



# Caracterização Geotécnica e Reológica do Solo Marinho em Região do Pré-sal com Foco em Fluxo de Detritos Submarinos

Marcelo Muta Hotta

Pesquisador de pós-doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, hottamar@gmail.com

Larissa Barbosa de Lima

Doutoranda, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, larissa.lima@coc.ufrj.br

Marcio de Souza Soares de Almeida

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

Ricardo Garske Borges

Pesquisador do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES) da Petróleo Brasileiro S.A. – Petrobras, garske@petrobras.com.br

**RESUMO:** Os fluxos de detritos submarinos são eventos que ocorrem com grande frequência em escala geológica e podem causar grandes danos a estruturas offshore. Compreender os mecanismos envolvidos no desenvolvimento de um fluxo de detritos requer não apenas conhecimento das propriedades geotécnicas, mas também das reológicas, uma vez que a incorporação de água durante o fluxo causa alterações na resistência ao cisalhamento do material. O objetivo desse trabalho é apresentar as propriedades geotécnicas e reológicas de amostras de solo marinho extraídas de áreas do pré-sal das Bacias de Campos e Santos. O estudo do solo foi realizado através de ensaios de caracterização geotécnica, determinação de Limites de Atterberg, Difração de Raios-x e MEV, além de ensaios reológicos do material para a compreensão do comportamento do solo em um fluxo de detritos. A pesquisa mostrou que o solo marinho possui propriedades distintas do solo formado predominantemente pelo intemperismo de rochas da crosta terrestre, sendo o processo de formação um elemento importante para o entendimento dessas diferenças.

**PALAVRAS-CHAVE:** Solo Marinho, Propriedades Geotécnicas, Propriedades Reológicas

**ABSTRACT:** Submarine debris flows are events that occur with great frequency on a geological scale and can cause major damage to offshore structures. Understanding the mechanisms involved in the development of a debris flow requires not only knowledge of geotechnical properties, but also rheological ones, since the incorporation of water during the flow causes changes in the shear strength of the material. The objective of this work is to present the geotechnical and rheological properties of marine soil samples extracted from pre-salt areas of the Campos and Santos Basins. The soil study was carried out through geotechnical characterization tests, determination of Atterberg Limits, XRD and SEM, as well as rheological tests of the material to understand the behavior of the soil in a debris flow. The research showed that the seabed has different properties from the soil formed predominantly by the weathering of rocks in the earth's crust, and the formation process is an important element for understanding these differences.

**KEYWORDS:** Marine Soil, Geotechnical Properties, Rheological Properties

## 1 INTRODUÇÃO

Após a deflagração do mecanismo de disparo, os movimentos de massa submarinos podem se desenvolver de diversas formas. Locat e Lee (2002) os classificaram em deslizamentos, tombamentos, subsidência/colapso, rolamentos e corridas de massa. Para os dois últimos, eles ainda mencionam a possibilidade de se desenvolverem como avalanches, fluxos de detritos, fluxos de lama e correntes de turbidez.

Nesse contexto, os fluxos de detritos submarinos representam um grandes riscos geológicos no fundo do mar e a quantificação dos riscos envolvidos é um elemento essencial nos projetos de engenharia offshore (Nian et al., 2018; Rui; Yin, 2019). Uma particularidade do estudo do comportamento do solo em fluxos de detritos submarinos está no fato de que os conceitos da mecânica dos solos clássica não são aplicados de forma

convencional (Tsugawa et al., 2019), uma vez que as propriedades do solo variam a cada instante, e para investigar esse comportamento de maneira aprofundada, é necessário levar em conta os efeitos hidrodinâmicos envolvidos. Assim, a compreensão completa desse fenômeno abrange aspectos tanto da mecânica dos solos quanto da mecânica dos fluidos (Hotta et al., 2024), que se complementam mutuamente.

