

## Proposta de Modelo Centrífugo Para Estudo da Estabilidade de Taludes Submarinos Submetidos ao Processo de Subsidência

Antônio Hilário da Rocha Júnior

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

Márcio de Souza Soares de Almeida

Professor Titular, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, marciossal@gmail.com

Diego de Freitas Fagundes

Professor Adjunto, FURG, Rio Grande, Brasil, dffagundes@gmail.com

Maria do Carmo Reis Cavalcanti

Professor Adjunto, POLI/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, carminhacavalcanti@poli.ufrj.br

Pedro Lobato Dias

Engenheiro Pesquisador, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, plobato@poli.ufrj.br

**RESUMO:** O avanço da exploração de óleo e gás em campos produtores suscita preocupações na indústria devido à possível subsidência do leito marinho, afetando a integridade das estruturas submarinas e a produção. O presente estudo propõe uma análise numérica detalhada para subsidiar a construção de um aparato geotécnico capaz de simular fenômenos de subsidência em taludes submarinos. Os modelos em elementos finitos analisaram o comportamento da estabilidade de taludes submarinos submetidos a um processo de subsidência induzida e variando parâmetros como inclinação do talude, área de influência da subsidência e espessura da camada de solo marinho. Os resultados dos modelos numéricos foram utilizados no aparato geotécnico utilizado para estudar modelos reduzidos centrifugados em gravidade induzida, visando a estabilidade de taludes submarinos de baixa inclinação. A caixa de ensaios projetada permitirá o deslocamento controlado de uma plataforma no fundo, operada por um cilindro hidráulico, simulando a desestabilização. O monitoramento da subsidência e padrões de ruptura envolverá sensores a laser, transdutores de poropressão, ensaios T-bar e células de tensão total. Esse método experimental oferecerá uma abordagem realista para analisar os efeitos da subsidência, com resultados que permitirão determinar parâmetros cruciais para a estabilidade do fundo marinho.

**PALAVRAS-CHAVE:** Taludes Submarinos, Subsidência, Modelagem Centrífuga, Modelagem Numérica.

**ABSTRACT:** The advance of oil and gas exploration in producing fields raises concerns in the industry due to the possible subsidence of the seabed, affecting the integrity of subsea structures and production. This study proposes a detailed numerical analysis to support the construction of a geotechnical apparatus capable of simulating subsidence phenomena on subsea slopes. The finite element models analyzed the stability behavior of subsea slopes subjected to an induced subsidence process and varying parameters such as the slope inclination, the area of influence of the subsidence and the thickness of the marine soil layer. The results of the numerical models were used in the geotechnical apparatus used to study reduced models centrifuged in induced gravity, with a view to the stability of low-slope submarine slopes. The designed test box will allow the controlled displacement of a platform on the bottom, operated by a hydraulic cylinder, simulating destabilization. Monitoring subsidence and rupture patterns will involve laser sensors, poropressure transducers, T-bar tests and total stress cells. This experimental method will offer a realistic approach to analyzing the effects of subsidence, with results that will make it possible to determine crucial parameters for the stability of the seabed.

**KEYWORDS:** Underwater Slopes, Subsidence, Centrifugal Modeling, Numerical Modeling.

## 1 INTRODUÇÃO

O petróleo obtido na bacia de Campos representa no Brasil cerca de 23% e 9% da produção de petróleo e de gás natural, respectivamente. Este campo de petróleo cobre uma área de cerca de 100.000 metros quadrados, e tem sido explorado nas últimas quatro décadas. Atualmente, a produção de petróleo e gás é de cerca de 840 mil de barris de petróleo e cerca de 13 milhões de metros cúbicos de gás natural por dia (ANP-2023). Esses números justificam a importância do campo petrolífero da bacia de Campos para a economia brasileira. Estudar o comportamento geomecânico dos solos marinhos localizados em águas profundas da bacia de Campos tornou-se uma atividade importante entre outras que visam caracterizar a bacia de Campos para desenvolver e aprimorar as técnicas de prospecção de petróleo, e aprimorar o conhecimento dos engenheiros projetistas no entendimento do comportamento das estruturas offshore fundadas no leito marinho.

Associado tanto à atividade de extração de petróleo e gás quanto a fenômenos geológicos naturais, a subsidência no fundo do mar representa um desafio que pode afetar estruturas subaquáticas e a segurança das operações. Esse fenômeno, caracterizado pelo afundamento da camada superficial do leito marinho, pode resultar em deslizamentos que comprometem as instalações de produção subaquáticas, aumentando os riscos operacionais e os custos de manutenção.

