

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
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Interpretação dos Resultados de Ensaios SPT e CPTu Realizados no Município de Biguaçu – SC

Gabriel Fernando Costa

Graduando em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, Brasil, gabrielf3@gmail.com

Bianca de Córdova Caetani

Graduanda em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, Brasil, bibicaetani@gmail.com

Jade Jacomini de Jesus

Graduanda em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, Brasil, jade.jacomini@gmail.com

Naloan Coutinho Sampa

Professor, UFSC, Florianópolis, Brasil, naloan.sampa@ufsc.br

Paulo Eduardo Obadovski Alves

Engenheiro Civil, CGT Eletrosul - Eletrobras, Florianópolis, Brasil, p.obadovski@gmail.com

RESUMO: Um programa de investigação geotécnica, que inclui os ensaios de campo e de laboratório, forneceu os dados utilizados neste artigo para classificar o solo, determinar os principais parâmetros da camada argilosa e estabelecer correlações entre medidas de CPTu e SPT. As três abordagens diferentes - descrição do material no ensaio SPT, índice de classificação do material (I_c) e ábacos de classificação - utilizadas para a classificar o subsolo convergem na delimitação das camadas e na identificação dos seus respectivos materiais. Os parâmetros de compressibilidade e de resistência foram apresentados e discutidos, assim como a história de tensões e sensibilidade da argila, permitindo concluir que a argila é não sensível e apresenta a consistência mole a muito mole, baixo peso específico, elevada compressibilidade, elevado teor de umidade e elevado índice de vazios. Com base no conceito de energia no SPT, os valores da resistência dinâmica (q_d) e da resistência não drenada (s_u) foram calculados e comparados com os valores estimados pelas correlações empíricas e através de CPTu. Valores de s_u estimados por meio de conceito de energias e da correlação empírica apresentam a mesma ordem de grandeza, entretanto, boas correlações entre medidas de CPTu e SPT foram observadas somente em análises individuais dos resultados. Dispersões observadas nas correlações são atribuídas à variabilidade do solo e à realização dos ensaios SPT e CPTu em épocas diferentes. Os resultados e as conclusões são relevantes e recomendados para projetos preliminares de obras na região de Biguaçu-SC.

PALAVRAS-CHAVE: Solos Moles, SPT, CPTu, Caracterização Geotécnica, Correlações, Biguaçu.

ABSTRACT: A geotechnical investigation program, which includes field and laboratory tests, provided the data used in this paper to classify the soil, determine the main parameters of the clay layer, and establish correlations between CPTu and SPT measurements. The three different approaches - material description in the SPT test, material classification index (I_c) and classification abacuses - used for the classification of the subsoil converge in defining the layers and identifying their respective materials. The compressibility and strength parameters were presented and discussed, as well as the stress history and sensitivity of the clay, allowing the conclusion that the clay is non-sensitive and presents soft to a very soft consistency, low specific weight, high compressibility, high moisture content and high void ratio. Based on the concept of energy in the SPT, the values of dynamic strength (q_d) and undrained shear strength (s_u) were calculated and compared with the values estimated by empirical correlations and through CPTu. Values of s_u estimated by means of the concept of energy and the empirical correlation present the same order of magnitude, however, good correlations between CPTu and SPT measurements were observed only in individual analyses of the results. Dispersions seen in the correlations are attributed to soil variability and to the SPT and CPTu tests



being carried out at different times. The results and conclusions are relevant and recommended for preliminary construction projects in the region of Biguaçu-SC.

KEYWORDS: Soft Soils, SPT, CPTu, Geotechnical Characterization, Correlations, Biguaçu.

1 Introdução

O Standard Penetration Test (SPT) é um dos meios de investigação geotécnica mais popular e rotineiro no Brasil e no mundo em razão da sua simplicidade, robustez, baixo custo e a experiência acumulada ao longo do tempo. Os seus resultados são largamente utilizados para a classificação do subsolo, identificação da consistência e compacidade de solos e estimativa dos parâmetros geotécnicos de interesse.

Apesar da sua popularidade, os resultados da sondagem SPT apresentam uma certa variabilidade relacionada às perdas de energia – atrito nas cordas e roldanas, mau contato das superfícies, desalinhamento entre as superfícies, reflexões nas luvas, etc. Em consequência, a eficiência do sistema é prejudicada de modo que a energia potencial aplicada não seja totalmente convertida em energia cinética, de acordo com Schnaid e Odebrecht (2012).

Odebrecht (2003), Odebrecht et al. (2005), Schmertmann e Palacios (1979) realizaram medições locais de energia para analisar a eficiência do golpe de martelo sobre a haste de sondagem. Schnaid e Odebrecht (2012) realçaram a importância desses estudos em termos do aumento do grau de confiabilidade do ensaio e da acurácia no uso de correlações baseadas em SPT.

