

Modelagem Física Centrífuga de Cânion Submarino Submetido a Carregamento Dinâmico

Bárbara Luiza Riz de Moura

Doutoranda, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, barbara.moura@coc.ufrj.br

Priscilla Velloso de Albuquerque Nunes

Doutoranda, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, priscilla.nunes@coc.ufrj.br

Maria Cascão Ferreira de Almeida

Docente, POLI e COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, mariacascasao@poli.ufrj.br

Márcio de Souza Soares de Almeida

Docente e Coordenador de Projeto, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, almeida@coc.ufrj.com

RESUMO: A descoberta do pré-sal tornou a exploração de óleo e gás em águas ultraprofundas uma realidade. Esse cenário torna ainda mais relevante o estudo do ambiente e do leito marinho para mitigação dos riscos de vazamento de óleo e gestão sustentável dos recursos. A costa brasileira, em especial a Bacia de Campos, conta com a presença de taludes e cânions submarinos e registra um histórico de sismos de baixa e média magnitude. Essa sismicidade pode gerar instabilização dos taludes o que pode causar enormes prejuízos operacionais, ambientais e socioeconômicos. Assim, a avaliação da ameaça sísmica visando análises realísticas da resposta do solo sob esse carregamento é de suma importância. A presença de camadas fracas também integra esse cenário e pouco se sabe sobre a influência dessas camadas na resposta do solo. Este trabalho tem por objetivo avaliar a resposta sísmica de modelos centrífugos geotécnicos planos ou dotados de cânions submarinos de 30°, com e sem a presença de camada fraca, essa última possibilitada pela metodologia de transferência de camadas na preparação do modelo. Foi realizada uma série de experimentos centrífugos a 40g, com perfis geotécnicos caracterizados por ensaios T-bar e monitorados por meio de acelerômetros, entre outros sensores, com aplicação de carregamento dinâmico senoidal e histórico. Observou-se que o modelo com camada fraca mostrou uma degradação mais intensa do solo da superfície, o que resultou em menor amplificação sísmica, principalmente com o aumento da amplitude dos sinais.

PALAVRAS-CHAVE: Resposta sísmica, camada fraca, cânions submarinos, modelagem em centrífuga geotécnica.

ABSTRACT: The pre-salt layer discovery made ultra-deep water oil and gas exploration on the Brazilian continental shelf a reality. This scenario makes it even more important to study the environment and the seabed to mitigate the risks of oil spills and manage resources sustainably. The Brazilian coast, especially the Campos Basin, has slopes and submarine canyons and a history of low and medium magnitude earthquakes. This seismicity can cause slopes to become unstable and cause enormous operational, environmental and social-economic losses. Assessing the seismic threat is therefore extremely important to realistically analyze the response of the soil under this load. The presence of weak layers is also part of this scenario and little is known about the influence of these layers on soil response. The aim of this work is to evaluate the seismic response of centrifuge geotechnical models flat and 30° slope of submarine canyons, with and without the presence of a weak layer, this latter enabled by the layer transfer methodology in model preparation. A series of centrifuge experiments were carried out at 40g, soil profiles characterized by T-bar tests and monitored using accelerometers, among other sensors, with the application of sinusoidal and historical dynamic loading. It was observed that the model with a weak layer showed more intense degradation of the surface soil, which resulted in lower seismic amplification, mainly with the increase in signal amplitude.

KEYWORDS: Seismic response, weak layer, submarine canyons, geotechnical centrifuge modeling.

1 INTRODUÇÃO

Com a intensificação da exploração do pré-sal na costa brasileira, o estudo da integridade de dutos instalados no leito submarino tornou-se cada vez mais importante, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental. Diversos georiscos, como deslizamentos, subsidência, corrida de detritos, entre outros, podem resultar em acidentes na indústria de petróleo, podendo causar enormes prejuízos operacionais, ambientais e socioeconômicos. Os deslizamentos submarinos destacam-se por envolverem o deslocamento de um grande volume de material ao longo de extensas distâncias, tendo os sismos como o principal agente desencadeador (MOSHER et al., 2010, OWEN et al., 2007).

