

Estudo comparativo entre ensaios de palheta e cilindros concêntricos com amostras de argila marinha utilizando o reômetro de bancada

Larissa Barbosa de Lima

Mestranda do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE/UFRJ), Laboratório de Geotecnia (LabGeo), Rio de Janeiro, Brasil, larissa.lima@coc.ufrj.br

Marcelo Mutta Hotta

Doutor pesquisador do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE/UFRJ), Laboratório de Geotecnia (LabGeo), Rio de Janeiro, Brasil, hottamar@gmail.com

Lucas Chinem Takayassu

Doutorando do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE/UFRJ), Laboratório de Geotecnia (LabGeo), Rio de Janeiro, Brasil, lucas.takayassu@coc.ufrj.br

Priscilla Velloso de Albuquerque Nunes

Engenheira pesquisadora do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE/UFRJ), Laboratório de Geotecnia (LabGeo), Rio de Janeiro, Brasil, priscilla.nunes@coc.ufrj.br

Márcio de Souza Soares de Almeida

Professor Titular do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE/UFRJ), Laboratório de Geotecnia (LabGeo), 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: A presente pesquisa apresenta discussões acerca do comportamento reológico da argila marinha da Bacia de Campos (RJ) a partir de ensaios com reômetro de bancada utilizando geometria de palheta e cilindros concêntricos, sendo ensaiadas amostras com Índice de Liquidez variando entre 1,1 e 2,0. Objetivou-se comparar resultados obtidos a partir dos diferentes métodos descritos e discutir sobre eles utilizando conceitos de reologia e de mecânica dos solos. O principal aspecto analisado foi a existência de uma correlação entre o parâmetro reológico de tensão de escoamento, utilizando o modelo de Bingham, e do parâmetro geotécnico de resistência não drenada. Dessa forma, foi possível verificar que há um significado físico para a tensão de escoamento do modelo de Bingham e utilizar conceitos da mecânica dos solos para discutir sobre os resultados reológicos.

PALAVRAS-CHAVE: Reologia, Resistência não drenada, Argila marinha, Ensaios de laboratório.

ABSTRACT: This research presents discussions about the rheological behavior of marine clay from the Campos Basin (RJ), based on bench rheometer tests using vane geometry and concentric cylinders, testing samples with a Liquidity Index varying between 1.1 and 2.0. The aim was to compare the results obtained from the different methods described and to discuss them using concepts from rheology and soil mechanics. The main aspect analyzed was the existence of a correlation between the rheological parameter of flow stress, using the Bingham model, and the geotechnical parameter of undrained strength. In this way, it was possible to verify that there is a physical meaning to the flow stress of the Bingham model and to use soil mechanics concepts to discuss the rheological results.

KEYWORDS: Rheology, Undrained strength, Marine clay, Laboratory tests.

1 INTRODUÇÃO

O termo reologia foi apresentado em 1929 pelo professor Eugene Bingham que definiu como sendo o estudo da deformação e fluxo da matéria, conceito que deu origem ao entendimento de diversos fenômenos em várias áreas do conhecimento. Nesse contexto, a curva de fluxo reológica trata-se da relação entre tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento e permite a compreensão do comportamento do material e determinação de propriedades reológicas.

Ao longo da história da geotecnia, nota-se a importância dos conceitos de reologia para a concepção de dispositivos de campo e de laboratório. Um exemplo é o ensaio de limite de liquidez definido por Atterberg e padronizado por Casagrande, descrito na NBR 6459 (ABNT, 2016), uma vez que no teste a concha cai a uma altura constante de 10 mm e a uma razão constante de duas voltas por segundo, de maneira que as metades do solo divididas por um cinzel possam fluir a constante tensão de cisalhamento (altura) e taxa de cisalhamento (razão de queda). Quando o teor de água é alto, o solo se comporta como líquido em virtude do enfraquecimento da interação entre partículas.

O resultado do ensaio é gerado em termos de teor de umidade versus número de golpes (em escala logarítmica). O limite de liquidez refere-se então ao teor de umidade relativo a 25 golpes, que é equivalente à resistência não drenada na faixa de 1,7 a 2,0 kPa, conforme apresentam Mitchell e Soga (1993) com base em diversos estudos. Dessa forma, o limite de liquidez trata-se de uma fronteira entre os estados líquido e plástico de consistência e o seu resultado apresenta o comportamento do fluxo do solo em função do teor de umidade sob tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento constantes, tratando-se de uma curva de fluxo geotécnica (Tsugawa *et al.*, 2019).

