

# Ensaio Triaxiais em Argila Marinha para Estudo da Estabilidade de Taludes Submarinos em Decorrência de Subsidência

Paulo Victor Acácio Alves

Engenheiro Civil, Coppe/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, paulovictor.alves@coc.ufrj.br

Leonardo De Bona Becker

Professor, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, leonardobecker@poli.ufrj.br

Sergio Iorio

Engenheiro Civil, Coppe/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, sergio@coc.ufrj.br

Vitor Nascimento Aguiar

Professor, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, vitoraguiar@poli.ufrj.br

Márcio de Souza Soares de Almeida

Professor, Coppe/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, almeida@coc.ufrj.br

**RESUMO:** Um dos problemas enfrentados pela indústria do petróleo é o entendimento dos mecanismos de ruptura de taludes no leito marinho provocados pela subsidência. Para investigar esse problema, foram coletadas amostras deformadas de sedimento argiloso do campo de Marlim, para futura realização de ensaios em centrífuga. Antes, entretanto, houve a necessidade de estudar como diferentes condições de carregamento podem afetar o comportamento do sedimento argiloso e, por consequência, a segurança dos taludes. Para tanto, foi realizada uma campanha de ensaios de laboratório em amostras reconstituídas a partir das amostras deformadas coletadas do sedimento argiloso do leito marinho. A caracterização do material coletado indicou que se trata de um silte argiloso com propriedades físicas e mineralógicas diferentes daquelas tipicamente encontradas em argilas sedimentares *onshore*, pois suas compressibilidades e plasticidades são relativamente elevadas. Nas amostras reconstituídas, foram realizados ensaios de adensamento edométrico, e ensaios triaxiais de compressão cisalhados de forma não drenada após adensamento ora hidrostático (CIUc) ora sob condição  $K_0$  ( $CK_0U$ ), bem como ensaios triaxiais de extensão cisalhados de forma não drenada após adensamento hidrostático (CIUe). Alguns ensaios CIU foram realizados ainda com diferentes valores de razão de sobreconsolidação (OCR) e outros foram realizados com diferentes taxas de deformação axial impostas no cisalhamento a fim de avaliar a influência desses fatores na razão de resistência não drenada ( $s_u / p'_0$ ).

**PALAVRAS-CHAVE:** Ensaio triaxiais, Compressão, Extensão, Argila marinha, Taludes offshore, Efeitos de taxa de deformação.

**ABSTRACT:** One of the problems faced by the oil industry is understanding the mechanisms of submarine slope failure caused by subsidence. To investigate this issue, disturbed samples of clayey sediment were taken from the Marlim field for future centrifuge testing. Before that, however, it was necessary to study how different loading conditions can affect the behavior of the clayey sediment and, consequently, the stability of the slopes. For this, a series of laboratory tests was carried out on reconstituted samples prepared from the disturbed samples taken from the seabed's clayey sediment. The characterization of the material indicated that it is a clayey silt with physical and mineralogical properties different from those typically found in onshore sedimentary clays, since its compressibility and plasticity are relatively high. On the reconstituted samples, oedometer consolidation tests were carried out, along with undrained triaxial compression tests following either hydrostatic consolidation (CIUc) or  $K_0$ -consolidation ( $CK_0U$ ), as well as undrained triaxial extension tests following hydrostatic consolidation (CIUe). Some CIU tests were also performed with different overconsolidation ratios (OCR), whereas others were performed with different imposed axial strain rates during shearing, in order to assess the influence of these factors on the undrained shear strength ratio ( $s_u / p'_0$ ).



**KEYWORDS:** Triaxial tests, Compression, Extension, Marine clay, Offshore slopes, Strain rate effects.

## 1 INTRODUÇÃO

Apesar da tendência das últimas décadas pela busca de novas fontes de energia, a indústria do petróleo ainda se mostra muito longe do seu esgotamento. Segundo dados consolidados e emitidos pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), no ano de 2023, a produção de petróleo e gás natural no Brasil atingiu um novo recorde, com a marca de 4,344 milhões de barris de petróleo equivalente por dia, representando um crescimento de 11,69% em relação ao ano anterior. Nesse contexto, evidencia-se ainda a importância do entendimento dos mecanismos associados a fenômenos ligados à ação antrópica nessa indústria, como é o caso do fenômeno da subsidência. A subsidência é um gatilho para a instabilidade de taludes submarinos, associada a diversas formas de carregamento com diferentes taxas.

