

## Módulo Cisalhante Máximo de Areia Quartzosa Obtido Através do Ensaio Mini *Air Hammer* em Centrífuga Geotécnica

Rodolfo Torres de Carvalho Barboza  
Mestrando, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, rodolfo.barboza@coc.ufrj.br

Sílvia Gomes Fernandes Polido Lemos  
Doutora em Engenharia Civil, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, polidolemos@gmail.com

Nathália Pizzol Oliveira  
Mestranda, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, nathalia.oliveira@coc.ufrj.br

Maria Cascão Ferreira de Almeida  
Pesquisadora, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, mariacascão@poli.ufrj.br

Márcio de Souza Soares de Almeida  
Pesquisador, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, marciossal@gmail.com

**RESUMO:** O desenvolvimento de projetos de estruturas esbeltas, como os arranha-céus e as turbinas eólicas *offshore*, vem estimulando o estudo do comportamento da interação dinâmica solo-estrutura, sendo fundamental o conhecimento dos parâmetros dinâmicos do solo, como o módulo cisalhante. Para obtenção de parâmetros representativos em laboratório é fundamental reconstituir o solo em escala reduzida nas condições encontradas no campo, o que pode ser obtida através da modelagem física em centrífuga. O trabalho tem como objetivo desenvolver em centrífuga geotécnica o dispositivo denominado *air hammer* para obtenção do módulo cisalhante máximo ( $G_{máx}$ ), parâmetro que traduz a rigidez inicial do solo. O modelo de solo foi preparado pela metodologia de pluviação automática a seco apresentando uma repetibilidade adequada. A velocidade da onda cisalhante ( $V_s$ ) foi obtida medindo o tempo de viagem da onda entre dois acelerômetros consecutivos, permitindo assim a obtenção do perfil de  $G_{máx}$  com a profundidade. Para validar o dispositivo experimental desenvolvido, os valores experimentais de  $G_{máx}$  foram comparados com as estimativas obtidas por meio de correlações empíricas da literatura, apresentando resultados similares àqueles obtidos por Seed e Idriss (1970), o que validou o dispositivo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Módulo cisalhante máximo, Ensaio mini *air hammer*, Modelagem centrífuga, Pluviação de areias, Areias quartzosas.

**ABSTRACT:** The development of slender structures projects, such as skyscrapers and offshore wind turbines, has been stimulating the study of the dynamic soil-structure interaction, with fundamental importance placed on knowledge dynamic parameters of soil, such as the shear modulus. To obtain representative parameters in the laboratory, it is crucial to reconstitute the soil on a reduced scale under field conditions, which can be achieved through physical modeling in a centrifuge. This work aims to development a device in a geotechnical centrifuge called *air hammer* to obtain the small strain shear modulus ( $G_{máx}$ ), a parameter that reflects the initial stiffness of the soil. The soil model was prepared using the methodology of dry automatic pourer, showing adequate repeatability. The shear wave velocity ( $V_s$ ) was obtained by measuring the travel time of the wave between two consecutive accelerometers, allowing to obtain the  $G_{máx}$  profile with depth. To validate the developed experimental device, the experimental values of  $G_{máx}$  were compared with estimates obtained through empirical correlations in the literature, showing similar results to those obtained by Seed and Idriss (1970), thereby validating the device.

**KEYWORDS:** Small strain shear modulus; Air hammer test; Centrifuge modeling; Sand pourer; Quartz sands.

## 1 INTRODUÇÃO

Apesar da importância da interação dinâmica solo-estrutura, muitas simplificações ainda são admitidas na elaboração e desenvolvimento de projetos de fundações de estruturas submetidas a carregamentos dinâmicos e/ou cíclicos, muitas vezes devido à dificuldade na obtenção de parâmetros geotécnicos que reproduzam o comportamento do solo.

Para as estruturas esbeltas, como as turbinas eólicas *offshore*, o conhecimento de parâmetros dinâmicos é fundamental. Essas estruturas apresentam características únicas devido à distribuição de massa e rigidez ao longo da altura, e às cargas que agem sobre elas, que incluem componentes cíclicos e dinâmicos.