Os sismos além de afetarem a estabilidade, podem induzir deformações cíclicas que reduzem a resistência ao cisalhamento do solo (SHANMUGAM, 2016). Embora a costa brasileira, em especial a Bacia de Campos, registre um histórico de sismos de baixa e média magnitude, os efeitos locais desses eventos, sejam de origem topográfica ou geológica, podem torná-los suficientemente relevantes para afetar a estabilidade dos taludes submarinos. Assim, compreender a resposta sísmica do solo é fundamental para planejar e definir rotas seguras para instalação de dutos na costa brasileira.

1.1 Contexto Geomorfológico da Bacia de Campos

A presença de cânions submarinos na região da Bacia de Campos é destacada por Viana et al. (1998) e ilustrada na Figura 1, que mostra um conjunto desses cânions conforme apresentado por Borges (2020). Esses cânions desempenham um papel importante no transporte de sedimentos das encostas e plataformas continentais.

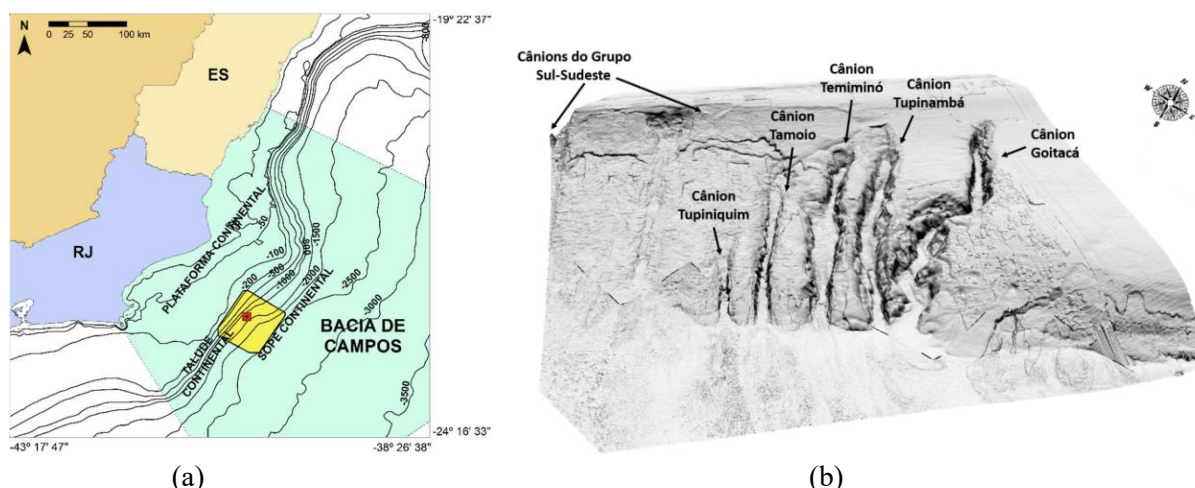


Figura 1. Bacia de Campos (a) Área de estudo (b) Zona com presença de cânions submarino (BORGES, 2020)

Grande parte das rupturas de taludes tendem a ocorrer em camadas de baixa resistência ao cisalhamento (ASHABRANNER et al., 2010). Soriano et al. (2019) apresentam sondagem realizada em taludes *offshore* do Sudeste brasileiro em que observa-se um contraste de cerca de 30% de resistência não drenada ao longo da profundidade. Camadas fracas compostas por solos de baixa resistência promovem amplificação sísmica ao “aprisionar” ondas próximas à superfície, prolongando a duração da vibração e favorecendo frequências baixas (BRADLEY, 2012). Esse comportamento aumenta o risco de fadiga e danos estruturais, especialmente em bacias sedimentares (ABRAHAM et al., 2015)

1.2 Modelagem Física Centrífuga

A modelagem física centrífuga tem-se mostrado um método experimental importante para avaliar questões e desafios da engenharia *offshore*, permitindo o estudo de diversos problemas geotécnicos sob condições reais de tensão e deformação. A modelagem centrífuga submete um modelo de escala reduzida N vezes a um campo de macrogravidade N vezes a aceleração da gravidade, mantendo o estado de tensão e de

deformação do modelo compatível ao do protótipo (MADABHUSHI, 2014). Ensaios centrífugos permitem a melhor compreensão de fenômenos e, com uso da mesa vibratória para aplicação de carregamentos dinâmicos no modelo, permitem a avaliação resposta sísmica de taludes submarinos.

