



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



Trabalho de Conclusão de Curso

**PARÂMETROS DE DEFORMABILIDADE E RESISTÊNCIA DOS SOLOS DA
CIDADE DE SÃO PAULO A PARTIR DE ENSAIOS CPTU EM OBRAS DO METRÔ**

MARIA PAULA PIVI SIMONETTE

Orientadora: Profa. Dra. Ana Elisa Silva de Abreu

Coorientadora: Ma. Magali Dubas Gurgueira

CAMPINAS – SP

2021

MARIA PAULA PIVI SIMONETTE

**PARÂMETROS DE DEFORMABILIDADE E RESISTÊNCIA DOS SOLOS DA
CIDADE DE SÃO PAULO A PARTIR DE ENSAIOS CPTU EM OBRAS DO METRÔ**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado em 15 de Julho de 2021 para
obtenção do título de Bacharel em Geologia
pelo Instituto de Geociências da UNICAMP.

Orientadora: Dra. Ana Elisa Silva de Abreu

Coorientadora: Ma. Magali Dubas Gurgueira

CAMPINAS – SP

2021

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca do Instituto de Geociências
Marta dos Santos - CRB 8/5892

Si56p Simonette, Maria Paula Pivi, 1998-
Parâmetros de deformabilidade e resistência dos solos da Cidade de São Paulo a partir de ensaios CPTu em obras do Metrô / Maria Paula Pivi Simonette. – Campinas, SP : [s.n.], 2021.

Orientador: Ana Elisa Silva de Abreu.
Coorientador: Magali Dubas Gurgueira.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.

1. Mecânica do solo. 2. Geologia de engenharia. 3. Engenharia geotécnica. I. Abreu, Ana Elisa Silva de, 1973-. II. Gurgueira, Magali Dubas, 1985-. III. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Geociências. IV. Título.

Informações adicionais, complementares

Título em outro idioma: Deformation and strength parameters of soils estimated from CPTu soundings performed by the Metropolitan Company of São Paulo

Palavras-chave em inglês:

Soil mechanics

Engineering geology

Geotechnical engineering

Titulação: Bacharel em Geologia

Banca examinadora:

Ana Elisa Silva de Abreu [Orientador]

David de Carvalho

Marcelo Denser Monteiro

Data de entrega do trabalho definitivo: 15-07-2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Companhia do Metropolitano de São Paulo por disponibilizar os dados usados nesse trabalho. Agradeço também a minha orientadora Dra. Ana Elisa Silva de Abreu e coorientadora Magali Dubas Gurgueira, que me acompanharam durante todo o processo, por todo o apoio e aprendizagem.

Agradeço ao professor Dr. David de Carvalho e ao geólogo Marcelo Denser Monteiro, membros da banca examinadora, pelo interesse e disponibilidade. Agradeço a todos os professores que contribuíram para minha formação.

Por fim, agradeço a turma 016 da geologia, por tornarem essa trajetória acadêmica mais leve e divertida. A todos que contribuíram para a minha formação, meu muito obrigada!

RESUMO

A Companhia do Metropolitano de São Paulo - CMSP tradicionalmente realiza investigações geológico-geotécnicas por sondagens de simples reconhecimento e por sondagens mistas. Mais recentemente, passaram a ser incorporadas às campanhas de investigação os ensaios de piezocone (CPTu). A integração entre os resultados desses diferentes tipos de investigação é cada vez mais necessária. Esse trabalho tem o objetivo de contribuir para o entendimento do comportamento geotécnico dos Solos da Cidade de São Paulo e para a discussão dos sistemas de classificação desses solos, além de valorizar e divulgar os resultados das investigações por CPTu realizadas pela CMSP. O CPTu é um método de investigação *in situ* que consiste na cravação de um cone a uma velocidade constante no solo, que coleta informações de resistência de ponta, atrito lateral e poropressão. Foram usados dados de 8 investigações CPTu, realizados ao longo da expansão da Linha 2 – Verde do Metrô, na zona leste do município de São Paulo, SP. Com esses dados, foi possível identificar três tipos de comportamento do solo para as camadas interpretadas como 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, por sua vez, apresentou comportamento de argilas siltosas, areias siltosas e areias limpas. Para cada tipo de solo, foram calculados os seguintes parâmetros: módulo de elasticidade tangencial inicial (E_i), módulo edométrico (M) e condutividade hidráulica (k), 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. Para as camadas da Formação São Paulo, os intervalos de valores médios obtidos foram de 53-75 MPa para E_i , 35-162 MPa para M , 1.10^{-10} a 1.10^{-5} para k , 132 kPa para S_u , 7,0 para OCR e $38-40^\circ$ para ϕ' . Para as camadas interpretadas como Formação Resende, os valores médios foram de 96 MPa para o E_i , 134 MPa para M , 1.10^{-5} a 1.10^{-3} para k e 42° para ϕ' . Para o aluvião, os intervalos médios foram de 13-55 MPa para E_i , 8-73 MPa para M , 3.10^{-9} a 1.10^{-3} para k , 32 kPa para S_u , 4,9 para OCR e 38 a 42° para ϕ' . Os resultados obtidos foram comparados com os dados disponíveis na literatura, apresentando certa concordância, exceto no ângulo de atrito interno, em que os valores calculados ficaram maiores do que os esperados. Entretanto, o comportamento do solo obtido com o CPTu não coincidiu sempre com a descrição tátil-visual realizada na sondagem de simples reconhecimento, que é a base usada para a classificação dos Solos da Cidade de São Paulo, o que implica que as classificações realizadas a partir do CPTu e de acordo com a classificação adotada correntemente pela CMSP não são necessariamente concordantes, apesar de os valores dos parâmetros geotécnicos serem muitas vezes concordantes para solos com a mesma denominação.

Palavras-chave: Mecânica do solo; Geologia de engenharia; Engenharia geotécnica.

ABSTRACT

The Metropolitan Company of São Paulo – CMSP traditionally carries out geological-geotechnical investigations by standard penetration test. More recently, piezocone test (CPTu) have been incorporated into research campaigns. Integration between the results of these different types of investigations is increasingly necessary. This work aims to contribute to the understanding of the geotechnical behavior of soils in the city of São Paulo and to the discussion of classification systems for these soils, in addition to valuing and disseminating the results of CPTu investigations carried out by the CMSP. CPTu is an in situ investigation method that 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. With these data, 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, in turn, showed behavior of silty clays, silty sands and clean sands. For each soil type, the following parameters were calculated: small strain Young's modulus, (E_i), constrained modulus (M) and hydraulic conductivity (k), 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. For the layers of the São Paulo Formation, the mean value ranges obtained were 53-75 MPa for E_i , 35-162 MPa for M , 1.10^{-10} to 1.10^{-5} for k , 132 kPa for S_u , 7.0 for OCR and $38-40^\circ$ for ϕ' . For the layers interpreted as Resende Formation, the mean values were 96 MPa for E_i , 134 MPa for M , 1.10^{-5} to 1.10^{-3} for k and 42° for ϕ' . For alluvium, the mean ranges were 13-55 MPa for E_i , 8-73 MPa for M , 3.10^{-9} to 1.10^{-3} for k , 32 kPa for S_u , 4.9 for OCR and 38 to 42° for ϕ' . The results obtained were compared with data available in the literature, showing some agreement, except for the peak friction angle, in which the calculated values were higher than expected. However, the behavior of the soil obtained with the CPTu did not always coincide with the tactile-visual description carried out in the simple recognition survey, which is the basis used for the classification of Soils in the City of São Paulo, which implies that the classifications carried out from the CPTu and according to the classification currently adopted by the CMSP are not necessarily in agreement, although the values of the geotechnical parameters are often in agreement for soils with the same denomination.

Keywords: Soil mechanics; Engineering geology; Geotechnical engineering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: exemplo de piezocone (lado esquerdo) e equipamento para a cravação do cone no terreno (lado direito). Fonte: Abreu (2011).	11
Figura 3.1: Posição do elemento filtrante no piezocone. 1 – luva de atrito; 2 – piezocone; 3 - cone (Extraído de ISO 22476-1).	12
Figura 3.2: Esquema da ponteira do piezocone (CMSP, 2012, <i>apud</i> CALDO 2015).	13
Figura 3.3: Ábacos de classificação propostos por Robertson (1990), retirado de Schnaid e Odebrecht (2012).	15
Figura 3.4: ábaco de Robertson (1990) com os valores de α_E para diferentes tipos de solos (extraído de ROBERTSON e CABAL, 2015).	18
Figura 4.1: Encarte Tectônico do Mapa Geológico Integrado da Região Metropolitana de São Paulo, com destaque para o município de São Paulo (Almeida <i>et al.</i> , 2019).	20
Figura 4.2: Contexto geológico regional do Rift Continental do Sudeste do Brasil. A Bacia de São Paulo está indicada pelo número 7, pertencendo ao seguimento central do RCSB (RICCOMINI, 2004).	22
Figura 4.3: Quadro litoestratigráfico e evolução tectono-sedimentar do seguimento central do RCSB (RICCOMINI <i>et al.</i> , 2004). Letras: p - leques aluviais proximais; m-d - leques aluviais medianos a distais associados a planície aluvial de rios entrelaçados; t - depósitos de tálus; c - depósitos coluviais; ca - depósitos colúvioaluviais; a - depósitos aluviais.	23
Figura 4.4: sistema de classificação de unidades geológico-geotécnicas utilizado pela CMSP (2011, <i>apud</i> GURGUEIRA 2013).	24
Figura 5.1: Mapa de localização das investigações com CPTu para expansão da Linha 2 – Verde do Metrô de São Paulo.	28
Figura 6.1: Interpretação da divisão de camadas da investigação por CPTu n. 1023.	33
Figura 6.2: ábaco de Robertson (1990) com as camadas da investigação n. 1023.	34
Figura 6.3: Interpretação da divisão de camadas da investigação por CPTu n. 1050.	35
Figura 6.4: ábaco de Robertson (1990) com as camadas da investigação n. 1050.	36
Figura 6.5: Interpretação da divisão de camadas da investigação por CPTu n. 1058.	37

Figura 6.6: ábaco de Robertson (1990) com as camadas da investigação n. 1058. .38	38
Figura 6.7: Interpretação da divisão de camadas da investigação por CPTu n. 1082.	39
Figura 6.8: ábaco de Robertson (1990) com as camadas da investigação n. 1082. .40	40
Figura 6.9: Interpretação da divisão de camadas da investigação por CPTu n. 1084.	
Figura 6.10: ábaco de Robertson (1990) com as camadas da investigação n. 1084.	41
Figura 6.11: Interpretação da divisão de camadas da investigação por CPTu n. 1102.	43
Figura 6.12: ábaco de Robertson (1990) com as camadas da investigação n. 1102.	44
Figura 6.13: Interpretação da divisão de camadas da investigação por CPTu n. 1115.	45
Figura 6.14: ábaco de Robertson (1990) com as camadas da investigação n. 1115.	46
Figura 6.15: Interpretação da divisão de camadas da investigação por CPTu n. 1129.	47
Figura 6.16: ábaco de Robertson (1990) com as camadas da investigação n. 1129.	48
Figura 6.17: ábaco de Robertson (1990) com os dados da Fm. Resende e Aluvião.	49
Figura 6.18: Ábaco de Robertson (1990) com os dados da Fm. São Paulo.....	50
Figura 6.19: Gráfico de frequência dos valores de OCR calculados para as camadas com comportamento de argila da Fm. São Paulo.	51
Figura 6.20: Gráfico de frequência dos valores de Su calculados para as camadas com comportamento de argila da Fm. São Paulo.	52
Figura 6.21: Gráfico de frequência dos valores de Ei calculados para as camadas com comportamento de argila da Fm. São Paulo.	52
Figura 6.22: Gráfico de frequência dos valores de M calculados para as camadas com comportamento de argila da Fm. São Paulo.	53
Figura 6.23: Gráfico de frequência dos valores de ϕ calculados para as camadas com comportamento de areia siltosa da Fm. São Paulo.	54
Figura 6.24: Gráfico de frequência dos valores de Ei calculados para as camadas com comportamento de areia siltosa da Fm. São Paulo.	54

Figura 6.25: Gráfico de frequência dos valores de M calculados para as camadas com comportamento de areia siltosa da Fm. São Paulo.	55
Figura 6.26: Gráfico de frequência dos valores de ϕ calculados para as camadas com comportamento de areia fina rígida da Fm. São Paulo.	56
Figura 6.27: Gráfico de frequência dos valores de E_i calculados para as camadas com comportamento de areia fina rígida da Fm. São Paulo.	56
Figura 6.28: Gráfico de frequência dos valores de M calculados para as camadas com comportamento de areia fina rígida da Fm. São Paulo.	57
Figura 6.29: Gráfico de frequência dos valores de ϕ calculados para as camadas da Fm. Resende.	58
Figura 6.30: Gráfico de frequência dos valores de E_i calculados para as camadas da Fm. Resende.	58
Figura 6.31: Gráfico de frequência dos valores de M calculados para as camadas da Fm. Resende.	59
Figura 6.32: Gráfico de frequência dos valores de OCR calculados para as camadas com comportamento de argila do aluvião.	60
Figura 6.33: Gráfico de frequência dos valores de S_u calculados para as camadas com comportamento de argila do aluvião.	60
Figura 6.34: Gráfico de frequência dos valores de ϕ calculados para as camadas com comportamento de areia do aluvião.	61
Figura 6.35: Gráfico de frequência dos valores de E_i calculados para as camadas do aluvião.	61
Figura 6.36: Gráfico de frequência dos valores de M calculados para as camadas do aluvião.	62
Figura 7.1: perfil longitudinal das investigações de CPTu, com a indicação do contato da Fm. São Paulo com a Fm. Resende na cota 740m, de acordo com Gurgueira (2013).	65

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Coeficiente de calibração do cone
α_E	Coeficiente para o cálculo do módulo de elasticidade inicial
α_M	Coeficiente para o cálculo do módulo edométrico
B_q	Poropressão normalizada
CPT	Ensaio de penetração de cone (<i>Cone Penetration Test</i>)
CPT _u	Piezocone
E	Módulo de elasticidade
E_i	Módulo de elasticidade inicial
F_r	Razão de atrito normalizada
f_s	Atrito lateral
I_c	Índice de classificação do material (<i>material classification index</i>)
k	Condutividade hidráulica
K_1	Coeficiente para o cálculo da pressão de pré-adensamento
M	Módulo edométrico
N_{kt}	Fator de capacidade de carga
OCR	Razão de pré-adensamento
q_c	Resistência de ponta
q_t	Resistência real de penetração
Q_t	Resistencia de ponta normalizada
R_f	Razão de atrito
S_u	Resistência ao cisalhamento não drenada
u_0	Pressão hidrostática
u_2	Poropressão

ϕ'	Ângulo de atrito interno
σ_{v0}	Tensão vertical <i>in situ</i>
σ'_{v0}	Tensão vertical efetiva
σ'_{vm}	Pressão de pré-adensamento

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. OBJETIVO.....	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1 Ensaio CPTu.....	12
3.2 Estimativa de parâmetros geotécnicos	15
4. ÁREA DE ESTUDO	20
4.1 Geologia Regional.....	20
4.2 Geologia Local	23
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
6. RESULTADOS	31
6.1 Características dos Solos da Cidade de São Paulo.....	49
6.2 Parâmetros Geotécnicos dos Solos da Cidade de São Paulo	50
7. DISCUSSÃO.....	62
7.1 Sondagem de Simples Reconhecimento e CPTu	62
7.2 Divisão das camadas.....	63
7.3 Distribuição espacial das camadas.....	64
7.4 Comparação com os dados de parâmetros geotécnicos disponíveis na literatura	65
8. CONCLUSÃO.....	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

1. INTRODUÇÃO

A cidade de São Paulo é a mais populosa do Brasil, com população estimada acima de 12 milhões de pessoas (IBGE, 2020). Devido à intensa urbanização, é difícil encontrar afloramentos que permitam mapear a geologia do município de forma direta. Apesar disso, a urbanização também deu origem a várias obras subterrâneas, que permitiram observar de perto as unidades geológicas em subsuperfície.

A Companhia do Metropolitano de São Paulo – CMSP, desde 1968 executa obras na cidade, gerando grande quantidade de informações que permitem a interpretação da geologia. Tradicionalmente as investigações geológico-geotécnicas sempre foram realizadas por sondagens de simples reconhecimento e por sondagens mistas (percussão e rotativa). Com base na experiência acumulada ao longo de várias décadas a CMSP desenvolveu e adota atualmente um sistema de classificação que se baseia principalmente nos resultados de investigações por sondagens.

Mais recentemente passaram a ser incorporadas às campanhas de investigação os ensaios de piezocone (CPTu), que são um tipo de investigação geológico-geotécnica realizada *in situ* e com grande detalhe. O ensaio consiste na cravação de uma ponteira no solo a uma velocidade constante de 2 cm/s. A figura 1.1 ilustra a ponteira utilizada no ensaio e um dos possíveis equipamentos de cravação da ponteira no terreno.



Figura 1.1: exemplo de piezocone (lado esquerdo) e equipamento para a cravação do cone no terreno (lado direito). Fonte: Abreu (2011).

O comportamento esperado dos solos e alguns parâmetros geotécnicos podem ser interpretados a partir dos resultados do ensaio CPTu, fornecendo informações adicionais para a estimativa do comportamento geológico-geotécnico dos Solos da Cidade de São Paulo. Massad (2012) destaca a importância de se realizarem novos ensaios nesses solos para determinação de seus parâmetros.

Neste trabalho será realizada a interpretação das investigações com CPTu realizadas no trecho de expansão da Linha 2 – Verde do Metrô, na zona leste do município de São Paulo, visando à obtenção das características dos Solos da Cidade de São Paulo por essa investigação. Também será avaliada a relação entre essas novas informações e aquelas constantes do sistema de classificação dos Solos da Cidade de São Paulo já utilizado pela CMSP.

2. OBJETIVO

Esse trabalho tem o objetivo de contribuir para o entendimento do comportamento geotécnico dos Solos da Cidade de São Paulo e para a discussão dos sistemas de classificação desses solos, além de valorizar e divulgar os resultados das investigações geotécnicas realizadas pela CMSP.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Ensaio CPTu

O ensaio de CPT (*Cone Penetration Test*) é um ensaio *in situ* que consiste na cravação de uma ponteira com sensores de resistência de ponta e atrito lateral no solo. Sendo cravado com velocidade constante de $20 \text{ mm/s} \pm 5 \text{ mm/s}$, os valores podem ser registrados a cada centímetro, gerando uma grande quantidade de dados. Com esses dados é possível determinar a estratigrafia do solo e obter diversos parâmetros geotécnicos. Além do ensaio de CPT, existe também o ensaio de CPTu (piezocone), cujo equipamento permite medir, além da resistência de ponta e atrito lateral, a poropressão. Essa medição é feita a partir de um elemento filtrante, que pode ser colocado em três posições (na ponta - u_1 , base - u_2 ou luva - u_3) (figura 3.1), preenchido com um fluido, normalmente glicerina.

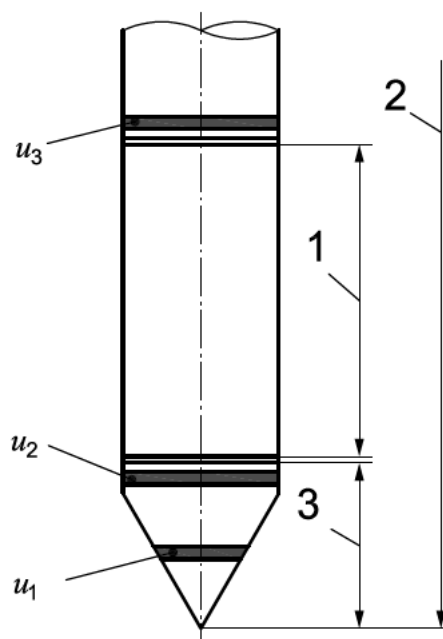


Figura 3.1: Posição do elemento filtrante no piezocone. 1 – luva de atrito; 2 – piezocone; 3 - cone (Extraído de ISO 22476-1).

No Brasil, a norma técnica para o ensaio CPT era a NBR 12069:1991, mas essa norma foi descontinuada em 2015. Atualmente, as normas em vigor são a ISO 22476-1:2012, da Organização Internacional de Normalização (*International Organization for Standardization*) e a norma D5778:20, da ASTM (*American Society for Testing and Materials*). As dimensões do piezocone usado pela CMSP estão indicadas na figura 3.2. A medida da poropressão é realizada na posição u_2 .

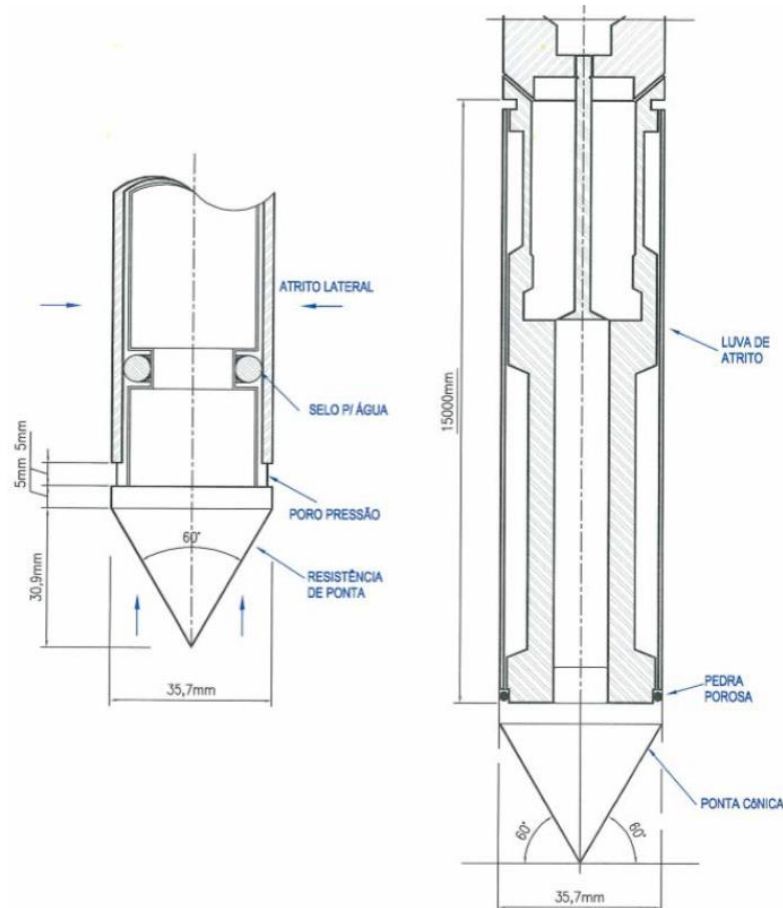


Figura 3.2: Esquema da ponteira do piezocone (CMSP, 2012, *apud* CALDO 2015).

A partir dos dados de resistência de ponta (q_c), atrito lateral (f_s) e poropressão (u_2), diversos outros parâmetros geotécnicos são obtidos deste ensaio. O primeiro parâmetro é a razão de atrito (R_f), que é obtido pela razão do atrito lateral pela resistência de ponta (equação 3.1).

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \quad (3.1)$$

Onde R_f = razão de atrito, f_s = atrito lateral e q_c = resistência de ponta.

A resistência real de penetração (q_t) é influenciada pelo efeito da poropressão e deve ser calculada de acordo com a equação 3.2.

$$q_t = q_c + (1 - a) \cdot u_2 \quad (3.2)$$

Onde q_t = resistência real de penetração, q_c = resistência de ponta, a = coeficiente de calibração do cone, u_2 = poropressão.

Como os valores de resistência do solo e poropressão aumentam com o aumento de profundidade, Robertson (1990) propôs a normalização dos três parâmetros fundamentais obtidos deste ensaio, levando em conta o nível de tensões. Os parâmetros estão indicados nas equações 3.3, 3.4 e 3.5, mostradas a seguir.

$$Q_t = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{(\sigma_{v0} - u_0)} \quad (3.3)$$

$$B_q = \frac{(u_2 - u_0)}{(q_t - \sigma_{v0})} \quad (3.4)$$

$$F_r = \frac{f_s}{(q_t - \sigma_{v0})} \cdot 100\% \quad (3.5)$$

Sendo Q_t a resistência de ponta normalizada, q_t a resistência real, σ_{v0} a tensão vertical *in situ*, u_0 a pressão hidrostática, B_q a poropressão normalizada, u_2 a poropressão, F_r a razão de atrito normalizada e f_s o atrito lateral.

Com esses parâmetros, Robertson (1990) propôs dois ábacos de classificação ($B_q - Q_t$) e ($F_r - Q_t$), identificando nove zonas, que equivalem aos comportamentos típicos de diversos solos (SBT_n – *Normalized Soil Behaviour Type Classification Chart*). Os ábacos estão mostrados na figura 3.3. A tabela 3.1 indica os tipos de solo de acordo com a zona.

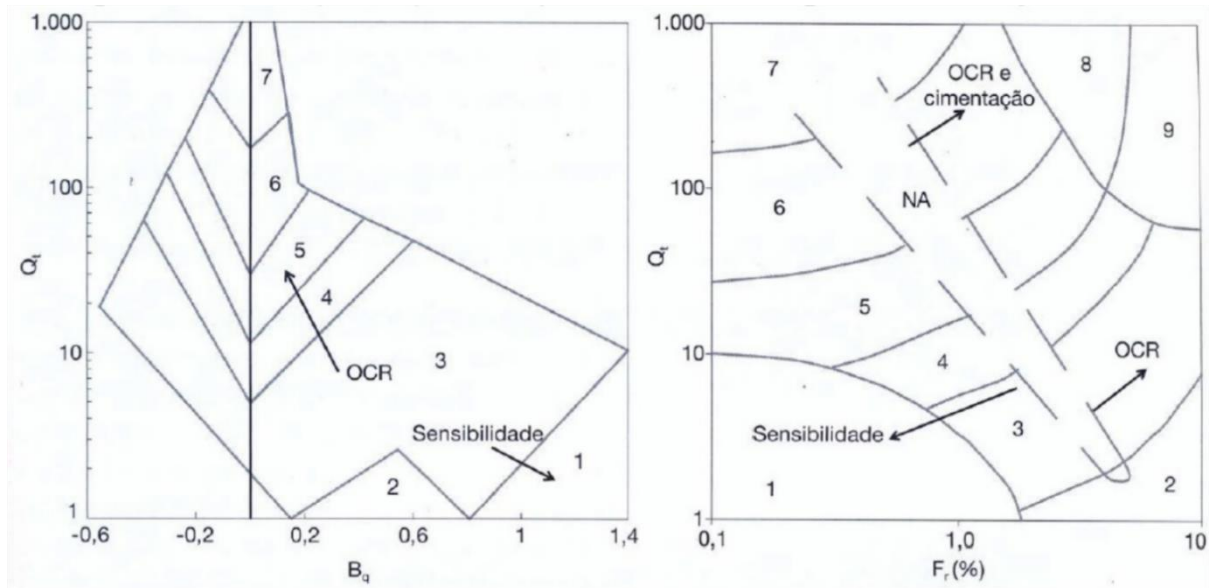


Figura 3.3: Ábacos de classificação propostos por Robertson (1990), retirado de Schnaid e Odebrecht (2012).

