

INFLUÊNCIA DA VAZÃO EM MODELOS DE ESTACA TORPEDO INSTALADAS COM JATOS D'ÁGUA A BAIXAS VAZÕES

Karina Retzlaff Camargo (Universidade Federal do Rio Grande) E-mail: karinacamargo@furg.br

Resumo: Este estudo investigou a influência da vazão de jatos de água na penetração de modelos de estacas torpedo, identificando um valor mínimo de vazão necessário para influenciar o processo. Uma contribuição importante do estudo foi o uso de modelos reduzidos, que se mostraram eficazes na simulação de condições reais de penetração em laboratório, evitando os elevados custos de ensaios em escala real em estágios preliminares. O estudo empregou uma mistura artificial de caulim e bentonita, representativa dos solos finos de campos *offshore* de petróleo brasileiros. Essa composição permitiu replicar características geotécnicas típicas desses solos, facilitando os ensaios e estabelecendo uma base confiável para estudos futuros, eliminando a necessidade de amostras naturais de campo e aumentando a aplicabilidade dos resultados ao contexto *offshore* brasileiro. Ensaios de penetração realizados com baixas vazões indicaram que, abaixo de uma vazão crítica, o jateamento de água não impacta significativamente a penetração das estacas, pois, nesse cenário, a resistência mobilizada é dominada pelo peso da estaca e pela resistência mobilizada. Essa observação alerta para a necessidade de aplicar uma vazão mínima em campo para otimizar o processo de penetração, garantindo a eficiência da instalação e evitando o uso de recursos sem efeito prático. A pesquisa também sugere a continuação de estudos para determinar uma metodologia que quantifique essa vazão mínima, permitindo maior precisão nos parâmetros operacionais.

Palavras-chave: Modelos reduzidos, Indústria *offshore*, Mistura caulim-bentonita

INFLUENCE OF FLOW RATE ON TORPEDO PILES INSTALLED WITH LOW-FLOW WATER JETS

Abstract: This study investigated the influence of water jet flow rate on the penetration of torpedo pile models, identifying a minimum flow rate required to influence the process. An important contribution of the study was the use of scaled models, which proved effective in simulating real penetration conditions in the laboratory, avoiding the high costs of full-scale tests in preliminary stages. The study employed an artificial mixture of kaolin and bentonite, representative of the fine soils found in Brazilian offshore oil fields. This composition allowed the replication of typical geotechnical characteristics of these soils, facilitating the tests and establishing a reliable basis for future studies, eliminating the need for natural field samples and increasing the applicability of the results to the Brazilian offshore context. Penetration tests conducted at low flow rates indicated that, below a critical flow rate, water jetting does not significantly impact pile penetration, as, in this scenario, the mobilized resistance is dominated by the pile's weight and the mobilized resistance. This observation highlights the need to apply a minimum flow rate in the field to optimize the penetration process, ensuring installation efficiency and avoiding the use of resources with no practical effect. The research also suggests the continuation of studies to determine a methodology to quantify this minimum flow rate, allowing greater precision in operational parameters.

Keywords: Reduced models, Offshore industry, Kaolin-bentonite mixture

1. Introdução

Com o aumento da demanda energética, a exploração de recursos oceânicos, como petróleo, gás natural e energia eólica *offshore*, está ganhando importância estratégica (MA, 2020). As descobertas desses recursos em águas profundas têm impulsionado a exploração em águas cada vez mais distantes e profundas, onde as plataformas precisam ser flutuantes e, portanto, ancoradas no fundo marinho (WANG *et al.*, 2019). Tradicionalmente, métodos de penetração como prensagem, impacto e vibração exigem equipamentos robustos, o que encarece a instalação de estacas em águas profundas (DONG, 2022). Como alternativa, a

estaca torpedo, uma inovação brasileira patenteada pela PETROBRAS (Empresa Brasileira de Petróleo), surge como uma opção prática para o cenário *offshore* e foi projetada para penetrar o solo marinho em queda livre, eliminando a necessidade de grandes maquinários (ADS *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2018; YU E YANG, 2020).