2 METODOLOGIA

2.1 Preparação dos modelos

O solo utilizado nos ensaios centrífugos foi o *Caulim Speswhite*, um material argiloso padrão-ouro para modelagem física centrífuga dada a repetibilidade das suas propriedades. Este material possui um coeficiente de adensamento c_v relativamente alto tornando-o interessante também devido à redução de tempo para adensamento da amostra e estabilização de poropressão ao longo do ensaio.

Os parâmetros do *Caulim Speswhite* utilizados neste trabalho são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Características do Caulim Speswhite segundo Fernandes et al.(2023)

Parâmetros	
Limite de Liquidez	62%
Limite de Plasticidade	23%
Densidade Real dos Grãos	2,62
Coeficiente de Adensamento	3,4 a 34,7. 10^{-8} m ² /s

O pó de caulim seco foi misturado com água para atingir uma umidade de 75%. Ao obter a consistência de lama, o material foi depositado na caixa e adensado a 250 kPa com cargas progressivas. Esse procedimento foi realizado em quatro camadas. No entanto, para o modelo com camada fraca, utilizou-se da metodologia de transferência de camada. Conforme Figura 2, as camadas 1 e 2 foram adensadas dentro da caixa ESB de ensaio até a tensão de 250 kPa, a camada 3 até 130 kPa e a camada 4 foi adensada num container circular externo à caixa até 250 kPa para, em seguida, ser transferida ao topo da caixa de ensaio.

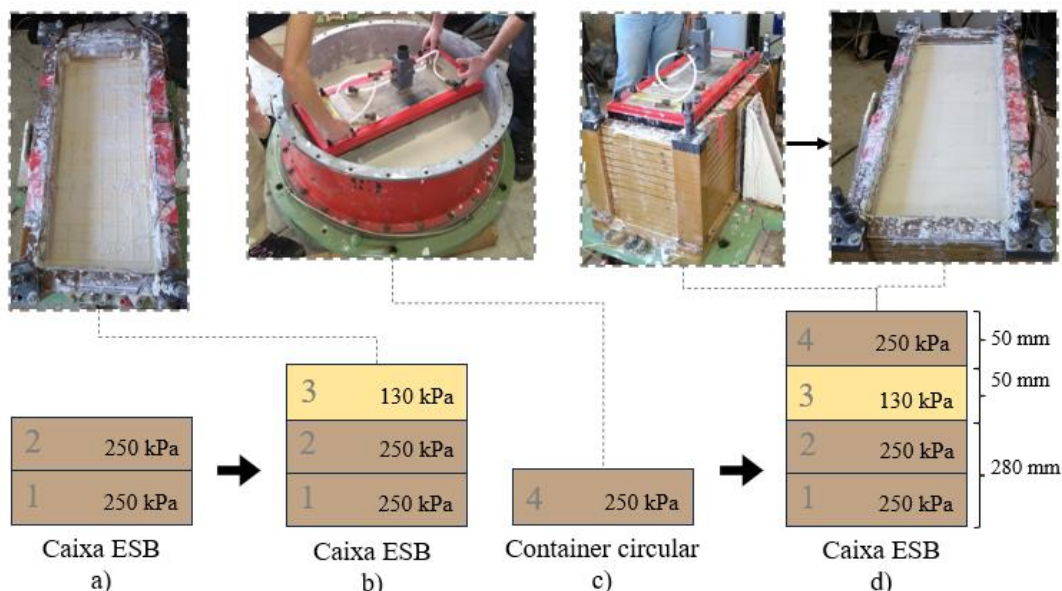


Figura 2. Procedimento do adensamento em camadas do modelo centrífugo

2.2 Ensaios centrífugos

Os ensaios centrífugos foram conduzidos na centrífuga geotécnica de braço da Université Gustave Eiffel que também contou com uma mesa vibratória com capacidade de simular sismos senoidais e reais. A caixa de

ensaio utilizada foi a ESB (*Equivalent Shear Box*), com dimensões internas de 0,80 x 0,34 x 0,41 metros, com funcionamento das paredes como vigas cisalhantes.