Não obstante as vantagens obtidas com a consideração do conceito de energia, a prática atual de engenharia geotécnica baseia-se essencialmente no uso das correlações empíricas para determinar os parâmetros de interesse em função do N_{SPT} . Essas correlações formuladas em condições particulares e específicas são geralmente extrapoladas na prática, sendo que esse procedimento nem sempre é feito de forma correta (Schnaid e Odebrecht, 2012).

Como solução para o uso eficiente das correlações empíricas, assim como para a análise da variabilidade do solo e a dispersão de valores de N_{SPT} , vários autores recomendam comparar os valores dos parâmetros estimados empiricamente através do N_{SPT} com os determinados através das medidas de outros ensaios. Essa recomendação faz-se necessária, principalmente, em solos argilosos, onde CPTu (piezocone penetration test) é utilizado para a determinação da estratigrafia de perfis de solos e das propriedades dos materiais, como também para a previsão de capacidade de carga.

Com base nos resultados das investigações geotécnicas, o presente artigo se propõe a classificar o solo do Município de Biguaçu-SC e estabelecer padrões de comportamento e relações entre os parâmetros estimados, considerando o conceito de energia na interpretação dos resultados de SPT.

2 Conceito Teórico

Os princípios aplicados no conceito de energia no SPT estabelecem que a variação ou a diferença de energia gravitacional do martelo e da haste (ΔEPG_{m+h}) pode ser calculada a partir da Equação 1.

$$\Delta EPG_{m+h} = (H + \Delta\rho)M_m g + \Delta\rho M_h g \quad (1)$$

A Equação 2, referente à energia potencial gravitacional do sistema ($\Delta EPG_{m+h}^{\text{sistema}}$), incorpora os fatores de eficiência propostos por Odebrecht et al. (2005) com base nas perdas que ocorrem durante o processo de cravação.

$$\Delta EPG_{m+h}^{\text{sistema}} = \eta_3 [\eta_1 (H + \Delta\rho)M_m g + \eta_2 (\Delta\rho M_h g)] \quad (2)$$

A partir da Equação 2 e considerando a conversão da energia do amostrador para o trabalho, determina-se a força dinâmica de reação do solo (F_d) através da Equação 3, com possibilidade de aplicação para a estimativa dos parâmetros de resistência do solo ou da capacidade de carga de estacas.



$$F_d = \Delta EPG_{m+h}^{\text{sistema}} / \Delta \rho = \frac{\eta_3 [\eta_1 (H + \Delta \rho) M_m g + \eta_2 (\Delta \rho M_h g)]}{\Delta \rho} \quad (3)$$

Para solos arenosos, resultados apresentados por Schnaid et al. (2017) mostraram boa correlação entre a resistência à penetração dinâmica, q_d estimada por meio da Equação 4 e a resistência de ponta de CPT, q_t .

$$q_d = \frac{F_d}{A_c} \quad (4)$$

Para solos coesivos, a expressão de capacidade de carga de estacas tem sido associada ao conceito de energia no SPT a fim de calcular a resistência não drenada (s_u). Esse cálculo requer primeiramente a determinação da força estática (F_e) em função da F_d , como mostra a Equação 5. Devido à diferença de mecanismo entre as cravações estáticas e dinâmicas, adota-se um fator de incremento de carga (v) proporcional à resistência estática e dependente do tipo de solo na faixa de 1,0 a 2,1 (Hermansson e Grävare, 1978).

$$F_e = \frac{F_d}{v} = \frac{\eta_3 [\eta_1 (H + \Delta \rho) M_m g + \eta_2 (\Delta \rho M_h g)]}{\Delta \rho} \cdot \frac{1}{v} \quad (5)$$

Em situações onde a composição martelo e haste penetra na argila normalmente adensada somente pela ação do peso próprio, a Equação 5 é resumida na Equação 6, considerando que os fatores de eficiência $\eta_1 = \eta_2 = \eta_3 = 1$ e a altura de queda, $H = 0$. Assume-se também que $v = 1$ para representar a condição em que a velocidade de penetração do amostrador é muito inferior à velocidade de penetração do amostrador sob impacto de golpes.

$$F_e = \frac{F_d}{v} = \frac{(M_m + M_h) g \Delta \rho}{\Delta \rho} \cdot \frac{1}{v} \quad (6)$$

Por fim, a Equação 7, baseada no conceito de energia no SPT, pode ser utilizada para estimar a resistência não drenada, s_u de solos argilosos.

