



# Ensaio de campo de penetração auxiliada por jatos de água de modelos de estacas torpedo em solo granular

Field tests of water jet-assisted penetration of torpedo pile models in granular soil

L. V. Rocha\*; D. F. Fagundes; K. R. Camargo

*Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande, CEP, Rio Grande-RS, Brasil*

\*luciano\_vroha@yahoo.com.br

*(Recebido em 14 de abril de 2023; aceito em 20 de outubro de 2023)*

O presente trabalho apresenta os resultados de ensaios de instalação de âncoras do tipo estaca torpedo em escala reduzida auxiliada pelo processo de fluidização feita através da aplicação de jatos de água verticais circulares. Foi avaliada a influência da vazão imposta e a massa do elemento ancorante. O protótipo analisado foi um modelo de estaca torpedo T66 de 66 toneladas. Os ensaios foram executados em um campo experimental de solo arenoso com modelos reduzidos na escala de comprimento 1:12, de acordo com a Lei de Semelhança pelo Número de Froude. Os estágios de vazão aplicada foram de 10,35, 22,81, 30,71 e 41,60 L/min. Os resultados dos ensaios demonstraram bastante concordância com pesquisas semelhantes realizadas em laboratório com escalas menores que a avaliada neste trabalho. Observou-se que o aumento da vazão aumentou a profundidade de penetração dos modelos, assim como para uma dada vazão, a estaca com maior massa tem maior penetração. Os ensaios mostraram que o processo de fluidização contribui para aumento das profundidades desse tipo de sistema de ancoragem offshore e que a correta escolha da vazão e da massa da estaca torpedo podem trazer melhorias no procedimento de instalação.

Palavras-chave: estaca torpedo, fluidização, ensaios de campo.

The present work presents the results of installation tests of reduced scale torpedo pile anchors assisted by fluidization process created by the application of circular vertical water jets. The influence of the imposed flow and the mass of the anchoring element were evaluated. The prototype analyzed was a 66-ton T66 torpedo pile type. The tests were carried out in an experimental field of sandy soil with models reduced in the length scale 1:12, according to the Law of Similarity by Froude Number. The flow rates applied were 10.35, 22.81, 30.71 and 41.60 L/min. The test results showed great agreement with similar research carried out in the laboratory with smaller scales than the one evaluated in this work. It was observed that the increase in flow increased the penetration depth of the models, as for a given flow, the pile with greater mass has greater penetration. The tests showed that the fluidization process contributes to increasing the depths of this type of offshore anchoring system and that the correct choice of flow rate and mass of the torpedo pile can improve the installation procedure.

Keywords: torpedo pile, fluidization, field tests.

## 1. INTRODUÇÃO

A estaca torpedo é uma solução econômica desenvolvida pela Petrobras (Petróleo Brasileiro S.A) para ancorar grandes unidades de produção em campos de petróleo em águas muito profundas e com menor raio de ancoragem no Brasil, como as semissubmersíveis e plataformas *Floating Production Store and Offloading* (FPSO), e vem sendo bastante utilizada no Brasil nas últimas décadas [1]. A Figura 1 apresenta um modelo de estaca torpedo e este tipo de âncora pode ser aletada ou desprovida de aletas.

O procedimento de instalação de uma estaca torpedo é a liberação do torpedo de uma posição alta o suficiente do fundo do mar para permitir que o dispositivo atinja a velocidade terminal que gere energia cinética suficiente para que a estaca penetre no solo [2]. Ainda, segundo os autores, a estaca deve cravar no solo na posição vertical, para maximizar sua capacidade de ancoragem.

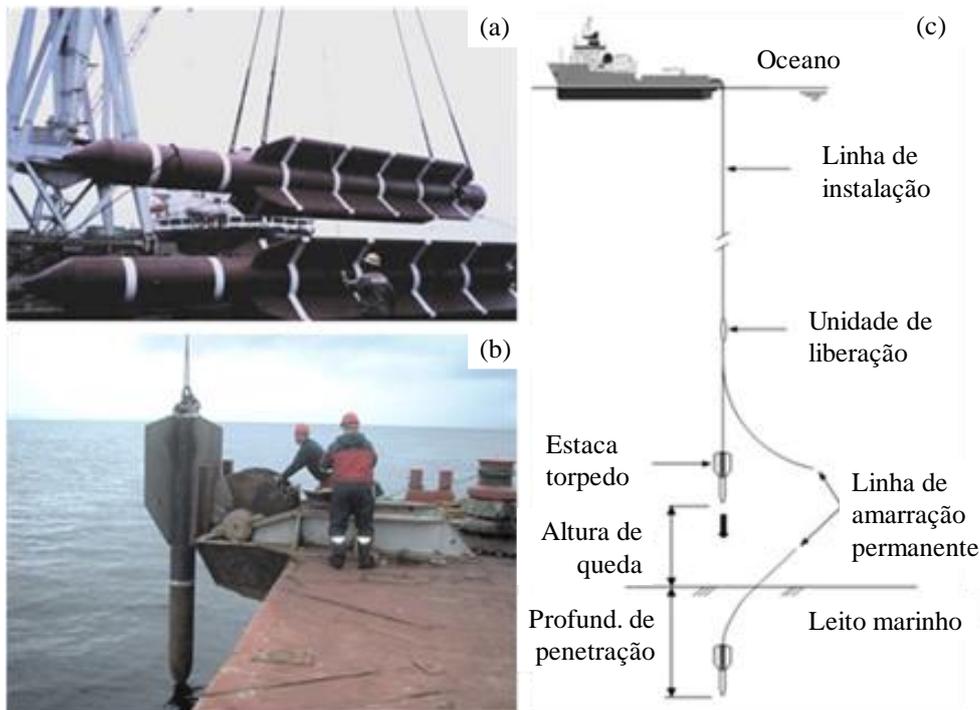


Figura 1- Instalação da Estaca torpedo aletada. (a) Içamento da estaca torpedo, (b) Posicionamento da estaca para o lançamento e (c) Procedimentos de instalação. Adaptado de Richardson et al. (2009) [3] e O'Beirne et al. (2016) [4].