Estudos reológicos envolvendo diferentes teores de umidade ou conteúdo areia / argila no solo são vistos na literatura (Liu et al., 2020a, 2020b; Messaoudi; Bouzit; Boualla, 2018; Nie et al., 2020; Shakeel et al., 2022), porém poucos estudos utilizam efetivamente solos marinhos para investigar o fenômeno de fluxo de detritos submarinos. Assim, a presente pesquisa tem por objetivo analisar o comportamento reológico e geotécnico do solo marinho superficial de duas bacias offshore localizadas na margem continental brasileira, ambas inseridas em áreas de exploração do pré-sal, com a finalidade de aprofundar a compreensão dos mecanismos associados aos fluxos de detritos submarinos.

## 2 FLUXOS DE DETRITOS SUBMARINOS

### 2.1 Relevo submarino

O entendimento das feições da morfologia submarina é parte integrante da avaliação de risco para projetos de petróleo e gás offshore, uma vez que permite evitar ou acomodar riscos geológicos ao longo da vida do projeto (Moore; Davis; Dabson, 2018). Nesse contexto, a margem continental brasileira tornou-se foco de estudos geológicos e geomorfológicos, sendo classificada como uma margem tectonicamente passiva do tipo Atlântica, estas apresentam três regiões principais: plataforma continental, talude continental e elevação continental (Baptista Neto *et al.*, 2004).

O limite externo da plataforma continental é caracterizado por uma mudança acentuada na declividade do relevo, marcando a transição para o talude continental. Nessa região, as profundidades aumentam rapidamente de aproximadamente 130 metros para valores entre 1500 e 3500 metros, acompanhadas por gradientes íngremes, com inclinações típicas de 1:40 (Baptista Neto *et al.*, 2004). Essa transição representa uma área de maior instabilidade do fundo marinho, onde são comuns movimentos de massa submarinos. Esses processos dinâmicos contribuem para a formação de cânions submarinos, ilustrados na Figura 1, que são vales profundos e relativamente estreitos, erodidos na porção externa da plataforma continental e no talude continental (Corrêa, 2021; Tarazona et al., 2020).