No Brasil já é grande o interesse para o desenvolvimento de novos projetos para instalação de parques eólicos *offshore*, existindo, conforme o site do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos (2023), 96 projetos de complexos eólicos *offshore* com processos de licenciamento ambiental abertos no IBAMA, o que tem motivado estudos e pesquisas do comportamento destas estruturas, como as conduzidas no Laboratório Multiusuário em Modelagem Centrífuga (LM<sup>2</sup>C) da COPPE-UFRJ (e.g. BARRA, 2020; GOMES, 2020; FERREIRA, 2021; LOPES *et al.*, 2023, ALMEIDA *et al.*, 2023 e LEMOS, 2024).

As pesquisas conduzidas no LM<sup>2</sup>C têm demandado o conhecimento de parâmetros dinâmicos de areias utilizadas nos estudos da interação solo-estrutura de turbinas eólicas *offshore*. Os modelos centrífugos destas estruturas foram ensaiados com baixos níveis de deformações cisalhantes, sendo importante para as análises dos resultados experimentais a obtenção dos parâmetros de deformabilidade do solo.

A realização do ensaio exige a preparação da amostra de forma criteriosa para a reconstituição das condições do solo em campo. O método de preparação da amostra do solo deve ser capaz de (1) reproduzir amostras de solo na faixa de peso específico unitário esperado em um depósito *in situ*; (2) manter uma proporção de vazios uniforme em todo o volume da amostra; (3) não permitir a segregação granulométrica da amostra, independentemente de sua distribuição granulométrica ou do teor de finos; (4) simular o processo de deposição do solo encontrado *in-situ* (KUERBIS, 1988).

O presente trabalho tem por objetivo (a) o desenvolvimento, para uso na centrífuga geotécnica do LM<sup>2</sup>C, do dispositivo experimental denominado *air hammer* para obtenção do módulo de cisalhamento para pequenas deformações do solo ( $G_{máx}$ ), (b) adequar os procedimentos de preparação da amostra de solo para a utilização com os dispositivos dos ensaios de mini *air hammer* com DR=80% e, por fim, (c) verificar a repetibilidade da preparação da amostra através do ensaio mini CPT.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Centrífuga geotécnica de braço

A centrífuga geotécnica de braço do Laboratório Multiusuário de Modelagem Centrífuga (LM<sup>2</sup>C) da COPPE/UFRJ na qual foram realizados os ensaios (Figura 1) apresenta diâmetro de 1,60 m e velocidade angular máxima de 638 rpm, atingindo até 300 vezes a aceleração da gravidade (300 g). Para realização dos ensaios foi utilizada uma caixa cilíndrica confeccionada em alumínio de alta resistência instalada no interior da caixa retangular da centrífuga, com diâmetro interno de 220 mm e altura de 145 mm. Conforme reportado por Lemos (2024), foi necessário instalar uma nova estrutura de suporte no interior da centrífuga para fixação de um novo computador de bordo (instalação de novos softwares), do osciloscópio (para aquisição dos sinais dos acelerômetros) e de componentes elétricos, eletrônicos e pneumáticos (para automação e controle dos ensaios).



Figura 1 - Centrífuga de braço utilizada nos ensaios

## 2.2 Célula de carga e mini CPT

Os ensaios de penetração com mini CPT utilizaram uma célula de carga da Omega Engineering, modelo LCM202 com capacidade de 5.000 N (Figura 2). As constantes de calibração da célula de carga foram determinadas através de ciclos de carga e descarga, correlacionados com a variação da tensão elétrica medida através sistema de aquisição de dados LogLab.