Estudos sobre o efeito da subsidência na estabilidade de taludes marinhos ainda são incipientes, havendo pouco material sobre o tema na literatura. Assim, o entendimento da influência da resistência não drenada ( $S_u$ ) na estabilidade desses taludes é fundamental para os projetos. Dessa forma, o objetivo deste estudo é analisar como a resistência não drenada ( $S_u$ ) varia conforme a direção do carregamento (i.e. compressão ou extensão), a taxa de deformação imposta e a razão de sobreadensamento (OCR).

## 2 O Fenômeno da Subsidência

A subsidência é o rebaixamento de uma porção da superfície do terreno (no caso em análise, do leito marinho) devido a causas naturais, como o tectonismo, ou ainda devido à retirada de fluidos de porções inferiores do maciço. A produção de óleo e gás, assim como a retirada de água, causam a dissipação do excesso de poropressão desses reservatórios, sendo responsáveis pelo adensamento nessas regiões. A subsidência, portanto, é um subproduto do processo de extração (Abija & Abam, 2021; Doornhof et al., 2006).

Borges et al. (2015) apresentam que os deslizamentos submarinos são mecanismos comuns de transferência de sedimentos de taludes superiores para bacias oceânicas. Destaca-se ainda que os taludes submarinos possuem inclinações suaves, variando entre 0,5° e 3,0°. Para a ocorrência de movimentos de massa, é necessário a ocorrência de alguns fatores, como mudanças na morfologia (Costa et al., 1994, apud Borges et al., 2015). Esse fenômeno pode ser intensificado pela subsidência gerada nos locais onde ocorre a extração de petróleo e gás natural.

## 3 Materiais e métodos

### 3.1 Preparação das amostras reconstituídas

O material utilizado para a realização dos ensaios desta pesquisa trata-se do sedimento argiloso do leito marinho do campo de Marlim, que está localizado a cerca de 110 km a leste do cabo de São Tomé, no litoral norte do estado do Rio de Janeiro, na Bacia de Campos. As amostras foram coletadas em tubos Shelby, que tinham comprimentos levemente inferiores a 1 m e diâmetro interno de 101,6 mm, tendo sido fornecidas pela Petrobrás ao Laboratório de Geotecnia da Coppe/UFRJ, onde todos os ensaios foram realizados.

Uma vez que as amostras foram coletadas em diferentes locais e profundidades no campo, apresentando, por conseguinte, uma natural heterogeneidade entre si, e tendo em vista a necessidade de obtenção de corpos de prova homogêneos entre si a serem submetidos aos ensaios de laboratório, decidiu-se pelo preparo de amostras reconstituídas a partir das homogeneizações das amostras coletadas. Para tanto, primeiramente foi procedido o descarte das amostras que apresentavam quantidades significativas de fração areia, após exame tátil-visual. Como as amostras não revelaram uma variação significativa na estratigrafia do leito marinho, apenas algumas lentes de areia foram descartadas. As amostras selecionadas foram colocadas em uma caixa plástica com capacidade de 500 l, tomando-se o cuidado para que uma lâmina d'água protegesse o material contra o aparecimento de fungos e microrganismos que pudessem afetar a amostra.

Para facilitar o manuseio da amostra e permitir estocagem adequada, o material da caixa de 500 l foi dividido em dez partes armazenadas em dez tambores plásticos (chamadas de bombonas), com capacidade de 100 l cada, e numeradas de 1 a 10. Uma das maiores preocupações nesse processo foi garantir que todas as bombonas continham materiais com características similares. Para isso, as bombonas foram enchidas com material sequencialmente (de 1 a 10) e por etapas, sendo colocado aproximadamente 5 l de material em cada

bombona, em cada etapa, até a total transferência do material que estava na caixa de 500 l. Durante o processo de transferência de material da caixa para as bombonas, o material era continuamente misturado dentro da caixa de modo a garantir que não ocorressem segregações do material durante o processo de transferência. O material armazenado nas dez bombonas foi utilizado em três vertentes de trabalhos que ocorriam no Laboratório Multiusuário em Modelagem Centrífuga (LM<sup>2</sup>C), sendo executados ensaios triaxiais, centrífugos e reológicos.