Ensaio de palheta de campo e de laboratório também fazem uso de conceitos da reologia em seus dispositivos e metodologias, estes ensaios são normatizados pela NBR 10905 (ABNT, 1989) e D4648/4648M (ASTM, 2024), consistindo na inserção vertical de uma palheta cruciforme a partir de uma velocidade de rotação constante enquanto o torque é medido regularmente. A análise do ensaio em questão, sob o ponto de vista da reologia, resulta em um único ponto na curva reológica, uma vez que todo o ensaio ocorre com taxa de cisalhamento constante e é obtido um valor de tensão de cisalhamento.

Nesse contexto, um ensaio largamente utilizado na reologia é o de cilindros concêntricos, que visa a obtenção de curvas de fluxo e análises a partir de modelos reológicos, tendo a correlação direta entre parâmetros reológicos e geotécnicos como um grande desafio pouco explorado na literatura. Dessa forma, visando preencher essa lacuna, a presente pesquisa objetivou a determinação de parâmetros reológicos a partir do modelo de Bingham e estabelecer uma correlação com o parâmetro geotécnico de resistência não drenada do solo. Cabe destacar que o trabalho em questão é um recorte de um estudo mais abrangente que visa o entendimento da reologia no contexto de fluxo de detritos submarinos.

2 METODOLOGIA

As análises foram realizadas utilizando cinco amostras de argila marinha provenientes da Bacia de Campos (RJ). Inicialmente, procederam-se com ensaios de caracterização (ABNT NBR 6457:2016; ABNT NBR 7181:2016) e de limites de Atterberg (ABNT NBR 6459:2017; ABNT NBR 7180:2017). Em seguida, as amostras foram preparadas para os ensaios reológicos, o que consistiu na: retirada do solo dos amostradores; pesagem das amostras; adição de água destilada para alcançar as umidades de ensaio – escolhidas a partir da determinação do Índice de Liquidez (I_L) desejado; homogeneização fazendo uso de misturador mecânico.

Posteriormente, foi utilizado o reômetro RST-CC-SST, fabricado pela *Brookfield Viscometers e Rheometers*, para os ensaios de cilindros concêntricos e de palheta, conforme a montagem consta na Figura 1, ambos realizados com a configuração para controle da taxa de cisalhamento.

