

TIXOTROPIA: VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NÃO DRENADA DE UM SOLO ARTIFICIAL

Fecha de envío: 03/06/2024

Fecha de aceptación: 01/07/2024

Karina Retzlaff Camargo

Universidade Federal do Rio Grande,
Escola de Engenharia
Rio Grande – RS
<https://orcid.org/0000-0002-6427-329X>

Ricardo Giumelli Marquezan

Universidade Federal de Pelotas, Centro
de Engenharias
Pelotas – RS
<https://orcid.org/0000-0002-5796-0067>

Alexandre Felipe Bruch

Universidade Federal de Pelotas, Centro
de Engenharias
Pelotas – RS
<https://orcid.org/0000-0003-1734-6799>

Marciano Carneiro

Universidade Federal do Rio Grande do
Sul, Instituto de Geociências
Porto Alegre – RS
<https://orcid.org/0000-0003-4436-1935>

RESUMO: Este trabalho foi realizado com base em proporções ideais de caulim e bentonita para representar geotecnicamente os solos de alguns dos principais campos brasileiros de exploração de petróleo *offshore*. Foi identificado, através de ensaios

de caracterização geotécnica tradicional e MCT pelo Método das Pastilhas, que a mistura de 85% de caulim e 15% de bentonita, em termos de peso seco e com teor de umidade de 120%, é a que melhor se adequa ao fim proposto. Com esta mistura foram realizados ensaios de palheta de laboratório para avaliar a variação ao longo do tempo da resistência ao cisalhamento não-drenada no solo artificial por efeito tixotrópico. Os ensaios foram realizados entre 1 hora e 240 dias após a moldagem. Em síntese, os resultados apontam para um ganho significativo de resistência até, aproximadamente, 100 dias, quando mais de 90% da Razão de Resistência Tixotrópica foi alcançada. A Razão de Resistência de Recuperação Tixotrópica entre os tempos máximo e mínimo foi de 3,7. Este valor é considerado baixo quando comparado à bentonita, mas alto em relação ao caulim. Assim, atribui-se o comportamento tixotrópico do solo artificial à presença do argilomineral expansivo, de estrutura 2:1, a qual mesmo em um teor baixo causou o efeito avaliado à mistura.

PALAVRAS-CHAVE: Caulim; Bentonita; Ensaio de palheta de laboratório; Razão de Resistência Tixotrópica; Razão de Resistência de Recuperação Tixotrópica.

THIXOTROPY: VARIATION OF UNDRAINED SHEAR STRENGTH OF AN ARTIFICIAL SOIL

ABSTRACT: This paper as carried out based on ideal proportions o kaolin and bentonite to geotechnically represent the soils of some of the main Brazilian offshore oil exploration fields. It was identified, through traditional geotechnical characterization tests and MCT using the Tablet Method, that the mixture of 85% kaolin and 15% bentonite, in terms of dry weight and with a moisture content of 120%, is the best suitable for the proposed purpose. Laboratory vane tests were carried out with this mixture to evaluate the variation over time in the undrained shear strength of the artificial soil due to thixotropic effect. The tests were carried out between 1 hour and 240 days after molding. In summary, the results point to a significant gain in undrained shear strength up to approximately 100 days, when more than 90% og the Thixotropic Resistance Ratio was reached. The Thixotropic Recovery Resistance Ratio between the maximum and minimum times was 3.7. This value is considered low when compared to bentonite, but high compared to kaolin. Thus, the thixotropic behavior of the artificial soil is attributed to the presence expansive clay mineral, with a 2:1 structure, which even at a low level caused the effect evaluated on the mixture.

KEYWORDS: Kaolin; Bentonite; Laboratory vane test; Thixotropic Resistance Ratio; Thixotropic Recovery Resistance Ratio.

INTRODUÇÃO

O comportamento de solos finos artificiais, especialmente a resistência ao cisalhamento não drenada, é tradicionalmente avaliado no âmbito geotécnico (DUONG e HAO, 2020; EYO *et al.*, 2021; SHAKEEL *et al.*, 2021; ZHENG *et al.*, 2022; MOTLAGH *et al.*, 2023; entre outros). Neste universo têm sido particularmente exploradas as propriedades geotécnicas de misturas de caulim e bentonita usadas para simular solos finos da região *offshore*, como estudado por Camargo (2020), Lourenço *et al.*, (2020), Sampa *et al.* (2021), entre outros. Entretanto, nestes trabalhos foi observado um aumento significativo de resistência ao cisalhamento não drenada ao longo do tempo nas misturas, mesmo sob tensão efetiva constante, e foi atribuído este ganho de resistência ao efeito tixotrópico rápido causado ao solo artificial pela bentonita. O efeito tixotrópico tem sido intensamente estudado para os solos naturais (YANG e ENDERSEN, 2016; PENG *et al.*, 2021; YANG *et al.*, 2021; entre outros), mas poucos estudos sobre solos artificiais são encontrados. Neste contexto, este trabalho tem por objetivo dar continuidade àquelas pesquisas com solos artificiais finos, avaliando o ganho de resistência ao cisalhamento não drenada, por efeito tixotrópico, em solo artificial composto por caulim e bentonita, representativo dos solos finos da região *offshore* brasileira.

TIXOTROPIA

O termo “tixotropia” foi introduzido por Péterfi em 1927, e foi usado por seu mentor Freundlich para descrever o fenômeno de transição reversível e isotérmica sol-gel-sol de sistemas coloidais induzidos por excitação mecânica e subsequente repouso (MEWIS E WAGNER, 2009). Goodeve (1939) *apud* Sampa (2019) definiu a tixotropia como a diminuição isotérmica e reversível da viscosidade com a variação da taxa de cisalhamento. Burgers e Scoot-Blair (1949) a conceituaram como um processo de *softening* causado por grandes deformações, seguido por um retorno dependente do tempo para o estado original, mais sólido.

