

DENSIDADE RELATIVA DE DEPÓSITO DA PLANÍCIE COSTEIRA DO RIO GRANDE DO SUL

Alana Stern Retzlaff (Universidade Federal do Rio Grande) E-mail: alanasternr@gmail.com

Karina Retzlaff Camargo (Universidade Federal do Rio Grande) E-mail: karinacamargo@gmail.com

Alexandre Felipe Bruch (Universidade Federal de Pelotas) E-mail: afbruch@gmail.com

Marciano Carneiro (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) E-mail: marciano.carneiro@ufrgs.br

Resumo: Este estudo dá continuidade a pesquisas anteriores sobre os solos granulares do Campus Carreiros da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), situado em Rio Grande e na Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Utilizando-se de sondagens SPT (*Standard Penetration Test*) já existentes e perfis longitudinais elaborados previamente, foram realizadas coleta de amostras em quatro pontos estratégicos para a determinação do peso específico natural do solo, por ensaio de frasco de areia, e teor de umidade. Também foram coletadas amostras indeformadas para realização de ensaios de caracterização geotécnica e determinação de índices de vazios máximo e mínimo. A análise dos resultados revelou uma alta similaridade entre os solos, os quais são predominantemente arenosos e não-plásticos. Entretanto, ao comparar a densidade relativa determinada em campo com a estimada por fórmulas consagradas na literatura, verificou-se correspondência satisfatória apenas em um dos locais avaliados. Entende-se que a divergência observada esteja associada ao fato de as amostras terem sido coletadas em profundidades rasas, onde a tensão efetiva é significativamente menor, o que resulta em pesos específicos subestimados e, conseqüentemente, densidades relativas superestimadas. Assim, o estudo ressalta a importância de uma caracterização precisa dos parâmetros geotécnicos para estimativa confiável de densidade relativa e recomenda investigações e coleta de amostras mais profundas para melhorar a precisão dos resultados.

Palavras-chave: Ensaio de frasco de areia, Sondagem SPT, Geoestatística, Campus Carreiros

Relative density of Coastal Plain of Rio Grande do Sul State deposit

Abstract: This study builds on previous research on the granular soils of the Carreiros Campus at Federal University of Rio Grande (FURG), located in Rio Grande within the Coastal Plain of Rio Grande do Sul State. Using SPT (*Standard Penetration Test*) data and previously developed longitudinal profiles, soil samples were collected from our strategic points to determine the natural unit weight and moisture content using sand cone test. Additionally, disturbed samples were collected for geotechnical characterization and for determining the maximum and minimum void ratios. The analysis of results revealed a high similarity among the soils, which are predominantly sandy and non-plastic. However, when comparing the field-determined relative density with estimates obtained from established formulas on the literature, satisfactory correspondence was observed only at one of the evaluated sites. It is understood that this observed discrepancy is likely due to the samples being collected at shallow depths, where effective stress is significantly lower, resulting in underestimated unit weights and, consequently, overestimated relative densities. Thus, this study emphasizes the importance of precise characterization of geotechnical parameters for reliable relative density estimates and recommends deeper investigations and sample collection to improve result accuracy.

Keywords: Sand cone test, SPT sounding, Geostatistics, Carreiros Campus

1. Introdução

A sondagem SPT (*Standard Penetration Test*) é amplamente adotada na engenharia geotécnica brasileira, conforme destaca Odebrecht (2003), devido à sua simplicidade, robustez, e ao baixo custo associado ao equipamento. A vasta experiência empírica adquirida com a sua execução e interpretação consolidou o SPT como uma ferramenta indispensável na prática de engenharia civil. A padronização deste método em âmbito nacional é regida pela NBR 6484 (2020), que define o procedimento de cravação de um amostrador padrão utilizando um martelo padronizado, possibilitando tanto a coleta de

amostras do solo quanto a contagem do número de golpes necessários para a penetração do amostrador. Entre os parâmetros geotécnicos que o SPT permite estimar, destaca-se a Densidade Relativa (D_r) de solos granulares. Pinto (2006) descreve D_r como a relação entre o índice de vazios natural de uma areia em sua condição em campo (e) e seus índices de vazios máximo ($e_{máx}$) e mínimo ($e_{mín}$).

A PROINFRA (Pró-Reitoria de Infraestrutura) da Universidade Federal do Rio Grande (FURG) supervisiona as ações de implantação, manutenção e expansão da infraestrutura necessária para as atividades de ensino, pesquisa, extensão e administração na Universidade. Em virtude dessa responsabilidade, a PROINFRA mantém em seu acervo relatórios de sondagens SPT realizadas a pedido da instituição. Em estudo anterior, Retzlaff *et al.* (2022) organizaram estes dados em um Sistema de Informações Geográficas (SIG), possibilitando a elaboração de dois perfis longitudinais da área do Campus Carreiros (Figura 1), localizado na cidade do Rio Grande, no sul do estado do Rio Grande do Sul. Estes perfis, apresentados na Figura 2, abrangem cerca de 1000 m de extensão e atingem profundidades entre 13 e 18 metros, revelaram a presença de um aterro de aproximadamente 0,5 m de altura nas áreas de construção dos prédios da Universidade, seguido por um solo granular fino de compactidade variável e uma camada areno-argilosa com conchas. Em profundidades mais acentuadas, foi encontrada uma camada de solo granular mais compacto que os anteriores.