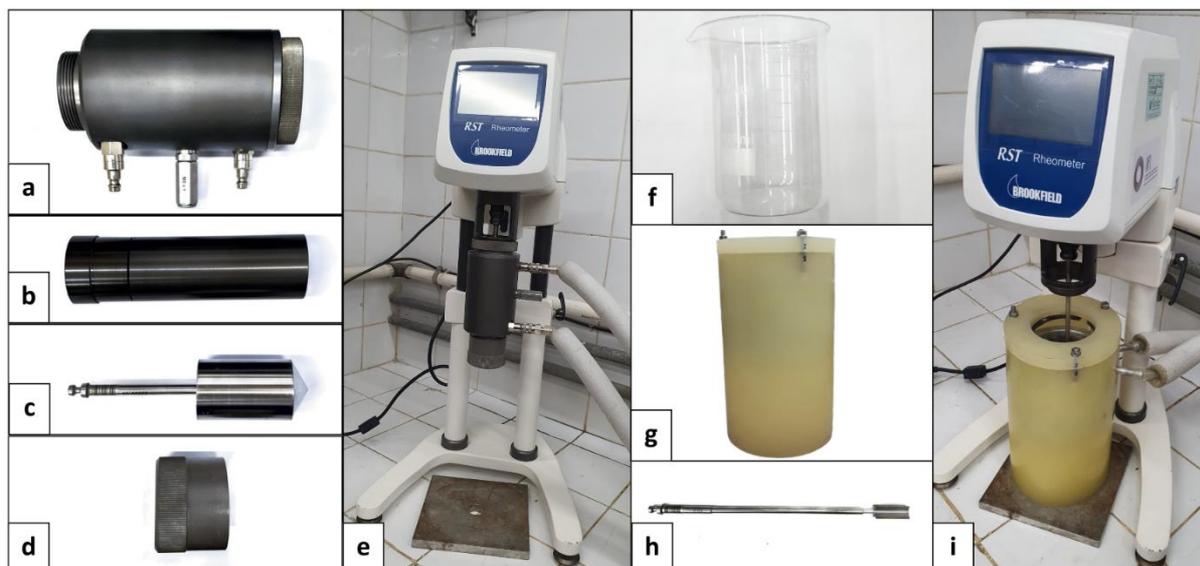


Figura 1. (a) jaqueta térmica; (b) cilindro externo; (c) cilindro interno; (d) tampa da jaqueta térmica; (e) equipamento preparado para o ensaio de cilindros concêntricos; (f) béquer; (g) cápsula térmica; (h) palheta; (i) equipamento preparado para o ensaio de palheta.

O reômetro em questão pode ser utilizado para obtenção de resultados com alta precisão em diferentes faixas de tensões, alterando apenas os tamanhos das geometrias a serem utilizadas. Posto isso, nos ensaios realizados fazendo uso do sistema de cilindros concêntricos foram utilizadas as geometrias para os cilindros internos CCT-25 (25mm de diâmetro) e CCT-40 (40 mm de diâmetro) e os ensaios de palheta foram realizados com as geometrias VT 30-15 (30 mm de altura e diâmetro de 15 mm) e VT 60-30 (60 mm de altura e diâmetro de 30 mm).

A configuração quanto ao controle da taxa de cisalhamento se dá de maneira diferente nos dois ensaios realizados. Visando a obtenção das curvas de fluxo, que é resultado do ensaio de cilindros concêntricos, foi aplicada uma taxa de cisalhamento com aumento linear de 0s^{-1} a 100s^{-1} e monitoramento da tensão de cisalhamento. A escolha da faixa de valores para a taxa de cisalhamento foi embasada em estudos relacionados a fluxos de detritos submarinos (Du *et al.*, 2022; Guo *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2020; Shakeel *et al.*, 2022). O que também justifica a escolha de valores de L_c acima de 1,0 para as amostras ensaiadas.

Os ensaios de palheta foram realizados a uma taxa de cisalhamento constante de $0,1\text{s}^{-1}$, com o objetivo de evitar a mobilização da parcela viscosa e obter a resistência não drenada do solo, que corresponde a tensão de cisalhamento máxima. O ensaio realizado sob as condições descritas, considerando o uso de um béquer com 86 mm de diâmetro e a palheta 15mm de diâmetro, apresenta velocidade linear de $3,61 \times 10^{-5}\text{ m/s}$. Por sua vez o ensaio de palheta de campo, padronizado pela NBR 10905 (ABNT, 1989) para a palheta de 65mm de diâmetro a velocidade linear é de $5,67 \times 10^{-5}\text{ m/s}$.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaios de caracterização

Os resultados obtidos dos ensaios de caracterização constam na Tabela 1. Observa-se que as amostras possuem composição granulométrica semelhante, com predominância da fração fina. A partir do Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) tratam-se de argilas de alta compressibilidade (CH). Todas as amostras possuem limite de liquidez superior a 54% e índice de plasticidade entre 26 e 44%, valores que convergem com os presentes na literatura para argilas marinhas (Randolph; Gourvenec, 2017). Além disso, apresentam índice de atividade das argilas segundo o critério de Skempton (1953), em sua maioria entre normal e inativa.

Tabela 1. Resultado dos ensaios de caracterização.

Nomenclatura adotada	Prof. (m)	Composição granulométrica (%)			G_s	w_L (%)	w_P (%)	I_P (%)	w (%)
		Argila	Silte	Areia fina					
Amostra 01	49	55	41	4	2,70	70	26	44	42,3
Amostra 02	22	34	56	10	2,65	54	20	34	35,8
Amostra 03	27	30	53	17	2,65	69	25	44	33,9
Amostra 04	39	29	49	22	2,72	69	26	43	46,4
Amostra 05	33	40	55	5	2,71	57	31	26	35,9

3.2 Ensaios reológicos

3.2.1 Palheta

Uma curva típica para o teste de palheta – torque versus rotação - é apresentada na Figura 2 para as amostras ensaiadas. Os resultados demonstram um aumento no torque até o valor de pico (M_o) seguido por um declínio gradual até atingir resistência residual.