Segundo Zhang *et al.* (2017), a teoria da dupla camada elétrica, que explica as relações entre a energia gerada e a distância entre as partículas, é amplamente utilizada para explicar as forças que atuam no solo durante a tixotropia. De acordo com estes autores, as argilas apresentam no estado indeformado um balanço de energias atrativas (EA) e repulsivas (ER). Ao remoldar a argila, uma energia externa é imposta ao sistema eletrólito solo-água, danificando provavelmente a ligação entre as partículas do solo e obrigando a mudança da estrutura inicial floculada para dispersa. Este processo surge como resultado das EA e ER entre as partículas que induzem ao movimento iônico e à resistência viscosa. Após a perturbação, no estado remoldado, uma porção da energia total é consumida durante a dispersão da estrutura, enquanto a microestrutura tende a rearranjar-se para adaptar-se a um novo campo de forças, elevando assim os macroporos. Deixando o solo em repouso por algum tempo, as partículas tendem a se reaproximar, mudando assim a estrutura de dispersa para floculada. Segundo os autores, durante este processo, ocorrem significativas mudanças na estrutura, incluindo a posição e direção das partículas, o tamanho e a distribuição dos poros e a reorganização do sistema eletrólito solo-água.

A sensibilidade (S_t) de um solo é definida como a razão entre o pico de resistência de um solo no estado indeformado (S_{ur}) e o pico de resistência no estado deformado (S_{ut}), na condição de teor de umidade constante (SKEMPTON E NORTHEY, 1952 *apud* PERRETE *et al.*, 1996). Estes primeiros autores introduziram o conceito da Razão de Resistência Tixotrópica (AS_t) para avaliar o potencial tixotrópico de solos em função do tempo, conforme Equação 01.

$$AS_t = \frac{S_{ut}}{S_{ur}} \quad \text{Eq. 01}$$

onde S_{ut} é a resistência do solo em um tempo específico do tempo tixotrópico. Zhang *et al.* (2017) propuseram uma forma para analisar a porcentagem da Razão de Resistência de Recuperação Tixotrópica (B_t), conforme Equação 02.

$$B_t = \frac{S_{ut} - S_{ur}}{S_{ui} - S_{ur}} \times 100\% \quad \text{Eq. 02}$$

Mitchell e Soga (2005) afirmam que a alta sensibilidade de um solo está relacionado com o baixo valor de S_{ur} e não com alto valor de S_{ur} . Bjerrum (1954) também observou que os altos valores de sensibilidade de uma argila marinha da Noruega estão associados com altos índices de liquidez. Skempton e Northey (1952) *apud* Perrete *et al.* (1996) apresentaram resultados de Moretto (1948) que analisou cinco argilas diferentes, com índices de plasticidade variando entre 13 e 65% e de atividade coloidal variando entre 0,35 e 1,27. Os resultados mostram que os valores praticamente não crescem nas primeiras horas após a mistura. No entanto, os resultados demonstram que após um dia os valores aumentam entre 10 e 40%, apresentando tendência de estabilização após alguns meses.

Com relação aos minerais caulinita, illita e montmorilonita, Moretto (1948) mostrou que a caulinita praticamente não apresenta aumento tixotrópico de resistência, enquanto a illita apresenta um comportamento moderado. O maior crescimento foi observado na bentonita, a qual apresentou ganhos de resistência nos instantes seguintes após a moldagem, conforme Figura 01.

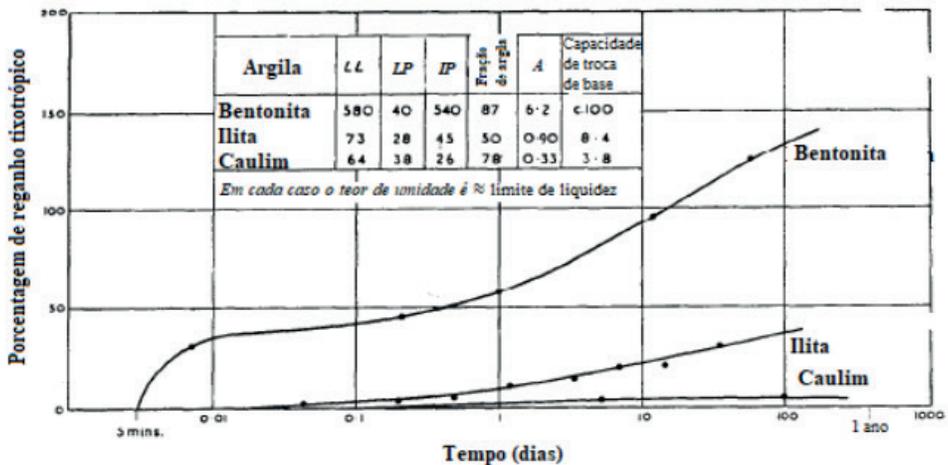


Figura 1: Recuperação tixotrópica em tres minerais de argila (adaptado de MORETTO, 1948 por SAMPA, 2019).

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foi utilizado solo artificial composto por caulim e bentonita. O caulim utilizado, de coloração rosa, é comercializado pela empresa *Induca*[®] e é oriundo da cidade de Caçapava do Sul/RS. A bentonita sódica utilizada foi fornecida pela empresa *T-Minas*[®] e é proveniente de Quatro Barras/PR. A primeira etapa deste trabalho foi a determinação das proporções ideais destes materiais para que o solo artificial fosse representativo das argilas plásticas marinhas que se desejava representar. Foram avaliadas quatro proporções de misturas: (i) B00C100 (100% de caulim); (ii) B05C95 (5% bentonita e 95% caulim); (iii) B10C90 (10% bentonita e 90% caulim); e (iv) B15C85 (15% bentonita e 85% caulim). Todas as proporções foram determinadas em termos de peso seco dos materiais.