$$s_u = \frac{F_e - \gamma L A_b}{(N_c A_b + \alpha A_l)} \quad (7)$$

onde $\Delta \rho = 30 \text{ cm}/N_{\text{SPT}}$ é a penetração permanente do amostrador no solo, H é a altura de queda do martelo, g é a aceleração da gravidade, M_m é a massa do martelo, M_h é a massa da haste. $\eta_1 = 0,76$, $\eta_2 = 1$ e $\eta_3 = 1 - 0,0042l$ são perdas do sistema relacionadas ao golpe, hastes e ao longo do sistema, respectivamente. A_c é a área da seção transversal do penetrômetro, A_p e A_l são áreas de ponta e lateral do amostrador, respectivamente, γ é o peso específico natural, L é a profundidade do ensaio, α é o coeficiente de adesão do solo e N_c é o fator de capacidade de carga.

Schnaid e Odebrecht (2012) recomendam determinar os valores de α e N_c localmente. Caso não seja possível essa determinação, Odebrecht (2003) apresenta gráficos provenientes de estudos anteriores que possibilitam estimar valores de α na faixa de 0,23 a 1,25 em função do índice de plasticidade ou da resistência não drenada.

Visando posteriores comparações, duas expressões largamente utilizadas para a estimativa dos valores da resistência não drenada são demonstradas nas Equações 8 e 9. A Equação 8 foi proposta por de Mello (1971) para estimar resistência não drenada em função de N_{SPT} , ao passo que a Equação 9 calcula (s_u) com base nas medições de CPTu. Salienta-se que Schnaid e Odebrecht (2012) recomendam adotar valores do fator de capacidade de carga (N_{kt}) na faixa de 10 a 20, quando não se dispõe de outros ensaios que permitem a sua determinação.

$$s_u = 10 N_{SPT} \text{ entre } 0,4 \text{ a } 20 \text{ (recomendado)} \quad (8)$$

$$s_u = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{N_{kt}} \quad (9)$$

3 Descrição do Local de Estudo e Investigações Geotécnicas

A área da região em análise é de aproximadamente 113.000 m² e fica no Município de Biguaçu-Santa Catarina, a 200 metros da rodovia SC 408 (Figura 1). O local possui relevo plano, com formação geológica de planícies fluviais. À semelhança de grande parte da planície litorânea brasileira, o solo da região é caracterizado como solo mole de origem aluvial, resultante da ação de fluxos gravitacionais e aluviais de transporte de material das vertentes.

O comportamento do subsolo foi investigado através dos ensaios de caracterização física, 8 ensaios de adensamento, 10 ensaios CPTu com medições de dissipação do excesso de poropressão, além de 40 ensaios SPT realizados em diferentes fases da obra.



Figura 1. Localização da Obra (Google Earth).

4 Resultados

Várias campanhas dos ensaios SPT foram realizadas em diferentes fases da obra com o intuito de classificar os materiais, traçar os perfis geotécnicos do subsolo e determinar os parâmetros de projeto. Em razão do grande volume de dados, este item concentra-se somente na interpretação dos resultados dos ensaios SPT realizados em 2005 e dos CPTu realizados em 2011. Convém salientar que os ensaios de SPT e CPTu foram realizados antes e após a execução do aterro de espessura variável entre 1,5 m e 3 m, respectivamente.

A Figura 2 ilustra a variação N_{SPT} , q_t , f_s e do índice de classificação do material (I_c) ao longo da profundidade. Registra-se que todos os resultados dos ensaios de SPT realizados em 2005 estão na Figura 2a, sendo que 6 desses ficam próximos aos furos de CPTu, razão pela qual foram destacados na Figura 2b. De modo geral, a proximidade entre os furos de SPT e CPTu ocorre da seguinte forma: SPT01 e CPTu02, SPT02 e CPTu04, SPT04 e CPTu03, SPT05 e CPTu05, SPT07 e CPTu6, SPT14 e CPTu08.

Os resultados de SPT identificaram na camada superficial de espessura variável entre 2,5 m e 8,0 m, a presença de argila arenosa saturada, pouco siltosa e com presença localizada de matéria orgânica. Ademais, a argila apresenta consistência mole a muito mole (N_{spt} entre 0 e 10), além de baixo peso específico, elevada compressibilidade, elevado teor de umidade e elevado índice de vazios (Tabela 1) observados nos resultados laboratoriais. A espessura da camada seguinte, composta pela mistura de areia e frações de silte, argila pedregulhos e matações, varia entre 2,0 m e 5,0 m. A camada mais profunda, que se estende até maiores profundidades, é formada essencialmente pela mistura de areia e alteração de rocha.