Segundo Cabral et. al. (2006), a subsidência é definida como o rebaixamento da superfície terrestre devido a modificações nas camadas subterrâneas, resultando na perda de suporte subterrâneo e manifestando-se por meio de deformações e falhas no solo.

A literatura apresenta diversos estudos e pesquisas dedicados à compreensão e mitigação da subsidência do fundo do mar. Garske et al. (2015) realizaram uma avaliação regional das áreas suscetíveis a movimentos de massa submarinos no talude continental localizado na Bacia de Campos. Utilizando uma ferramenta de análise espacial em um sistema de informação geográfica (SIG) e um modelo matemático para previsão de áreas propensas a deslizamentos, baseado em leis físicas, o estudo produziu mapas regionais de fatores de segurança estáticos para avaliar a propensão a deslizamentos submarinos translacionais rasos nessas regiões (Figura 1).

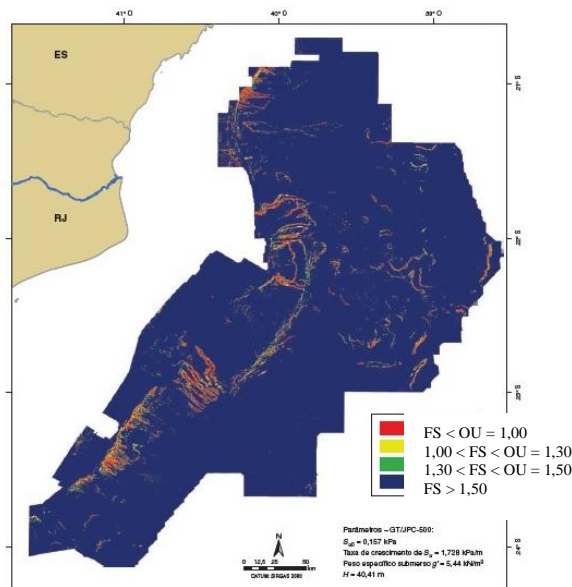


Figura 1 - Cenário de suscetibilidade a deslizamentos obtido da modelagem matemática (Garske et al., 2015)

Adicionalmente, Cabral et. al. (2006) apontam que é crucial compreender a morfologia e os processos geológicos do fundo marinho para a avaliação de riscos de subsidência e o aprimoramento de técnicas de monitoramento e previsão mais acuradas.

Com base no exposto, o objetivo do estudo apresentado é entender o comportamento mecânico da argila marinha encontrada no fundo do mar da bacia de Campos frente ao fenômeno da subsidência. Com o auxílio de modelos numéricos foi possível prever o comportamento do solo marinho sendo definido, à priori, os parâmetros geotécnicos do Caulim, previamente estudados em Fernandes (2018) e largamente utilizado em

estudos que avaliam o solo marinho, devido as suas propriedades similares. Os resultados dos modelos numéricos foram analisados para obtenção de dados que servissem de alicerce para o desenvolvimento e construção do aparato de geotécnico capaz de simular a subsidência no leito marinho através de ensaios com modelos físicos reduzidos em centrífuga de braço da COPPE/UFRJ e com a utilização de amostras reconstituídas. Ao final de toda pesquisa será possível compreender os mecanismos que causam a subsidência do leito marinho e aplicar ações preventivas e de gestão eficientes, além de ser possível assegurar a segurança das atividades subaquáticas e a sustentabilidade duradoura da indústria de exploração.

## 2 MODELO FÍSICO EM CENTRÍFUGA

Os perfis geológicos típicos de taludes submarinos da margem continental são compostos de camadas de argilas normalmente adensadas a levemente pré-adensadas com profundidades variando entre poucos metros e centenas de metros (Kowsmann *et al*, 2015).

Atualmente, a modelagem física em centrífuga geotécnica tem se tornado um método experimental que permite o estudo de uma ampla gama de problemas geotécnicos sob condições reais de tensão e deformação (Almeida, 1984; Madabhushi, 2014; Taylor, 1995).

Ensaio em modelos centrífugos fornecem informações necessárias para melhorar o entendimento dos mecanismos básicos de deformação e ruptura de solos, provendo resultados experimentais de referência e essenciais para a validação de modelos numéricos.