Para esta escolha foram realizados ensaios de caracterização geotécnica tradicional, com realização de ensaios de análise granulométrica (Figuras 2a, 2b e 2c), seguindo orientações da NBR 7181 (2016), determinação do peso específico real dos grãos por ensaio de picnômetro (Figura 2d), seguindo recomendações da NBR 6508 (1984), e Limites de Atterberg, com ensaios para a determinação do Limite de Liquidez (Figura 1e), seguindo recomendações da NBR 6459 (2016), e Limite de Plasticidade (Figura 1f), seguindo recomendações da NBR 7180 (2016). A preparação das amostras e determinação do teor de umidade higroscópico foram realizadas de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 6457 (2016). Por fim, foi realizada a classificação expedita MCT (Miniatura, Compactado e Tropical) pelo Método das Pastilhas.

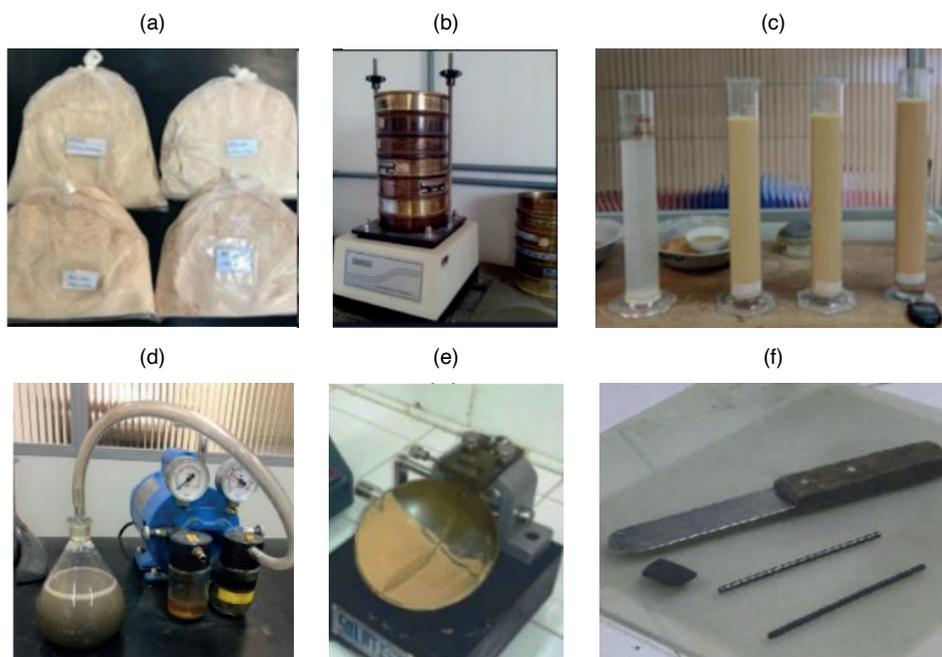


Figura 2: Caracterização geotécnica tradicional: (a) preparação das amostras; ensaios: (b) peneiramento; (c) sedimentação; (d) peso específico real dos grãos com picnômetro; (e) limite de liquidez; e (f) limite de plasticidade.

Uma vez escolhida a mistura ideal, a moldagem dos corpos de prova (CPs) foi realizada em um tubo PVC (Polímero de polocloreto de vinila) – Figura 3a. O tubo tem 83 mm de diâmetro externo e 4,3 mm de espessura de parede. A mistura foi realizada com o auxílio de uma haste acoplada a uma furadeira (Figura 3b) e o solo artificial foi transferido gradualmente para os moldes (Figura 3c).



Figura 3: Moldagem dos CPs: (a) construção dos moldes; (b) realização da mistura; e (c) transferência gradual das misturas para os moldes.

Os corpos de prova (CPs) foram moldados com um teor de umidade correspondente a 1,5 vezes o Limite de Liquidez (w_l), conferindo assim um comportamento líquido às misturas. Eles foram envoltos em sacos plásticos para evitar a perda de umidade para o ambiente. A Figura 4a ilustra o armazenamento dos CPs no laboratório. Ensaios em triplicata foram realizados ao longo do tempo para medir a resistência ao cisalhamento não drenada (S_u), utilizando o ensaio de palheta de laboratório, conforme mostrado na Figura 4b. O equipamento utilizado é da marca *Viates*[®] e é operado manualmente. A palheta possui dimensões de 12,7 mm de altura e 12,7 mm de largura, resultando em um índice de aspecto igual a 1. Os ensaios seguiram o procedimento descrito por Head (1982), sendo realizado um ensaio por CP, no ponto central da seção transversal. A profundidade da base da palheta em relação ao topo da amostra foi de 63,5 mm (cinco vezes o diâmetro da palheta).

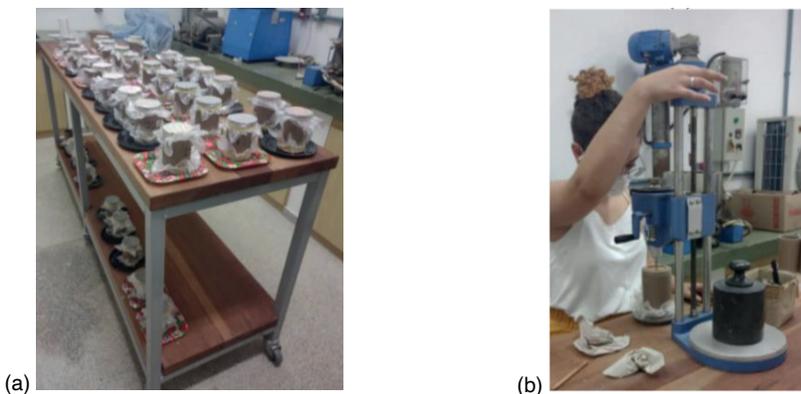


Figura 4: (a) Armazenamento dos CPs; e (b) realização dos ensaios de palheta de laboratório.

