

Instalação de Fundações Profundas em Solos Argilosos para Aplicação Offshore.

David Eduardo Lourenço

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, lourencodavid@gmail.com

Fernando Schnaid

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, fschnaid@gmail.com

RESUMO: A Petrobras utiliza as estacas torpedo metálicas, para ancoragem de plataformas flutuantes no leito oceânico, cuja instalação consiste na queda livre e penetração no solo argiloso marinho por ação da aceleração da gravidade. Este trabalho apresenta uma nova técnica de instalação de âncoras baseada em modelos reduzidos ensaiados para duas escalas de comprimento, correspondendo a relação protótipo/modelo de 1:67 e 1:76. A técnica consiste na instalação de hastes metálicas livres de movimentos pela ação do seu peso próprio e por aplicação de jatos de água verticais, provenientes de tubos metálicos que penetram em solos argilosos. Pretende-se identificar e avaliar a influência do fluxo de água a partir das variáveis: vazão, pressão, velocidade e diâmetro do jato, bem como os efeitos da massa e diâmetro das hastes metálicas. Para esta finalidade desenvolveu-se um aparato experimental em laboratório e utilizando-se solo argiloso artificial representativo de condições observadas na costa brasileira. As observações dos ensaios permitiram caracterizar a instalação das hastes metálicas e os resultados indicaram que as maiores profundidades de penetração das estacas ocorreram em modelos reduzidos de maiores massas, maiores vazões do fluxo de água e menor resistência não drenada. Por meio de análise estatística foi desenvolvida uma equação para prever a profundidade alcançada pelos modelos dos torpedos. Estes resultados permitem uma avaliação inicial da eficiência do jateamento, dos parâmetros de controle do mecanismo de erosão, avanço e profundidade máxima de penetração alcançados pelas hastes em solo argiloso.

PALAVRAS-CHAVE: argilas, estaca torpedo, fundações profundas, hidrojateamento, modelos reduzidos.

1 INTRODUÇÃO

As jazidas de petróleo descobertas em 2006 pela Petrobras no Brasil, trouxeram novos desafios de operacionalização em grandes profundidades. Assim a exploração dessas bacias requer investimento em pesquisa e tecnologia que dê resposta aos diversos problemas associados. Para assegurar condições adversas de produção diversos sistemas tecnológicos de fundações no leito marinho, nearshore e offshore, tem que ser instalados para resistir a esforços solicitados por plataformas, navios, ondas, correntes marinhas, ventos, pressões de gases, corrosão, etc...

A Petrobras utiliza um sistema de ancoragens desenvolvido e patenteado, as estacas torpedo, que servem de fundações a diversos tipos de

estruturas de produção em águas ultra profundas (Medeiros et al., 2000) e (Brandão, 2006). O torpedo é uma estaca preenchida com lastro, apresenta ponta em cone, e é instalado por queda livre, a uma altura de 120m do fundo marinho a partir um navio, descrito por Medeiros et al. (2001) e Medeiros et al. (2002). A Petrobras desenvolve constantes melhorias e adequações da geometria das estacas torpedo (Henriques et al., 2010).

Os trabalhos anteriores de Niven (1998) e Niven e Khalili (1998a) serviram de base à pesquisa assim como os de Mezzomo (2009), Jung (2012) e Stracke (2012), que fixaram hastes metálicas com avanços sucessivos na profundidade, aplicaram jatos de água verticais para remoção de solo, observaram e analisaram as geometrias

das cavidades erodidas que se formaram ao longo da profundidade, e permitiram que a âncora penetrasse no subleito em que tinha ocorrido a remoção do solo, fazendo avançar novamente a haste no subleito de solos arenosos e argilosos.

A inovação da presente pesquisa reside no estudo dos fenômenos da instalação de hastes metálicas de forma livre, não fixadas, em solo argiloso representativo do leito oceânico brasileiro, pela ação dos seus pesos próprios e com recurso a técnicas de hidrojateamento.