Figura 2. Célula de carga de 5000 N utilizada nos ensaios de CPT

Durante o ensaio CPT, os dados de força foram adquiridos pelo software LogLab a taxa de 1kHz. O objetivo dos ensaios foi avaliar a repetibilidade da amostra de solo preparada utilizando a metodologia de pluviação automática desenvolvida por Ferreira (2021) para obtenção da densidade relativa de  $80 \pm 1\%$ . O mini CPT utilizado consiste em um cone de 1 cm<sup>2</sup> de área, 12 mm de diâmetro, haste de 152 mm de comprimento e ângulo de ponta de 60°. Os ensaios foram realizados com a velocidade de cravação de 10 mm/s até atingir 120 mm de profundidade para uma amostra de solo em caixa cilíndrica com altura de 145 mm.

## 2.3 Acelerômetro e mini air hammer

Os acelerômetros do tipo MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) representam avanços tecnológicos constantes na medição de movimentos, incorporando microeletrônica e processamento de sinais. Esses dispositivos oferecem detecção de movimentos em múltiplos eixos com alta faixa dinâmica, sendo fundamentais em diversas aplicações. O modelo ADXL1001 (Figura 3) utilizado é um acelerômetro de único eixo com características de densidade de ruído ultrabaixa, sensibilidade estável e repetível, resistente a choques externos de até 10.000g, com dimensões compactas de 5 mm × 5 mm × 1,80 mm. A operação dos acelerômetros envolve a conversão de aceleração medida em um sinal elétrico de saída, onde uma tensão de alimentação é necessária.

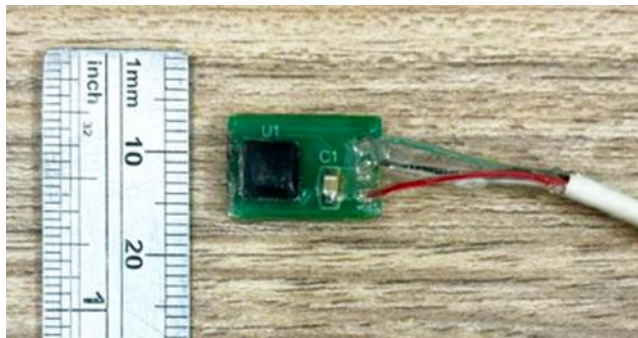


Figura 3. Acelerômetro

O mini air hammer surgiu como uma abordagem inovadora e eficaz para obter o módulo de cisalhamento do solo em centrífuga geotécnica. O dispositivo desenvolvido consiste em um cilindro com um pistão de teflon interno de 19 mm de comprimento (Figura 4), cujo movimento acionado por ar comprimido gera um impacto, produzindo ondas cisalhantes na amostra de areia. Essas ondas são detectadas pelos acelerômetros, com uma diferença de tempo entre o impacto de ida e volta de 50 ms.

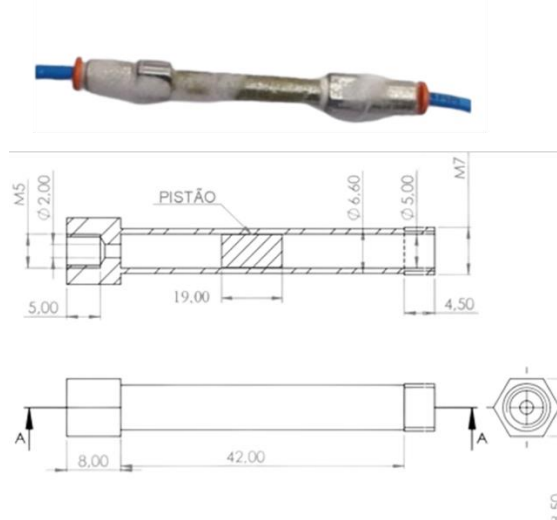


Figura 4. Areia colada com epóxi na parte central do cilindro do air hammer, teste de vedação e esquema com suas dimensões (mm)

O air hammer foi revestido com areia aderida por resina epóxi para aumentar o atrito com a amostra de areia quartzosa, conforme recomendado por Arulnathan et al. (2000). As conexões do air hammer com as mangueiras de ar foram testadas para garantir vedação e evitar perturbações na amostra de areia devido a vazamentos de ar ascendente. As calibrações indicaram a necessidade de utilização da pressão de ar comprimido de 4,0 bar para manter baixos os níveis de deformação no solo necessários para obtenção de  $G_{max}$ . Os sinais foram aquisitados por um osciloscópio digital, com interface com o *software* PicoScope com visualizações no domínio do tempo.

