

ESTIMATIVA DE PARÂMETROS GEOTÉCNICOS E COMPORTAMENTO DOS SOLOS DA CIDADE DE SÃO PAULO A PARTIR DE ENSAIOS CPTU REALIZADOS PELO METRÔ

Maria Paula Pivi Simonette ¹; Ana Elisa Silva de Abreu ²; Magali Dubas Gurgueira ³

Resumo – Esse trabalho tem como objetivo contribuir para o entendimento do comportamento geotécnico dos Solos da Cidade de São Paulo, além de valorizar e divulgar os resultados das investigações por CPTu realizadas pela Companhia do Metropolitano de São Paulo. Foram usados os dados de 8 investigações CPTu, realizadas ao longo da expansão da Linha 2 – Verde do Metrô, na zona leste do município de São Paulo, SP. Foi possível identificar três tipos de comportamento do solo para as camadas da Formação São Paulo, sendo eles de argilas/argilas siltosas, areias siltosas e areias finas rígidas. As camadas interpretadas como pertencentes à Formação Resende possuem comportamento de areias limpas. O aluvião apresentou comportamento variado: argilas siltosas, areias siltosas e areias limpas. Foram calculados o módulo de elasticidade tangencial inicial (E_i) e o módulo edométrico (M) além dos parâmetros de resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) e razão de pré-adensamento (OCR) para as camadas com comportamento de argila e o ângulo de atrito interno (ϕ') para as camadas com comportamento de areia. Os resultados obtidos concordaram, em sua maioria, com os valores disponíveis na literatura técnica.

Abstract – This work aims to contribute to the understanding of the geotechnical behavior of soils in the city of São Paulo, in addition to valuing and disseminating the results of CPTu investigations carried out by the CMSP. This investigation consists of driving a cone at a constant rate in the ground, which collects information on point resistance, side friction and pore pressure. Data from 8 CPTu investigations, carried out along the expansion of Line 2 – Green of the Metrô, in the east zone of the city of São Paulo, SP, were used. It was possible to identify three types of soil behavior for the layers interpreted as the São Paulo Formation, namely clays/silty clays, silty sands and stiff fine sands. The layers interpreted as belonging to the Resende Formation have clean sand behavior. The alluvium showed behavior of silty clays, silty sands and clean sands. The small strain Young's modulus (E_i) and constrained modulus (M) were calculated, in addition to the parameters of undrained shear strength (S_u) and overconsolidation ratio (OCR) for layers with clay behavior and the peak friction angle (ϕ') for layers with sand behavior. The obtained results mostly coincided with the values available in the technical literature.

Palavras-Chave – Mecânica dos solos; Geologia de engenharia; Engenharia geotécnica.

¹ Geól., Instituto de Geociências, UNICAMP: Campinas - SP, (11) 99510-0999, mariapaulapivi@gmail.com

² Geól., PhD, Instituto de Geociências, UNICAMP : Campinas - SP, (19) 3521-4575, aeabreu@unicamp.br

³ Geól., PhD, Instituto de Geociências, UNICAMP: Campinas - SP, magali.gurgueira@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

A Companhia do Metropolitano de São Paulo (CMSP) tradicionalmente realiza ensaios de simples reconhecimento e sondagens mistas para obter os principais parâmetros geotécnicos dos solos da cidade de São Paulo. Mais recentemente, foram iniciadas as investigações com o piezocone (CPTu), ensaio que consiste na cravação de uma ponteira de dimensões padronizadas a uma velocidade constante de 2cm/s no solo. Esse ensaio coleta informações sobre a resistência de ponta do cone, o atrito lateral e a poropressão e, a partir desses dados, é possível estimar empiricamente diversos outros parâmetros geotécnicos.

Esse trabalho apresenta a interpretação dos parâmetros geotécnicos e do comportamento esperado para os solos investigados com ensaios CPTU nas obras de expansão da CMSP e tem como objetivos contribuir com o entendimento do comportamento geotécnico dos solos da cidade de São Paulo e divulgar os resultados das investigações realizadas com o CPTu pela CMSP.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

O município de São Paulo apresenta três grandes compartimentos geológicos: o embasamento pré-cambriano, o pacote sedimentar paleógeno a neógeno da Bacia de São Paulo e os depósitos quaternários (MONTEIRO *et al.*, 2012). As investigações com CPTu utilizadas neste estudo foram realizadas em 2015 ao longo do trecho de expansão da Linha 2 – Verde do Metrô, na zona leste de São Paulo. Nessa região estão presentes os sedimentos da Bacia de São Paulo e Depósitos Quaternários.

Na área estudada foram encontrados sedimentos da Formação Resende, que compreendem um sistema de leques aluviais associados à planície aluvial de rios entrelaçados, e da Formação São Paulo, que foi depositada num sistema fluvial meandrante (RICCOMINI, 1989). Também foi localizado um depósito aluvionar em uma das investigações, sendo que esses depósitos são associados aos sistemas fluviais meandrantes atuais e caracterizados por intercalações de camadas arenosas e argilosas de baixa resistência, ricas em matéria orgânica e com cascalheiras na base, de acordo com Monteiro *et al.* (2012).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram disponibilizados os dados de 8 investigações CPTu, contendo os valores de resistência real de penetração (q_t - MPa), atrito lateral (f_s - kPa), poropressão (u_2 - kPa) e razão de atrito (R_f - %). A localização das investigações está indicada na figura 1. Além disso, foram fornecidos os perfis das sondagens de simples reconhecimento contendo a descrição tátil-visual das camadas de solo próximas ao CPTu, os resultados do ensaio SPT (Standard Penetration Test) e a posição do nível d'água subterrânea.