Tabela 3.1: Classificação dos solos por tipo de comportamento.

Zona	Tipos de Solos
1	Solo fino sensível
2	Solo orgânico e turfas
3	Argilas – argilas siltosas
4	Argila siltosa – silte argiloso
5	Siltos arenosos – areias siltosas
6	Areias limpas – areias siltosas
7	Areias com pedregulhos - areias
8	Areias e areias argilosas muito rígidas*
9	Areias finas rígidas*

* Fortemente sobreadensadas ou cimentadas

Fonte: Robertson, 1990.

3.2 Estimativa de parâmetros geotécnicos

Existem muitas correlações propostas na literatura para estimar diversos parâmetros geotécnicos, mas a aplicabilidade desses parâmetros depende do tipo de solo, arenoso ou argiloso. A tabela 3.2 mostra uma estimativa dessa aplicabilidade para o ensaio de CPTu (ROBERTSON e CABAL, 2015).

Tabela 3.2: Aplicabilidade do CPTu para estimar parâmetros do solo

Tipo de solo	OCR	S_u	ϕ'	E	M	k
arenoso	5		2-3	2-3	2-3	3-4
argiloso	1	1-2	4	2-4	2-3	2-3

1 = alta, 2=alta a moderada, 3=moderada, 4=moderada a baixa, 5=baixa confiabilidade, vazio=sem aplicabilidade (modificado de Robertson e Cabal 2015).

Sendo OCR = razão de pré-adensamento, S_u = resistência ao cisalhamento não drenada, ϕ' = ângulo de atrito interno, E = módulo de elasticidade, M = módulo edométrico e k = condutividade hidráulica.

3.2.1 Resistência ao Cisalhamento não drenada

A resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) é calculada para as argilas de forma indireta a partir da equação 3.6.

$$S_u = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{N_{kt}} \quad (3.6)$$

Sendo S_u = resistência ao cisalhamento não drenada, q_t = resistência real, σ_{v0} = tensão vertical *in situ* e N_{kt} = fator de capacidade de carga. O fator N_{kt} pode ser obtido a partir da relação entre 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). De acordo com Robertson (2009), se há poucos dados disponíveis sobre o local do ensaio, pode-se usar valores de N_{kt} entre 15-20, sendo que para uma estimativa mais conservadora, devem ser usados valores próximos do limite superior.

3.2.2 Histórico de Tensões

A pressão de pré-adensamento (σ'_{vm}) pode ser relacionada com a resistência de ponta do piezocone ou ao excesso de poropressão gerado durante a cravação. Como a Bacia de São Paulo apresenta intercalações de areias e argilas, com diversos lençóis empoleirados sobrepostos a trechos não-saturados, ocorre o efeito de sucção, fazendo com que a medida de u_2 apresente grande incerteza (CALDO, 2015). Dessa

forma, a equação escolhida para o cálculo da pressão de pré-adensamento foi a equação 3.7, que leva em consideração somente a resistência de ponta.

$$\sigma'_{vm} = K_1(q_t - \sigma_{v0}) \quad (3.7)$$

Sendo σ'_{vm} a pressão de pré-adensamento, q_t a resistência real e σ_{v0} = tensão vertical *in situ*. O valor de K_1 varia da faixa 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).

A razão de pré-adensamento (OCR) é a 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 3.8.

$$OCR = \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v0}} \quad (3.8)$$

Onde σ'_{vm} = pressão de pré-adensamento e σ'_{v0} = tensão vertical efetiva atuante. Existem equações como a de Mayne (1991, *apud* SCHNAID e ODEBRECHT, 2012) que utilizam as medidas de poropressão para calcular a OCR, porém, devido a presença de lençóis empoleirados, não foi possível utilizar essas equações para o cálculo.

3.2.3 Ângulo de Atrito

Para as areias, um parâmetro que pode ser obtido através do ensaio CPTu é o ângulo de atrito interno (ϕ'). Robertson e Campanella (1983) propuseram uma correlação do 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 2009) sugeriram uma correlação alternativa para areias limpas, arredondadas e sem cimentação, que utiliza somente o valor de Q_t , de acordo com a equação 3.9 abaixo.

$$\phi' = 17,6 + 11. (\log(Q_t)) \quad (3.9)$$

Onde Q_t é a resistência de ponta normalizada.

3.2.4 Módulos de Elasticidade

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. É possível calcular esse módulo com os resultados do CPTu para solos coesivos, a partir da equação 3.10.

$$E_i = \alpha_E \cdot (q_t - \sigma_{v0}) \quad (3.10)$$

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, e pode ser estimado a partir do ábaco da figura 3.4.

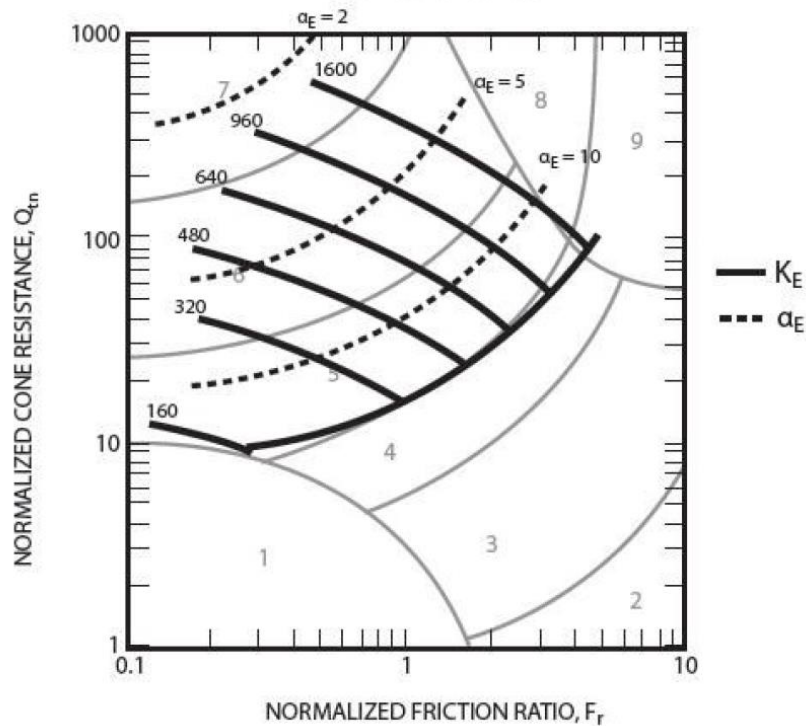


Figura 3.4: ábaco de Robertson (1990) com os valores de α_E para diferentes tipos de solos (extraído de ROBERTSON e CABAL, 2015).

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, é usada a equação 3.11 (ROBERTSON e CABAL, 2015).

$$M = \alpha_M \cdot (q_t - \sigma_{v0}) \quad (3.11)$$

Sendo M o módulo edométrico, q_t a resistência real e σ_{v0} a tensão vertical *in situ*. O valor de α_M também varia de acordo com o tipo de solo, sendo que para solos argilosos:

$$\alpha_M = Q_t \quad \text{quando} \quad Q_t < 14$$

$$\alpha_M = 14 \quad \text{quando} \quad Q_t > 14$$

Para solos arenosos, o valor de α_M deve ser calculado a partir da equação 3.12.

$$\alpha_M = 0,0188 \cdot [10^{(0,55 \cdot I_c + 1,68)}] \quad (3.12)$$

Sendo I_c o índice de classificação do material, que é calculado a partir da equação 13.

$$I_c = ((3,47 - \log Q_t)^2 + (\log F_r + 1,22)^2)^{0,5} \quad (3.13)$$

Sendo Q_t a resistência de ponta normalizada e F_r a razão de atrito normalizada.

3.2.5 Condutividade Hidráulica

Uma estimativa da condutividade hidráulica (k) pode ser feita a partir do ábaco de classificação do comportamento do solo (SBT_n), da figura 3.3. A tabela 3.3 indica uma estimativa aproximada, que serve de guia para a variação do valor de k (ROBERTSON e CABAL, 2015).

Tabela 3.3: Permeabilidade do solo (k) estimada a partir do ábaco de comportamento do solo (SBT_n) mostrado na figura 3.3.

Zona	Tipos de Solos (SBT)	Condutividade Hidráulica (k) (m/s)
1	Solo fino sensível	$3 \cdot 10^{-10}$ a $3 \cdot 10^{-8}$
2	Solo orgânico e turfas	$1 \cdot 10^{-10}$ a $1 \cdot 10^{-8}$
3	Argilas – argilas siltosas	$1 \cdot 10^{-10}$ a $1 \cdot 10^{-9}$
4	Argila siltosa – silte argiloso	$3 \cdot 10^{-9}$ a $1 \cdot 10^{-7}$
5	Siltos arenosos – areias siltosas	$1 \cdot 10^{-7}$ a $1 \cdot 10^{-5}$
6	Areias limpas – areias siltosas	$1 \cdot 10^{-5}$ a $1 \cdot 10^{-3}$
7	Areias com pedregulhos - areias	$1 \cdot 10^{-3}$ a 1
8	Areias e areias argilosas muito rígidas	$1 \cdot 10^{-8}$ a $1 \cdot 10^{-3}$
9	Areias finas rígidas	$1 \cdot 10^{-9}$ a $1 \cdot 10^{-7}$

Fonte: Robertson e Cabal, 2015.

4. ÁREA DE ESTUDO

4.1 Geologia Regional

O município de São Paulo está localizado no Planalto Paulista e 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).

4.1.1 Embasamento

O embasamento pré-cambriano faz parte do Sistema Orogênico Mantiqueira, pertencendo ao Cinturão Ribeira. No município de São Paulo estão presentes rochas do Domínio Embu (porção centro e sul do município) e Domínio São Roque-Serra do Itaberaba (na porção norte do município), sendo que os sistemas de falhas Taxaquara e Rio Jaguari limitam esses dois domínios (Figura 4.1).

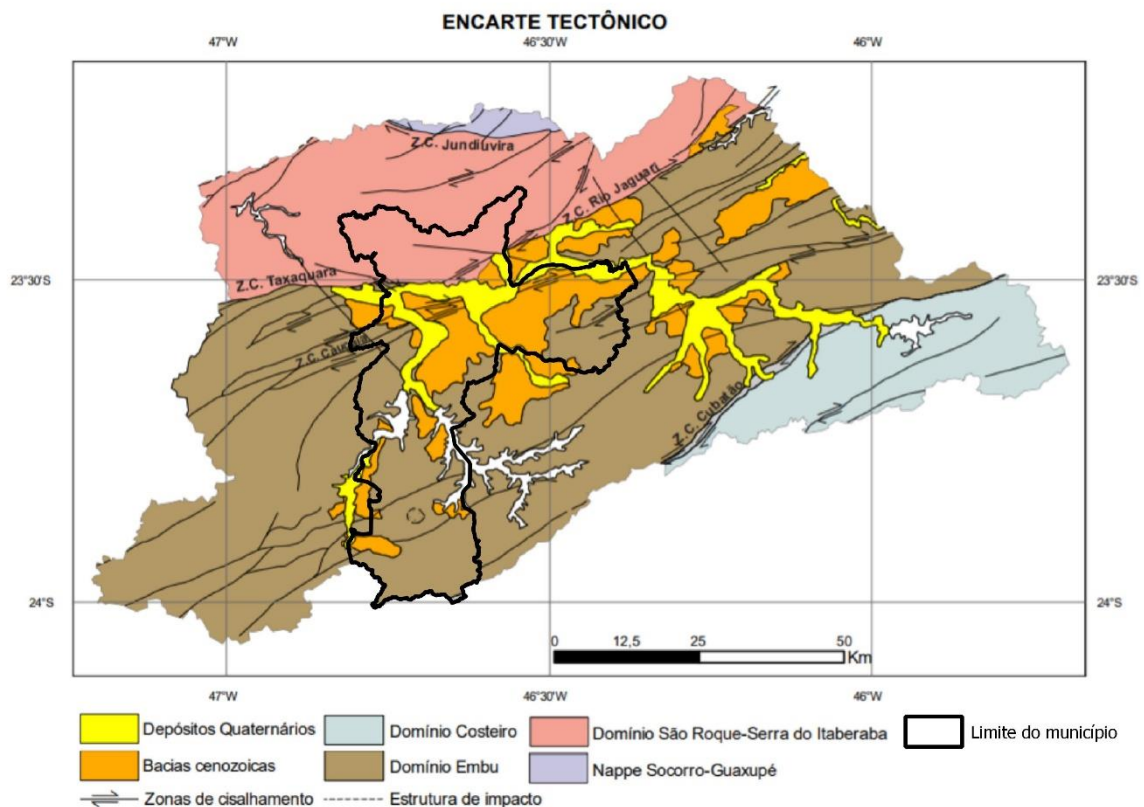


Figura 4.1: Encarte Tectônico do Mapa Geológico Integrado da Região Metropolitana de São Paulo, com destaque para o município de São Paulo (Almeida et al., 2019).

O Domínio Embu é formado por paragneisses, ortogneisses tonalíticos a granodioríticos, micaxistos, quartzitos, rochas cálcio-silicáticas, anfibolitos e metaultramafitos. No paleoproterozóico, essas rochas passaram por metamorfismo de baixo a alto grau, migmatização parcial e deformações durante o Evento Brasileiro, além da injeção de granitoides sincolisionais e pós-colisionais de 790-600 Ma (HASUI, 2012).

No Domínio São Roque-Serra do Itaberaba, Juliani (1993) subdividiu as rochas do Grupo Serra do Itaberaba em Formação Morro da Pedra Alta, composta essencialmente de metabasitos e xistos, sendo a formação basal do grupo; Formação Nhanguçu, composto por metapelitos com lentes de rochas carbonáticas/cálcio silicáticas no topo e com lentes subordinadas de metabasitos e metavulcanoclásticas; e Formação Pirucaia, sendo esta essencialmente quartzítica. O Grupo São Roque é constituído predominantemente por metassedimentos rítmicos, com quartzitos, metabasitos e rochas metavulcanoclásticas subordinadas, além de lentes de metaconglomerados e metabrechas na base.

4.1.2 Bacia de São Paulo

A Bacia de São Paulo faz parte de um conjunto de bacias pertencentes ao Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) (figura 4.2) que, de acordo com Riccomini (1989), teve origem no paleógeno, com a formação de um hemi-graben devido a esforços extensionais de direção NNW-SSE imposto pelo basculamento termomecânico na Bacia de Santos. Posteriormente, de acordo com Riccomini *et. al* (2004), a bacia foi retalhada por falhas pós-sedimentares que causaram soerguimentos e abatimentos locais de seu substrato.

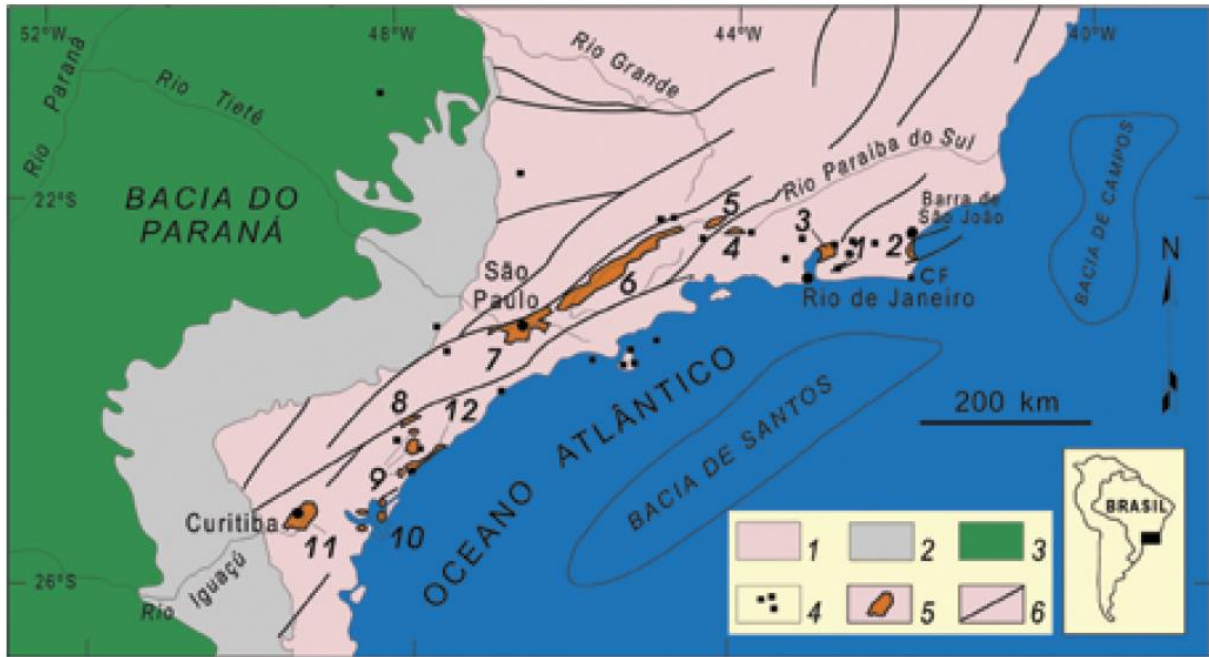


Figura 4.2: Contexto geológico regional do Rift Continental do Sudeste do Brasil. A Bacia de São Paulo está indicada pelo número 7, pertencendo ao seguimento central do RCSB (RICCOMINI, 2004).

O preenchimento da Bacia de São Paulo se iniciou com o Grupo Taubaté, de rochas vulcano-sedimentar sintectônicas. O Grupo Taubaté é dividido em três formações, sendo a primeira a Formação Resende, que compreende um sistema de leques aluviais associados à planície aluvial de rios entrelaçados. A Formação Tremembé foi depositada num sistema playa-lake, na lateral da bacia. Por fim, a Formação São Paulo foi depositada num sistema fluvial meandrante (RICCOMINI, 1989). A coluna litoestratigráfica, com a evolução tectono-sedimentar da porção central do RCSB, está representada na figura 4.3.

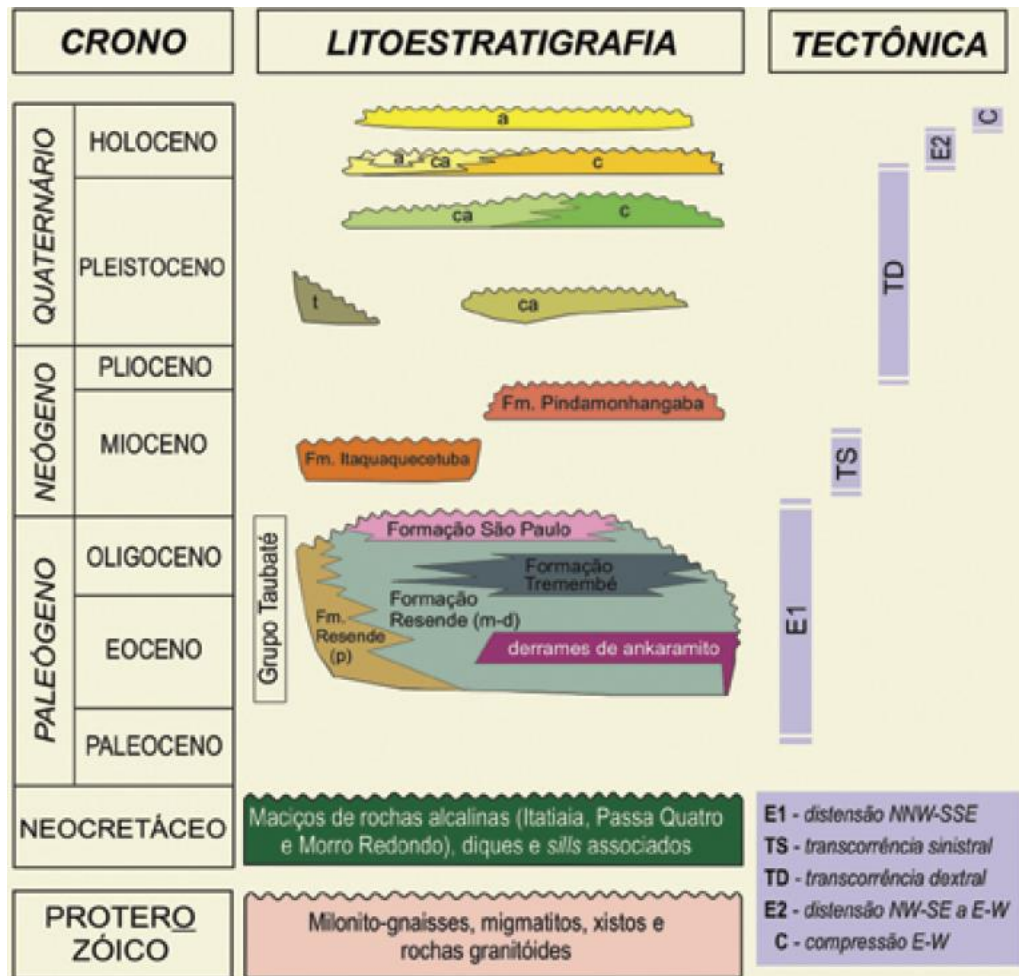


Figura 4.3: Quadro litoestratigráfico e evolução tectono-sedimentar do segmento central do RCSB (RICCOMINI et al., 2004). Letras: p - leques aluviais proximais; m-d - leques aluviais medianos a distais associados a planície aluvial de rios entrelaçados; t - depósitos de tálus; c - depósitos coluviais; ca - depósitos colúvioaluviais; a - depósitos aluviais.

4.1.3 Depósitos Quaternários

Os depósitos quaternários possuem distribuição relativamente restrita, predominando próximo às drenagens atuais. São depósitos colúvio-aluviais, com espessura normalmente inferior a 10m. Os coluviões são descontínuos, embora com distribuição generalizada, enquanto os aluviões são depositados em várzeas e baixos terraços, apresentando camadas arenosas e argilosas ricas em matéria orgânica, com cascalheiras na base (Monteiro et. al, 2012).

4.2 Geologia Local

A geologia da área de estudo corresponde aos sedimentos da Formação São Paulo e da Formação Resende, além de depósitos aluvionares e tecnogênicos.

A CMSP utiliza uma classificação própria para os litotipos da bacia de São Paulo, usando como base a proposta de classificação de Kutner e Bjornberg (1997), que utiliza letras e números para identificar as unidades. Uma síntese da classificação utilizada atualmente está apresentada na figura 4.4. O primeiro número indica se são depósitos tecnogênicos (1), depósitos aluvionares (2), Formação São Paulo (3), Formação Resende (4) ou embasamento cristalino (5). Depois, para os depósitos sedimentares, são inseridos prefixos que identificam a granulometria predominante (como Ag para argila ou Ar para areia), seguido de um número que representa as características específicas da unidade.

1 DEPÓSITOS TECNOGÊNICOS			
ATERROS COM MATERIAIS DIVERSOS COM PREDOMÍNIO DE ARGILA SILTOSA POUCO ARENOSA, GERALMENTE COM PEDREGULHOS E/OU MATÉRIA ORGÂNICA.			
2 DEPÓSITOS ALUVIONARES (QUATERNÁRIO)			
• FACIES ARGILOSO		• FACIES ARENOSO	
2Tf TURFA MUITO MOLE, PRETA.		2Ar1 AREIA FINA E MÉDIA ARGILOSA, POUCO PLÁSTICA, FOFA, MARROM E CINZA.	
2Ag1 ARGILA SILTOSA COM MATÉRIA ORGÂNICA DISSEMINADA, PLÁSTICA, MUITO MOLE, CINZA E MARROM.		2Ar2 AREIA MÉDIA E GROSSA POUCO ARGILOSA, FOFA, CINZA.	
2Ag2 ARGILA ARENOSA (AREIA FINA), COM MAT. ORGÂNICA, MUITO MOLE A MED. CONSISTENTE, MARROM E CINZA.		2Ar3 AREIA MÉDIA E GROSSA ARGILOSA COM PEDREGULHOS, FOFA A MED. COMPACTA, CINZA E MARROM.	
2Ag3 ARGILA SILTOSA ARENOSA, COM PEDREGULHOS E MAT. ORGÂNICA, PLÁSTICA, MOLE, CINZA E MARROM.			
3 FORMAÇÃO SÃO PAULO (TERCIÁRIO)			
• FACIES ARGILOSO		• FACIES ARENOSO	
– ARGILAS VERMELHAS			
3Ag1 ARGILA SILTOSA POUCO ARENOSA, POROSA, DE CONSISTÊNCIA MOLE A MÉDIA, VERMELHA E AMARELA.		3Ar1 AREIA FINA A MÉDIA ARGILOSA MEDIANAMENTE COMPACTA A COMPACTA, AMARELA E VERMELHA.	
3Ag2 ARGILA SILTOSA POUCO ARENOSA, DE CONSISTÊNCIA MÉDIA A RUA, VERMELHA.		3Ar2 AREIA DE GRANULAÇÃO VARIADA ARGILOSA COM PEDREGULHOS FINOS E MÉDIOS, MEDIANAMENTE COMPACTA A COMPACTA, VERMELHA.	
– ARGILAS VARIEGADAS			
3Ag3 ARGILA SILTOSA POUCO ARENOSA, DE CONSISTÊNCIA RUA A DURA, VARIEGADA (AMARELA, CINZA E VERMELHA)			
3Ag4 ARGILA ARENOSA POUCO SILTOSA, DE CONSISTÊNCIA MÉDIA A DURA, VARIEGADA (AMARELA, CINZA E VERMELHA)			
4 FORMAÇÃO RESENDE (TERCIÁRIO)			
• FACIES ARGILOSO		• FACIES ARENOSO	
4Ag1 ARGILA SILTOSA POUCO ARENOSA (AREIA FINA E MÉDIA) MEDIANAMENTE PLÁSTICA A PLÁSTICA, RUA A DURA, CINZA ESVERDEADA.		4Ar1 AREIA FINA E MÉDIA ARGILOSA, POUCO SILTOSA, POUCO MICACEA, POUCO PLÁSTICA, POUCO COMPACTA A COMPACTA, CINZA AMARELA.	
4Ag2 ARGILA ARENOSA (AREIA FINA E MÉDIA), POUCO MICACEA, POUCO A MEDIANAMENTE PLÁSTICA, RUA A DURA, CINZA.		4Ar2 AREIA MÉDIA E GROSSA, POUCO SILTOSA, MEDIANAMENTE A MUITO COMPACTA, CINZA AMARELA.	
4Ag3 ARGILA ARENOSA, POUCO SILTOSA, COM PEDREGULHOS VARIADOS, MEDIANAMENTE PLÁSTICA A PLÁSTICA, RUA A DURA, CINZA E MARROM.		4Ar3 AREIA MÉDIA E GROSSA, POUCO SILTOSA, COM FRAGMENTOS DE QUARTZO E PEDREGULHOS VARIADOS, MEDIANAMENTE A MUITO COMPACTA, CINZA AMARELA.	
5 EMBASAMENTO CRISTALINO (PRÉ-CAMBRIANO)			
5SR1 SILTE ARGILOSO POUCO ARENOSO, POUCO A MEDIANAMENTE COMPACTO, CINZA AVERMELHADO (SOLO RESIDUAL MADURO).		5SR2 SILTE ARGILOSO POUCO ARENOSO (AREIA FINA E MÉDIA), MICACEO, COMPACTO A MUITO COMPACTO, VERDE (SAFROLITO).	
5SR3 SILTE ARENOSO (AREIA FINA E MÉDIA), MICACEO, COMPACTO A MUITO COMPACTO, CINZA ESCURO (SOLO RESIDUAL JOVEM).		5R GNAISSE DE TEXTURA PROTOMILONÍTICA, GRANULAÇÃO MÉDIA, FOLIAÇÃO SUBVERTICAL A 60° – 70°, FRATURAS INCLINADAS (45°) A SUBVERTICAIS, POUCO A MEDIANAMENTE ALTERADO (A2/A3), COERENTE (C2), FRATURADO (F2).	