Em cada material armazenado nas bombonas de número ímpar (1, 3, 5, 7 e 9), foi realizada uma bateria de ensaios de caracterização completa, compreendendo: análise granulométrica por peneiramento e sedimentação, limites de Atterberg (liquidez e plasticidade) e massa específica dos grãos, seguindo o que preconiza as respectivas normas da ABNT, NBR 7181(2016), NBR 6459 (2016), NBR 7180 (2016) e NBR 6508 (2014).

Para a posterior moldagem dos corpos de prova dos ensaios de adensamento edométrico e triaxiais, foram produzidas seis amostras reconstituídas a partir das amostras armazenadas nas bombonas 1, 2 e 3, seguindo as recomendações de Fernandes (2018). Assim, para a produção de uma amostra reconstituída, inicialmente uma lama de mistura solo-água era homogeneizada verificando, e eventualmente ajustando, o teor de umidade da lama para que correspondesse a 1,5 vezes o limite de liquidez do material. Em seguida, uma caixa com altura de 30 cm, largura de 16 cm e comprimento de 37 cm era preenchida com a lama homogeneizada. A lama era então adensada no interior da caixa aplicando tensão vertical em seu topo em quatro estágios, a saber, 6,25 kPa, 12,5 kPa, 25 kPa e 60 kPa, com uma prensa pneumática (Figura 1a). Todo o processo levava no mínimo 30 dias. Após o adensamento sob o último estágio (tensão vertical de 60 kPa), a caixa era desmontada (Figura 1b).

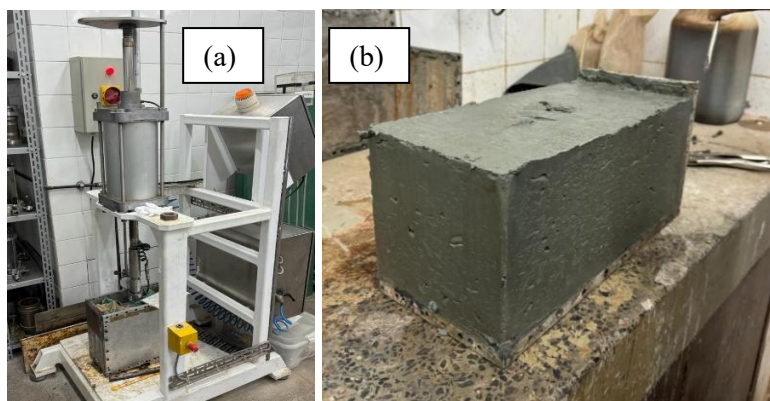


Figura 1. (a) Amostra no adensômetro e (b) bloco para moldagem dos corpos de prova.

De cada bloco de amostra reconstituída foram destacados dez paralelepípedos, desprezando-se a porção da amostra situada a menos de 2 cm de distância das paredes da caixa. Em cada prisma foi talhado um corpo de prova, o qual era embalado em plástico hermeticamente fechado, identificado, e estocado na câmara úmida até o momento da realização do ensaio.

### 3.2 Ensaios de laboratório

Além dos ensaios de caracterização, em corpos de prova moldados nos paralelepípedos das amostras reconstituídas, foram realizados, inicialmente, dois ensaios de adensamento edométrico de carga incremental, seguindo o que preconiza a norma ABNT NBR 16853 (2020), sendo um em corpo de prova intacto e outro em corpo de prova propositalmente amolgado. O objetivo principal desse par de ensaios foi avaliar a qualidade do corpo de prova intacto e, consequentemente, a eficácia da metodologia descrita de fabricação de blocos de amostra reconstituída, com base na comparação dos resultados dos dois ensaios. Nos dois ensaios, os corpos de prova tinham diâmetro de 71,5 mm e altura inicial de 20 mm, tendo sido aplicado estágios de carregamento de tensão vertical de 1,5 (carga de assentamento); 3,125; 6,25; 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa, todos com 24 h de duração (exceto a carga de assentamento), seguidos de estágios de descarregamento para 800; 400; 100 e 25 kPa.