A literatura tem estudado métodos alternativos para instalação destas âncoras, sendo um deles o processo de fluidização do solo através do hidrojateamento. O processo de fluidização consiste em aplicar um jato de água na ponta da estaca, fazendo com que gere um fluxo ascendente capaz de arrastar as partículas do solo, fazendo com que este se liquefaça. Ainda, conforme Shepley (2015) [5] e Shepley e Bolton (2014) [6], em pesquisas com solo granular em centrífuga, a injeção de água pode causar um excesso de poropressão ao redor da ponta da estaca, ou até mesmo eliminando a tensão efetiva, conseqüentemente diminuindo ou eliminando sua resistência. Esta condição permite ou facilita a penetração da estaca.

Diversos autores estudaram o processo de fluidização do solo ao longo dos anos em áreas como dragagem, rebaixamento de barras em bocas de canais ou estuários [e.g. 7-12]. Também foram realizados estudos dos efeitos da aplicação de jatos verticais de água em solos granulares, conforme [e.g. 13-19].

Niven e Khalili (1988) [20, 21] introduziram jatos verticais com o intuito de descontaminar o solo através da elutrição. Baseados nos procedimentos de Niven e Khalili (1988) [20, 21], Passini e Schnaid (2015) [22], Passini et al. (2018) [23] e Lourenço et al. (2020) [24] realizaram testes para a aplicação da fluidização na ancoragem de estruturas offshore. Foram realizados ensaios de laboratório com modelos reduzidos de estacas torpedo T66 (de 66 toneladas) e T120 (de 120 toneladas) nas escalas 1:76, 1:67 e 1:50, confeccionados em tubos metálicos.

Os três primeiros estudos utilizaram solo granular. O procedimento consistia na aplicação dos jatos verticais circulares de água pelo interior dos modelos com o objetivo de fluidizar o solo, com a perda de resistência do leito granular, os tubos penetravam pela ação do peso próprio. Neste contexto foram observados os parâmetros da zona fluidizada do solo e os parâmetros que influenciavam a profundidade atingida pelas estacas como a vazão do jato e a massa dos modelos.

O processo de instalação de estacas torpedos utilizando o processo de hidrojateamento pode contribuir para a redução do congestionamento marinho nas regiões de exploração, pois aumenta a profundidade de instalação e a verticalização das âncoras.

O presente trabalho propõe a instalação por hidrojateamento de um modelo em escala reduzida em campo experimental constituído de solo arenoso, a fim de verificar se o padrão de comportamento verificado em laboratório por Passini e Schnaid (2015) [22] e Passini et al. (2018) [23] se repete em campo. No presente trabalho serão apresentados os resultados de dois ensaios realizados com diferentes valores de vazão durante a penetração e modelos com diferentes massas.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Na presente pesquisa foram realizados ensaios de campo nos arredores do Laboratório de Geotecnia e Concreto Prof. Dr. Cláudio Renato Rodrigues Dias (LGC/FURG), no Campus Carreiros da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, o qual está localizado na cidade do Rio Grande no extremo sul do estado do Rio Grande do Sul, conforme ilustra a Figura 2. O Campus Carreiros da FURG está localizado na Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS) e, mais especificamente, no Sistema Laguna-Barreira IV, o qual é o mais recente sistema deposicional da PCRS formado durante o Holoceno e, justamente por isso, a região é predominantemente composta por sedimentos arenosos não consolidados.

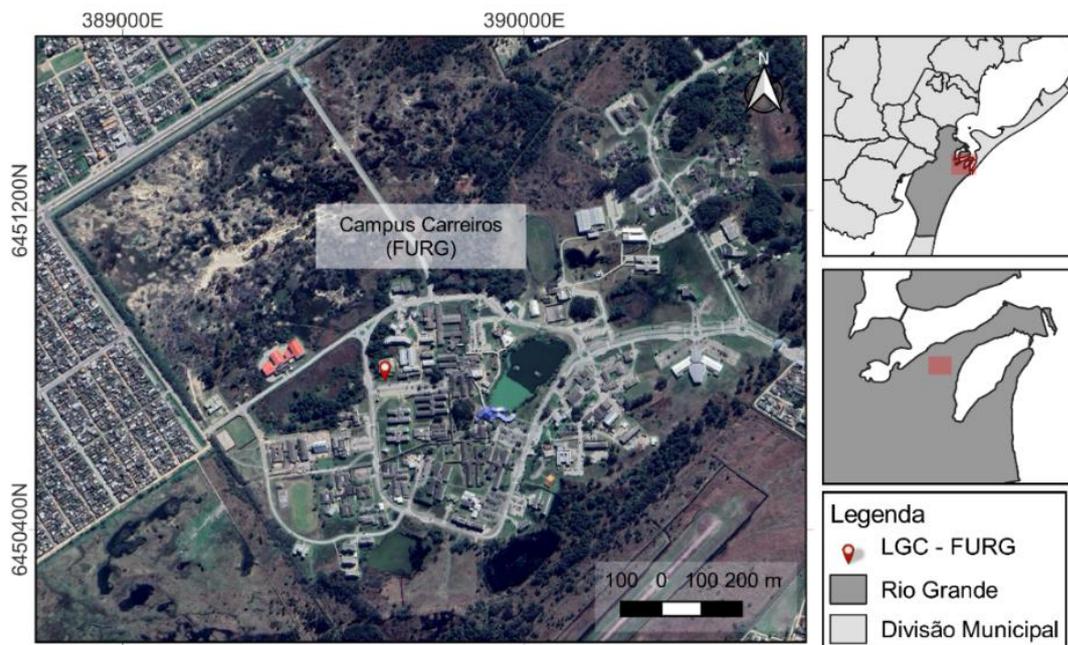


Figura 2: Localização do campo experimental de realização dos ensaios.

### 2.1 Caracterização geotécnica do solo

A caracterização geotécnica do solo foi realizada através dos ensaios de peneiramento, sedimentação e ensaio de picnômetro, conforme NBR 6458/2016 [25], para determinação da curva granulométrica e peso específico real dos grãos ( $\gamma_s$ ), respectivamente.