Os ensaios reológicos com geometria de palheta permitem a determinação da tensão de escoamento a partir de uma formulação clássica apresentada por Steffe (1996), mostrada na Equação 1. Segundo o autor, sendo aceitável que o valor da constante m seja igual a zero, uma vez que o erro associado é pequeno.

Além disso, cabe destacar que altura/diâmetro (h/d) é igual a 2 em todas as geometrias do ensaio de palheta no reômetro, possibilitando essa simplificação. Ademais, considerando a hipótese de que os valores de resistência não drenada (S_u) são iguais ao longo dos planos verticais e horizontais (Almeida; Marques, 2010), tem-se que Tensão de cisalhamento de pico (σ_o) = Resistência não drenada (S_u). Assim, é possível encontrar a Equação 2.

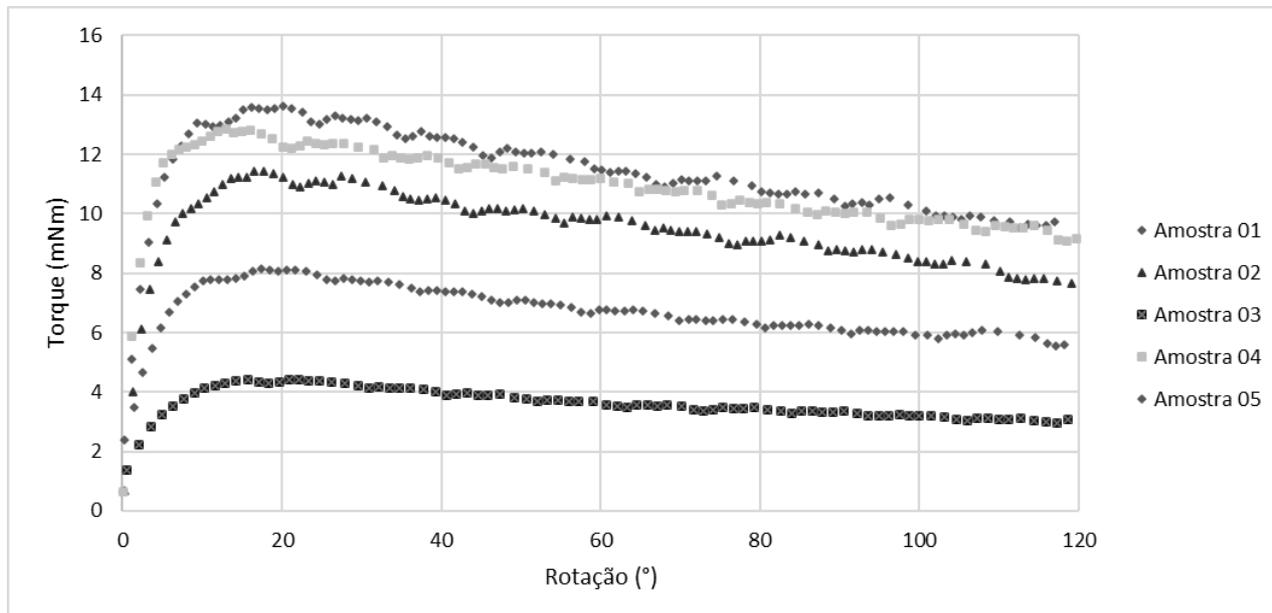


Figura 2. Torque versus tempo obtido no ensaio de palheta para as amostras com $I_L = 1,1$.

$$\sigma_o = \frac{2M_o}{\pi d^3} \left(\frac{h}{d} + \frac{1}{m+3} \right)^{-1} \quad (1)$$

$$S_u = 0,86 \frac{M_o}{\pi d^3} \quad (2)$$

Outro resultado que pode ser obtido no ensaio de palheta utilizando o reômetro é o gráfico correlacionando tensão de cisalhamento e tempo, cujo aspecto é semelhante ao gráfico anterior. No entanto, este resultado fornece de forma direta a resistência não drenada do solo, valor de pico, o que se apresenta como uma vantagem em virtude da facilidade de obtenção. Ao realizar um comparativo entre os valores calculados a partir da formulação exposta anteriormente e os valores de pico, obtidos de tensão de cisalhamento, são encontrados praticamente os mesmos valores, variando na ordem de 0,0002 Pa.

