

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/213

Estudo de Deflagração de Escorregamentos de Taludes Submarinos por Elevação de Poropressão com Modelos Físicos Centrifugados

Mariana Abreu dos Santos

Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Brasil, mariabreuds@gmail.com

Sérgio Tibana

Professor Associado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Brasil, stibana@gmail.com

Fernando Saboya Albuquerque Júnior

Professor titular, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Brazil, saboya@uenf.br

RESUMO: Os movimentos de massa do leito marinho são fenômenos complexos que podem iniciar mesmo com taludes de baixa inclinação. Pode-se citar como um dos principais mecanismo de deflagração, o desenvolvimento de poropressão na base da camada de solo superficial do fundo do mar. Sabe-se que o uso de modelos físicos possibilita avaliar os mecanismos de deflagração desses movimentos a partir da indução do do excesso de poropressão na base de uma camada de solo superficial de baixa permeabilidade representada no modelo físico. Neste contexto, este trabalho apresenta a modelagem física de taludes submarinos, com o objetivo principal de avaliar movimentos de massa desencadeados por indução de excesso de poropressão na base de uma camada de solo de baixa permeabilidade. A técnica de PIV foi utilizada para delimitar as regiões de maiores deslocamento da massa, onde a instabilidade iniciaria.

PALAVRAS-CHAVE: Modelos Físicos Centrifugados, Deslizamento Submarino, PIV.

ABSTRACT: The mass movements at the bottom of seabed are complex phenomena that can start even with gentle slopes. It can be cited as one of the main deflagration mechanism, the development of poropressure at the base of the surface soil layer of the seabed. It is known that the use of physical models makes it possible to evaluate the mechanisms of deflagration of these movements inducing excess pore pressure at the base of a layer of low permeability surface soil placed in the physical model. In this context, this work presents the physical modeling of undersea slope, with the main objective of evaluating mass movements triggered by induction of excess pore pressure at the base of a low permeability soil layer. The PIV technique was used to delimit the regions of greater mass displacement, where the instability would begin.

KEYWORDS: Physical model, Submarine landslides, PIV

1 INTRODUÇÃO

A atividade de extração de Óleo & Gás na margem continental pode ser considerada de alto risco em diferentes aspectos. Um deles, é a segurança estrutural de dutos submarinos e estruturas instaladas no fundo do oceano, próximo as cabeças de poços. A integridade dessas estruturas pode ser ameaçada pelo impacto de detritos oriundo de deslizamentos que podem iniciar em áreas distantes das instalações mas que percorrem dezenas de quilômetros, acumulando um volume gigantesco de sólidos. A corrida de detritos é um problema complexo que envolve fundamentos da hidrodinâmica e também da área de geotecnia. Muitos estudos nessa área tem sido apresentados na literatura científica.

Diversos eventos naturais são citados na literatura científica como possíveis gatilhos para o desenvolvimento desse fenômeno. O adensamento do solo e a sedimentação rápida, abalos sísmicos, desprendimento de hidratos, ondas, marés entre outros, são citados como exemplos. Parte desses eventos tem como consequência o desenvolvimento de poropressão no maciço que leva a diminuição da resistência ao cisalhamento do solo.

Há muitas evidências de escorregamentos que iniciam em superfícies com inclinações muito baixas (menores do que 10°), aparentemente de condição estável e que por isso necessitam de uma condição externa para desencadear o escorregamento. Isto sugere que o excesso de poropressão seja um fator importante na instabilidade de taludes suaves (Smith *et al.* 2013; Talling *et al.*, 2014; Zhang *et al.* 2015). Masson *et al.* (2006) conclui que o acúmulo de poropressão associado às condições de tremores de terra ou sedimentação rápida é o principal motivo dos deslizamentos de taludes submarinos.

Outro fator importante e muito investigado é a dissociação dos hidratos de gás, compostos principalmente por metano, que são estáveis em condições de temperatura e pressão ideais no ambiente marinho. A causa da dissociação dos hidratos de gás está relacionada a redução do nível do mar durante os ciclos glaciais (Kayen e Lee, 1991). O famoso escorregamento de Storegga é citado na literatura como um evento que ocorreu em decorrência desse fenômeno.