Em corpos de prova intactos moldados nos paralelepípedos das amostras reconstituídas, foram realizados também, em uma primeira etapa, nove ensaios triaxiais adensados hidrosticamente e cisalhados



de forma não drenada, sendo cinco de compressão por carregamento vertical (CIUc) e quatro de extensão por descarregamento vertical (CIUe), além de quatro ensaios triaxiais adensados sob condição  $K_0$  (restrição de deformação radial) e cisalhados de forma não drenada, de compressão por carregamento vertical ( $CK_0Uc$ ). Todos estes ensaios foram adensados para o domínio de compressão virgem, aplicando-se uma tensão hidrostática (ou vertical, no caso de  $CK_0Uc$ ) de, pelo menos, duas vezes a tensão vertical de 60 kPa, aplicada no último estágio quando da produção dos blocos de amostra reconstituída.

Todos os ensaios triaxiais foram realizados em corpos de prova cilíndricos de altura inicial de 100 mm e diâmetro inicial de 50 mm, montados na câmara triaxial com pedras porosas e papéis filtro na base e no topo (sem “free ends”), e tiras verticais de papel filtro ao longo de sua superfície lateral, seguindo o processo de preparação descrito na norma ASTM D4767-11. Os corpos de prova foram saturados por aplicação de contrapressão em estágios, obtendo-se parâmetro B de poropressão de, no mínimo, 0,97. Os cinco corpos de prova submetidos aos ensaios CIUc foram adensados para tensões confinantes efetivas ( $\sigma'_c$ ) de 125, 250, 500, 1000 e 2000 kPa. Os quatro corpos de prova submetidos aos ensaios CIUe foram adensados para tensões confinantes efetivas ( $\sigma'_c$ ) de 250, 500, 1000 e 2000 kPa. Os quatro corpos de prova submetidos aos ensaios  $CK_0Uc$  foram adensados para tensões verticais efetivas ( $\sigma'_v$ ) de 180, 360, 720, e 1440 kPa. Na fase de cisalhamento não drenado, todos os corpos de prova dos ensaios CIUc e  $CK_0Uc$  foram carregados com velocidade de deformação axial constante de 0,013 mm/min, ao passo que os corpos de prova dos ensaios CIUe foram descarregados com a mesma velocidade.

Em uma segunda etapa, foram realizados mais quatro ensaios triaxiais CIUc com as mesmas características descritas acima, porém sendo um corpo de prova normalmente adensado para tensão efetiva de 100 kPa ( $OCR = 1$ ), e três corpos de prova sobreadensados, inicialmente carregados para tensões efetivas de 200, 400 e 800 kPa, e, em seguida, descarregados para a tensão efetiva de 100 kPa, gerando-se razões de sobreadensamento ( $OCR$ ) de 2, 4 e 8, respectivamente. Estes ensaios foram realizados com o objetivo de obter a razão de resistência não drenada ( $S_u/p'_0$ ) como função do  $OCR$  para a argila estudada, sendo  $p'_0$  a tensão confinante efetiva pré-cisalhamento.

Finalmente, em uma terceira etapa, foram realizados mais três ensaios triaxiais CIUc, todos em corpos de prova normalmente adensados sob tensão confinante efetiva de 100 kPa, porém cisalhados com velocidades de deformação axial de 1,3 mm/min, 0,13 mm/min e 0,0013 mm/min, isto é, 100 vezes maior, 10 vezes maior e 10 vezes menor do que aquela aplicada nos demais ensaios, respectivamente. Estes ensaios foram realizados com o objetivo de avaliar a influência da velocidade de deformação axial na razão de resistência não drenada ( $S_u/p'_0$ ), para  $OCR = 1,0$ .

## 4 Resultados obtidos

### 4.1 Ensaios de caracterização geotécnica

A Figura 2 apresenta as curvas granulométricas obtidas das amostras 1, 3, 5, 7 e 9 coletadas nas bombonas de mesmo número. Observa-se que as curvas granulométricas das cinco amostras são muito semelhantes, com um percentual de material passante na peneira nº 200 de 97%. De acordo com a norma ABNT NBR 6502 (2022), de um modo geral, a granulometria das amostras é formada por, aproximadamente, 40% de fração argila, 50% de fração silte e 10% de fração areia fina. Os valores médios obtidos de limite de liquidez e de índice de plasticidade foram 68% e 44%, respectivamente, e o valor médio de massa específica dos grãos foi de 2,68 g/cm<sup>3</sup>.