O peso específico aparente natural do solo ( $\gamma_{nat}$ ) foi determinado a partir de amostras retiradas com cilindros de cravação, seguindo os preceitos da NBR 9813/2016 [26], o que também serviu para obtenção das amostras de solo para os demais ensaios de caracterização.

De acordo com os resultados, o solo foi classificado texturalmente como uma areia argilosa. A classificação HRB ratifica esta informação, uma vez que o grupo A-2-4(0) agrupa solos granulares com graduação irregular. O índice de grupo evidencia que dentre os solos do grupo A-2, este tem a melhor capacidade de suporte esperada. Quanto ao coeficiente de uniformidade, o solo foi classificado como desuniforme e quanto à graduação como mal graduado. O peso específico dos grãos encontrado foi da ordem do peso específico do quartzo

(26,5 kN/m<sup>3</sup>), mineral predominante nos solos granulares da planície costeira. Os resultados completos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades geotécnicas do solo.

$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	26,34	Coefficiente de uniformidade - $C_u$	>150
$\gamma_{nat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	18,19	Coefficiente de curvatura - $CC$	46
Porosidade (%)	34,16	Classificação HRB	A-2-4 (0)
Índice de Vazios	0,52	Argila (%)	11
$d_{10}$ (mm)	<0,0012	Silte (%)	2
$d_{30}$ (mm)	0,100	Areia (%)	87
$d_{50}$ (mm)	0,150	Pedregulho (%)	0
$d_{60}$ (mm)	0,180	-	-

Também foram realizados ensaios de cisalhamento direto para determinação da resistência do solo. As amostras foram retiradas da profundidade de 61 cm com a utilização de um cilindro de cravação. Dentro do cilindro era cravado o anel de 6 cm de diâmetro e 2 cm de altura para a extração das amostras. Foram utilizadas as tensões normais de 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa e a amostra foi inundada durante o ensaio. Os deslocamentos horizontais foram controlados com uma velocidade de 0,10 mm/min garantindo um comportamento drenado durante o cisalhamento das amostras e, assim, obter parâmetros de resistência em termos efetivos. Na Figura 3 são apresentados os resultados dos ensaios através do gráfico de tensões normal e tensão cisalhante que permitiram a obtenção do ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ ) de 35,53°. Além disso, pela análise do gráfico, observa-se que o intercepto coesivo ( $c'$ ) é nulo.

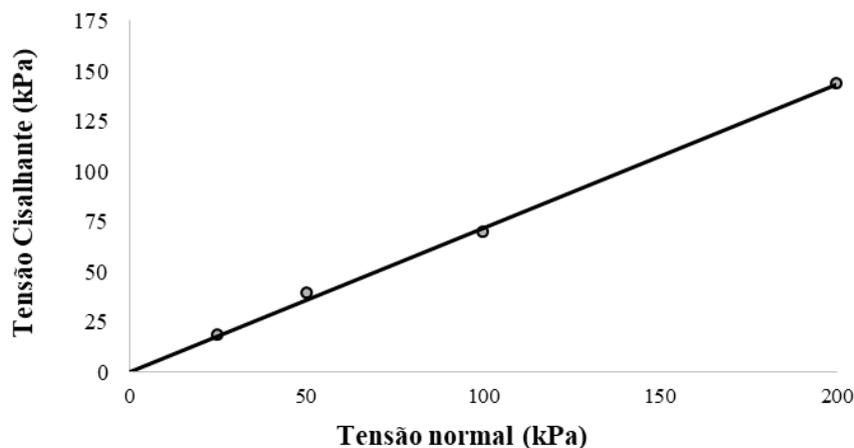


Figura 3: Envoltória de tensões (ensaio de cisalhamento direto).

## 2.2 Ensaio DPL (Dynamic Probe Light)

De forma complementar foram realizados ensaios *Dynamic Probe Light*. O DPL é um equipamento leve e de fácil manuseio e transporte, consiste na cravação de uma haste com ponteira alargada no solo pelo impacto de um peso içado manualmente e liberado em queda livre. Durante o ensaio foi medido o número de golpes necessários para a penetração de cada 0,1 m da haste, o qual é correlacionável com a resistência do solo. No campo experimental deste trabalho foram realizados três ensaios DPL. A Figura 4a mostra a realização do ensaio e na Figura 4b são apresentados os resultados.

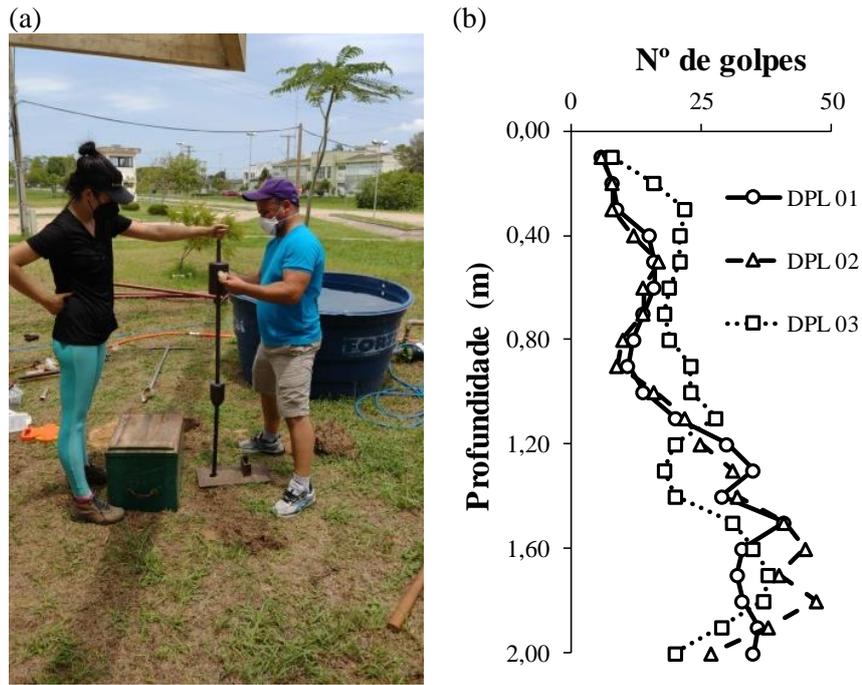


Figura 4: Ensaio DPL: a) execução; b) resultados (profundidade atingida x número de golpes necessários para penetrar cada 10 cm).