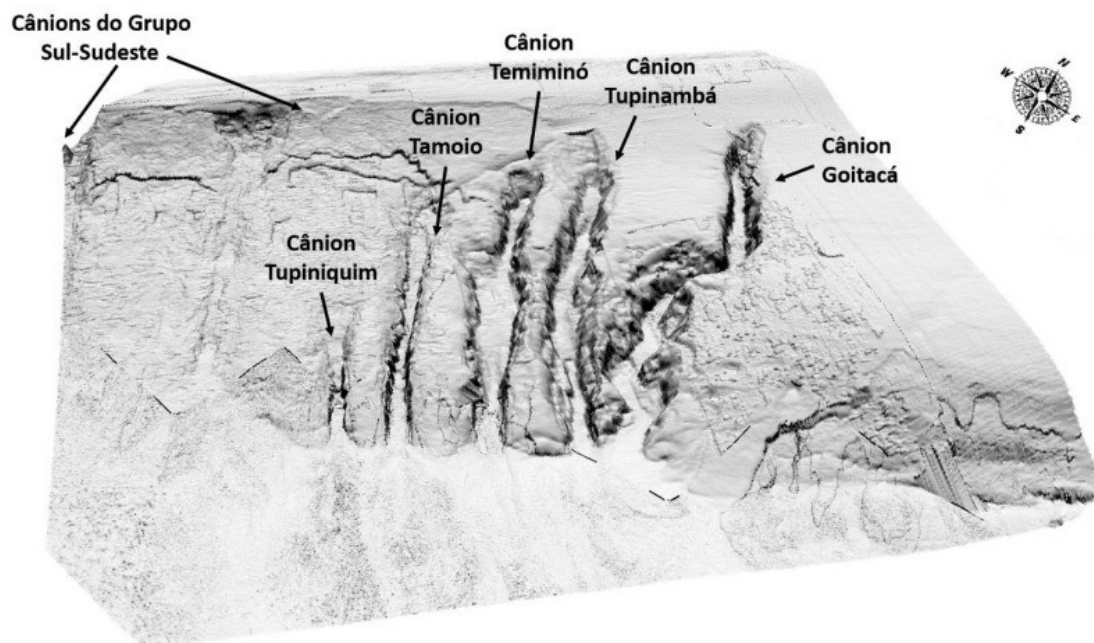


Figura 1. Modelo Digital de Terreno dos Cânions Submarinos na Região Sul-Sudeste da Margem Continental Brasileira. Fonte: Imagem cedida pela Petrobras.

## 2.2 Fases do fluxo e mecanismos de disparo

Neste estudo, o termo “fluxo” refere-se ao movimento de uma massa liquefeita de solo na superfície de um talude, como descreve Tsugawa et al. (2019). No contexto específico dos fluxos de detritos submarinos, Hotta et al. (2024) descrevem que esse fenômeno pode ser descrito em estágios. Inicialmente, ocorre a falha do talude oriunda de um mecanismo desencadeador. De acordo com (Locat; Lee, 2009), movimentos de massa submarinos podem ser deflagrados pelo aumento das tensões cisalhantes, pela redução da resistência ao cisalhamento do talude ou pela combinação de ambos, resultando na diminuição do fator de segurança e possível ruptura.

Diversos mecanismos podem desencadear movimentos de massa submarinos, conforme apontado pela literatura. Terremotos estão entre os principais gatilhos, pois as tensões de cisalhamento geradas podem induzir excesso de poro-pressão, reduzindo a tensão efetiva e levando à instabilidade (Kvalstad et al., 2005). O descongelamento de hidratos de gás, como o metano presente no permafrost, libera grandes volumes de gás, elevando as poro-pressões e diminuindo a resistência ao cisalhamento (Crutchley et al., 2016). Ondas também exercem influência, ao induzirem esforços nos sedimentos, especialmente ao longo de planos de cisalhamento em águas rasas e intermediárias (Locat; Lee, 2002).

O acúmulo rápido de sedimentos pode gerar sobrecarga e excesso de poro-pressão, especialmente em solos com baixo coeficiente de adensamento, favorecendo rupturas, sobretudo no topo dos taludes (Christian et al., 1994). Processos erosivos em canais e cânions submarinos reduzem o fator de segurança, contribuindo para instabilidades. A atividade vulcânica também pode gerar deslizamentos ao pressionar camadas de sedimentos finos saturados (*weak layers*), como observado em regiões como o Havaí (Dieterich, 1988).

Além disso, o diapirismo e outras deformações tectônicas que alteram a inclinação do leito marinho reduzem o fator de segurança e aumentam o risco de falhas (Locat; Lee, 2002). Por fim, atividades antrópicas, como construções costeiras e offshore, podem redistribuir tensões e induzir instabilidades. Um caso notório ocorreu em Nice, em 1979, quando o colapso de um aterro submarino causou um fluxo de detritos e um tsunami com ondas de até 3 metros (Dan; Sultan; Savoye, 2007).

Após a instabilidade inicial, ocorre a formação do fluxo, quando a massa de solo desliza pela encosta e se mistura com a água, promovendo a redução da resistência ao cisalhamento e a transição de um comportamento sólido para fluido não newtoniano. Em seguida, desenvolve-se o fluxo de detritos propriamente dito. O processo se encerra com a fase de deposição, na qual o fluxo perde energia devido ao atrito com o fundo marinho, resultando no acúmulo de grandes volumes de sedimentos.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de solo marinho estudadas são oriundas de duas plataformas continentais offshore brasileiras localizadas na Bacia de Campos (RJ) e Bacia de Santos (SP), com nomenclatura adotada e ensaios realizados descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Descrição das amostras e dos ensaios realizados.