3.2.2 Cilindros concêntricos

A Figura 3 apresenta as curvas de fluxo obtidas a partir dos ensaios de rampa realizados com o sistema de cilindros concêntricos. Ao analisá-las, é possível notar explicitamente a influência da taxa de deformação na resistência ao cisalhamento do solo estudado e discernir sobre a manifestação das duas componentes referentes a resistência ao cisalhamento do solo (de atrito e viscosa), amplamente discutidas por Martins (2023).

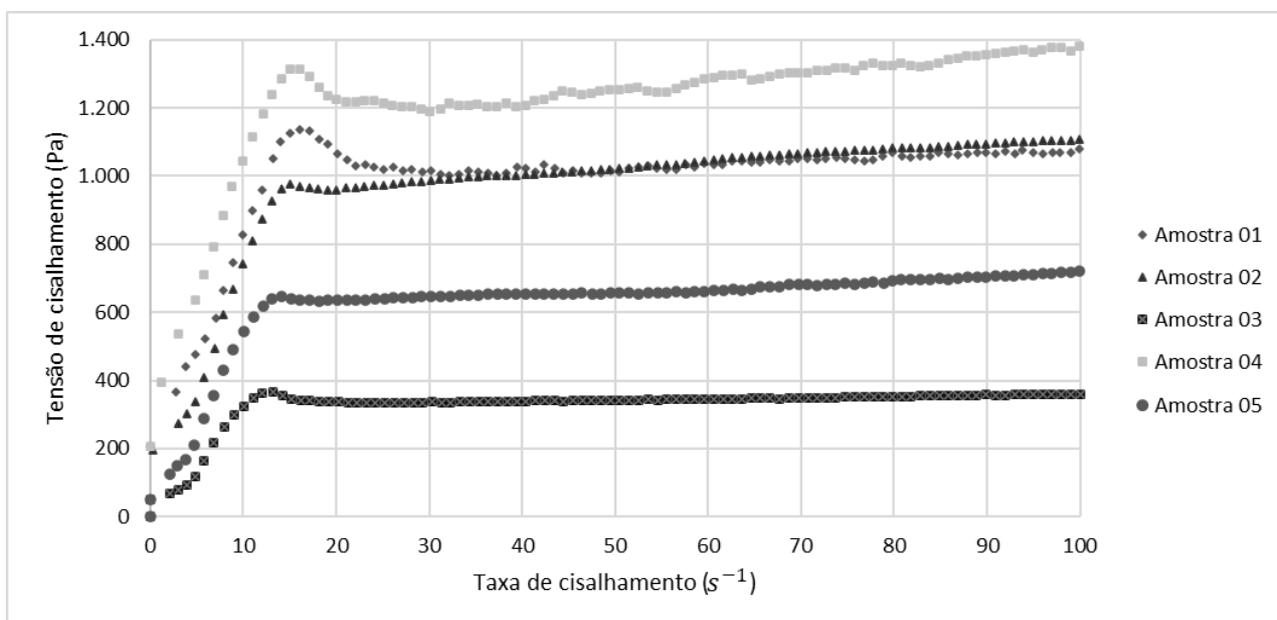


Figura 3. Tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento obtido no ensaio de cilindros concêntricos para as amostras com $I_L = 1,1$.

Os resultados encontrados são semelhantes aos obtidos por Hotta (2019) ao analisar a argila marinha da Bacia de Santos (SP). É notório em todas as amostras ensaiadas que a tensão de cisalhamento aumenta até atingir um valor máximo, correspondente a uma taxa de cisalhamento crítica. Embasado no modelo reológico de Bingham é possível analisar quantitativamente os resultados, sendo os principais parâmetros: tensão de escoamento de Bingham ($\tau_{0,B}$); viscosidade (μ); tensão de escoamento crítica (τ_c); e taxa de cisalhamento crítica ($\dot{\gamma}$). Conforme apresentado na Figura 4 e descrito pela Equação 3.