No entanto, condições adversas de vento e corrente oceânica podem desviar a posição da estaca ou incliná-la, reduzindo sua capacidade de suporte (DONG, 2022; ZHANG *et al.*, 2024). Pesquisas sugerem que o uso de jatos d'água, aplicados de forma vertical e circular, pode corrigir e aumentar a penetração das estacas, trazendo economia e maior eficiência (SHEPLEY E BOLTON, 2014; ROCHA *et al.*, 2023). Neste cenário, este estudo visa avançar essas investigações, analisando o impacto da vazão na penetração dos modelos de estaca torpedo sob condições de baixas vaz

2. Material e métodos

Dadas as grandes dificuldades e os elevados custos associados à realização de ensaios em escala real, esta pesquisa optou pela representação dos protótipos modelos de estaca torpedo T66 e T120, respectivamente com 60 e 120 ton) por meio de modelos reduzidos. Para tanto, foram conduzidos ensaios em duas escalas de comprimento (1:76 e 1:67), com dois diâmetros de jato diferentes (12,5 e 25% do diâmetro externo da estaca).

Os parâmetros foram estabelecidos segundo a Lei de Semelhança por Número de Froude, apropriado para condições em que é necessário preservar a relação entre as forças inerciais e gravitacionais. A Tabela 1 apresenta os resultados da aplicação da Teoria de Froude, exibindo as dimensões de protótipos e modelos, onde d_e é o diâmetro externo da estaca, d_{jp} é o diâmetro de jato pequeno, d_{jg} é o diâmetro de jato grande, m_{66} é a massa do modelo de estaca T66 e m_{120} é o modelo de estaca T120.

Tabela 1 – Dimensões de protótipos e modelos

Parâmetro	Escala 1:1	Escala 1:67	Escala 1:76
d_e	1070 mm	16 mm	14 mm
d_{jp}	130 mm	2 mm	1,7 mm
d_{jg}	260 mm	4 mm	3,3 mm
m_{66}	66 ton	220 g	150 g
m_{120}	120 ton	400 g	275 g

Os ensaios foram realizados utilizando uma mistura composta por 85% de caulim e 15% de bentonita, com base no peso seco dos materiais, mantendo um teor de umidade de $\pm 3\%$. Os ensaios de caracterização geotécnica foram realizados em conformidade com as normas técnicas vigentes. Houve um tempo mínimo de espera de 24 horas entre a preparação da mistura e a realização dos ensaios, de forma a permitir a ocorrência das reações entre a bentonita e a água.

Para a realização dos ensaios foram utilizados três tanques de acrílico. Dois deles possuem dimensões de 450 mm \times 450 mm \times 700 mm, diferenciando-se pelo fato de um ser totalmente vedado na base, enquanto o outro possui uma abertura que permite a drenagem da água nos ensaios em que a argila foi submetida à dupla drenagem. O terceiro tanque utilizado exclusivamente para a condição de drenagem simples apresenta dimensões de 700 mm \times 700 mm \times 600 mm.

O sistema empregado para a penetração das estacas segue a descrição apresentada em Rocha *et al.* (2023). A resistência ao cisalhamento não-drenada do solo, sob diferentes condições de drenagem e tempo de adensamento, foi determinada por meio de mini-palhetas.

3. Análise e discussão dos dados

A Tabela 2 apresenta a caracterização geotécnica dos materiais estudados, onde: γ é o peso específico do solo; γ_s é o peso específico dos grãos; γ_d é o peso específico aparente seco do solo; e é índice de vazios; n é a porosidade; d_{50} é o diâmetro médio das partículas de solo no qual 50% são passantes; w_l é o limite de liquidez; w_p é o limite de plasticidade; I_p é o índice de plasticidade; I_l é o índice de liquidez; I_c é o índice de consistência; e I_a é o índice de atividade coloidal.

Tabela 2 – Caracterização geotécnica

Propriedade geotécnica	Caulim	Bentonita	Mistura
γ (kN/m ³)	-	-	14,00
γ_s (kN/m ³)	25,38	24,46	26,46
γ_d (kN/m ³)	-	-	6,36
e	-	-	3,16
n (%)	-	-	75,96
d_{50} (mm)	0,015	-	0,002
w_l (%)	58	453	116,00
w_p (%)	30	86	46,00
I_p (%)	28	367	70
I_c (%)	-	-	-0,06
I_l (%)	-	-	1,06
I_a (%)	0,61	4,37	1,52
% argila	46	84	46
% silte	52	16	53
% areia	2	0	1

Observa-se que a bentonita apresenta um índice de atividade coloidal característico de um solo ativo, confirmando o caráter expansivo do argilomineral de estrutura 2:1, típico da bentonita sódica utilizada nesta pesquisa. Por outro lado, o caulim é classificado, de acordo com o mesmo critério, como um solo inativo. Além disso, constatou-se que a adição de 15% de bentonita ao caulim não é suficiente para transformar a mistura em um solo ativo.