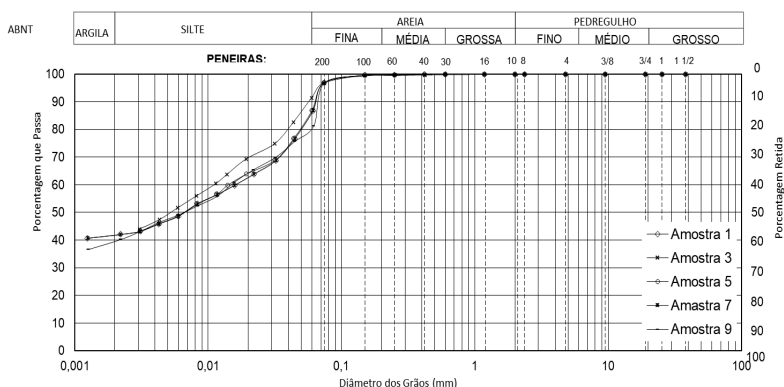


Figura 2. Curvas granulométricas



## 4.2 Ensaios de adensamento edométrico

A Figura 3a apresenta as curvas de compressibilidade “tensão vertical efetiva (escala log) *versus* índice de vazios”, ao passo que a Figura 3b apresenta as curvas “tensão vertical efetiva (escala log) *versus* coeficiente de adensamento,  $c_v$  (escala log)” dos dois ensaios de adensamento edométrico, sendo um em corpo de prova intacto e outro em corpo de prova remoldado/amolgado. Os valores de  $c_v$  foram determinados pelo método de Taylor.

Na curva de compressibilidade do corpo de prova intacto, obteve-se um valor de tensão de sobreadensamento de 43 kPa pelo método de Pacheco Silva, correspondendo a 72% da tensão vertical total aplicada, igual a 60 kPa, quando da fabricação dos blocos de amostra reconstituída. Na mesma curva, obteve-se ainda um valor de índice de compressão virgem ( $C_c$ ) de 0,70, determinado no trecho inicial retilíneo do domínio de compressão virgem, correspondendo a um valor de  $C_c/(1+e_0)$  de 0,25, sendo  $e_0 = 1,78$  o índice de vazios inicial do corpo de prova intacto.

Ressalta-se ainda que a comparação entre as curvas de compressibilidade dos dois corpos de prova revela todos os efeitos de amolgamento descritos por Ladd (1973), e que tal comparação aponta para a eficácia do processo empregado para a produção de blocos de amostra reconstituída de boa qualidade.

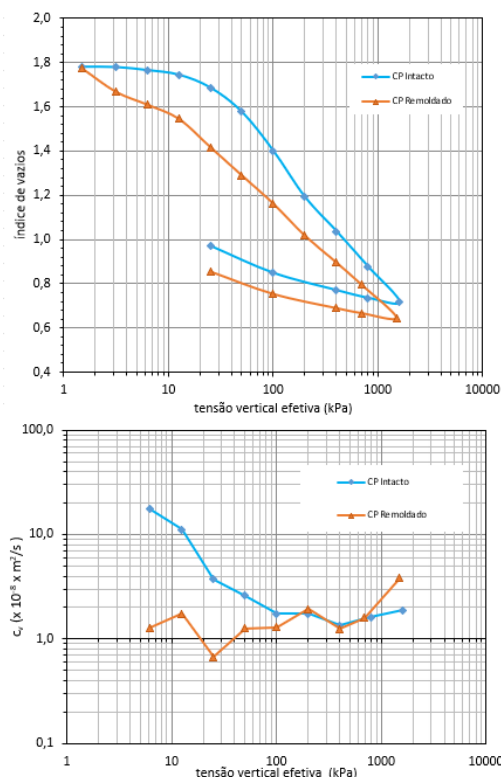


Figura 3. (a) Índice de vazios vs. tensão vertical efetiva (b) Coeficiente de adensamento vs. tensão vertical efetiva.

