



## Validação Experimental em Centrífuga de Modelo Numérico Aplicado à Subsidiência em Taludes Submarinos

Camila Ferreira Floriano

Mestranda, Programa de Engenharia Civil/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, camilafloriano@coc.com.br

Maria Cascão Ferreira de Almeida

Professora, Programa de Engenharia Civil/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, mariacascao@poli.ufrj.br

Maria do Carmo Reis Cavalcanti

Professora, Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, carminhacavalcanti@poli.ufrj.br

Antônio Hilário da Rocha Junior

Doutorando, Programa de Engenharia Civil/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, antonio.hilario@coc.ufrj.br

Marcio de Souza Soares de Almeida

Professor, Programa de Engenharia Civil/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, marciossal@gmail.com

**RESUMO:** A produção de petróleo e gás em águas profundas desempenha um papel crucial na matriz energética brasileira, mas também está associada a desafios geotécnicos relevantes. A extração desses recursos pode provocar o colapso dos poros da rocha reservatório devido ao aumento da tensão efetiva, levando à subsidência do solo na superfície e à instabilização do leito marinho. Esse mecanismo pode comprometer a infraestrutura instalada no local e resultar em perdas ambientais, econômicas e reputacionais para a empresa exploradora. No contexto de um projeto de pesquisa desenvolvido no LM<sup>2</sup>C/COPPE/UFRJ, este artigo tem como foco avaliar o desempenho de um modelo numérico na simulação desse processo, por meio da comparação com resultados de ensaios centrífugos. As análises tensão-deformação foram realizadas por meio do método dos elementos finitos, utilizando o modelo constitutivo de Mohr-Coulomb em condição não drenada. De modo geral, os resultados indicaram boa compatibilidade entre os deslocamentos obtidos numericamente e aqueles registrados nos ensaios físicos, com destaque para a representação da bacia de recalques. O estudo será ampliado futuramente para avaliar os efeitos da geometria, da inclinação do talude e da magnitude do colapso.

**PALAVRAS-CHAVE:** Subsidiência, Talude Submarino, Estabilidade de Taludes, Análise Numérica, Modelagem Centrífuga.

**ABSTRACT:** Deepwater oil and gas production plays a crucial role in Brazil's energy matrix but is also associated with significant geotechnical challenges. The extraction of these resources can induce the collapse of reservoir rock pores due to increased effective stress, leading to surface subsidence and destabilization of the seabed. This mechanism may compromise offshore infrastructure and result in environmental, economic, and reputational losses for the operating company. Within the scope of a research project developed at LM<sup>2</sup>C/COPPE/UFRJ, this study focuses on evaluating the performance of a numerical model in simulating this phenomenon, based on comparisons with centrifuge test results. Stress-strain analyses were carried out using the finite element method, adopting the Mohr-Coulomb constitutive model under undrained conditions. Overall, the results showed good agreement between the displacements obtained numerically and those observed in the physical tests, particularly with regard to the settlement basin profile. Future developments of the study will investigate the influence of slope geometry, inclination, and the magnitude of reservoir compaction.

**KEYWORDS:** Subsidence, Submarine Slope, Slope Stability, Numerical Analysis, Centrifuge Modeling.



## 1 INTRODUÇÃO

A indústria de exploração de petróleo e gás desempenha papel estratégico na matriz energética brasileira, sendo responsável por 46,2% da oferta nacional de energia e cerca de 97% da produção é advinda de operações offshore (EPE, 2023). Nos campos do pré-sal, situados a até 7000 metros abaixo do nível do mar (Petrobras, 2025), a extração se dá sob elevadas pressões e em ambientes geotécnicos complexos (Moraes, 2023). Essa atividade pode induzir à subsidéncia do leito marinho, provocada pelo colapso dos poros da rocha reservatório, à medida que a retirada de fluidos reduz a poro pressão e aumenta a tensão efetiva no maciço rochoso. O resultado pode ser o deslocamento vertical do solo, com impacto na estabilidade do fundo oceânico e nas estruturas submarinas nele instaladas.