Figura 4.4: sistema de classificação de unidades geológico-geotécnicas utilizado pela CMSP (2011, *apud* GURGUEIRA 2013).

São apresentados os valores de SPT, peso específico (γ), ângulo de atrito interno (ϕ'), condutividade hidráulica (k) e módulo de elasticidade inicial (E_i) para os aterros e aluviões (tabela 3.1), Formação São Paulo (tabela 3.2) e Formação Resende (tabela 3.3), utilizados pela CMSP em parte do projeto básico da Linha 4 - Amarela. Esses parâmetros foram calculados a partir de sondagens de simples reconhecimento, ensaios geotécnicos (como triaxiais e edométricos) e também retroanálises a partir de obras subterrâneas anteriormente realizadas, entre outros.

Tabela 3.1: Parâmetros geotécnicos para aterros e aluviões (modificado de CMSP 1994, apud GURGUEIRA 2013).

Propriedades (unidades)	1 Aterro	2Tf	2Ag1	2Ag2	2Ag3	2Ar1	2Ar2 e 2Ar3
Descrição	Argila silto arenosa	Turfa muito mole	Argila siltosa com matéria orgânica	Argila arenosa com matéria orgânica	Argila areno-siltosa com matéria orgânica	Areia fina argilosa	Areia média e grossa, argilosa e com pedregulhos
SPT	2 a 7	0	0 a 4	0 a 4	0 a 4	1 a 9	2 a 13
γ (kN/m³)	16	14	16	16	16	17	17
ϕ' (°)	20	15	20	20	20	28	28
K (cm/s)	10^{-5}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-3}	$5 \cdot 10^{-3}$
E_i (MPa)	8 a 28	1	1 a 16	1 a 16	1 a 16	4 a 36	8 a 52

Tabela 3.2: Parâmetros geotécnicos para a Formação São Paulo (modificado de CMSP 1994, apud GURGUEIRA 2013).

Propriedades (unidades)	3Ar1	3Ar2	3AgP1	3AgP2	3Ag1	3Ag2
Descrição	Areia fina a média e argilosa	Areia média, argilosa com pedregulhos	Argila porosa vermelha	Argila vermelha rija	Argila siltosa variegada rija e dura	Argila arenosa variegada média e dura
SPT/prof (m)	SPT = prof(m) / 2 a SPT = 1,35 . prof(m)					
γ (kN/m³)	19	19	14,5 a 16	16 a 18	17 a 20	17 a 20
ϕ' (°)	30 a 35	30 a 35	27	25	22 a 21	24 a 21
K (cm/s)	10^{-3}	10^{-3}	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	$5 \cdot 10^{-4}$
OCR	3,0 a 1,5	3,0 a 1,5	2,0 a 1,1	2,0 a 1,5	3,0 a 2,5	3,3 a 2,2
E_i (MPa)	50 a 200	50 a 175	10 a 30	35 a 80	50 a 200	30 a 175

Tabela 3.3: Parâmetros geotécnicos para Formação Resende (modificado de CMSP 1994, apud GURGUEIRA 2013).

Propriedades (unidades)	4Ar1	4Ar2	4Ar3	4Ag1	4Ag2	4Ag3
Descrição	Areia fina, média e argilosa	Areia média, grossa e argilosa	Areia média e grossa	Argila siltosa	Argila arenosa	Argila arenosa com pedregulhos
SPT/prof (m)	Mínimo: $SPT = \text{prof(m)} / 2$ Máximo: $SPT = 2 \cdot \text{prof(m)}$					
γ (kN/m ³)	18,7 a 20,6	18,7 a 20,6	18,7 a 20,6	18,8 a 21,6	18,8 a 21,6	18,8 a 21,6
ϕ' (°)	30 a 35	30 a 40	30 a 40	24 a 21	24 a 21	27
K (cm/s)	$5 \cdot 10^{-3}$ a $9 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$ a 10^{-4}	$9 \cdot 10^{-3}$ a $5 \cdot 10^{-2}$	10^{-7}	10^{-7}	10^{-7}
OCR	3,3 a 1,7	3,3 a 1,7	>3,3 a 1,7	3,3 a 1,7	3,3 a 1,7	>4
E_i (MPa)	40 a 150	50 a 350	30 a 200	40 a 170	40 a 80	180 a 360

Gurgueira (2013) propôs uma sistematização das unidades não somente pela granulometria, mas também considerando o ambiente de sedimentação. Os aluviões foram divididos em 2 subunidades, ALag, composto por argilas e lamias ricas em matéria orgânica, e ALar, composto por areias e cascalhos.

A Formação São Paulo foi dividida em 3 subunidades: SPal, camada superficial alterada, com lamitos argilosos, que corresponde as camadas descritas como “argila vermelha” ou “argila porosa” no meio geotécnico; SPag, composta por depósitos fluviais meandantes de planície de inundação ou meandros abandonados, de argilitos e lamitos argilosos, que corresponde as “argilas variegadas”; SPar, depósitos fluviais de canais meandantes ou de rompimento de diques marginais, compostos por arenitos e conglomerados.

O contato entre a Formação São Paulo e a Formação Resende ocorre em torno da cota 740m, variando de 730 até 745 m, sendo um contato do tipo erosivo na região central da Bacia de São Paulo. Próximo a borda da bacia, pode haver interdigitações entre os leques aluviais da Formação São Paulo e os depósitos fluviais meandantes da Formação Resende (GURGUEIRA, 2013).

A Formação Resende também foi dividida em 3 subunidades, sendo elas RSlp, que corresponde aos depósitos de leques aluviais proximais, composto por brechas e diamictitos, RSld, que corresponde aos depósitos de leques aluviais medianos a distais, composto por lamitos argilosos a arenosos e argilitos, e RSel, de depósitos

fluviais provenientes de canais de rios entrelaçados, composto por arenitos e conglomerados (GURGUEIRA, 2013).

Gurgueira (2013) fez uma correlação dos parâmetros geotécnicos advindos das sondagens e ensaios provenientes da Linha 17 – Ouro do Metrô de São Paulo com as unidades definidas, sendo que os resultados estão em função do valor de N_{spt} , pois pode haver variações dentro de cada unidade (tabela 3.4).

Tabela 3.4: Parâmetros geotécnicos para as unidades definidas por Gurgueira (2013). Em amarelo estão descritos os parâmetros dos aluviões, em vermelho da Formação São Paulo e em verde da Formação Resende.

Unidade	N_{spt}	γ (kN/m ³)	c' (kN/m ²)	ϕ' (°)	K_0	K_h	E	k (cm/s)
ALag	0 a 4	16,0	8	20	0,83	2,08	3,2	10^{-5} a 10^{-4}
ALar	1 a 9	17,0	5	28	0,73	5,20	8,0	10^{-3} a $5 \cdot 10^{-3}$
SPal	2 a 4	15,0	20	27	0,60	3,90	6,0	$5 \cdot 10^{-4}$
	5 a 10	16,0	20	27	0,60	9,75	15,0	$5 \cdot 10^{-4}$
	> 10	18,0	40	25	0,60	19,50	30,0	$5 \cdot 10^{-4}$
SPag	3 a 5	17,0	25	27	0,90	5,20	8,0	$5 \cdot 10^{-4}$
	5 a 8	18,0	30	25	0,90	9,75	15,0	$5 \cdot 10^{-4}$
	8 a 12	19,0	40	24	0,90	13,00	20,0	$5 \cdot 10^{-4}$
	12 a 18	20,0	50	23	0,90	19,50	30,0	$5 \cdot 10^{-4}$
	18 a 25	20,0	75	22	0,80	29,25	45,0	$5 \cdot 10^{-4}$
	25 a 40	20,0	100	21	0,80	42,25	65,0	$5 \cdot 10^{-4}$
	> 40	20,0	150	20	0,80	65,00	100,0	$5 \cdot 10^{-4}$
SPar	5 a 10	19,0	3	30	0,80	6,50	10,0	10^{-4} a 10^{-3}
	10 a 20	19,0	3	32	0,80	19,50	30,0	10^{-4} a 10^{-3}
	> 20	19,0	3	35	0,80	32,50	50,0	10^{-4} a 10^{-3}
RSel	5 a 10	19,0	5	30	0,80	9,75	15,0	10^{-4} a 10^{-2}
	10 a 20	20,0	5	32	0,80	19,50	30,0	10^{-4} a 10^{-2}
	> 20	20,6	5	35	0,80	32,50	50,0	10^{-4} a 10^{-2}
RSld e lp	3 a 5	19,0	25	27	0,80	5,20	8,0	10^{-7} a 10^{-6}
	5 a 8	19,5	30	25	0,80	9,75	15,0	10^{-7} a 10^{-6}
	8 a 12	20,0	40	24	0,80	13,00	20,0	10^{-7} a 10^{-6}
	12 a 18	20,5	50	23	0,80	19,50	30,0	10^{-7} a 10^{-6}
	18 a 25	21,0	75	22	0,80	29,25	45,0	10^{-7} a 10^{-6}
	25 a 40	21,5	100	21	0,80	42,25	65,0	10^{-7} a 10^{-6}
	>40	21,5	150	20	0,80	65,00	100,0	10^{-7}

5. MATERIAIS E MÉTODOS

A CMSP disponibilizou os dados de 8 ensaios CPTu realizados em 2015 ao longo do trecho de expansão da Linha 2 - Verde do Metrô, na zona leste do município de São Paulo. A localização dos ensaios está indicada na figura 5.1. O número e as características dos ensaios estão na tabela 5.1.

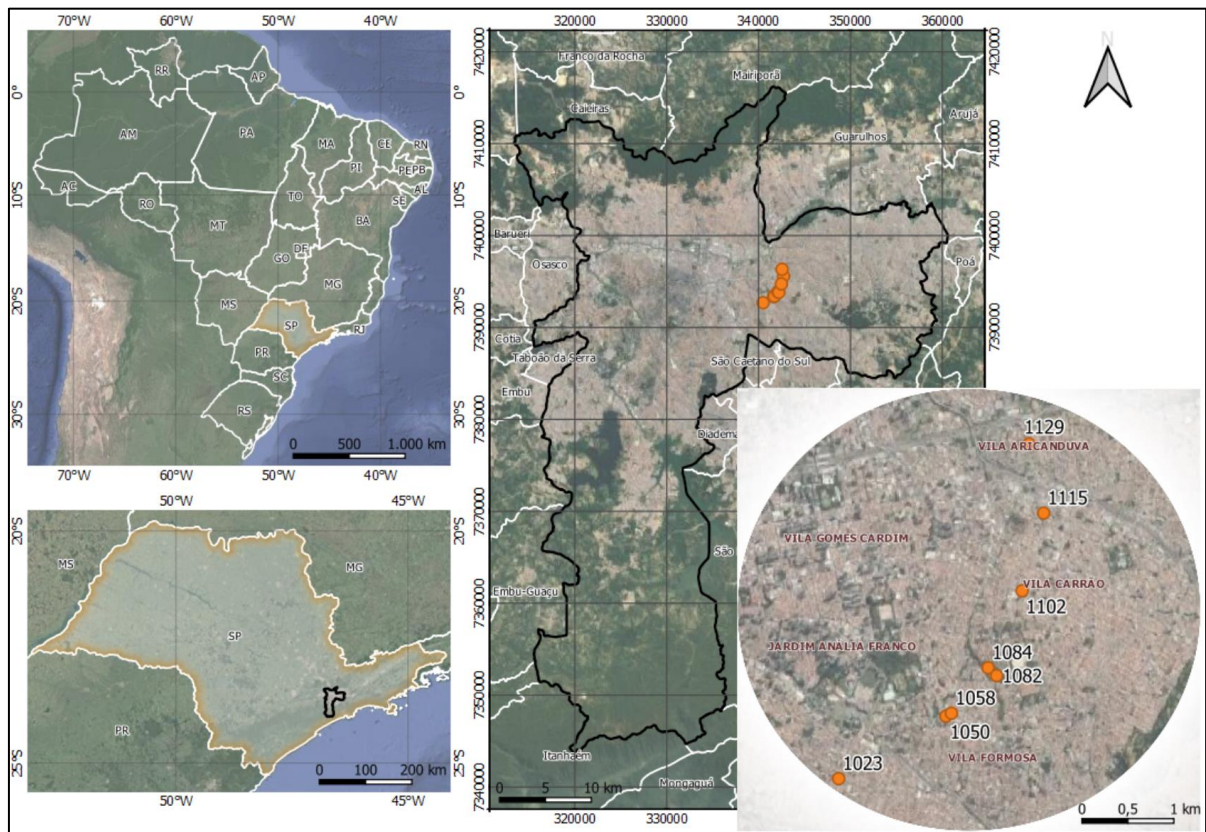


Figura 5.1: Mapa de localização das investigações com CPTu para expansão da Linha 2 – Verde do Metrô de São Paulo.

Tabela 5.1: Características dos ensaios CPTu.

Nº ensaio	Cota (m)	Pré-furo (m)	Profundidade final (m)	Critério de paralisação
1023	770,478	0,70	9,87	Atingido limite do sistema de ancoragem
1050	785,236	1,97	8,10	Atingido limite do sistema de ancoragem
1058	787,715	1,75	7,56	Atingido limite do sistema de ancoragem
1082	754,125	2,20	8,85	Flambagem das hastes
1084	752,230	2,06	10,70	Flambagem das hastes
1102	761,375	2,08	16,30	Flambagem das hastes
1115	730,082	2,02	13,00	Atingido limite do sistema de ancoragem
1129	764,673	1,93	19,26	Atingido limite do sistema de ancoragem

Para cada ensaio foram disponibilizados os valores de q_t (MPa), f_s (kPa), u_2 (kPa) e R_f (%), tanto na forma de planilha, quanto na forma de perfis em formato pdf. O valor de q_t foi convertido para kPa, de forma a padronizar a unidade de medida. Exceto quando explicitado, todos os parâmetros foram calculados em kPa.

Também foram disponibilizados os Perfis Individuais das sondagens de simples reconhecimento executadas na mesma ilha de investigação que os CPTu's, com as informações de descrição tátil-visual das camadas de solo, os resultados do ensaio SPT (*Standard Penetration Test*) e a posição do nível d'água subterrânea.

Com esses dados, foi feita uma divisão das camadas de acordo com o comportamento, sendo que as camadas foram nomeadas em ordem alfabética, a partir da camada superior, para cada ensaio.

A classificação da CMSP (2011, *apud* GURGUEIRA 2013) foi utilizada nos dados da sondagem de simples reconhecimento para obter o valor do peso específico (γ) do solo para cada camada, de acordo com as tabelas 3.1, 3.2 e 3.3. Com o valor do peso específico, foram calculados os valores de tensão vertical (σ_{vo}). A pressão hidrostática (u_0) foi calculada usando o nível d'água medido no ensaio de simples reconhecimento e a tensão efetiva (σ'_{vo}) foi calculada a partir da seguinte equação (4.1).

$$\sigma'_{vo} = \sigma_{vo} - u_0 \quad (4.1)$$

Com esses dados, foram calculados os parâmetros normalizados B_q , Q_t e F_r , de acordo com as equações 3.3, 3.4 e 3.5 de Robertson (1990).

As camadas foram plotadas nos ábacos de Robertson (1990) (figura 3.3). Em seguida, as camadas foram agrupadas de acordo com a formação geológica e com as regiões do ábaco. Para a análise dos resultados, os dados dos aterros foram descartados, pois na maior parte dos aterros não é feita a investigação com CPTu devido aos pré-furos (como indicado na tabela 5.1).

Para as **camadas argilosas**, foram calculados os seguintes parâmetros:

- **Resistência ao cisalhamento não drenada (S_u):** foi calculada a partir da equação 3.6. O valor de N_{kt} utilizado foi de 20, valor obtido por Caldo (2015) para os sedimentos da Bacia de São Paulo.

- **Pressão de pré-adensamento (σ'_{vm}):** calculada a partir da equação 3.7, sendo que foi usado o valor 0,33 para k_1 , valor usado por Caldo (2015) para a mesma região de estudo.

- **Razão de pré-adensamento (OCR):** calculado a partir da equação 3.8.

Para as **camadas arenosas**, foi calculado o **ângulo de atrito (ϕ')** a partir da equação 3.9.

Para todas as camadas, foram calculados os parâmetros:

- **Módulo de Elasticidade Tangencial Inicial (E_i):** calculado a partir da equação 3.10, sendo que o valor de α_E adotado foi de 20 para as camadas argilosas, 10 para as camadas arenosas da Fm. São Paulo e aluvião e 5 para as camadas da Fm. Resende. Esses valores foram definidos com base no ábaco da figura 3.4. O valor de E_i foi convertido para MPa.

- **Módulo Edométrico (M):** calculado a partir da equação 3.11, sendo que o valor de α_M também varia de acordo com o material. O cálculo do α_M foi realizado seguindo o que foi mostrado no item 3.2.4. da revisão bibliográfica. O valor final foi convertido para MPa.

- **Condutividade Hidráulica (k):** o intervalo de condutividade hidráulica foi calculado de acordo com a tabela 3.3, que relaciona o tipo de comportamento do solo com a permeabilidade.

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. Nesses trechos não saturados, ocorre o efeito de sucção, resultando numa medida de poropressão negativa. Esse efeito da poropressão negativa foi registrado em quase todas as investigações, exceto na investigação n. 1082, mas pode ser observado de forma clara nos perfis das figuras 6.5, 6.11 e 6.13, por exemplo. Quando o elemento filtrante do piezocone perde a saturação, as medidas geradas não são confiáveis.

Os resultados foram comparados àqueles já disponíveis na literatura técnica sobre o assunto.

6. RESULTADOS

Nessa seção são apresentados os gráficos dos 8 ensaios, a divisão das camadas e a plotagem dos dados nos ábacos de classificação de Robertson (1990) (figuras 6.1 a 6.16). Nessas figuras também é feita uma comparação com os resultados das sondagens de simples reconhecimento, mostrados sempre na coluna ao lado esquerdo do resultado do ensaio CPTu.

Na investigação n. 1023 (figura 6.1) a divisão das camadas propostas apresenta correlação com as camadas identificadas pela sondagem de simples reconhecimento, sendo que a camada B foi classificada com comportamento de argila siltosa de acordo com o ábaco de Robertson (1990), enquanto as camadas C e D ficaram na região com comportamento de silte arenoso (figura 6.2). A camada B foi descrita como argila siltosa na sondagem e as camadas C e D são argilas siltosas com areia consolidada.

Já em outras investigações, como a n. 1082 (figura 6.7), os limites para divisão das camadas não convergiram, mas o comportamento geral das camadas condiz com o descrito na sondagem de simples reconhecimento. No caso da investigação n. 1082, todos os pontos do CPTu caíram na região de comportamento de siltes arenosos (figura 6.8) e, de acordo com a descrição de sondagem, são argilas siltosas ou arenosas com areia fina a média.

Por outro lado, em algumas investigações, como a n. 1102 (figura 6.11), apesar de algumas camadas interpretadas a partir do CPTu apresentarem limites e comportamentos semelhantes aos descritos na sondagem de simples reconhecimento, outras camadas aparentam não ser detectadas pelo CPTu. No caso da investigação n. 1102, todos os pontos do CPTu caíram na região de comportamento de argilas/argilas siltosas (figura 6.12) mas, de acordo com a descrição de sondagem, entre 9,6 a 12,0 m existe uma camada de areia média a grossa argilosa, com pedregulhos finos dispersos e de consistência média a rija. A camada C, que estaria no centro dessa camada arenosa, apresenta um valor de R_f muito alto (acima de 12%) e conseqüentemente um valor muito alto de F_r , de forma que vários pontos dessa camada não entraram no ábaco da figura 6.12.

Além da camada C da investigação n. 1102, alguns pontos das camadas C e D da investigação n. 1058 também apresentam valores de F_r maiores que 10, mas como

foram poucos pontos, essas camadas foram classificadas de acordo com o comportamento do restante da camada.

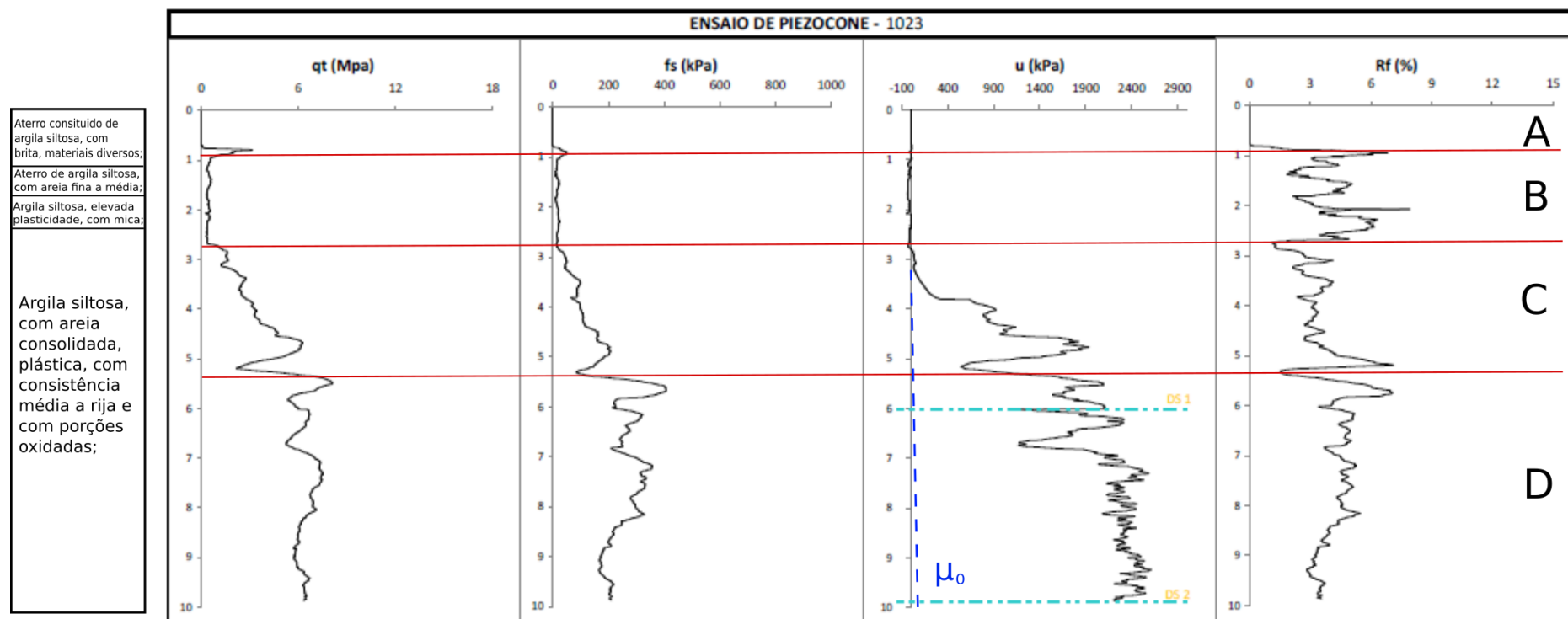


Figura 6.1: Interpretação da divisão de camadas da investigação por CPTu n. 1023.