Amostra	Origem	Ensaio realizado
A1	Bacia de Campos	• Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) associado ao de Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS) - Equipamento Hitachi TM 3000;
A2		
A3		
A4		
A5		
A6	Bacia de Santos	• Difração de raios X (DR-X) – Equipamento Bruker;
A7		
A8		
A9		
A10		
		• Granulometria - ABNT NBR 7181 (2018);
		• Limite de liquidez - ABNT NBR 6459 (2017);
		• Limite de plasticidade - ABNT NBR 7180 (2016);
		• Ensaios reológicos – Reômetro Brookfield

Os ensaios reológicos realizados contaram com duas etapas principais: 1) A preparação das amostras com umidades, majoritariamente, acima do limite de liquidez; 2) Obtenção das curvas de fluxo com o uso do reômetro na geometria de cilindros concêntricos. Ao todo, foram utilizados para a análise 30 ensaios, sendo 10 amostras e cada uma em 3 teores de umidade distintos. Posteriormente, utilizou-se o modelo Bilinear para a determinação do parâmetro reológico de tensão de escoamento.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 MEV, EDS e DRX

Os dados obtidos por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) revelaram que os solos estudados apresentam morfologia irregular e superfície rugosa. Acoplado a esse ensaio, foi realizada a análise de Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS), que indicou a predominância dos elementos químicos oxigênio (O), silício (Si), cálcio (Ca) e carbono (C) nas amostras provenientes de ambas as localidades. A Figura 2 apresenta os resultados obtidos para a amostra A4, escolhida de forma aleatória como representativa, com o objetivo de ilustrar as características morfológicas e a composição elementar observadas nas demais amostras analisadas.