O desenvolvimento do excesso de poropressão também pode estar associada a intervenção humana como por exemplo o Aeroporto de Nice (Mulder *et al.*, 1993) e o Porto de Sakagway (Cornforth e Lowell 1996).

Investigações experimentais e teóricas foram realizadas para estimar o impacto do fluxo em dutos *offshore*, o que traz informações acerca do potencial de destruição dos fluxos de detritos (Zakeri & Hawlader 2013; Sahdi *et al.*, 2014; Acosta *et al.*, 2017; Sahdi *et al.*, 2019). Outros trabalhos sobre esse tema foram desenvolvidos, principalmente com modelos reduzidos a 1 g (Mohrig e Marr, 2003; Ilstad *et al.*, 2004; Elverhøi *et al.*, 2005).

Devido às limitações dos experimentos em modelagem física e observações *in situ*, as análises numéricas tornaram-se métodos importantes acerca dos deslizamentos de taludes submarinos acionados pelo excesso de poropressão sendo vastamente explorada (e.g., Zhang (2014); Urlaub (2014); Urlaub *et al.* (2016); Bellwald *et al.* (2019)).

Por fim, vale ressaltar que diversos estudos encontrados na literatura científica sugerem que o excesso de poropressão estava associado aos deslizamentos em áreas de sedimentação rápida. Já Locat *et al.* (2014), Urlaub *et al.* (2014) e Urlaub *et al.* (2015) apresentam uma outra explicação para eventos ocorridos em áreas de sedimentação lenta - formação de camadas fracas.

Considerando que o equilíbrio do solo está relacionado a uma complexa interação entre as propriedades dos solos constituintes dos taludes e os eventos naturais, a modelagem física é uma ferramenta que pode ser utilizada para estudar mecanismos específicos de instabilização. Em casos, em que o perfil geotécnico apresenta camadas de solos de baixa permeabilidade sobrepostas as camadas de solos de alta permeabilidade, o desenvolvimento do excesso de poro pressão na camada de base pode induzir uma subpressão levando a camada de solo superior ao deslizamento. Neste contexto, o objetivo desse trabalho é desenvolver um modelo físico de talude submarino a fim de avaliar um dos gatilhos de disparo de movimentos de massa que podem ocorrer em condições sub aquáticas, a poro pressão.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Modelo Centrífugo

O modelo de talude submarino desenvolvido nessa pesquisa compreende duas camadas de solo sobrepostas (Figura 1). A inferior compreende uma camada drenante, de areia calibrada, que possui o papel único de receber água pressurizada e distribuí-la na base da segunda camada. A camada superior é constituída de argila de baixa permeabilidade, esta camada é submetida a subpressão induzida pela pressurização da camada sobrejacente de areia. Foram instalados parafusos para regulagem da inclinação da caixa teste (Figura 1). A caixa teste foi colocada dentro de um container utilizado para execução de ensaios centrífugos.

Como esquematizado na Figura 2, a instrumentação consiste em seis transdutores de poro pressão e três transdutores de pressão total, ambos instalados na base de alumínio da caixa teste. A poro pressão no meio da camada de argila foi medida através de quatro transdutores posicionados na lateral da caixa teste. Pode-se observar na Figura 2, que a pressão foi induzida na camada de areia por meio de tubos de nylon instalados na caixa teste. A caixa teste possui uma frente removível que forma na fase de adensamento um ângulo de 21° no talude frontal. Essa inclinação inicial foi definida por meio de análise de estabilidade em equilíbrio limite.

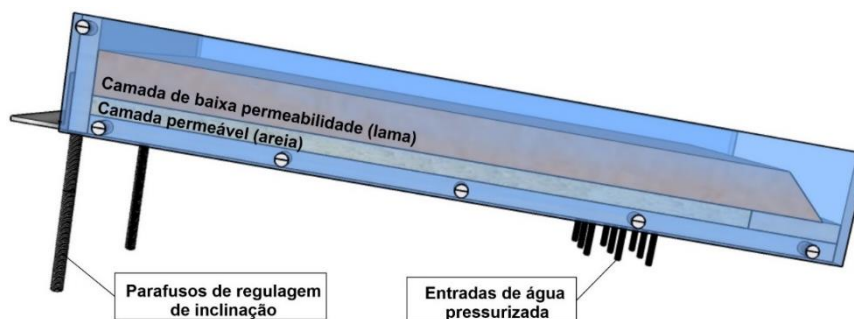


Figura 1. Vista lateral da caixa teste – Camadas de solo e parafuso de regulagem de inclinação.

