

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

AQUISIÇÃO DE PARÂMETROS GEOTÉCNICOS ATRAVÉS DE CORRELAÇÕES EMPÍRICAS BASEADAS EM DADOS DE ENSAIOS DE CONE (CPTU)

Carolina de Araújo Gusmão

Doutoranda em Engenharia, Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil, carolina.argusmao@usp.br

Willians Perley Alexandre da Silva

Graduando em Engenharia Civil, Escola Politécnica UPE, Recife, Brasil, wpas@poli.br

Alexandre Duarte Gusmão

Professor Associado, Escola Politécnica da UPE, Recife, Brasil, alexandreduarteagusmao@gmail.com

RESUMO: O ensaio de penetração do cone (CPTU) é um método de investigação geotécnica *in situ*, que mede simultaneamente a resistência da ponta do cone q_c , o atrito lateral f_s , e a pressão neutra u_2 em profundidade. Nos últimos 50 anos, diversas metodologias foram desenvolvidas na determinação de correlações empíricas de dados do ensaio CPTU com outros parâmetros geotécnicos. Nesse contexto, o presente trabalho desenvolveu uma planilha aberta à comunidade científica que, a partir dos dados de entrada obtidos através do ensaio CPTU, estimou uma série de parâmetros geotécnicos através de correlações empíricas consolidadas na literatura. Dentre os parâmetros, estão os parâmetros de resistência (resistência não drenada e ângulo de atrito), parâmetros modulares (Módulo edométrico, de cisalhamento máximo e de Young), coeficiente de empuxo, parâmetros de histórico de tensões (Tensão de pré-adensamento e OCR), condutividade hidráulica, classificação do solo, e parâmetros de compressibilidade.

PALAVRAS-CHAVE: CPTU, Piezocone, investigação geotécnica, parâmetros geotécnicos.

ABSTRACT: The cone penetration test (CPTU) is an in-situ geotechnical investigation method, which simultaneously provides the parameters of cone tip resistance q_c , sleeve friction f_s , and pore pressure u_2 as depth functions. Several approaches have been developed to correlate the CPTU data with several other geotechnical parameters determined previously through laboratory tests. In this context, the present work developed a spreadsheet available for the scientific community that, from the input data obtained through the CPTU test, estimates a series of geotechnical parameters through empirical correlations consolidated in the literature. Among the parameters that can be obtained by previously proposed empirical correlations are the pre-consolidation ratio (OCR), undrained strength (S_u), effective friction angle (ϕ), soil type, coefficient of consolidation (C_v) and hydraulic conductivity (k).

KEYWORDS: CPTU, Piezocone, geotechnical investigation, geotechnical parameters.

1 Introdução

O ensaio de penetração do cone (CPTU) é um método de investigação geotécnica *in situ* que foi desenvolvido no final da década de 1970. Consiste na cravação de uma ponteira cônica no maciço a velocidade constante de 2 cm/s. No Brasil, o ensaio é realizado com base na norma NBR 12069/1991 (Solo - Ensaio de penetração de cone 'in situ' - CPT). A partir da ação de um pistão hidráulico, o instrumento é penetrado no solo e a cada 2 cm de profundidade é feita aquisição automática dos dados de resistência da ponta do cone q_c , de resistência ao atrito lateral f_s , e a sobrepressão neutra u_2 (Queiroz, 2013).

A partir dos dados obtidos, é possível obter através de correlações empíricas diversos parâmetros geotécnicos referentes a histórico de tensões, resistência ao cisalhamento, empuxo e módulos de compressibilidade. Além disso, associado à ensaios de dissipação de poropressão em diferentes profundidades, é possível obter coeficiente de adensamento vertical e horizontal, e a condutividade hidráulica (Karlsrud *et al.*, 2005). O ensaio de penetração do cone não permite amostragem do solo, tornando a investigação geotécnica



realizada exclusivamente através do ensaio CPTU limitada quando considerado o sistema unificado de classificação do solo (USCS) (Ku, Juang and Ou, 2010). Desse modo, diversas metodologias foram desenvolvidas com o propósito de obter correlações empíricas robustas de classificação de solos a partir dos parâmetros fornecidos pelo ensaio CPTU (Schneider *et al.*, 2008).