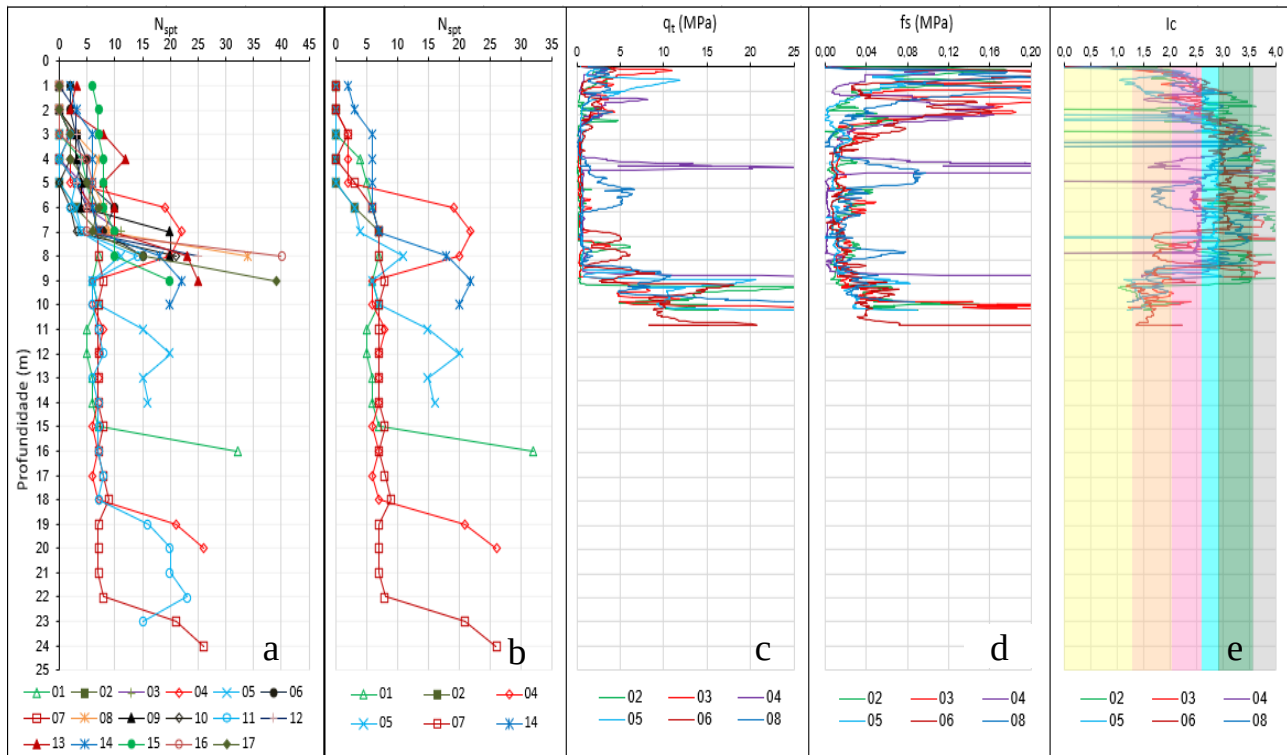


Figura 2 – Variação de N_{SPT} , q_t , f_s e I_c com a profundidade.

Tabela 1 – Principais parâmetros da argila mole.

Parâmetros	Média	Desvio Padrão	Faixa de Variação
Umidade natural - w (%)	98,26	16,14	73,90 – 120,90
Peso específico natural - γ_n (kN/m ³)	14,19	0,68	13,52 – 15,54
Índice de vazios inicial - e_0	2,64	0,33	2,10 – 3,02
Tensão de pré-adensamento - σ'_{vm} (kN/m ²)	35,38	15,88	11,0 – 52,0
Razão Sobre Adensamento - OCR	2,42	1,37	0,59 – 3,96
Índice de compressão - C_c	0,95	0,18	0,74 – 1,26
Índice de recompressão - C_r	0,22	0,13	0,08 – 0,42

Os resultados de CPTu corroboram a descrição de SPT e identificam a presença de uma camada menos resistente abaixo do aterro, com valores de q_t e f_s menores que 2 MPa e 50 kPa, respectivamente. Classifica-se o solo dessa camada como argila e argila siltosa por apresentar valores de I_c maiores que 3 e valores do parâmetro de poropressão (B_q) e do excesso de poropressão (u_2) dentro da faixa esperada para esses solos.