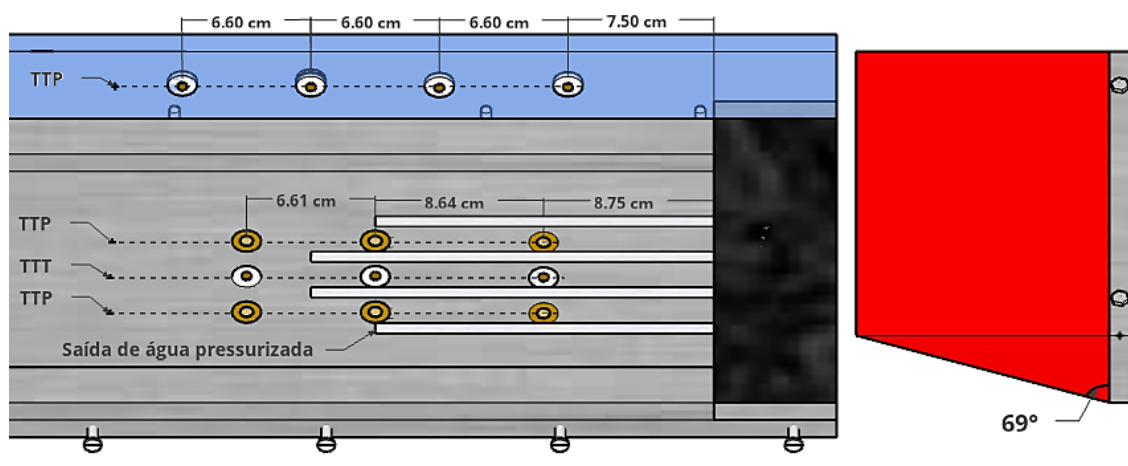


Figura 2. Vista superior da caixa teste com a posição da instrumentação (TTP – Transdutores de poropressão – TTT Transdutores de tensão total) e molde frontal.

Há de se registrar que para esse modelo, em específico, há uma maior preocupação com a escala tempo. Isso se dá pois é um evento que envolve processos simultâneos de geração e dissipação de poro pressão que possuem escala tempo de N e N^2 , respectivamente. Entretanto, a geração de poro pressão é o maior enfoque desse trabalho, portanto, a lei de escala do tempo será considerada como N . Desse modo, para resolver o conflito de escala pode-se utilizar um solo com o coeficiente de permeabilidade menor (Kutter e James, 1989 e Zhang et al, 2015).

A centrífuga geotécnica da UENF utilizada para realizar os ensaios, possui um braço de 3,5 m com duas plataformas com capacidade de 100gton. Sua velocidade máxima é de 277rpm. O container de alumínio utilizado para o ensaio acomodou uma caixa teste de alumínio e acrílico a qual foi projetada para receber toda instrumentação, além de dois parafusos na extremidade que permitem o ajuste da sua inclinação.

2.2 Propriedades do Solo

A fim de caracterizar os materiais utilizados nesse projeto, foram realizados ensaios de laboratório que seguiram as recomendações e procedimentos preconizados nas normas brasileira. Os resultados dos limites de consistência e densidade real dos grãos dos materiais utilizados na pesquisa e da mistura utilizada nos ensaios centrífugos são apresentados na Tabela 1. O solo colocado na caixa teste foi a mistura de caulim e metacaulim. O teor de umidade inicial do solo utilizado foi de 1,5 a umidade do LL obtido no ensaio de caracterização.