Esse estudo evidenciou, portanto, o predomínio de solos granulares no campus, o que enfatiza a necessidade de se conhecer a D_r desses solos para o desenvolvimento adequado de infraestrutura no local. Assim, este trabalho tem como objetivo aprofundar o estudo anterior por meio da estimativa da densidade relativa de solos do Campus Carreiros da FURG, localizado na Planície Costeira do Rio Grande do Sul, cuja localização está apresentada na Figura 1, usando dados de sondagens SPT e comparando-os com resultados obtidos por meio de ensaio de frasco de areia em campo.

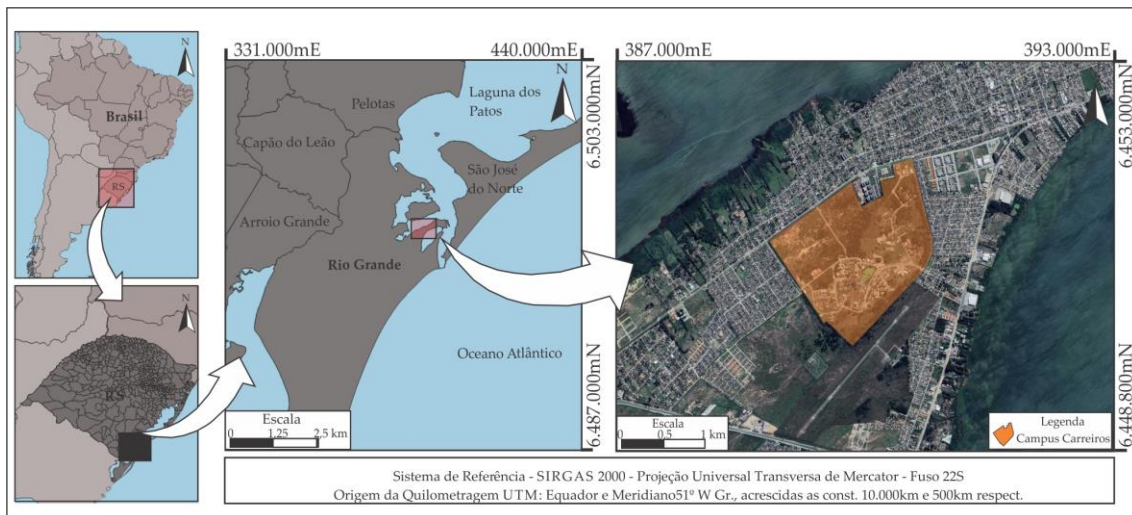


Figura 1 – Localização do Campus Carreiros da FURG

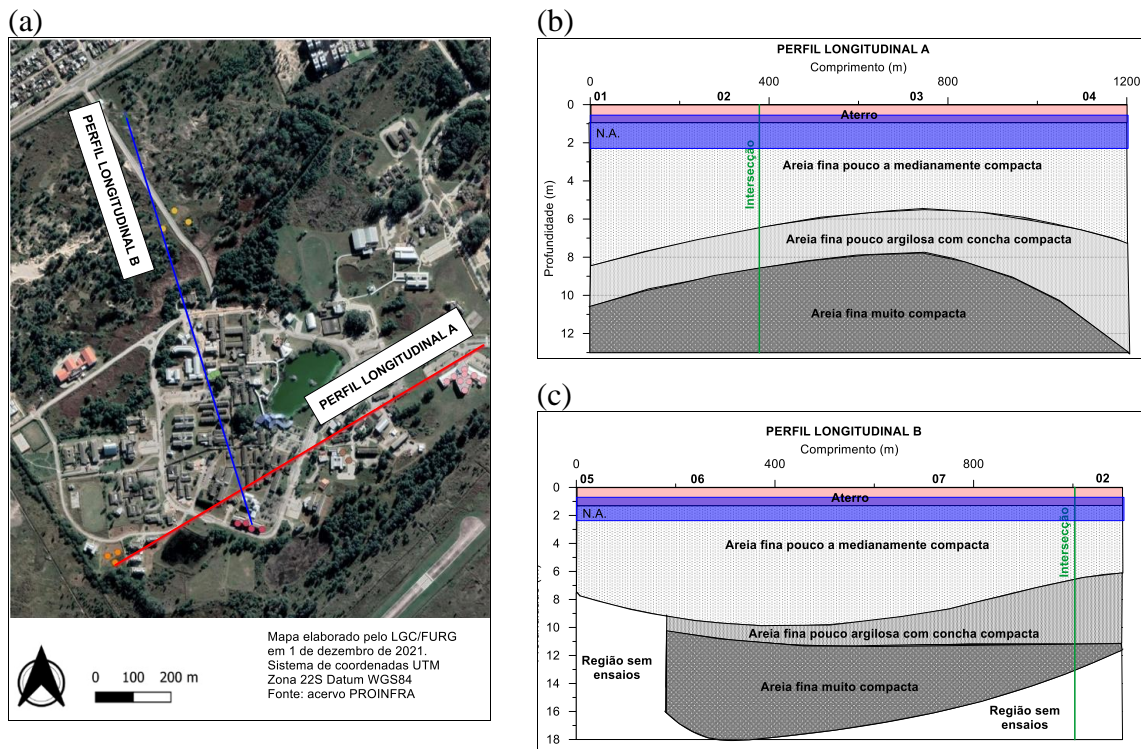


Figura 2 – Perfis longitudinais do Campus Carreiros da FURG: (a) mapa de localização; (b) perfil longitudinal A; e (c) perfil longitudinal B (RETZLAFF *et al.*, 2022)

2. Cenário de estudo

A cidade do Rio Grande, situada no extremo sul do estado do Rio Grande do Sul, fica na desembocadura da Laguna dos Patos para o Oceano Atlântico. Segundo Villwock e Tomazelli (2022), esta região integra a Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS) e faz parte do mais recente sistema deposicional da área, denominado Sistema Laguna-Barreira IV. Este sistema é composto principalmente por areias da faixa praiar e do campo eólico adjacente. Como resultado, grande parte do município é coberta por solos granulares, predominantemente quartzosos, originados pela degradação e transporte de rochas das adjacências que formaram a PCRS e que, por serem geologicamente recentes, permanecem geralmente inconsolidados (LIMA E PARISE, 2020).

3. Materiais e métodos

Os métodos foram organizados em três grupos principais: (i) estimativa de D_r com base em sondagens SPT; (ii) determinação de D_r por meio de ensaios de campo; e (iii) comparação entre os resultados estimados e determinados. Para a estimativa de D_r foram utilizados dados de N_{SPT} (número de golpes necessários para cravar os 30 cm finais do amostrador padrão da sondagem