## 2.4 Preparação e montagem da caixa de ensaio

A estrutura de suporte dos acelerômetros foi instalada em duas posições distintas para avaliar possível efeito de borda (Figura 5). Na posição do suporte situada a 50 mm do centro da caixa cilíndrica o ensaio foi denominado tipo MB. Na posição do suporte no centro da caixa o ensaio foi denominado tipo MC. Nesta disposição a distância (I) entre o acelerômetro inferior e intermediário, foi de 37 mm, e a distância (S) entre o acelerômetro intermediário e o superior, foi de 35 mm. O air hammer foi colocado abaixo dos acelerômetros, com as mangueiras de ar comprimido fixadas lateralmente na caixa cilíndrica, completando a montagem antes da etapa de pluviação.

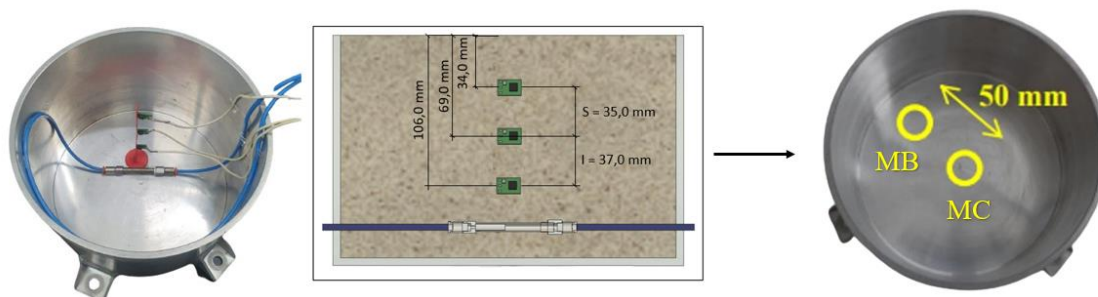


Figura 5. Preparação do ensaio, montagem tipo MB e MC.

### 3 RESULTADOS E ANÁLISES

A Figura 6 apresenta em forma de fluxograma a programação dos ensaios mini CPT e mini *air hammer*, indicando o fator de escala N de cada ensaio, determinado em função da aceleração da centrífuga.

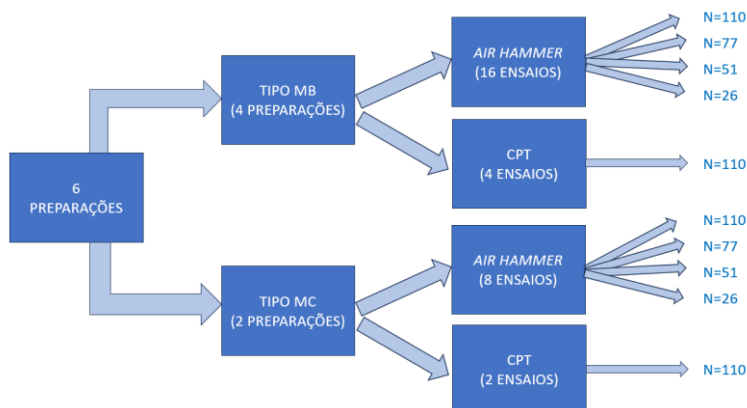


Figura 6. Programação de ensaios

Os resultados dos ensaios mini CPT mostrados na Figura 7 indicam uma relação linear entre a resistência de ponta ( $q_c$ ) e a profundidade, indicando que as amostras de solo apresentam comportamento similar e que o método de pluviação proporciona uma boa repetibilidade na preparação das amostras. A discrepância observada no final dos ensaios, além de 10,0 m, pode ser atribuída ao efeito de borda em relação ao fundo da caixa cilíndrica.