Dois tipos de perfis de solo foram modelados e ensaiados: (1) modelo homogêneo com todas as camadas adensadas a 250 kPa, denominado HO e (2) modelo adensado a 250 kPa com camada fraca de 130 kPa, denominado WL1.

Os modelos planos e de cânions submarinos de 30° foram submetidos a uma aceleração de 40g e instrumentados com extensômetros, acelerômetros, transdutores de poro pressão e *bender elements*, conforme esquema apresentado na Figura 3. Tanto nos modelos planos quanto nos cânions, uma camada d'água de 1 cm (escala modelo) foi colocada na superfície do solo para realização dos ensaios. Devido à limitação de espaço, apenas alguns dos resultados são apresentados nesse trabalho.

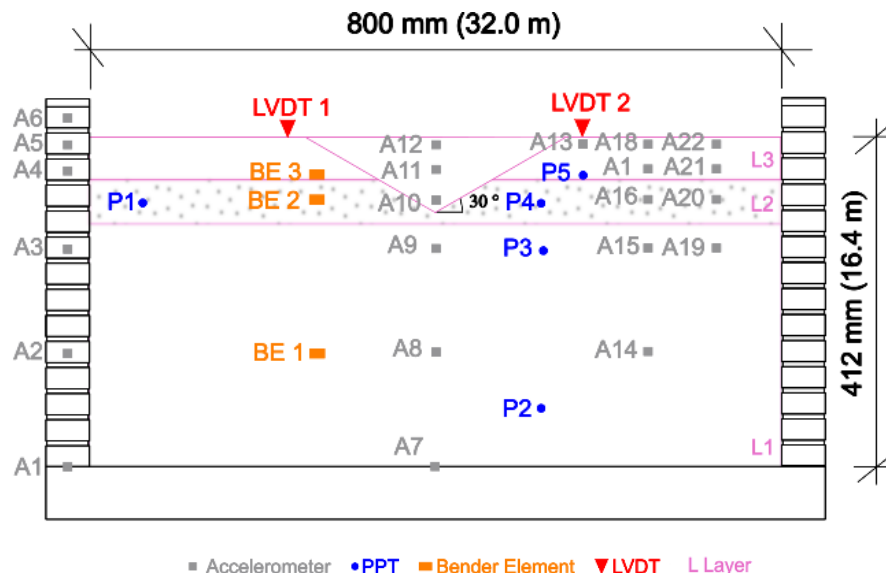


Figura 3. Desenho da configuração do modelo centrífugo instrumentado

Dois tipos de sismos foram aplicados: (1) senoidal; e (2) Emilia, sismo real do norte da Itália ocorrido em 2012. As acelerações horizontais foram aplicadas intercaladamente entre Emilia e Seno, e progressivamente, aumentando os valores das acelerações horizontais máximas: 0,05g, 0,075g, 0,10g e 0,15g. Antes da aplicação dos sismos, ensaios T-bar também foram realizados para caracterizar o perfil do solo conforme Randolph and Houlsby (1984).

3 RESULTADOS

3.1 Perfis de S_u

A Figura 4 apresenta os resultados de resistência não drenada S_u para os modelos planos (F) e cânions (C) em voo (40g). O S_u teórico também é apresentado e foi obtido pela equação mostrada na figura (WROTH, 1984), onde OCR é a razão de sobreadensamento, σ'_0 é a tensão efetiva vertical e os parâmetros S e m são iguais a 0,23 e 0,56 para o caulim, conforme Fernandes et al. (2023). Os resultados apresentam uma redução do S_u entre as profundidades de 2 e 4 metros (camada 3) no modelo WL1 em comparação ao modelo HO, resultado que está de acordo com a tensão de pré-adensamento para a camada 3 (fraca) para cada modelo. Observa-se aumento do S_u na camada superficial 4 para todos os modelos, possivelmente pela perda de umidade e/ou adensamento localizado dessa camada. O S_u teórico também é apresentado e há boa concordância entre ele e os resultados dos ensaios T-bar.