De forma complementar, os ábacos de identificação de comportamento típico de solos, propostos por Robertson (1990), foram utilizados para classificar os solos, considerando camadas de 1 m de espessura. Os ábacos ilustrados nas Figuras 3 e 4 relacionam o solo do aterro à mistura de areia, areia siltosa e silte arenosa, divergindo assim da classificação da argila siltosa, segundo os resultados do ensaio SPT realizados após a execução do aterro. Para as demais camadas, foi observada pequena divergência na classificação dos solos com base nos ábacos e valores de I_c e SPT, o que é aceitável devido às particularidades intrínsecas a cada uma das abordagens, além de que às classificações do SPT são feitas de forma discreta a cada 1 m e as do CPTu de forma contínua.

Com relação à sensibilidade e história de tensões dos materiais, é possível observar em ambas as figuras a indicação de comportamentos não sensitivos, como era esperado para solos sedimentares de origem aluvial. Há uma certa dispersão dos pontos, contudo a maioria dos pontos enquadra-se nas regiões com comportamentos de solos com baixo nível de pré-adensamento. Solos das camadas abaixo de 8 m tendem a apresentar comportamentos de solos normalmente adensamentos, como ilustra a figura 3.

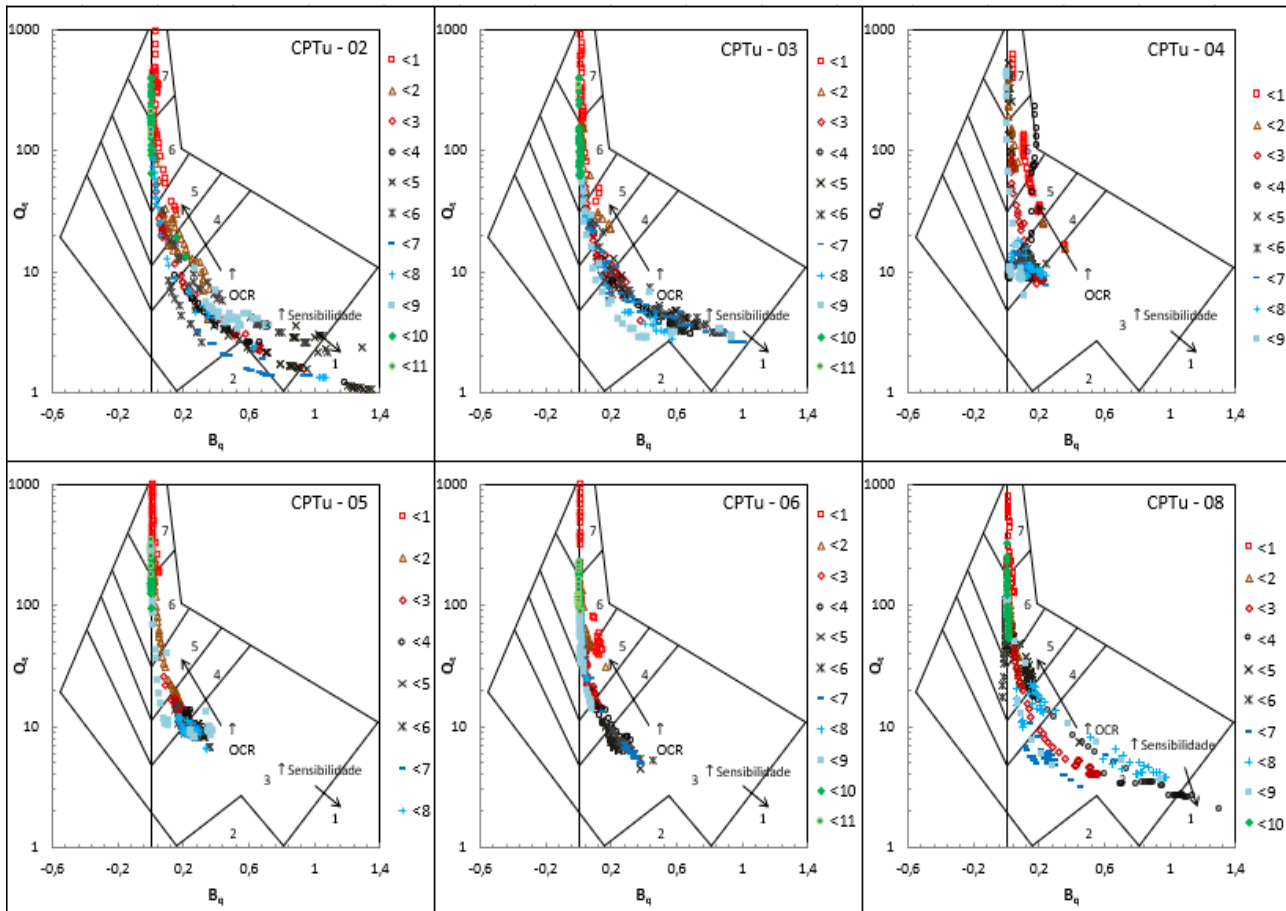


Figura 3 – Classificação dos solos em camadas de 1 m por meio do ábaco $Q_t \times B_q$.