## 4.3 Ensaios Triaxiais

A Figura 4 apresenta os caminhos de tensões efetivas  $s' \times t$  das fases de cisalhamento não drenado dos cinco ensaios CIUc, quatro ensaios CK<sub>0</sub>Uc e quatro ensaios CIUe, da primeira etapa de ensaios triaxiais. Foi assumido que a ruptura ocorre quando a tensão desviadora atinge o seu valor máximo. Tanto os pontos referentes à ruptura dos ensaios de compressão (valores positivos de  $t$ ) quanto os dos ensaios de extensão (valores negativos de  $t$ ) denunciam envoltórias de ruptura curvilíneas, isto é, valores decrescentes de ângulo de atrito efetivo com o aumento da tensão de adensamento. Há de se ressaltar, contudo, que os valores de tensão desviadora na ruptura dos três ensaios CIUe (extensão) de menores tensões de adensamento estão muito acima do esperado. Possivelmente, os resultados dos ensaios CIUe estão afetados por problemas de efeito de tração na membrana de látex que envolve o corpo de prova e de estricção do corpo de prova durante a extensão,

que são problemas frequentemente encontrados neste tipo de ensaio. Por estas razões, esses ensaios serão futuramente reinterpretados à luz do método proposto por Becker et al. (2022).

Procurou-se então ajustar uma envoltória de ruptura retilínea única aos pontos de ruptura dos ensaios de compressão CIUc e CK<sub>0</sub>Uc (valores positivos de  $t$ ), forçando-a a passar pela origem dos eixos, obtendo-se um ângulo de atrito efetivo de 20°, que é um valor tipicamente baixo.

Vale ressaltar também que os caminhos de tensões efetivas tanto dos ensaios triaxiais de compressão quanto dos ensaios triaxiais de extensão acusaram o chamado “salto de viscosidade”, que consiste na manifestação instantânea, no início do cisalhamento, da parcela viscosa da resistência não drenada segundo o modelo desenvolvido pelo Grupo de Reologia dos Solos da Coppe/UFRJ (ver Martins 2023).

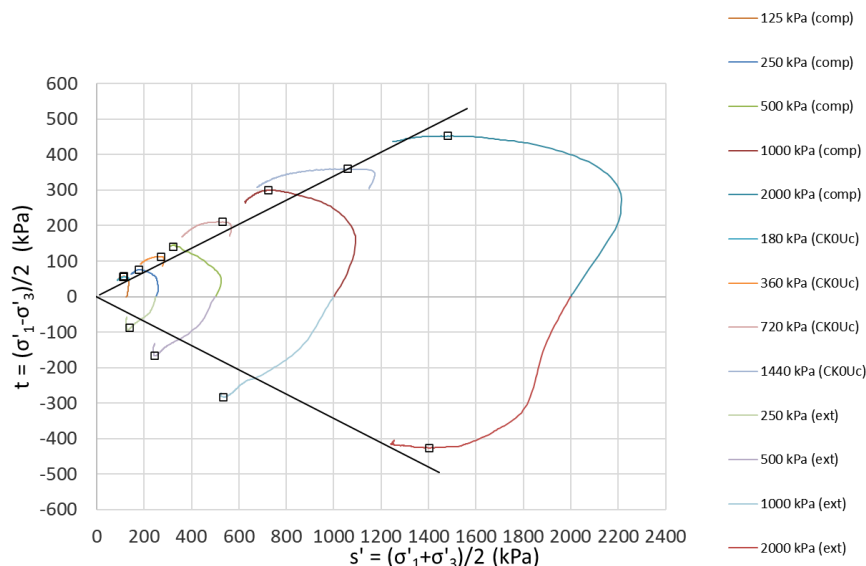


Figura 4. Envoltória  $s'$  x  $t$  dos ensaios triaxiais de compressão e extensão.

A Figura 5 apresenta a curva “resistência não drenada normalizada  $S_u/p'_0$  versus razão de sobreadensamento, OCR (escala log)” obtida dos ensaios triaxiais CIUc da segunda etapa, onde  $S_u$  é a resistência não drenada e  $p'_0$  é a tensão hidrostática efetiva pré-cisalhamento. Lembrando que todos estes ensaios foram cisalhados com a mesma velocidade de deformação axial de 0,013 mm/min. Observa-se que quanto maior o valor do OCR, maior o valor de  $S_u/p'_0$ , conforme o esperado (ver, por exemplo, Ladd & Foot, 1974). O objetivo destes ensaios era justamente obter a relação entre  $S_u/p'_0$  e OCR para o solo estudado.