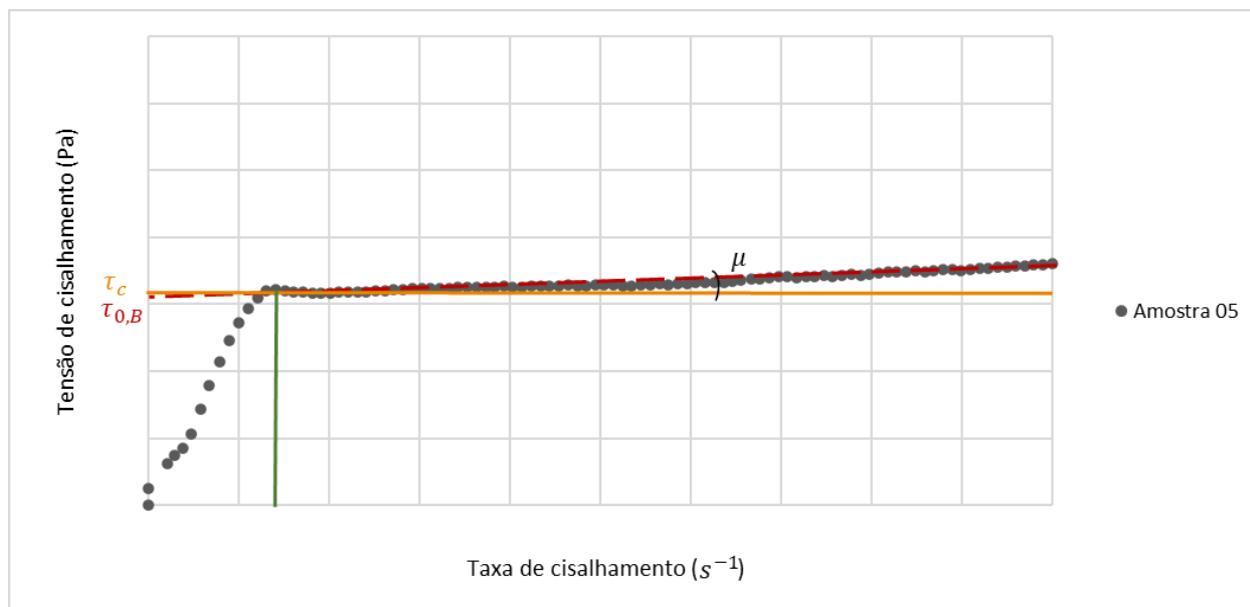


Figura 4. Representação gráfica do modelo de Bingham a partir do resultado obtido no ensaio de cilindros concêntricos para a Amostra M5, com $I_L = 1,1$.

$$\tau = \tau_{0,B} + \mu \dot{\gamma} \quad (3)$$

No início do ensaio, a resistência ao cisalhamento aumenta de maneira linear com a taxa de cisalhamento e o material apresenta apenas deformações elásticas. O trecho em questão não é visto de forma pronunciada na curva de fluxo, por se tratar de um intervalo muito pequeno que ocorre a taxas de cisalhamento baixíssimas (próximo a 0). Posteriormente, com o aumento da taxa de cisalhamento passam a ser manifestadas deformações plásticas, sendo estas observadas.

A mobilização da parcela referente ao atrito comanda a resistência ao cisalhamento do solo ao longo desse intervalo e o valor de pico demonstra a ruptura do solo (ou início do fluxo). Cabe destacar que os ensaios da presente pesquisa equivalem ao estudo do solo em aceleração e uma das consequências disso é a verificação de efeitos inerciais, que tomam o pico mais pronunciado como é visto nas curvas de fluxo. No comportamento pós-pico, nota-se a componente de atrito se torna constante e a parcela viscosa permanece sendo mobilizada, tornando possível separar as duas parcelas referentes a resistência ao cisalhamento do solo.

Ademais, é interessante enfatizar que o conceito de tensão de escoamento da mecânica dos solos é diferente do que equivale a tensão de escoamento do modelo de Bingham. Conforme já descrito, na curva de fluxo mostrada não é possível verificar a tensão de escoamento que se refere ao ponto a partir do qual aparecem deformações plásticas. Em contrapartida, é visível o ponto que está relacionado com a mudança de comportamento de um sólido rígido para um fluido viscoso, tratando-se da definição de tensão de escoamento do modelo de Bingham.