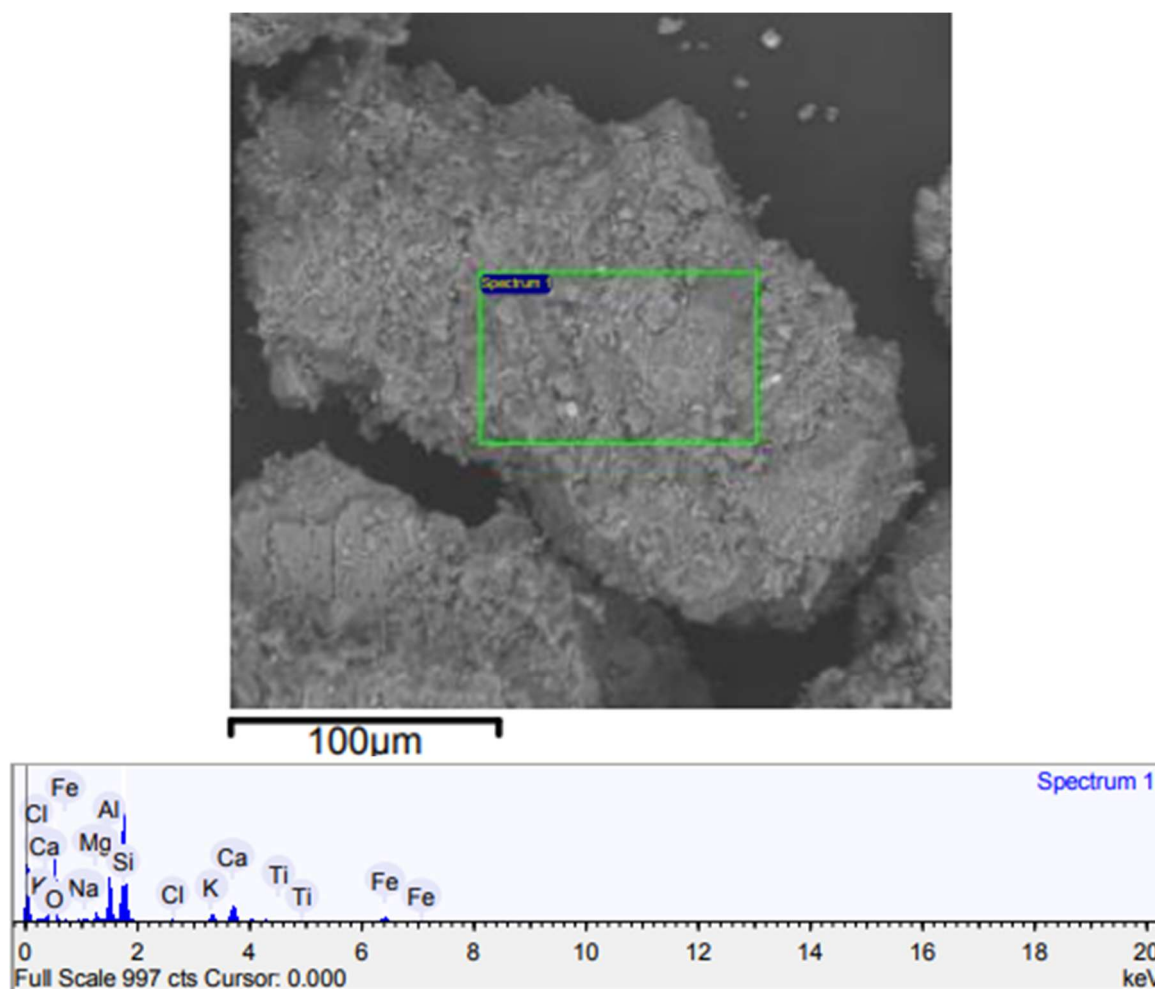


Figura 2. Resultado para a amostra A4 dos ensaios MEV e EDS.

Com base na identificação dos elementos químicos presentes em cada amostra, os dados foram empregados na interpretação do difratograma obtido por Difração de Raios X (DRX). Ressalta-se, nesse contexto, a presença predominante de três minerais: calcita, quartzo e halita. A presença da calcita pode ser justificada pelo processo de formação desses solos, que está diretamente relacionado aos processos





sedimentares marinhos e à dinâmica de compensação do carbonato (Hotta et al., 2025). A profundidade de compensação de carbonato (CCD) é a profundidade no oceano em que a taxa de dissolução do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) é igual à sua taxa de deposição (Millero, 2005).

Acima dessa profundidade, os carbonatos são preservados nos sedimentos; abaixo, eles se dissolvem mais rápido do que são depositados, o que impacta diretamente na composição dos solos (Morse; Mackenzie, 1990). A formação de solos carbonáceos na região de retirada das amostras ocorreu em ambientes que historicamente estiveram acima do CCD, favorecendo o acúmulo de minerais carbonáticos em depósitos sedimentares marinhos. A presença de quartzo é característica do ambiente marinho, assim como a halita, cuja ocorrência está provavelmente associada à salinidade da água do mar.

#### 4.1 Caracterização geotécnica

A sistematização dos resultados para as amostras ensaiadas é apresentada na Tabela 2. A análise desses dados revela que as amostras de solo marinho possuem granulometria semelhante, com predominância da fração fina. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), todas as amostras são classificadas como argilas inorgânicas de alta compressibilidade (CH).

Tabela 2. Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica.

Amostra	Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Gs	wL (%)	wP (%)	I <sub>p</sub> (%)
A1	55	41	4	2,70	70	26	44
A2	34	56	10	2,65	54	20	34
A3	30	53	17	2,65	69	25	44
A4	29	49	22	2,72	69	26	43
A5	40	55	5	2,71	57	31	26
A6	73	25	1	2,69	117	39	78
A7	71	27	1	2,68	90	36	54
A8	48	47	4	2,70	82	30	52
A9	64	36	0	2,67	114	28	86
A10	44	53	3	2,72	67	23	44

Gs - Densidade Real dos Grãos; wL - Limite de Liquidez; wP - Limite de Plasticidade; I<sub>p</sub> - Índice de Plasticidade; w - Teor de Umidade.

