, pode-se atribuir a massa de solo mobilizada pela geogrelha maior no estado denso.

Os resultados aqui apresentados, apesar de ainda estarem restritos a análises laboratoriais, são promissores como uma medida simples, barata e direta para melhorar a resistência à elevação dos tubos enterrados.



**Figura 6 - Eficiência da ancoragem da geogrelha.**

### Conclusão

A resistência de dutos enterrados em areia tem sido muito estudada. Muitos estudos colocam materiais pesados como sobrecarga para aumentar a resistência ao levantamento dos dutos. No trabalho apresentado a proposta foi usar uma geogrelha ancorada ao duto para aumentar a resistência ao levantamento.

Os resultados apresentados mostram um grande ganho de resistência quando os dutos enterrados são ancorados com geogrelha.

### Referências

BRANSBY, M.F., NEWSON, T.A., BRUNNING, P., DAVIES, M.C.R. (2002). Physical Modelling of the Uplift Resistance of Buried Offshore Pipelines. Proc. ICPMG, St. Johns

CHIN, E. L., CRAIG, W. H., AND CRUICKSHANK, M. 2006. "Uplift resistance of pipelines buried in cohesionless soil." *Proc., 6th Int. Conf. on Physical Modelling in Geotechnics*. Ng, Zhang, and Wang, eds., Vol. 1, Taylor & Francis Group, London, 723–728.

KATONA, M.G. Allowable fill height for corrugated polyethylene pipe. TRB 1191, Transportation Research Board, National Research Council. Washington, DC, 1988.

NG, C.W.W., SPRINGMAN, S.M. Uplift Resistance of Buried Pipelines in Granular Materials. *Centrifuge 94, Leung, Lee & Tan (eds)*, p753-758, 1994.

PHARES, B.M.; WIPF, T.J.; KLAIBER, F. W.; LOHNES, R.A. Behavior of high-density polyethylene pipe with shallow cover. **Transportation Research record** 1624: 214-224, 1998.

ROGERS, C.D.F. The influence of surrounding soil on flexible pipe performance. **Transportation Research Record** 1129: 1-11, 1987.

ROGERS, C.D.F. Some observations on flexible pipe response to load. **Transportation Research Record** 1191: 1-11, 1988.

SCHUPP, J., BYRNE, B. W., EACOTT, N., MARTIN, C.M., OLIPHANT, J., MACONCHIE, A., CATHIE, D. "Pipeline unburial behaviour in loose sand." *Proc., 25th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Hamburg, Germany, OMAE2006-92541, 2006.

TRAUTMANN, C.H., O'ROURKE, T.D., KULHAWY, F.H. Uplift force-displacement response of buried pipe. **J. Geotech. Engrg.**, 111 (9): 1061–1076, 1985.

WHITE, D.J.; BAREFOOT, A.J.; BOLTON, M.D.. Centrifuge Modelling of upheaval buckling in sand. Report-

---

CUED/DSOIL/TR314, Cambridge University,  
2000.