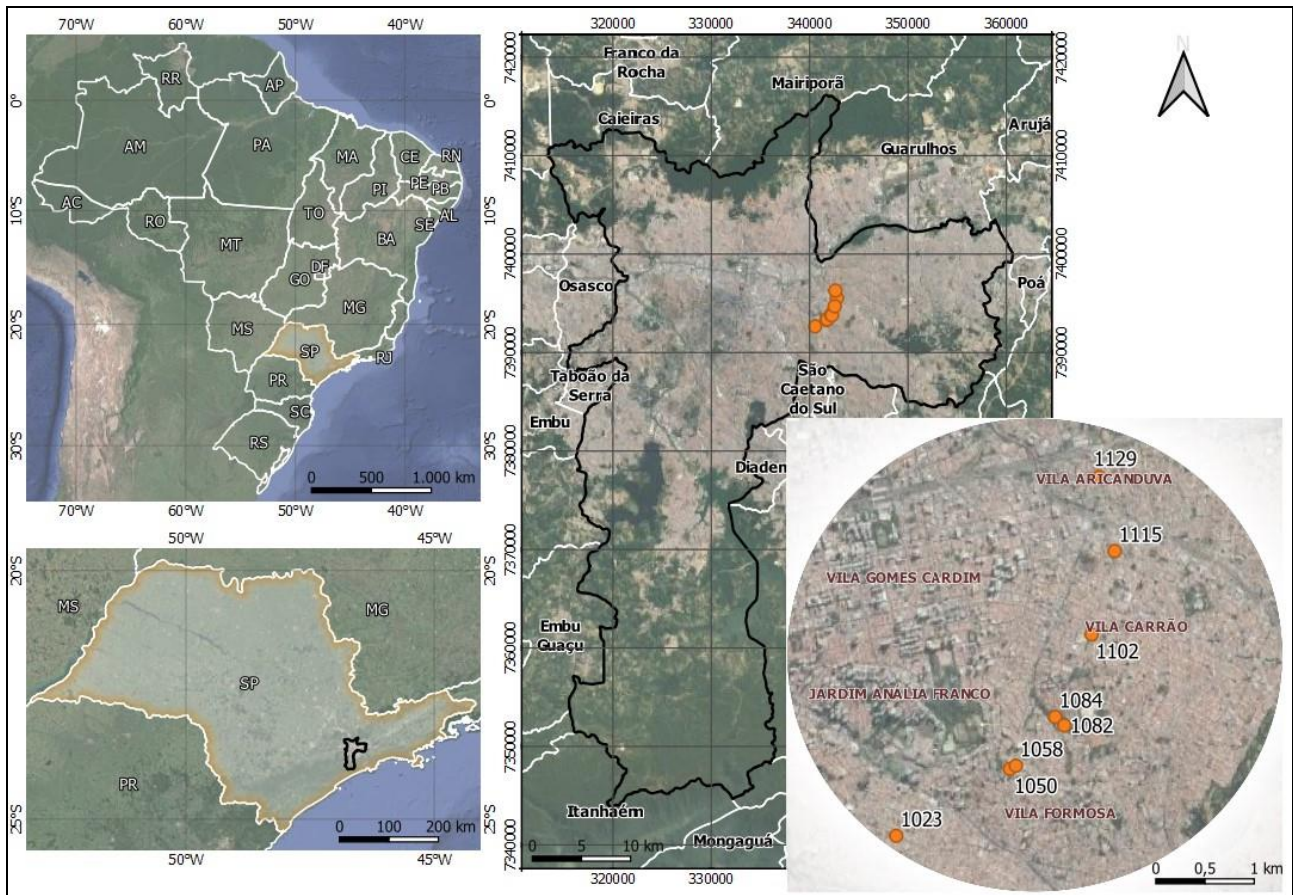


Figura 1. Mapa de localização das investigações com CPTu para expansão da Linha 2 – Verde do Metrô de São Paulo utilizadas nesse artigo.

Cada investigação foi dividida em camadas de comportamento semelhante, sendo que as camadas foram nomeadas em ordem alfabética, a partir da camada superior. Foram calculados os parâmetros normalizados Q_t (resistência de ponta), B_q (poropressão) e F_r (razão de atrito), de acordo com as equações propostas por Robertson (1990) (equações 1, 2 e 3, respectivamente), e os dados foram plotados no ábaco de Robertson (1990).

$$Q_t = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{(\sigma_{v0} - u_0)} \quad (1)$$

$$B_q = \frac{(u_2 - u_0)}{(q_t - \sigma_{v0})} \quad (2)$$

$$F_r = \frac{f_s}{(q_t - \sigma_{v0})} \cdot 100\% \quad (3)$$

Sendo q_t a resistência real de penetração, σ_{v0} a tensão vertical in situ, u_0 a pressão hidrostática, μ_2 a poropressão e f_s o atrito lateral.

Para todas as camadas foram calculados os valores do módulo de elasticidade tangencial Inicial (E_i) e o módulo edométrico (M). Para as camadas com comportamento argiloso, foram calculados os parâmetros de resistência ao cisalhamento não drenada (S_u), pressão de pré-adensamento (σ'_{vm}) e razão de pré-adensamento (OCR). Para as camadas com comportamento arenoso, foi calculado o valor de ângulo de atrito (ϕ').

As medidas de u_2 obtidas com o CPTu não foram usadas na interpretação dos resultados, pois na Formação São Paulo ocorre a intercalação de camadas arenosas e argilosas, gerando diversos lençóis empoleirados sobrepostos a trechos não-saturados. (CALDO, 2015) Nesses trechos não saturados, ocorre o efeito de sucção, resultando numa medida de poropressão negativa. Quando o elemento filtrante do piezocone perde a saturação, as medidas geradas não são confiáveis. Os dados das camadas de aterro não foram usados nesse estudo, pois as investigações com CPTu foram realizadas após um pré furo, que variou de 0,70 a 2,20 metros.