1.1 Fluidização

É definida como a suspensão de partículas do solo arenoso devido a um fluxo ascendente de fluido, capaz de criar forças de arrasto suficientes para suportarem o peso próprio das partículas, produzindo uma zona ou leito fluidizado (Leva, 1959).

Os autores Niven e Khalili (1998a) apresentaram diferentes estágios de um ensaio de fluidização com hastes metálicas em areias definidos a partir de profundidades críticas T1, T2 e T3. A profundidade T1 representa o início da instabilidade do jato de água. Na profundidade T2, o leito fluidizado fica metade do tempo com a cavidade submersa fechada e a outra metade do tempo com a cavidade aberta. Na profundidade T3 a cavidade é submersa quase sempre simetria nas cavidades.

1.2 Erosão Hidráulica

Devido ao baixo coeficiente de condutividade hidráulico do solo argiloso, em relação às diferentes velocidades de jateamento, não se verificou ocorrência de leito fluidizado e não há tendência para a formação de cavidade com simetria. A erosão nas argilas com alto índice de vazios, nas pesquisas de Jung (2012) e na presente, ocorre por remoção de massas de solo na fase inicial do jateamento, e erosão partícula a partícula na fase final quando os tubos metálicos avançam em profundidade durante a penetração (Mazureck, 2001).

2 MATERIAIS

2.1 Solo Argiloso

Da mistura ótima encontram-se na Tabela 1 os resultados dos limites de Atterberg e índices de plasticidade, pela NBR 6459, para o solo artificial utilizado em laboratório e se assemelha ao solo natural, que são argilas siltosas normalmente adensadas com fragmentos de conchas.

Tabela 1. Limites de Atterberg do solo artificial utilizado.

Limites de Atterberg	Caulim	Bentonita	Mistura (85% Caulim e 15% Bentonita)
LL (%)	40	533	114
LP (%)	28	92	49
IP (%)	12	440	65

Tal como in situ, em laboratório se pretendeu utilizar a mistura de solo com umidade próxima ao limite de liquidez. Foi caracterizada em várias profundidades pelo ensaio de Palheta, a resistência não drenada para amostras com 100% e 120% de umidade, que serviram como referência para discutir resultados.

Os índices físicos do solo artificial de laboratório resumem-se na Tabela 2.

Tabela 2. Índices físicos e propriedades do solo usado em laboratório para duas umidades distintas.

Propriedade física	Argila A	Argila B
Índice de vazios.	2,83	3,37
Umidade, w.	100%	120%
Peso específico real dos grãos, γ_s (kN/m ³).	26,79	26,79
Peso específico saturado, γ_{sat} (kN/m ³).	14,39	13,85
Peso específico natural, γ_{nat} (kN/m ³).	14,00	13,50
Grau de saturação, S.	0,95	0,96
Resistência não drenada em profundidade, s_u (kN/m ²).	$2,47 \times Z + 0,88$	$0,3 \times Z + 0,41$

Em laboratório foram realizados ensaios de palheta e mini CPTU para caracterizar a resistência não drenada, s_u , do solo artificial em várias profundidades.

As análises granulométricas dos solos naturais fornecidas pela Petrobras e as curvas do solo artificial da presente pesquisa, conforme a NBR 7181, apresentam-se na Figura 1.

Solo artificial e solos de campo da Petrobras

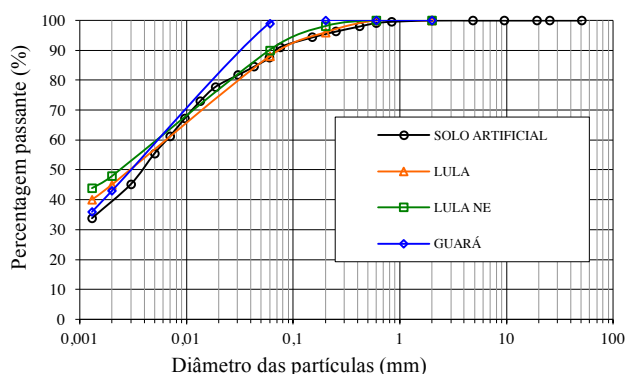


Figura 1. Distribuição das curvas granulométricas.