### 2.3 Ensaio de simples reconhecimento com SPT (Standard Penetration Test)

No campo experimental foi realizado ensaio de simples reconhecimento com SPT, com a utilização de um equipamento automatizado e o ensaio seguiu as recomendações previstas pela NBR [27] 6484/2020. O ensaio atingiu a profundidade de 3 m, quando alcançou um  $N_{SPT}$  (número de golpes necessários para cravar os 0,3 m finais do amostrador do ensaio) de 47.

O perfil do solo foi identificado como areia fina medianamente compacta, o que vai ao encontro da caracterização geotécnica obtida com a retiradas de amostras, com  $N_{SPT}$  variando entre 9 e 11 nos dois primeiros metros, e de 11 a 47 no metro final. O resultado do ensaio está apresentado na Figura 5.

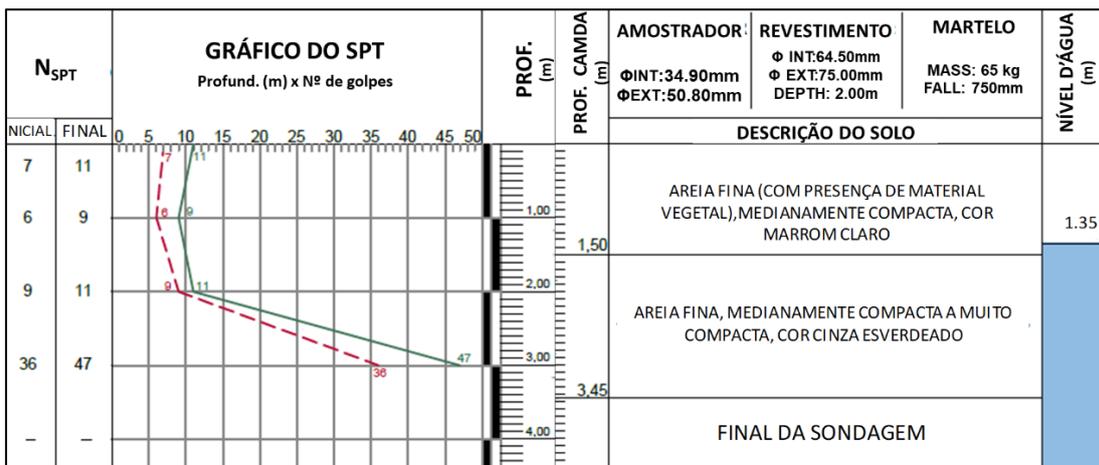


Figura 5: Perfil Geotécnico – SPT.

### 2.3 Critérios de similaridade

O protótipo no qual foi baseado o modelo reduzido é a estaca torpedo fictícia T66, apresentada por Passsini e Schnaid (2015) [22]. Este é um modelo de estaca torpedo sem aletas com massa de 66 toneladas, comprimento de 17 m e 1,07 m de diâmetro externo.

O dimensionamento do modelo reduzido foi baseado na Lei de Semelhança por Número de Froude (Fr), de forma a manter a relação entre as forças gravitacionais e inerciais. O Número de Froude é um adimensional determinado pelo quociente entre energia cinética e potencial, conforme dado pela Eq. 1. A escala de comprimento utilizada foi a 1:12.

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}} \quad (1)$$

onde U é a velocidade do fluido em m/s, g a aceleração da gravidade em m/s<sup>2</sup>, e L o comprimento característico do escoamento em m.

Foram utilizadas como grandezas de base o comprimento (L), a massa específica ( $\rho$ ) e aceleração da gravidade (g). As grandezas de base têm suas escalas pré-estabelecidas e a partir das quais as escalas de todas as outras grandezas são decorrentes. Como não é possível alterar escala da massa específica e da aceleração da gravidade, por se tratar de ensaio de campo, foi adotada a escala 1:1 para essas duas grandezas. A Tabela 2 apresenta a matriz dimensional para as condições avaliadas.

Tabela 2: Matriz dimensional de semelhança por número de Froude para  $\lambda = 1:12$ .

Grandeza de base	Símbolo	Unid.	L	M	T	Inversão			Escala	Escala invertida
Comprimento	L	m	1	0	0	1	0	0	8,333 x 10 <sup>-02</sup>	12
Massa Específica	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	-3	1	0	3	1	0	1,000 x 10 <sup>-02</sup>	1
Aceleração (gravidade)	g	m/s <sup>2</sup>	1	0	-2	0,5	0	0,5	1,000 x 10 <sup>-02</sup>	1
Grandezas derivadas	Símbolo	Unid.	L	m	t	L	$\rho$	g	Escala	Escala Invertida
Comprimento	L	m	1	0	0	1	0	0	8,333 x 10 <sup>-02</sup>	12
Massa	M	kg	0	1	0	3	1	0	5,787 x 10 <sup>-02</sup>	1728
Tempo	T	s	0	0	1	0,5	0	-0,5	2,887 x 10 <sup>-02</sup>	3,46
Frequência	f	Hz	0	0	0	0	0	0	3,464 x 10 <sup>-02</sup>	0,29
Aceleração	g	m/s <sup>2</sup>	1	0	-2	0	0	1	1,000 x 10 <sup>-02</sup>	1
Velocidade	v	m/s	1	0	-2	0,5	0	0,5	2,887 x 10 <sup>-02</sup>	3,46
Vazão	Q	m <sup>3</sup> /s	3	0	-1	5	0	0,5	2,005 x 10 <sup>-02</sup>	499
Área	A	m <sup>2</sup>	2	0	0	2	0	0	6,944 x 10 <sup>-02</sup>	144
Volume	V	m <sup>3</sup>	3	0	0	3	0	0	5,787 x 10 <sup>-02</sup>	1728
Inércia de área	I	m <sup>4</sup>	4	0	0	4	0	0	4,823 x 10 <sup>-02</sup>	20736

Com base nas características do protótipo foram definidas características do modelo em escala reduzida, cujos resultados estão sumarizados na Tabela 3, onde d<sub>e</sub> é diâmetro externo do modelo, L o comprimento e m a massa.