O solo não satisfaz os requisitos de um material elástico, principalmente no que se refere à reversibilidade das deformações quando as tensões mudam de sentido. Entretanto, quando ocorrem somente acréscimos de tensão, existe uma certa proporcionalidade entre as tensões e deformações, de forma que se considera um módulo de elasticidade constante como representativo do material (PINTO, 2006). O módulo de elasticidade tangencial inicial (E_i) corresponde a condição inicial do carregamento, com deformação nula ou muito pequena, e foi calculado de acordo com a equação 4.

$$E_i = \alpha_E \cdot (q_t - \sigma_{v0}) \quad (4)$$

Sendo E_i o módulo de elasticidade tangencial inicial, q_t a resistência real e σ_{v0} a tensão vertical in situ. O valor de α_E varia de acordo com o tipo de solo, sendo que foi utilizado o valor de 20 para os solos argilosos, 10 para os solos arenosos e 5 para os solos arenosos da Formação Resende, de acordo com o ábaco de Robertson e Cabal (2015).

O módulo edométrico (M) normalmente é obtido pelo ensaio de compressão edométrica, que consiste na compressão do solo dentro de um molde que impeça qualquer deformação lateral, sendo que o módulo edométrico é a razão entre a taxa de variação de tensão pela taxa de variação volumétrica (PINTO, 2006). Para obter o valor do módulo edométrico a partir dos resultados do CPTu, foi utilizada a equação 5, de Robertson e Cabal (2015), sendo que o valor de α_M também varia de acordo com o tipo de solo (ROBERTSON e CABAL, 2015).

$$M = \alpha_M \cdot (q_t - \sigma_{v0}) \quad (5)$$

Para as camadas com comportamento argiloso, foi calculado o valor da resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) através da equação 6.

$$S_u = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{N_{kt}} \quad (6)$$

Sendo N_{kt} o fator de capacidade carga, que pode ser obtido a partir da relação entre os ensaios de cone e palheta. O valor médio do N_{kt} é 12, mas ele aumenta de acordo com o aumento da pressão de pré-adensamento e com a redução do índice de plasticidade da argila, além de variar devido a fatores associados a execução do ensaio e à variabilidade do solo (SCHNAID e ODEBRECHT, 2012). O valor utilizado para esse estudo foi de 20, valor obtido por Caldo (2015) para os sedimentos da Bacia de São Paulo.

A pressão de pré-adensamento (σ'_{vm}) foi calculada a partir da equação 7, sendo K_1 uma constante que varia de 0,1 a 0,5, apresentando valor médio de 0,3. Essa variação pode estar associada ao limite de liquidez e a presença de matéria orgânica (SCHNAID e ODEBRECHT, 2012). O valor utilizado foi de 0,33 para K_1 , valor usado por Caldo (2015) para a mesma região de estudo.

$$\sigma'_{vm} = K_1 (q_t - \sigma_{v0}) \quad (7)$$

A partir da pressão de pré-adensamento, foi possível calcular a razão de pré-adensamento (OCR), que é relação entre a tensão vertical efetiva máxima a qual o solo foi submetido sobre a tensão vertical efetiva atuante, e pode ser expressa pela equação 8.

$$OCR = \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v0}} \quad (8)$$

Para as camadas com comportamento arenoso, foi calculado o valor do ângulo de atrito (ϕ'). Robertson e Campanella (1983) propuseram uma correlação de q_c com a tensão vertical efetiva (σ'_{v0}) para obter o ângulo de atrito a partir de um ábaco, para areias com predominância de quartzo, sem cimentação e de compressibilidade moderada. Kulhawy and Mayne (1990, *apud* ROBERTSON e CABAL, 2009) sugeriram uma correlação alternativa para areias limpas, arredondadas e sem cimentação, que utiliza somente o valor da resistência de ponta normalizada (Q_t), de acordo com a equação 9 abaixo.

$$\phi' = 17,6 + 11 \cdot (\log(Q_t)) \quad (9)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Comportamento dos solos da Cidade de São Paulo

Ao plotar todos os dados normalizados no ábaco de Robertson (1990), é possível notar que os pontos da Formação São Paulo se concentram em 3 regiões principais do gráfico, sendo elas de argilas/argilas siltosas (representadas em vermelho, laranja e amarelo), areias siltosas (em tons de azul e roxo) e areias finas rígidas (em verde) (figura 2). Para a Formação Resende, todos os pontos se concentraram na região 6 do ábaco, de areias/areias siltosas, enquanto os dados do aluvião apresentaram dispersão em diversas regiões, desde a região 3, de argilas/argilas siltosas, até a região 6, de areias/areias siltosas.