2.2 Hastes Metálicas

Para utilização nos ensaios foram utilizados 2 tubos de aço carbono com diâmetro interno de 10 e 12mm com bocais de jato rosqueáveis de 1,7 e 3,3mm de diâmetro de jato para os tubos com diâmetro interno de 10mm e ponteiros rosqueáveis de 2 e 4mm de diâmetro para os tubos com diâmetro interno de 12mm. Os tubos, ou hastes, possuem paredes com espessura de 2mm, tendo diâmetros externos 14 e 16mm, respetivamente conforme a Figura 2. Possuem os mesmos diâmetros nominais que os usados nas pesquisas de Mezzomo (2009), Jung (2012) e Stracke (2012). As hastes têm 1050mm de comprimento e uma rosca macho na extremidade superior, para conexão com o adaptador que faz a ligação com uma mangueira flexível ligada a uma rede abastecida por um reservatório de água e um grupo eletrobomba.

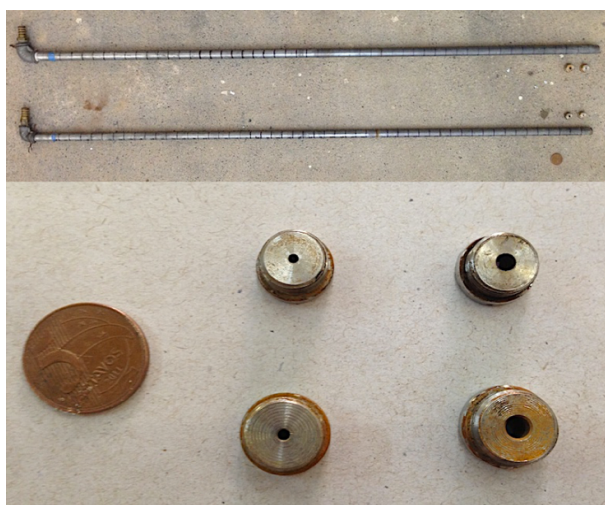


Figura 2. Hastes metálicas e pormenor dos bocais de jato.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Aparato

O aparato experimental com os equipamentos mostra-se na Figura 3. O sistema de contrapeso é usado para garantir a massa desejada em cada ensaio e atritos no eixo das roldanas e destas com o fio de nylon foram desprezados. As dimensões nominais em planta do tanque de acrílico são de 0,45m por 0,45m e altura de 1,1m.

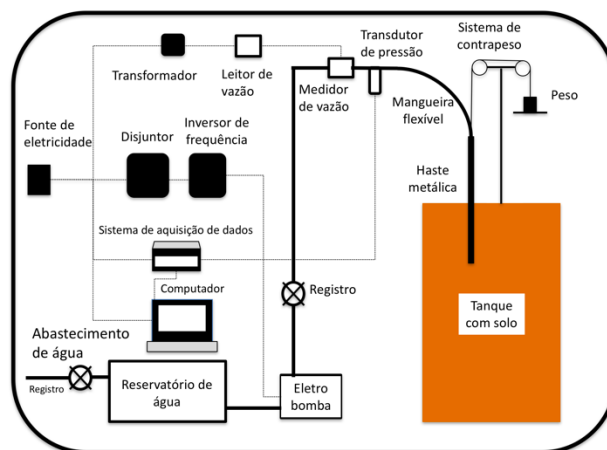


Figura 3. Esquema do aparato experimental.