O princípio fundamental da modelagem física em centrífuga é estabelecer um modelo de escala reduzida, com resistência e rigidez similares a um determinado protótipo. Modelos de solo são submetidos à centrífuga de modo a serem conduzidos para um campo inercial maior do que o campo gravitacional terrestre, através de uma aceleração radial ( $a_r = \omega^2 \cdot r$ ). Ao aumentar em  $N$  vezes a aceleração gravitacional de um modelo em escala  $1/N$  é possível recriar níveis de tensão e deformação compatíveis ao protótipo (Schofield, 1980).

Uma amostra de solo acelerada em centrífuga tem a superfície livre de tensões e um perfil de tensões verticais que aumenta diretamente com a profundidade, proporcionalmente relacionada com o peso específico da amostra e com campo de aceleração criado, ou seja,  $N \cdot g$ . Assim, em um modelo corretamente planejado, uma profundidade  $h_m$  possui exatamente o mesmo nível de tensões do protótipo a uma profundidade  $h_p$ , onde  $h_p = N \cdot h_m$ , sendo  $N$  o fator de escala.

Tal relação da altura do modelo com a altura de protótipo estabelece a lei básica de escalas em modelos centrífugos. Em resumo, para obter equivalência de tensões entre o modelo centrífugo e o protótipo, as dimensões lineares devem ser reduzidas  $N$  vezes, e o modelo submetido a uma aceleração  $N$  vezes da gravidade. Dessa forma, as tensões (inerciais) a uma profundidade  $z/N$  no modelo serão idênticas às tensões (gravitacionais) a uma profundidade  $z$  no protótipo (Figura 2).

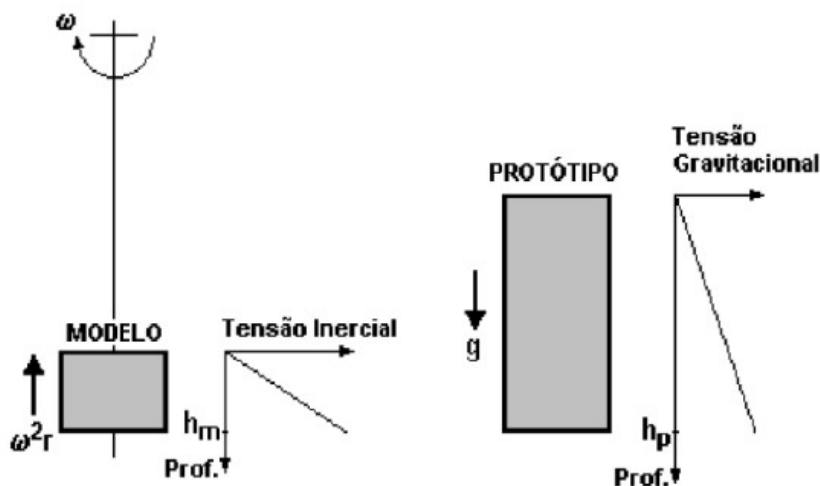


Figura 2 - Croqui esquemático da relação entre a altura do modelo ( $h_m$ ) e altura do protótipo ( $h_p$ ).

A centrífuga que será utilizada nos ensaios é caracterizada como uma centrífuga de pequeno porte com um raio efetivo 66 cm (Figura 3), que representa a distância do eixo da centrífuga até o centro da amostra. A caixa de ensaio que será utilizada nos ensaios possui 30 cm de comprimento, 10 cm de largura e 18 cm de altura. Devido a necessidade de se construir uma plataforma no fundo da caixa de ensaios de exatos 5 cm de altura, sob a qual será instalado o aparato de subsidência, essa altura foi reduzida para 13 cm e consequentemente o raio efetivo foi alterado para 61 cm.