As amostras de solo marinho analisadas apresentam valores em concordância com os dados reportados na literatura para argilas marinhas (Randolph; Gourvenec, 2017). Adicionalmente, o índice de atividade das argilas, segundo o critério de Skempton (1953), indica que, em sua maioria, as amostras estudadas possuem comportamento entre normal e inativo.

#### 4.2 Caracterização reológica

As curvas de fluxo obtidas a partir do ensaio com o reômetro utilizando a geometria de cilindros concêntricos permite a obtenção de parâmetros reológicos, sendo a tensão de escoamento ( $\tau_0$ ) equivalente a resistência não drenada ( $S_u$ ) obtida pelo reômetro com a geometria de palheta (Lima et al., 2024a, 2024b). Assim, foram obtidos os resultados para cada uma das dez amostras (Tabela 3), sendo utilizado o modelo reológico Bilinear para a determinação do  $\tau_0$  e considerado o índice de liquidez ( $I_L$ ) para padronizar o tratamento dos dados em termos de índice de liquidez. Observou-se claramente que o aumento do índice de liquidez acarreta uma redução da tensão de escoamento em todas as amostras analisadas.



Tabela 3. Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica.

Amostra	$I_L$	$\tau_0$ (Pa)	Amostra	$I_L$	$\tau_0$ (Pa)
A1	1,00	994,04	A6	0,87	1261,60
	1,40	347,23		1,09	519,20
	1,97	177,02		1,30	324,30
A2	1,19	930,55	A7	1,15	686,90
	1,35	423,40		1,41	328,70
	1,98	164,44		1,71	108,40
A3	1,26	332,70	A8	1,29	923,40
	1,43	200,00		1,58	358,30
	1,96	75,20		1,97	178,60
A4	1,06	1171,30	A9	0,78	1486,20
	1,45	442,69		1,09	503,30
	1,95	229,61		1,24	226,10
A5	1,06	614,72	A10	1,74	221,20
	1,45	242,25		2,15	107,20
	1,95	93,38		2,50	37,60

$I_L$  – Índice de Liquidez;  $\tau_0$  – Tensão de escoamento.

A análise dos dados experimentais permitiu traçar curvas de correlação entre o índice de liquidez ( $I_L$ ) e a tensão de escoamento para o solo de cada bacia estudada, Figura 3, evidenciando em ambos os casos, uma tendência de decréscimo exponencial da resistência do solo com o aumento do teor de água. A compreensão desta relação é essencial para o desenvolvimento de modelos preditivos mais robustos, com aplicação direta em projetos de engenharia offshore.

Um aspecto que merece destaque é a análise do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que, embora amplamente utilizado para avaliar a qualidade do ajuste, não reflete de forma plenamente adequada o comportamento observado neste estudo. Verifica-se que, à medida que o  $I_L$  aumenta, o modelo ajustado descreve com maior consistência os dados experimentais.

Essa variação na qualidade do ajuste, indicativa de heterocedasticidade, está associada à transição do comportamento do solo: para valores de  $I_L$  próximos a 1, o solo ainda exibe características intermediárias entre os estados sólido e fluido; entretanto, com o aumento do  $I_L$ , o material passa a se comportar predominantemente como um fluido não newtoniano, com propriedades mais homogêneas do ponto de vista reológico. Essa transição de comportamento justifica a melhora na correlação nos intervalos de maior liquidez, indicando que a modelagem se torna mais representativa à medida que o solo atinge condições de fluidez mais pronunciadas.