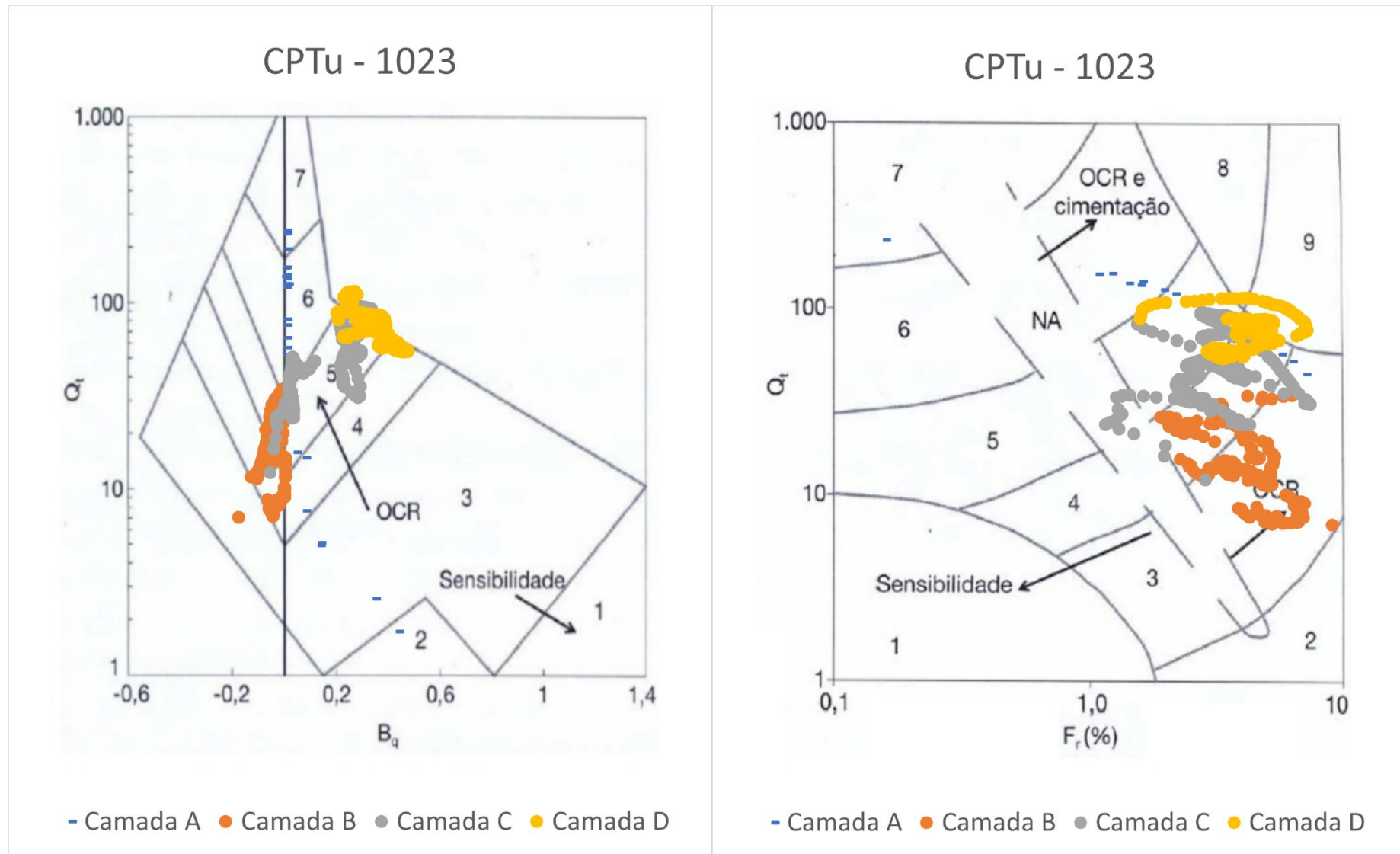


Figura 6.2: ábaco de Robertson (1990) com as camadas da investigação n. 1023.

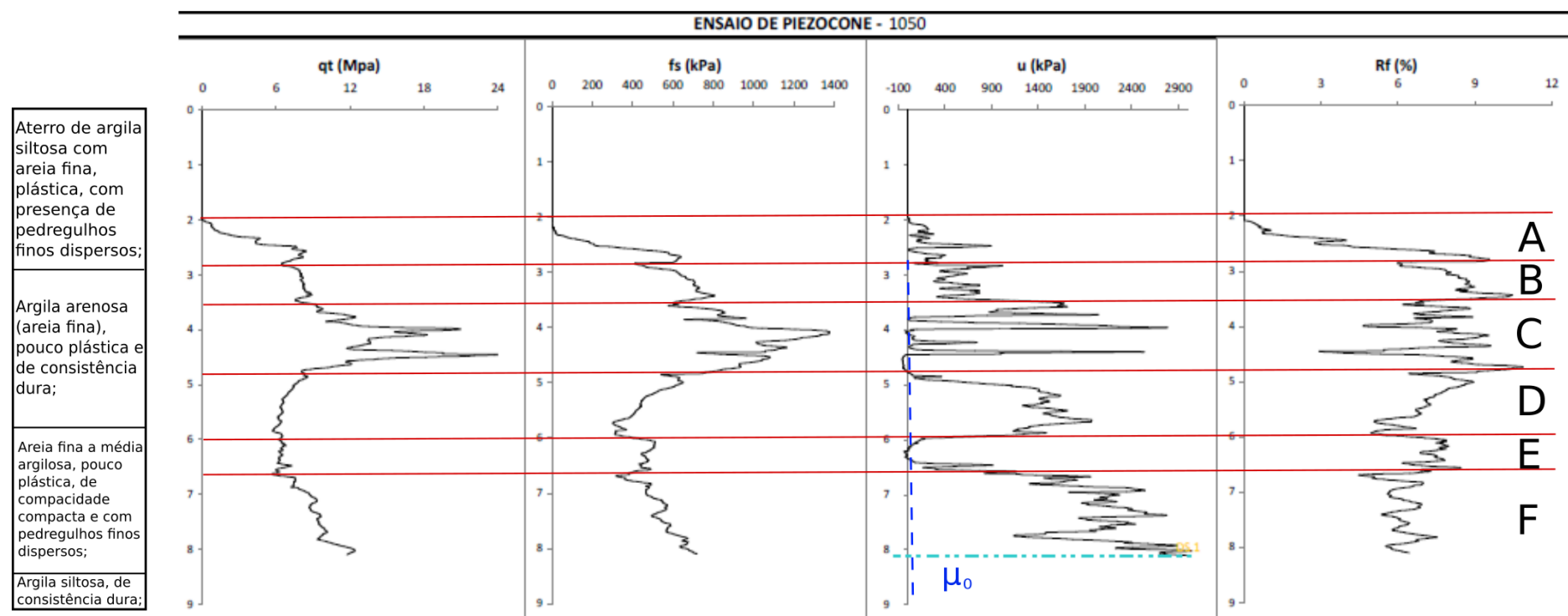


Figura 6.3: Interpretação da divisão de camadas da investigação por CPTu n. 1050.

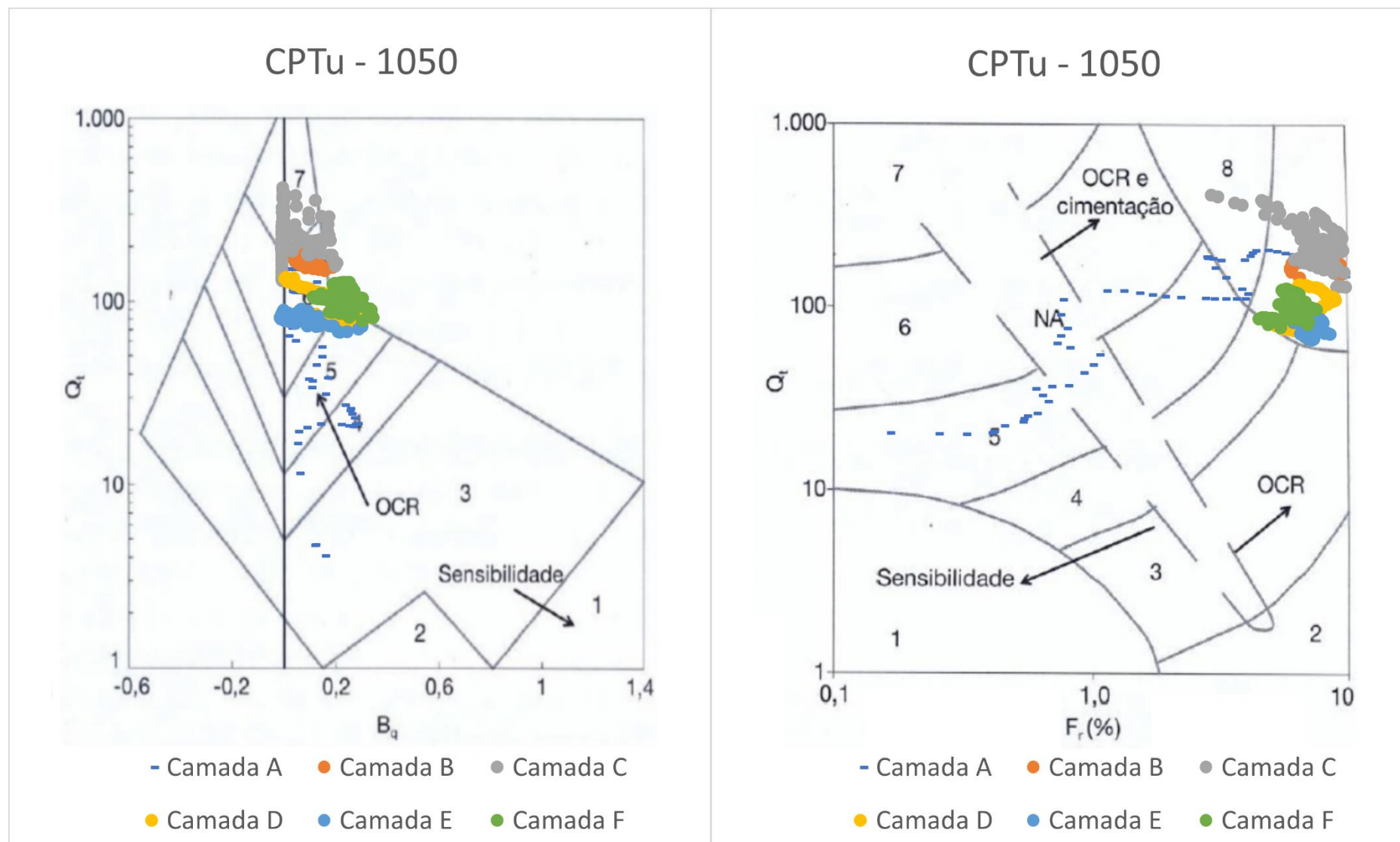


Figura 6.4: ábaco de Robertson (1990) com as camadas da investigação n. 1050.

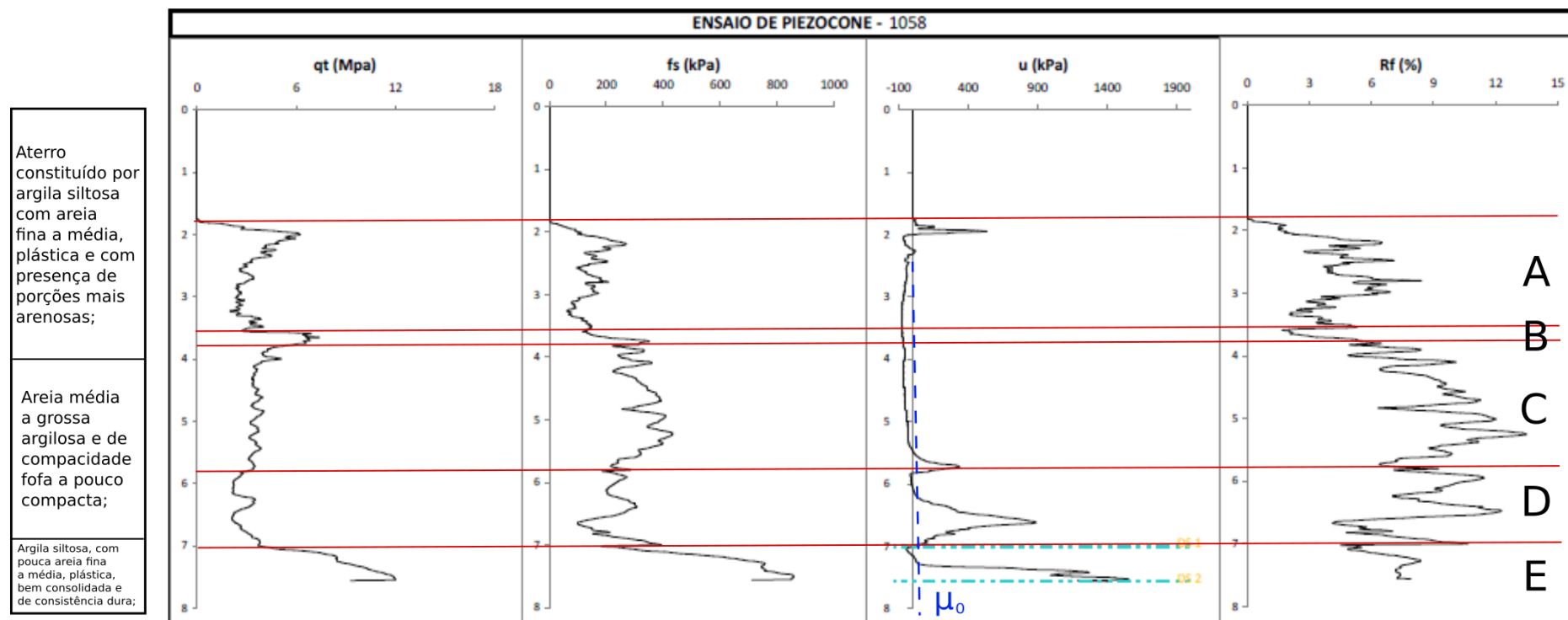


Figura 6.5: Interpretação da divisão de camadas da investigação por CPTu n. 1058.

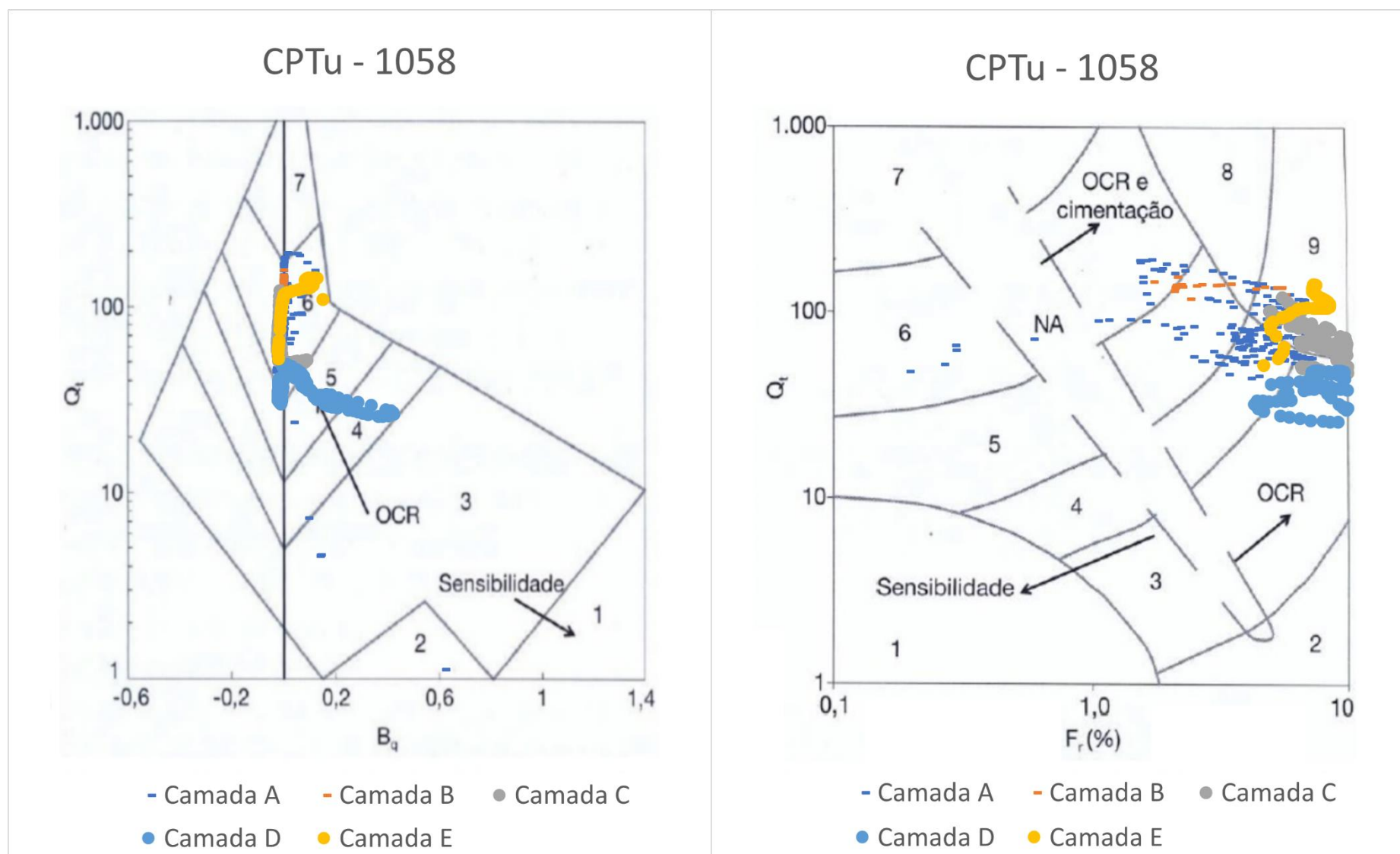


Figura 6.6: ábaco de Robertson (1990) com as camadas da investigação n. 1058.

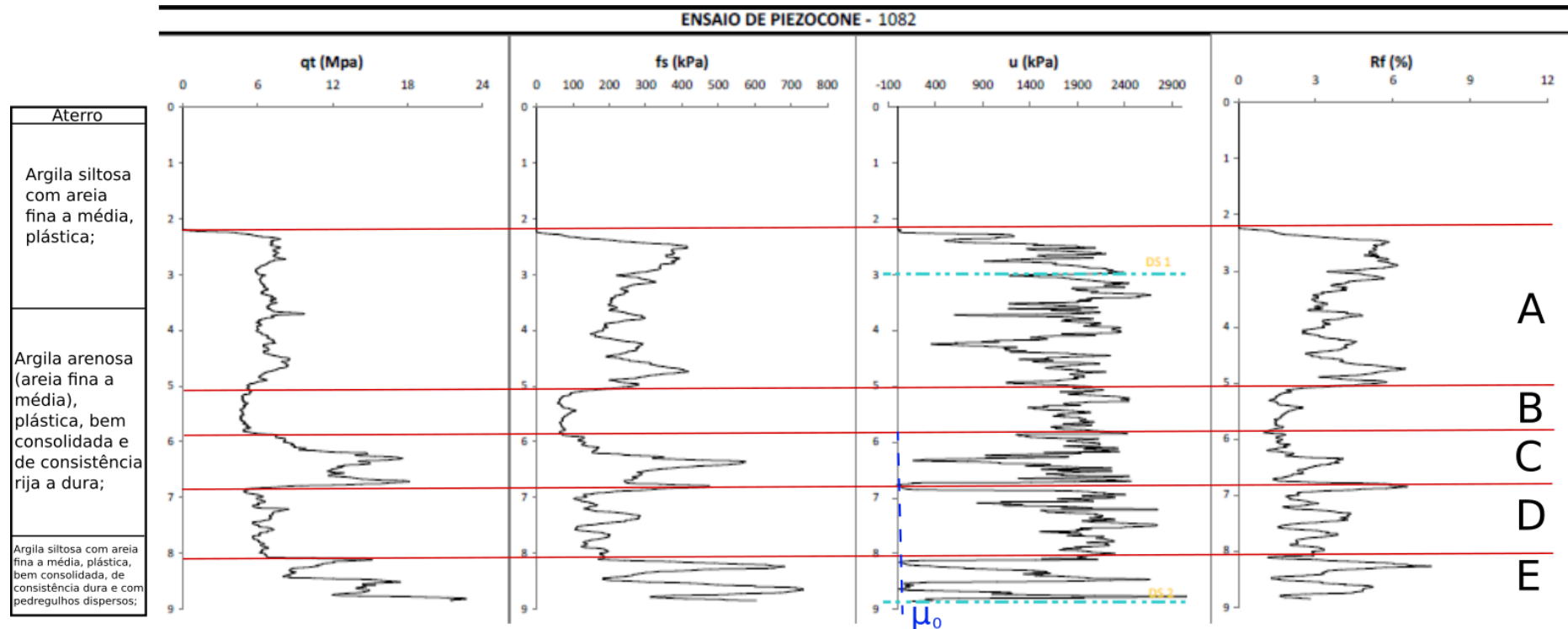


Figura 6.7: Interpretação da divisão de camadas da investigação por CPTu n. 1082.

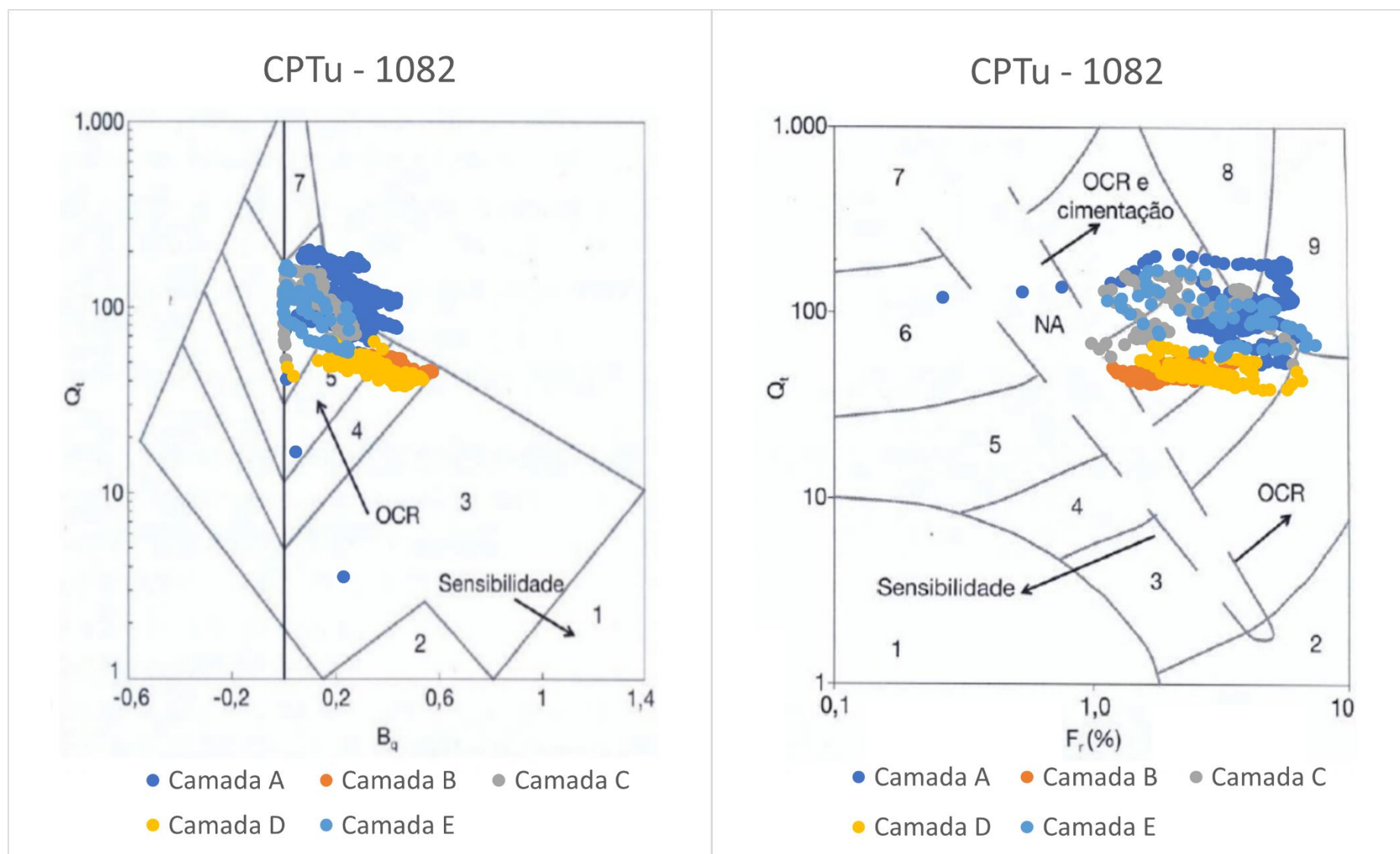


Figura 6.8: ábaco de Robertson (1990) com as camadas da investigação n. 1082.

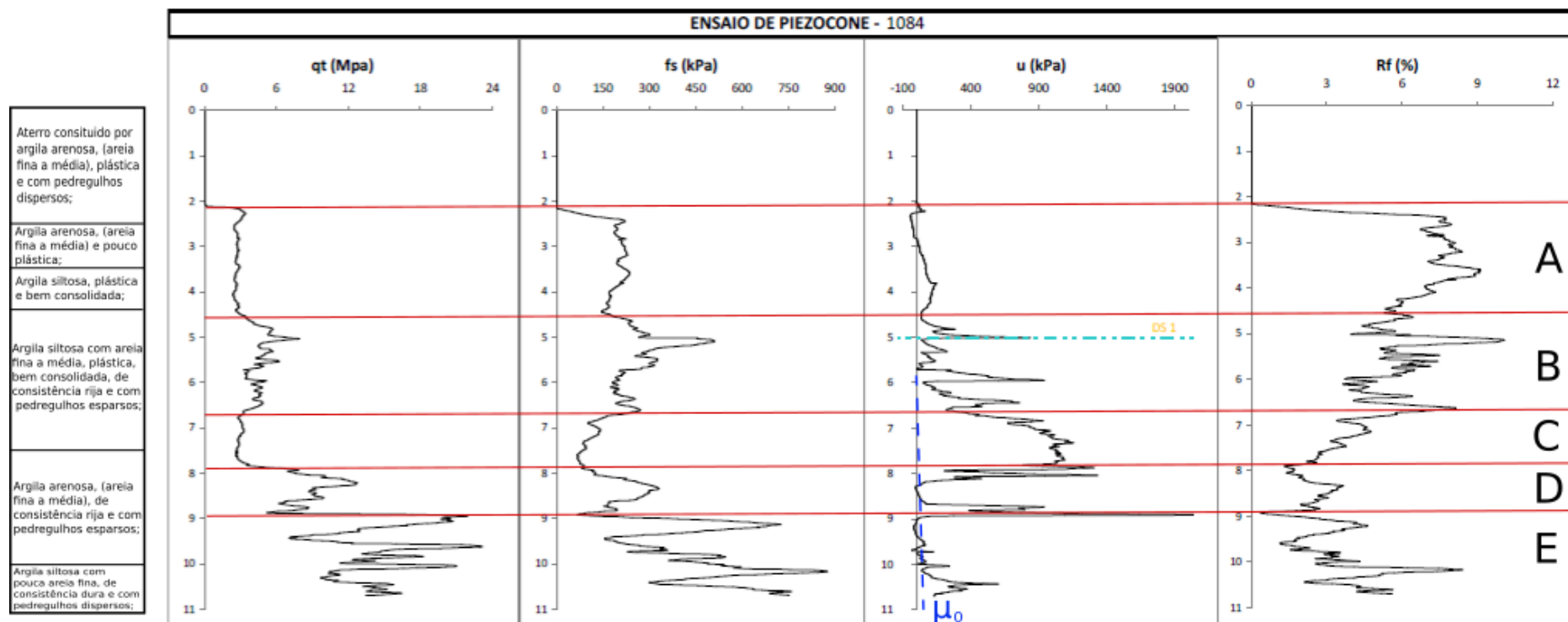


Figura 6.9: Interpretação da divisão de camadas da investigação por CPTu n. 1084.