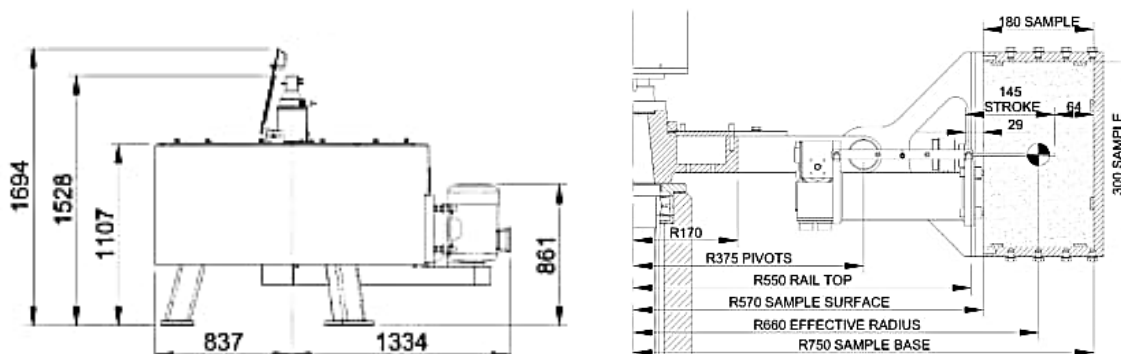


Figura 3 - Desenho esquemático da centrífuga de braço (LM2C-UFRJ)

A amostra que será realizado os ensaios será previamente adensada em um consolidômetro até uma tensão de 50 kPa. O recalque previsto para a amostra de solo marinho será de aproximadamente 40%, que resultará em uma espessura final de 8 cm de solo marinho.

Ao se considerar um fator de escala  $N = 100$  e uma relação  $h_p = N \cdot h_m$ , anteriormente mencionada, a altura do protótipo será de 8 m. Considerando o raio efetivo utilizado no ensaio de 61 cm, será necessário a aplicação de uma rotação equivalente à 380 rpm para que essa relação seja verdadeira. A centrífuga utilizada nos ensaios é do modelo GT6 e a caixa de ensaios com estrutura reforçada para suportar os níveis de tensão no qual a amostra será submetida (Figura 4).

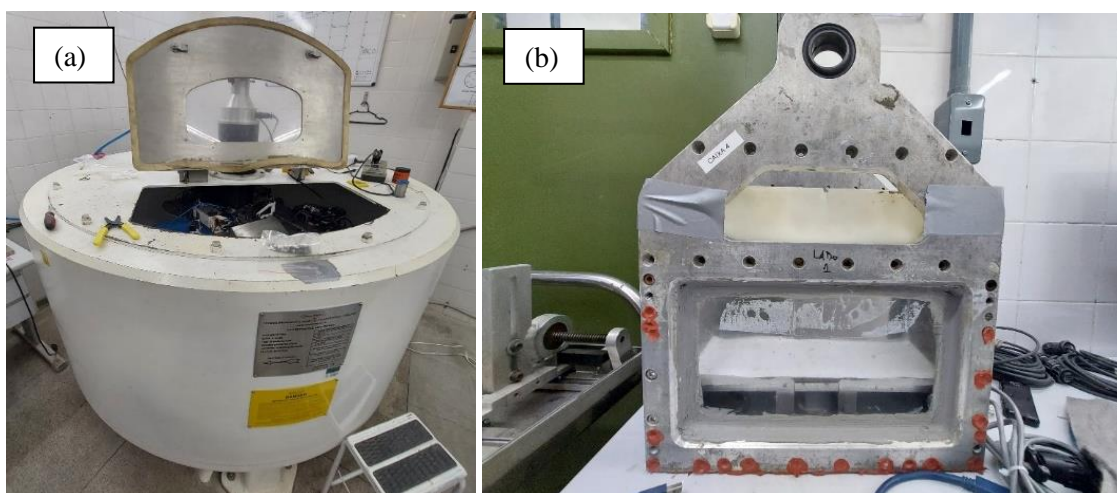


Figura 4 - a) Centrífuga de braço do laboratório LM2C-UFRJ; b) Caixa de ensaios reforçada.

### 3 MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico visa simular condições particulares referentes ao fenômeno da subsidência, através da simulação do deslocamento da base e consequente deslocamento na superfície (subsidência). Nesse contexto, o modelo numérico foi concebido utilizando as dimensões de protótipo compatíveis com as limitações geométricas impostas pelo modelo físico, atribuindo ao modelo numérico as dimensões de 30 m de comprimento com uma espessura de solo de 8 m.

Como o plano de ensaios em centrífuga contemplará análises em superfícies planas e inclinadas, foi levado em consideração a declividade existente nas margens da plataforma continental para embasar as



simulações de taludes. Em geral, os taludes possuem baixas declividades, com inclinações variando entre  $1^\circ$  e  $8^\circ$ , sendo em sua maioria em torno de  $5^\circ$  (Geosgb.gov).