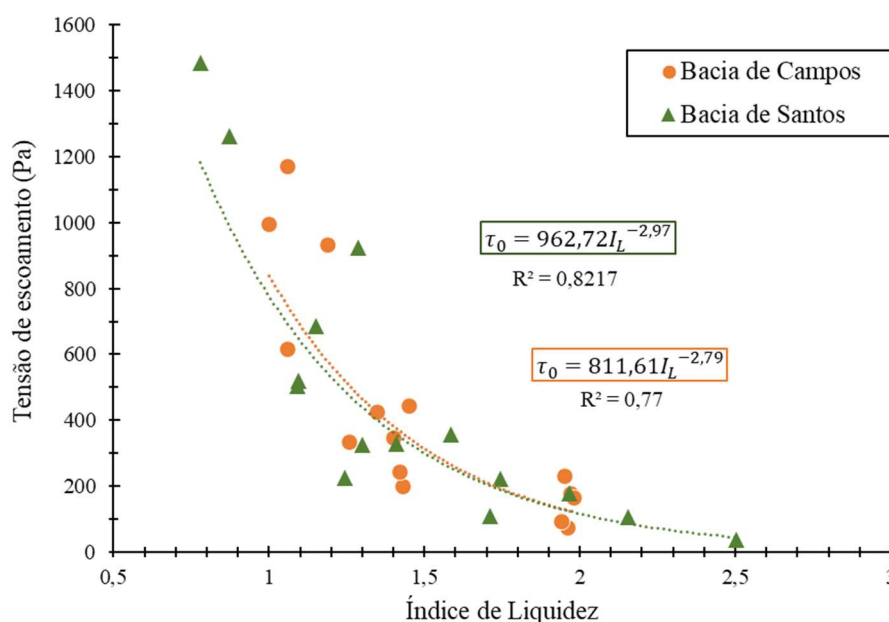


Figura 3. Curva de correlação da tensão de escoamento com o índice de liquidez para os solos estudados.

## 5 CONCLUSÕES

A presente pesquisa contribui para a caracterização geotécnica, mineralógica e reológica de solos marinhos superficiais de duas bacias offshore brasileiras. As análises mineralógicas indicaram a predominância de calcita, quartzo e halita, refletindo a deposição em ambientes marinhos acima da profundidade de compensação do carbonato (CCD). Do ponto de vista geotécnico, todas as amostras foram classificadas como argilas inorgânicas de alta plasticidade (CH), com predominância de frações finas e índices de atividade entre normal e inativo.

Os ensaios reológicos demonstraram uma clara correlação entre o aumento do índice de liquidez e a redução da tensão de escoamento, evidenciando o comportamento transicional dos solos ao longo do fluxo. Nesse contexto, os resultados obtidos oferecem subsídios importantes para a avaliação de *geohazards* em ambientes offshore, especialmente na gestão de riscos associados à exploração de petróleo e gás em regiões do pré-sal.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as seguintes instituições: Laboratório Multiusuário em Modelagem Centrífuga (LM2C), por todo o apoio em termos de estrutura e equipe de profissionais; Petrobras, pelo fornecimento das amostras e financiamento da pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). 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 (2018). NBR 7181. *Solo - Análise granulométrica*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- Baptista Neto, J. A., Ponzi, V. R. A., Sichel, S. E. (2004) *Introdução à Geologia Marinha*, 1<sup>st</sup> ed., Editora Interciência, Rio de Janeiro, BRA, 279 p.
- Corrêa, I. C. S. (2021) *Morfologia do Ambiente Marinho*. E-book. Porto Alegre: CECO/PGGM/IGEO/UFRGS.
- Crutchley, G. J. *et al.* (2016) Submarine Slope Instabilities Coincident with Shallow Gas Hydrate Systems: Insights from New Zealand Examples. *Submarine Mass Movements and their Consequences*. v. 41 p. 401–409.
- Dan, G., Sultan, N., Savoye, B. (2007) The 1979 Nice harbour catastrophe revisited: Trigger mechanism inferred from geotechnical measurements and numerical modelling. *Marine Geology*, v. 245, n. 1–4, p. 40–64.
- Dieterich, J. H. (1988) Growth and persistence of Hawaiian volcanic rift zones. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 93, n. B5, p. 4258–4270.
- Hotta, M. M. *et al.* (2024) Study of the influence of rheological parameters on the behavior of a submarine debris flow. *Soils and Rocks*, v. 47, n. 4, p. e2024001524.
- Hotta, M. M. *et al.* (2025) Study of the geotechnical and rheological properties of carbonaceous soils of the Brazilian pre-salt layer and its impact on submarine debris flows. *Anais... International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics*.