3.2 Programa

Dadas as condições, e conhecidas as limitações dos equipamentos, estabeleceu-se o programa dos experimentos. Com duas escalas diferentes de comprimento em relação ao diâmetro e escalas de massa derivadas com base na analogia de Froude, ainda se utilizaram dois diâmetros de jato por escala de comprimento e para cada um deles quatro vazões distintas. Totalizam-se dezesseis ensaios por cada um dos dois modelos e repetiram-se os ensaios, totalizando 64 ensaios por lote. Foram realizados dois lotes de ensaios e voltaram a executar-se mais nove ensaios em que houve dúvidas. No total 137 ensaios se consideraram válidos nesta pesquisa. A Tabela 3 apresenta a planificação dos ensaios para os modelos de 66 toneladas. Para o modelo de 120 toneladas, varia apenas a massa, que apresenta 0,275 kg e 0,400 kg em vez de 0,150 kg e 0,220 kg.

Tabela 3. Plano de ensaios para o modelo de 66 toneladas.

Massa do modelo (kg)	Diâmetro Externo, d_e (mm)	Diâmetro do Jato, d_j (mm)
0,150	14	1,7
0,150	14	3,3
0,220	16	2,0
0,220	16	4,0

3.3 Preparação do Solo

A mistura de solo, 85% de caulim e 15% de bentonita, foi preparada num misturador para a humidade inicial de 95% da massa de solo. Foram retiradas amostras para verificação do teor de humidade. Colocou-se o solo no tanque e cobriu-se com uma lâmina de água de 5cm de altura. Ficou em repouso um período de tempo padrão, de 24 horas, o mesmo que Jung (2012).

3.4 Execução dos Ensaios

Por cada mistura de solo foi possível fazer, com rigor, até um máximo de nove ensaios de hidrojetamento por cada mistura. Primeiro conectou-se a haste respectiva com a ponteira do jato no sistema e colocou-se o contrapeso para obter a massa desejada. Posicionou-se no tanque o tubo metálico, alinhado verticalmente, no local de ensaio e manteve-se segura a haste. Ligou-se o inversor e a eletrobomba até ajustar a vazão desejada no visualizador e fez-se a leitura da pressão. Então tubo metálico foi liberado cuidadosamente rente ao leito da argila, e desceu livre até se imobilizar. Executou-se novo ensaio até esgotar a capacidade do tanque. Depois de cada dia de ensaios removeu-se o solo do tanque e misturou-se de novo, evitando o desperdício, uma vez que em média a cada nova mistura após ensaios a umidade aumentou em torno de 3%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Mecanismo de Penetração

Quando começou o ensaio, o jato de água axial remove o solo que se encontra à sua frente, abrindo uma cavidade que permitiu o avanço em profundidade da haste metálica no solo. O material erodido foi carregado pela água. Durante este processo o diâmetro da cavidade erodida observado na superfície não ultrapassou em média dois diâmetros das hastes.

Com o aumento da profundidade de penetração, a velocidade da haste diminuiu até à imobilização completa, deixou de ser possível que a água arrastasse as partículas de solo para fora da cavidade. Quando a haste parou, começou a formação de fraturas hidráulicas verticais, diagonais e horizontais. A partir de determinada profundidade, o escoamento ao redor das hastes metálicas deixou de ter a energia necessária para carrear as partículas de argila para o exterior e força para sustentar as paredes da cavidade, facilitando a adesão do solo ao fuste da estaca. O fluxo de água até à superfície, responsável pelo transporte de solo e pelo equilíbrio de forças das paredes da cavidade erodida foi interrompido, verificou-se um pico de pressão, consequente diminuição da vazão do fluxo de água e se formaram fraturas hidráulicas no solo argiloso, isto é, a energia necessária à abertura de fraturas é menor que a energia requerida para a erosão e transporte do solo à superfície. As fraturas atingiram os limites do tanque ou a superfície e o fluxo de água voltou a ser contínuo, com estabilização da pressão e vazão aos valores anteriores. Uma ilustração e fotografia do que se descreveu pode ser vista na Figura 4.