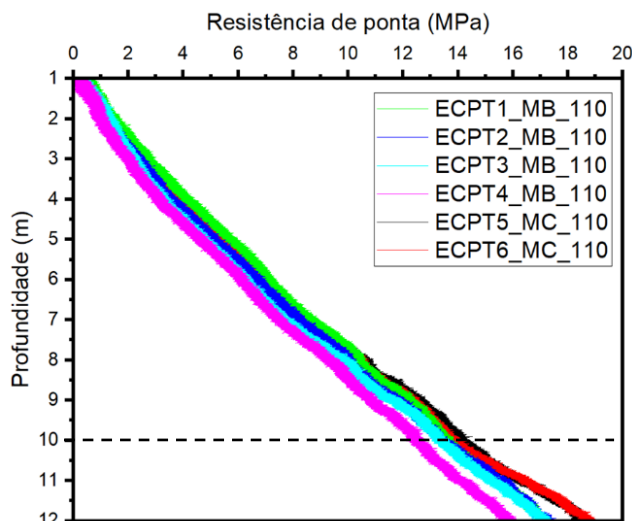


Figura 7. Resultados da resistência de ponta com a profundidade obtidos com os ensaios CPT

Os principais métodos para determinar a velocidade de propagação da onda cisalhante no domínio do tempo são a correlação cruzada e o pico a pico (MARSHALL et al., 2018). A análise pico a pico é mais simples, pois envolve a identificação de características como picos e vales nas ondas de entrada e saída. Os intervalos entre esses pontos representam o tempo de viagem da onda de cisalhamento. No entanto, variações nos intervalos podem ocorrer devido ao amortecimento, atenuação e conteúdo de frequência dos sinais. A Figura 8 apresenta um exemplo de análise pico a pico dos ensaios mini air hammer realizados por CAMELO, 2021.

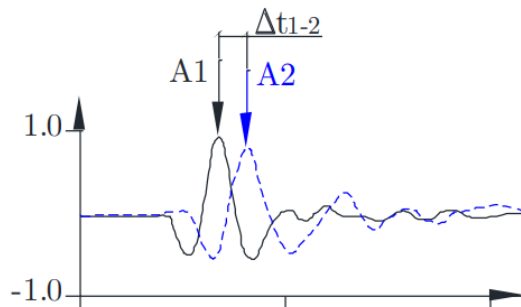


Figura 8. Exemplo de sinal de output típico com os pontos em seta denotando as possíveis escolhas subjetivas para a chegada das ondas. Adaptado de Camelo (2021)

A correlação cruzada entre um pulso de entrada e sua resposta resulta em um pico temporal, representando o tempo de viagem da onda entre os dois pontos (Airey, 2013). Essa técnica é adequada para sinais de natureza similar, com frequências comparáveis (Viggiani, 1995). Devido às características dos sinais dos acelerômetros, a análise pico a pico foi considerada mais adequada para determinar o tempo de propagação da onda cisalhante entre os acelerômetros (distâncias I e S).

A Figura 9 mostra o resultado de um ensaio típico. Os sinais capturados pelos acelerômetros foram adquiridos pelo osciloscópio e registrados no software PicoScope e processados no OriginPro utilizando o filtro FFT (filtro de transformada de Fourier) e a ferramenta "peak analyzer". Isso permitiu identificar os primeiros picos nos sinais de cada acelerômetro, obtendo o tempo de viagem da onda de cisalhamento. Com a distância conhecida entre os acelerômetros, a velocidade da onda cisalhante foi calculada ( $V_s = \Delta d / \Delta t$ ).