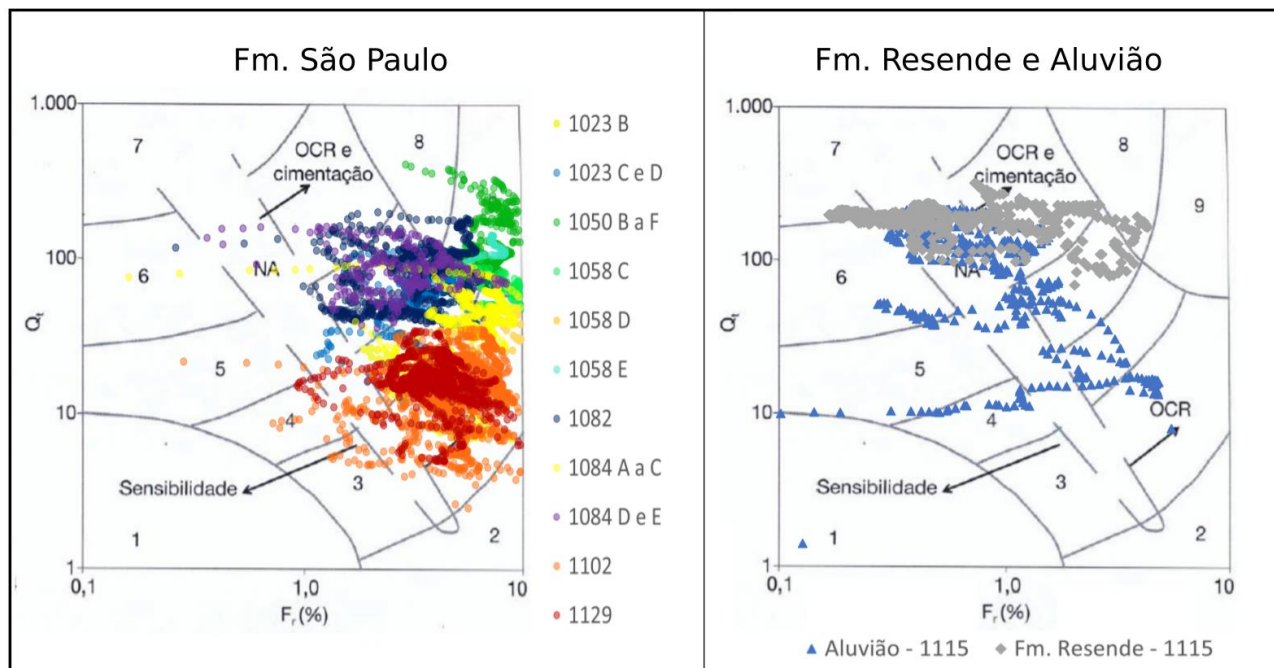


Figura 2. Ábaco de Robertson (1990) com os dados da Fm. São Paulo (lado esquerdo) e da Fm. Resende e aluvião (lado direito). Os números indicam o tipo de comportamento do solo, sendo 1 – solo fino sensível; 2 – solo orgânico e turfas; 3 – argila/argila siltosa; 4 – argila siltosa/silte arenoso; 5 – silte arenoso/areia siltosa; 6 – areia/areia siltosa; 7 – areia com pedregulho; 8 – areia e areia argilosa muito rígida (fortemente sobreadensada ou cimentada); 9 – areia fina rígida (fortemente sobreadensada ou cimentada).

As camadas com comportamento de areia fina rígida da Formação São Paulo foram localizadas nas investigações n° 1050 e n° 1058, que se localizam acima da cota de 775 metros. As investigações n° 1102 e n° 1129, realizadas na região nordeste da área de estudo, apresentaram comportamento predominantemente argiloso/silte argiloso. As investigações n° 1023 e n° 1084 apresentaram intercalações entre comportamento de argila siltosa a areia siltosa, enquanto a investigação n° 1082 apresentou comportamento predominante de silte arenoso/areia siltosa. O perfil com a localização das investigações está representado na figura 3.

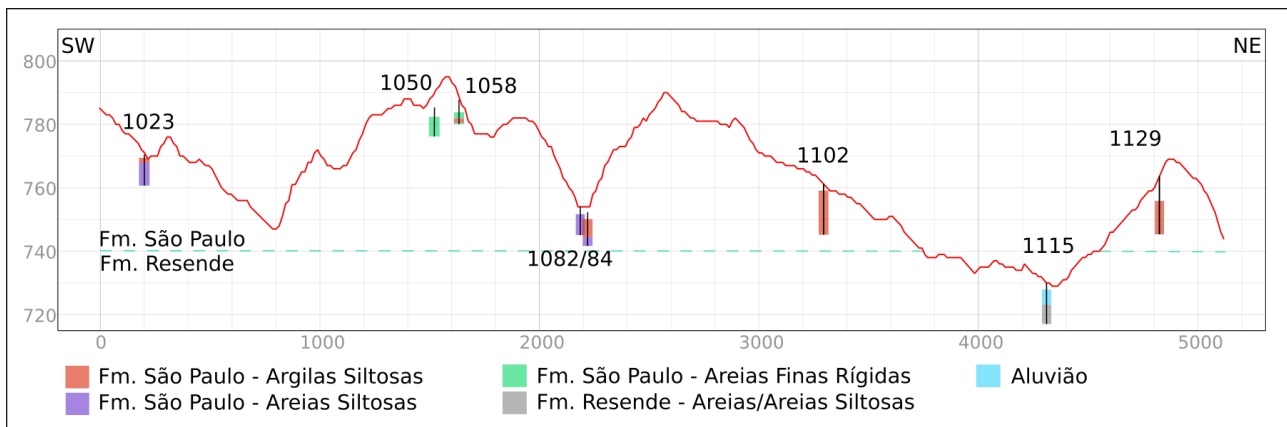


Figura 3. Perfil longitudinal das investigações realizadas com CPTu, com a indicação do contato entre a Formação São Paulo e a Formação Resende na cota de 740 metros, de acordo com Gurgueira (2013).

A investigação n° 1115 foi realizada abaixo da cota de 740 metros, onde, de acordo com Gurgueira (2013), ocorre o contato entre as formações São Paulo e Resende. O comportamento desse solo, de acordo com o ábaco da figura 2, difere do comportamento dos solos da Formação São Paulo, estando na região 6 do ábaco, de areias/areias siltosas. Devido a esses fatores, foi considerado que esse solo pertence a Formação Resende. Nessa mesma investigação foram encontrados solos de aluvião na descrição táctil visual.