Verificou-se um aumento nos Limites de Atterberg da mistura com a adição de bentonita ao caulim. Este comportamento era esperado, pois o incremento de partículas finas ao solo, como no caso da bentonita ao caulim, tende a elevar estes parâmetros. Considerando a classificação baseada nos limites de liquidez e plasticidade, com um teor de umidade de 120%, a mistura apresenta um comportamento líquido e é classificada como um solo altamente plástico. Em relação ao índice de consistência, com o mesmo teor de umidade, a mistura é considerada como um solo muito mole. O índice de liquidez indica que a mistura possui o comportamento de uma argila normalmente adensada, conforme o esperado.

Pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), o caulim e a mistura são classificados como CL, ou seja, argilas de baixa plasticidade. Por outro lado, a bentonita é classificada como CH, ou seja, argila de alta plasticidade. Pelo sistema de classificação *Highway Research Board* – HRB, o caulim é classificado como um solo A-7 (19), enquanto a bentonita e as misturas são classificadas como um solo A-7 (20). Assim, como esperado, o aumento do índice de grupo confirma que a adição de bentonita ao caulim contribui para a redução da capacidade de suporte da mistura.

A Figura 1 compara as porcentagens granulométricas da fração fina da mistura com os resultados obtidos para solos de três campos de exploração de petróleo brasileiros e com o intervalo dessas frações testados em estudos realizados na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). A Figura demonstra que o solo testado é representativo dos solos encontrados nesses campos de exploração. Conforme dados fornecidos pela PETROBRAS (2011), o peso específico do solo próximo a superfície nos campos Lula, Lula NE e Guará é 14,2, 15,05 e 15,90 kN/m³, respectivamente e, em todos os casos, há uma taxa de crescimento de 0,07 z ao longo da profundidade. A mistura caulim-bentonita apresenta, conforme apresentado anteriormente, um peso específico de 14 kN/m³.

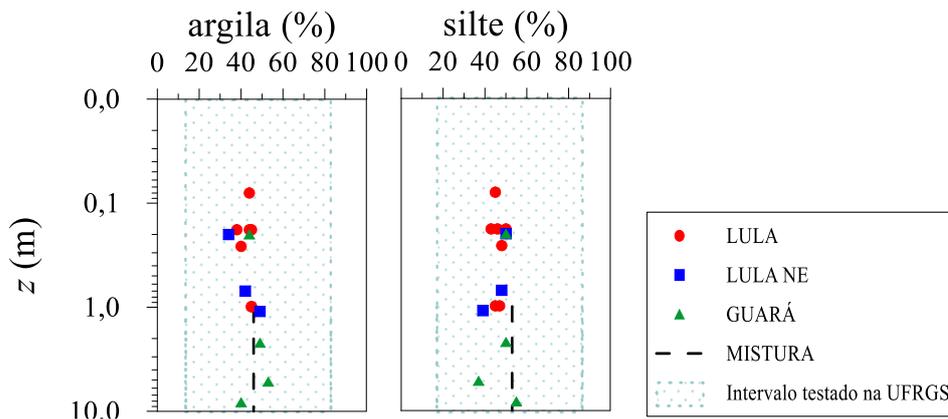


Figura 1: Composição granulométrica fina

A Figura 2 apresenta os resultados dos Limites de Atterberg dos campos Lula, Lula NE e Guará, conforme dados da PETROBRAS (2011), e compara esses valores com os obtidos para a mistura de caulim e bentonita utilizada nesta pesquisa. Observa-se que o Limite de Liquidez da mistura é compatível com os dados de campo. Entretanto, o Limite de Plasticidade situa-se no limite superior dos encontrados pros solos naturais.