SPT), corrigidos pela energia de cravação e estimativas da tensão efetiva vertical, conforme as propostas de Gibss e Holz (1957) e Skempton (1986), conforme Equações 1 e 2, respectivamente. Esta equações dependem de N_{60} (número de golpes corrigido para 60% da energia teórica). As sondagens SPT inventariadas foram realizadas com sistema manual de liberação do martelo, que, segundo Decourt *et al.* (1989), apresenta eficiência média de 72% no Brasil.

$$D_r = \left(\frac{N_{60}}{0,23 \times \sigma'_{v0} + 16} \right)^{1/2} \quad \text{Equação 1}$$

$$D_r = \left(\frac{N_{60}}{0,28 \times \sigma'_{v0} + 27} \right)^{1/2} \quad \text{Equação 2}$$

Para calcular a tensão efetiva vertical (σ'_v), foram utilizados os valores do peso específico aparente natural do solo (γ_{nat}), medidos em campo. Tomando como referência os perfis longitudinais elaborados por Retzlaff *et al.* (2022), realizadas coletas de amostras em quatro pontos em campo, identificados como PAV 4, CIDEC, PÓRTICO e PAV. 6, conforme mostrado na Figura 3. Em cada um desses locais, a pequenas profundidades, foram realizados ensaios para determinação do peso específico natural e coletadas amostras deformadas representativas (Figura 4a), as quais foram levadas ao Laboratório de Geotecnia e Concreto (LGC) da FURG para a realização de ensaios.

Em função da natureza granular do solo, optou-se pela realização do ensaio frasco de areia para a determinação de γ_{nat} , de acordo com as padronizações da NBR 7185 (2016), conforme apresentado na Figura 4b. As amostras deformadas coletadas foram transportadas para o LGC-FURG, onde a preparação das amostras e determinação do teor de umidade higroscópico foram realizados de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 6457 (2024). A análise granulométrica e a massa específica real dos grãos foram determinadas conforme as recomendações da NBR 7181 (2016) e NBR 6508 (2016), respectivamente. O limite de liquidez e plasticidade foram determinados de acordo com a NBR 6459 (2016) e NBR 7180 (2016), respectivamente.