4.2. Parâmetros geotécnicos

A partir das divisões por tipo de comportamento de solo, na Formação São Paulo, foram obtidos 3390 dados de solo com comportamento de argila siltosa, 1642 de areia siltosa e 775 dados de areia fina rígida. Para a Formação Resende, foram obtidos 599 dados. No aluvião, foram 105 dados de argila, 171 de areia siltosa e 206 de areia. Nos gráficos a seguir (figuras 4 a 8), estão apresentados os parâmetros geotécnicos calculados com a frequência em porcentagem para cada tipo de solo, de modo a melhorar a visualização da distribuição dos valores.

Nos solos da Formação São Paulo, as camadas com comportamento argiloso apresentaram valor médio de E_i de 53 MPa, com desvio padrão de 28 MPa. Para as camadas com comportamento de areia siltosa, o valor médio foi de 72 MPa com desvio padrão de 40 e as camadas com comportamento de areias finas rígidas apresentaram valor médio de 75 MPa e desvio padrão de 36 MPa. Para as camadas da Formação Resende, o valor médio de E_i foi de 93 MPa, com desvio padrão de 24 MPa. Para o aluvião, a camada com comportamento de argila siltosa apresentou valor médio de E_i de 13MPa, com desvio padrão de 5 MPa, a camada de areia siltosa apresentou média de 43 MPa, com desvio padrão de 20 MPa, e a camada com comportamento de areia limpa média de 55 MPa e 10 MPa. O gráfico com a distribuição de frequência dos valores de E_i para todas as camadas está na figura 4.

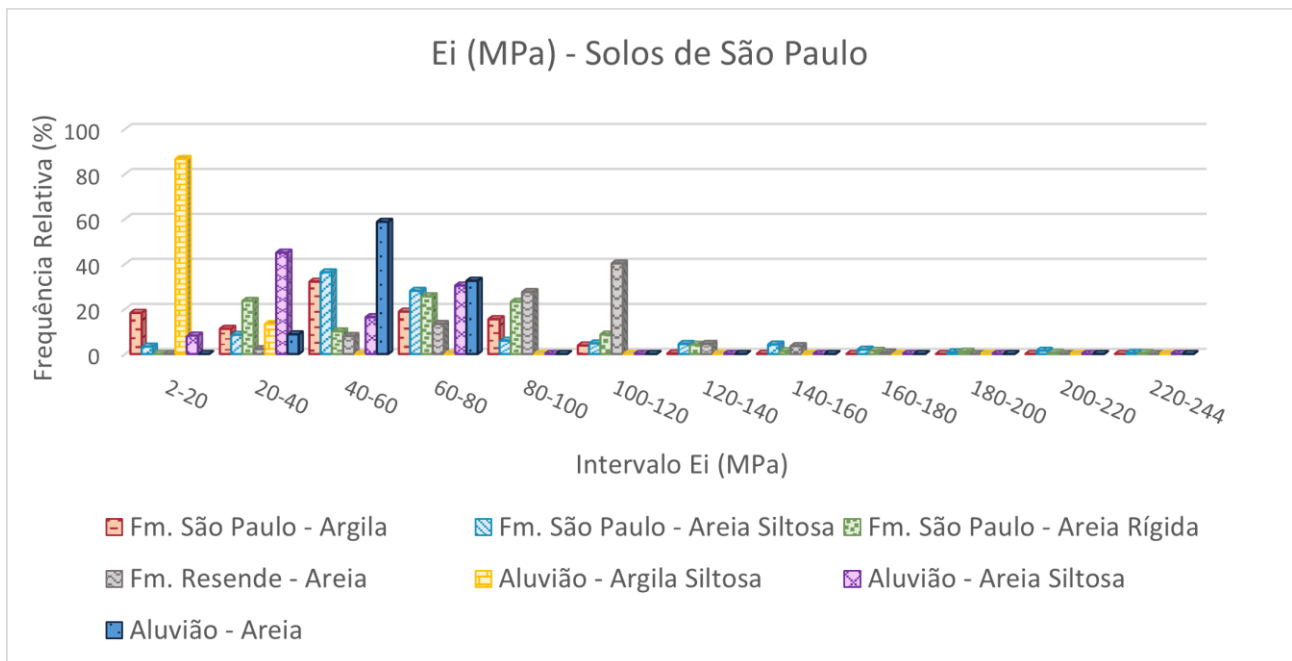


Figura 4. gráfico de frequência relativa do módulo de elasticidade inicial (E_i).

Para os solos da Formação São Paulo, o valor médio de M foi de 35 MPa, 125 MPa e 162 MPa para as camadas com comportamento de argila, areia siltosa e areia fina rígida, respectivamente, com desvios padrão de 21 MPa, 54 MPa e 49 MPa respectivamente. Para as camadas da Formação Resende, o valor médio foi de 134 MPa, com desvio padrão de 61 MPa. Para o aluvião, os valores médios foram de 8 MPa, 44 MPa e 73 MPa para as camadas com comportamento de argila siltosa, areia siltosa e areia, respectivamente, e desvios padrão 4 MPa, 13 MPa e 11 MPa. O gráfico de distribuição de frequência de M está na figura 5.