A subsidéncia induzida pode reativar falhas, gerar recalques diferenciais e comprometer a integridade de dutos e plataformas, configurando um risco geotécnico relevante (Allen, 1984; Cabral *et al.*, 2006). Esses efeitos são agravados em taludes inclinados ou em solos moles como as argilas marinhas das Bacias de Campos e Santos. Nesse contexto, torna-se essencial investigar a interação entre a subsidéncia e a estabilidade do leito marinho, utilizando métodos para tentar prever e prevenir acidentes. Este trabalho se propõe a avaliar tais efeitos por meio de modelagem numérica com validação em ensaios centrífugos, com o objetivo de contribuir para projetos *offshore* mais seguros e resilientes.

Este trabalho faz parte de um projeto de pesquisa desenvolvido no Laboratório Multiusuário em Modelagem Centrífuga (LM<sup>2</sup>C - COPPE/UFRJ), voltado à investigação dos efeitos da subsidéncia na estabilidade de taludes submarinos. Este estudo faz parte de um projeto P&D financiado pela Petrobras, no qual existe um grupo de pesquisadores desenvolvendo, em paralelo, temas relacionados.

O objetivo geral da linha de pesquisa é investigar os efeitos da subsidéncia da rocha reservatório na estabilidade de taludes submarinos, por meio da integração entre modelagem física e numérica. Este artigo tem como foco avaliar a compatibilidade do desempenho do modelo numérico com os resultados dos ensaios centrífugos, no contexto da análise da subsidéncia pelo colapso da rocha reservatório. Uma vez validado, o modelo numérico poderá ser extrapolado para diferentes espessuras de sedimentos, inclinação do talude e magnitude do colapso, permitindo, inclusive, a análise de cenários reais.

## 2 METODOLOGIA

A modelagem física é uma importante ferramenta utilizada em diversas áreas da engenharia e tem como objetivo criar um modelo em escala adequada que forneça uma compreensão física de um fenômeno relacionado a um problema real. A modelagem centrífuga, então, tem o papel de apoiar o desenvolvimento do projeto geotécnico em condições desafiadoras do solo ou quando as cargas esperadas são atípicas ou extremas, além de auxiliar na observação direta dos mecanismos de ruptura do solo (Madabhushi, 2015).

Neste estudo, os resultados obtidos por meio dos ensaios centrífugos desempenham papel fundamental ao serem utilizados como referência para a comparação com os dados provenientes da modelagem numérica, funcionando, assim, como base para a sua validação.

Conforme descrito por Madabhushi (2015), a premissa básica da modelagem por centrífuga é que sejam realizados testes em um modelo em escala 1/N de um protótipo dentro do campo gravitacional aumentado de uma centrífuga geotécnica, o qual é gerado por meio da rotação da amostra de solo em torno do eixo da centrífuga. A gravidade é ampliada pelo mesmo fator geométrico N em relação ao campo gravitacional normal da Terra, denominado 1-g.

A lei de escala básica apresentada a seguir, conforme descrito por Taylor (1994), deriva da necessidade de garantir a similaridade de tensões entre o modelo e o protótipo correspondente. Se uma aceleração de N vezes a gravidade terrestre (g) for aplicada a um material de densidade  $\rho$ , então a tensão vertical  $\sigma_{vm}$  na profundidade  $h_m$  do modelo (indicada pelo subscrito *m*) é dada pela Equação 1. Já, no protótipo (indicada pelo subscrito *p*), a tensão vertical é calculada pela Equação 2.

$$\sigma_{vm} = \rho N g h_m \quad (1)$$

$$\sigma_{vp} = \rho g h_p \quad (2)$$

Logo, para que  $\sigma_{vm} = \sigma_{vp}$ , é necessário que  $h_m = h_p N^{-1}$ , sendo N denominado como fator de escala.



A Figura 1 apresenta a correspondência entre a tensão inercial em um modelo e a tensão gravitacional no protótipo.

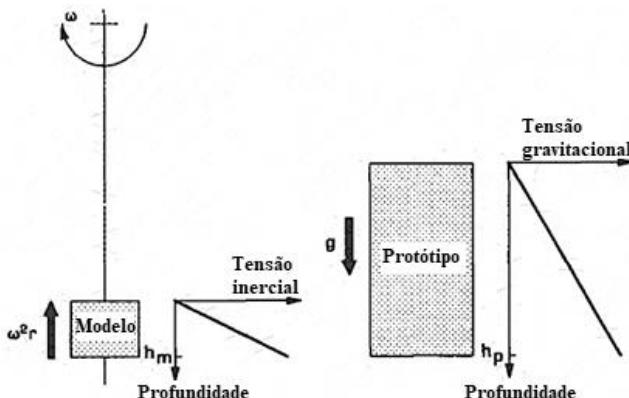


Figura 1. Correspondência entre a tensão inercial em um modelo e a tensão gravitacional no protótipo  
(adaptado de Taylor, 1994)