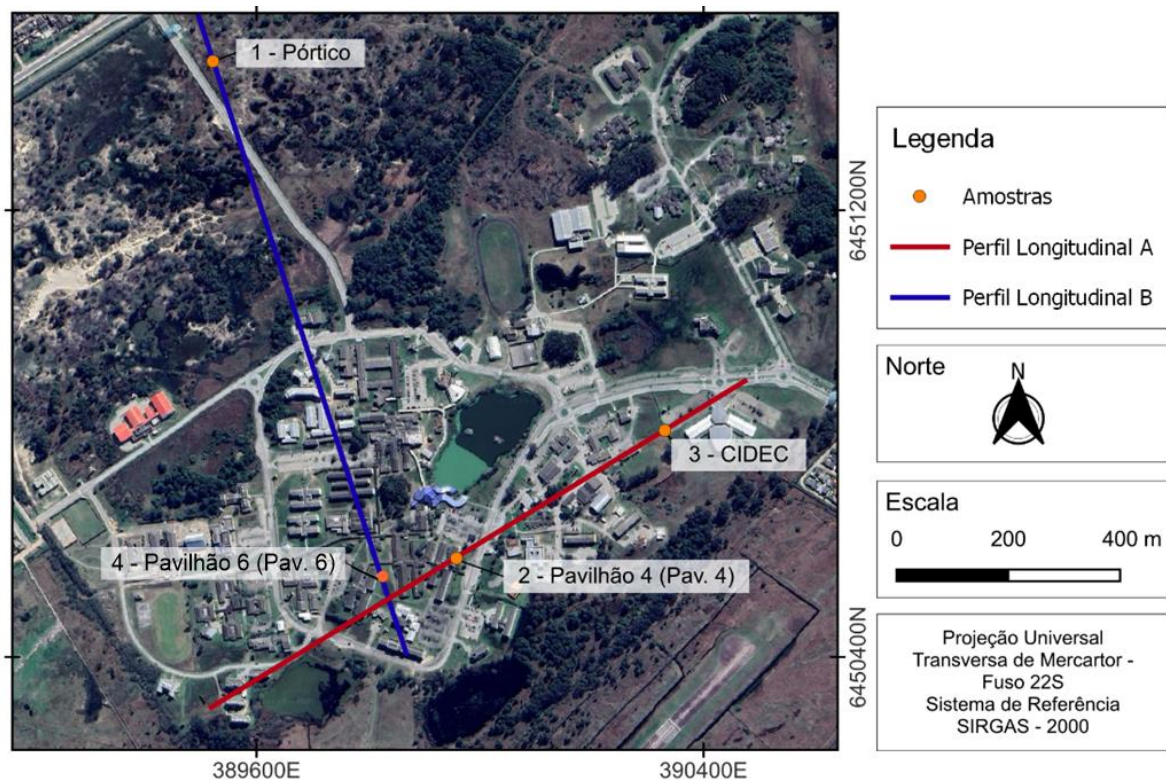


Figura 3 – Localização dos pontos de coleta de amostras

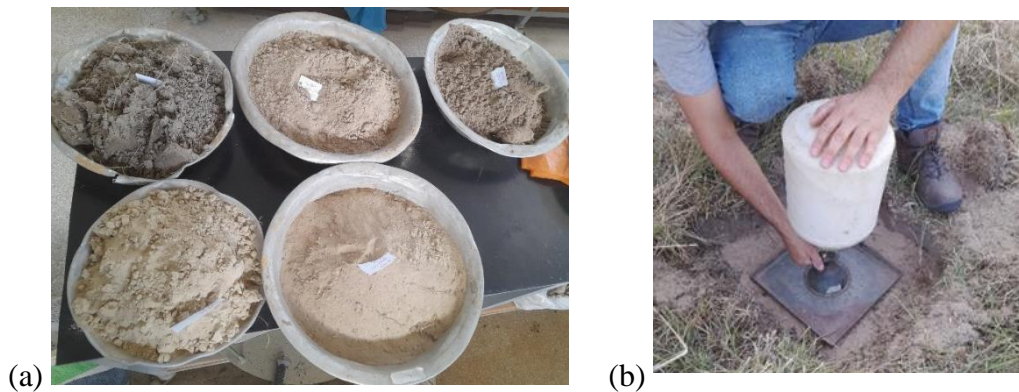


Figura 4 – (a) amostras deformadas representativas; e (b) ensaio de frasco de areia

Com base nos resultados de peso específico aparente natural e teor de umidade, foi determinado o índice de vazios em campo (e), o qual, juntamente com os índices de vazios máximo ($e_{máx}$) e mínimo ($e_{mín}$), permitiu a determinação da densidade relativa, conforme Equação 3.

$$D_r = \frac{e_{máx} - e}{e_{máx} - e_{mín}} \quad \text{Equação 3}$$

Dada a variabilidade entre os valores médios, máximos e mínimos obtidos, optou-se pela análise geostatística dos dados, integrando a estatística com a localização. Para tal, utilizou-se o *software Surfer*[®], com interpolação por Função de Base Radial, que proporciona uma resposta monotônica baseada na distância ao ponto central.