Tabela 1. Caracterização dos materiais utilizados na lama

Material	Limite de liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)	Densidade Real dos Grãos (g/cm ³)
Caulim	56,8	27,7	29,1	2,40
Metacaulim	NP	NP	NP	2,58
Mistura	47,3	29,4	17,9	2,57

2.3 Indução de poro pressão na base da camada do modelo

Para aplicar a pressão de água na base do modelo foi utilizada uma interface ar-água instalada em um compartimento do container. A pressão de ar foi regulada por meio de válvulas reguladoras de pressão. A interface foi instrumentada com um transdutor de poro pressão para fins de verificação da pressão aplicada. Na parte inferior da interface, a saída d'água foi conectada a base da caixa teste possibilitando a indução do aumento da poro pressão.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Após a construção da caixa teste e instalação e calibração dos instrumentos, preparação da interface de água, preparação da camada drenantes de areia e colocação do solo na caixa para início dos ensaios, seguiu-se o seguinte planejamento:

- Prosseguiu-se então para o adensamento em centrífuga a 50G. Essa etapa durou aproximadamente uma hora. A resistência não drenada da argila de 3,01 kPa foi medida através do ensaio do *Mini Vane Test* realizado a 50G após o adensamento.
- Após o adensamento a centrífuga foi parada para permitir o ajuste do ângulo de inclinação acionando os parafusos reguladores;
- Retoma-se o voo em centrífuga até 50G e inicia a aplicação de ar pressurizado na interface até a ruptura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizados três ensaios com diferentes inclinações da caixa teste 0°, 10° e 15°. Após o adensamento a 50G todos os modelos possuíam o mesmo perfil, entretanto após a inclinação da caixa teste e a retomada da força centrífuga observou-se o início de uma suavização dos modelos. Sendo mais pronunciada no modelo em que a caixa teste foi inclinada a 15°.

Os resultados dos transdutores de poro pressão e tensão total dos Ensaios 1 (0°), 2 (10°) e 3 (15°) são apresentados nas Figuras 3, 4 e 5, respectivamente. Nos gráficos que relaciona a poro pressão medida na base da caixa teste com o tempo, observa-se uma queda da poro pressão medida nos transdutores. Isto deve-se a dissipação da poro pressão induzida em pontos específicos de movimentação do talude, abertura de crista de tração ou mesmo um ponto de fuga de pressão. Visualmente, não se observou um movimento importante na face do talude. Assim, utilizou-se da técnica de PIV para identificar possíveis inícios de ruptura.

Uma análise mais detalhada dos gráficos de incremento de poro pressão foi realizada utilizando em conjunto as imagens obtidas com o software PIV-Lab. Com essas imagens foi possível identificar as áreas de movimentação relacionada ao instante do pico de poro pressão. As imagens do software PIV-Lab para cada ensaio são apresentadas na Figura 6.

O incremento de poro pressão no Ensaio 1 é apresentado na Figura 3. No gráfico, observa-se que há um excesso de poro pressão médio de 6,24 kPa e por meio de da análise de PIV nota-se que a área de deslocamento é mínima, próxima ao pé do talude. Ou seja, observou-se o início de uma ruptura com valor de poro pressão muito baixa. No Ensaio 2 o incremento de poro pressão é apresentado na Figura 4 e foi em média, 6 kPa, menor se comparado ao Ensaio 1, porém com área de deslocamento maior. O incremento de poro pressão no Ensaio 3 (Figura 5) foi o menor de todos, em média 5,9 kPa. Contudo, a área de ruptura ficou muito bem definida através da análise de PIV, e significativamente maior se comparada aos outros ensaios.