A metodologia adotada neste estudo combinou as modelagens física e numérica para avaliar os efeitos da subsidência do reservatório na estabilidade do talude marinho. Foram efetuadas análises de tensão e deformação por elementos finitos com o *software* Plaxis 2D em condição não drenada e em estado plano de deformações, simulando o mecanismo de subsidência utilizado na centrífuga geotécnica. A simulação numérica foi validada com base nos resultados experimentais de deslocamentos obtidos em ensaios centrífugos realizados no LM<sup>2</sup>C/COPPE/UFRJ.

A subsidência foi simulada pelo rebaixamento de uma plataforma central rígida, representando o colapso localizado da rocha reservatório. As deformações/deslocamentos obtidos viabilizaram a avaliação do comportamento do talude em resposta ao colapso da rocha reservatório. O estado de tensões provenientes das análises numéricas será utilizado como dado de entrada nas análises de estabilidade via SRF (*strength reduction factor*), as quais serão desenvolvidas no próximo estágio da pesquisa a fim de avaliar o efeito da inclinação na estabilidade do talude após a subsidência.

O trabalho desenvolvido por Rocha Júnior *et al.* (2024) apresentou a proposta e a concepção do modelo físico em centrífuga para o estudo da estabilidade de taludes submarinos submetidos ao processo de subsidência. Nesse estudo pregresso, foram definidas as dimensões da caixa de ensaio e os critérios geométricos necessários para garantir a similitude física nos experimentos. Essa pesquisa foi conduzida de forma paralela à presente, servindo como base para a modelagem física no âmbito do projeto. Por outro lado, o foco deste trabalho está centrado na modelagem numérica do fenômeno, utilizando os dados experimentais da centrífuga como referência para a calibração e validação dos modelos computacionais.

A seguir, são apresentadas as características do modelo numérico e do modelo físico feito em centrífuga.

## 2.1 Caracterização do Modelo Centrífugo

Foram realizados dois ensaios para a calibração do modelo numérico, sendo um para a condição de talude horizontal, chamado de *flat* ao longo do presente estudo, e o outro numa inclinação de, aproximadamente, 3,1°. A configuração do talude é realizada após o adensamento da amostra fora da centrífuga. Após à moldagem do talude, torna-se necessário conduzir uma nova etapa de adensamento em voo, antes da aplicação do colapso da plataforma, com o objetivo de estabilizar as poro pressões no modelo e restabelecer o equilíbrio do estado de tensões. Como consequência desse processo, a inclinação final do talude pode apresentar variações em relação à inclinação inicialmente projetada. No presente estudo, a inclinação de 3,1° corresponde ao valor médio medido ao longo da face inclinada do modelo físico imediatamente antes da descida da plataforma.

O modelo físico foi realizado em uma caixa com 30 cm de comprimento, 10 cm de largura e altura variável conforme a configuração adotada (*flat* ou inclinada), representando um protótipo escalado a 1:100, ou seja, com um fator de escala (N) igual a 100. A plataforma central, com 5 cm de comprimento e largura transversal ocupando toda a extensão entre as faces laterais da caixa, foi rebaixada verticalmente em 6 mm, com o objetivo de simular a subsidência localizada induzida pelo colapso da rocha reservatório.



A Figura 2 apresenta a seção transversal da caixa utilizada nos ensaios para as condições de talude horizontal e inclinado.