O presente trabalho tem como objetivo compartilhar com a comunidade científica uma planilha automatizada que, a partir dos parâmetros obtidos diretamente pelo ensaio de penetração de cone, gera uma série de parâmetros a partir de correlações empíricas consolidadas na literatura, bem como gráficos comparativos de parâmetros em função da profundidade e ábacos de classificação do solo.

2 Metodologia

2.1 Correlações empíricas

Diversas correlações empíricas foram utilizadas baseadas em metodologias consolidadas na literatura para a obtenção dos parâmetros geotécnicos a partir dos parâmetros obtidos no ensaio de penetração do cone. Primeiramente, a resistência de ponta q_c obtida através do ensaio de CPTU foi corrigida através da Equação 1, sendo q_t a resistência de ponta corrigida, q_c a resistência de ponta, u_2 a poropressão e a a razão de área da ponteira na base do cone e área total. O peso específico do solo foi utilizado direta ou indiretamente na determinação da maioria dos parâmetros geotécnicos, tendo sido estimado através da resistência ao atrito lateral, como mostra a Equação 2 (Mayne, 2014), sendo γ_t peso específico do solo (kN.m^{-3}), γ_w peso específico da água (kN.m^{-3}), f_s resistência ao atrito lateral (kPa) e σ_{atm} (kPa) a tensão de referência equivalente à pressão atmosférica.

$$q_t (\text{MPa}) = q_c + u_2 \times (1 - a) \quad (1)$$

$$\gamma_t (\text{kN.m}^{-3}) = \gamma_w \times (1,22 + 0,15 \times \ln(100 \times \frac{f_s}{\sigma_{atm}} + 0,01)) \quad (2)$$

A partir do peso específico do solo e do nível d'água do terreno, foram calculadas as tensões totais e efetivas em função da profundidade do maciço, como descrito nas Equações 3 (tensão total) e 4 (tensão efetiva), sendo σ_{v0} tensão total (kPa), σ'_{v0} tensão efetiva (kPa), z profundidade (m) e z_w profundidade do nível d'água (m).

$$\sigma_{v0} (\text{kPa}) = \gamma_t \times z \quad (3)$$

$$\sigma'_{v0} (\text{kPa}) = \gamma_t \times z - \gamma_w \times (z - z_w) \quad (4)$$

2.1.1 Obtenção de parâmetros normalizados

Após o cálculo do peso específico do solo e das tensões totais e efetivas, os parâmetros de resistência de atrito lateral, resistência de ponta e poropressão obtidos a partir do ensaio CPTU foram normalizados a partir das equações 5, 6, 7, 8 e 9, que estimam, respectivamente, resistência de atrito lateral normalizada F_r (%); resistência de atrito de ponta normalizada Q_{tn} ; coeficiente dependente do tipo de solo n ; índice de tipo de comportamento de solo I_c ; e poropressão normalizada B_q (Robertson, 2009).

$$F_r = 100 \times \left(\frac{f_s}{(q_t - \sigma_{v0})} \right) \quad (5)$$

$$Q_{tn} = \frac{(q_t - \sigma_{v0}) / \sigma_{atm}}{\left(\frac{\sigma'_{v0}}{\sigma_{atm}} \right)^n} \quad (6)$$

$$n = 0,381 \times I_c + 0,05 \times \left(\frac{\sigma'_{v0}}{\sigma_{atm}} \right) - 0,15 \quad (7)$$



$$I_c = \sqrt{(3,47 - \log Q_{tn})^2 + (1,22 + \log F_R)^2} \quad (8)$$

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (9)$$

Foi necessário realizar uma iteração a partir das equações 6, 7 e 8 para obter os referidos parâmetros, utilizando n=1 no cálculo do valor inicial de I_c . A iteração foi realizada a partir da linguagem VBA (*Visual Basic for Applications*) no software *Microsoft Excel*. O código está exibido abaixo na Figura 1.

```

Sub SolveMacro()
    '
    ' Teste Macro
    '
    Dim i As Long
    For i = 16 To 3000
        'Limpar o Solver
        SolverReset
        SolverOk SetCell:="$P$5" & i, MaxMinVal:=3, ValueOf:=0, ByChange:="$Q$5" & i & ":$R$5" & i, _
            Engine:=1, EngineDesc:="GRG Nonlinear"
        SolverSolve (True)
    Next i
End Sub
  
```

Figura 1. Código desenvolvido para solucionar iteração das Equações 6, 7 e 8.