Em meio às pesquisas recentes conduzidas na COPPE-UFRJ, tornou-se necessária a obtenção de parâmetros geotécnicos do caulim utilizado na modelagem centrífuga., principalmente para validação de modelos numéricos com os resultados obtidos na modelagem física em centrífuga. Fernandes (2018) conduziu uma série de experimentos visando à determinação dos parâmetros de compressibilidade e resistência do Caulim.

O perfil de resistência não drenada utilizado nos modelos numéricos foi obtido por Bakr (2024). Foram realizados ensaios T-bar em condições similares às propostas para o projeto de subsidência, como espessura de solo, dimensões da caixa de ensaios e efeitos de borda, no qual foi obtida a equação de resistência não drenada a ser utilizada no modelo numérico. Na Tabela 1 são relacionados os parâmetros geotécnicos do Caulim utilizados nas análises numéricas Mohr-Coulomb e Cam-clay.

Tabela 1 - Parâmetros geotécnicos do Caulim.

$\gamma_{sat} \left( \frac{kN}{m^3} \right)$	Gs	ei	A	K	M	$\nu$	Su	E (Su)
16,38	2,58	1,36	0,172	0,05	0,93	0,495	2,11h + 0,0127	633h +3,81

A malha de elementos finitos utilizada no modelo numérico aplicada no programa Rocscience foi discretizada em elementos do tipo triangulares, conforme ilustrado na Figura 5, tendo sido densificada na superfície do modelo e na região prevista para a instalação da plataforma móvel.

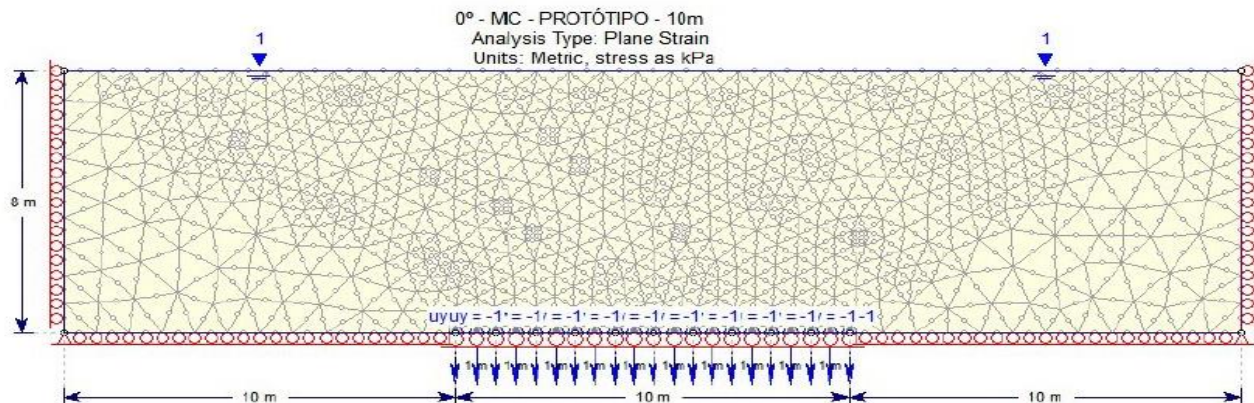


Figura 5 - Malha de elementos finitos

O deslocamento da base ( $\Delta_{cb}$ ) foi induzido em etapas que variaram de 0,1 m à 1,0 m em plataformas de 2 m, 4 m, 6 m, 8 m e 10 m de largura (L), com o objetivo de avaliar o deslocamento na superfície do modelo ( $\Delta_{ds}$ ), conforme representado na Figura 6.

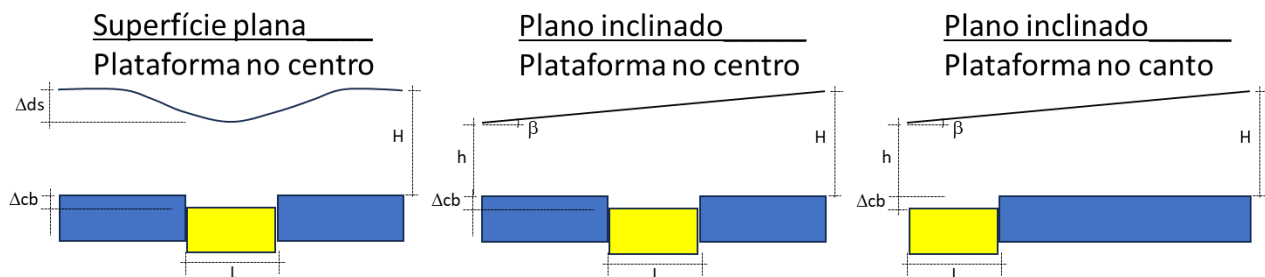


Figura 6 - Croqui representativo do posicionamento da plataforma e suas variáveis.