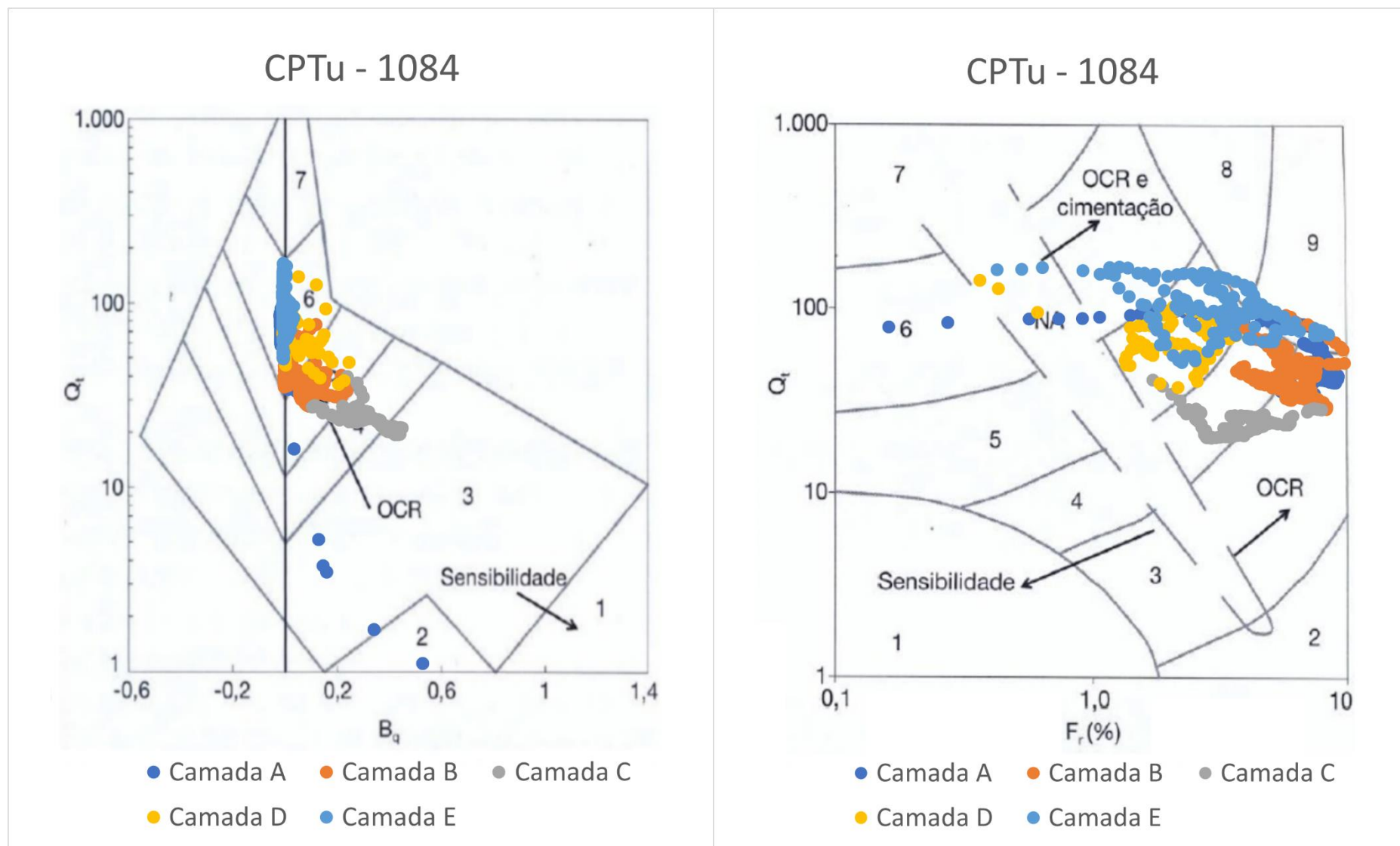


Figura 6.10: ábaco de Robertson (1990) com as camadas da investigação n. 1084.

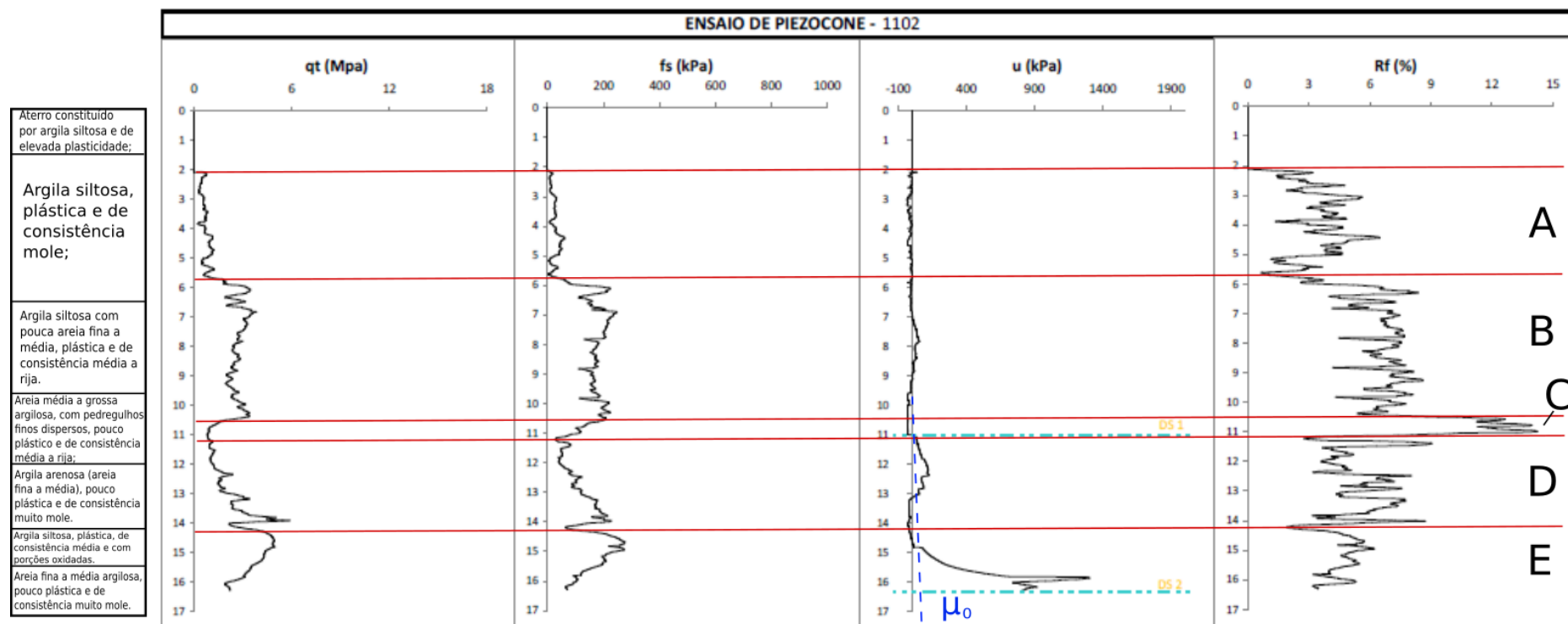


Figura 6.11: Interpretação da divisão de camadas da investigação por CPTu n. 1102.

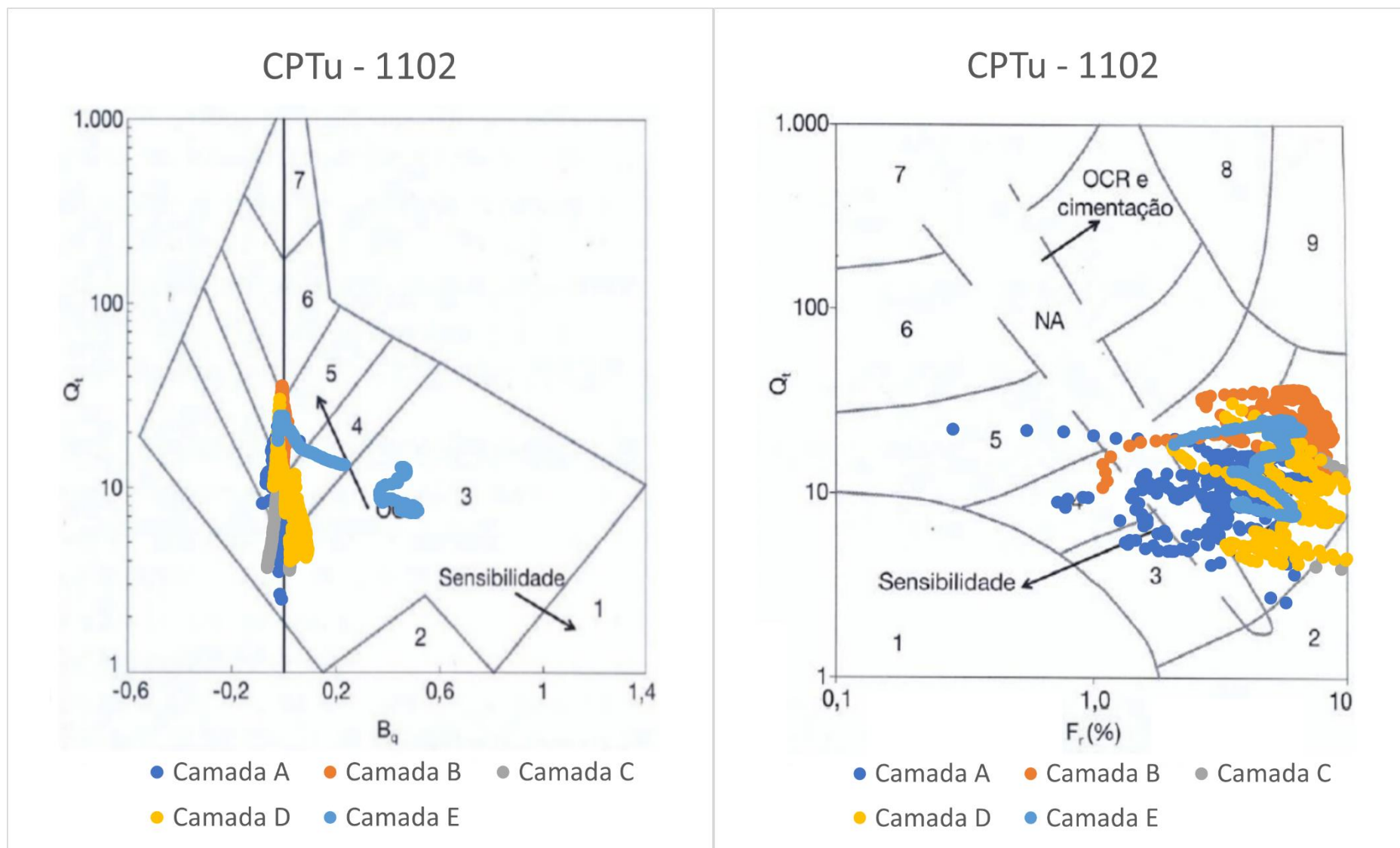


Figura 6.12: ábaco de Robertson (1990) com as camadas da investigação n. 1102.

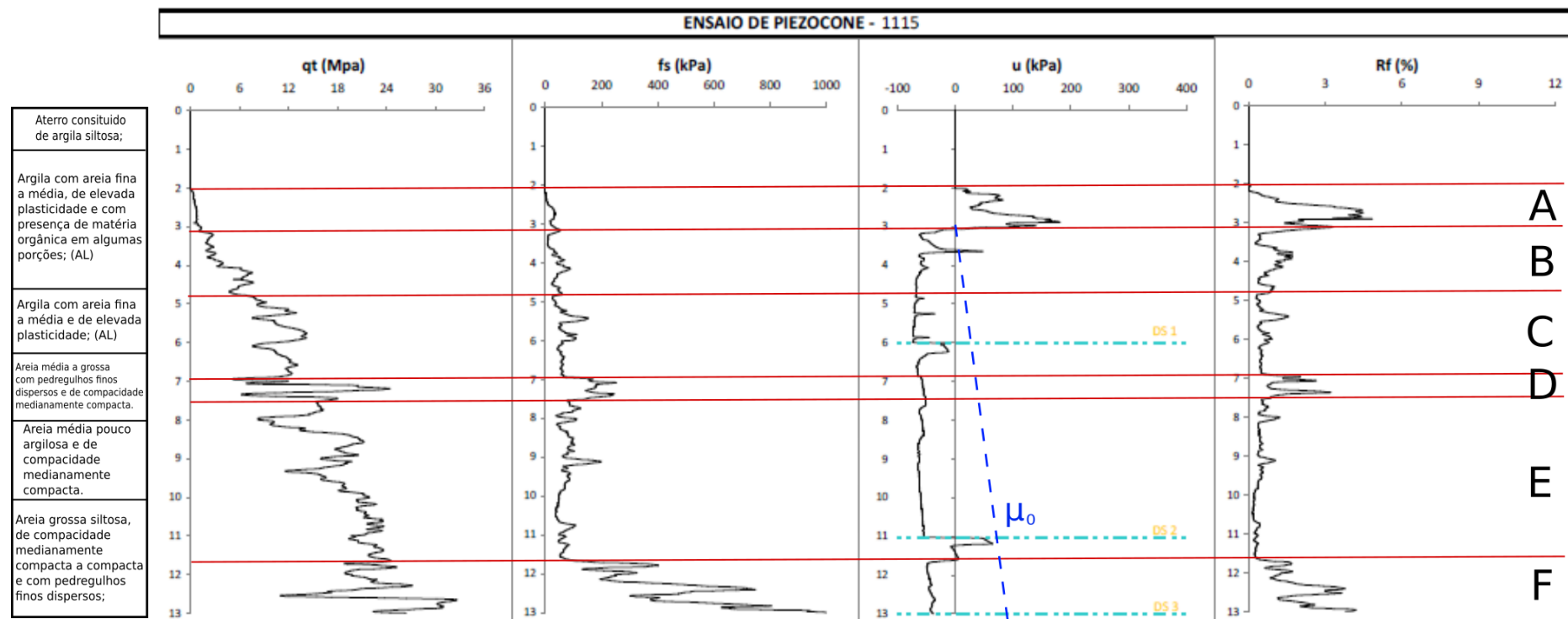


Figura 6.13: Interpretação da divisão de camadas da investigação por CPTu n. 1115.

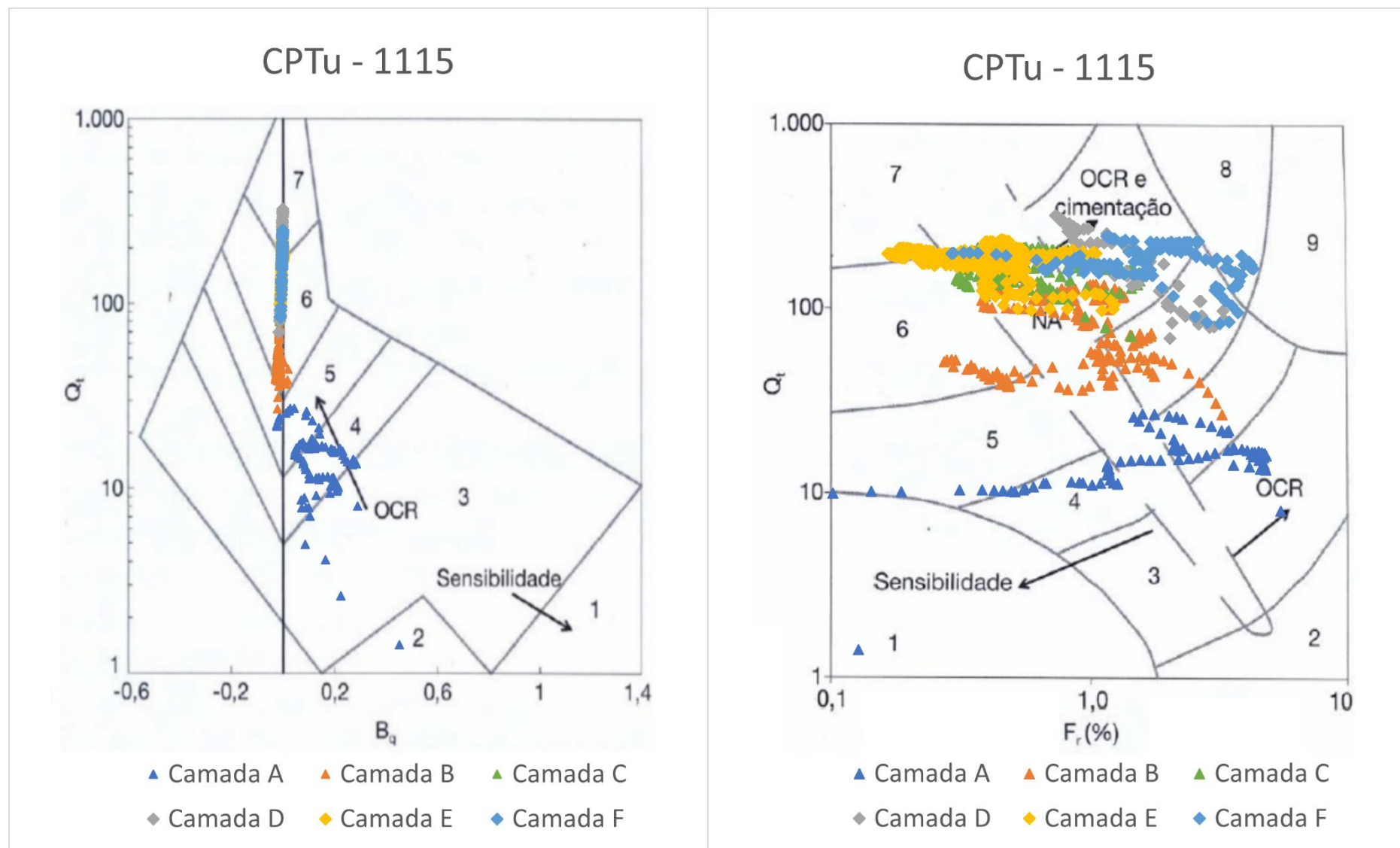


Figura 6.14: ábaco de Robertson (1990) com as camadas da investigação n. 1115.

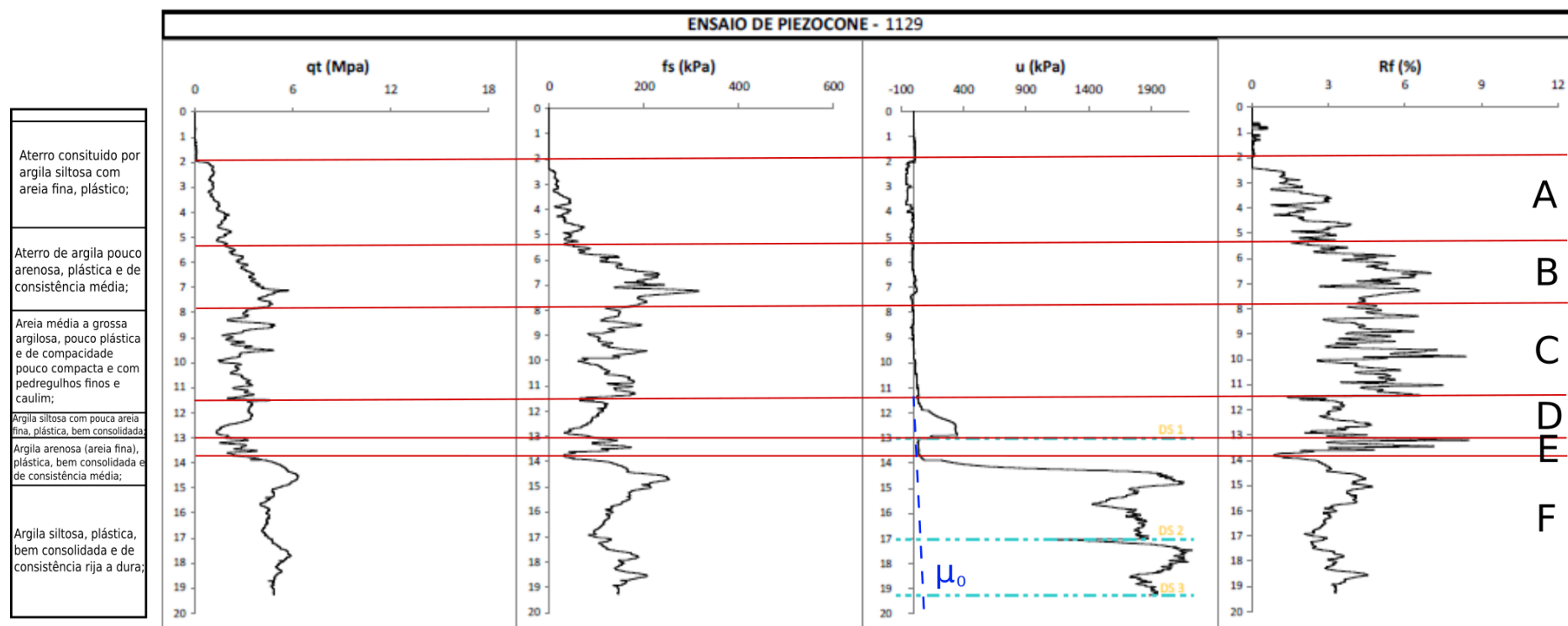


Figura 6.15: Interpretação da divisão de camadas da investigação por CPTu n. 1129.

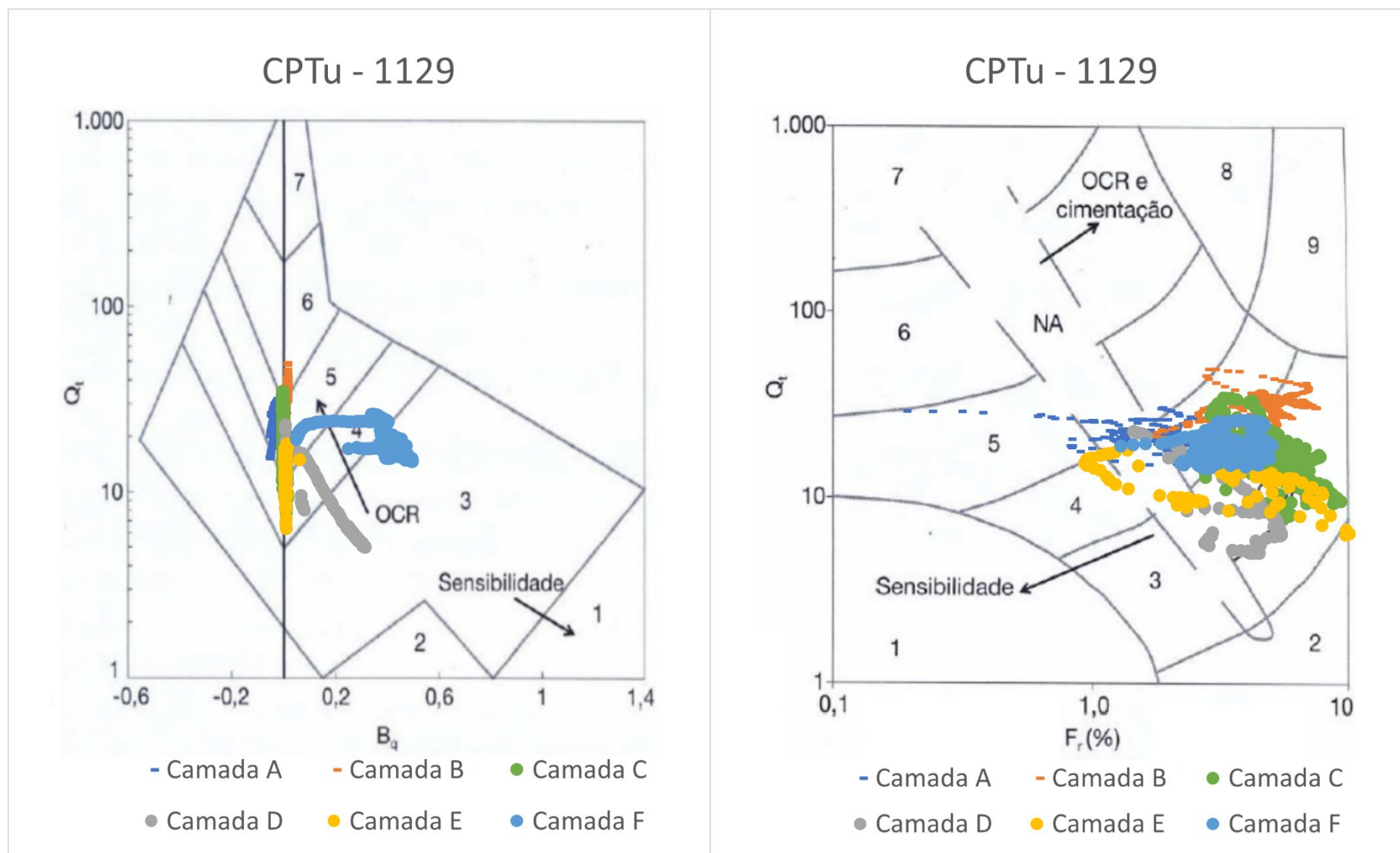


Figura 6.16: ábaco de Robertson (1990) com as camadas da investigação n. 1129.

6.1 Características dos Solos da Cidade de São Paulo

O ensaio 1115 foi o único que foi realizado abaixo da cota de 740 m, sendo interpretado como pertencendo à Formação Resende. Além disso, as camadas A, B e C foram identificadas como sendo aluvião pela sondagem de simples reconhecimento. Foram plotados novamente os dados deste ensaio no ábaco de Robertson (1990), desta vez com as divisões entre a Formação Resende e Aluvião (figura 6.17).

