

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



Caracterização e investigação da resistência não-drenada de uma mistura argilosa de caulim e bentonita

Daniel de Andrade Faria
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, danieldeafaria@gmail.com

Vinícius Batista Godoy
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, vinigodoy@msn.com

Fernando Schnaid
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, fschnaid@gmail.com

Lucas Festugato
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, lucas@ufrgs.br

RESUMO: Misturas compostas por caulim e bentonita vêm sendo empregadas em laboratório ao longo dos anos visando reproduzir o comportamento geotécnico de solos de campo. As características do material resultante dependem das proporções e do teor de umidade empregado. O presente trabalho tem como objetivo investigar as propriedades geotécnicas e a resistência não-drenada de uma mistura argilosa composta por 85% de caulim e 15% de bentonita, com 120% de umidade, que foi empregada em ensaios de modelo reduzido. As características da mistura foram comparadas com as de argilas marinhas presentes em três campos de exploração de petróleo localizados na bacia de Santos. Para a investigação da resistência não-drenada, foram realizados ensaios de palheta e T-bar em miniatura. Os ensaios de palheta foram utilizados como referência para calibração do fator de resistência do penetrômetro T-bar (N_{T-bar}). Os ensaios de resistência não-drenada demonstraram boa concordância e foi observado um perfil com um significativo incremento de resistência próximo à superfície e crescimento linear com a profundidade. A distribuição granulométrica da mistura e os limites de liquidez e de plasticidade obtidos se apresentaram bastante próximos da média dos valores encontrados em profundidades de até 10 metros nos campos de exploração, demonstrando que a mistura argilosa com estas proporções e teor de umidade guarda semelhanças com as argilas marinhas estudadas.

PALAVRAS-CHAVE: Caracterização geotécnica, Resistência não-drenada, Argilas Moles.

ABSTRACT: Mixtures composed of kaolin and bentonite have been used in the laboratory over the years to reproduce the geotechnical behavior of in situ soils. The characteristics of the resulting material depend on the proportions and the moisture content employed. This work aims to investigate the geotechnical properties and the undrained shear strength of a clayey mixture composed of 85% kaolin and 15% bentonite with moisture content of 120%, which was used in small scale model tests. The characteristics of the mixture were compared with those of marine clays present in three oil exploration fields located in the Santos basin. Miniature vane shear tests and T-bar penetrometer tests were performed to investigate the undrained shear strength. The vane shear tests were used as reference for calibrating the T-bar penetrometer resistance factor (N_{T-bar}). The undrained shear strength tests showed good agreement and the profiles showed a significant resistance increment near the clay surface and linear increase with depth. The granulometric distribution of the mixture and the liquid and plasticity limits obtained were very close to the mean values found at depths up to 10 meters in the exploration fields, demonstrating that the clay mixture with these proportions and moisture content has similarities with the marine clays studied.

KEYWORDS: Geotechnical characterization; undrained shear strength, soft clays.



1 Introdução

Diversas pesquisas utilizam misturas de materiais produzidas em laboratório com o propósito de reproduzir o comportamento de solos de campo. A produção do solo artificial proporciona melhor homogeneidade, trabalhabilidade e controle dos parâmetros geotécnicos de interesse.

Dentre as misturas citadas, misturas argilosas compostas por caulim e bentonita em variadas proporções vêm sendo empregadas ao longo dos anos, tendo demonstrado resultados satisfatórios em diversos tipos de aplicação. De acordo com o caso de estudo, faz-se necessário investigar as proporções de materiais mais adequadas, visto que as características da mistura resultante dependem das porcentagens dos materiais e do teor de umidade empregado.

Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho é investigar as propriedades geotécnicas e a resistência não-drenada de uma mistura argilosa de laboratório composta por 85% de caulim e 15% de bentonita (em pesos secos), com teor de umidade de 120%, a qual foi empregada em ensaios de modelo reduzido de fundações superficiais de equipamentos submarinos.

As características da mistura foram comparadas com as de argilas marinhas presentes em três campos de exploração da Petrobras localizados na Bacia de Santos (Lula, Lula NE e Guará), adotadas como referência. Em águas profundas, em geral, o leito marinho é constituído por uma composição de argilas muito moles ou siltes de alta plasticidade, com perfil normalmente consolidado, baixas resistências e altos índices de vazios (Randolph e Gourvenec, 2011). A resistência não-drenada da mistura foi investigada utilizando uma palheta (*vane*) e um penetrômetro T-bar de laboratório, cujos resultados demonstraram boa concordância.