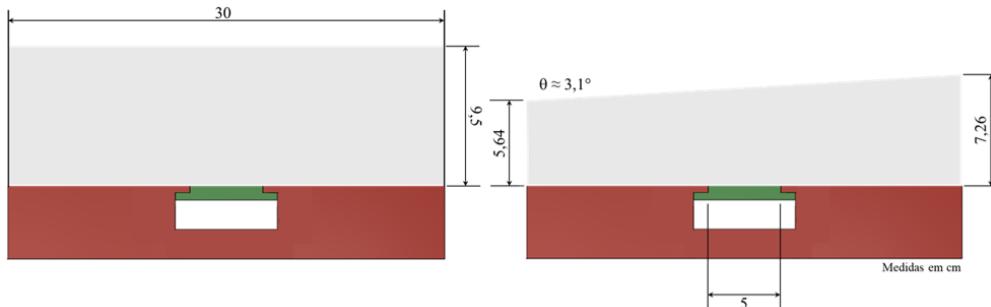


Figura 2. Seção transversal da caixa utilizada nos ensaios centrífugos

Conforme estudado por Borges *et al.* (2015), o perfil geológico característico dos taludes submarinos ao longo da margem continental é predominantemente constituído por argilas normalmente adensadas a levemente pré-adensadas, cujas espessuras variam de poucos metros a centenas de metros, a depender das condições geotécnicas e deposicionais locais. Com isso, o caulim foi utilizado no presente estudo por ser um material largamente empregado em pesquisas geotécnicas.

Durante a campanha de ensaios centrífugos, foram realizados ensaios de caracterização geotécnica e de mini T-bar. O perfil médio de resistência não drenada ( $S_u$ ) obtido nos ensaios se assemelha ao perfil geotécnico na camada de solo superficial citado por Borges *et al.* (2015), que, ao avaliar áreas suscetíveis a movimentos de massa submarinos no talude continental e no Platô de São Paulo, na Bacia de Campos, propôs a relação  $S_u = 0,629 + 1,939z$ .

Em ambos os ensaios, foi realizada a medição dos deslocamentos do topo do modelo por meio de *lasers*, os quais foram dispostos em maior concentração no centro da caixa, pois é a região mais mobilizada pela descida da plataforma. A partir desses dados, foi possível traçar a bacia de recalques gerada pelo mecanismo de subsidência.

## 2.2 Caracterização do Modelo Numérico

Nas análises numéricas, as dimensões da caixa do ensaio centrífugo foram convertidas para a escala de protótipo, resultando em um modelo com 30 m de largura, 9,5 m de altura (para a condição *flat*) e 5 m de extensão da plataforma. Para o caso com inclinação de aproximadamente 3,1°, o talude foi representado com 7,26 m de altura na porção superior e 5,64 m na porção inferior.

Conforme apresentado na Tabela 1, que reúne os parâmetros geotécnicos do caulim utilizados na modelagem numérica, o modelo foi dividido em camadas a fim de refletir o perfil médio de  $S_u$  obtido nos ensaios de mini T-bar. A partir desses resultados, determinou-se o módulo de elasticidade não drenado do solo ( $E_u$ ) com base na correlação  $E_u = 300S_u$ , valor típico para argilas brasileiras em ambientes *onshore* e *offshore* (Almeida e Marques, 2014).

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos do caulim utilizados na modelagem numérica

Parâmetro	Camada	Valor
Peso específico saturado [kN/m <sup>3</sup> ]	0 – base do modelo	16,38
Índice de Plasticidade ( $I_p$ ) [%]		39,00
$e_0$ [-]		1,36
Módulo de elasticidade não drenado ( $E_u$ ) [kPa]		$E_u = 300S_u$
Coeficiente de poisson ( $\nu$ ) [-]		0,495
Coeficiente de empuxo no repouso ( $K_0$ ) [-]		1,00
Perfil de resistência não drenada ( $S_u$ ) [kPa]	0 – 1 m	$0,36 + 3,24z$
	1 – 4 m	$3,60 + 2,36z$
	4 m – base	$10,67 + 5,49z$



2025

Na análise com talude inclinado, além da estratificação do solo em função do perfil de  $S_u$ , foram realizadas camadas de 1 m de espessura com  $S_u$  e  $E_u$  constante equivalente ao valor médio da camada. Essa abordagem foi adotada em razão das limitações do *software* utilizado, que atribui os valores iniciais de  $S_u$  e  $E_u$  com base em uma única cota de referência, o que inviabiliza a representação adequada do perfil de resistência ao cisalhamento quando se utiliza uma variação linear desses parâmetros com a profundidade e não em relação à tensão efetiva vertical.

Todas as análises foram realizadas com o modelo constitutivo Mohr-Coulomb em condições não drenadas (modelo de Tresca) devido à forma como o mecanismo de colapso é simulado, o qual acontece rapidamente. Essa escolha também permite, na próxima etapa da pesquisa, aplicar o método de redução da resistência ao cisalhamento (SRF) em estudos de estabilidade de taludes.