2.1.2 Obtenção de parâmetros de resistência

A partir das tensões totais e efetivas, tipo de solo, e resistência de ponta normalizada, foi estimado o ângulo de atrito φ (°) a partir da correlação (Kulhawy and Mayne, 1990) exibida na Equação 10. Como essa correlação é válida apenas para areias, foi utilizada apenas para areias e areias siltosas. Para siltes argilosos e argilas, o ângulo de atrito foi estimado a partir da correlação empírica (Mayne, 2006) apresentada na Equação 11. Vale ressaltar que a planilha foi modelada para calcular o ângulo de atrito através da Equação 9 ou 10 utilizando como parâmetro de entrada a classificação de solo obtida no item 2.2.

$$\varphi \text{ (°)} = 17,6^\circ + 11,0^\circ \times \log Q_{tn} \quad (10)$$

$$\varphi \text{ (°)} = 29,5^\circ \times \left(\frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} \right)^{0,121} \times [0,256 + 0,336 \times B_q + \log \left(\frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right)] \quad (11)$$

Já a resistência não drenada S_u (kPa) foi estimada a partir da correlação empírica (Dagger, Saftner and Mayne, 2018) exibida na Equação 12. O fator N_{kt} é estimado preferencialmente a partir de correlações com o ensaio de Palheta (Schnaid, F., & Odebrecht, 2012) e varia em função das propriedades do solo, como anisotropia de resistência, índice de rigidez e índice de plasticidade (Danziger, F. A. B., Schnaid, 2000).

$$S_u \text{ (kPa)} = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{N_{kt}} \quad (12)$$

2.1.3 Obtenção de módulos de compressibilidade

Inicialmente o módulo edométrico D' (kPa) foi estimado a partir da correlação apresentada na Equação 13 (Dagger, Saftner and Mayne, 2018).

$$D' \text{ (kPa)} = 5 \times (q_t - \sigma_{v0}) \quad (13)$$

Já o módulo de Young drenado E' (kPa) e o módulo volumétrico K' (kPa) foram calculados através das correlações exibidas nas Equações 14 e 15, respectivamente, sendo ν o coeficiente de Poisson (Dagger, Saftner and Mayne, 2018).



$$E' (kPa) = \frac{D'}{1,1} \quad (14)$$

$$K' (kPa) = \frac{E'}{3 \times (1 - 2 \times \nu)} \quad (15)$$

O módulo máximo de cisalhamento $G_{\text{máx}}$ (kPa) foi estimado a partir da massa específica do solo e da velocidade média de cisalhamento V_s (m.s^{-1}). As Equações 16 e 17 exibem, respectivamente, as correlações para obtenção de V_s e $G_{\text{máx}}$ (Dagger, Saftner and Mayne, 2018).

$$V_s (\text{m.s}^{-1}) = (10,1 \times \log q_t - 11,4)^{1,67} \times (100 \times \frac{f_s}{q_t})^{0,3} \quad (16)$$

$$G_{\text{máx}} (kPa) = \frac{E'}{3 \times (1 - 2 \times \nu)} \quad (17)$$

Já o módulo de cisalhamento G (kPa) e o índice de rigidez I_R foram calculados a partir das Equações 18 e 19 (Dagger, Saftner and Mayne, 2018).

$$G (kPa) = \frac{E'}{2(1+\nu)} \quad (18)$$

$$I_R = \frac{G}{s_u} \quad (19)$$

2.1.4 Obtenção de parâmetros de compressibilidade

Primeiramente, foram estimadas as tensões de pré-adensamento σ'_p e a razão de pré-adensamento OCR através das Equações 20 e 21. Para o cálculo da tensão de pré-adensamento, foi utilizado o fator m' , dependente do tipo de solo. O modelo já considera no cálculo de σ'_p o valor de m' correspondente ao tipo de solo a partir da classificação de solo obtida em 2.2 (Agaiby e Mayne, 2019). A Tabela 1 exibe os valores de m' e os solos correspondentes.