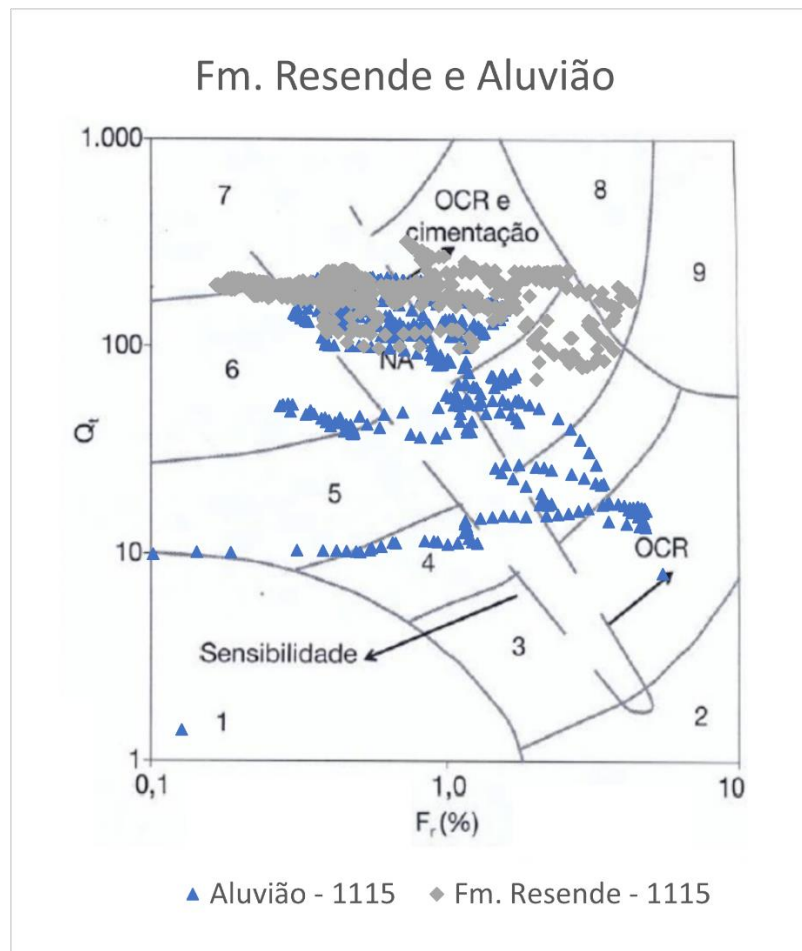


Figura 6.17: ábaco de Robertson (1990) com os dados da Fm. Resende e Aluvião.

É possível observar pela figura 6.17 que a maior parte da Fm. Resende está na zona 6, de areias limpas – areias siltosas. O aluvião apresenta grande dispersão dos dados, ocupando 4 zonas no ábaco.

Todas as demais investigações foram executadas acima da cota 740m e foram interpretadas como pertencentes à Formação São Paulo. Esses dados foram plotados conjuntamente no ábaco de Robertson (1990) (figura 6.18). É possível observar que eles ocupam 3 regiões principais no ábaco. A divisão das camadas foi representada

por cores, sendo que os pontos vermelhos e amarelos são referentes às camadas com comportamento de argila – argila siltosa nas zonas 3 e 4, os pontos azuis e roxos na zona 5 correspondem a solos com comportamento de areias siltosas e os pontos verdes, na zona 9, correspondem a solos com comportamento de areias finas rígidas.

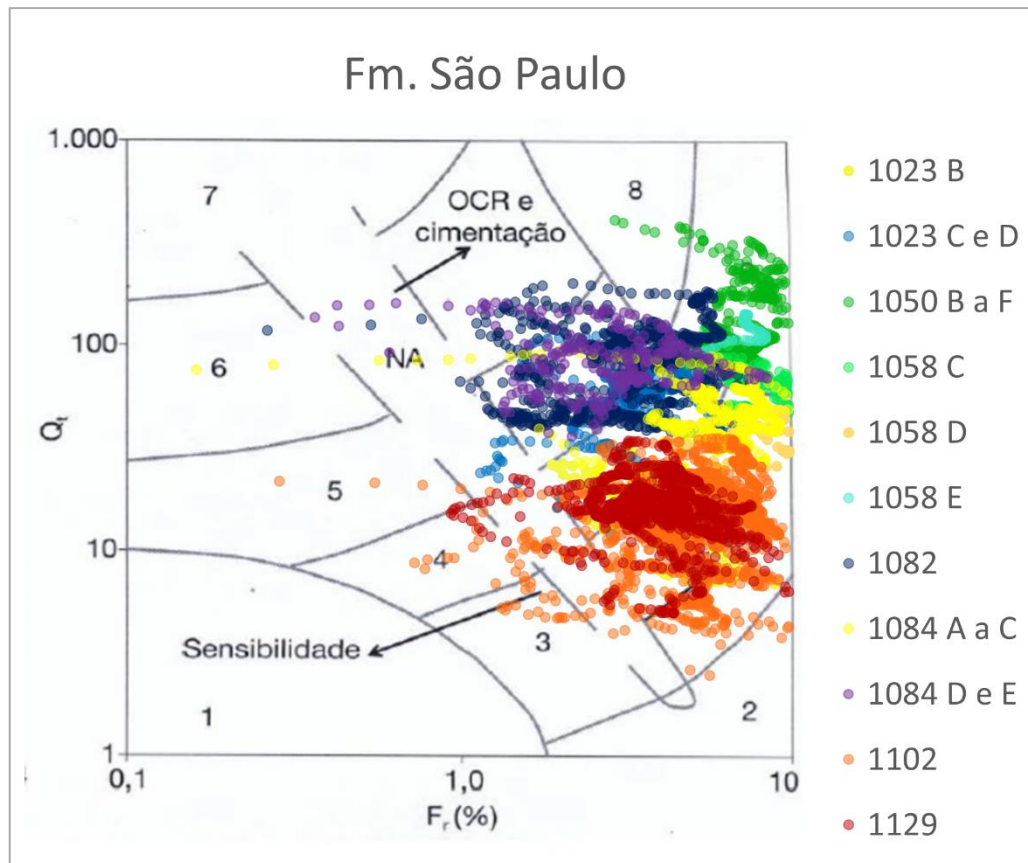


Figura 6.18: Ábaco de Robertson (1990) com os dados da Fm. São Paulo.

6.2 Parâmetros Geotécnicos dos Solos da Cidade de São Paulo

Os parâmetros geotécnicos foram calculados e divididos de acordo com o comportamento do solo. Na Formação São Paulo, os solos com comportamento argiloso apresentaram alta razão de pré-adensamento, com valor médio de OCR de 7,0, mas chegando a valores acima de 30 na investigação 1084. O valor médio de S_u foi de 132 KPa, variando de 11 até 390 KPa. Os valores médios de E_i e M foram de 53 MPa e 35 MPa, respectivamente. A tabela 6.2 apresenta os intervalos, valores médios e desvio padrão desses parâmetros para cada investigação com camadas argilosas, sendo que para algumas camadas (camada C da investigação n. 1084 e camada B da investigação n.1102) o resultado foi individualizado, por apresentarem valores distintos do restante da investigação.

Tabela 6.2: Parâmetros geotécnicos calculados para as camadas com comportamento de argilas da Fm. São Paulo, sendo Interv. o intervalo de valores calculados, Md a média e DP o desvio padrão.

Fm. São Paulo Argilas		OCR			Su (kPa)			Ei (MPa)			M (MPa)		
Ens.	Cmd.	Interv.	Md	DP	Interv.	Md	DP	Interv.	Md	DP	Interv.	Md	DP
1023	B	2,3-11,7	5,1	2,3	11-29	20	4	5-12	8	2	1,6-8	5	2
1058	D	8,5-16,1	12,1	2,4	92-185	130	28	37-74	52	11	26-52	36	8
1084	A e B	9,1-30,9	16,3	4,7	95-390	177	55	38-156	71	22	27-109	49	15
	C	6,3-13,1	7,6	1,1	117-246	137	20	47-98	55	8	33-69	38	6
1102	A, C-E	1,2-9,9	3,8	1,9	8-283	83	66	4-113	33	26	0,7-79	20	20
	B	3,5-11,7	6,8	2,0	47-186	128	24	17-74	51	10	10-52	36	7
1129	C-F	1,7-11,4	5,6	1,6	51-283	172	54	20-113	69	22	5-79	47	17
Geral		1,2-30,9	7,0	4,7	11-390	132	69	4-156	53	28	0,7-109	35	21

As figuras 6.19, 6.20, 6.21 e 6.22 apresentam a distribuição dos valores calculados para cada parâmetro apresentado na tabela 6.2, para as camadas com comportamento de argila da Formação São Paulo. Sobre o valor de OCR (figura 6.19), pode-se notar que, apesar da grande variação dos valores obtidos, principalmente da investigação n° 1084, a maior parte ficou no intervalo entre 3 a 6.

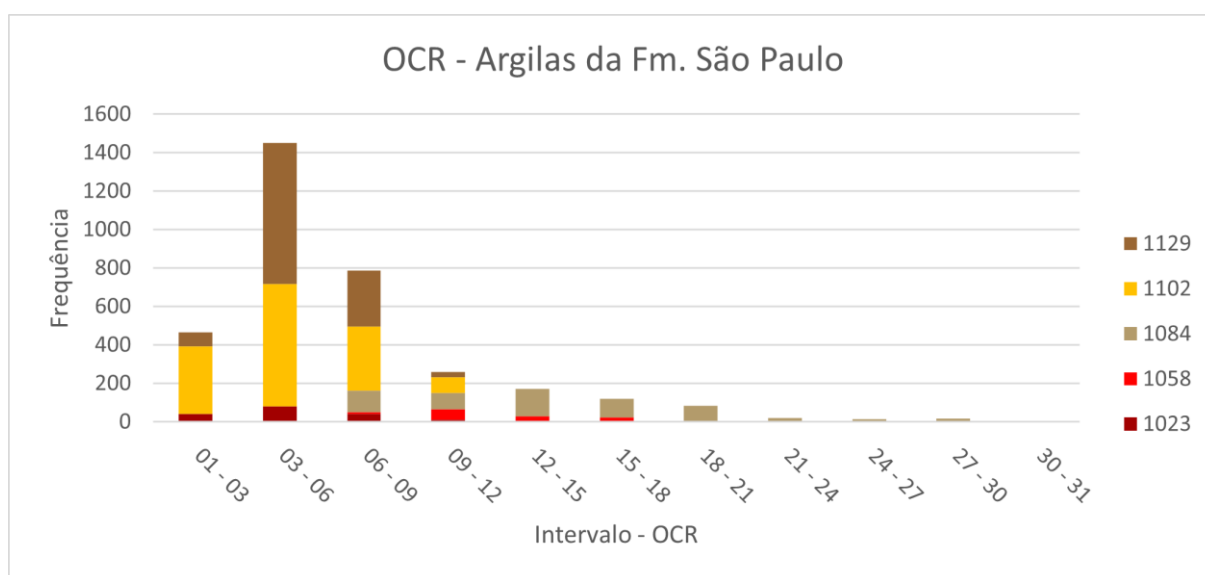


Figura 6.19: Gráfico de frequência dos valores de OCR calculados para as camadas com comportamento de argila da Fm. São Paulo.

Os gráficos de frequência dos valores de Su (figura 6.20), Ei (figura 6.21) e M (figura 6.22) apresentam comportamento semelhante. A investigação n° 1102 apresenta comportamento diferente das demais, possuindo dois picos, um com valores mais baixos e outro seguindo o padrão das demais. Essa variação também

pode ser observada pela tabela 6.2, onde a coluna B apresenta valores acima da média para o restante das camadas. Já a investigação n° 1023 apresenta todos os valores no primeiro intervalo.

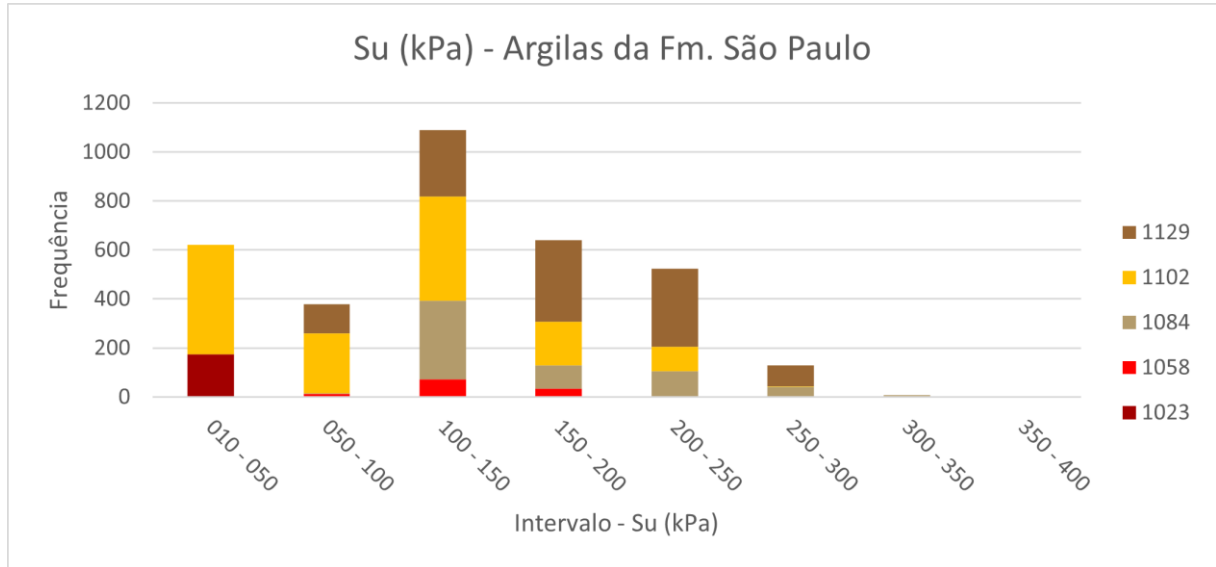


Figura 6.20: Gráfico de frequência dos valores de Su calculados para as camadas com comportamento de argila da Fm. São Paulo.

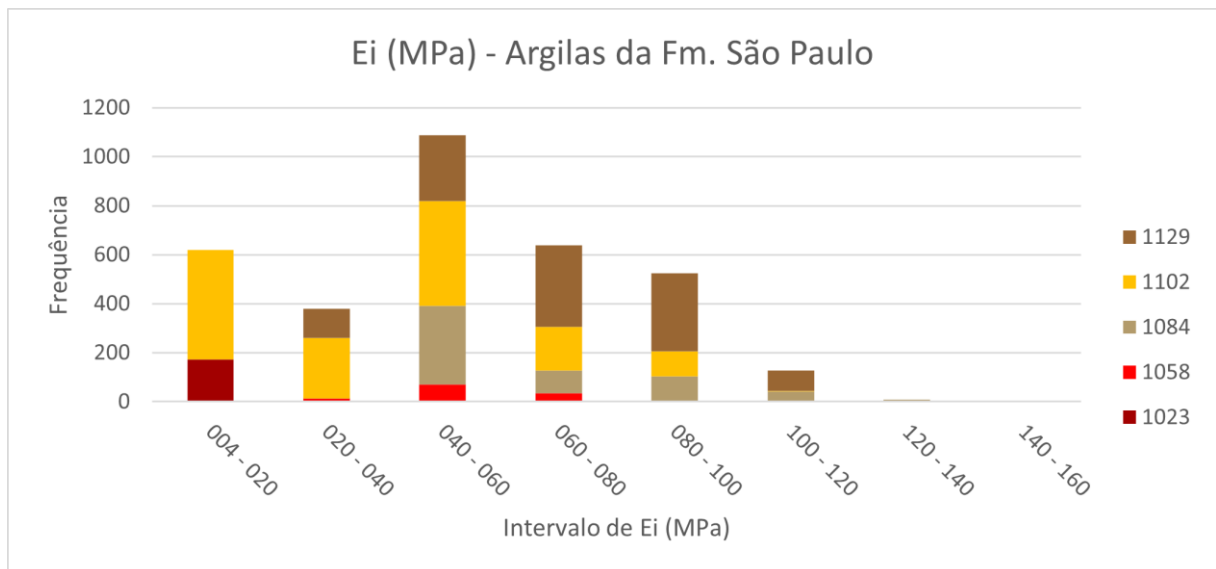


Figura 6.21: Gráfico de frequência dos valores de Ei calculados para as camadas com comportamento de argila da Fm. São Paulo.

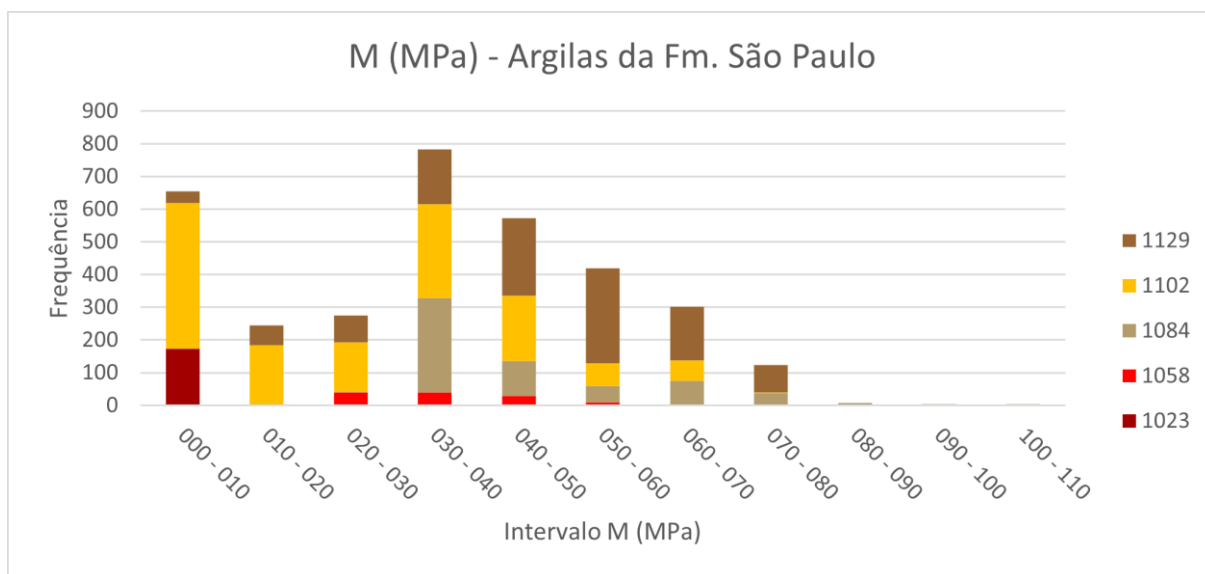


Figura 6.22: Gráfico de frequência dos valores de M calculados para as camadas com comportamento de argila da Fm. São Paulo.

Para as camadas com comportamento de areia siltosa da Formação São Paulo, o valor médio do ângulo de atrito interno foi de 38° . Os valores médios de E_i e M foram de 72 MPa e 125 MPa, respectivamente. A tabela 6.3 apresenta os intervalos, valores médios e desvio padrão desses parâmetros para cada investigação.

Tabela 6.3: Parâmetros geotécnicos calculados para as camadas com comportamento de areias siltosas da Fm. São Paulo, sendo DP o desvio padrão.

Fm. São Paulo Areias siltosas		ϕ' ($^\circ$)			E_i (MPa)			M (MPa)		
Ensaio	Camada	Intervalo	Média	DP	Intervalo	Média	DP	Intervalo	Média	DP
1023	C-D	30-40	37	2	5-76	49	17	19-139	98	32
1082	A-E	24-43	39	2	1,2-225	76	34	22-276	126	44
1084	D-E	35-42	39	2	48-230	124	43	92-287	195	55
Geral		30-43	38	2	5-230	72	40	19-287	125	54

Os gráficos de distribuição de frequência dos parâmetros da tabela 6.3 estão nas figuras 6.23, 6.24 e 6.25. Os valores de ϕ' apresentam distribuição semelhante nas três investigações, enquanto que os valores de E_i e M apresentaram valores menores na investigação nº1023, se comparado as investigações nº 1082 e 1084.

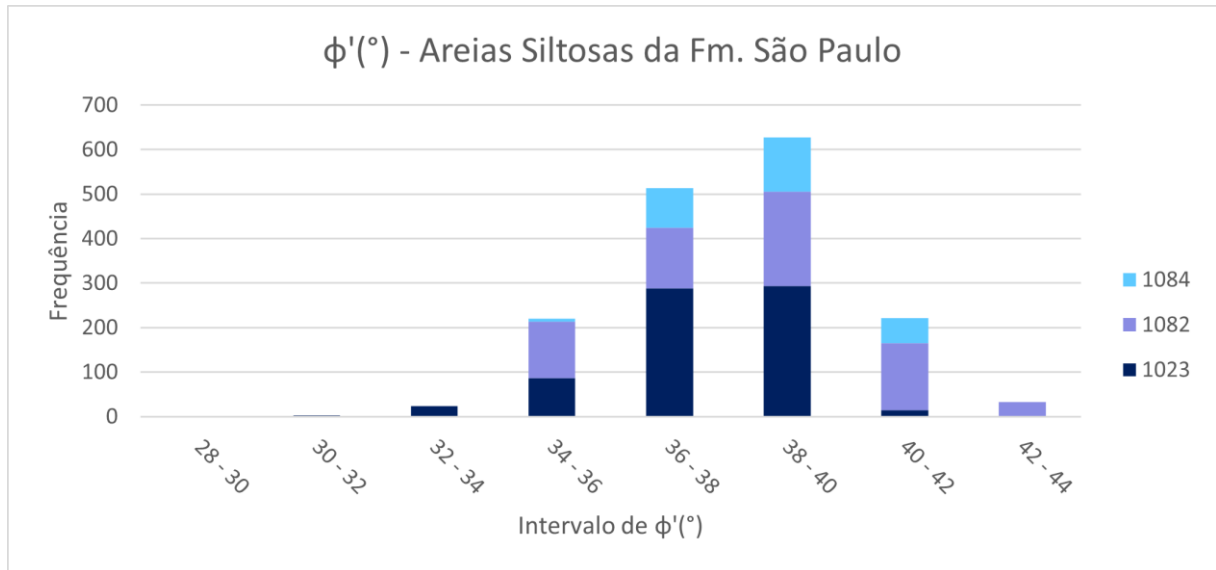


Figura 6.23: Gráfico de frequência dos valores de ϕ' calculados para as camadas com comportamento de areia siltosa da Fm. São Paulo.

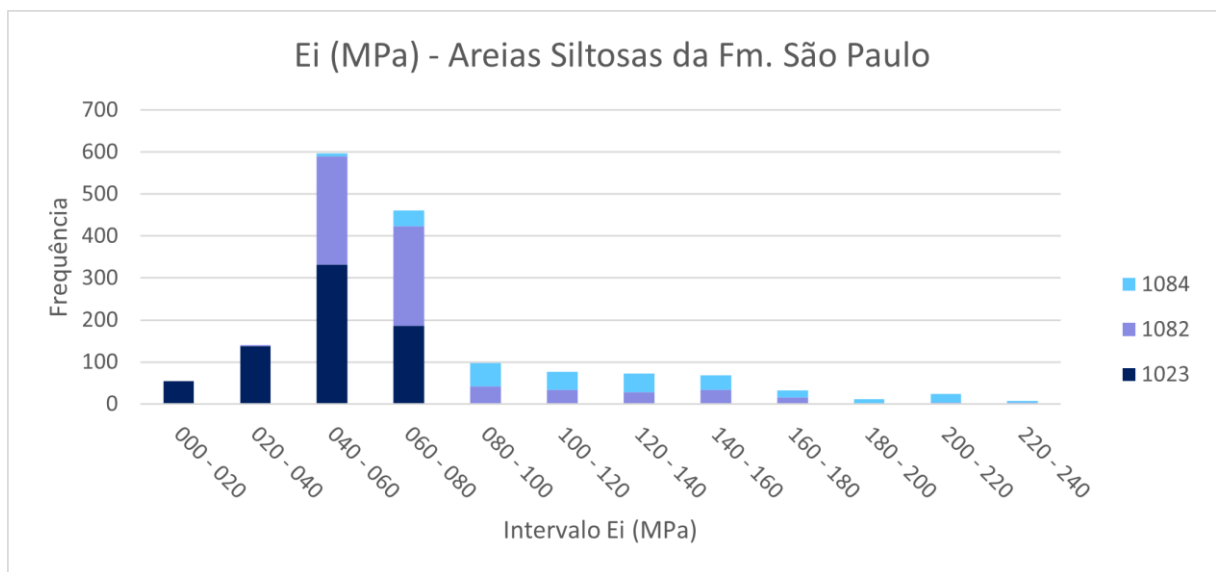


Figura 6.24: Gráfico de frequência dos valores de E_i calculados para as camadas com comportamento de areia siltosa da Fm. São Paulo.

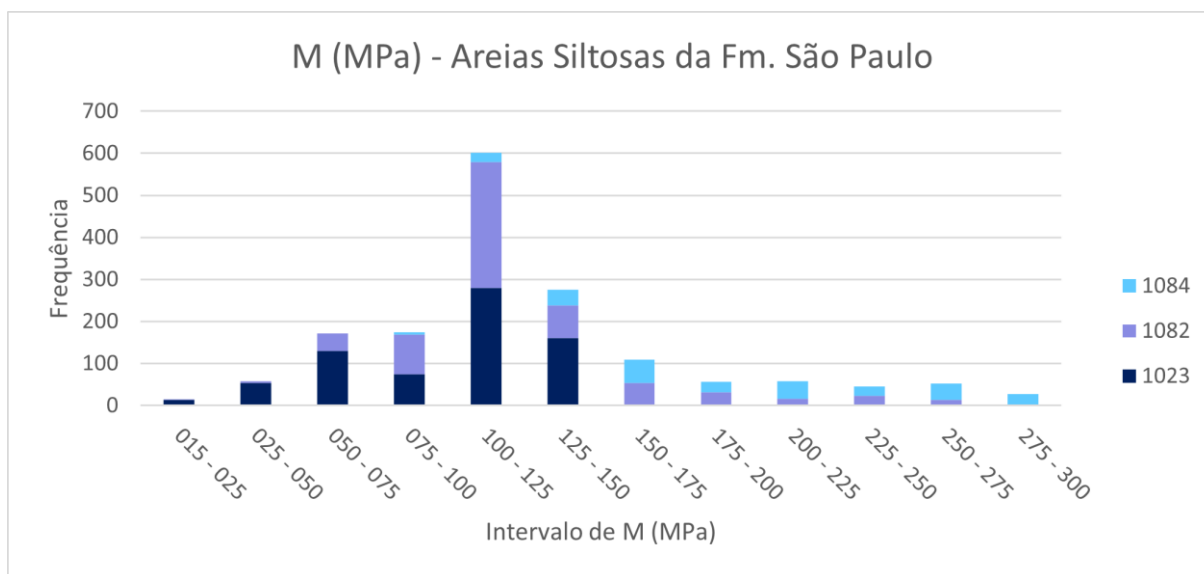


Figura 6.25: Gráfico de frequência dos valores de M calculados para as camadas com comportamento de areia siltosa da Fm. São Paulo.