Na Figura 7a é representado o gráfico de subsidência na superfície para um deslocamento de 1,0 m na base do modelo em uma análise Cam-clay e a subsidência máxima na superfície corresponde a aproximadamente 80% do valor do colapso induzido na base do modelo. Na Figura 7b foi constatado que a subsidência ou deslocamento na superfície varia linearmente com o valor do colapso na base do modelo.

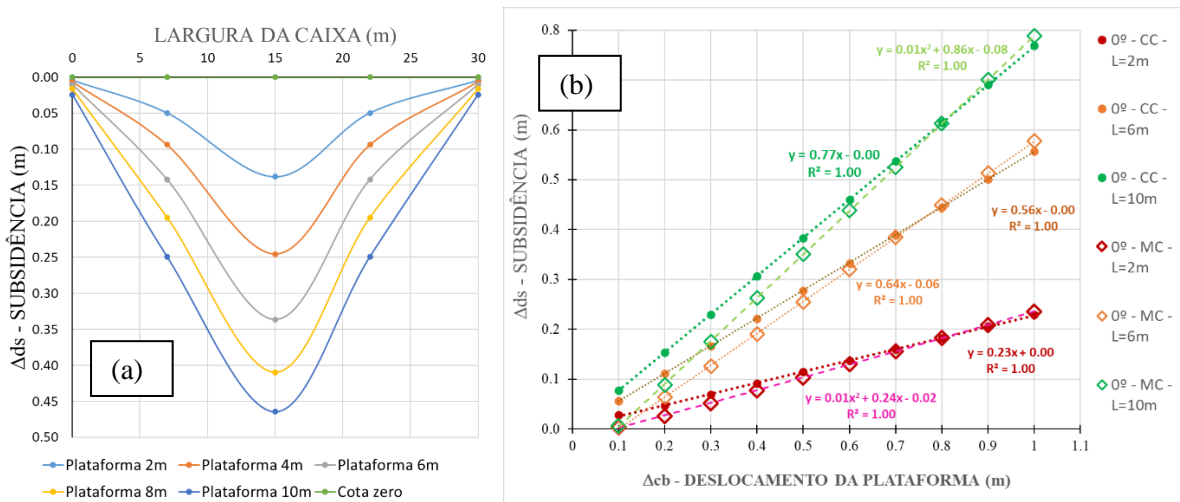


Figura 7 – (a) resultados de deslocamentos na superfície plana no modelo Cam-clay; (b) resultado de subsidência em função do deslocamento da plataforma.

Adicionalmente foi possível avaliar a subsidência normalizada pelo deslocamento da plataforma em função do deslocamento da plataforma de 2 m, 6 m e 10 m (Figura 8a), e na Figura 8b a subsidência normalizada em função da largura da plataforma para deslocamentos de 0,1 m, 0,2 m, 0,3 m, 0,6 m e 1,0 m.