- Kvalstad, T. J. *et al.* (2005) The Storegga slide: evaluation of triggering sources and slide mechanics. *Marine and Petroleum Geology*, v. 22, n. 1–2, p. 245–256.
- Lima, L. B. *et al.* (2024a) Estudo comparativo entre ensaios de palheta e cilindros concêntricos com amostras de argila marinha utilizando o reômetro de bancada. *Anais... Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*. p. 8.
- Lima, L. B. *et al.* (2024b) The importance of marine clay rheological parameters for understanding the behavior of submarine debris flows. In: ROG.E CONFERENCE. *Anais....* Disponível em: <<https://biblioteca.ibp.org.br/pt-BR/search/49811>>. Acesso em: 20 jun. 2025
- Liu, D. *et al.* (2020a) Investigating the effects of clay/sand content on depositional mechanisms of submarine debris flows through physical and numerical modeling. *Landslides*, v. 17, n. 8, p. 1863–1880.
- Liu, F. *et al.* (2020b) Spatiotemporal destabilization modes of upper continental slopes undergoing hydrate dissociation. *Engineering Geology*, v. 264, p. 105286.
- Locat, J., Lee, H. (2009) Submarine Mass Movements and Their Consequences: An Overview. In: SASSA, Kyoji; CANUTI, Paolo (Orgs.). *Landslides – Disaster Risk Reduction*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. p. 115–142.
- Locat, J., Lee, H. J. (2002) Submarine landslides: advances and challenges. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 39, n. 1, p. 193–212, 1 fev.
- Messaoudi, A., Bouzit, M., Boualla, N. (2018) Physical and rheological properties of the Chorfa dam mud: dependency on solids concentration. *Applied Water Science*, v. 8, n. 6, p. 178.
- Millero, Frank J. (2005) *Chemical Oceanography*. 3. ed. CRC Press, 2005.
- Moore, R., Davis, G., Dabson, O. (2018) Applied Geomorphology and Geohazard Assessment for Deepwater Development. *Submarine Geomorphology*. Springer Geology. Cham: Springer International Publishing. p. 459–479.
- Morse, J. W., Mackenzie, F. T. (1990) Chapter 4 The Oceanic Carbonate System and Calcium Carbonate Accumulation in Deep Sea Sediments. In: *Developments in Sedimentology*: Elsevier., v. 48 p. 133–177.
- Nian, T. *et al.* (2018) Impact forces of submarine landslides on suspended pipelines considering the low-temperature environment. *Applied Ocean Research*, v. 81, p. 116–125.
- Nie, S. *et al.* (2020) Investigation on solid-liquid transition of soft mud under steady and oscillatory shear loads. *Sedimentary Geology*, v. 397, p. 105570.
- Randolph, M., Gourvenec, S. (2017) *Offshore Geotechnical Engineering*. 1. ed.: CRC Press.
- Rui, Y., YIN, M. (2019) An Analytical Solution for the Run-Out of Submarine Debris Flows. *Marine Geodesy*, v. 42, n. 3, p. 246–262.
- Shakeel, A. *et al.* (2022) Effect of organic matter degradation in cohesive sediment: a detailed rheological analysis. *Journal of Soils and Sediments*, v. 22, n. 11, p. 2883–2892.
- Tarazona, S. F. M. *et al.* (2020) Evaluation of seismic site response of submarine clay canyons using centrifuge modelling. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, v. 20, n. 4, p. 224–238.
- Tsugawa, J. K. *et al.* (2019) Review: Rheology concepts applied to geotechnical engineering. *Applied Rheology*, v. 29, n. 1, p. 202–221.