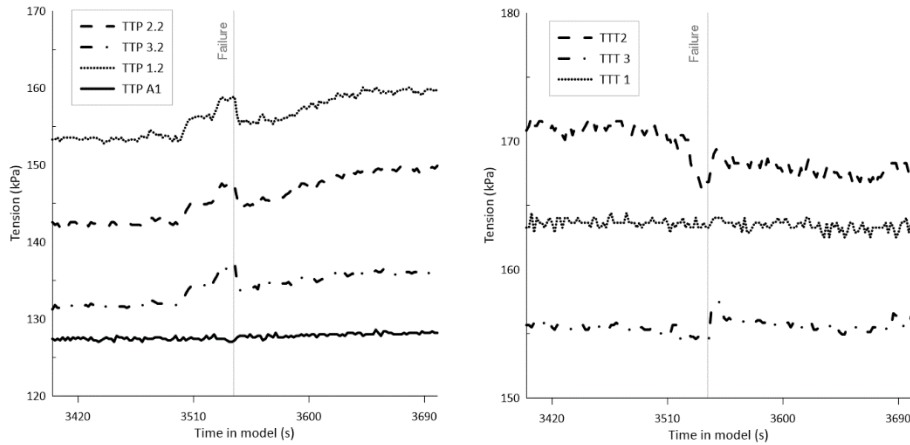


Figura 3. Incremento de poro pressão no Ensaio 1 - 0°

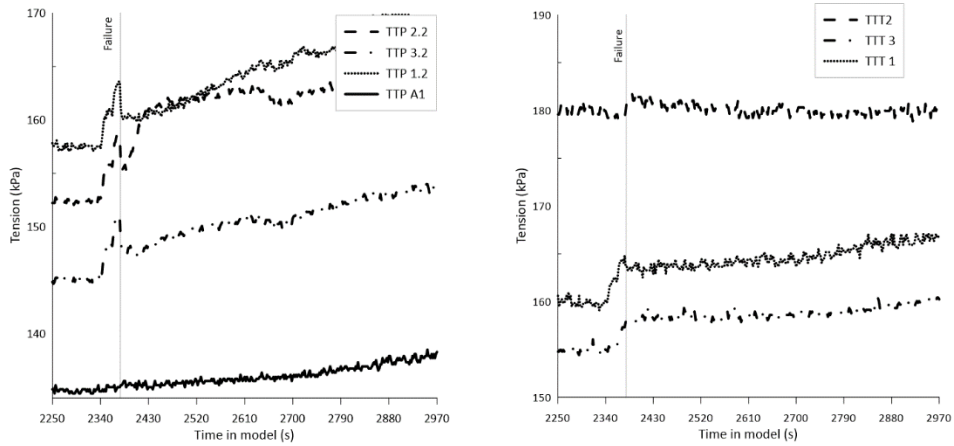


Figura 4. Incremento de poro pressão no ensaio 2 - 10°

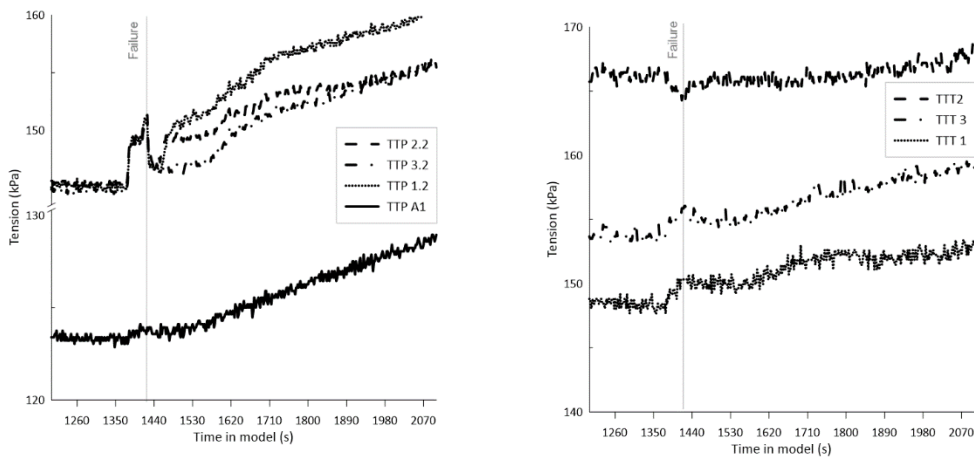


Figura 5. Incremento de poro pressão no ensaio 3 - 15°

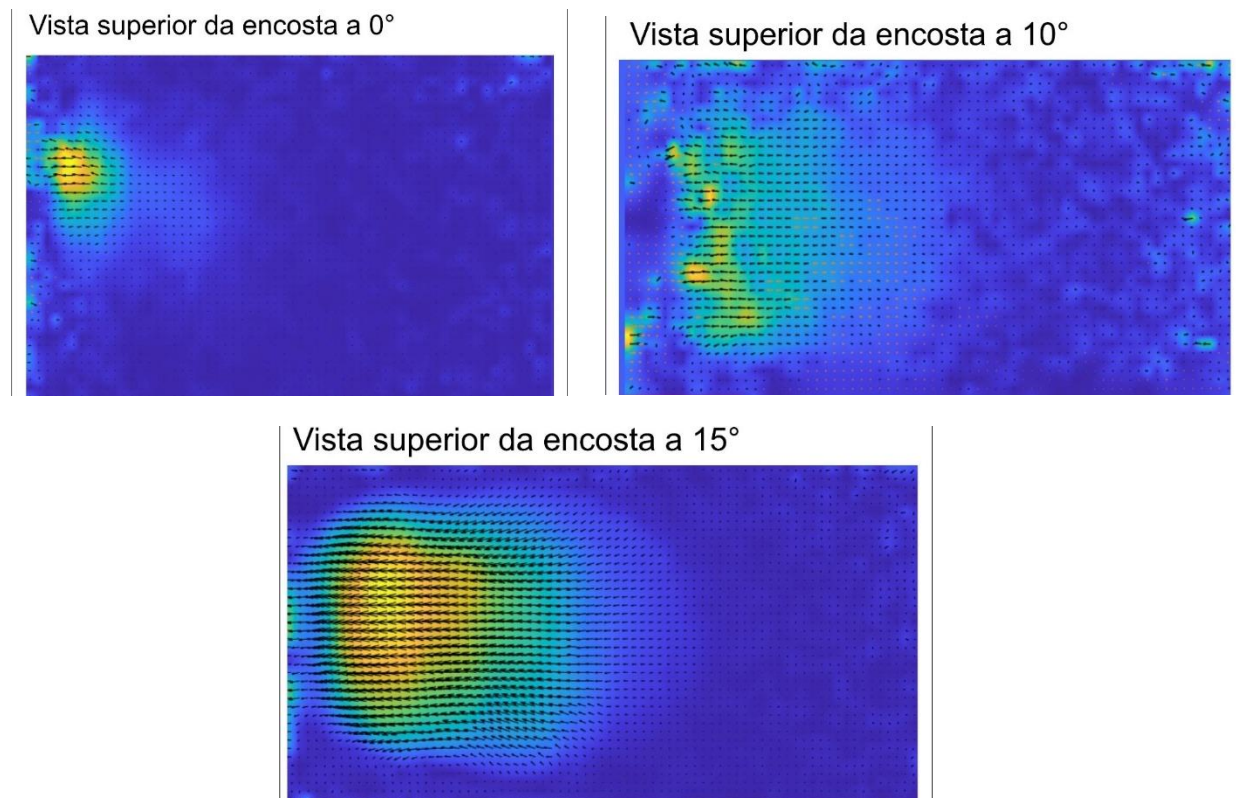


Figura 6. Resultado da área de movimentação no momento de ruptura

Pode-se dizer que quanto maior a inclinação menor foi o excesso de poro pressão observados nos transdutores de poro pressão, necessário para iniciar o deslocamento, e maior a área de movimentação observada nas imagens geradas pelo PIV-Lab.

5 CONCLUSÃO

De uma forma geral, conclui-se que para taludes submarinos suaves (igual ou menor que 15°) o desenvolvimento de poro pressão na base de uma camada de solo de baixa permeabilidade não produz uma movimentação importante, ou seja, um evento catastrófico. Deve-se enfatizar que esta constatação é válida para as condições dos modelos construídos. O Ensaio com o maior grau de inclinação da caixa teste produziu as menores poro pressões e maior área de deslocamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e a PETROBRAS pelo apoio financeiro a essa pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, E. A. et al. (2017). Centrifuge modelling of hydroplaning in submarine slopes. *Ocean Engineering*, v. 129, p. 451-458.
- Bellwald, Benjamin & Urlaub, Morelia & Hjelstuen, Berit & Sejrup, Hans & Sørensen, Mathilde & Forsberg, Carl & Vanneste, Maarten. (2018-2019). NE Atlantic continental slope stability from a numerical modeling perspective. *Quaternary Science Reviews*.