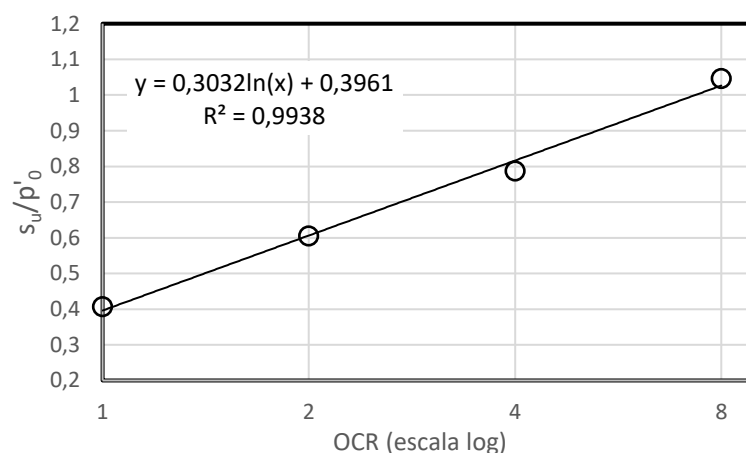


Figura 5. Resistência não drenada normalizada pela tensão efetiva média x razão de sobreadensamento.

A Figura 6 apresenta a curva “resistência não drenada normalizada  $S_u/p'_0$  versus velocidade de deformação axia (escala log)” obtida dos ensaios CIUc das segunda e terceira etapas de ensaios triaxiais

realizados com  $OCR = 1,0$ , porém com diferentes velocidades de deformação axial aplicadas na fase de cisalhamento não drenado. Observa-se que quanto maior a velocidade de deformação axial, maior o valor de  $S_u/p'_0$ , conforme já observado em diferentes argilas (ver, por exemplo, Berre & Bjerrum, 1973 e Sheahan et al., 1996). O objetivo destes ensaios era obter a relação entre  $S_u/p'_0$  e velocidade de deformação axial para o solo estudado.

De acordo com o modelo desenvolvido pelo Grupo de Reologia dos Solos da Coppe/UFRJ (ver Martins, 2023), o aumento da resistência não drenada com o aumento da velocidade de deformação axial imposta é uma manifestação da parcela viscosa da resistência ao cisalhamento.

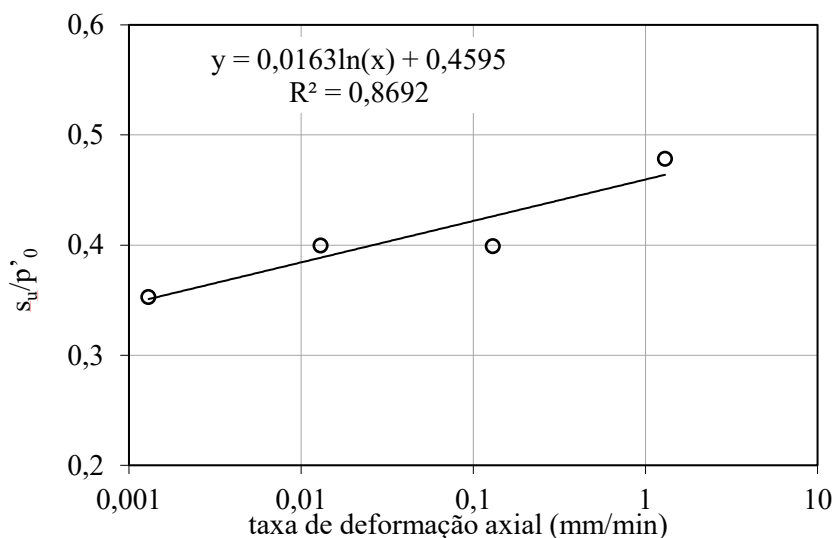


Figura 6. Resistência não drenada normalizada pela tensão efetiva média x taxa de deformação axial.

## 5 Considerações Finais

Este artigo apresentou os resultados de uma campanha de ensaios de laboratório realizada em amostras reconstituídas produzidas a partir de amostras Shelby extraídas do sedimento argiloso do leito marinho do Campo de Merlim, na Bacia de Campos, litoral norte do estado do Rio de Janeiro. Esta campanha de ensaios está inserida em um programa de pesquisa mais amplo, em andamento no Laboratório Multiusuário em Modelagem Centrífuga (LM<sup>2</sup>C), do Laboratório de Geotecnia da Coppe/UFRJ, que tem por objetivo investigar o fenômeno da subsidência do leito marinho provocado pela extração de petróleo e gás como gatilho para a instabilidade de taludes submarinos.