A Figura 3 mostra as dimensões do modelo utilizado nas análises numéricas e a verificação do perfil de  $S_u$  para as condições de talude horizontal e inclinado.

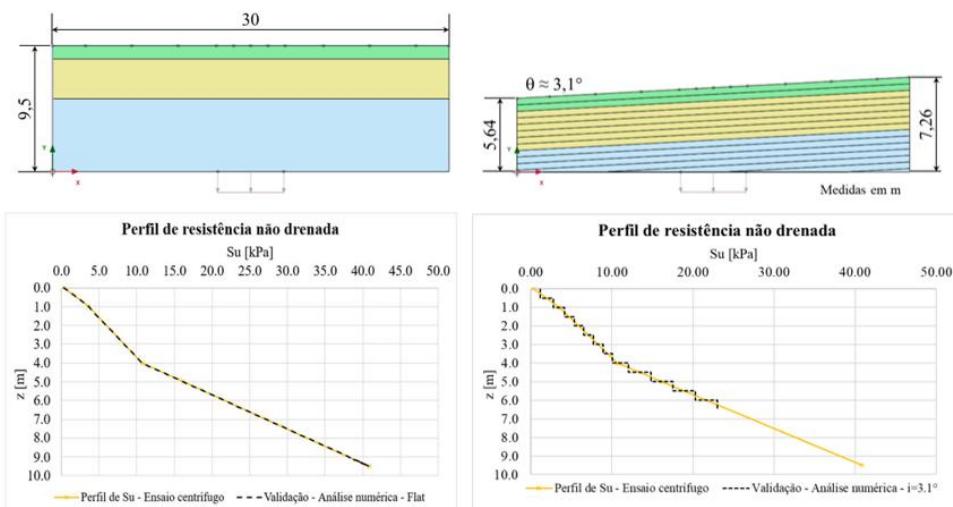


Figura 3. Dimensão do modelo numérico e verificação do perfil de  $S_u$  para as condições *flat* e inclinada

A malha do modelo numérico foi inicialmente definida de maneira uniforme e na configuração *fine*, o que gerou elementos de dimensões reduzidas adaptados à geometria geral. Visando a eficiência computacional, foi realizada uma análise de convergência, conduzindo a um refinamento maior somente na região próxima à plataforma, onde ocorrem maiores gradientes de tensão. As malhas das análises *flat* e inclinada foram geradas com, aproximadamente, 15 mil elementos.

As condições de contorno utilizadas no modelo numérico foram de restrição de deslocamento horizontal nas laterais e restrição de deslocamentos horizontal e vertical na base, exceto na região da plataforma, onde foi aplicado um deslocamento prescrito de 60 cm. A descida da plataforma foi realizada em 12 etapas de 5 cm. Esse refinamento foi essencial para evitar distorções nos deslocamentos simulados, como descontinuidades observadas nas primeiras simulações. Testes com diferentes configurações de malha e número de incrementos de deslocamento foram realizados para garantir a estabilidade e a acurácia numérica das simulações.

A Figura 4 apresenta a malha e as condições de contorno aplicadas ao modelo numérico.

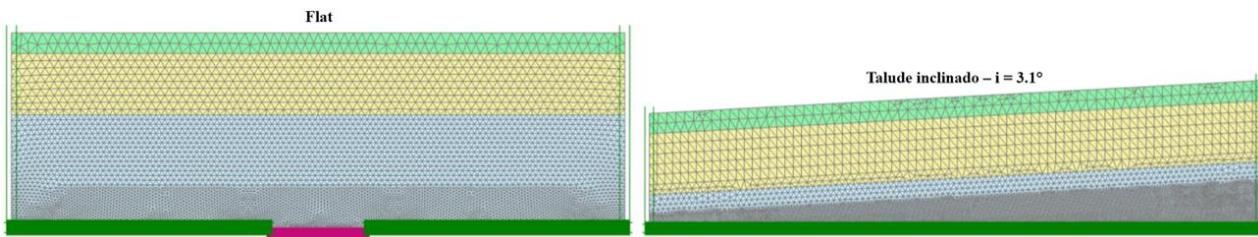


Figura 4. Malha e condições de contorno aplicadas ao modelo numérico para as condições *flat* e inclinada