2 Uso de misturas de caulim e bentonita em laboratório

O caulim é um silicato de alumínio hidratado, formado basicamente por caulinita. Já a bentonita é uma argila composta majoritariamente por montmorilonita, caracterizada por conferir alta plasticidade, baixa condutividade hidráulica e propriedades tixotrópicas aos materiais aos quais é misturada. Nas últimas décadas, diversos trabalhos vêm utilizando misturas destes materiais em laboratório com variadas proporções e teores de umidade, permitindo observar as diferenças resultantes no comportamento e nas características geotécnicas obtidas.

Guimarães (2000), por exemplo, observou que a proporção de 80% de caulim e 20% de bentonita apresentou melhor homogeneização e trabalhabilidade comparada com a proporção de 75% de caulim e 25% de bentonita. Netto (2006) utilizou uma mistura de caulim e bentonita na proporção 98:2, em pesos secos, com teor de umidade de 116%, indicando que a presença de bentonita, mesmo em quantidades reduzidas, proporciona condições adequadas de plasticidade e trabalhabilidade à mistura. Segundo o autor, as amostras exibiram características de permeabilidade e compressibilidade similares às de materiais argilosos moles de depósitos litorâneos do sudeste brasileiro.

Jung (2012) empregou, para estudos de jateamento em solos argilosos, uma mistura composta por 80% de caulim e 20% de bentonita em massa de materiais secos. Foram testados teores de umidade de 100% e 120%. Foi observado o aumento do índice de vazios de 2,79 para 3,22 e a redução da resistência não-drenada para aproximadamente metade com o aumento do teor de umidade.

Passini (2015) utilizou uma mistura composta por 90% de caulim e 10% de bentonita com 120% de umidade em estudos de instalação de estacas modelo com fluidização. Com esta proporção, o limite de liquidez (LL) da mistura apresentou valores significativamente inferiores do que com 85% de caulim e 15% de bentonita, apesar de o limite de plasticidade ter mantido valores próximos nos dois casos.

Alguns autores, como Sampa (2015) e Lourenço e Schnaid (2016), adotaram em seus estudos as proporções de 85% de caulim e 15% de bentonita em massas secas, com teor de umidade de 120%, observando que estas proporções promovem boa homogeneização e trabalhabilidade à mistura.

3 Materiais, equipamentos e métodos

O programa experimental deste trabalho foi composto por ensaios de caracterização da mistura argilosa de caulim e bentonita e ensaios de investigação da resistência não-drenada.

Os ensaios de caracterização dos materiais foram realizados seguindo as normas da ABNT. A preparação das amostras e a determinação do teor de umidade seguiram os procedimentos descritos na NBR 6457 (ABNT, 2016a). Os ensaios de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) foram realizados de acordo com a NBR 6459 (ABNT, 2016c) e a NBR 7180 (ABNT, 2016d), respectivamente. A análise granulométrica seguiu as prescrições da NBR 7181 (ABNT, 2016e), e a massa específica dos grãos (ρ_s) foi determinada de acordo com a NBR 6458 (ABNT, 2016b).

A resistência não-drenada do solo foi investigada através de ensaios de palheta e penetrômetro T-bar em miniatura. Os ensaios de mini-palheta foram empregados como referência para a investigação do fator de resistência do T-bar (N_{T-bar}), auxiliando na definição do perfil de resistência.

3.1 Materiais

A mistura argilosa empregada neste trabalho foi produzida com proporções de 85% de caulim e 15% de bentonita, em massas secas, e teor de umidade de 120%, de forma a obter uma argila de alta plasticidade, com boa trabalhabilidade e com características representativas das argilas marinhas descritas.

Foi utilizado um caulim de cor rosa proveniente de uma jazida de Pântano Grande/RS, com porcentagem retida na peneira de malha 325 (0,045 mm) menor que 3%. A bentonita utilizada foi uma bentonita sódica com porcentagem retida na peneira de malha 200 (75 μ m) menor que 3%. O aspecto dos materiais pode ser visualizado na Figura 1.