Após a escolha e instalação da mola, cuja torção permite a medição do torque, e o ajuste das escalas angulares do equipamento para zero, a palheta foi posicionada centralmente sobre o ponto de realização do ensaio (eixo central do CP). Em seguida, a manivela superior do equipamento foi girada, movendo o conjunto para baixo e fazendo com que a palheta penetrasse lentamente na amostra. O ensaio foi realizado aplicando rotação à palheta por meio do giro da manivela inferior, até que a ruptura do solo fosse detectada pela estabilização do valor do torque medido. A velocidade de rotação da palheta, fixada em um giro da manivela por segundo, foi controlada por um cronômetro. Assumindo isotropia na mobilização da resistência do solo e uma distribuição uniforme das tensões ao redor da palheta, a resistência ao cisalhamento não drenada foi obtida através da Equação 05.

$$S_u = \frac{T_{m\acute{a}x}}{\pi D^2 \left(\frac{H}{2} + \frac{D}{6} \right)} \quad \text{Eq. 05}$$

onde $T_{m\acute{a}x}$ corresponde ao torque máximo medido no ensaio, produto entre a constante da mola (K) e o ângulo máximo de torção da mola (α), que indica a ruptura do solo, D é o diâmetro do círculo desenhado pela rotação da palheta e H é a altura da palheta. A constante K (N.mm/grau de torção) é obtida pela calibração das molas fornecidas pelo fabricante junto com o equipamento. Neste conjunto de ensaios a mola utilizada foi a número 4 (a menos rígida), cuja constante de calibração é 1,1830 N.mm/grau, indicada para a realização de ensaios em solo com resistência ao cisalhamento não drenada menor que 20 kPa, conforme o solo artificial avaliado. Após a finalização dos ensaios, a palheta era retirada do solo lentamente, girando-se a manivela superior do equipamento. Em seguida, foram retiradas amostras para a determinação do teor de umidade do CP após o ensaio.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 resume os resultados da caracterização geotécnica das misturas de solo artificial, onde g_s corresponde ao peso específico real dos grãos, d_{50} corresponde ao diâmetro médio das partículas, w_l corresponde ao limite de liquidez, w_p corresponde ao limite de plasticidade, I_p corresponde ao Índice de Plasticidade, I_a corresponde ao Índice de atividade coloidal, HRB corresponde à classificação pela *Highway Research Board* e SUCS à classificação pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos.

Observa-se que o acréscimo de 15% de bentonita ao caulim, em termos de peso seco, causa uma diminuição no peso específico das partículas, um aumento bastante significativo no limite de liquidez e um aumento no limite de plasticidade. O caulim apresenta o comportamento de um solo inativo, assim como todas as misturas caulim e bentonita. O acréscimo de bentonita ao caulim não causou mudanças significativas na curva granulométrica dos solos. Assim, estes resultados demonstram que o acréscimo de bentonita ao solo, nos teores avaliados, apesar de não alterar significativamente a granulometria do solo, interfere bastante em suas propriedades plásticas. Todos os solos analisados pertencem ao grupo A-7-5 da classificação HRB, o qual agrupa materiais com moderado índice de plasticidade em relação ao limite de liquidez e que podem ser altamente elásticos e também sujeitos a consideráveis variações de volume. Quanto à Classificação Unificada, o caulim e o solo artificial com 5% de bentonita são classificados como argila pouco compressível e os solos artificiais com 10 e 15% de bentonita como argila muito compressível. A classificação expedita MCT do caulim é de um solo siltoso ou argiloso de comportamento não laterítico (NS' ou NG'). As misturas com bentonita apresentam a classificação NG' como possibilidade única, isto é, são solos argilosos de comportamento não laterítico. Observa-se, como esperado, que o acréscimo de bentonita aumenta a contração diametral e, por correlação, o parâmetro c' da Classificação MCT, que representa a "argilosidade" do solo segundo a metodologia.

Parâmetro	B00C100	B05C95	B10C90	B15C85
γ_s (kN/m ³)	25,5	25,3	24,9	24,2
d_{50} (mm)	0,05	0,03	0,03	0,03
w_l (%)	44	49	64	80
w_p (%)	19	26	38	46
I_p (%)	25	23	26	34
I_a (%)	0,57	0,51	0,59	0,76
Argila (%)	44	45	44	45
Silte (%)	34	35	36	35
Areia (%)	22	20	19	19
Pedregulho (%)	0	0	0	0
HRB	A-7-5 (15)	A-7-5 (15)	A-7-5 (18)	A-7-5 (20)
SUCS	CL	CL	CH	CH
Expedita MCT	NS'-NG'	NG'	NG'	NG'

Tabela 4: Caracterização geotécnica das misturas.

A Figura 5a compara as frações granulométricas finas dos solos artificiais desta pesquisa com resultados da PETROBRAS (PETROBRAS, 2011) dos principais campos brasileiros de exploração de petróleo *offshore*. Por sua vez, a Figura 5b faz comparação semelhante para os Limites de Atterberg. Os resultados indicam que o solo artificial B15C85 é o que melhor representa o comportamento plástico dos solos naturais que se desejava representar, especialmente quanto às propriedades plásticas. Assim, este foi o solo escolhido para a realização desta pesquisa.

A Figura 6 mostra a umidade de moldagem dos 63 corpos de prova (CP) avaliados com amostras do solo artificial B15C85. Observa-se que a maioria dos CPs foi moldado com umidade levemente inferior à umidade teórica de moldagem ($1,5 \times w_l$). O teor de umidade médio de moldagem foi de 118,56% com desvio padrão de 1,62%.