4. Resultados e discussões

As curvas granulométricas obtidas, apresentadas na Figura 5, confirmam o caráter granular do solo estudado. A Tabela 1 sintetiza os resultados de caracterização geotécnica, onde d_{50} representa o diâmetro médio das partículas de solo, w_l e w_p correspondem aos limites de liquidez e plasticidade, respectivamente, C_u e C_c representam os coeficientes de uniformidade e curvatura, respectivamente, HRB corresponde à classificação pela *Highway Research Board*, SUCS à classificação pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos, w e γ_d referem-se à umidade e peso específico aparente do solo, respectivamente, e NP à não-plástico. Em síntese, os resultados apontam para solos com características semelhantes, não plásticos e compostos predominantemente pela fração areia. Pela classificação SUCS os solos são classificados como areias de bem a mal graduadas. Por sua vez, quanto à HRB, todos os solos são classificados como A-3, grupo que reúne as areias com ausência de argilas e siltes.

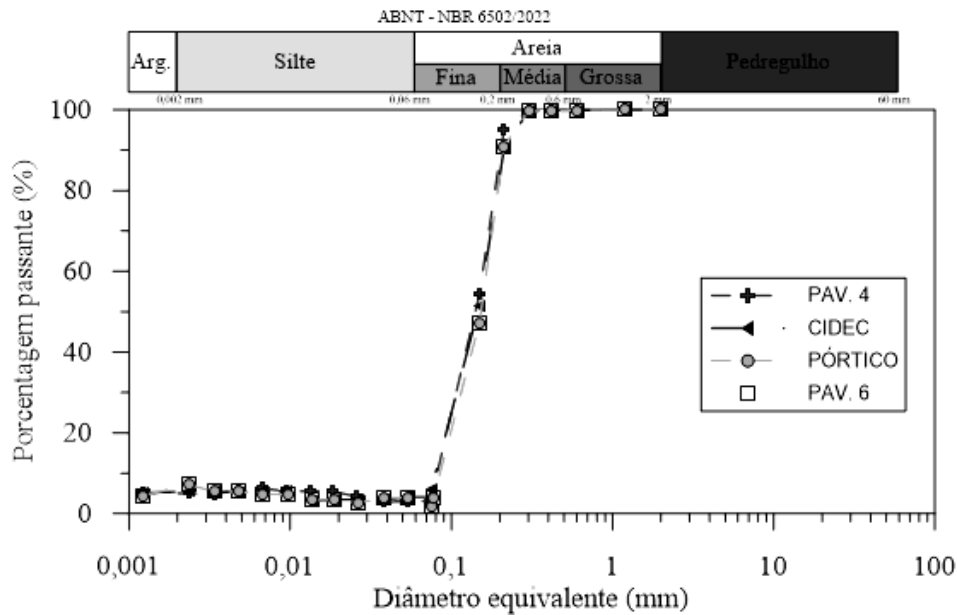


Figura 5 – (a) amostras deformadas representativas; e (b) ensaio de frasco de areia

Tabela 1 – Caracterização geotécnica

Propriedade geotécnica	Pórtico	PAV. 4	CIDEC	PAV. 6
d_{50}	0,16	0,15	0,15	0,14
w_l (%)	NP	NP	NP	NP
w_p (%)	NP	NP	NP	NP
Argila (%)	4	4	4	4
Silte (%)	0	2	1	0
Areia (%)	96	94	95	96
Pedregulho (%)	0	0	0	0
C_u	2	1,88	1,44	1,76
C_c	1,21	1,06	1,17	0,95
HRB	A-3 (0)	A-3 (0)	A-3 (0)	A-3 (0)
SUCS	SW-SP	SW-SP	SW-SP	SP
γ_{nat} (kN/m ³)	15,76	15,37	16,81	15,40
w (%)	9,16	2,36	8,43	3,52
γ_d (kN/m ³)	14,44	15,01	15,50	15,40
γ_s (kN/m ³)	25,91	26,15	25,93	25,95
e	0,79	0,74	0,68	0,68
$e_{mín}$	0,57	0,53	0,58	0,55
$e_{máx}$	0,82	0,76	0,83	0,70
D_r (%)	0,09	0,07	0,63	0,08

A Figura 6 apresenta os valores de N_{SPT} médios, máximo e mínimos, ao longo da profundidade, inventariados por Retzlaff *et al.* (2022), juntamente com os resultados corrigidos para 60% da energia teórica. Com base nesses dados, foram estimados os valores de D_r ao longo da profundidade nos diferentes locais analisados, conforme mostra a Figura 7. De modo geral, observa-se que, a partir de três metros de profundidade, as estimativas para o solo em campo tendem a estar mais próximas do índice de vazios mínimo, indicando uma condição de elevada densidade relativa. No entanto esta estimativa só foi validada apenas para o local CIDEC.