As camadas com comportamento de areias finas rígidas apresentaram ângulo de atrito interno com valor médio de 40° e os módulos de elasticidade inicial e módulo edométrico com médias de 75 MPa e 162 MPa, respectivamente. A tabela 6.4 apresenta os intervalos, valores médios e desvio padrão desses parâmetros para cada investigação, sendo que para a camada C da investigação nº 1050, o resultado foi apresentado separado, por apresentar valores mais altos que o restante das camadas.

Tabela 6.4: Parâmetros geotécnicos calculados para as camadas com comportamento de areias finas rígidas da Fm. São Paulo, sendo DP o desvio padrão.

Fm. São Paulo areias finas rígidas		ϕ' ($^\circ$)			Ei (MPa)			M (MPa)		
Ensaio	Camada	Intervalo	Média	DP	Intervalo	Média	DP	Intervalo	Média	DP
1050	B, D-F	38-42	40	1	54-117	75	15	122-226	164	24
	C	41-46	43	1	77-244	128	37	164-304	232	37
1058	C e E	36-41	38	1	30-116	47	24	85-237	122	41
Geral		36-46	40	2	30-244	75	36	85-304	162	49

As figuras 6.26, 6.27 e 6.28 apresentam os gráficos de frequência dos valores calculados para as camadas com comportamento de areias finas rígidas das investigações nº 1050 e 1058. A investigação nº 1058 apresentou intervalos menores para todos os parâmetros calculados.

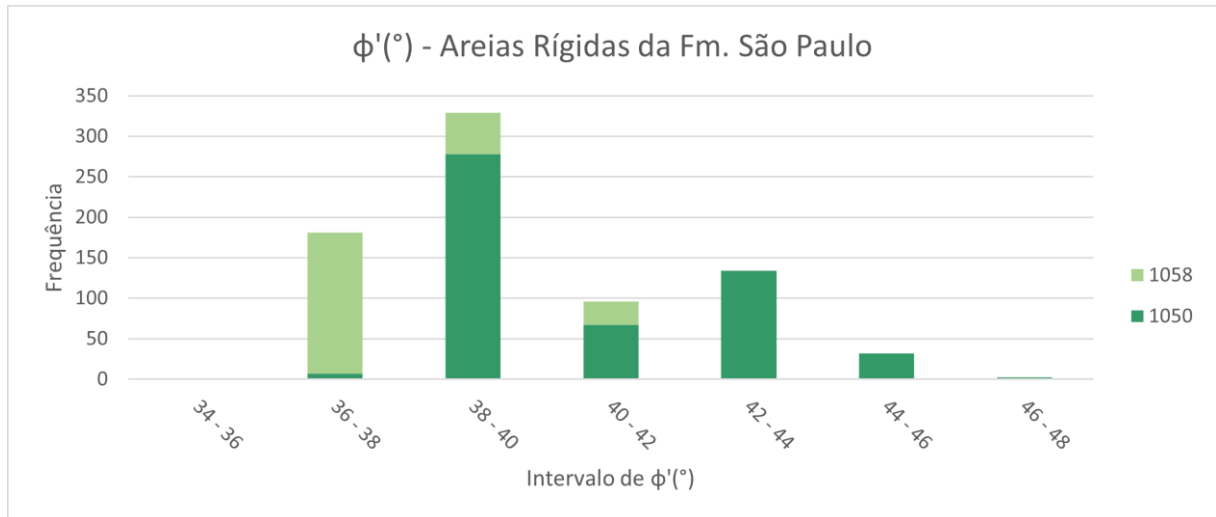


Figura 6.26: Gráfico de frequência dos valores de ϕ' calculados para as camadas com comportamento de areia fina rígida da Fm. São Paulo.

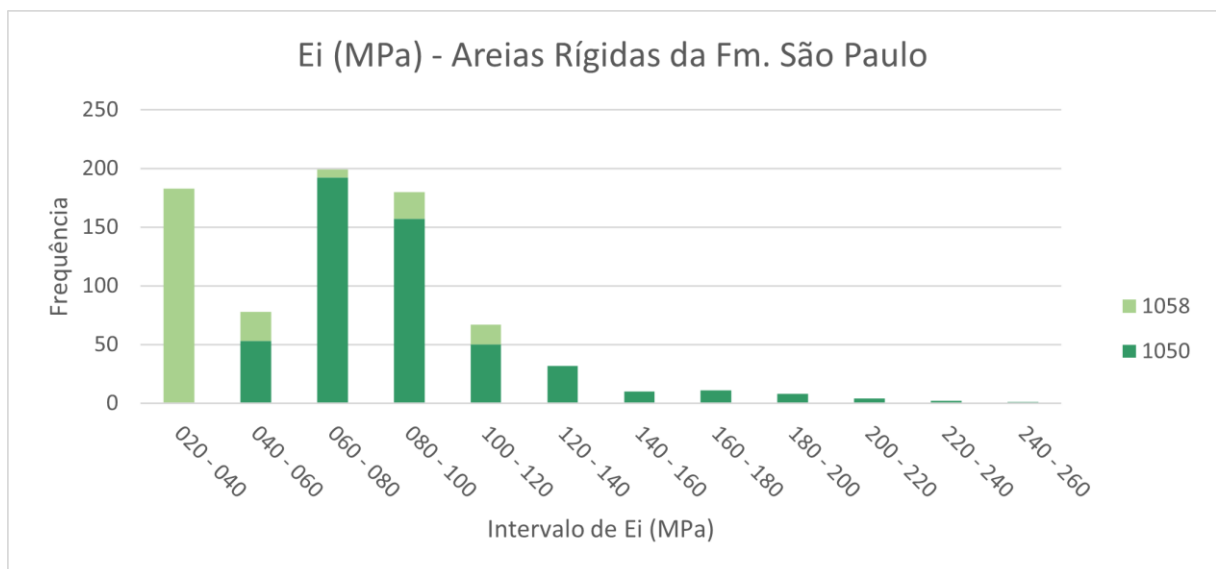


Figura 6.27: Gráfico de frequência dos valores de E_i calculados para as camadas com comportamento de areia fina rígida da Fm. São Paulo.

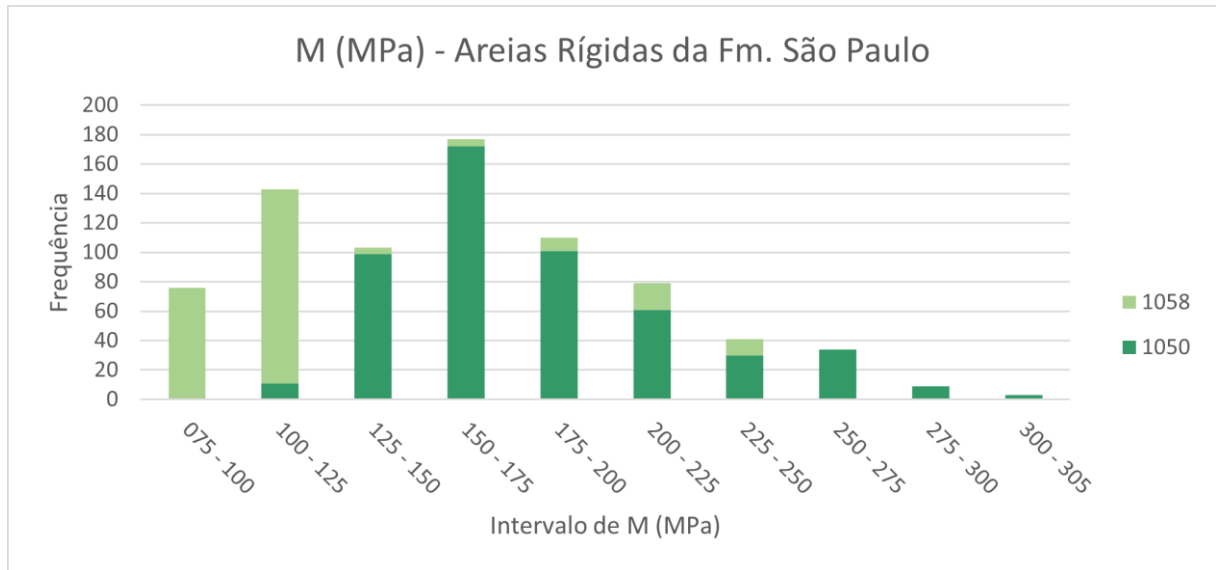


Figura 6.28: Gráfico de frequência dos valores de M calculados para as camadas com comportamento de areia fina rígida da Fm. São Paulo.

As camadas que foram interpretadas como sendo da Formação Resende apresentam comportamento de areias limpas a areias siltosas, sendo o valor médio do ângulo de atrito interno de 42° , o valor médio de E_i de 191 MPa e o valor médio de M de 133 MPa. A tabela 6.5 apresenta os valores médios e os intervalos obtidos na investigação n. 1115 para as camadas D, E e F. As figuras 6.29, 6.30 e 6.31 apresentam os gráficos de frequência dos parâmetros apresentados nessa tabela.

Tabela 6.5: Parâmetros geotécnicos calculados para a Fm. Resende, sendo DP o desvio padrão.

Fm. Resende		$\phi' (^\circ)$			E_i (MPa)			M (MPa)		
Ensaio	Camada	Intervalo	Média	DP	Intervalo	Média	DP	Intervalo	Média	DP
1115	D-F	38-45	42	1	26-162	96	24	67-361	134	61

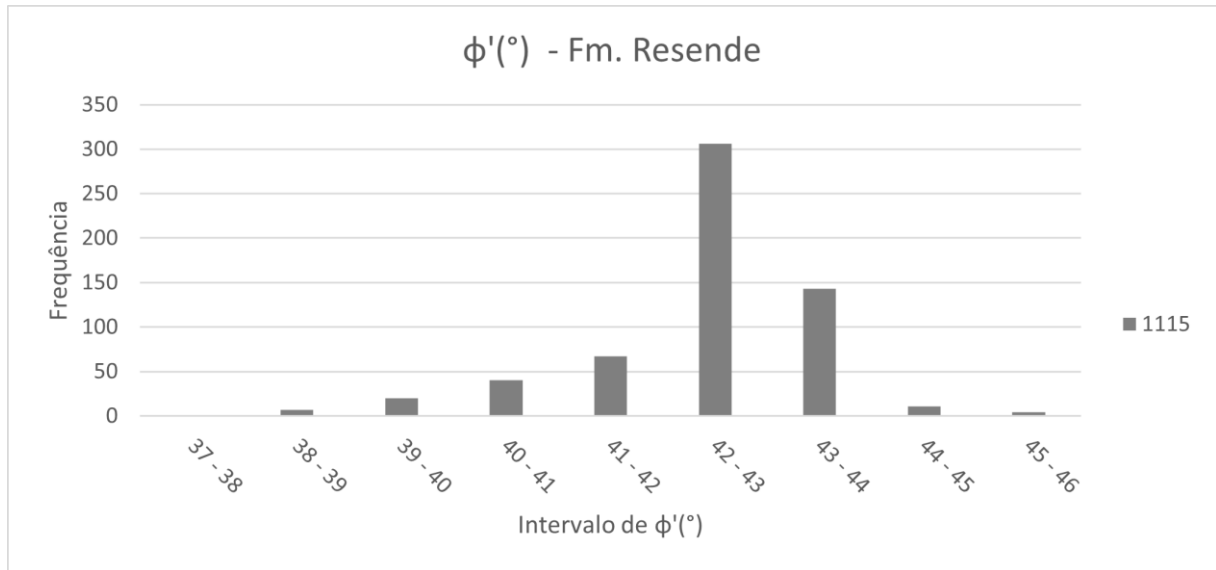


Figura 6.29: Gráfico de frequência dos valores de ϕ' calculados para as camadas da Fm. Resende.

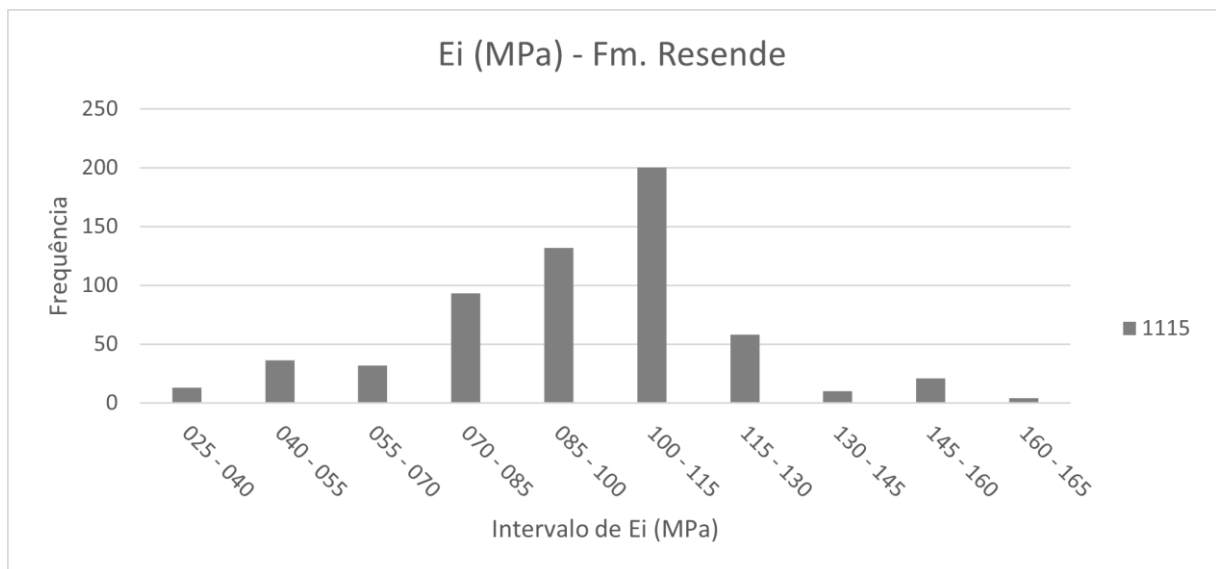


Figura 6.30: Gráfico de frequência dos valores de E_i calculados para as camadas da Fm. Resende.

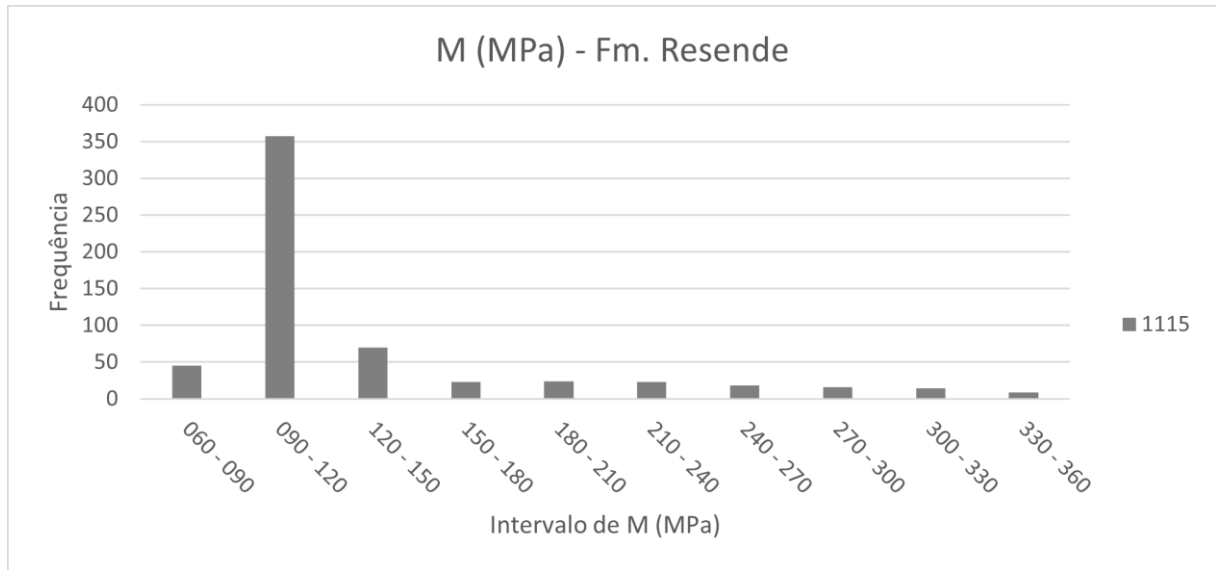


Figura 6.31: Gráfico de frequência dos valores de M calculados para as camadas da Fm. Resende.

Na investigação n. 1115, as 3 primeiras camadas foram classificadas como aluvião de acordo com o boletim da sondagem de simples reconhecimento. Foram calculados os parâmetros geotécnicos de argila para a camada A e de areia para as camadas B e C. O valor médio de OCR e Su para a camada argilosa foi de 4,9 e 32 kPa, respectivamente. A média do ângulo de atrito interno foi de 38° para a camada com comportamento de argila siltosa e 42° para a camada com comportamento de areia limpa. A tabela 6.6 apresenta os intervalos e valores médios obtidos para o aluvião da investigação n. 1115.

Tabela 6.6: Parâmetros geotécnicos calculados para o aluvião do ensaio 1115, sendo Interv. o intervalo de valores calculados, Md a média e DP o desvio padrão.

Aluvião Camada	OCR			Su (kPa)			ϕ' (°)			Ei (MPa)			M (MPa)		
	Interv.	Md	DP	Interv.	Md	DP	Interv.	Md	DP	Interv.	Md	DP	Interv.	Md	DP
A (argila siltosa)	1,4-8,9	4,9	1,6	7-65	32	13	-	-	-	2,7-26	13	5	0,2-18	8	4
B (areia siltosa)	-	-	-	-	-	-	33-41	38	2	13-78	43	20	24-69	44	13
C (areia limpa)	-	-	-	-	-	-	38-43	42	1	26-71	55	10	50-98	73	11

Nas figuras 6.32 e 6.33 estão os gráficos de frequência dos valores de OCR e Su, respectivamente, para a camada A do aluvião, com comportamento de argila siltosa. Pode-se notar que essa camada não possui distribuição normal, apresentando picos em 2 intervalos diferentes. Essa variação nos valores calculados já era esperada, pois os pontos da camada A estavam bem dispersos no ábaco da figura 6.14.

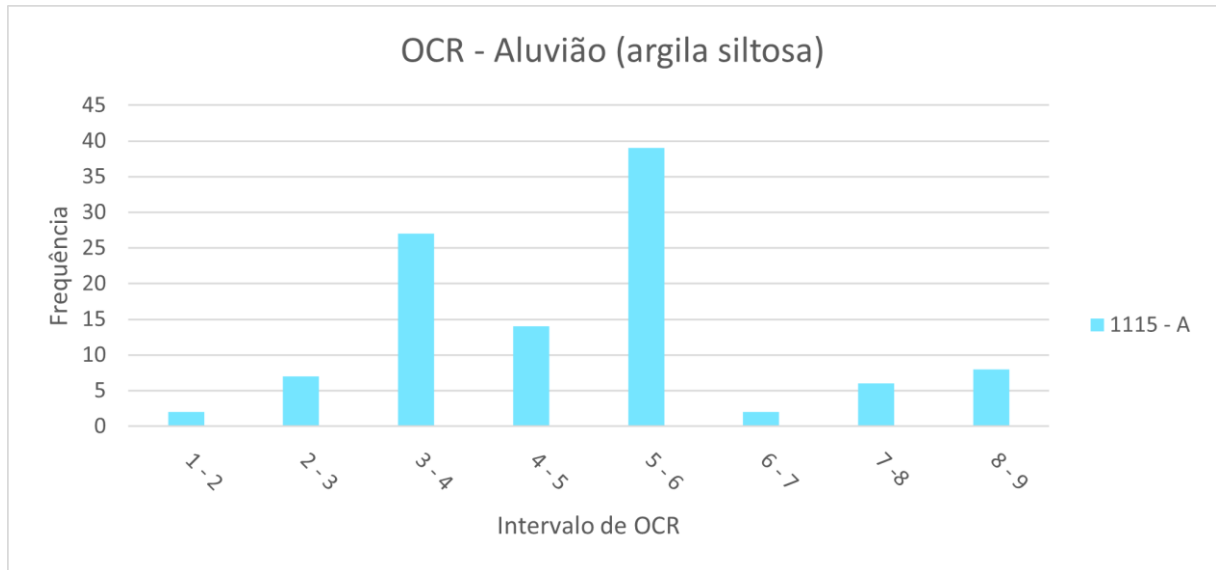


Figura 6.32: Gráfico de frequência dos valores de OCR calculados para as camadas com comportamento de argila siltosa do aluvião.

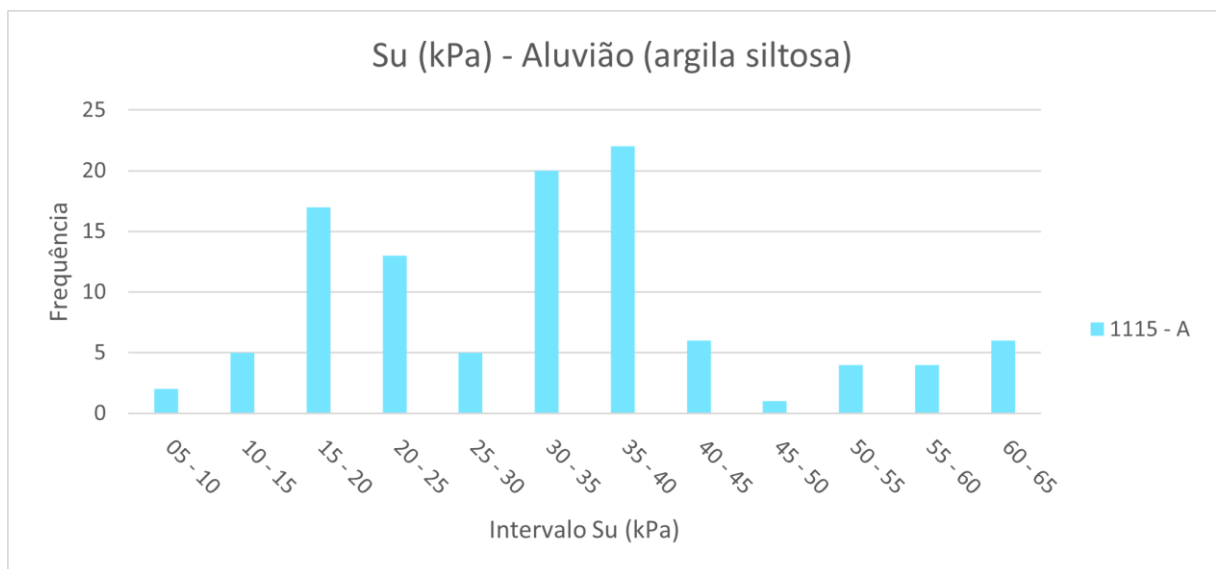


Figura 6.33: Gráfico de frequência dos valores de Su calculados para as camadas com comportamento de argila siltosa do aluvião.

A figura 6.34 apresenta o gráfico de frequência dos valores obtidos para o ângulo de atrito nas camadas arenosas do aluvião (camadas B e C). A camada B apresenta uma dispersão maior, enquanto a camada C apresenta valores mais altos e mais concentrados.

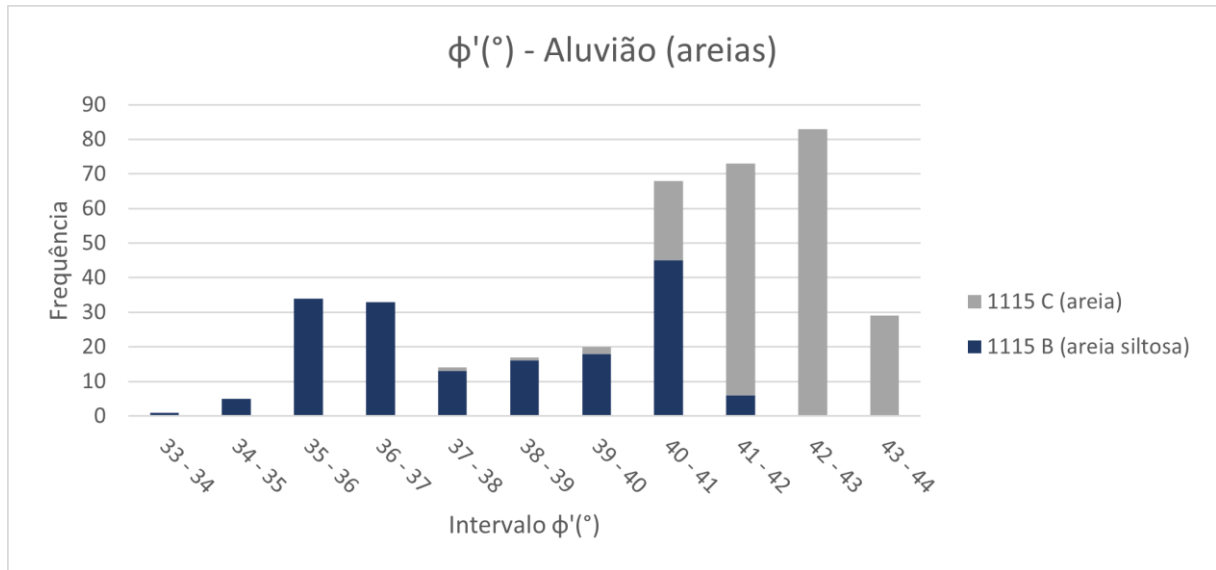


Figura 6.34: Gráfico de frequência dos valores de ϕ' calculados para as camadas com comportamento de areia do aluvião.

As figuras 6.35 e 6.36 mostram os gráficos de frequência dos valores de E_i e M para as camadas do aluvião. Apesar das duas fórmulas utilizarem os valores de resistência real e tensão vertical in situ para o cálculo dos módulos, os valores de α_E e α_M variam de acordo com o tipo de comportamento do material. Por isso, enquanto os valores de E_i não apresentam grande dispersão entre as camadas, sendo que no intervalo de 20 a 30, por exemplo, existem valores calculados para as três camadas, os valores de M apresentam uma dispersão maior.