Tabela 1. Fator m' em função do tipo de solo (Agaiby e Mayne, 2019).

Qualidade da amostra	m'
Argila fissurada	1,10
Argila intacta	1,00
Argila orgânica	0,90
Argila sensível	0,90
Siltes	0,85
Areia siltosa	0,80
Areia	0,72

$$\sigma'_p (kPa) = 0,33 \times (q_t - \sigma_{v0})^{m'} \quad (20)$$

$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}} \quad (21)$$

Para o cálculo dos coeficientes de adensamento horizontal C_H e vertical C_V , é necessário realizar um ensaio complementar de dissipação de poropressão em profundidades específicas. A partir desse ensaio, é obtido o tempo de 50% de dissipação de poropressão t_{50} em segundos. O C_H é calculado a partir do t_{50} , do raio do cone de penetração, do fator tempo T para uma dissipação de 50%, e do índice de rigidez calculado através da Equação 19 (Dagger, Saftner and Mayne, 2018). A determinação de C_H é exibida na Equação 22. O C_V é estimado a partir do C_H e da razão K_H/K_V , que vai depender do grau de anisotropia do solo e sua determinação



é apresentada na Equação 23. O fator tempo T vai depender da posição do filtro no cone de penetração e a Tabela 2 expõe os valores de T em função da posição do filtro.

Tabela 1. Fator tempo em função da posição do filtro.

Posição do filtro	Fator tempo T para 50% de dissipação
Fuste do cone	0,069
Face do cone	0,118
Base do cone	0,245
5 raios acima da base	1,110
10 raios acima da base	1,460

$$C_H(m^2.s^{-1}) = \frac{T \times R^2 \times \sqrt{I_R}}{t_{50}} \quad (22)$$

$$C_v(m^2.s^{-1}) = \frac{K_H}{K_V} \times C_H \quad (23)$$

Finalmente, a condutividades hidráulica k é calculada a partir das Equações 24 e 25. Para um índice de comportamento do solo I (Equação 27) menor ou igual a 3,27, deve-se usar a Equação 24 para o cálculo de k. Já para um I maior que 3,27, deve-se estimar o k a partir da Equação 25 (Robertson, 1990).

$$k(m.s^{-1}) = 10^{0,952 - 3,04 \times I} \quad I \leq 3,27 \quad (24)$$

$$k(m.s^{-1}) = 10^{-4,52 - 1,37 \times I} \quad I > 3,27 \quad (25)$$

2.2 Classificação do solo

2.2.1 Ábaco de tipo de comportamento de solo a partir de parâmetros de CPTU normalizados - SBTn (Robertson 2009)

A partir dos valores de F_R e Q_m obtidos no 2.1.1 por iteração, a classificação do solo pode ser feita plotando os pontos de diferentes profundidades no gráfico exibido na Figura 2. Essa classificação a partir dos parâmetros de CPTU normalizados foi desenvolvida por (Robertson, 2009) e é chamada de SBTn. As regiões do gráfico correspondem a zonas características de diferentes tipos de solo. Desse modo, a classificação é feita correlacionando as zonas e os pontos no gráfico.

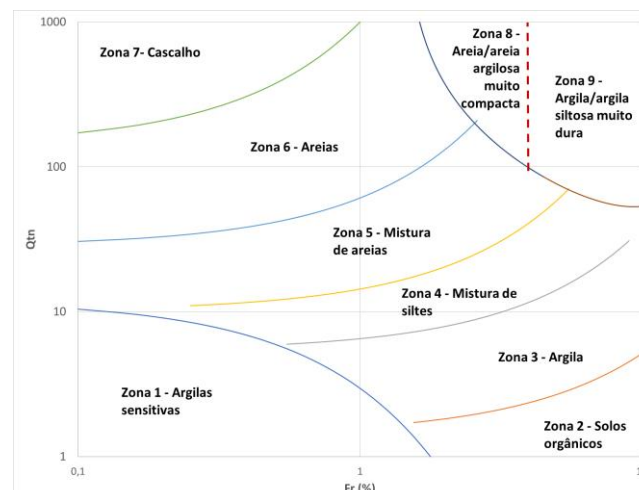


Figura 2. Ábaco de classificação do solo através do SBTn (Robertson, 2009).