Com ensaios preliminares havia sido constatada uma diferença significativa de consistência ao longo da profundidade dos CPs com o passar do tempo. Assim, optou-se por, após a ruptura, fazer medidas do teor de umidade do CP em sua base, no topo e na posição central (bastante próxima da posição de realização dos ensaios de palheta de laboratório). A Figura 7 apresenta a variação do teor de umidade (Δw), a qual é dada pelo quociente entre a diferença do teor de umidade após a ruptura e o teor de umidade de moldagem pelo teor de umidade de moldagem, em termos percentuais, para as diferentes posições avaliadas. Os resultados evidenciam que no centro do CP acontece a menor variação entre o teor de umidade de moldagem e ao longo do tempo. Por isso, mesmo com a evidente variação de umidade, aceitou-se como válido o valor de resistência ao cisalhamento não drenada medido nesta posição. Observa-se também que próximo à superfície ocorre uma secagem do solo, enquanto próximo à base o solo apresenta-se um pouco mais úmido que no instante de moldagem. Assim, evidencia-se que, com o passar do tempo, ocorre migração de água do topo para a base do CP.

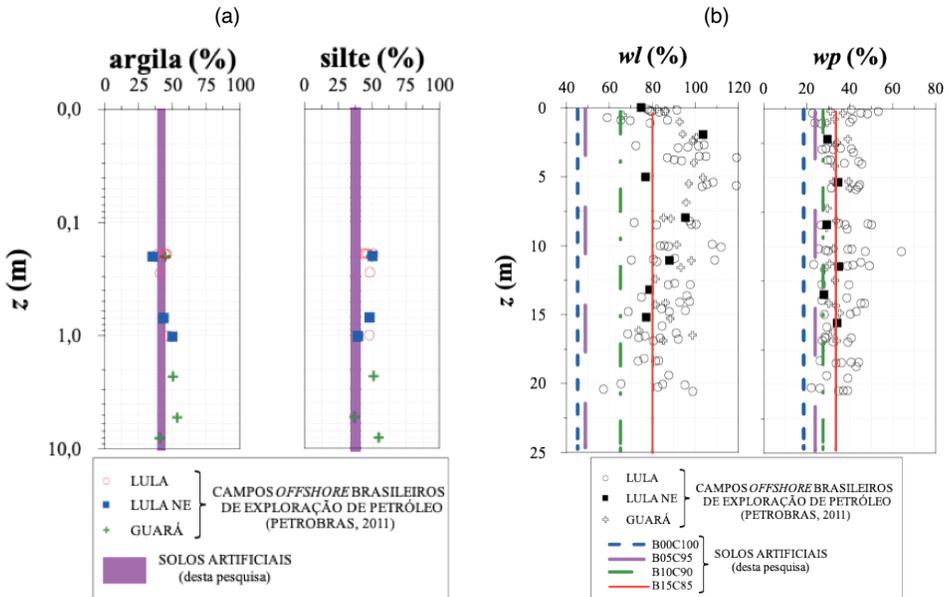


Figura 5: (a) Frações granulométricas finas dos solos artificiais; e (b) Limites de Atterberg comparados com solos de alguns campos brasileiros de exploração de petróleo *offshore*.

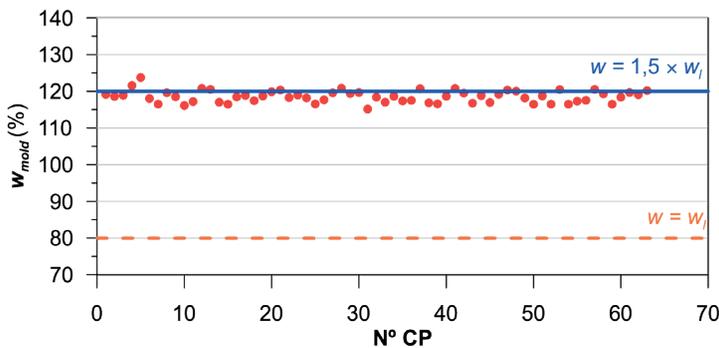


Figura 6: Teor de umidade de moldagem por CP.

Tendo como base os valores de massa e volume medidos, foi determinado o peso específico de cada um dos CPs avaliados, cujos resultados são apresentados na Figura 8a. Em termos médios, os CPs foram moldados com um específico de $13,57 \text{ kN/m}^3$, com um desvio padrão de $0,81 \text{ kN/m}^3$. De posse desses valores e do teor de umidade de moldagem de cada CP, foi calculado o valor do peso específico aparente seco (γ_d) por CP, conforme apresentado na Figura 8b. Os resultados apontam para um peso específico aparente seco médio de $6,21 \text{ kN/m}^3$, com um desvio padrão de $0,38 \text{ kN/m}^3$). Com base nestes resultados e no valor de peso específico dos grãos apresentado na Tabela 1, foi calculado o valor de porosidade para cada um dos CPs. Estes resultados estão apresentados na Figura 8c e tem-se uma média de 74,34% com desvio padrão de 1,56%.

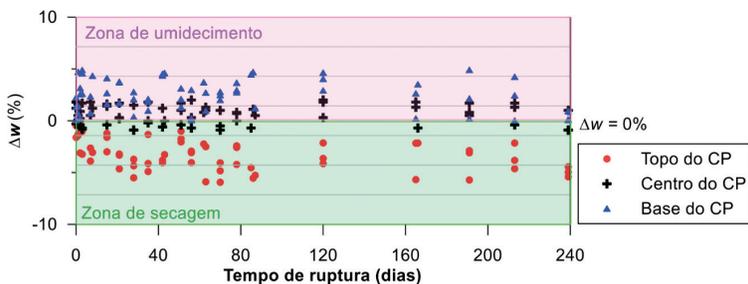


Figura 7: Variação de umidade em diferentes posições por CP.