Figura 1. Aspecto do caulim e da bentonita utilizados para a mistura.

Para melhor homogeneização, inicialmente os materiais foram misturados à mão, sendo, em seguida, adicionados a um misturador com capacidade efetiva de 100L, juntamente com a quantidade de água correspondente ao teor de umidade pretendido. A homogeneização foi feita com o auxílio de uma hélice com dentes triangulares conectada a uma bomba trifásica.

Os ensaios de resistência foram realizados em um tanque de acrílico com seção quadrada, com dimensões internas 45 x 45 cm e altura de 70 cm, sendo empregada camada de solo com 30 cm de profundidade. Assim, após a homogeneização, a mistura foi gradualmente transferida para o tanque de ensaio, tomando-se o cuidado de não deixar espaços vazios. Ao fim do enchimento, a superfície foi suavemente aplainada e adicionou-se uma lâmina de água de aproximadamente 3 cm na superfície para evitar a perda de umidade e ressecamento do material. De forma a estabelecer uma condição padrão para os ensaios, adotou-se como padrão o tempo de 24 horas de repouso da mistura antes da realização dos mesmos.

3.2 Ensaios para investigação da resistência não-drenada

O equipamento de mini-palheta utilizado é automatizado com um motor de passo para a aplicação de torque, o qual é controlado por um driver programável. A palheta empregada, de geometria cruciforme, tem comprimento de 51 mm e diâmetro de 25,5 mm, com índice de aspecto (H/D) igual a 2. O torque durante o

ensaio é medido através de uma célula de torque. A velocidade de rotação utilizada nestes ensaios foi de 5,4°/min, sendo realizados ensaios a cada 10 cm de profundidade na camada de solo.

O penetrômetro *T-bar* em miniatura empregado possui 10 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento, com relação L/D igual a 5 e área projetada de 500 mm². A haste de cravação do penetrômetro possui diâmetro de 8 mm, com área projetada de 50,3 mm², correspondente a 10% da área projetada do cilindro *T-bar*. A cravação do penetrômetro no solo foi realizada utilizando um sistema de cravação contendo motor de passo com driver programável. Foi adotada como velocidade padrão de ensaio o valor de 2,5 mm/s, equivalente a 0,25 D_{T-bar}/s . O monitoramento da carga durante os ensaios foi feito com uma célula de carga tipo S posicionada entre a plataforma deslizante e a haste de cravação do penetrômetro. Na Figura 2 são mostrados a mini-palheta e o penetrômetro *T-bar* utilizados no programa experimental.

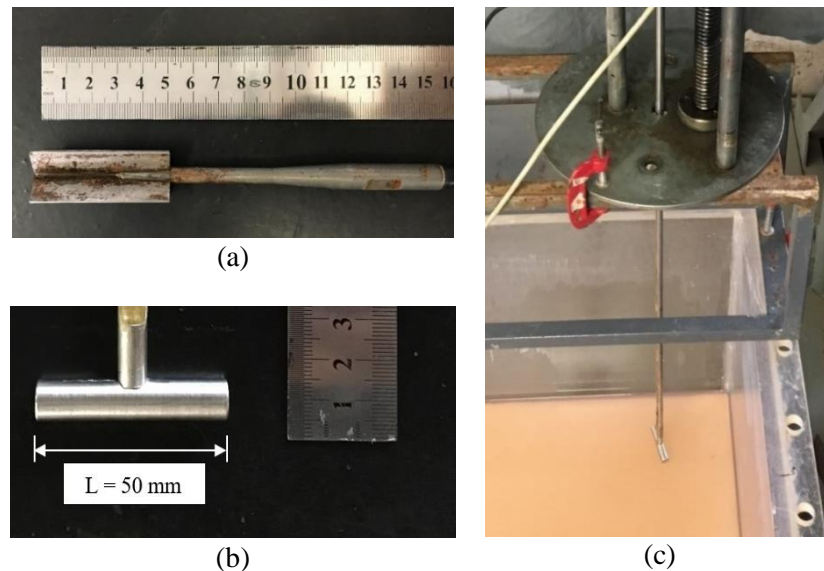


Figura 2. Equipamentos para investigação da resistência não-drenada do solo: (a) mini-palheta; (b) penetrômetro *T-bar* em miniatura; (c) *T-bar* posicionado no tanque de ensaio.