## 2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 apresenta a comparação entre as bacias de recalques obtidas no ensaio centrífugo com talude horizontal (*flat*) e na análise numérica correspondente. Observa-se que ambas as curvas apresentam a mesma tendência geral de deslocamento, com recalques concentrados na região central da plataforma colapsada e uma transição suave nas bordas da bacia. A análise numérica reproduziu, em geral, satisfatoriamente a profundidade e a extensão do recalque observado no ensaio físico, embora se perceba uma leve diferença no formato da bacia: a curva do ensaio centrífugo é ligeiramente mais aberta, enquanto o modelo numérico mostra uma inclinação mais abrupta na região próxima às bordas da plataforma.

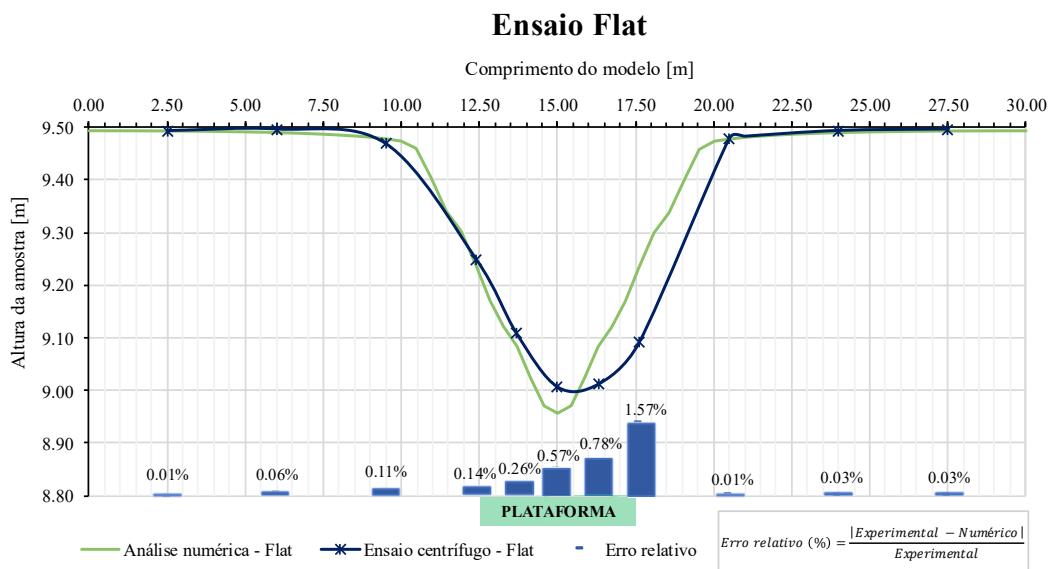


Figura 5. Comparação das bacias de recalque obtidas no ensaio centrífugo e na modelagem numérica para a condição *flat*

Nota-se ainda uma assimetria na bacia de recalques obtida experimentalmente em relação ao centro da plataforma, com deslocamentos ligeiramente mais acentuados à direita da posição central. Esse comportamento não foi reproduzido na modelagem numérica, que apresenta uma bacia simétrica em torno da plataforma. Além disso, destaca-se que o valor máximo de deslocamento obtido na simulação numérica está ligeiramente acima daquele registrado no ensaio centrífugo.

Para quantificar a aderência entre as curvas, foi calculado o erro relativo ponto a ponto, que apresentou valores inferiores a 1,6% ao longo do perfil, com pico próximo à borda direita da plataforma e valores inferiores a 0,6% na região de máximo recalque. Esses resultados corroboram a boa reprodução da forma e da profundidade da bacia pelo modelo numérico.

Essas discrepâncias podem estar relacionadas a pequenas irregularidades na execução do ensaio, como uma leve heterogeneidade na preparação do solo, variações locais de resistência ou possíveis fugas de material durante o rebaixamento da plataforma. Tais efeitos, ainda que sutis, são comuns em modelagens físicas e reforçam a importância da análise conjunta entre os métodos físico e numérico para uma melhor compreensão do fenômeno.

A Figura 6 mostra a comparação entre as bacias de recalques obtidas no ensaio centrífugo com talude inclinado a 3,1° e na análise numérica correspondente.