Tabela 3: Características do protótipo e do modelo em escala reduzida 1:12.

Dados	Modelo
L (m)	1,50
d <sub>e</sub> (m)	0,09
m (kg)	38,00

## 2.4 Análise Dimensional

Foi procedida à análise dimensional dos resultados obtidos para os ensaios E11 e E25, e comparados com os dados de Passini e Schnaid (2015) [22]. Para tal, foi utilizado o Teorema  $\Pi$  de Buckingham, o qual apresenta os grupos adimensionais através de termos  $\Pi$ . Segundo Munson et al. (2013) [28], esse teorema pressupõe que, se uma equação envolvendo  $k$  variáveis for dimensionalmente homogênea, ela pode ser reduzida a uma relação entre  $k - r$  produtos adimensionais independentes, onde  $r$  é o número mínimo de dimensões de referência (grandezas fundamentais) necessárias para descrever as variáveis.

Desta forma, assume-se que para fenômeno físico representado pela Eq. 2, envolvendo  $k$  variáveis, as dimensões da variável no lado esquerdo da equação devem ser iguais às dimensões de qualquer termo que esteja sozinho no lado direito, e o fenômeno pode ser reorganizado na forma da Eq. 3.

$$u_1 = f(u_2, u_3, \dots, u_k) \quad (2)$$

$$\Pi_1 = \Phi(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{k-r}) \quad (3)$$

No presente estudo, optou-se por trabalhar com as grandezas fundamentais como força (F), comprimento (L) e tempo (T). As variáveis escolhidas para representar o fenômeno foram  $Z$  (L),  $d_e$  (L),  $Q_0$  (L<sup>3</sup>/T),  $\nu_f$  (L<sup>2</sup>/T) e  $d_{50}$  (L), onde  $Z$  é profundidade de instalação por fluidização do solo,  $\nu_f$  é a viscosidade cinemática do fluido e  $d_{50}$  o diâmetro médio das partículas do solo. Desta forma, três grupos adimensionais foram identificados, os quais foram determinados através do método da repetição de variáveis e estão apresentados na Eq. 1, 2, 3 e 4.

$$\Pi_1 = \frac{Z}{d_e} \quad (4)$$

$$\Pi_2 = \frac{Q_0}{\nu_f d_{50}} \quad (5)$$

$$\Pi_3 = \frac{d_{50}}{d_e} \quad (6)$$

onde,  $\Pi_1$  é o fator de profundidade,  $\Pi_2$  é o fator de vazão e  $\Pi_3$  é o fator de escala.

## 2.5 Ensaio de Instalação por Hidrojateamento

A estaca era confeccionada a partir de um tubo metálico de 90 mm de diâmetro externo ( $d_e$ ) e 1500 mm de comprimento (L). Em seu interior foi instalado um tubo de aço galvanizado com diâmetro de 3/4", que atravessa a estaca longitudinalmente com a finalidade de levar o fluxo de água para sua ponta (Figura 6).

A ponta da estaca era rosqueável, o que permitia sua remoção para a introdução de sobrepesos. Estes sobrepesos eram compostos por discos metálicos com aproximadamente 0,65 kg cada um, e permitiam variar a massa da estaca entre os experimentos. Outros estudos apresentados na literatura identificaram a influência da massa na penetração das estacas [e.g. 22, 23] e assim, optou-se pela utilização de duas massas nesta pesquisa: 31 kg e 42,5 kg.

O orifício de saída do jato na ponta da estaca também era dotado de rosca, o que permitia a variar o diâmetro do jato instalando um tampão com um orifício de menor diâmetro. A água utilizada no hidrojateamento era armazenada em um reservatório de polietileno com capacidade de 1000 L. Com a utilização de uma motobomba elétrica com potência nominal de 1 HP, a água era levada até a ponta da estaca através de uma mangueira flexível. Um inversor de frequência permitia variar a vazão durante os ensaios com vazão escalonada em quatro

estágios: (i) 10,35 L/min; (ii) 22,81 L/min; (iii) 30,71 L/min; e (iv) 41,60 L/min. Apesar da motobomba ter vazão máxima de 118 L/min, a vazão máxima na ponta da estaca foi de 41,60 L/min, devido à perda de carga no escoamento. Esta vazão era inferior à pré-definida para instalação a penetração total do modelo (80 L/min). Desta forma, foram realizados testes com a vazão de 41,60 L/min, quando se observou que tal vazão era suficiente para que a estaca de 38 kg penetrasse por completo. Diante disso, foram definidos os estágios de vazão.

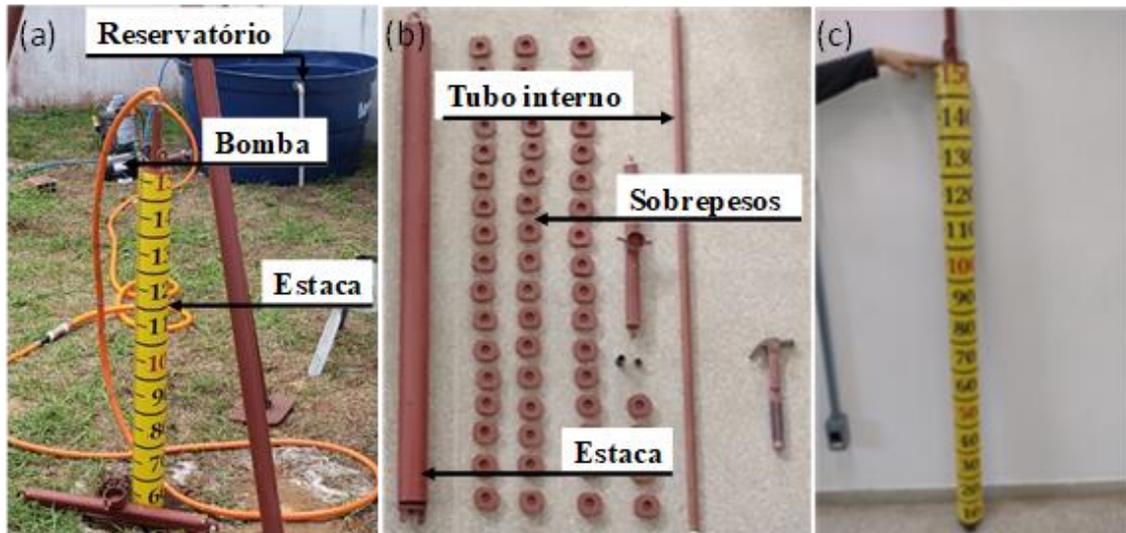


Figura 6: Ensaio de instalação da estaca por hidrojateamento: (a) perspectiva geral do ensaio, (b) elementos da estaca modelo e (c) estaca modelo com aplicação do adesivo graduado (graduação em centímetros).