A resistência não-drenada obtida ao longo da profundidade através do ensaio *T-bar* é calculada através da solução plástica para a pressão limite atuante em um cilindro infinitamente longo movimentando-se lateralmente através de solo puramente coesivo (Randolph e Houlsby, 1984). Definindo o fator de resistência (N_{T-bar}) como a relação entre a resistência líquida de penetração (q_{net}) e a resistência não-drenada do solo, esta pode ser calculada através da Equação 1.

$$S_u = \frac{q_{net}}{N_{T-bar}} \quad (1)$$

Onde q_{net} é a resistência líquida de penetração. O valor analítico de N_{T-bar} é dependente da rugosidade do cilindro, sendo os limites superior e inferior da solução plástica de aproximadamente 12 para barra perfeitamente rugosa e 9,14 para barra perfeitamente lisa. Tendo em vista que os penetrômetros utilizados em campo e laboratório não são perfeitamente lisos nem rugosos, utiliza-se comumente para a interpretação de resultados um valor intermediário de $N_{T-bar} = 10,5$ (Randolph e Houlsby, 1984; Stewart e Randolph, 1994).

4 Resultados e análises

Na Tabela 1 são apresentadas as características dos materiais (caulim e bentonita) empregados, da mistura argilosa obtida e as médias de valores obtidos ao longo dos 10 primeiros metros de profundidade nos campos de exploração de petróleo da bacia de Santos estudados.

Tabela 1. Características dos materiais utilizados e das argilas marinhas adotadas como referência.

Característica	Caulim	Bentonita	Mistura	Argilas marinhas
Massa específica dos grãos - ρ_s (g/cm ³)	2,594	2,645	2,626	-
Limite de liquidez – LL (%)	43	448	103	95
Limite de plasticidade – LP (%)	29	90	37	35
Índice de plasticidade – IP (%)	14	358	66	60
d_{50} (mm)	0,0062	-	0,0029	-
% Argila	32	81	41	25 a 60
% Silte	67	19	58	35 a 60
% Areia	1	0	1	5 a 15

A curva granulométrica da mistura é apresentada na Figura 3, em comparação com a faixa de granulometrias obtida para as argilas marinhas. É possível observar que a curva granulométrica da mistura tem distribuição bastante similar às curvas das argilas estudadas, sobretudo para diâmetros de grãos menores que 0,03 mm. Além disso, nota-se, a partir da Tabela 1, que os valores dos Limites de Atterberg da mistura (LL = 103 e LP = 37) resultaram bastante próximos dos valores médios das argilas marinhas. Pode-se concluir, portanto, que a mistura argilosa empregada guarda semelhança com as características das argilas marinhas tomadas como referência.

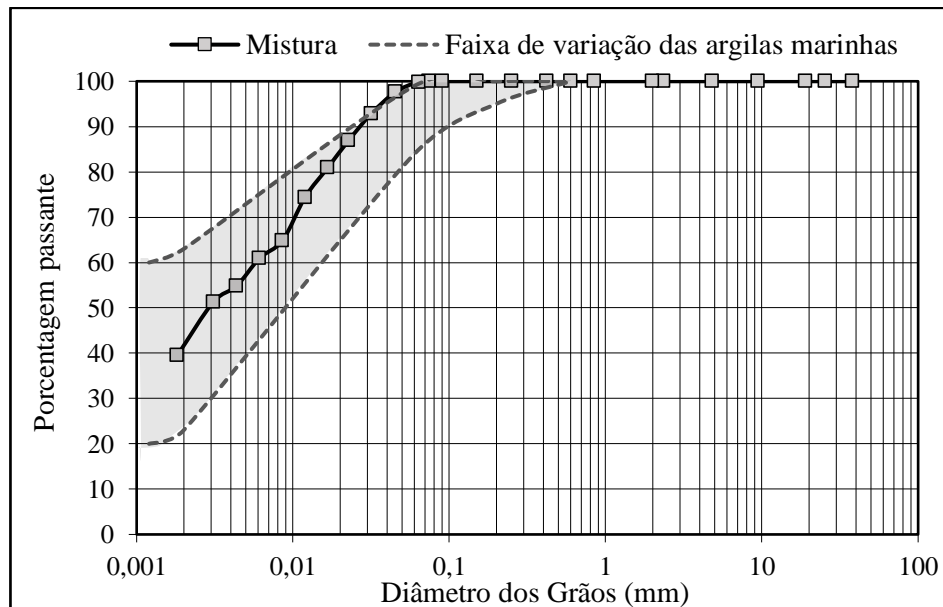


Figura 3. Comparação entre a curva granulométrica da mistura e das argilas marinhas da bacia de Santos.