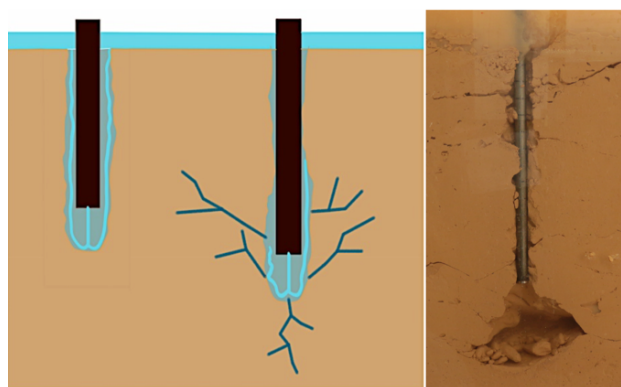


Figura 4. Ilustração do mecanismo de evolução da profundidade penetração e fotografia após ensaio.

4.2 Resultados Gráficos - Vazão

Os resultados na forma gráfica têm o objetivo de identificar a influência das variáveis no processo de instalação da estaca no leito argiloso. A legenda dos gráficos lê-se seguinte forma: por exemplo "E 1:76 M=150g d_j =1,7mm w=106%" significa que o conjunto de dados nesta legenda são resultados do modelo reduzido com escala de comprimento de 1:76, com a massa de 150

gramas, diâmetro do jato de 1,7mm e o solo nestes ensaios apresentou um teor em água de 106%.

A Figura 5 refere-se à escala de 1:76 e verifica-se que a profundidade máxima de penetração é diretamente proporcional à vazão. Além disso, para uma mesma vazão e condições geométricas, a humidade do solo afeta a profundidade final, quanto maior, menor é a resistência não drenada e maior a profundidade penetrada. Como se pode ainda constatar, a profundidade de penetração é proporcional ao aumento da massa das hastes.

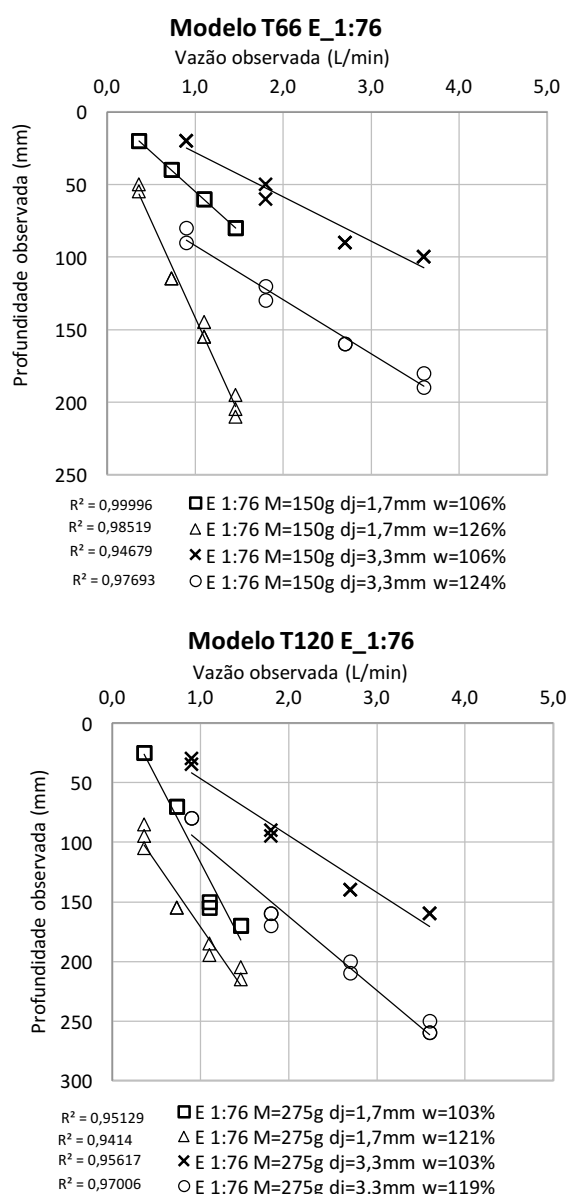


Figura 5. Representação da profundidade penetrada das hastes em função da vazão para os modelos correspondentes a 66 e 120 toneladas.