3.2.3 Comparativo entre ensaios

Para cada I_L , variando entre 1,1 e 2,0, foram realizados um ensaio de palheta e um ensaio de cilindros concêntricos, totalizando 26 ensaios com 13 umidades diferentes. A comparação dos valores obtidos para a resistência não-drenada (palheta) versus a tensão de escoamento de Bingham (cilindros concêntricos) está apresentada na Figura 5. A apresentação desses dados tem a finalidade de discutir a semelhança entre os valores obtidos através das curvas de fluxo para $\tau_{0,B}$ e o S_u do ensaio de palheta, mesmo tratando-se de ensaios com metodologias e condições de contorno distintas.

A equação de correlação entre o $\tau_{0,B}$ e o S_u possui um coeficiente angular de 1,0251 (ângulo de 45,71°) e um coeficiente linear de 31,356 Pa para um R^2 de 0,9808, indicando a equivalência entre esses valores para um mesmo I_L . A diferença entre as tensões medidas em média é de apenas 31,35 Pa, o que pode ser explicado devido a resistência não drenada do ensaio de palheta ser obtida com a taxa de cisalhamento diferente de zero e a tensão de escoamento do ensaio de cilindros concêntricos é obtida com a extrapolação da reta da curva de

fluxo até o eixo vertical (taxa de cisalhamento zero). Dessa forma, o ensaio de cilindros concêntricos pode ser utilizado para a obtenção da resistência não drenada desses materiais e a grande vantagem disso está na possibilidade do parâmetro ser obtido com acurácia para diferentes faixas de velocidade de cisalhamento.

Além disso, é possível observar que as tensões representadas na curva de fluxo, obtidas no ensaio de cilindros concêntricos, possuem significado físico mensurável a partir da mecânica dos solos, e que o comportamento do solo pós-ruptura é comandado pela mobilização da parcela viscosa citada e explicada por Martins (2023).