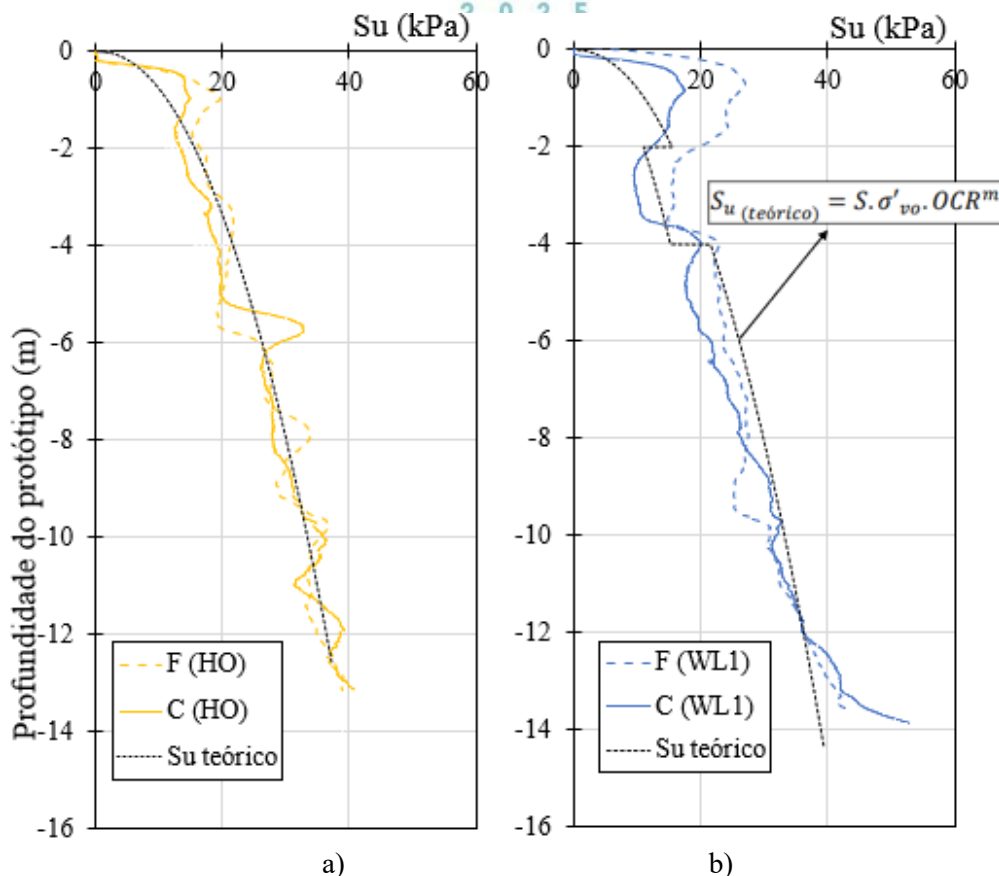


Figura 4. Perfis de resistência não drenada dos modelos: a) HO e b) WL1

3.2 Influência da camada fraca e do cânion

3.2.1 Fator de amplificação

A Figura 5 apresenta os fatores de amplificação das acelerações (relação entre o pico do sinal captado na superfície e pico do sinal aplicado à base) obtidos nos acelerômetros A13, A18 e A22; para os modelos HO e WL1 nos sismos Emília de amplitudes iguais a 0,05g (E1), 0,10g (E3) e 0,15g (E4).