2.2.2 Gráfico de tipo de comportamento de solo a partir de parâmetros de CPTU normalizados – SBTn (Robertson 1990)

A classificação do solo a partir de parâmetros obtidos pelo ensaio de CPTU também pode ser realizada através do gráfico de profundidade por um índice de tipo de solo I (Robertson, 1990). O índice I é obtido a partir dos valores de Q_{tl} e F_r , e as Equações 26 e 27 expõem as correlações para a obtenção de Q_{tl} e I. Essa metodologia de classificação de solo foi desenvolvida por Robertson, 1990. O valor de I determina o tipo de solo e o gráfico é plotado com legendas de tipos de solo para facilitar a classificação. A Figura 3 apresenta o gráfico e as legendas de classificação.

$$Q_{tl} = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \quad (26)$$

$$I = \sqrt{(3,47 - \log Q_{tl})^2 + (1,22 + \log F_R)^2} \quad (27)$$

Como essa metodologia apresenta intervalos específicos de I para os diferentes tipos de solo, possibilita uma correlação direta entre um parâmetro obtido para as diferentes camadas de solo (I) e o tipo de solo. Desse modo, essa metodologia de classificação foi utilizada na determinação dos parâmetros que possuíam como um dos parâmetros de entrada o tipo de solo (ex. Ângulo de atrito e tensão de pré-adensamento).

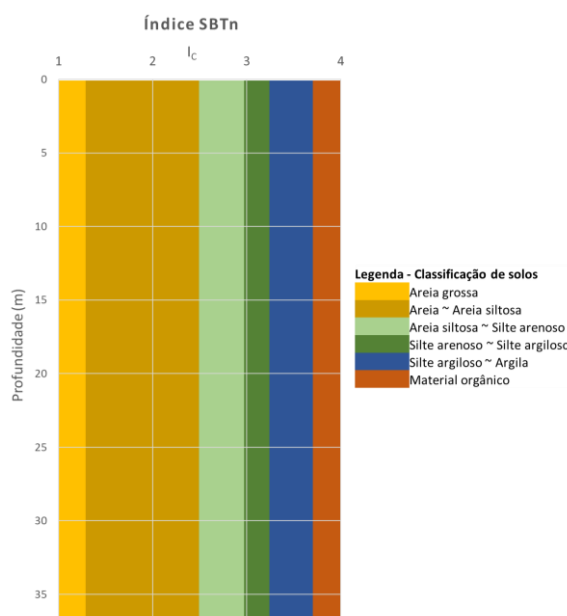


Figura 3. Classificação do solo de acordo com metodologia desenvolvida por (Robertson, 1990).

3 Resultados e discussões

Para aplicação da planilha em um caso de obra real, foram utilizados dados de um ensaio de piezocone CPTU realizado na etapa de investigação geotécnica do projeto de um edifício de 25 pavimentos na cidade do Recife (Brasil). A Figura 4 exibe os resultados de q_t , f_s e u_2 obtidos pelo ensaio CPTU. A partir dos parâmetros de entrada exibidos na Figura 4, e de informações do ensaio (nível d'água, posição do filtro, e raio do filtro), foram determinadas todas as correlações empíricas previamente citadas no presente trabalho em uma planilha no *software excel*. Na planilha 'Dados-EnsaioCPTU' foram gerados os parâmetros de saída e na planilha 'Gráficos' foram gerados os gráficos correspondentes. A Figura 5 exibe os gráficos dos principais parâmetros de saída gerados, sendo esses a a) Classificação SBTn do solo; b) resistência não-drenada S_u ; c) ângulo de atrito ϕ ; d) módulo edométrico D' ; e) razão de pré-adensamento OCR.