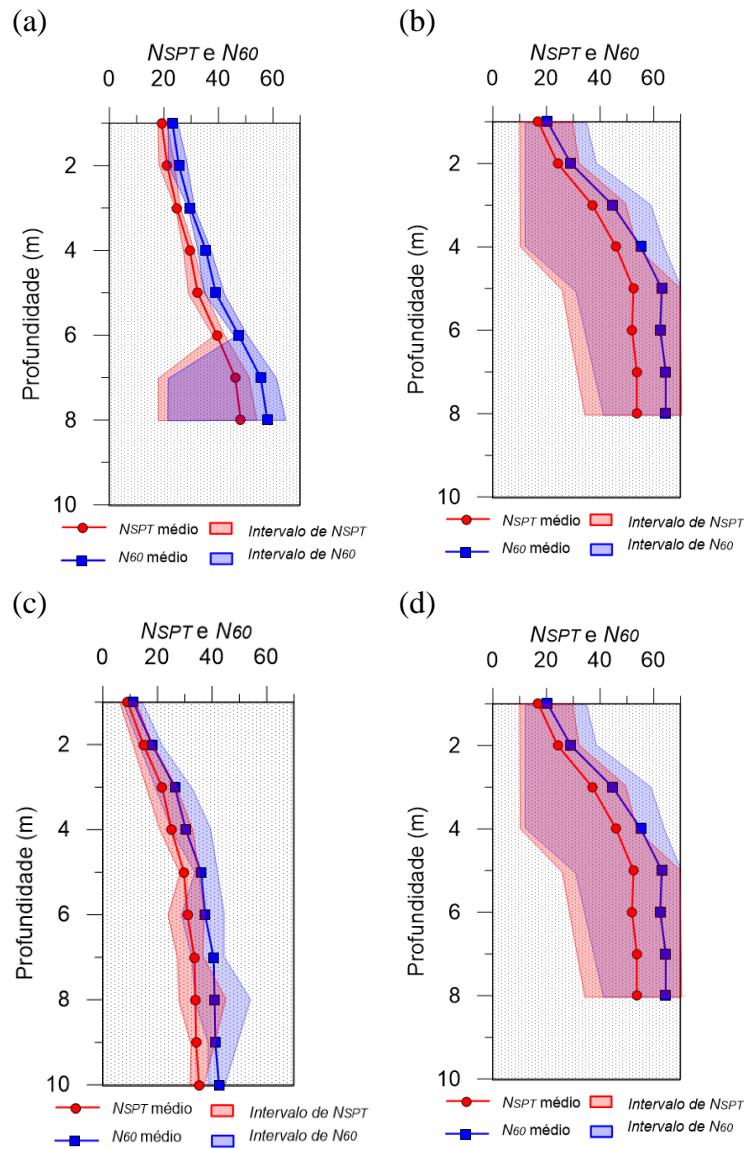


Figura 6 – Resultados médios, mínimos e máximos ao longo da profundidade de N_{SPT} e N_{60} : (a) Pórtico; (b) PAV 4; (c) CIDEC; e (d) PAV 6

As Figuras 8 e 9 mostram uma distribuição estimada de D_r para os perfis longitudinais A e B, respectivamente, evidenciando novamente uma disparidade significativa entre os valores estimados e os medidos. Acredita-se que esta discrepância se deve, em parte, aos valores de peso específico natural, que foram determinados a pequenas profundidades. Nestas pequenas profundidades, a tensão efetiva é pouco expressiva, levando a estimativas subestimadas. Estes valores reduzidos de peso específico influenciam, conforme as fórmulas aplicadas, nas altas densidades relativas estimadas para o solo.