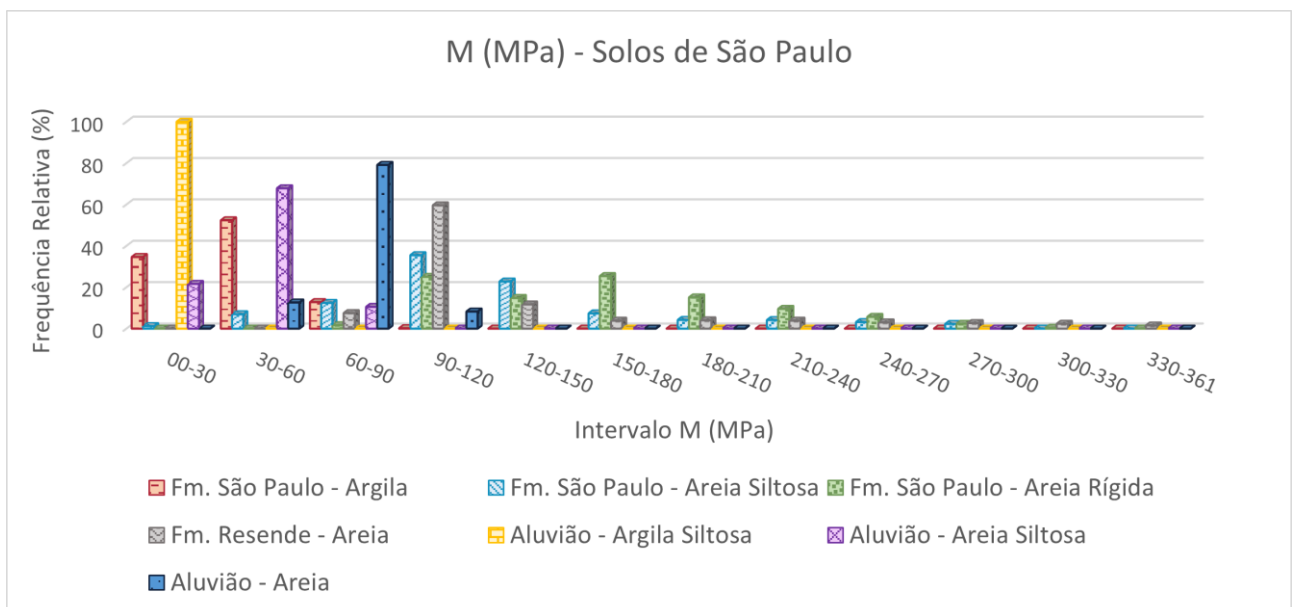


Figura 5. Gráfico de frequência do módulo edométrico (M).

O valor médio de S_u para as camadas com comportamento de argilas siltosas da Formação São Paulo foi de 132 kPa, com desvio padrão de 69 kPa. Para as camadas com comportamento argiloso do aluvião, o valor médio foi de 32 kPa, com desvio padrão de 13 kPa. A figura 6 apresenta o gráfico de distribuição de frequência de S_u para essas camadas.

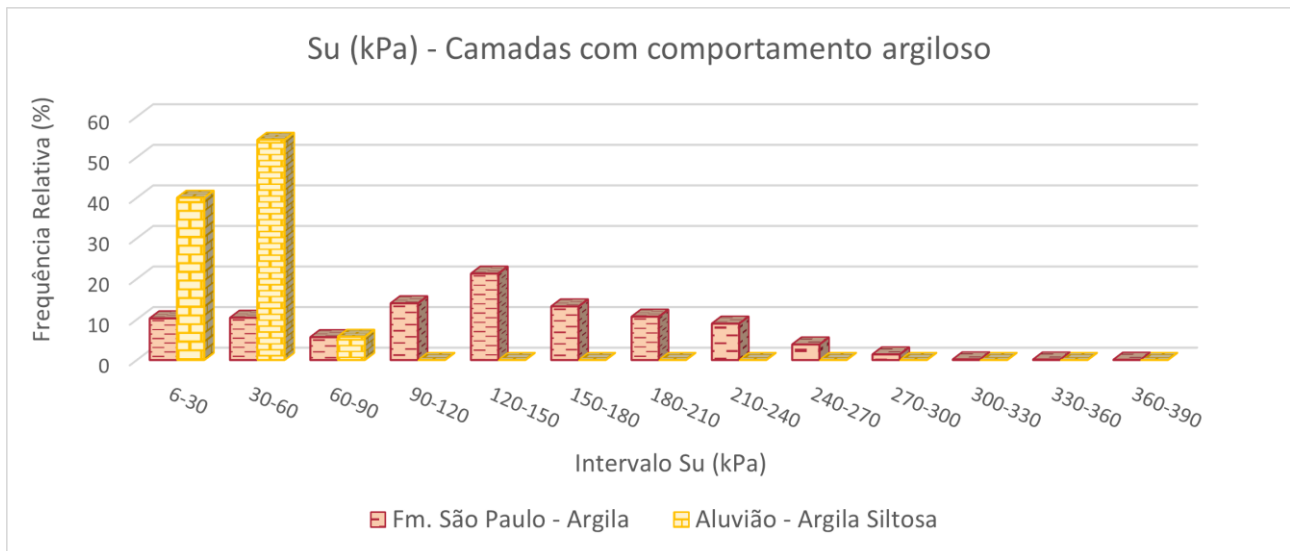


Figura 6. Gráfico de frequência da resistência ao cisalhamento não drenada (S_u).

A média de OCR foi 7,0, com desvio padrão de 4,7 para as camadas com comportamento de argilas siltosas da Formação São Paulo e média de 4,9 com desvio padrão de 1,6 para as camadas argilosas do aluvião. A frequência dos valores de OCR para esses solos está mostrada no gráfico da figura 7.