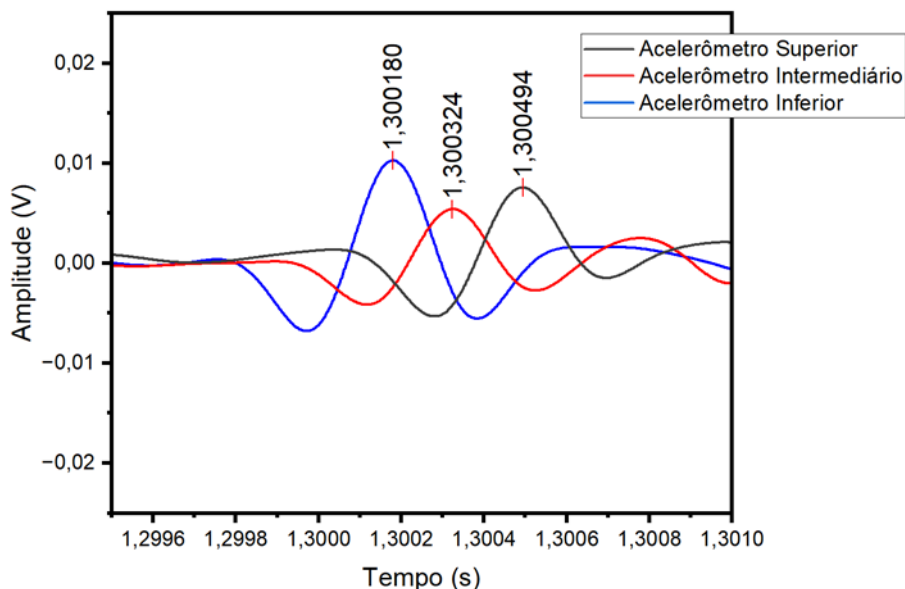


Figura 9. Resultado típico dos sinais captados através dos ensaios com mini air hammer

A Figura 10 mostra os valores experimentais de obtidos  $G_{m\acute{a}x}$  através dos ensaios com mini *air hammer* ( $G_{m\acute{a}x} = V_s^2 \rho$ ), coluna ressonante e *bender elements* comparados com os valores obtidos por formulações

teóricas. Como pode ser observado os resultados experimentais obtidos com *air hammer* estão mais congruentes com os valores teóricos da formulação de Seed e Idriss (1970)

Para tensões confinantes de  $\sigma_c = 50 \text{ kPa}$ , os resultados de  $G_{\text{máx}}$  obtidos com o ensaio de *air hammer* foram aproximadamente 53,14% maiores que os da coluna ressonante e apenas 0,5% maiores que os de *bender elements*. Para  $\sigma_c = 100 \text{ kPa}$ , as diferenças foram aproximadamente 33,61% e 27,06%, respectivamente. Os resultados indicam que, como esperado, os valores de  $G_{\text{máx}}$  obtidos nos ensaios com *bender elements* são mais consistentes com os obtidos no ensaio *air hammer*, já que os ensaios geram níveis de deformação do solo similares, diferente do nível de deformação gerado nos ensaios de coluna ressonantes.

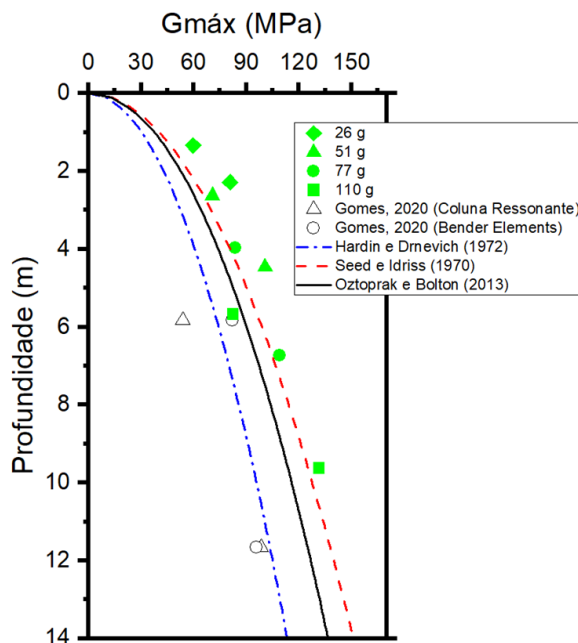


Figura 10. Comparação entre os módulos cisalhantes máximo ( $G_{\text{máx}}$ )

#### 4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitiram concluir que o procedimento de preparação da amostra de solo na caixa cilíndrica, ajustado para incluir os dispositivos para o ensaio *air hammer*, foi adequado para obter a densidade relativa de 80%. Os ensaios CPT revelaram um comportamento consistente das amostras de solo, indicando repetibilidade na preparação. E o aumento linear da resistência de ponta ao longo da profundidade evidenciou a uniformidade das camadas pluviadas.