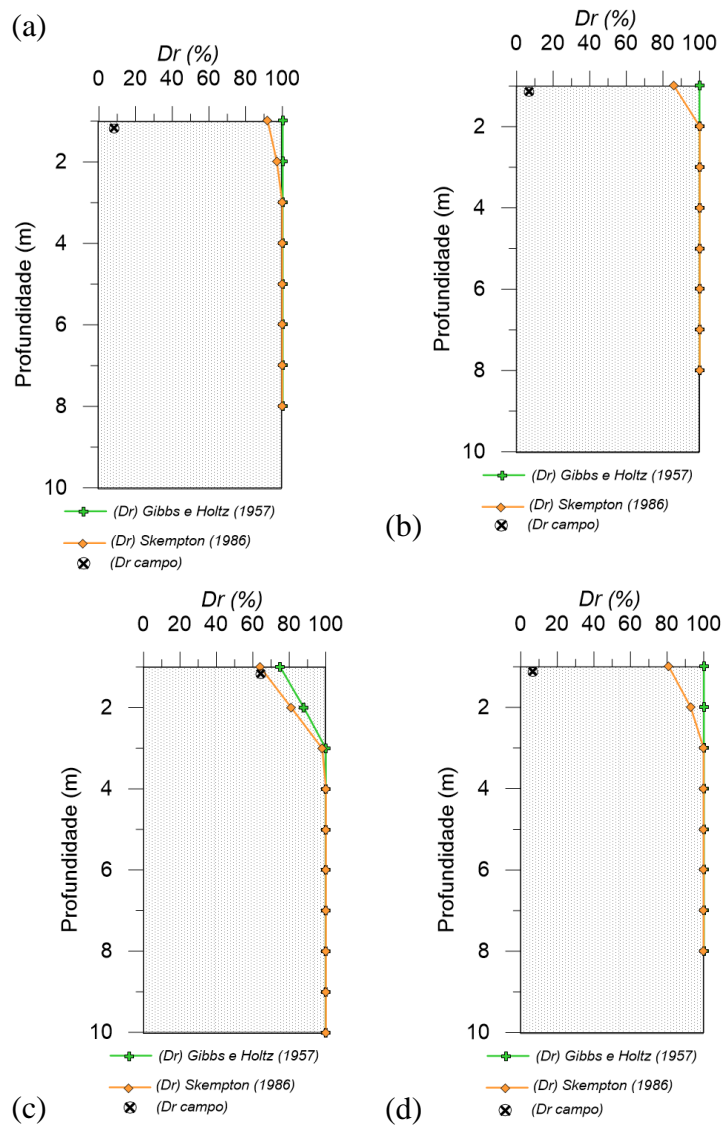


Figura 7 – Densidade relativa calculada e determinada pelos dois métodos: (a) Pórtico; (b) PAV 4; (c) CIDEC; e (d) PAV 6

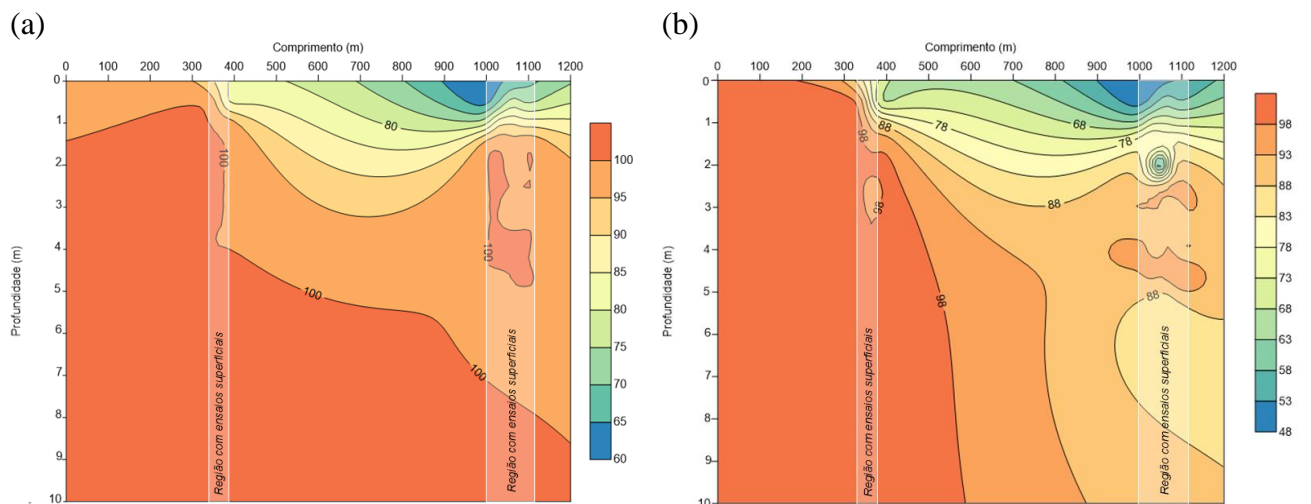


Figura 8 – Estimativa da distribuição de D_r para o perfil longitudinal A pela formulação: (a) Gibbs e Holtz (1957); e (b) Skempton (1956)