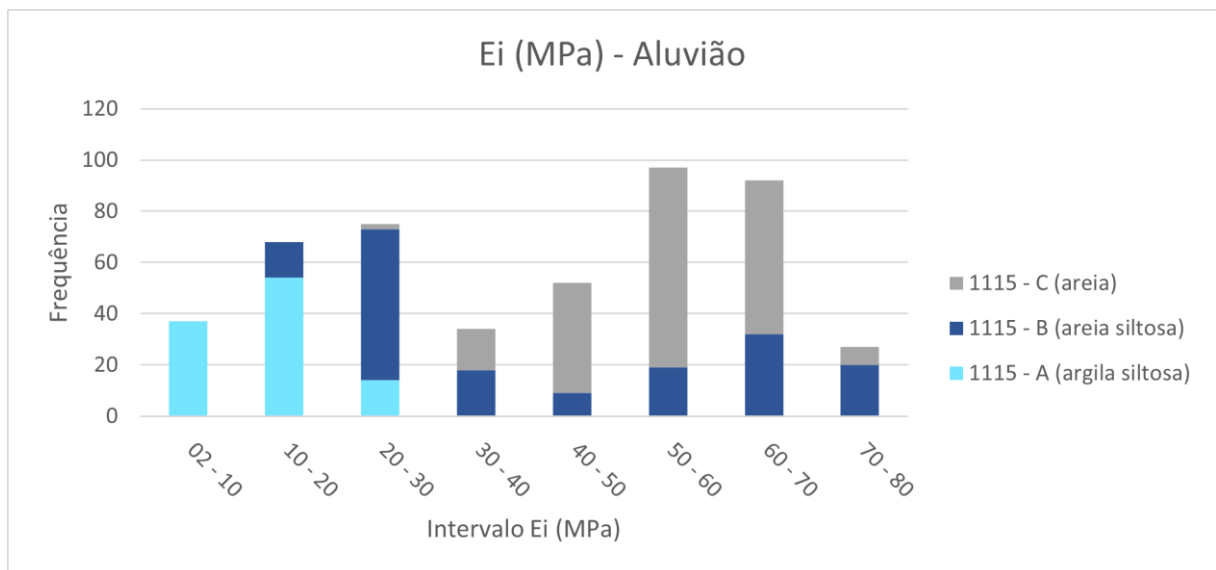


Figura 6.35: Gráfico de frequência dos valores de E_i calculados para as camadas do aluvião.

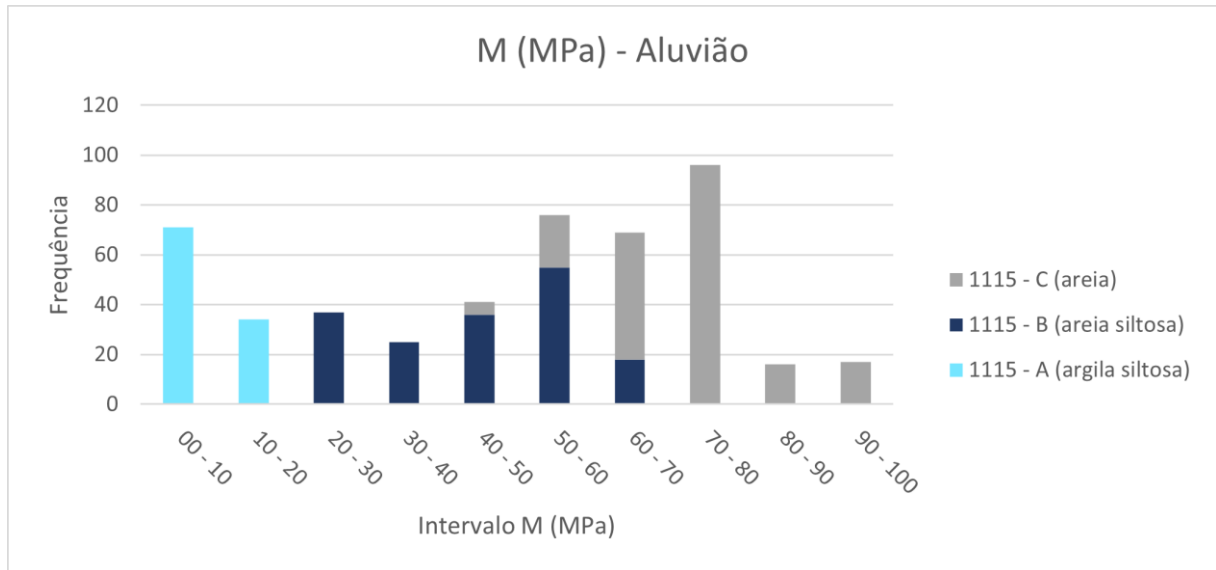


Figura 6.36: Gráfico de frequência dos valores de M calculados para as camadas do aluvião.

Os intervalos de condutividade hidráulica para os solos identificados estão representados na tabela 6.7. Apesar do intervalo apresentado ser grande, é um valor aproximado e pode servir como guia para as variações possíveis da condutividade hidráulica.

Tabela 6.7: Intervalos de condutividade hidráulica obtidos para os Solos da Cidade de São Paulo.

	Tipos de solos	Condutividade Hidráulica (k) (m/s)
Fm. São Paulo	argilas/argilas siltosas	1.10^{-10} a 1.10^{-7}
	areias siltosas	1.10^{-7} a 1.10^{-5}
	areias finas rígidas	1.10^{-9} a 1.10^{-7}
Fm. Resende	areias limpas	1.10^{-5} a 1.10^{-3}
Aluvião	argilas siltosas	3.10^{-9} a 1.10^{-7}
	areias siltosas	1.10^{-7} a 1.10^{-5}
	areias limpas	1.10^{-5} a 1.10^{-3}

7. DISCUSSÃO

7.1 Sondagem de Simples Reconhecimento e CPTu

É importante ressaltar que, apesar do CPTu ser uma investigação *in situ*, não são recolhidas amostras para a análise granulométrica. Portanto, só é possível classificar as camadas por comportamento e não por granulometria. Dessa forma, podem surgir algumas divergências entre a classificação táctil visual realizada na sondagem de simples reconhecimento e a classificação proposta por Robertson (1990) para o comportamento do solo (SBT).

Um exemplo dessa divergência é a camada descrita como “argila siltosa com areia fina a média, plástica, bem consolidada, de consistência rija a dura”, que aparece na investigação n. 1058 (figura 6.5), n. 1082 (figura 6.7) e n. 1084 (figura 6.9). Essas camadas, de acordo com o ábaco de Robertson (1990), apresentaram comportamento de areias finas rígidas na investigação n. 1058 (figura 6.6), silte arenoso na n. 1082 (figura 8) e argila/argila siltosa na n. 1084 (figura 10).

A divisão entre as camadas também difere da divisão apresentada pela sondagem de simples reconhecimento. As investigações com CPTu são feitas a uma distância de 1,5 metros das sondagens de simples reconhecimento. De Mio (2005) mostra que o nível de detalhamento para subdivisão do perfil gerado pelo ensaio CPTu é maior do que a descrição tátil-visual realizada na sondagem de simples reconhecimento, pois intercalações de camadas com pequenas espessuras, que podem ser identificadas por variações na razão de atrito e poropressão, não são percebidas nas descrições tátil-visual, apesar de apresentarem comportamento diferente. Apesar disto, algumas camadas, como a camada arenosa da investigação n. 1102 (figura 6.11) não foi detectada pelo CPTu.

7.2 Divisão das camadas

A primeira divisão das camadas foi feita de forma visual, com base no comportamento dos valores de q_t , f_s e R_f , sendo que na maioria das investigações foram divididas mais camadas do que no ensaio de simples reconhecimento. Apesar disso, ao colocar as camadas no ábaco de Robertson (1990), foi possível perceber que algumas camadas caíram na mesma zona, apresentando comportamento similar.

Ao calcular os parâmetros geotécnicos, foi possível notar que, apesar de estarem na mesma zona de comportamento no ábaco de Robertson, algumas camadas apresentavam valores diferentes das demais, como é o caso da camada C na investigação n. 1084 e a camada B na investigação n. 1102 (tabela 5.2).

A camada C, na investigação n. 1084, apesar de estar na região 4 assim como as camadas A e B, apresenta valores menores de Q_t e F_r , estando numa posição mais abaixo no ábaco (Figura 6.10). Como mostrado no próprio ábaco, essa região apresenta valor de OCR menor, e consequentemente, todos os parâmetros calculados ficaram com um valor menor também.

Já a camada B da investigação n. 1102 apresenta comportamento contrário, estando na região mais acima dos outros dados, apesar de estar na mesma zona (figura 6.12). Isso resulta em valores maiores de OCR e de todos os outros parâmetros.

Na investigação n. 1050 ocorre o mesmo efeito, mas com as camadas arenosas (figura 6.4). Apesar de todos os dados da investigação ficarem na zona 9, a camada C, que apresenta valores mais altos de Q_t e F_r e alguns pontos na zona 8, apresenta o valor do ângulo de atrito interno maior, o valor de E_i aproximadamente 70% maior e o valor de M 40% maior também. Dessa forma, conclui-se que, apesar dos pontos estarem na mesma zona do ábaco, se houver certa dispersão dos dados ao longo da zona, é preciso calcular os parâmetros para cada camada, e não usar a média para a zona toda.

Somente uma investigação foi feita abaixo da cota de 740m, mas é possível notar que os dados das camadas D, E e F da investigação n. 1115 ficaram na zona 6 do ábaco (figura 6.17), comportamento que não é visto nos sedimentos da Formação São Paulo (figura 6.18). Isso reforça a interpretação de que essas três camadas pertençam à Formação Resende.

As camadas A, B e C da investigação n. 1115 foram classificadas como aluvião pela sondagem de simples reconhecimento. Apesar do contato entre o aluvião e os sedimentos da Bacia de São Paulo divergirem um pouco (65 cm) do obtido pela sondagem de simples reconhecimento com o interpretado a partir do CPTu (figura 6.13), o comportamento das camadas A, B e C seguem o esperado para um aluvião, com sedimentos mais grossos na base (camada C), gradando para sedimentos mais finos (figura 6.14).

7.3 Distribuição espacial das camadas

As investigações com CPTu para a Linha 2 – Verde do Metrô de SP foram feitas na direção SW-NE, passando por várias cotas topográficas. Para facilitar a visualização, foi elaborado o perfil topográfico com a localização e profundidade das investigações (figura 7.1).

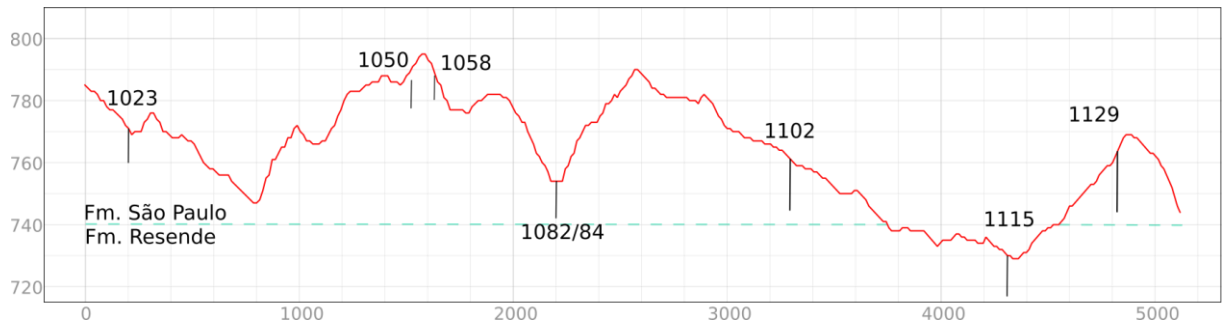


Figura 7.1: perfil longitudinal das investigações de CPTu, com a indicação do contato da Fm. São Paulo com a Fm. Resende na cota 740m, de acordo com Gurgueira (2013).

Correlacionando os comportamentos das camadas obtidos com o CPTu com a distribuição espacial, pode-se notar que as investigações n. 1050 e 1058, que são as únicas que contém camadas com comportamento de areias finas rígidas, estão acima da cota 775m e bem próximas uma da outra. As investigações n. 1102 e 1129, que estão na região NE da área de estudo e aproximadamente na mesma cota topográfica, apresentaram comportamento semelhante, com todas as camadas indicando comportamento de argilas/argilas siltosas. A investigação n. 1115, única abaixo da cota de 740m, apresentou comportamento bem diferente das camadas da Fm. São Paulo, o que corrobora com a interpretação de pertencer a Formação Resende. A investigação n. 1082 apresentou comportamento silte arenoso, enquanto as demais investigações apresentaram intercalações de camadas com comportamento argiloso com camadas de comportamento silte arenoso. Apesar das correlações feitas, como só foram estudadas 8 investigações numa linha de aproximadamente 5 km, não há dados suficientes para criar uma seção geológica da região.

7.4 Comparação com os dados de parâmetros geotécnicos disponíveis na literatura

Os valores dos parâmetros geotécnicos obtidos a partir do ensaio CPTu foram comparados com os valores disponíveis na literatura. É importante ressaltar que as camadas foram divididas de acordo com o comportamento do solo e não com a granulometria, como é o caso da classificação utilizada pela CMSP. Portanto, quando foi comparado os parâmetros obtidos pelo comportamento do solo com os utilizados pela CMSP em parte do projeto básico da Linha 4 -Amarela ou por Gurgueira (2013), buscou-se comparar com as camadas que apresentariam o mesmo comportamento (por exemplo: camadas com comportamento de argilas siltosas foram comparadas

com a classificação de argilas siltosas), o que foi mostrado que não ocorre em todos os casos analisados nesse estudo.

A resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) calculada está dentro dos intervalos obtidos com o ensaio Vane Test por Massad (2012) para os aluviões quaternários e com o ensaio CPTu por Caldo (2015) para a Formação São Paulo (tabela 7.1).

Tabela 7.1: Comparação dos valores de S_u calculados com os valores disponíveis na literatura.

Unidade	Tipo de solo	S_u (kPa)		
		Valor calculado	Caldo (2015)	Massad (2012)
Aluvião	argilas siltosas	32	-	10 a 40
	areias siltosas	-		
	areias limpas	-		
Fm. São Paulo	argilas/argilas siltosas	132	15 a 600	-
	areias siltosas	-		
	areias finas rígidas	-		
Fm. Resende	areias limpas	-	-	-

O valor de OCR calculado para o aluvião está dentro do intervalo indicado por Massad (2012). Para as camadas com comportamento de argilas da Formação São Paulo, o valor de OCR ficou acima do esperado pela CMSP (1994), mas está dentro do resultado encontrado por Caldo (2015) (tabela 7.2).

Tabela 7.2: Comparação dos valores de OCR obtidos pelo ensaio CPTu com valores disponíveis na literatura.

Unidade	Tipo de solo	OCR			
		Valor calculado	CMSP (1994)*	Caldo (2015)	Massad (2012)
Aluvião	argilas siltosas	4,9	-	-	1 a 6
	areias siltosas	-			
	areias limpas	-			
Fm. São Paulo	argilas/argilas siltosas	7	3 a 2,5 (3Ag1)	1 a 40	
	areias siltosas	-	3 a 1,5 (3Ar2)		
	areias finas rígidas	-	3 a 1,5 (3Ar1)		
Fm. Resende	areias limpas	-	3,3 a 1,7 (4Ar1)	-	

*CMSP (1994, *apud* GURGUEIRA, 2013)

Os altos valores de OCR, de acordo com Massad (2012), não são devido 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.

O ângulo de atrito interno obtido foi bem maior do que o esperado para o aluvião (com diferença maior que 10°) e para a Formação Resende (com diferença de 7°). Para as camadas com comportamento de areia da Formação São Paulo, a diferença foi menor (de 3 a 5°), mas ainda sim maior que o esperado de acordo com a CMSP e Gurgueira (2013) (tabela 7.3). O cálculo do ângulo de atrito foi feito a partir da equação 3.9 de Kulhawy and Mayne (1990, *apud* ROBERTSON 2009), que utiliza somente o valor normalizado Q_t e foi elaborada para areias de quartzo limpas, arredondadas e não cimentadas.

Tabela 7.3: Comparação dos valores de ϕ' obtidos pelo ensaio CPTu com valores disponíveis na literatura.

Unidade	Tipo de solo	ϕ' (°)		
		Valor calculado	CMSP (1994)*	Gurgueira (2013)
Aluvião	argilas siltosas	-	20 (2Ag1)	20 (ALag)
	areias siltosas	38	28 (2Ar1)	28 (ALar)
	areias limpas	42	28 (2Ar2 e 2Ar3)	
Fm. São Paulo	argilas/argilas siltosas	-	22 a 21 (3Ag1)	20 a 27 (SPag)
	areias siltosas	38	30 a 35 (3Ar2)	30 a 35 (SPar)
	areias finas rígidas	40	30 a 35 (3Ar1)	
Fm. Resende	areias limpas	42	30 a 35 (4Ar1)	30 a 35 (RSeI)

* CMSP (1994, *apud* GURGUEIRA, 2013)

O módulo de elasticidade inicial (E_i) foi comparado com os dados da CMSP (1994) e de Caldo (2015) (tabela 7.4). O que se pode verificar é que os valores obtidos para o aluvião são mais altos do que o apresentado na literatura, exceto as argilas siltosas, que estão dentro do intervalo estipulado pela CMSP.

Tabela 7.4: Comparação dos valores de E_i obtidos pelo ensaio CPTu com valores disponíveis na literatura.

Unidade	Tipo de solo	E_i (MPa)		
		Valor calculado	CMSP (1994)*	Caldo (2015)
Aluvião	argilas siltosas	13	1 a 16 (2Ag1)	-
	areias siltosas	43	4 a 36 (2Ar1)	
	areias limpas	55	8 a 52 (2Ar2 e 2Ar3)	
Fm. São Paulo	argilas/argilas siltosas	53	50 a 200 (3Ag1)	6 a 300
	areias siltosas	72	50 a 175 (3Ar2)	
	areias finas rígidas	75	50 a 200 (3Ar1)	
Fm. Resende	areias limpas	96	40 a 150 (4Ar1)	-

* CMSP (1994, *apud* GURGUEIRA, 2013)

Para as Formações São Paulo e Resende, os valores do E_i estão dentro do esperado de acordo com a CMSP (1994). Caldo (2015) também estimou os valores de E_i a partir do CPTu para os solos da Formação São Paulo, obtendo resultado semelhante.

Para o módulo Edométrico (M), Caldo (2015) obteve a partir de ensaios CPTu o intervalo de 2 a 200 MPa para a Formação São Paulo, sendo que o valor obtido calculado está dentro desse intervalo (tabela 7.5).

Tabela 7.5: Comparação dos valores de M calculados com os valores obtidos por Caldo (2015).

Unidade	Tipo de solo	M (MPa)	
		Valor calculado	Caldo (2015)
Aluvião	argilas siltosas	8	-
	areias siltosas	44	
	areias limpas	73	
Fm. São Paulo	argilas/argilas siltosas	35	2 a 200
	areias siltosas	125	
	areias finas rígidas	162	
Fm. Resende	areias limpas	134	-

A condutividade hidráulica (k) só pode ser estimada a partir do tipo de comportamento do solo (SBT_n), apresentando um intervalo relativamente grande. Apesar do intervalo apresentar correspondência com os valores utilizados pela CMSP (1994) e Gurgueira (2013) para os aluviões e para a Formação Resende, para a Formação São Paulo o intervalo de k ficou abaixo do indicado pela CMSP (1994) e Gurgueira (2013), exceto para a camada com comportamento de areia siltosa (tabela 7.6).

Tabela 7.6: Comparação dos valores de condutividade hidráulica (k) calculados com os valores disponíveis na literatura.

Unidade	Tipo de solo	k (m/s)		
		Valor calculado	CMSP (1994)*	Gurgueira (2013)
Aluvião	argilas siltosas	3.10^{-9} a 1.10^{-7}	10^{-7} (2Ag1)	10^{-7} a 10^{-6} (ALag)
	areias siltosas	1.10^{-7} a 1.10^{-5}	10^{-5} (2Ar1)	10^{-5} a 5.10^{-5} (ALar)
	areias limpas	1.10^{-5} a 1.10^{-3}	5.10^{-5} (2Ar2 e 2Ar3)	
Fm. São Paulo	argilas/argilas siltosas	1.10^{-10} a 1.10^{-7}	10^{-6} (3Ag1)	5.10^{-6} (SPag)
	areias siltosas	1.10^{-7} a 1.10^{-5}	10^{-5} (3Ar2)	10^{-6} a 10^{-5} (SPar)
	areias finas rígidas	1.10^{-9} a 1.10^{-7}	10^{-5} (3Ar1)	
Fm. Resende	areias limpas	1.10^{-5} a 1.10^{-3}	5.10^{-5} a 9.10^{-5} (4Ar1)	10^{-6} a 10^{-4} (RSel)

*CMSP (1994, *apud* GURGUEIRA, 2013)

8. CONCLUSÃO

A partir de 8 investigações realizadas com o CPTu, 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 (n.1115) foi interpretada como sendo da Formação Resende, sendo que as camadas dessa formação apresentaram comportamento de areias limpas. Nessa mesma investigação foram identificadas três camadas pertencentes a um depósito aluvionar. Nesse aluvião, foram identificados três tipos de comportamento de solo, sendo eles de argilas siltosas, areias siltosas e areias limpas.

Para cada camada, foram calculados os valores do módulo de elasticidade tangencial inicial (E_i), módulo edométrico (M) e condutividade hidráulica (k), 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 valores de E_i e M calculados ficaram no mesmo intervalo dos valores obtidos com Caldo (2015) para os solos da Formação São Paulo. A estimativa de k foi feita com base no tipo de comportamento de solo, apresentando um intervalo grande para cada camada. 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°, valores bem maiores que os esperados em todas as unidades.

Em relação a distribuição espacial das camadas, para as camadas interpretadas como Formação São Paulo, as investigações n. 1050 e 1058 são as únicas que possuem camadas com o comportamento de areias finas rígidas, estando na parte SW da área de estudo, sendo as únicas investigações realizadas acima da cota 775 m. As investigações na região NE da área de estudo (n. 1102 e 1129) apresentaram todas as camadas com comportamento argiloso/argilas siltosas e somente a investigação realizada abaixo da cota 740 m (n. 1115) apresentou camadas com comportamento de areias limpas, sendo essas camadas interpretadas como da Formação Resende. Apesar dessas correlações, são necessários mais dados para confirmar a distribuição lateral das camadas.

Quando comparamos solos com a mesma denominação os parâmetros calculados estão na mesma faixa de valores, mas o que ocorre é que para algumas camadas, a mesma camada que é classificada como areia a partir de uma das investigações é classificada como argila em outra, por exemplo, como ocorreu nas investigações n. 1058, n. 1102 e n. 1129, nas profundidades 5,8 a 6,9 m, 9,6 a 12,0 m e 7,9 a 12,0 m, respectivamente. 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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A.E.S. Comunicação pessoal. 2011.

ALMEIDA V.V., *et al.* **Mapa Geológico Integrado da Região Metropolitana de São Paulo**. Mapa. São Paulo: CPRM, 2019. Escala 1:250.000. Projeto Materiais de Construção na Região Metropolitana de São Paulo.

CALDO, M. K. **Estimativa de parâmetros geotécnicos dos solos variegados da Formação São Paulo utilizando ensaios in situ**. 2015. Tese de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

DE MIO, G. **Condicionantes geológicos na interpretação de ensaios de piezocone para identificação estratigráfica na investigação geotécnica e geoambiental**. 2005. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

GURGUEIRA, M. D. **Correlação de dados geológicos e geotécnicos na Bacia de São Paulo**. 2013. Tese de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
HASUI, Y. Sistema Orogênico Mantiqueira. **Geologia do Brasil**. São Paulo, Beca, p. 331-372, 2012.

IBGE, Diretoria de Pesquisas. Coordenação de População e Indicadores Sociais, Estimativas da população residente com data de referência 1o de julho de 2020. **População estimada**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-paulo/panorama> . Acessado em: 07 jul. 2021.

ISO, E. N. 22476-1 (2012) Geotechnical investigation and testing-Field testing-Part 1: electrical cone and piezocone penetration test. **European Committee for Standardization (CEN)**, 2012.

JULIANI, C. **Geologia, petrogênese e aspectos metalogenéticos dos Grupos Serra do Itaberaba e São Roque na região das serras do Itaberaba e da Pedra Branca, NE da cidade de São Paulo, SP**. 1993. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

KUTNER, A. S.; BJORNBERG, A. J. S. Contribuição para o conhecimento geológico-geotécnico da bacia de São Paulo: litotipos, notação estratigráfica e feições estruturais relevantes. **Engenharia**, v. 54, n. 522, p. 65-73, 1997.

MASSAD, F. Resistência ao cisalhamento e deformabilidade dos solos sedimentares de São Paulo. **Twin Cities–Solos das Cidades de São Paulo e Curitiba**. ABMS, São Paulo, p. 107-133, 2012.

MONTEIRO, M. D.; GURGUEIRA, M. D.; ROCHA, H. C. Geologia da região metropolitana de São Paulo. **Twin Cities: solos das regiões metropolitanas de São Paulo e Curitiba**. São Paulo: ABMS, p. 17-46, 2012.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, v. 3, 2006.

RICCOMINI, C. **O rift continental do sudeste do Brasil**. 1989. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L. G.; FERRARI, A. L. Evolução geológica do rift continental do sudeste do Brasil. **Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**, p. 383-405, 2004.

ROBERTSON, P. K.; CAMPANELLA, R. G. Interpretation of cone penetration tests. Part I: Sand. **Canadian geotechnical journal**, v. 20, n. 4, p. 718-733, 1983.

ROBERTSON, P. K. Soil classification using the cone penetration test. **Canadian Geotech. Journal**, v.27, n.1, p. 151-158,1990.

ROBERTSON, P. K.; CABAL, K. L. Guide to Cone Penetration Testing fir Geotechnical Engeneering. **Greeg Drilling & Testing. Inc**, 3^aed, 2009.

ROBERTSON, P. K.; CABAL, K. L. Guide to cone penetration testing for geotechnical engineering. **Gregg Drilling & Testing, Inc**, v. 6, 2015.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaio de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações**: 2^a edição. Oficina de Textos, 2012.