Na Figura 4 são mostrados os pontos de resistência não-drenada obtidos através dos ensaios de mini-palheta em oito diferentes tanques de ensaio. O perfil médio de resistência foi traçado considerando um ajuste logarítmico, que representa melhor o aumento de resistência observado ao longo do perfil, principalmente para as menores profundidades. O ajuste linear dos pontos obtidos resultou em resistência superficial $S_{u0} = 0,73$ kPa e gradiente de crescimento com a profundidade $k = 1,02$ kPa/m.

As resistências à penetração obtidas pela cravação do penetrômetro *T-bar* são apresentadas na Figura 5. Pode-se observar que houve certa dispersão entre os resultados, porém todos os perfis apresentaram tendências bastante parecidas. Nota-se um significativo aumento de resistência próximo à superfície, tornando-se, posteriormente, menos acentuado e aproximadamente linear com a profundidade.

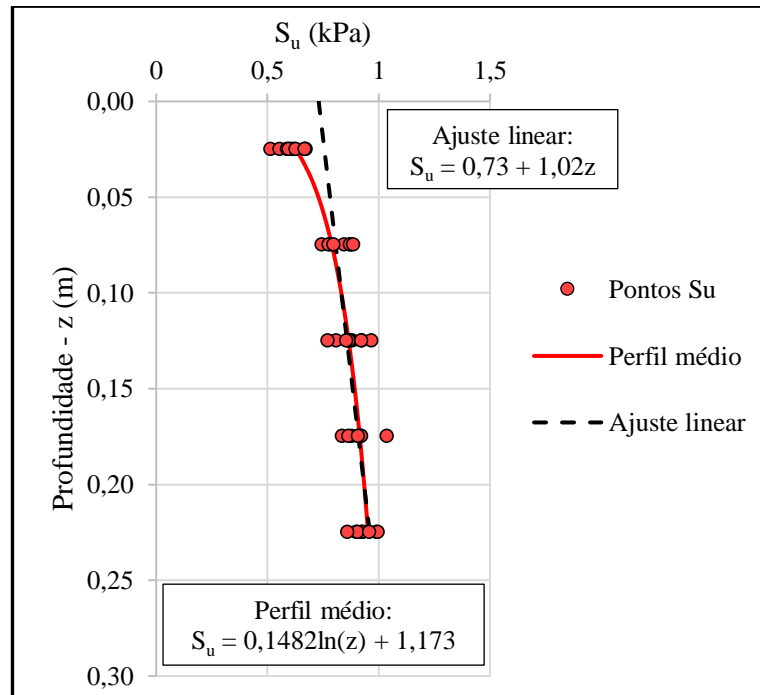


Figura 4. Resistências não-drenadas obtidas através de ensaios de mini-palheta.

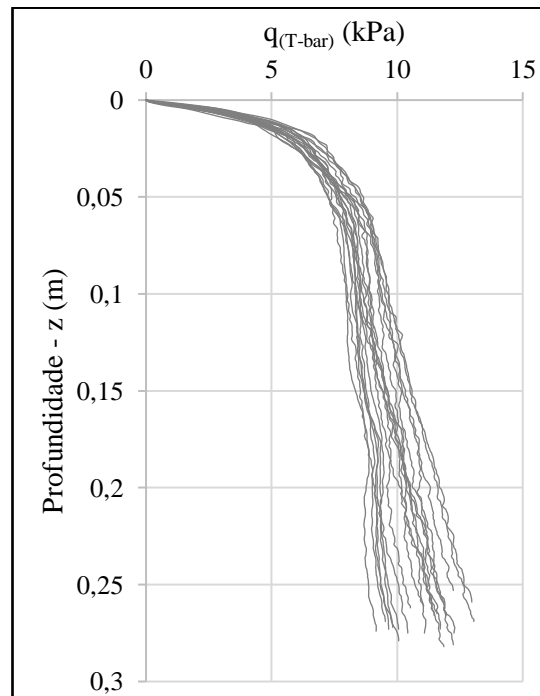


Figura 5. Resistências à penetração obtidas através dos ensaios T -bar.