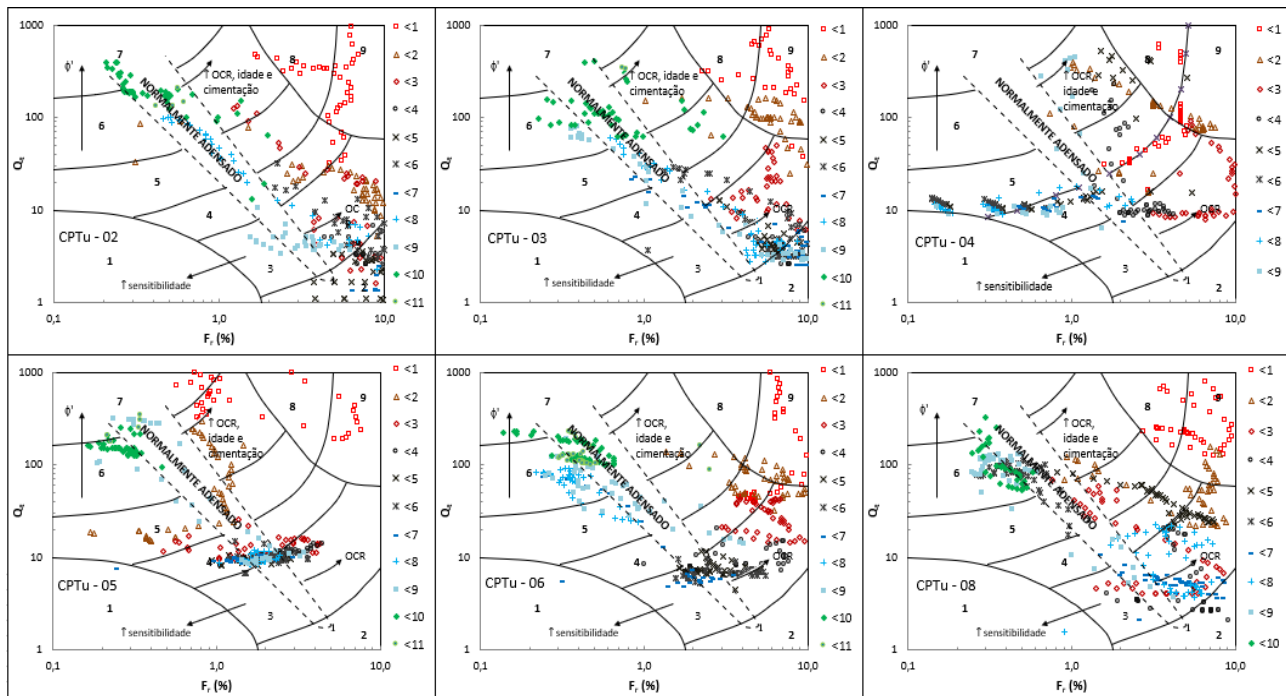


Figura 4 – Classificação dos solos em camadas de 1 m por meio do ábaco $Q_t \times F_r$.



Uma vez identificada a camada predominantemente argilosa, buscou-se estabelecer relações entre as medidas de SPT e de CPTu com o intuito de investigar padrões de comportamento que possibilitam formulações de correlações empíricas. As Figuras 5a-5f relacionam $q_t \times N_{60}$, $q_t \times (q_t/\text{Pa})/N_{60}$, $q_t \times q_d$, $f_s \times N_{60}$, $f_s \times (q_t/\text{Pa})/N_{60}$ e $f_s \times q_d$, respectivamente. As legendas apresentadas nas figuras referem-se à numeração dos SPTs utilizados.

De modo geral, a representação dos resultados no mesmo gráfico exibe grande dispersão, impossibilitando a normalização dos mesmos para estabelecer uma relação única entre os parâmetros. Boas correlações foram observadas somente em comparações individuais. Em parte, acredita-se que a dispersão deve-se ao aumento da resistência da argila durante o adensamento primário que se iniciou com a execução do aterro. Vale salientar que os resultados de SPT foram obtidos em 2005 e representam a condição de uma argila menos resistente em relação a de 2011 medida por CPTu, 4 anos após a execução do aterro. Por outro lado, a variabilidade do solo e a distância entre os furos de SPT e CPTu podem influenciar também na dispersão. As dispersões observadas nas Figuras 5c e 5d eram esperadas visto que a resistência dinâmica (q_d) é mais apropriada para análise de comportamento de solos granulares.