No ensaio de instalação, removia-se a camada superficial de solo orgânico para que a estaca fosse apoiada diretamente sob o solo granular de interesse, sem interferência de outros elementos. Posteriormente a estaca era posicionada manualmente na vertical e, em seguida, acionava-se a motobomba. Com o jato saindo na ponta da estaca, dava-se início à fluidização do solo e a estaca começava o processo de penetração pela ação de seu peso próprio.

Foram realizados ensaios com aplicação da vazão máxima desde o início e ensaio com vazão variável ao longo da instalação. Para estes últimos a vazão era incrementada por um valor pré-definido cada vez que a penetração da estaca cessava. A medida da penetração era feita com o auxílio de um adesivo graduado colado ao fuste da estaca, conforme apresentado na Figura 6c.

A Tabela 4 apresenta as características das duas configurações de ensaio executadas no presente estudo. Os estágios de vazão aplicados durante a instalação e diâmetro do jato são iguais para ambos, a única diferença entre os ensaios foi a massa do modelo.

Tabela 4: Identificação dos tipos de ensaios realizados.

Ensaio	Vazão (L/min)				Diâmetro do jato (mm)		Massa (kg)	
	10,35	22,81	30,71	41,60	11,25	22,50	31,00	42,50
J1M1E	x	x	x	x	x		x	
J1M2E	x	x	x	x	x			x

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A técnica utilizada para a instalação dos modelos foi a partir da fluidização do solo gerado pelo hidrojateamento. O intuito da fluidização é a diminuição ou eliminação da resistência do solo, fazendo com que a estaca possa penetrar pela ação do peso próprio.

No presente trabalho são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios E11 (J1M1E) e E25 (J1M2E), os quais executados com variação da vazão ao longo do processo de instalação, conforme indicado na Tabela 4. A estaca contava com uma massa de 31 kg para o ensaio E11 e 42,5 kg no E25. Em ambos os ensaios (E11 e E25) a instalação foi realizada com incrementos de vazão em 4 estágios durante a instalação (10,35; 22,81; 30,71 e 41,60 L/min). O avanço de um estágio para o outro se dava quando cessava a penetração da estaca para aquela vazão.

Passini e Schnaid (2015) [22] e Passini et al. (2018) [23], através de ensaios de laboratório, identificaram a influência da vazão no processo de instalação, verificando que quanto maior a vazão do jato ( $Q_0$ ) aplicada na ponta da estaca, maior era a profundidade de instalação ( $Z$ ) alcançada.

A Figura 7a mostra o resultado de  $Z$  em função da vazão para os dois ensaios. Assim como identificado nas pesquisas anteriores realizadas em laboratório [e.g. 20-23], identificou-se a influência da vazão na instalação das estacas.

Nota-se que o acréscimo de vazão levou ao aumento da profundidade penetrada, tanto para o ensaio com massa de 31 kg, quanto para o ensaio com 42,5 kg, assim como observado em pesquisas anteriores [e.g. 22, 23]. Na mesma figura são apresentados os resultados para penetração de estacas com massas diferentes. Observa-se que no ensaio E25 (maior massa) se alcançaram profundidades de instalação maiores para uma mesma vazão, inclusive as tendências das curvas “profundidade de instalação x vazão” são diferentes, sendo mais próxima do comportamento retilíneo para o ensaio com a estaca de maior massa. O incremento da vazão de aproximadamente 300 % aumentou a penetração em 300 % e de 2000 %, para estaca com 42,5 kg e 31 kg respectivamente.

Este aumento da profundidade em função do incremento de massa para uma dada vazão vai ao encontro do identificado por Passini e Schnaid (2015) [22] e Passini et al. (2018) [23] em ensaios de laboratório nos quais foi testada a instalação em areia fina saturada de estacas de modelos reduzidos nas escalas 1:76, 1:67 e 1:50, as quais tinham como protótipo as estacas torpedo T66 e T120, com respectivamente 66 e 120 toneladas de massa.

Quando a estaca estava mais leve (31 kg) o primeiro estágio de vazão se mostrou pouco efetivo para fazer o modelo penetrar no solo, quando alcançou a profundidade de 40 mm. Em comparação, o ensaio E25 (42,5 kg), para a mesma vazão, alcançou 450 mm – aproximadamente 11 vezes mais. Esta diferença caiu conforme se aumentou a vazão, chegando a aproximadamente 3 vezes para a vazão de 30,71 L/min.

A Figura 7b apresenta os resultados plotados de forma normalizada, no qual os coeficientes adimensionais foram determinados de acordo com o Teorema II de Buckingham. No gráfico é plotada a profundidade normalizada  $\Pi_1 = Z/d_e$  em função da vazão normalizada  $\Pi_4 = [(Q_0/v_f d_{50}) \times (d_{50}/d_e)^2]$ , resultado da operação entre os coeficientes  $\Pi_2 = Q_0/v_f d_{50}$  e  $\Pi_3 = d_{50}/d_e$ , onde  $v_f$  é a viscosidade cinemática do fluido.