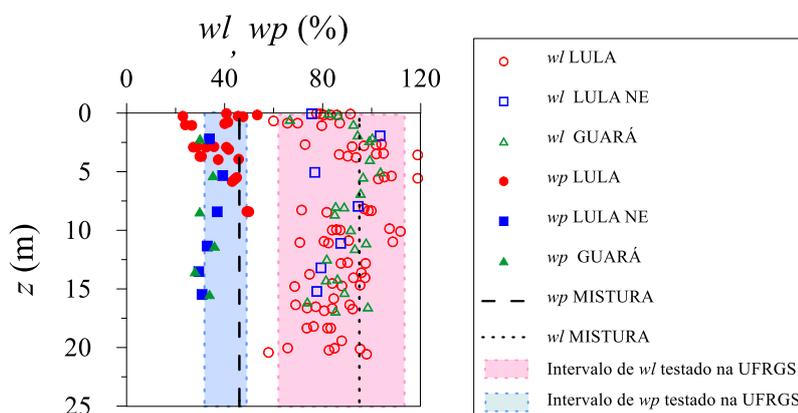


Figura 2: Limites de Atterberg

As Figuras 3 e 4 apresentam os resultados de resistência ao cisalhamento não-drenada nas condições de drenagem simples e dupla, respectivamente. Para aplicar as equações apresentadas nas figuras, podem ser considerados dois valores de penetração: (i) o valor médio, para a determinação da resistência ao cisalhamento não-drenada lateral (S_{ul}); e (ii) o valor total, para a determinação da resistência ao cisalhamento não-drenada de ponta (S_{up}).

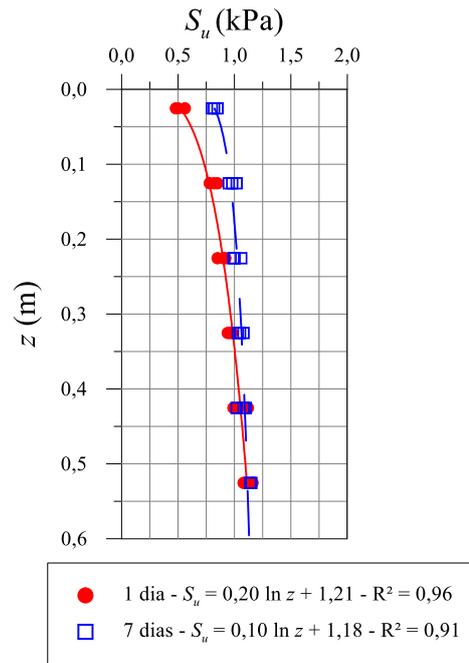


Figura 3: Resistência ao cisalhamento não-drenada do solo submetido à drenagem simples

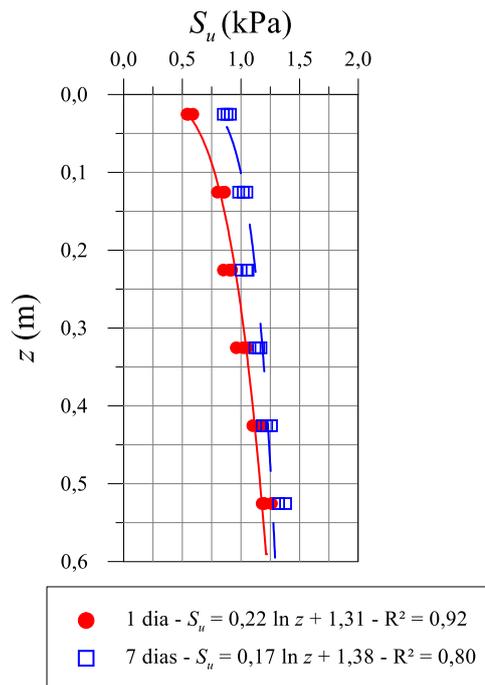


Figura 4: Resistência ao cisalhamento não-drenada do solo submetido à drenagem dupla

Ensaio preliminares indicam que, para uma dada tendência de resistência ao cisalhamento não-drenada do solo (determinada pela combinação de tempo de adensamento e condição de drenagem), modelo de estaca torpedo e escala ensaiada, o comportamento da penetração (z) em relação à vazão aplicada (Q) pode ser representado pela Figura 5. Nesta figura, Q_I corresponde à vazão a partir da qual o aumento da penetração com função do aumento de vazão passa a ocorrer praticamente de forma linear.