Os fatores de resistência (N_{T-bar}) foram analisados através da comparação das resistências de cravação do T-bar com os pontos de S_u obtidos nos ensaios de mini-palheta. Como pode ser visto na Figura 6, o melhor ajuste entre os valores correspondeu a um fator N_{T-bar} médio de 10,72, que é bastante próximo do valor médio de 10,5 usualmente adotado a partir da solução teórica.

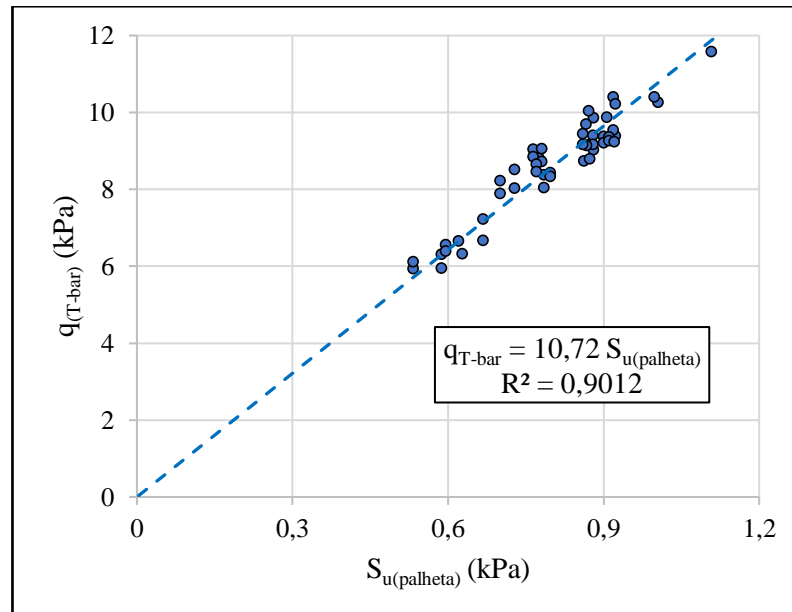


Figura 6. Análise do fator de resistência $N_{T\text{-bar}}$ médio calculado com base nas resistências não-drenadas do ensaio de mini-palheta.

A partir do fator de resistência obtido, foram calculados os perfis de resistência não-drenada dos ensaios T-bar, que são mostrados na Figura 8, juntamente com os pontos de mini-palheta. É possível observar que os ensaios apresentaram boa concordância ao longo da profundidade. O ajuste linear obtido para o perfil médio determinado resultou nos valores de resistência superficial $S_{u0} = 0,7$ kPa e gradiente de aumento linear com a profundidade $k = 1,22$ kPa/m.