Este conjunto de resultados demonstra que todos os CPs apresentam comportamento semelhante e, por isso, nenhum dado foi descartado na análise de ganho de resistência ao cisalhamento não drenada por efeito tixotrópico. A Figura 9 apresenta os resultados de resistência ao cisalhamento não drenada ao longo do tempo para a mistura caulim-bentonita B15C85 e percebe-se que o valor mínimo observado foi de 0,61 kPa e o máximo foi de 2,39 kPa, o que representa um aumento na resistência ao cisalhamento não-drenada de 2,67 vezes. Observa-se que há uma tendência de estabilidade do parâmetro entre, aproximadamente, 120 e 240 dias. Neste intervalo, o menor valor medido foi de 2,19 kPa e o maior de 2,39 kPa.

A Figura 10 mostra a Razão de Resistência Tixotrópica (AS_t) ao longo do tempo para o solo artificial. Para o cálculo deste parâmetro foi considerado que a menor resistência ao cisalhamento não drenada do solo no menor tempo avaliado (1 hora = 1/24 dia após a moldagem) corresponde à resistência do solo deformado e que maior (maior valor para 240 dias) corresponde ao valor no estado indeformado. A AS_t do solo atinge um valor máximo de 3,7, o qual é considerado bastante elevado em relação aos valores típicos do caulim e baixo em relação aos valores típicos da bentonita. Assim, entende-se que o comportamento tixotrópico da mistura é dada pela presença, mesmo que em teor baixo, da bentonita, a qual corresponde a um argilomineral expansivo, de estrutura 2:1, e que, notadamente, apresenta comportamento tixotrópico significativo.

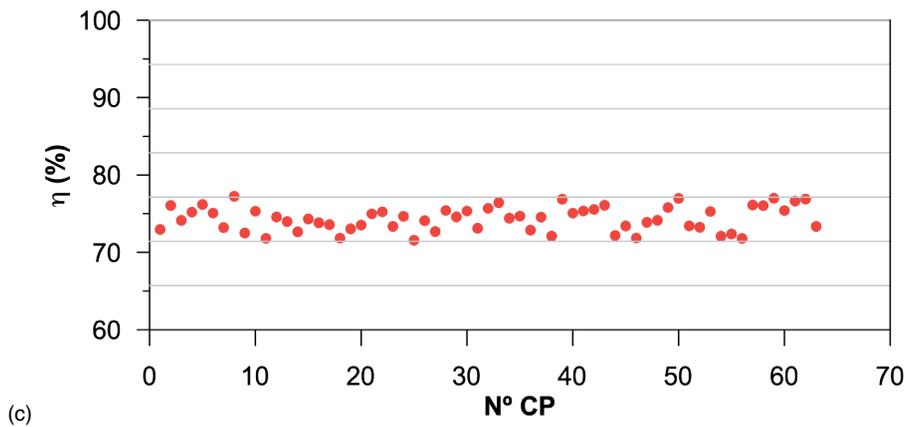
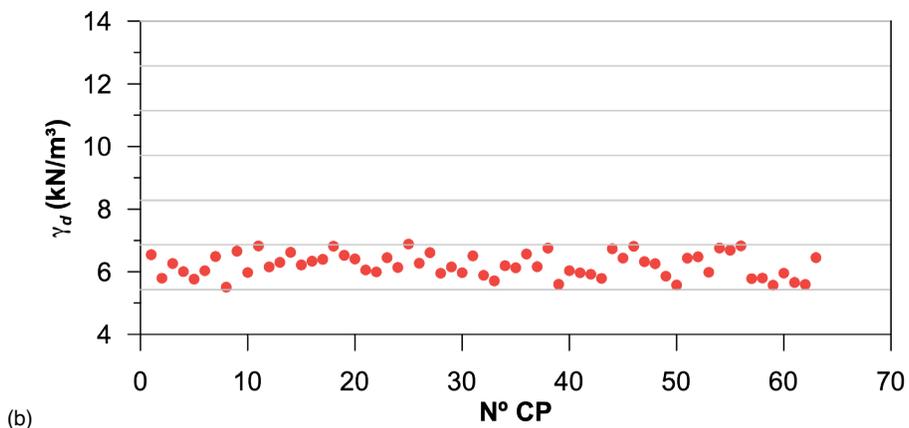
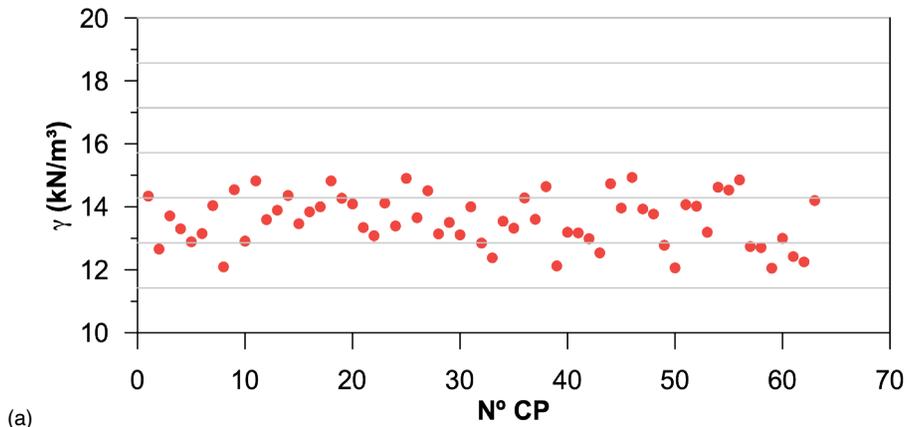


Figura 8: Índices físicos de moldagem por CP: (a) peso específico; (b) peso específico aparente seco; e (c) porosidade.