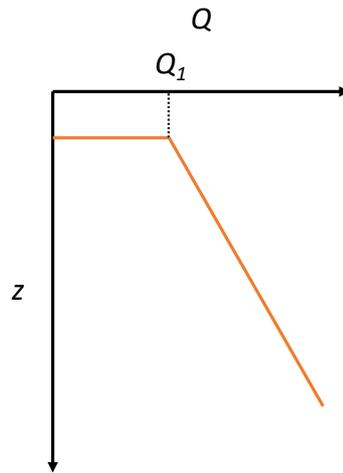


Figura 5: Comportamento característico observado da penetração em função da vazão

As Figuras 6 a 14 apresentam os resultados obtidos com vazão nula ou inferior a Q_1 , onde 1D, 7D, D.S. e D.D. significam, respectivamente 1 dia de adensamento, 7 dias de adensamento, drenagem simples e drenagem dupla. Ao ajustar uma única reta parada cada condição de ensaio (considerando o tempo de adensamento, a condição de drenagem, o modelo de estaca testado e a escala do ensaio) com os dois diâmetros de jato d'água testados, aproximadamente 95% dos resultados ficaram dentro do intervalo de predição de 90%. Esse resultado demonstra que a hipótese de vazão não influencia esse conjunto de resultados é válida. Assim, por hipótese, considera-se que a energia gerada pelo hidrojetamento não é suficiente para remover o solo argiloso e formar uma cavidade fluidizada que facilite a penetração da estaca.

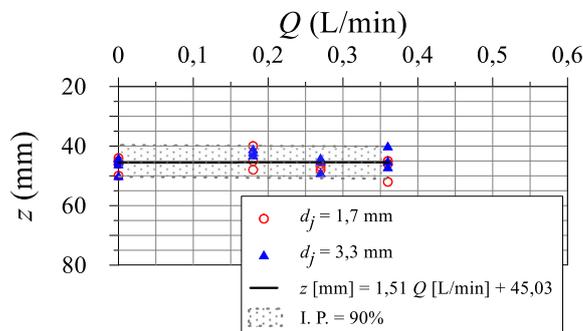


Figura 6: Resultados de penetração em função da vazão para modelo de estaca torpedo T66, na escala de comprimento 1:76 com solo submetido à drenagem simples e 1 dia de adensamento

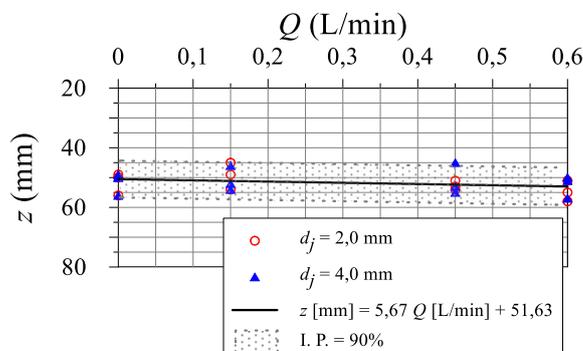


Figura 7: Resultados de penetração em função da vazão para modelo de estaca torpedo T66, na escala de comprimento 1:67 com solo submetido à drenagem simples e 1 dia de adensamento

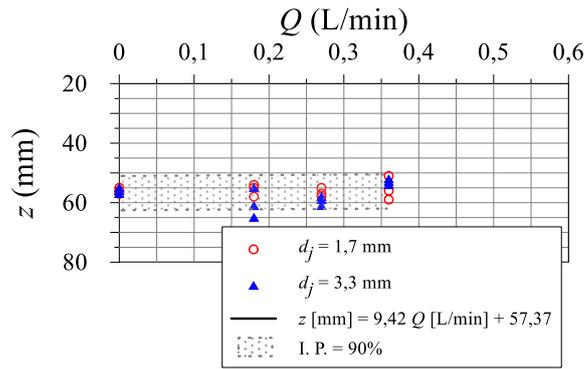


Figura 8: Resultados de penetração em função da vazão para modelo de estaca torpedo T120, na escala de comprimento 1:76 com solo submetido à drenagem simples e 1 dia de adensamento

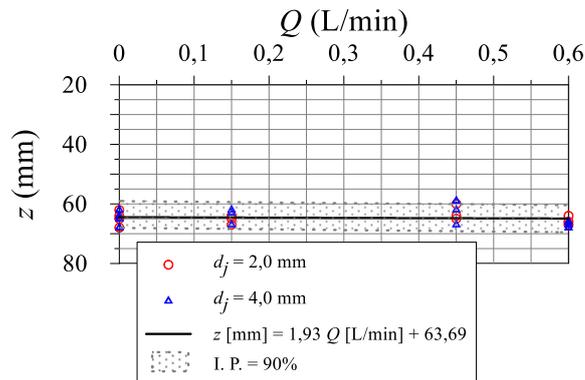


Figura 9: Resultados de penetração em função da vazão para modelo de estaca torpedo T120, na escala de comprimento 1:67 com solo submetido à drenagem simples e 1 dia de adensamento