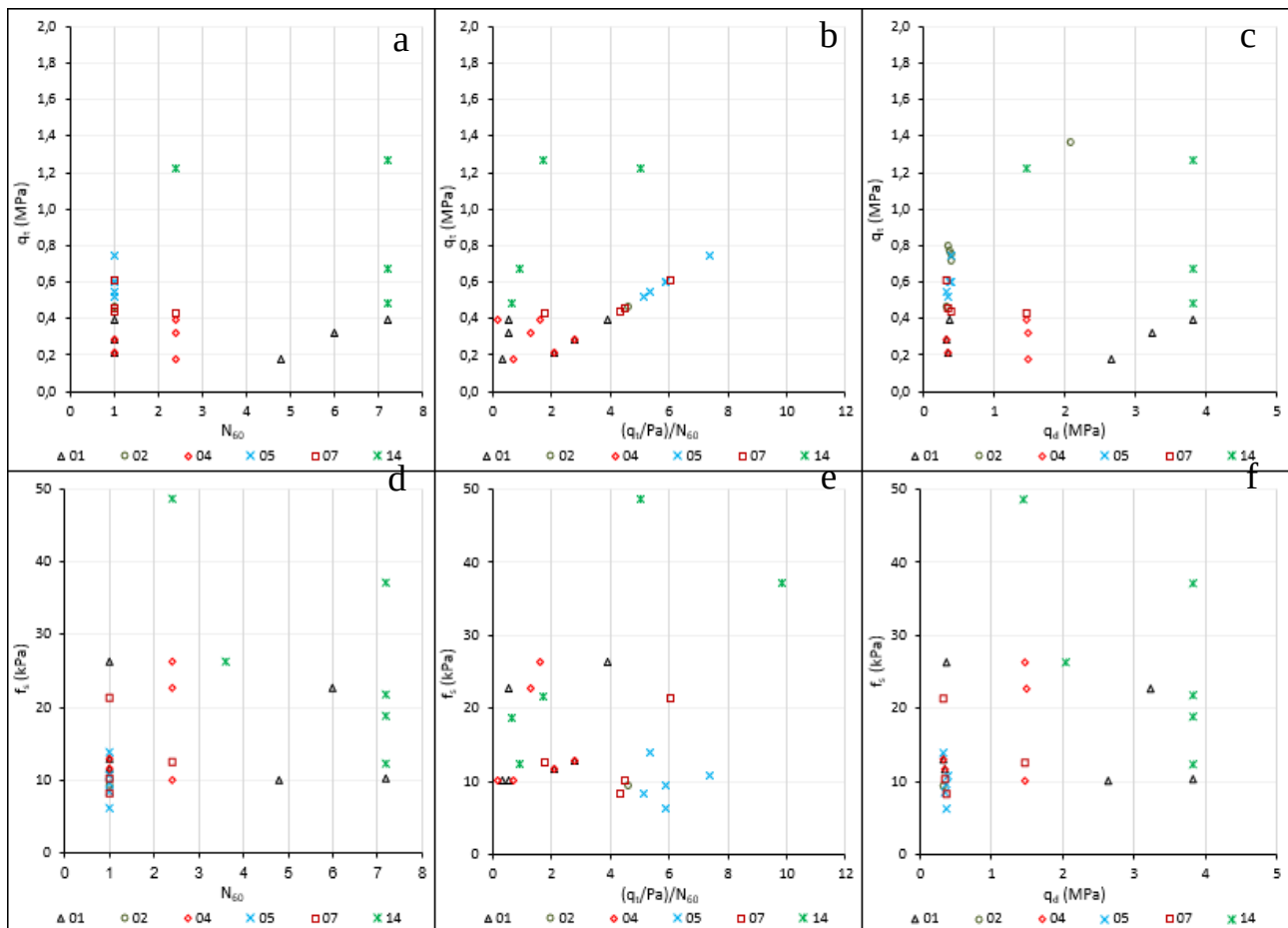


Figura 5 – Relações entre os grandezas medidas nos ensaios SPT e CPTu.

Boa correlação entre $q_d \times N_{SPT}$ e entre os valores de s_u estimados a partir das Equações 7 e 8 são mostradas nas Figuras 6a e 6b, respectivamente. Para o cálculo de s_u através da Equação 7, adotou-se $\alpha = 0,9$ e $N_c = 9$ compatíveis com a faixa de valor esperado para argilas do mesmo comportamento. A equação apresentada na Figura 6a pode ser uma alternativa à Equação 4 para a estimativa direta de q_d .

A relação entre os valores de s_u calculados com base nas Equações 7 e 9 apresenta grande dispersão, como ilustra a Figura 5c. Como explicado anteriormente, essa dispersão pode estar relacionada ao aumento da resistência da argila com o adensamento primário, variabilidade do solo e distância entre os furos de SPT e CPTu.