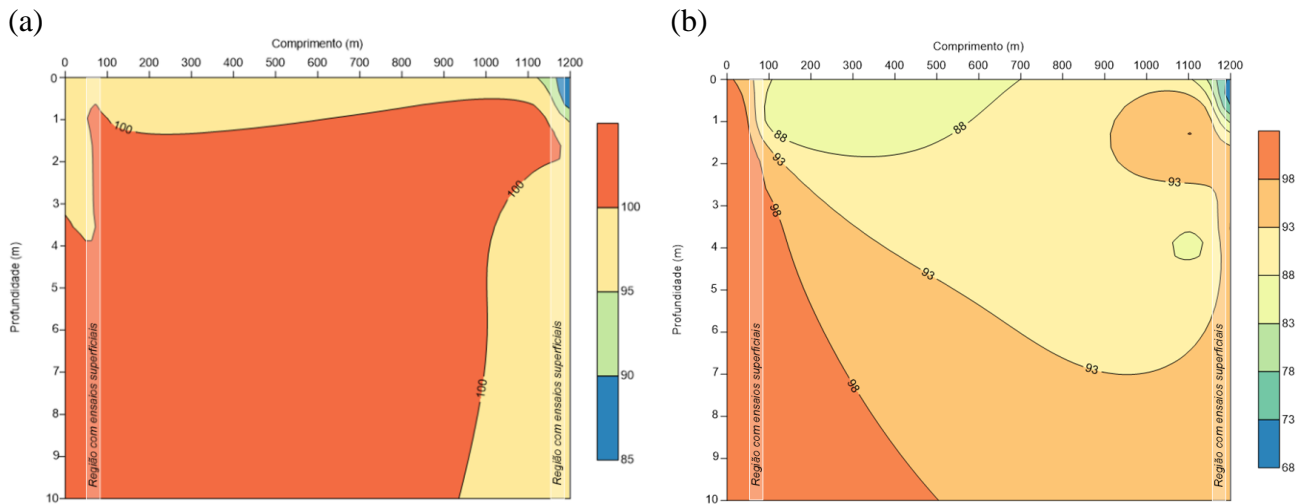


Figura 8 – Estimativa da distribuição de D_r para o perfil longitudinal B pela formulação: (a) Gibbs e Holz (1957); e (b) Skempton (1956)

5. Conclusões

Este trabalho dá continuidade a um estudo anterior que, com o apoio da PROINFRA-FURG, organizou os dados de sondagens PST do Campus Carreiros da FURG em um ambiente SIG. A partir dos dados e dos dois perfis longitudinais obtidos para o campus, localizado no estado município de Rio Grande, na Planície Costeira do Rio Grande do Sul, foram realizadas coletas em quatro pontos para determinação do peso específico natural do solo por meio do ensaio de frasco de areia. Além disso, nestes quatro locais foram coletadas amostras deformadas para a realização de ensaios de caracterização geotécnica tradicional e para determinação dos índices de vazios máximos e mínimos.

Os resultados de caracterização geotécnica indicaram alta similaridade entre os solos estudados, com predominância de areia e comportamento não-plástico. Contudo, ao comparar a densidade relativa determinada em campo com a estimada pelas fórmulas clássicas da literatura, observou-se correspondência para apenas um dos quatro pontos analisados. Entende-se que a discrepância nos demais pontos se deve ao fato de as amostras usadas para a determinação do peso específico natural do solo terem sido coletadas em camadas muito superficiais, onde a baixa tensão efetiva tende a subestimar esse valor, elevando as estimativas de densidade relativa.

Uma contribuição importante deste estudo é evidenciar que, para a adequada estimativa de parâmetros geotécnicos, é imprescindível a determinação, com a adequada precisão, de outros parâmetros geotécnicos necessários para a estimativa. Como continuidade a este trabalho, sugere-se a realização de novos ensaios geotécnicos, incluído coleta de amostras em profundidades maiores, a fim de aprimorar a precisão das estimativas de densidade relativa e, em etapas futuras, avaliar propriedades derivadas, como por exemplo, o ângulo de atrito.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6457. Solo – Preparação das amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade*. Rio de Janeiro. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6459. Solo – Determinação do limite*

de liquidez. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6484. Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaios. Rio de Janeiro. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508. Grãos de solo que passam na peneira 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180. Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181. Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7185. Solo – Determinação da massa específica aparente, in situ, com emprego de frasco de areia. Rio de Janeiro. 2016.

DÉCOURT, L. *The Standard Penetration Test. State-of- the-art Report.* Proceedings of the XII ICSMFE, Rio de Janeiro, v. 4, p. 2405-2416. 1989.

GIBBS, H. J.; HOLTZ, W. G. *Research on determining the density of sands by spoon penetration testing.* Proceedings of the 4th Int. Conf. Soil Mech. Found. Ebg., London, v. 1, p. 35 – 39. 1957.

LIMA, L. G.; PARISE, C. K. *A evolução morfológica e estratigráfica de uma barreira transgressiva/regressiva na planície costeira do Rio Grande do Sul.* Geosciences = Geociências, v. 39, n. 3, p. 709 – 725. 2020.

ODEBRECHT, E. *Medidas de energia no ensaio SPT.* Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 230 p. 2003.

PINTO, C. S. *Curso Básico de Mecânica dos Solos.* Volume 3. São Paulo: Oficina de Textos, 367 p. 2006.

RETZLAFF, A. S.; ALONSO, V. V.; CAMARGO, K. R.; ROCHA, R. G.; BASTOS, C. A. B. *Construção e interpretação de um SIG de sondagens de simples reconhecimento com circulação de água realizadas junto à FURG.* Anais do XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG, Campinas/SP. 2022.

VILLWOCK, B. J.; TOMAZELLI, L. J. *Holocene coastal evolution in Rio Grande do Sul, Brazil.* Quaternary and South America and Antartica Peninsula, p. 283 – 296. Taylor & Francis Group. 2022.