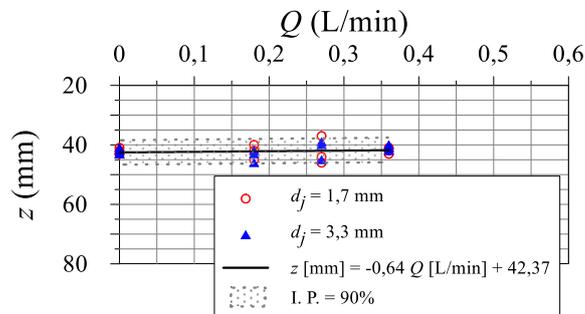


Figura 10: Resultados de penetração em função da vazão para modelo de estaca torpedo T66, na escala de comprimento 1:76 com solo submetido à drenagem dupla e 1 dia de adensamento

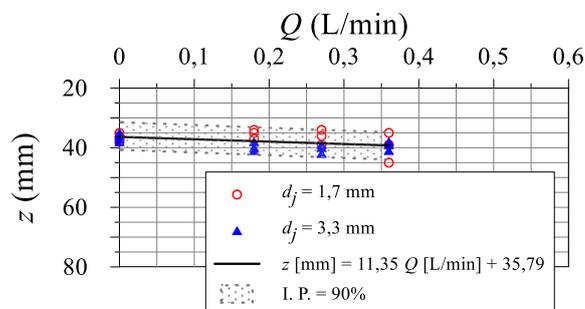


Figura 11: Resultados de penetração em função da vazão para modelo de estaca torpedo T120, na escala de comprimento 1:76 com solo submetido à drenagem dupla e 7 dias de adensamento

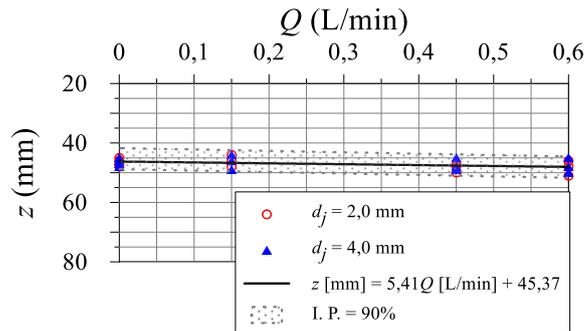


Figura 12: Resultados de penetração em função da vazão para modelo de estaca torpedo T66, na escala de comprimento 1:67 com solo submetido à drenagem simples e 7 dias de adensamento

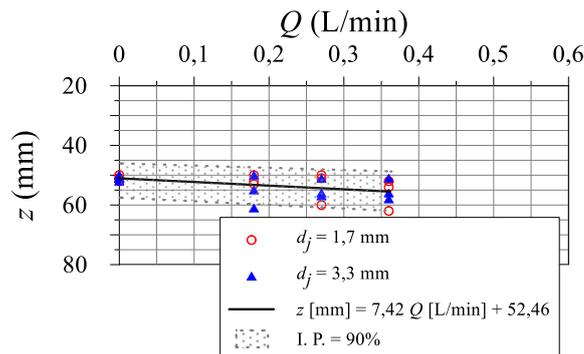


Figura 13: Resultados de penetração em função da vazão para modelo de estaca torpedo T120, na escala de comprimento 1:76 com solo submetido à drenagem simples e 7 dias de adensamento

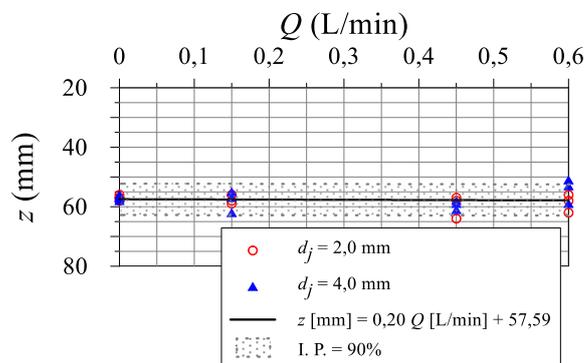


Figura 14: Resultados de penetração em função da vazão para modelo de estaca torpedo T120, na escala de comprimento 1:67 com solo submetido à drenagem simples e 7 dias de adensamento