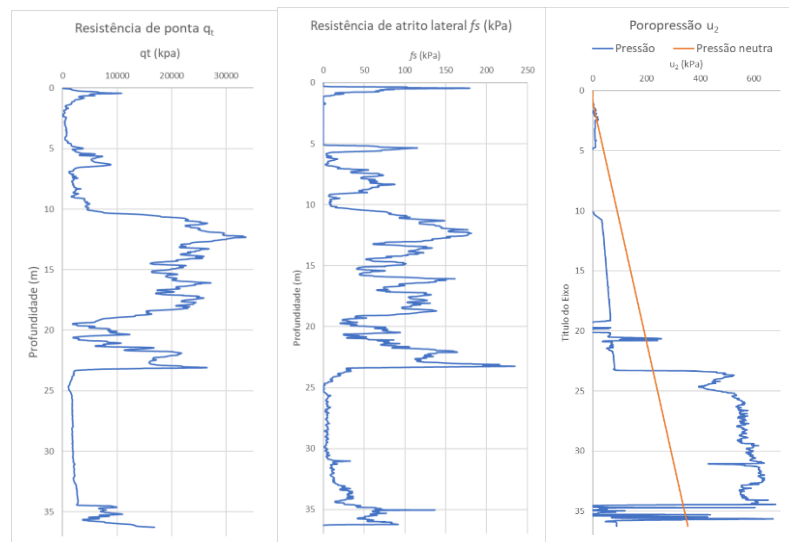


Figura 4. Resistências de: a) ponta q_t e; b) atrito lateral f_s e; c) poropressão u_2 .