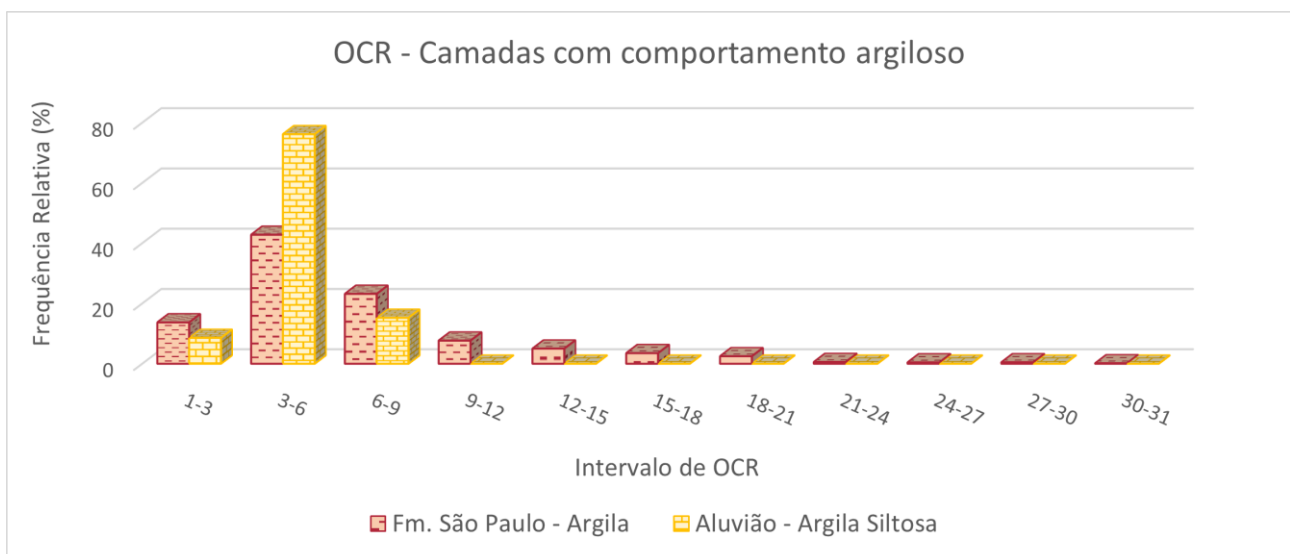


Figura 7. Gráfico de frequência da razão de pré-adensamento (OCR).

Os altos valores de OCR, de acordo com Massad (2012), não são devidos somente ao pré-adensamento relacionado com o peso, atual ou passado, da terra erodida, mas sim principalmente devido aos ciclos de sedimentação sucessivos, com secagem dos solos, que afetaram as pressões de pré-adensamento do solo através das tensões capilares.

As camadas com comportamento de areias siltosas da Formação São Paulo apresentaram valor médio de 38° , enquanto as camadas com comportamento de areias finas rígidas apresentaram média de 40° , ambas apresentaram desvio padrão de 2° . Para a Formação Resende a média foi de 42° , com desvio padrão de 1° . No aluvião, a camada com comportamento de areia siltosa apresentou média de 38° e desvio padrão de 2° e a camada com comportamento de areia limpa apresentou média de 42° , com desvio padrão de 1° . O gráfico de frequência dos valores do ângulo de atrito está na figura 8.

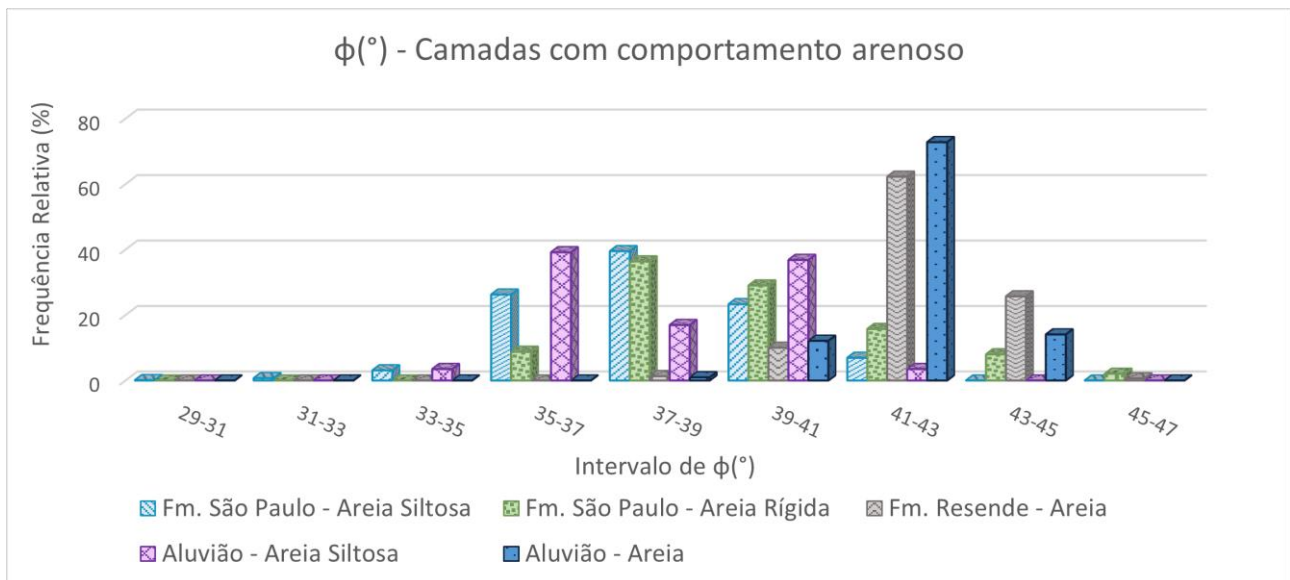


Figura 8. Gráfico de frequência do ângulo de atrito (ϕ').