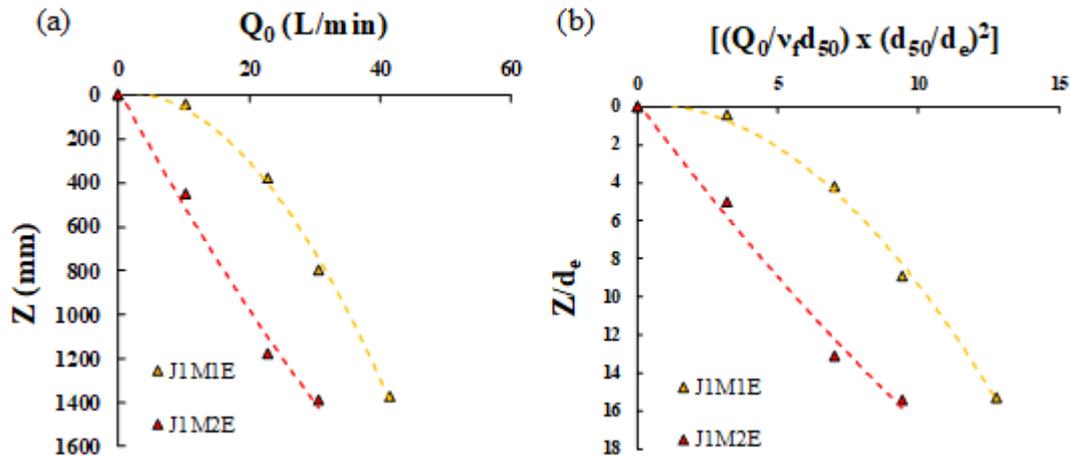


Figura 7: Profundidade de instalação em função da vazão: (a) dimensional e (b) adimensional.

Devido às condições de ensaios em campo, não se pode alterar o tamanho das partículas do solo. Desta forma a razão entre  $d_{50}/d_e$  é diferente entre modelo e protótipo, sendo 12 vezes maior na escala reduzida de 1:12. O mesmo ocorre na comparação de resultados com modelos em escalas diferentes, por isso se optou pela operação entre os adimensionais  $\Pi_2$  e  $\Pi_3$ . A Figura 8 apresenta a comparação dos resultados apresentados neste trabalho com os de Passini e Schnaid (2015) [22] na forma normalizada sugerida por este trabalho.

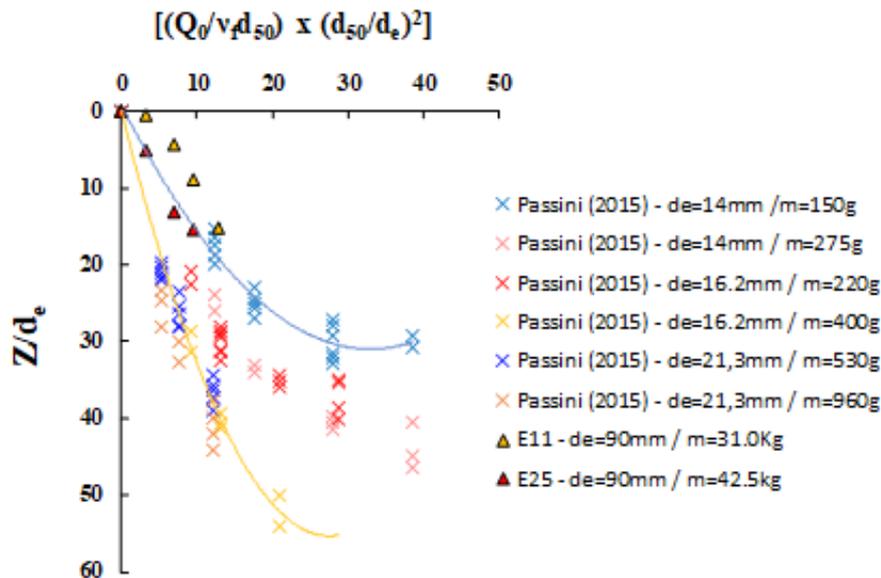


Figura 8: Comparação dos resultados com Passini e Schnaid (2015) [22].

Verifica-se na Figura 8 que os resultados da literatura e os do presente estudo apresentaram boa concordância quando tratados de forma adimensional. O aumento da profundidade  $Z$  com o acréscimo de  $Q_0$  também pode ser observado na Figura 8. As profundidades atingidas no ensaio E11 ficaram acima das linhas de tendência dos resultados de Passini e Schnaid (2015) [22], isto pode ser explicado pela massa ser menor que as dos protótipos utilizados em laboratório.

Cabe ressaltar que na presente pesquisa os ensaios foram encerrados quando a estaca penetrava por completo no solo. No entanto o ensaio E25 foi encerrado sem a aplicação do último estágio de vazão (41,60 L/min). Nas duas ocasiões a estaca estava em movimento

descendente quando o teste foi interrompido, sinalizando que a profundidade de instalação seria maior que a apresentada na Figura 7(a) e que a vazão de 41,60 L/min foi suficiente para a instalação da estaca.

Destaca-se também que os testes apresentados aqui, não representaram fielmente as condições de laboratório, pois o solo no qual as estacas foram instaladas não estavam na condição saturada. Segundo Niven & Khalili (1998) [21] o procedimento de fluidização do solo arenoso foi pensando originalmente para solos saturados, no entanto poderia ser aplicado em solos não saturados (areias finas e médias) criando-se uma “zona de recarga” a partir do lençol freático. Essa condição poderia influenciar na penetração das estacas no solo.

#### 4. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou os resultados de dois ensaios de instalação de estaca torpedo em modelo reduzido através do hidrojateamento do solo. Para os testes apresentados, as combinações de vazão aplicada ao sistema e a massa do modelo permitiram sua completa instalação.

Os resultados obtidos na presente pesquisa (ensaios E11 e E25) indicaram o ganho na profundidade de instalação com o acréscimo de vazão, indo ao encontro dos apresentados em pesquisas anteriores realizadas em laboratório com modelos em escalas menores, porém em solo semelhante. Assim como nas pesquisas de laboratório também se verificou aumento da profundidade de instalação com o aumento da massa do modelo, para uma dada vazão.

Foi proposta uma análise em termos adimensionais na qual se observou que os pontos que representam os resultados obtidos na presente pesquisa estão próximos às tendências observadas em pesquisas anteriores. Tanto o ensaio E11, quanto o E25 foram finalizados com a estaca ainda em movimento descendente, indicando que se alcançariam maiores penetrações. Cabe ressaltar que é comum observar uma grande dispersão dos resultados encontrados tanto em campo, quanto em laboratório.