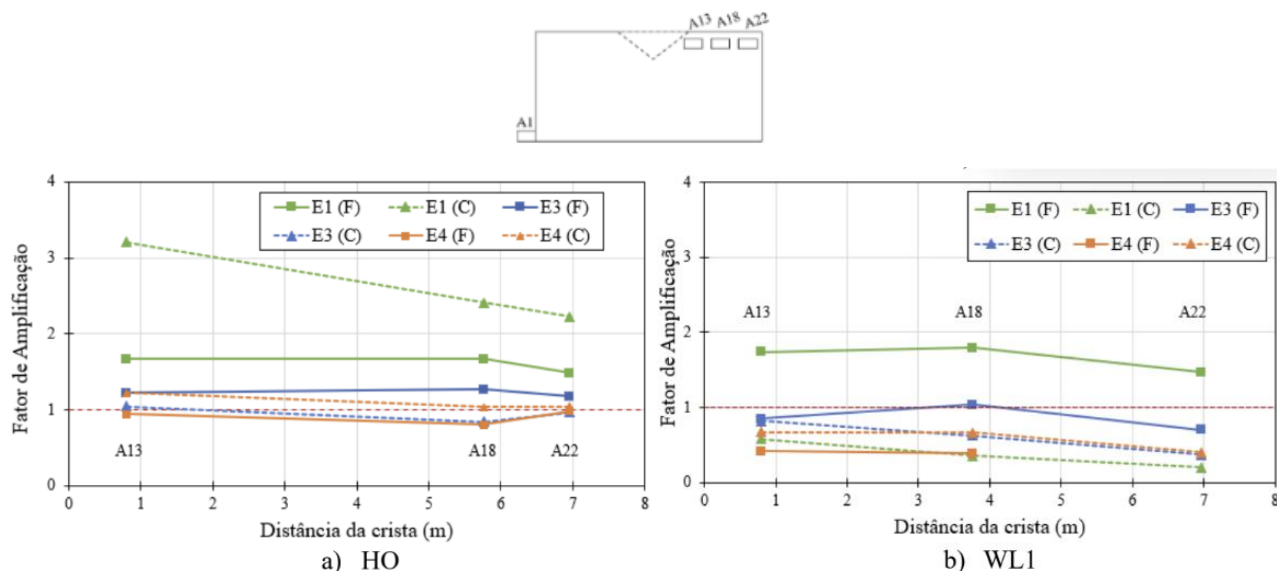


Figura 5. Fator de amplificação para o sinal Emilia: (a) HO; (b) WL1

Os resultados mostram que, para o sismo E1, os modelos planos (F) apresentam amplificações semelhantes com fatores variando entre 1,5 e 1,9 para ambos os modelos. Conforme a amplitude do sinal de E1 aumenta, observa-se a degradação do solo para a superfície do modelo devido aos baixos valores de amplificação observados. Para o sismo E4 de maior amplitude que apresenta pequena amplificação no modelo HO plano, produziu no modelo WL1 plano atenuações em toda a superfície.

Para os modelos cânion (C), o modelo HO apresenta um aumento significativo no fator de amplificação próximo à crista para o sismo E1 (de menor amplitude). Para o modelo WL1, esse comportamento se altera, visto que, mesmo com o cânion, o modelo WL1 não apresentou a amplificação esperada devida à presença da feição topográfica, especialmente no sismo E4 de maior amplitude, em nenhum dos pontos da superfície, nem próximo à crista do cânion. Esse comportamento está associado à presença da camada fraca, que no modelo WL1 reduziu as amplificações tanto no modelo plano e como no modelo do cânion, no qual os sinais continuaram a ser atenuados para todas as amplitudes de sinal.

3.2.2 Análise espectral

A Figura 6 apresenta, para o sismo E1, a amplificação diferencial entre os modelos cânion e plano homogêneos e com camada fraca. Trata-se da diferença entre as funções de transferência do A1 ao A13, ou seja, da base à superfície nos modelos planos e da base à crista do cânion nos modelos cânions. A Figura 3 mostra a amplificação diferencial para o A18, acelerômetro um pouco mais afastado da crista. Nos gráficos são representadas as frequências naturais da coluna de solo f_n e a frequência topográfica do cânion f_t , obtidas segundo Moura *et al.* (2024).

Ambos os modelos apresentam comportamentos semelhantes para frequências inferiores a 2 Hz e resultados próximos a zero, indicando que há pouco efeito da topografia para essa faixa de frequência.

No modelo HO, os efeitos da topografia foram observados mais claramente para frequências entre 3 Hz e 8 Hz. No modelo WL1, observa-se que a faixa de frequência que apresenta efeitos topográficos está reduzida em comparação com o modelo HO. Há um aumento da amplificação entre as frequências 3 e 5 Hz, com pico em 4 Hz. Acima de 5 Hz, os resultados se tornam similares entre A13 e A18, que assumem valores próximos a zero, indicando que houve redução do efeito da topografia nestas frequências.