4.3 Análise Estatística

No trabalho fez-se uma análise de regressão linear, que permite entender como o comportamento de algumas variáveis independentes, ou regressores, influenciam o comportamento da outra variável dependente (ou de resposta). A Equação 1 estima a profundidade Z , de penetração normalizada por d_j . Ela é função de da razão pressão disponível e resistência não drenada, $\frac{P_{disp}}{S_u}$, da razão de massas específicas do fluido e solo, $\frac{\rho}{\rho_{solo}}$, do número de Reynolds do jato, $Re_{jato} = \frac{\rho Q}{\mu d_j}$, da massa, $\frac{m}{\rho d_j^3}$, e do diâmetro externo das hastes, $\frac{d_e}{d_j}$.

$$\frac{Z}{d_j} = -782,594 + 0,572 \frac{P_{disp}}{S_u} + 1070,663 \frac{\rho}{\rho_{solo}} + 0,004 \frac{\rho Q}{\mu d_j} + 0,001 \frac{m}{\rho d_j^3} - 3,236 \frac{d_e}{d_j} \quad (1)$$

A maior contribuição de Re_{jato} e $\frac{m}{\rho d_j^3}$, seguido de $\frac{\rho}{\rho_{solo}}$ e $\frac{P_{disp}}{S_u}$. Isto está conforme os resultados da análise de variância e dos maiores valores dos coeficientes estandardizados do modelo de regressão linear. A análise foi realizada com o apoio do Núcleo de Assistência Estatística da UFRGS.

A Figura 6 permite compreender a Equação 1, que estima a profundidade alcançada através das variáveis preditoras e apresenta o coeficiente de determinação da estimativa para um nível de confiança de 95%.

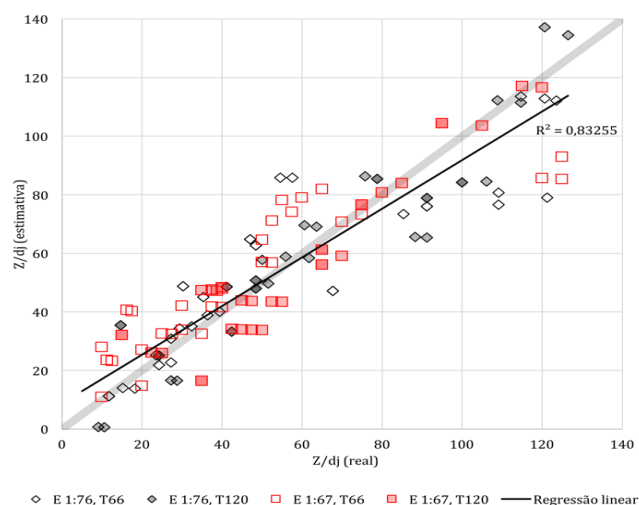


Figura 6. Comparação entre a estimativa do modelo e as observações reais.

5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa contribuiu para aprofundar o conhecimento em relação aos parâmetros e variáveis que caracterizam e controlam mecanismo de instalação de tubos metálicos com recurso a hidrojateamento em solos argilosos. Com base nos trabalhos desenvolvidos até agora é possível concluir que:

O mecanismo de instalação dos modelos dos torpedos caracteriza-se por erodir o solo com o jato de água formando uma cavidade à frente da estaca, que proporciona o seu avanço por auxílio do peso próprio, e transporte do solo até à superfície do leito, até atingir uma profundidade crítica em que a energia para continuar o processo se torna maior do que a energia necessária para fraturar o solo;

Antes de se formarem as fraturas hidráulicas no solo, a velocidade de descida da haste com hidrojato diminui até se imobilizar;

As fraturas depois de cada ensaio fecham e o solo comporta-se novamente como um meio contínuo, havendo repetibilidade em ensaios localizados aleatoriamente;