Consideração deve ser feita pelo fato de o solo não estar na condição saturada nos ensaios desta pesquisa, em discordância com as pesquisas anteriores e com o leito marinho. A condição não saturada pode levar a penetrações menores.

Os resultados aqui apresentados são preliminares e fazem parte de um amplo programa de ensaios visando o melhor entendimento do processo de instalação de estaca torpedos em solos arenosos através do processo de fluidização.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Fernandes AC, Sales Jr JS, Silva DFC, Diederichs GR. Directional Stability of the Torpedo Anchor Pile during its Installation. *The IES J. Part A: Civil & Struct. Eng.* 2011 Ago; 4(3):180-189. doi: 10.1080/19373260.2011.577934
2. Raaj SK, Saha N, Sundaravadivelu R. Exploration of deep-water torpedo anchors - A review, *Ocean Eng.* 2023 Feb;270:113607. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.113607
3. Richardson MD, O’Loughlin CD, Randolph MF, Gaudin C. Setup following installation of dynamic anchors in normally consolidated clay. *J Geotech Geoenviron Eng.* 2009 Apr;135:487-96. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2009)135:4(487)
4. O’Beirne CO, O’Loughlin CD, Gaudin C. Assessing the penetration resistance acting on a dynamically installed anchor in normally and over consolidated clay. *Can Geotech J.* 2016 Ago. 54(1):1-17. doi: 10.1139/cgj-2016-0111
5. Shepley P. Optimisation of water injection nozzles to aid pile jacking. *Geotech Eng.* 2015 Jun;168:257-66. doi: 10.1680/geng.14.00072
6. Shepley P, Bolton MD. Using water injection to remove pile base resistance during installation. *Can Geotech J.* 2014 May;51:1273-83. doi: 10.1139/cgj-2013-0240
7. Weisman RN, Lennon, GP, Roberts EW. Experiment on fluidization in unbounded domains. *J Hydraul Eng.* 1988 May;114(5):502-15. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:5(502)
8. Lennon GP, Chang T, Weisman RN. Predicting incipient fluidization of fine sands in unbounded domains. *J Hydraul Eng.* 1990 Dec;116(12):1454-67. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)116:12(1454)

9. Weisman RN, Lennon GP. Design of fluidizer systems for coastal environment". *J Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.* 1994 Sep;120(5):468-87. doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1994)120:5(468)
10. Perng ATH, Capart, H. Underwater sand bed erosion and internal jump formation by a travelling plane jets. *J Fluid Mech.* 2008 Jan;595:1-43. doi: 10.1017/S0022112007008567
11. Wang T, Song B. Study on deepwater conductor jet excavation mechanism in cohesive soil. *App. Ocean Res.* 2019 Jan;82:225-35. doi: 10.1016/j.apor.2018.09.007
12. Wang B, van Rhee C, Nobel A, Keetels G. Modeling the hydraulic excavation of cohesive soil by a moving vertical jet. *Ocean Eng.* 2021 Mar;227:108796. doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.108796
13. Aderibigbe OO, Rajaratnam N. Erosion of loose beds by submerged circular impinging turbulent jets. *J. Hydraul. Res.* 1996 Ago;34(1):19-33. doi: 10.1080/0022168960949876
14. Rajaratnam N, Mazurek KA. Erosion of sand by circular impinging water jets with small tail water. *J Hydraul Eng.* 2003 Mar;129(3):225-9. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:3(225)
15. Chakravarti A, Jain RK, Kothyari UC. Scour under submerged circular vertical jets in cohesionless sediments. *J Hydraul Eng.* 2013 Sep;20(1):32-7. doi: 10.1080/09715010.2013.835101
16. Alsaydalani MOA, Clayton CRI. Internal fluidization in granular soils. *J Geotech Geoenviron Eng.* 2014 Apr;140(3):1-10. doi: 10.1061/1943-5606.0001039
17. Weegenar RA, Keetels GH, Winkelman MO, van Rhee C. Sand erosion with a traversing circular jet. *Mar Eng.* 2015 Jun;68:76-83. doi: 10.1680/maen.14.00004
18. Wang C, Wang Y, Peng C, Meng X. Two-fluid Smoothed Particle Hydrodynamics simulation of submerged granular column collapse. *Mech Res Commun.* 2016;79:15-23. doi: 10.1016/j.mechrescom.2016.12.001
19. Van Bang D, Zapata MU, Gauthier G, Gondret P, Zhang W, Nguyen D. Two-phase flow modeling for bed erosion by a plane jet impingement. *MPDI Water.* 2022 Oct;14:3290. doi: 10.3390/w14203290
20. Niven RK, Khalili N. In situ fluidization by a single internal vertical jet. *J Hydraul Res.* 1998 Oct. 36(2):199-228. doi: 10.1080/00221689809498633
21. Niven RK, Khalili N. In situ multiphase fluidization ("upflow washing") for the remediation of hydrocarbon contaminated sands. *Can Geotech J.* 1988 Jun;35:938-60. doi: 10.1139/t98-067
22. Passini LB, Schnaid F. Experimental investigation of pile installation by vertical jet fluidization in sand. *J Offshore Mech Artic Eng.* 2015 Jun;137(4):042002-1-10. doi: 10.1115/1.4030707
23. Passini LB, Schnaid F, Rocha MM, Moller SV. Mechanism of model pile installation by water jet fluidization in sand. *JCR Ocean Eng.* 2018 Dec;170:160-70. doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.10.017
24. Lourenço DE, Schnaid F, Schettini EBC. Model pile installation by vertical water jet in clay. *J Offshore Mec Artic Eng. ASME.* 2020 Jan;144:045001-1-9. doi: 0.1115/1.4046169
25. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica, massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro (RJ): ABNT; 2016.
26. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 9813: Solo – Determinação da massa específica aparente in situ, com emprego de cilindro de cravação. Rio de Janeiro (RJ): ABNT; 2016.
27. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 6484: Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. Rio de Janeiro (RJ): ABNT; 2020.
28. Munson BR, Okiishi TH, Heebisch WW, Rothmayer AP. *Fundamentals of fluid mechanics.* 7. ed. Hoboken (US): John Wiley & Sons; 2013.