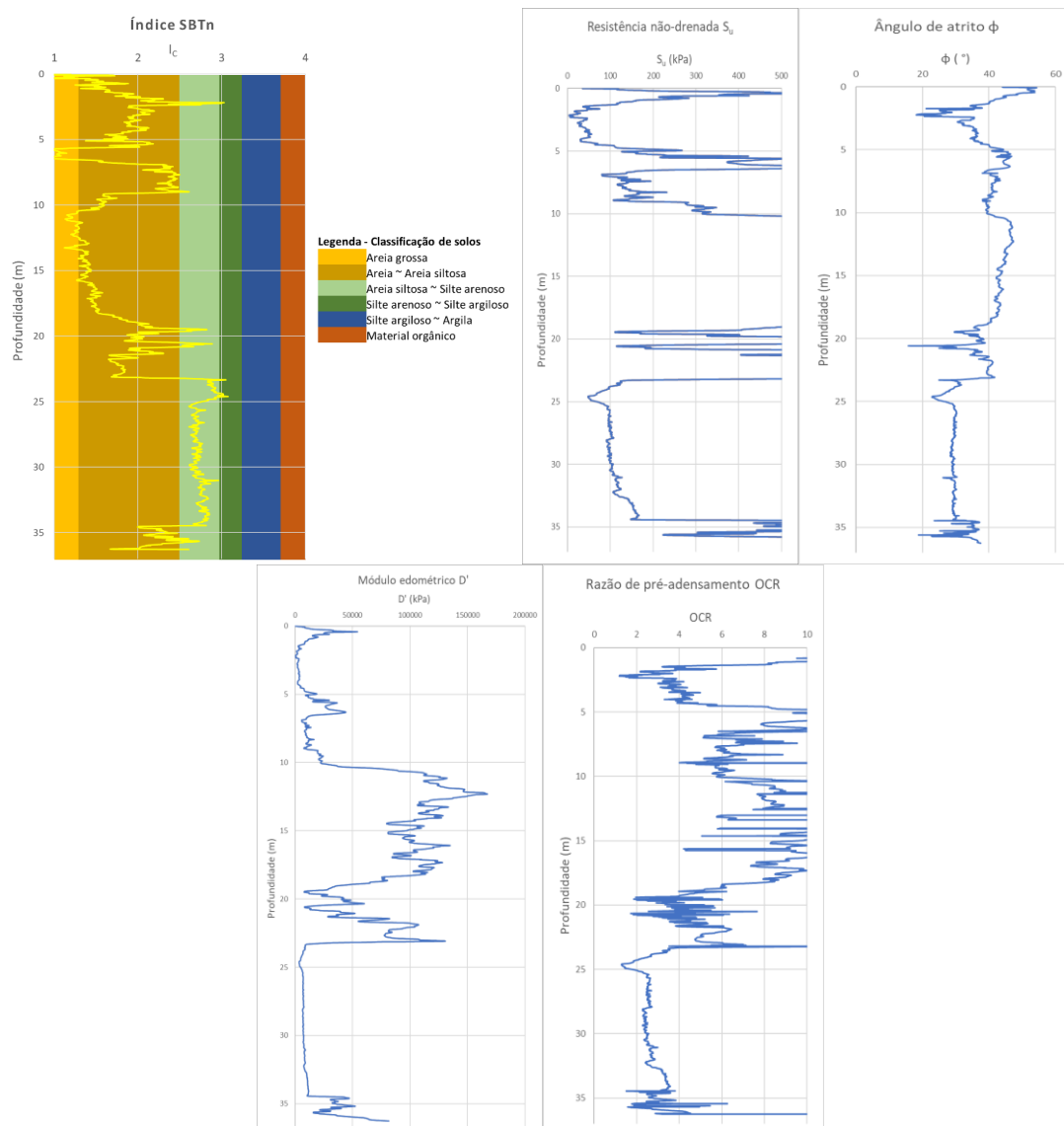


Figura 5. a) Classificação SBTn do solo; b) resistência não-drenada S_u ; c) ângulo de atrito ϕ ; d) módulo edométrico D' ; e) razão de pré-adensamento OCR.



Os gráficos dos parâmetros de saída (Figura 5) foram comparados com os gráficos gerados pelo software comercial SETTLE 3D a partir dos dados do ensaio e apresentaram comportamento semelhante, o que validou o uso da planilha disponibilizada no *software Excel* à comunidade científica.

4. Conclusão

Conclui-se que os parâmetros obtidos pela planilha em Excel estiveram de acordo com os dados obtidos pelo *software* comercial, o que valida o modelo gerado que está disponibilizado gratuitamente para download à toda comunidade científica através do QR code abaixo em formato .xlsx. É importante ressaltar que essa planilha torna possível a obtenção dos diversos parâmetros geotécnicos a partir das correlações com o ensaio CPTU gratuitamente e em *software* de fácil acesso e manipulação. Finalmente, resalta-se a relevância do ensaio CPTU na obtenção simultânea de uma ampla variedade de parâmetros geotécnicos importantes na prospecção e sucesso da obra de engenharia.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agaiyby, S. S. & Mayne, P. W. CPT Evaluation of Yield Stress Profiles in Soils. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 145, 04019104 (2019).
- Dagger, R., Saftner, D. & Mayne, P. *Cone Penetration Test Design Guide for State Geotechnical Engineers.* Minnesota Department of Transportation (2018).
- Danziger, F. A. B., Schnaid, F. Piezocone tests: procedures, recommendations and interpretation. in *Anais do Seminário Brasileiro de Investigação de Campo* 1–51 (2000).
- Karlsrud, K., Lunne, T., Kort, D. A. & Strandvik, S. CPTU correlations for clays. *Proc. 16th Int. Conf. Soil Mech. Geotech. Eng. Geotechnol. Harmon. with Glob. Environ.* 2, 693–702 (2005).
- Ku, C. S., Juang, C. H. & Ou, C. Y. Reliability of CPT ic as an index for mechanical behaviour classification of soils. *Geotechnique* 60, 861–875 (2010).
- Kulhawy, F. & Mayne, P. W. *Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design EPRI Report EL-6800 by Fred Kulhawy and Paul W. Mayne is available as PDF download from : www.epri.com Manual for Estimating Soil and Rock Properties for Foundation Design , 306 pages .* (1990).
- Mayne, P. W. Interpretation of geotechnical parameters from seismic piezocone tests. *3rd Int. Symp. Cone Penetration Test.* 47–73 (2014).
- Mayne, P. W. The second james k. mitchell lecture undisturbed sand strength from seismic cone tests. *Geomech. Geoengin.* 1, 239–257 (2006).
- Queiroz, C. M. Propriedades geotécnicas de um depósito de argila mole da região de Itaguaí-RJ. (Universidade Federal de Minas Gerais, 2013).
- Robertson, P. K. Interpretation of cone penetration tests - A unified approach. *Can. Geotech. J.* 46, 1337–1355 (2009).
- Robertson, P. K. Soil classification using the cone penetration test. *Can. Geotech. J.* 27, 151–158 (1990).
- Schneider, J. A., Randolph, M. F., Mayne, P. W. & Ramsey, N. R. Analysis of Factors Influencing Soil Classification Using Normalized Piezocone Tip Resistance and Pore Pressure Parameters. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 134, 1569–1586 (2008).
- Schnaid, F., & Odebrecht, E. *Ensaio de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações.* (2012).