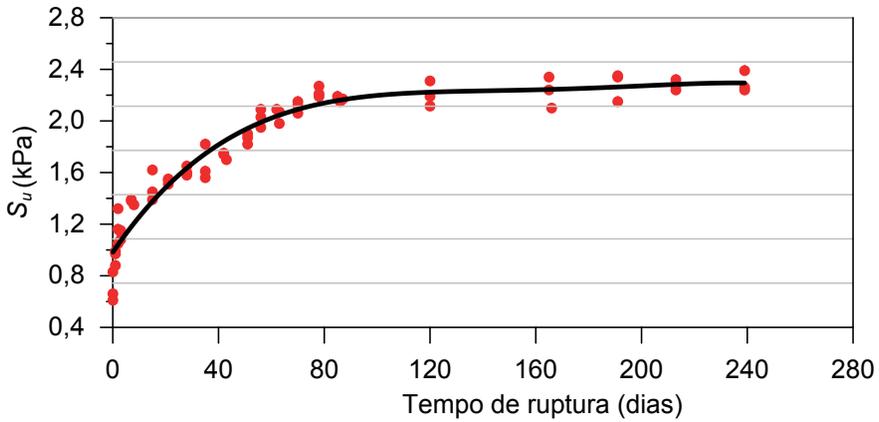


Figura 9: Resistência ao cisalhamento não drenada ao longo do tempo.

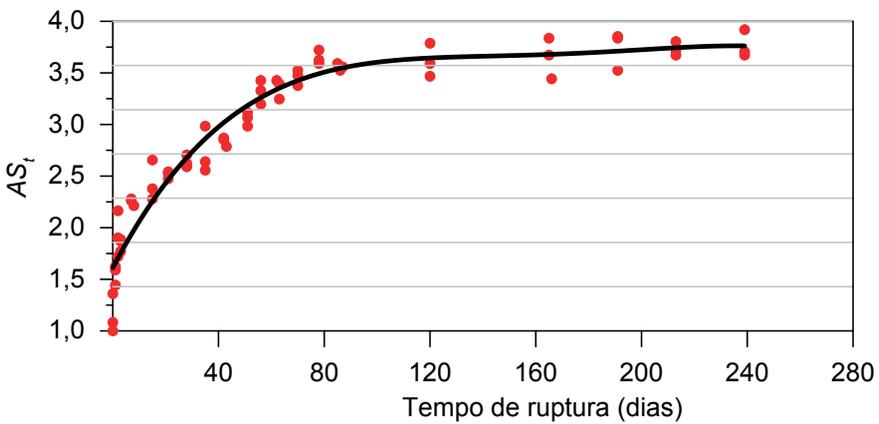


Figura 10: Razão de resistência tixotrópica ao longo do tempo.

A Figura 11 apresenta os resultados de Razão de resistência de recuperação tixotrópica ao longo do tempo e observa-se que o ganho significativo de resistência do solo, especialmente, até em torno de 100 dias, quando o ganho de resistência passa a apresentar um comportamento praticamente assintótico. Neste período, mais de 90% da Razão de resistência de recuperação tixotrópica é atingida.

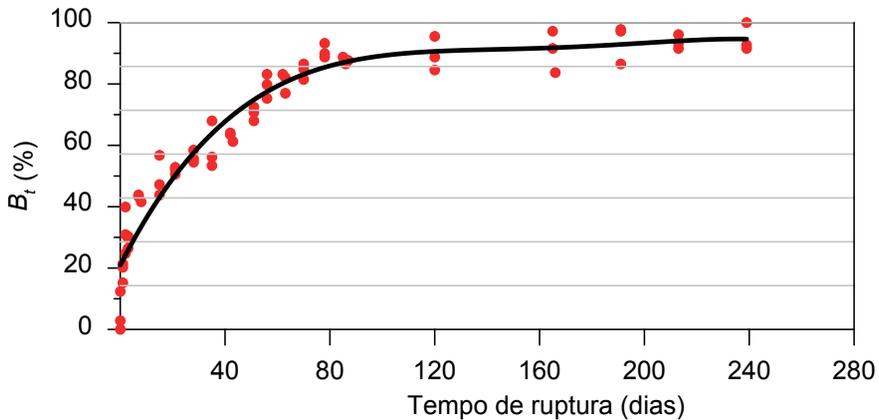


Figura 11: Razão de resistência de recuperação tixotrópica ao longo do tempo.

CONCLUSÕES

A realização deste trabalho permitiu determinar a proporção ideal entre caulim e bentonita para produzir um solo fino artificial representativo geotecnicamente de alguns dos principais campos brasileiros de exploração de petróleo *offshore*. Com a mistura determinada, a qual é composta por 85% de caulim e 15% de bentonita, em termos de peso seco e com 120% de umidade, foram realizados ensaios de palheta de laboratório ao longo de 240 dias entre a moldagem e a medida de S_u .

Foi observado que há uma variação significativa, no decorrer do tempo, no teor de umidade ao longo da profundidade do CP. Em termos gerais, para os tempos estudados neste trabalho, a posição central do CP (profundidade da palheta) permanece com teor de umidade muito próximo ao teor de umidade de moldagem, mas superficialmente o solo sofre secagem e na base sofre umedecimento, o que, provavelmente, é um indicativo de que há migração de água ao longo do perfil do CP com o tempo. Apesar desta observação, como na profundidade de realização do ensaio de palheta de laboratório, o teor de umidade segue muito próximo ao teor de moldagem, entende-se que a variação de S_u ao longo do tempo detectada ocorre por efeito tixotrópico e não por variação do teor de umidade.

Os resultados de resistência ao cisalhamento não drenada evidenciam que há no solo artificial um efeito tixotrópico significativo, o qual, provavelmente, é oriundo da bentonita. A bentonita é um argilomineral expansivo, de estrutura 2:1 e que, conforme já havia sido destacado por Moretto (1948), apresenta um efeito tixotrópico mais significativo que a caulinita, que é um argilomineral de estrutura mais estável 1:1. A Razão de resistência tixotrópica observada é de 3,7 e a conclusão da Razão de resistência de recuperação tixotrópica ocorre com 240 dias, embora com, em torno de 100 dias, mais de 90% deste parâmetro já tenha sido atingido.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa *T-Minas* pela doação da bentonita utilizada neste pesquisa.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 6457: Amostras de solos – preparação para ensaio de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro. 14 p. 2016.