De modo geral, observa-se boa concordância entre os resultados do modelo centrífugo e da análise numérica, com ambas as curvas indicando a formação de uma bacia de recalques proeminente sobre a plataforma colapsada. A inclinação natural do terreno suaviza a forma da bacia em comparação com o caso plano, mas ainda é possível identificar a zona de maior afundamento, seguida por uma transição gradativa para as regiões estáveis nas extremidades do modelo.



2025

Em relação ao deslocamento máximo, observou-se que o valor obtido para a condição inclinada foi superior ao da condição *flat*, tanto nas análises numéricas quanto nos ensaios centrífugos. Contudo, essa diferença pode estar relacionada à menor espessura da camada de solo sobre a plataforma na configuração inclinada, que apresenta quase 3 m a menos de cobertura. Como consequência, quanto mais superficial for o colapso, maior tende a ser a subsidência na superfície e mais estreita a bacia de recalques. A literatura relacionada ao uso de *trap-door* em solos argilosos reforça essa tendência, indicando que a profundidade da camada de solo sobre a região colapsada exerce influência direta na magnitude da deformação superficial. Meguid *et al.* (2008), por exemplo, relataram que o recalque superficial aumentou à medida que a razão entre a altura de solo e a largura da plataforma diminuiu.

### Ensaio Talude Inclinado - $i = 3,1^\circ$

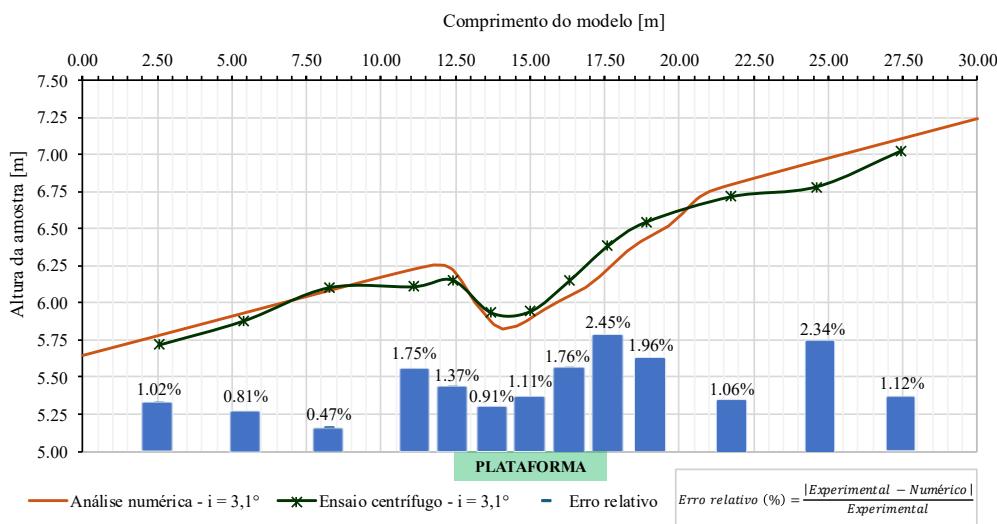


Figura 6. Comparação das bacias de recalque obtidas no ensaio centrífugo e na modelagem numérica para a condição de talude inclinado a  $3,1^\circ$

Apesar da boa compatibilidade global, a análise numérica tendeu a superestimar os deslocamentos em algumas regiões, especialmente no topo do talude. Os resultados experimentais apresentaram um abatimento mais acentuado na parte superior do modelo, o que poderia indicar uma possível instabilização do maciço em resposta à redistribuição de tensões induzida pela subsidência. O erro relativo na análise do talude inclinado variou entre 0,5% e 2,5%, atingindo maiores valores justamente nesta região.

É importante esclarecer que foi realizado um ajuste aos resultados experimentais a partir de um talude médio pré-subsidência, conforme utilizado na modelagem numérica, onde os deslocamentos registrados foram subtraídos desse valor médio de talude pré-adensamento, gerando o talude pré e pós-subsidência. Essa aproximação foi necessária devido à dificuldade de reproduzir com precisão a geometria real do talude no modelo numérico. Nesse contexto, o aumento do erro na região superior do talude é coerente com a sensibilidade à geometria inclinada e ao ajuste por talude médio adotado para compatibilizar ensaio e modelo.