Os perfis de  $G_{\text{máx}}$  foram obtidos experimentalmente nos ensaios centrífugos com *air hammer* variando a tensão confinante efetiva média. Os resultados dos ensaios mini *air hammer* foram comparados com previsões teóricas, mostrando similaridade com a formulação de Seed e Idriss (1970), permitindo validar o dispositivo experimental e o procedimento de ensaio com o mini *air hammer* desenvolvido para uso na centrífuga do Laboratório Multiusuário de Modelagem Centrífuga (LM<sup>2</sup>C) da COPPE/UFRJ para obtenção do módulo cisalhante máximo.

## AGRADECIMENTOS

A todo o corpo técnico e científico do Laboratório Multiusuário em Modelagem Centrífuga (LM<sup>2</sup>C) da COPPE-UFRJ.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Airey, D.; Mohsin, A. (2023) Evaluation of Shear Wave Velocity from Bender Elements Using Cross-correlation. *Geotechnical Testing Journal*, 36 (4), p.125.
- Almeida, M.; Barra, M.; Gomes, N.; Gomes, J.; Almeida, M.; Futai, M. (2023) Centrifuge modelling of monotonic and cyclic lateral responses of monopiles in quartz and carbonate sands. *8th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials*.
- Arulnathan, R.; Boulanger, R.; Kutter, B.; Sluis, W. (2000) New Tool for Shear Wave Velocity Measurements in Model Tests. *Geotechnical Testing Journal*, 23 (4), p. 444-453.
- Barra, M. (2020) *Centrifuge modelling of monopile foundation for offshore wind turbines*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ., 123 p.
- Camelo, C. (2021) *Evaluation of the seismic response of gentle slopes in soft clay*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ., 236 p.
- Ferreira, G. (2021) *Modelagem centrífuga do ensaio CPT em areias quartzosa e carbonatada*. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ, 102 p.
- Futai, M.; Dong, J.; Haigh, S.; Madabhushi, G. (2018) Dynamic response of monopiles in sand using centrifuge modelling. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115, p. 90–103,.
- Gomes, N. (2020) *Parâmetros geotécnicos estáticos e dinâmicos de areias quartzosa e carbonatadas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ., 177 p.
- Kuerbis, R. (1988) Nii-electronic library service sand sample preparation-the slurry deposition method. *Soil and Foundations*, 28, p. 107-118.
- Lemos, S.G.F.P. (2024). *Comportamento Dinâmico de Fundações em Monopiles de Turbinas Eólicas Offshore*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ., 180 p.
- Lopes, G.; Sousa, J.R.; Almeida, M.; Almeida, M. (2023) A numerical methodology to predict the lateral load response of monopiles installed in sand considering soil stiffness degradation. *Ocean Engineering*, 270.
- Mapas de projetos em licenciamento. (2024) Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos. Disponível em: <<https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/laf/consultas/mapas-de-projetos-em-licenciamento-complexos-eolicos-offshore>>. Acesso em: 09 jan. 2024.
- Marshall, J.; Warrington, R.; Watson, W.; Kim, H. (2018) An introduction to immunology and immunopathology. *Allergy, Asthma & Clinical Immunology*, 14 (2), p. 49.
- Oztoprak, S.; Bolton, M. (2013) Stiffness of sands through a laboratory test database. *Géotechnique*, 63 (1), p. 54–70.
- Seed, H; Idriss, I. (1970) Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses. *Earthquake Engineering Research Center*, 170 p.
- Viggiani, G.; Atkinson, J. (1995) Interpretation of bender element tests. *Géotechnique*, 45 (1), p. 149–154.