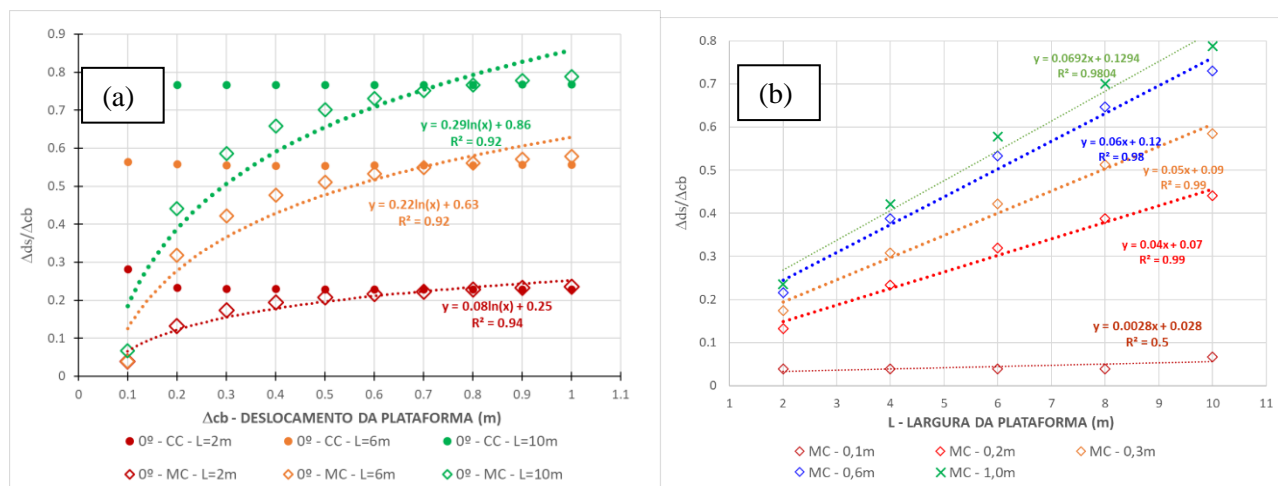


Figura 8 - Subsidência normalizada em função: (a) deslocamento da plataforma; (b) largura da plataforma

A Figura 8a mostra que a subsidência normalizada não varia significativamente em função do deslocamento induzido, contudo na Figura 8b é evidente uma variação linear entre a subsidência normalizada e a largura da plataforma.

Para a análise de planos inclinados, com declividades semelhantes à encontrada nas margens da plataforma continental, foram avaliados, através de modelos Mohr-Coulomb, taludes com inclinação inicial de 1° até uma inclinação final de 4°, inclinação essa que foi a máxima obtida para produzir um valor unitário de FS em uma espessura de solo igual a 8,0 m e um deslocamento da plataforma de 1,0 m. Além da variação da inclinação do talude foram executadas análises em função da variação da largura da plataforma e posição da plataforma de recalque. Os resultados das análises estão relacionados na Tabela 2 e não foram constatadas alterações do FS para taludes com ou sem subsidência, contudo é possível verificar a alteração do FS em função da inclinação do talude.

Tabela 2 - Resultados de fator de segurança em função da inclinação e posição da plataforma.

$\beta$ (°)	H (m) Montante	h (m) pé do talude	FS - Deslocamento da plataforma (1m)				
			Sem Subsidência	Largura Plat. = 10m		Largura Plat. = 2m	
				Posição Centro	Posição Canto	Posição Centro	Posição Canto
1	8	7.47	4.84	4.84	4.84	4.84	4.84
2	8	6.95	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32
3	8	6.42	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48
4	8	5.91	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07

#### 4 DESENVOLVIMENTO DE APARATO DE SUBSIDÊNCIA EM MODELO FÍSICO

Na etapa atual, foram desenvolvidos os setups dos ensaios centrífugos, em condição de superfície plana e com talude, considerando o projeto de instrumentação necessário à obtenção dos parâmetros de interesse. Para estudar os efeitos da subsidência em modelos reduzidos, aplicados em um ambiente de campo inercial aumentado, adotou-se um setup de ensaios de forma que fosse possível aplicar um deslocamento entre a base da caixa de ensaios e a amostra de solo. Então, uma plataforma metálica móvel de 5 cm de largura foi concebida com base nas análises numéricas apresentadas no item 3.

Com o objetivo de permitir o deslocamento de uma plataforma na parte inferior da caixa, foi adotado um atuador hidráulico de perfil ultraabaixo (CUB-05006) de 40 mm de altura com pistão de 6 mm de altura e capacidade máxima de 5t on, que é acionado por uma bomba hidráulica modelo ABS330, conforme ilustrado na Figura 9. Durante o ensaio, o deslocamento da plataforma será acionado pelo alívio de pressão na bomba hidráulica fazendo que essa plataforma se desloque para baixo. Esse mecanismo será acionado remotamente através de um motor de passo acoplado ao registro da bomba hidráulica.



Figura 9 - Cilindro Hidráulico de Aço Ultraabaixo

O monitoramento do deslocamento da plataforma móvel será feito através da utilização de transdutores de deslocamento variável linear (LVDT) presos à plataforma a partir do uso de fios de alta capacidade de tração. O monitoramento superficial da subsidência e dos padrões de ruptura do solo serão obtidos a partir do uso de 11 sensores de deslocamento à laser fixados no topo da caixa de ensaios através de uma estrutura impressa em impressora 3D. Além disso, serão utilizados ainda 4 transdutores de poropressão (PPT) na amostra de solo durante o ensaio e 3 células de tensão total (CTT) para medir a carga aplicada nas plataformas fixas e na plataforma móvel. Um ensaio T-bar será realizado para obter o perfil de resistência não drenada do solo. A Figura 10 apresenta uma vista em corte do setup de ensaios para estudo dos efeitos de subsidência.