Para a determinação da capacidade de carga de ponta unitária (P_{pu}) foram utilizadas as formulações de Meyerhoff (1951) e Skempton (1951) – Equação 1. A partir da proposta de Skempton (1951) para a estimativa de N_c em função do embutimento relativo da estaca no solo, obteve-se um valor de N_c igual a 9. A capacidade de carga por atrito lateral (P_{lu}) foi determinada utilizando um fator empírico associado à resistência ao cisalhamento não-drenada (α), conforme Equação 2. Segundo Hachich *et al.* (1998), este fator empírico é aproximadamente 1 para argilas normalmente adensadas, conforme a estudada nesta pesquisa. Para converter as capacidades de carga unitárias em capacidade de carga total, aquelas foram multiplicadas pela área correspondente (lateral ou ponta).

$$P_{pu} = S_{up} N_c + \gamma d_e \tag{Equação 1}$$

$$P_{lu} = \alpha S_{ul}$$

Equação 2

A Figura 15 mostra os resultados do somatório das resistências mobilizadas no instante de paralisação da penetração em função do peso submerso do modelo. O ajuste linear próximo a 45° confirma que estas são as principais forças atuantes no processo de penetração dos modelos quando submetidos a vazões menores que Q_l . Esse comportamento reforça a conclusão de que a vazão pode ser desconsiderada na análise desses resultados.

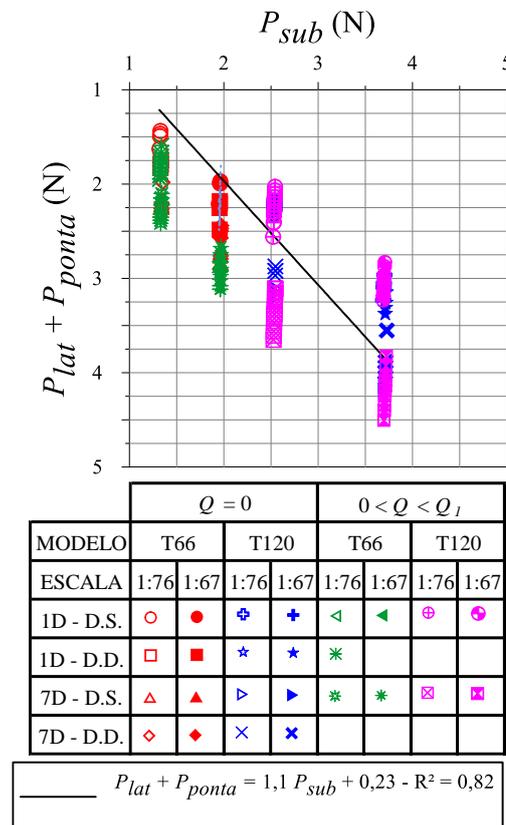


Figura 15: Resistência mobilizada em função do peso submerso dos modelos.

4. Conclusões

O estudo trouxe algumas contribuições relevantes para a compreensão do processo de instalação de estacas torpedo em ambiente *offshore*. Primeiramente, foi possível demonstrar que, para que a vazão de água influencia na penetração das estacas no solo, existe uma vazão mínima necessária. Ensaios realizados em baixas vazões indicaram que, abaixo deste limite mínimo, a penetração das estacas não é significativamente afetada. No instante de paralisação da penetração, o somatório das resistências mobilizadas (lateral e de ponta) igual-se ao peso submerso dos modelos, revelando que, nestas condições, as forças intervenientes envolvem exclusivamente o peso da estaca e a resistência do solo, sem contribuição efetiva da vazão. Este resultado serve como um alerta importante para a prática de instalação, indicando a necessidade de identificar e aplicar vazões maiores do que esta mínima para garantir a eficiência do processo.

Embora o estudo tenha evidenciado a existência desta vazão mínima, a determinação de uma metodologia para calcular este limite específico ainda não foi abordada, o que representa uma sugestão valiosa para trabalhos futuros. Entende-se que desenvolver uma forma de quantificar essa vazão mínima pode estabelecer parâmetros operacionais precisos,

garantindo eficiência e controle do processo de instalação das estacas torpedo, além de minimizar custos desnecessários.