Observou-se, portanto, que os efeitos topográficos foram significativamente limitados pela camada fraca, especialmente para frequências mais altas, o que está de acordo com o reportado na literatura.

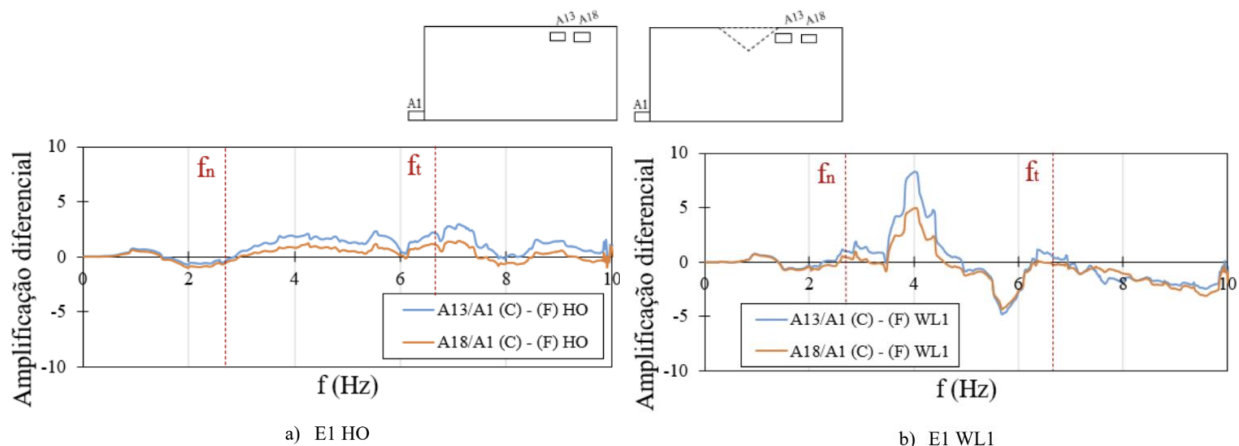


Figura 6. Função de transferência diferencial do sismo E1 entre os modelos cânion e plano para (a) modelo HO; (b) Modelo WL1

3.2.3 Duração Significativa dos Sinais

A duração significativa d_s corresponde ao intervalo de tempo entre dois níveis específicos de energia. Embora esses níveis possam variar, uma definição comum considera o tempo decorrido entre 5% e 95% da Intensidade de Arias (PINTO e LEDEZMA, 2019). A Tabela 2 apresenta o aumento percentual da duração



significativa obtida na superfície (no caso dos modelos planos) e na crista (nos modelos cânions) dos modelos em relação à duração significativa do sinal da base para o sismo Emilia 0,15g.

Os resultados mostram que, embora o modelo HO apresente aumento da d_s na crista do cânion em relação ao modelo plano (de 56% para 76%), para o modelo WL1 plano observou-se um aumento de 118% da d_s e, quando a camada fraca tem ação conjunta com o cânion, esse valor alcança 149%. Esse resultado mostra a influência da camada fraca no aumento da duração significativa do sismo na superfície do solo, parâmetro importante no efeitos danosos gerados pelos sismos.

Tabela 2. Aumento da d_s da superfície ou crista do cânion em relação à base do modelo para Emilia 0,15g

Modelo	Plano	Cânion
HO	56%	76%
WL1	118%	149%

4 CONCLUSÕES

A avaliação da resposta sísmica do solo é complexa e requer uma metodologia experimental com condições controladas para melhor compreensão, na qual a modelagem física centrífuga se apresenta como uma ótima alternativa.

Os ensaios realizados permitiram observar os efeitos da camada fraca e da topografia nos fatores de amplificação e na análise espectral dos modelos homogêneo HO e com camada fraca WL1.