Além disso, Rocha Júnior *et al.* (2024) realizaram um estudo prévio voltado à definição do aparato experimental para a simulação da subsidência utilizado nos ensaios centrífugos, analisando o comportamento de taludes com inclinações variando entre  $1^\circ$  e  $4^\circ$ . Os autores concluíram que, dentro dessa faixa de inclinação, a ocorrência de subsidência localizada não resultou em variações no fator de segurança, sendo este influenciado somente pela própria inclinação do talude. Para taludes com inclinação de até  $4^\circ$ , o fator de segurança encontrado permaneceu superior a 1, o que reforça a hipótese de que o abatimento observado no topo do perfil do solo inclinado no ensaio centrífugo não está relacionado a um processo de instabilização do talude.



### 3 CONCLUSÕES

Os resultados demonstraram que o modelo numérico adotado foi capaz de representar de forma satisfatória o comportamento observado nos ensaios centrífugos, especialmente quanto à forma da bacia de recalques e à distribuição dos deslocamentos verticais. Diferenças pontuais, como a assimetria identificada apenas no ensaio físico, podem ser atribuídas a heterogeneidades do solo no modelo experimental e às limitações na representação precisa da geometria no modelo numérico.

Com base na boa correlação entre os métodos físico e numérico, conclui-se que o modelo numérico simulou adequadamente o comportamento observado nos ensaios, podendo ser adotado em análises com diferentes espessuras de sedimentos e inclinações de talude. Na próxima etapa da pesquisa, serão conduzidas análises de estabilidade utilizando o método SRF (*strength reduction factor*), a fim de avaliar a influência da subsidência no fator de segurança para estabilidade do talude.

Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se: (i) ampliar o escopo com análises paramétricas variando espessura de sedimentos, inclinação de talude e magnitude do colapso; (ii) adotar modelos constitutivos mais avançados, capazes de representar de forma mais realista os mecanismos de deformação induzidos pela subsidência; (iii) investigar o efeito de arqueamento de tensões no solo provocado pela subsidência; e (iv) estender as análises numéricas a cenários reais.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, S. A. (1984) Types of land subsidence. In: *Guidebook to Studies of Land Subsidence Due to Groundwater Withdrawal*, Poland, J.F. (ed.), UNESCO, Paris, 133-142 p.
- Almeida, M. de S. S., Marques, M. E. S. (2014) *Aterros sobre solos moles: Projeto e desempenho*, 2<sup>a</sup> ed., Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil, 256 p.
- Borges, R. G., Lima, A. C., Kowsmann, R.O. (2015) *Áreas propensas a escorregamentos no talude continental*. In: Kowsmann, R.O., editor. *Geologia e Geomorfologia*. Rio de Janeiro: Elsevier. Habitats, v. 1, p. 99-136.
- Cabral, J. J. da S. P., Santos, S. M. dos; Pontes Filho, I. D. da S. (2006) Bombeamento intensivo de água subterrânea e riscos de subsidência do solo, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 11 (3), 147-157 p.
- Empresa de Pesquisa Energética (2023) *Balanço Energético Nacional 2023: ano base 2022*. Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>>. Acesso em: 15 nov. 2024.
- Madabhushi, G. (2015) *Centrifuge Modelling for Civil Engineers*, 1<sup>a</sup> ed., CRC Press, Londres, Inglaterra, Reino Unido, 324 p.
- Meguid, M. A., Saada, O., Nunes, M. A., Mattar, J. (2008) Physical modeling of tunnels in soft ground: A review. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23 (2), 85–198 p.
- Morais, J. M. de (2023) *Petróleo em águas profundas: uma história de evolução tecnológica da Petrobras na exploração e produção no mar*, 2<sup>a</sup> ed, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 592 p.
- Petrobras (2025) *Pré-sal: mergulhe nessa jornada ultraprofunda*. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/pre-sal>>. Acesso em: 5 jun. 2025.
- Rocha Júnior, A. H. da, Almeida, M. de S. S., Fagundes, D. de F., Cavalcanti, M. do C. R., Dias, P. L. (2024) Proposta de Modelo Centrífugo para Estudo da Estabilidade de Taludes Submarinos Submetidos ao Processo de Subsidiência. In: XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), Santa Catarina. *Anais geotecnica para o desenvolvimento sustentável*, 1979-1986 p.
- Taylor, R. N. (1994) *Geotechnical Centrifuge Technology*, 1<sup>a</sup> ed., CRC Press, Londres, Inglaterra, Reino Unido, 296 p.