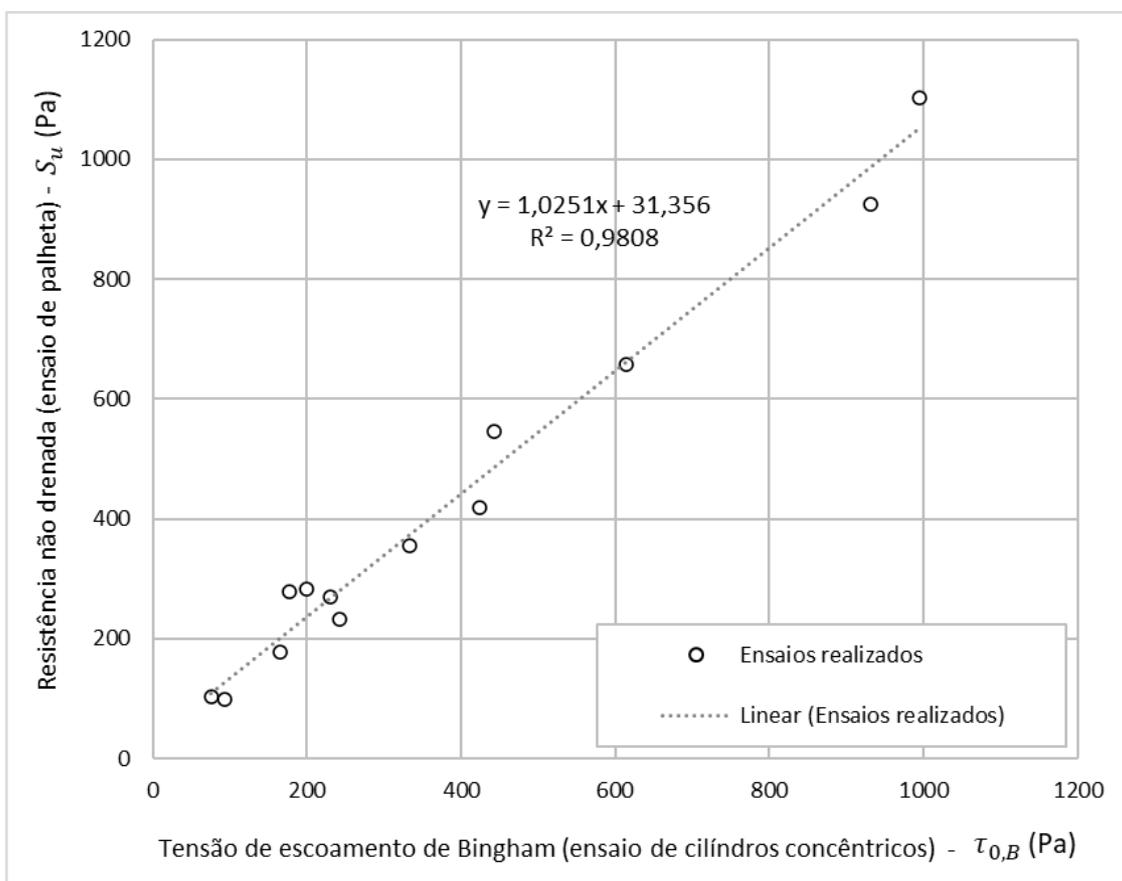


Figura 5. Comparativo entre os resultados dos ensaios de palheta e cilindros concêntricos.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente estudo permitiram avaliar o comportamento reológico de amostras de argila marinha a partir de ensaios de palheta e cilindros concêntricos utilizando reômetro de bancada. Ao observar o comportamento do solo em termos de torque versus rotação no ensaio de palheta, foi visto que o cálculo da resistência não drenada a partir do torque máximo, utilizando a formulação clássica, atingiu aproximadamente os mesmos valores dos resultados experimentais, obtidos em termos de tensão de cisalhamento versus tempo.

As curvas de fluxo obtidas nos ensaios com o sistema de cilindros concêntricos permitiram a observação da existência de dois comportamentos do solo: inicial e posterior a ruptura. De maneira que as componentes de atrito e viscosa que compõem a resistência ao cisalhamento do solo foram detalhadas para cada estágio, podendo ser estudadas quantitativamente a partir do modelo reológico de Bingham.

Posteriormente, foram apresentados resultados que demonstram a equivalência existente entre a tensão de escoamento de Bingham e a resistência não drenada do ensaio de palheta. Quando correlacionados, a reta possui inclinação próxima de 45° e um *offset* aproximado de 31 Pa. Dessa forma, correlacionando os parâmetros reológicos de Bingham com a resistência ao cisalhamento da mecânica dos solos.

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; Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) pelo incentivo e colaboração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024). NBR 6457. *Solo – Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). NBR 7181. *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). NBR 6459. *Solo – Determinação do limite de liquidez*. 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 (1989). NBR 10905. *Solo – Ensaio de palheta in situ*. Rio de Janeiro.
- ASTM International (2024). ASTM D2166: *Standard test methods for laboratory miniature vane shear test for saturated fine – grained soil*.
- ALMEIDA, M. S. S.; MARQUES, M. E. S. (2010) *Aterros sobre solos moles: projeto e desempenho*, 2nd ed., Oficina de Textos, São Paulo, BRA, 256 p.
- DU, J. et al. (2022) Mechanisms of submarine debris flow growth. *Journal of geophysical research. Earth surface*, v. 127, n. 3.
- GUO, X.-S. et al. (2021) Evaluation methodology of laminar-turbulent flow state for fluidized material with special reference to submarine landslide. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, v. 147, n. 1.
- HOTTA, M. M. (2019) *Estudos de fluxo de detritos submarinos através de métodos experimentais, analíticos e numéricos*. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- LIU, D. et al. (2020) 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.
- MARTINS, I. (2023) The 8th Victor de Mello lecture: role played by viscosity on the undrained behaviour of normally consolidated clays. *Soils and Rocks*, v. 46, n. 3, p. e2023006123, 2023.
- MITCHELL, J. K.; SOGA, K. (2005) *Fundamentals of soil behavior*. 3. ed. Nashville, TN, USA: John Wiley & Sons.
- RANDOLPH, M.; GOURVENEC, S. (2017) *Offshore Geotechnical Engineering*. Londres, England: CRC Press.
- 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.
- SKEMPTON, A.W. (1953) *The colloidal “Activity” of clays*. In: *international conference on soil mechanics and foundation engineering*, 3., Zurich, 1953. Proceeding. Zurich. p.57-61.
- STEFFE, J. F. (1996) *Rheological methods in food process engineering*. 2807 Still Valley Dr. East Lansing, MI 48823: Freeman Press.
- TSUGAWA, J. K. et al. (2019) Review: Rheology concepts applied to geotechnical engineering. *Applied rheology* (Lappersdorf, Germany: Online), v. 29, n. 1, p. 202–221.