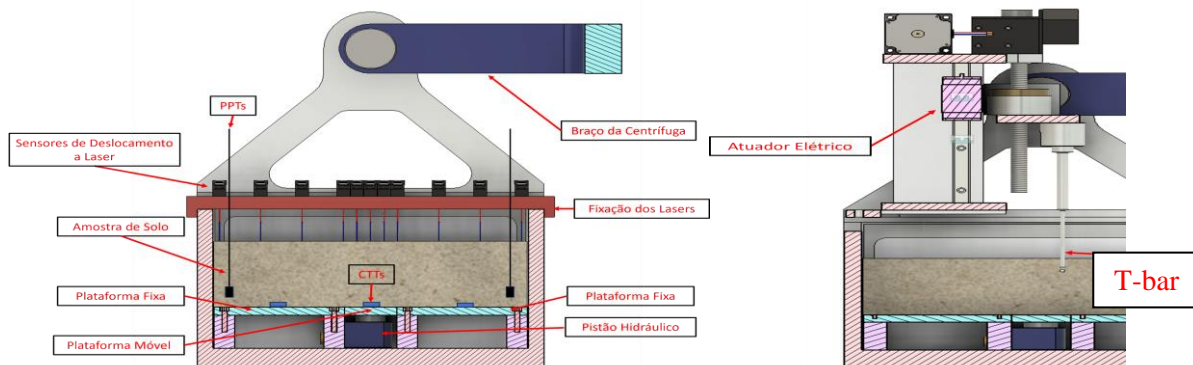


Figura 10 - Ilustração do setup de ensaios de subsidência.

## 4 CONCLUSÕES

Este artigo apresenta resultados de análises numéricas que fundamentaram o desenvolvimento de um aparato para estudar a subsidência em campos petrolíferos. Através de um atuador hidráulico será possível aplicar um deslocamento no fundo da caixa de ensaios.

A utilização da centrífuga irá permitir a obtenção de parâmetros em condições similares ao protótipo através de um campo inercial induzido. Serão obtidos perfis de resistência não drenada, além parâmetros de deformação obtidos pelos sensores à laser. Com isso será possível alimentar modelos numéricos que irão simular de forma mais representativa as condições de campo, e como consequência uma maior previsibilidade em relação às operações de extração de petróleo e gás no leito marinho sob a perspectiva do fenômeno da subsidência.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a PETROBRAS/CENPES. Os autores agradecem aos revisores pelos importantes comentários objetivos e pontuais, compartilhando sua experiência e conhecimento técnico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, M. S. S. (1984), *Doctor of Philosophy Thesis: Stage Constructed Embankments on Soft Clays*. 1984. Cambridge University.
- Bakr, D. (2024), *Avaliação da capacidade de carga de estaca torpedo T-120 em ensaios centrífugos*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE - PEC, Rio de Janeiro.
- Cabral, J.J.; Santos, S.M.; Pontes Filho, I.D. (2006), *Bombeamento Intensivo de Água Subterrânea e Risco de Subsidência do Solo*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.11. p.147-157.
- Fernandes, F.C. (2018), *Ensaio de coluna ressonante e de Bender Elements para medidas de módulos cisalhantes em Caulim*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro.
- Garske et. Al. (2015), *Áreas propensas a escorregamentos no talude continental*. Kowsmann, R.O., editor. Geologia e Geomorfologia. Rio de Janeiro: Elsevier. Habitats, v. 1. p. 99-136.
- Kowsmann, R. O.; Falcão, A. P. C.; Curbelo-Fernandez, M. P. (2015), *Geologia e geomorfologia. Rio de Janeiro*: Elsevier Ltd.
- Madabhushi, G. (2014), *Centrifuge Modelling for Civil Engineers*. Boca Raton, FL/USA: CRC Press.
- Schofield, A.N. (1980), *Cambridge geotechnical centrifuge operations*, Géotechnique, 25 (4), pp. 743-61.
- Taylor, R. N. (1995), *Ed. Geotechnical Centrifuge Technology*. City University, London/UK: BLACKIES ACADEMIC & PROFESSIONAL.