Este estudo também se beneficiou do uso de modelos reduzidos para simular as condições de penetração das estacas. Em fase preliminar, essa abordagem experimental em ambiente laboratorial evita os altos custos e complexidade associados aos ensaios de campo em escala real, especialmente nas etapas iniciais de investigação. Os modelos reduzidos permitiram uma análise controlada e detalhada, proporcionando resultados confiáveis e aplicáveis ao ambiente *offshore* e servindo como base para futuras extrapolações em escala real.

Adicionalmente foi apresentada uma contribuição significativa ao utilizar uma mistura artificial de solo fino, composta por caulim e bentonita, representativa das características geotécnicas de alguns dos principais campos de exploração de petróleo *offshore* brasileiros. O uso deste solo artificial não apenas facilitou a realização dos ensaios laboratoriais, mas também estabeleceu um modelo geotécnico que pode ser aproveitado em pesquisas futuras.

Referências

ADS, A.; ISKANDER, M.; BLESS, S.; OMIDVAR, M. *Visualizing the effects of Fin length on torpedo anchor penetration and pullout using a transparent soil.* Ocean Engineering, v. 216. 2020. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.108021

DONG, C. *Torpedo pile penetration by combined water jet and mechanical vibrations in cohesive sedimentary beds.* Ocean Engineering, v. 266. 2022. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.112723

HACHICH, W.; HENRIQUES JR., P.R.D.; PORTO, E.C.; MEDEIROS JR., C.J.; FOPPE, D.; COSTA, R.G.B.; FERNANDES, J.V.V.; DANZIGER, F.A.B.; JANNUZZI, G.M.F.; GUIMARÃES, G.V.M.; SILVA JR., S.P. *O desenvolvimento do piezocone-torpedo: finalidades do ensaio, desafios e primeiros testes.* Anais do XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG, Gramado, Brasil, 8 p. 2010.

LOURENÇO, D. E.; SCHANID, F.; SCHETTINI, E. B. C. *Model pile installation by vertical water jet in clay.* Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, v. 142, n. 4. 2020. DOI: 10.1115/1.4046169

MA, Y. *Marine oil and gas exploration in China.* Springer Nature. 2020.

MEYERHOFF, G. G. *The ultimate bearing capacity of foundations.* Geotéchnique, v. 2, n. 4, p. 301 – 302. 1951.

PASSINI, L. B.; SCHNAID, F. *Experimental investigation of pile installation by vertical jet fluidization in sand.* Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, v. 137, n. 4. 2015. DOI: 10.1115/1.4030707.

PASSINI, L.B.; SCHNAID, F.; SALGADO, R. *Experimental study of shaft resistance of model piles in fluidized and nonfluidized fine sand.* Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, v. 129. 2017. DOI: 10.1115/1.4036371

PETROBRAS. *Relatório Interno.* 11 p. 2011.

ROCHA, L. V.; FAGUNDES, D. F.; CAMARGO, K. R. *Ensaio de campo de penetração auxiliada por jato de água de modelos de estaca torpedo em solo granular.* Scientia Plena, v. 6 2023. DOI: 10.14808/sci.plena.2023.119917.

SHEPLEY, P.; OLTON, M. D. *Using water injection to remove pile base resistance during installation.* Canadian Geotechnical Journal, v. 51, n. 11. DOI: 10.1139/cgj-2013-0240.

SKEMPTON, A. W. *The bearing capacity of clays.* Building Research Congress, London, p. 180 – 189. 1951.

WANG, W.; CHEN, X.; YU, G. *Maximum force of inclined pullout of a torpedo anchor in cohesive beds.* China Ocean Engineering, v. 3., n. 3. 2019. DOI: 10.1007/s13344-019-0032-6.

WANG, W.; WANG, X.; YU, G. *Vertical holding capacity of torpedo anchors in underwater cohesive soil.* Ocean Engineering, v. 3., n. 3. 2018. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.05.018

YU, L.; YANG, Q. *The penetration resistance of the elliptical tip o*

f torpedo anchor in cohesive soil. Ocean Engineering, v. 218. 2020. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.108034

ZHANG, B.; FU, Y.; WANG, Q. *Installation performance of torpedo anchor at different installation heights under the action of currents: The example of T98 torpedo anchor.* Ocean Engineering. 2024. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.116626