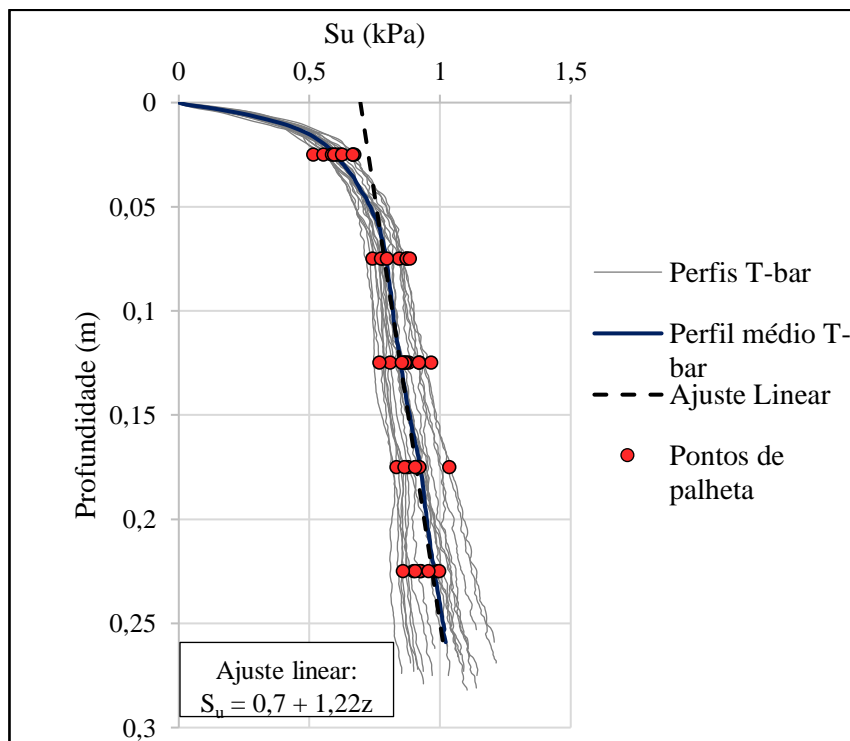


Figura 7. Perfis de resistência não-drenada e perfil médio obtidos com o penetrômetro T-bar.



5 Conclusões

Através da análise dos resultados obtidos no trabalho, foi possível observar que a mistura argilosa utilizada, composta por 85% de caulim e 15% de bentonita, com teor de umidade de 120%, guarda semelhanças com as argilas marinhas estudadas em termos de características geotécnicas. A distribuição granulométrica da mistura e os Limites de Atterberg se apresentaram bastante próximos da média dos valores encontrados em profundidades de até 10 m nos campos de exploração de petróleo descritos.

As resistências não-drenadas analisadas com base nos ensaios de mini-palhetas resultaram em um fator de resistência do penetrômetro T-bar (N_{T-bar}) de 10,72, bastante próximo do valor tipicamente adotado para interpretação com base na solução teórica. Os ensaios de resistência não-drenada realizados demonstraram boa concordância e foi observado um perfil com um incremento acentuado de resistência próximo à superfície e crescimento linear com a profundidade. O ajuste linear do perfil médio obtido apresentou resistência superficial $S_{u0} = 0,7$ kPa e gradiente de crescimento linear $k = 1,22$ kPa/m.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao apoio fornecido pela CAPES e o CNPq.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2016a) NBR 6457: *Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro: ABNT. 8 p.
- _____. (2016b) NBR 6458: *Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro: ABNT. 10 p.
- _____. (2016c) NBR 6459: *Solo - Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro: ABNT. 5 p.
- _____. (2016d) NBR 7180: *Solo - Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro: ABNT. 3 p.
- _____. (2016e) NBR 7181: *Solo - Análise granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT. 12 p.
- Guimarães, P. F. (2000) *Estudo da influência de uma parcela viscosa nas resistências saturadas*. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro: UFRJ. 194 p.
- Jung, J. G. (2012) *Estudo do jateamento em solos argilosos e sua aplicação à engenharia de fundações offshore*. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre: PPGEC/UFRGS. 181 p.
- Lourenço, D. E.; Schnaid, F. (2016) Instalação de fundações profundas em solos argilosos para aplicação offshore. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG 18, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: ABMS. 7 p.
- Netto, Y. A. (2006) *Estudo experimental das características de compressibilidade e adensamento de uma argila mole*. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro: PUC-Rio. 106 p.
- Passini, L. B. (2015) *Instalação e capacidade de carga axial de estacas modelo fluidizadas em solos arenosos*. Tese (Doutorado). Porto Alegre: PPGEC/UFRGS. 292 p.
- Randolph, M. F.; Gourvenec, S. (2011) *Offshore Geotechnical Engineering*. New York: Spon Press. 527 p.
- Randolph, M. F.; Houlsby, G. T. (1984) The limiting pressure on a circular pile loaded laterally in cohesive soil. *Géotechnique*, v. 50, n. 5, p. 573-582.
- Sampa, N. C. (2015) *Atenuação de cargas dinâmicas em linhas de ancoragem de plataformas offshore*. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre: PPGEC/UFRGS. 186 p.
- Stewart, D. P.; Randolph, M. F. (1994) T-bar penetration testing in soft clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, v. 120, n. 12, p. 2230-2235.