Analisando os fatores de amplificação, observou-se que o modelo WL1 mostrou uma degradação mais intensa do solo da superfície, o que resultou em menor amplificação sísmica, principalmente com o aumento da amplitude dos sinais. A presença da camada fraca intensificou a não linearidade do solo, reduzindo sua capacidade de transmissão das ondas sísmicas e limitando o efeito de amplificação topográfica esperada com o cânion. Além disso, observou-se uma relação entre o aumento da amplitude dos sismos e a redução dos fatores de amplificação.

Quanto à análise espectral, observou-se que no modelo WL1 houve redução da faixa de frequências em que os efeitos topográficos foram notados, especialmente com limitação das amplificações na crista do cânion para as frequências mais altas, quando comparado ao modelo HO. Por fim, os resultados de duração significativa do sismo mostraram que a camada fraca é um fator relevante de influência no prolongamento do sinal na superfície do solo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório Multisusuário em Modelagem Centrífuga, à empresa Petrobrás pelo suporte financeiro e à Université Gustave Eiffel pela realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abraham, J.R., Lai, C.G., Papageorgiou, A. (2015) Basin-effects Observed during the 2012 Emilia Earthquake Sequence in Northern Italy. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 78, pp. 230–242.
- Ashabanner, L.B., Tripsanas, E.K., Shipp, R.C. (2010) Multi-Direction Flow in a Mass-Transport Deposit, Santos Basin, Offshore Brazil. *Submarine Mass Movements and Their Consequences*, v. 28, pp. 247–255.
- Borges, R. G. (2020) *Análises de resposta sísmica e estabilidade de taludes no planejamento e projeto de estruturas submarinas*. Tese de Doutorado. COPPE-UFRJ. Rio de Janeiro.
- Bradley, B. A. (2012) Strong Ground Motion Characteristics Observed in the 4 September 2010 Darfield, New Zealand earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 42, pp. 32–46.
- Fernandes, F.C., Moura, B.L.R., Almeida, M.S.S., et al. (2023) Determination of the Dynamic Parameters of Speswhite Kaolin with Resonant Column and Centrifuge Tests, *Soils and Rocks*, v. 46, n. 2, pp. 1–11.
- Madabhushi, S.P.G. (2014) *Centrifuge Modelling for Civil Engineers*. Boca Raton, CRC Press.



- Mosher, D.C., Shipp, R.C., Moscardelli, L., et al. (2010) *Submarine Mass Movements and Their Consequences*. 4 ed., Springer, USA.
- Moura, B. L. R., Almeida, M. C. F., Almeida, M. S. S., Soriano Camelo, C. Y., Escoffier, S., Nunes, P. V. A. (2024) Analysis of the Centrifuge Seismic Response of a Submarine Canyon with a Weak Layer. *Geotechnical and Geological Engineering*, 42(7), 5711-5729.
- Owen, M., Day, S., Maslin, M. (2007) Late Pleistocene Submarine Mass Movements: Occurrence and Causes, *Quaternary Science Reviews*, v. 26, n. 7–8, pp. 958–978.
- Pinto, F.J., Ledezma, C.A. (2019) Dynamic Behavior of a Tall Building with Basements Considering Soil-structure Interaction. In: *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions – Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, CRC Press, pp. 4480–4489.
- Randolph, M., Houlsby, G. (1984) The limiting pressure on a circular pile loaded laterally in cohesive soil. *Geotechnique*, 34:613–623.
- Shanmugam, G. (2016) *Slides, Slumps, Debris Flows, Turbidity Currents, Hyperpycnal Flows, and Bottom Currents*, Encyclopedia of Ocean Sciences, v. 4, pp. 228-257.
- Soriano, C.Y., Andrade, R.B., Tarazona, S.F.M., et al. (2019) Simulation of a Weak Layered Profile Using Geotechnical Centrifuge. In: *XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE, 2019, Cancun, Mexico. Proceedings of the XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE)*.
- Viana, A.R., Faugères, J.C, Kowsmann, R.O. et al. (1998) Hydrology, morphology and sedimentology of the Campos continental margin, offshore Brazil. *Sedimentary Geology* 115(1–4): 133–157.
- Wroth, C. P. (1984) The interpretation of in situ soil tests. *Geotechnique* 34:449–489.