O diâmetro da cavidade erodida não ultrapassa em medida de dois diâmetros dos tubos metálicos;

No solo em questão as variáveis que têm maior influência na profundidade final cravada são o número de Reynolds do jato, a massa da estaca, a razão de densidades, a razão entre pressão do fluido e resistência do solo. Quanto maiores, maior a profundidade alcançada pelo tubo metálico;

Para o solo de ensaios, quanto maior a umidade e menor a resistência não drenada, maior é a profundidade final observada nos ensaios;

A velocidade do fluxo de água e o diâmetro externo da haste são variáveis cuja influência é reduzida nos modelos;

É possível estimar através de uma equação de regressão linear, a profundidade máxima que atinge uma haste num solo argiloso com recurso

ao hidrojateamento, de forma clara e com bom ajuste dos pontos entre as observações e o esperado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UFRGS, à PETROBRAS, à CAPES e ao CNPq pelos apoios e à comissão organizadora do COBRAMSEG 2016 pela oportunidade.

REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 6502: Solos e Rochas – classificação. Rio de Janeiro, 1995.
- ABNT. NBR 6457: Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.
- ABNT. NBR 6459: Solo – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984c.
- ABNT. NBR 6508: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984a.
- ABNT. NBR 7180: Solo – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984d.
- ABNT. NBR 7181: Solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984b.
- Brandão, F. E. N., Henriques, C. C. D., Araújo, J. B., Ferreira, O. C. G., And Amaral, C. S. *Albacora Leste Field Development – FPSO P-50 Mooring System Concept*. Proceedings of the 38th Offshore Technology Conference, 18243, Houston, 2006 .
- Henriques Jr., P.R.D; Porto, E.C.; Medeiros Jr., C.J. Foppa, D.; Costa, R.G.B.; Fernandes, J.V.V.; Danziger, F.A.B.; Jannuzzi, G.M.F.; Guimarães, G.V.M. *O Desenvolvimento do Piezocone-Torpedo: Finalidades do Ensaio, Desafios e Primeiros Testes*. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Gramado, 2010b.
- Henriques Jr., P.R.D.; Foppa, D.; Porto, E.C.; Medeiros Jr., C.J. *Alternativa de Estaca Torpedo para Altas Cargas de Ancoragem*. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Gramado, 2010.
- Jung, J. G. *Estudo do jateamento em solos argilosos e sua aplicação à engenharia de fundações offshore*. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- Leva, M. *Fluidization*. McGraw-Hill Book Co., New York, 327p, 1959.
- Mazureck, K. A. *Scour of clay by jets*. 2001. 313 p. Thesis (Ph.D. in Water Resources Engineering) – Department of Civil & Environmental Engineering. University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada.
- Medeiros Jr., C.J., Hassui, L.H.; Machado, R.D. *Pile for*

- Anchoring Floating Structures and Process for Installing the Same*. Brazilian Patent Number 9603599-4, United States Patent Number 6,106, 2000.
- Medeiros Jr., C.J. *Low Cost Anchor System for Flexible Risers in Deep Waters*. Proceedings Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, OTC 14151, 2002.
- Medeiros Jr., C.J. *Torpedo anchor for deep water*. Proceedings of Deepwater Offshore Technology Conference, Rio de Janeiro, Outubro, 2001.
- Mezzomo, S. M. *Estudo dos mecanismos de fluidização de areias com a utilização de jatos de água*. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- Niven, R.K. In situ multiphase fluidisation (“upflow washing”) for the remediation of diesel and lead contaminated soils. PhD Thesis, The University of New South Wales, Sydney, Austrália, pp.548, 1998.
- Niven, R.K.; Khalili, N. In situ fluidisation by a single internal vertical jet. *Journal of Hydraulic Research*, v. 36, n. 2, pp. 199-228, 1998a.
- Petrobras. <www.petrobras.com.br>. 2011 e 2013.
- Stracke, F. *Fluidização de solo arenoso associada à injeção de agente cimentante para ancoragem de estruturas offshore*. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.