- Cornforth, D.H., Lowell, J.A. (1996). The 1994 submarine slope failure at Skagway, Alaska. Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides, Trondheim, vol. 1, pp. 527-532.
- Elveerhoi, A., Issler, D., De Blasio, F.V., Ilstad, T., Harbitz, C.B., Gauer, P., (2005). Emerging insights into the dynamics of submarine debris flows. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 5, 633–648.
- Ilstad, T., De Blasio, F.V., Elveerhoi, A., Harbitz, C.B., Engvik, L., Longva, O., Marr, J.G., 2004c. On the frontal dynamics and morphology of submarine debris flows. *Marine Geology*, 213, pp. 481-497.
- Kayen, R.E. and Lee, H.J. (1991) Pleistocene Slope Instability of Gas Hydrate-Laden Sediment on the Beaufort Sea Margin. *Marine Geotechnology*, 10 No. 1-2, p. 125-141.
- Kutter, B. L., James, R.G., (1989). Dynamic Centrifuge Model Tests on Clay Embankments. *Geotechnique* 39 (1), 91–106.
- Locat, J.; Leroueil, S.; Locat, A.; Lee, H. (2014). Weak Layers: Their Definition and Classification from a Geotechnical Perspective. *Advances in Natural and Technological Hazards Research* 37.
- Massad, F. 2010. *Obras de terra: curso básico de Geotecnia*. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- Masson, D. G., Harbitz, C.B., Wynn, R.B., Pedersen, G., Lovholt, F. (2006). Submarine Landslide: Process, Triggers and Hazard Prediction. *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 364 (1845), p. 2009-2039.
- Mulder, T.; Tisot, J. P.; Cochonat, P.; Bourillet, J. F. (1993). Stabilité des Pentes Sous-Marines Dans a La Baie des Anges, Nice, France. *Revue Française de Géotechnique*. 64; 21-30.
- Mohrig D., Marr, J.G.; (2003). Constraining the Efficiency of Turbidity Current Generation from Submarine Debris Flows and Slides using Laboratory Experiments. *Marine and Petroleum Geology* 20(6), p. 883-899.
- Sahdi, F., Gaudin, C., White D.J., Boylan, N., Randolph, M.F. (2014). Centrifuge Modelling of Active Slide-Pipeline Loading in Soft Clay. *Géotechnique*, 64 (1), p. 16-27.
- Sahdi, F., Gaudin, C., Tom, J. G., Tong, F. (2019). Mechanisms of Soil Flow During Submarine Slide-Pipe Impact. *Ocean Engineering*, 186, p.106079.
- Smith, D.E., Harrison, S., Jordan, J.T., (2013). Sea level rise and submarine mass failures on open continental margins. *Quaternary Science Reviews*. 82, 93-103.
- Talling, P.J. Clare, M. Urlaub, M., Pope, E., Hunt, J.E., Watt, S.F.L., (2014). Large submarine landslides on continental slopes geohazards, methane release, and climate change. *Oceanography* 27 (2), 32-45.
- Urlaub, M., Talling, P., Zervos, A., (2014). A Numerical Investigation of Sediment Destructuring as a Potential Globally Widespread Trigger for Large Submarine Landslides on Low Gradients. *Submarine Mass Movements and Their Consequences*, 6th International Symposium, p. 177-188.
- Urlaub, M., Talling, P.J., Zervos, A., Masson, D., (2015). What causes large submarine landslides on low gradient (<math><2^\circ</math>) continental slopes with slow (~ 0.15 m/kyr) sediment accumulation?. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120 (10), p. 6722–6739.
- Zakeri, A., Hawlader, B. (2013). Drag forces caused by submarine glide block or out-runner block impact on suspended (free-span) pipelines-numerical analysis. *Ocean Engineering*. 67, p.89-99.
- Zhang, J.H., Zhao C., Xiong, Z. S. (2014). Meso-level simulation of gas hydrate dissociation in low-permeability sediments. *Theoretical & Applied Mechanics Letters* 4, 062002.
- Zhang, J. H., Lin, H. L.; Wang, K. Z. (2015) Centrifuge modeling and analysis os submarine landslides triggered by elevated pore pressure. *Ocean Engineering*. Vol. 109: 419-429.
- Terzaghi, K., Peck, R.B. (1987) *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd ed., McGraw Hill, New York, NY, USA, 685 p.