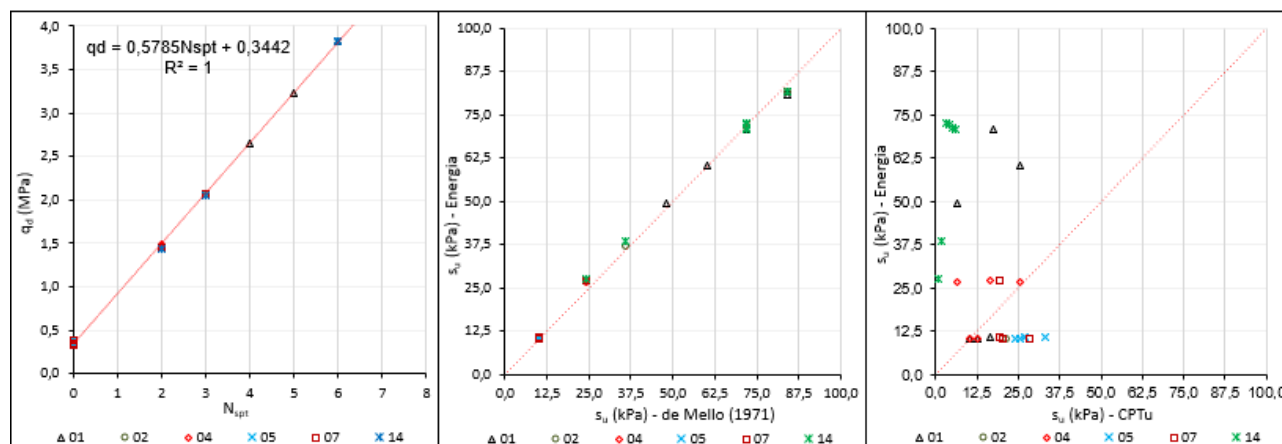


Figura 6 – Relação $q_d \times N_{SPT}$ e comparação entre valores de s_u estimados a partir de abordagens diferentes.

5 Conclusão

A partir da análise dos dados provenientes dos ensaios de campo e de laboratório, um conjunto de resultados é apresentado e discutido no artigo a fim de caracterizar os principais comportamentos do solo. A caracterização abrangeu todas as camadas, porém a maior atenção foi dada à camada da argila de baixa resistência e elevada compressibilidade.

Boas correlações e resultados com a mesma ordem de gradeza foram obtidos em comparações feitas a partir de abordagens e ensaios diferentes, o que realça a importância do uso de ensaios complementares para a classificação e análise de comportamento dos solos. Tendo em conta a dispersão observada em algumas correlações, recomenda-se estabelecer novas correlações entre as grandezas de CPTu e as de SPT medidas em solos argilosos.

Corroborando as conclusões apresentadas na literatura, CPTu é uma ferramenta adequada para investigar o comportamento de solos e as abordagens propostas a partir dos seus resultados são adequadas e de fácil uso e interpretação.

Por fim, ressalta-se que este artigo é parte de um projeto maior que visa divulgar não só os principais comportamentos do solo da região de Biguaçu, mas também apresentar os seus parâmetros para auxiliar na elaboração de projetos preliminares de futuras obras construídas na região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- De Mello, V.F.B. 1971. The standard penetration test. Proc. 4th Pan Am. Conf. Soil Mech. Found. Engng, Porto Rico, 1:1–87.
- Hermansson, I.; Grävare, C.J. (1978). Static Bearing Capacity of Piles from Dynamic Measurements. Särtyck ur Väg-och vattenbyggnaden, v. 1, pp. 8-9.
- Odebrecht, E. Medidas de energia no ensaio SPT. 230 f. Tese (Doutorado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, 2003.
- Odebrecht, E.; Rocha, M. M.; Schnaid, F.; Bernardes, G. P. Energy efficiency for standard penetration tests. ASCE, v. 131, n. 10, p. 1252-1263, 2005.
- Robertson, P.K. 1990. Soil classification using the cone penetration test. Can. Geotech. J., 27(1):151-158.
- Schmertmann, J. H.; Palacios, A. Energy dynamics of SP JT. Geotech. Eng. Div., ASCE, v. 105, p. 909-926, 1979.
- Schnaid, F.; Odebrecht, E. Ensaios de campo e suas aplicações à engenharia de fundações. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- Schnaid, F.; Lourenço, D.; Odebrecht, E. Interpretation of static and dynamic penetration tests in coarse-grained soils. Géotechnique Letters 7, 1–6, 2017.