Os ensaios de caracterização mostraram que a granulometria das amostras reconstituídas ensaiadas é formada por, aproximadamente, 40% de fração argila, 50% de fração silte e 10% de fração areia fina, com valores médios de limite de liquidez e de índice de plasticidade de 68% e 44%, respectivamente.

Os ensaios triaxiais de compressão CIU e CK<sub>0</sub>U revelaram valores decrescentes de ângulo de atrito efetivo com o aumento da tensão de adensamento, isto é, envoltória de ruptura curvilínea. O ajuste de uma envoltória de ruptura retilínea, forçando-a a passar pela origem, forneceu um ângulo de atrito efetivo de 20°, valor tipicamente baixo.

Finalmente foram obtidas as relações entre  $S_u/p'_0$  e OCR e entre  $S_u/p'_0$  e velocidade de deformação axial para o solo estudado, sendo que  $S_u/p'_0$  aumentou tanto com o aumento do OCR quanto com o aumento da velocidade de deformação axial, conforme o esperado.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório Multiusuário em Modelagem Centrífuga (LM<sup>2</sup>C) e à Petrobras pelo financiamento da pesquisa.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abija, F. A.; Abam, T. K. S. (2021). *Predicting ground subsidence due to long term oil/gas production in a Niger Delta basin, Nigeria: implications for CO<sub>2</sub> EOR and geosequestration*. [S.l.]: In Review. Disponível em: <https://www.researchsquare.com/article/rs-357959/v1>. Acesso em: 20 set. 2023.
- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP (2023). *Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural: Encarte de Consolidação da Produção – 2023*. Edição nº 160, dez. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br>. Acesso em: 8 jul. 2025.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014). *NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). *NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). *NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). *NBR 7181: Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). *NBR 16853: Solo – Ensaio de adensamento unidimensional*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). *NBR 6502: Solos e rochas – Terminologia*. Rio de Janeiro.
- ASTM International (2011). *ASTM D4767-11: Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils*. West Conshohocken, PA. Disponível em: <https://www.astm.org/D4767-11.html>. Acesso em: 17 jul. 2025.
- Becker, L. D.; Fabre, J. S.; Barbosa, M. C. (2022). *Determination of the critical state of a silty sand iron tailings in triaxial extension tests using photographic correction*. Canadian Geotechnical Journal, 60(4), 504–520.
- Berre, T.; Bjerrum, L. (1973). *Shear Strength of Normally Consolidated Clays*. In: 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow. Proceedings, p. 39–49.
- Borges, R. G.; Lima, A. C.; Kowsmann, R. O. (2015). *Áreas propensas a escorregamentos no talude continental*. In: Kowsmann, R. O. (org.). Geologia e Geomorfologia. Rio de Janeiro: Elsevier. v. 1, p. 99–136.
- Costa, A.M., Amaral, C.S., Kowsmann, r.o., Paganelli, L.M., Viana, A.r., Castro, d.d., Caddah, L.F.G. (1994). relatório final: análise de estabilidade do talude submarino de Marlim. rio de Janeiro: Petrobras. Cenpes. diprex. Sedem.
- Doornhof, D.; Kristiansen, T. G.; Nagel, N. B.; Pattillo, P. D.; Sayers, C. (2006). Compaction and subsidence. Oilfield Review, 18(3), 50–63.
- Fernandes, F. C. (2018). *Ensaio de Coluna Ressonante e de Bender Elements para Medidas de Módulos Cisalhantes em Caulim*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 148 f.
- Ladd, C. C. (1973). *Estimating settlements of structures supported on cohesive soils (MIT 1971 Special Summer Program I.34s)*. Cambridge: MIT.
- Ladd, C. C.; Foot, R. (1974). *New Design Procedure for Stability of Soft Clays*. Journal of the Geotechnical Engineering Division (ASCE), 100(GT7), 763–786.
- Martins, I. S. M. (2023). *Role played by viscosity on the undrained behaviour of normally consolidated clays*. The 8th Victor de Mello Lecture. Soils & Rocks, 46(3), 1–65.
- Sheahan, T. C.; Ladd, C. C.; Germaine, J. T. (1996). *Rate-dependent Undrained Shear Behavior of Saturated Clay*. Journal of Geotechnical Engineering (ASCE), 122(2), 99–108.