___ **NBR 6459: Solo – determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro. 5 p. 2016.

___ **NBR 6508: Grãos de solo que passam na peneira 4,8 mm – determinação da massa específica.** Rio de Janeiro. 8 p. 2016.

___ **NBR 7180: Solo – determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro. 7 p. 2016.

___ **NBR 7181: Solo – análise granulométrica.** Rio de Janeiro. 16 p. 2016.

BJERRUM, L. **Geotechnical properties of Norwegian marine clays.** *Geotéchnique*, v. 4, n. 2, p. 49 – 69. 1954.

BURGERS, J. M.; SCOOT-BLAIR, G. W. **Report on the Principles of Rheological Nomenclature.** North-Holland Publishing Company, Amsterdam. 1949.

CAMARGO, K. R. **Hidrojateamento em solos finos: ensaios de laboratório e campo.** Tese de Doutorado. Doutorado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2020.

DUONG, N. T.; HAO, D. V. **Consolidation characteristics of artificially structures kaolin-bentonite mixtures with different pore fluids.** *Advances in Civil Engineering*, v. 2020. 2020. DOI: 10.1155/2020/8856404 Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2020/8856404>. Acesso em 12 de março de 2024.

EYO, E.; ABBEY, S.; OTI, J.; NG'AMBI, S.; GANJIAN, E.; COAKLEU, E. **Microstructure and physical-mechanical characteristics of treated kaolin-bentonite mixture for application in compacted clay liner.** *Sustainability*, v. 13, n. 4. 2021. DOI: 10.3390/su13041617. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13041617>. Acesso em: 15 mar. 2024.

HEAD, K. **Manual of Laboratory Soft Laboratory Testing.** Vol. 2, Pentech Press, London, 440 p. 1982.

LOURENÇO, D. E.; SCHANID, F.; SCHETTINI, E. B. C. **Model pile installation by vertical water jet in clay.** *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, v. 142. 2020. DOI: 10.1115/1.4046169. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.4046169>. Acesso em: 10 jan. 2024.

MEWIS, J. E. WEGNER, N. J. **Thixotropy.** *Advanced Colloidal Interface Sciences*, v. 147, p. 214 – 227. 2009.

MITCHELL, J.K.; SOGA, K. **Fundamental of Soil Behavior.** 3rd Edition, John Wiley and Sons, Hoboken. 2005.

- MORETTO, O. **Effect of natural hardening in the unconfined compression strength of remoulded clays.** 2nd International Conference of Soil Mechanics. Proceedings... 1948.
- MOTLAGH, A. H.; HOSSEINZADEH, M.; HASANLOURAD, M.; HAMEDSALMAN, M. **Shear strength, adsorption, and microstructural behavior of sand-bentonite and sand-kaolinite mixtures contaminated with heavy metals.** Arabian Journal of Geosciences, v. 16, n. 425. 2023. DOI: 10.1007/s12517-023-11546-6. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11543-6>. Acesso em: 15 mar. 2024.
- PENG, J.; LUO, S. M.; WANG, D. F.; REN, Y.; FAN, L. L. DEGROOT, D. J. ZHANG, G. P. **Quantitative evaluation of thixotropy-governed microfabric evaluation in soft clays.** DOI: 10.1016/j.clay.2021.106157. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106157>. Acesso em: 12 mar. 2024.
- PERRET, D.; LOCAT, J. MARTIGNONI, P. **Thixotropic behavior during shear of a fine-grained mud from Eastern Canada.** Engineering Geology, v. 43, p. 31 – 44. 1996.
- PETROBRAS. **Relatório Interno.** 11 p. 2011.
- SAMPA, N. C. **Modelagens dos mecanismos de interação de linhas de ancoragem de plataformas offshore em solos argilosos.** Tese de Doutorado. Doutorado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2019.
- SAMPA, N. C.; SCHNAID, F.; ROCHA, M. R.; CUDMANI, R.; AMARAL, C. S. **Vertical and horizontal pullout capacity of mooring lines embedded in very soft clays.** Ocean Engineering, v. 234. 2021. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.10922. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.10922>. Acesso em: 13 de jan. 2024.
- SHAKEEL, A.; KIRICHEK, A.; CHASSAGNE, C. **Rheology and yielding transitions in mixed kaolinite/bentonite suspensions.** Applied Clay Science, v. 211, n. 15. 2021. DOI: 10.1016/j.clay.2021.106206. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106206>. Acesso em: 11 mar. 2024.
- SKEMPTON, A. W.; NORTHEY, R. D. **The sensitivity of clays.** Geotéchnique, v. 3, p. 30 – 53. 1952.
- YANG, S.; ANDERSEN, K. H. **Thixotropy of marine clays.** Geotechnical Testing Journal, v. 39, n. 2. 2016. DOI: 10.1520/GTJ20150020. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/GTJ20150020>. Acesso em: 20 mar. 2024.
- YANG, S.; REN, Y.; ANDERSEN, K. H. **Effects of thixotropy and reconsolidation on the undrained shear characteristics of remoulded marine clays.** Ocean Engineering, v. 239. 2021. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109888. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109888>. Acesso em: 30 mar. 2024.
- ZHANG, X. W.; KONG, L.W.; YANG, A. W, SAYERN, H. M. **Thixotropy mechanism of clay: a microstructural investigation.** Soils and Foundations, v. 57, p. 23 – 35. 2017. DOI: 10.1016/j.sandf.2017.01.002. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.01.002>. Acesso em: 15 dez. 2023.
- ZHENG, J; ZHANG, Z.; TIAN, G. **Membrane behavior of kaolin-bentonite mixtures.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 148, n. 10. 2022. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002880. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002880](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002880). Acesso em: 02 abr. 2024.