4.3. Comparação com os dados de parâmetros geotécnicos disponíveis na literatura

A separação e classificação dos solos de acordo com o comportamento no ábaco de Robertson (1990) difere em algumas camadas com a descrição táctil visual disponibilizada pela CMSP. Apesar disso, os valores dos parâmetros geotécnicos obtidos foram comparados com os valores disponíveis na literatura para camadas de mesma denominação.

Os valores de E_i e M calculados ficaram no mesmo intervalo dos valores obtidos com Caldo (2015) para os solos da Formação São Paulo. Os valores de S_u e OCR estão dentro dos intervalos determinados por Caldo (2015) para a Formação São Paulo e Massad (2012) para os aluviões, mas o valor de OCR ficou acima do indicado pela CMSP (1994, *apud* GURGUEIRA 2013) para a Formação São Paulo. O valor de ϕ' foi o único parâmetro que não apresentou resultados semelhantes aos apresentados na literatura, exibindo valores entre 38 a 42°, bem maiores que os esperados em todas as unidades.

5. CONCLUSÕES

A partir de 8 investigações realizadas com o CPTu na região de expansão da Linha 2 – Verde da CMSP foi possível identificar três tipos de comportamento de solo para as camadas interpretadas como pertencentes a Formação São Paulo, sendo eles de argilas/argilas siltosas, areias siltosas e areias finas rígidas. Somente uma investigação foi interpretada como sendo da Formação Resende, sendo que todas as camadas dessa formação apresentaram comportamento de areias limpas. Nessa mesma investigação foram identificadas três camadas pertencentes a um depósito aluvionar, onde foram identificados três tipos de comportamento de solo, sendo eles de argilas siltosas, areias siltosas e areias limpas.

Em relação a distribuição espacial das camadas, para as camadas interpretadas como Formação São Paulo, as únicas camadas com o comportamento de areias finas rígidas ocorrem na parte SW da área de estudo, sendo as únicas investigações realizadas acima da cota 775 m. As investigações da Formação São Paulo na região NE da área de estudo apresentaram todas as camadas com comportamento argiloso/argilas siltosas. Somente a investigação realizada abaixo da cota 740 m apresentou camadas com comportamento de areias limpas, sendo essas camadas interpretadas como da Formação Resende. Apesar dessas correlações sugerirem um controle na distribuição espacial das camadas de interesse à geotecnia, são necessários mais dados para confirmar a distribuição lateral das camadas.

É importante ressaltar que a investigação CPTu é uma investigação in situ que não realiza coleta de amostras. Dessa forma, só é possível estimar o tipo de comportamento do solo (Soil Behaviour Type Classification – SBT), não a granulometria. Os valores dos parâmetros geotécnicos obtidos a partir do comportamento dos solos foram comparados com os solos de mesma denominação, apresentando faixa de valores semelhantes ao da literatura, mas o que ocorre é que, para algumas camadas, a classificação do comportamento do solo difere da descrição táctil visual das amostras de sondagens adjacentes a cada CPTu. Dessa forma, além de realizar o ensaio CPTu, é necessário também que sejam realizados outros ensaios in situ e a coleta de amostras indeformadas para a realização de ensaios laboratoriais, visando determinar com mais precisão o tipo e comportamento do solo. A descrição detalhada de amostras deformadas, com utilização de lupa e identificação de granulação, forma dos grãos, presença de minerais opacos ou de cor escura, também pode levar ao discernimento entre materiais geológicos pertencentes às diferentes formações.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Companhia do Metropolitano de São Paulo (CMSP) pela disponibilização dos dados.

REFERÊNCIAS

- CALDO, M. K. (2015) *“Estimativa de parâmetros geotécnicos dos solos variegados da Formação São Paulo utilizando ensaios in situ”*. Tese de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 134 p.
- GURGUEIRA, M. D. (2013) *“Correlação de dados geológicos e geotécnicos na Bacia de São Paulo”*. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 80 p.
- MASSAD, F. (2012) *“Resistência ao cisalhamento e deformabilidade dos solos sedimentares de São Paulo”* in Twin Cities–Solos das Cidades de São Paulo e Curitiba. São Paulo: ABMS, p. 107-133.
- MONTEIRO, M. D.; GURGUEIRA, M. D.; ROCHA, H. C. (2012) *“Geologia da região metropolitana de São Paulo”* in Twin Cities: solos das regiões metropolitanas de São Paulo e Curitiba. São Paulo: ABMS, p. 17-46.
- PINTO, C. S. (2006) *“Curso básico de mecânica dos solos”*. São Paulo: Oficina de Textos, v. 3, 367 p.
- RICCOMINI, C (1989) *“O rift continental do sudeste do Brasil”*, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- ROBERTSON, P. K.; CAMPANELLA, R. G. (1983) *“Interpretation of cone penetration tests. Part I: Sand”* in Canadian geotechnical journal, v. 20, n. 4, p. 718-733.
- ROBERTSON, P. K. (1990) *“Soil classification using the cone penetration test”* in Canadian Geotech. Journal, v.27, n.1, p. 151-158.
- ROBERTSON, P. K.; CABAL, K. L. (2009) *“Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering”*. Gregg Drilling & Testing. Inc, 3ªed, 115 p.
- ROBERTSON, P. K.; CABAL, K. L. (2015) *“Guide to cone penetration testing for geotechnical engineering”*. Gregg Drilling & Testing, Inc, v. 6, 133 p.
- SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. (2012) *“Ensaio de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações”*, São Paulo: Oficina de Textos, 2. ed.