



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia


Daniel Silva Lopez

**Influência do comprimento de bucha nos métodos de previsão da
resistência estática do ensaio SPT**

Rio de Janeiro
2019

Daniel Silva Lopez

**Influência do comprimento de bucha nos métodos de previsão da resistência
estática do ensaio SPT**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof.^a. Bernadete Ragoni Danziger

Rio de Janeiro

2019

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

L864 Lopez, Daniel Silva.
Influência do comprimento de bucha nos métodos de previsão
da resistência estática do ensaio SPT / Daniel Silva Lopez. – 2019.
242f.

Orientadora: Bernadete Ragoni Danziger.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

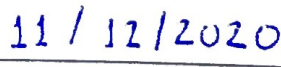
1. Engenharia civil - Teses. 2. Engenharia geotécnica - Teses.
3. Confiabilidade (Engenharia) - Teses. 4. Fundações
(Engenharia) - Teses. 5. Dinâmica do solo - Teses. I. Danziger,
Bernadete Ragoni. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro,
Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 624.131.5

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial
desta tese, desde que citada a fonte.


Assinatura


Data

Daniel Silva Lopez

**Influência do comprimento de bucha nos métodos de previsão da resistência
estática do ensaio SPT**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovado em: 17 de dezembro de 2019.

Banca Examinadora:



Prof. Dra. Bernadete Ragoni Danziger (Orientadora)
Departamento de Estruturas e Fundações – UERJ



Prof. Dr. Marcus Pereira Pacheco
Departamento de Estruturas e Fundações – UERJ



Prof. Dr. Nelson Aoki
Escola de Engenharia de São Carlos - EESC



Prof. Dr. Paulo Eduardo Lima de Santa Maria
COPPE - UFRJ

Rio de Janeiro

2019

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, irmão, minha companheira e a toda minha família e amigos que, com muito carinho e apoio, sempre estiveram ao meu lado me incentivando direta ou indiretamente em cada conquista da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus pela oportunidade de estar com saúde, e diariamente poder desfrutar de crescimento pessoal e profissional.

À minha mãe, Maria de Fátima, por ser a maior responsável por minha formação de caráter, sempre acreditando no meu potencial, dando todo o amor, carinho e atenção necessários.

Ao meu pai, Antônio Carlos (*in memoriam*) por ter dedicado sua vida para seus filhos e esposa, e pela eterna memória de herói e grande amigo que tenho dele.

Ao meu irmão Cristiano pelo forte laço de amizade e especialmente, por refletir a bondade e pureza que cada ser humano carrega.

Aos amigos Luiz Fernando e Pedro Beja, pela amizade fraterna e verdadeira que mantém a motivação de mútuo crescimento.

Aos meus amigos que a graduação da UERJ me proporcionou, em especial, Petterson Justino e Bruno Brandão, pelo contínuo convívio e aprendizado.

Aos colegas de turma do mestrado pelas lembranças que levarei com carinho deste período, em especial aos amigos Carlos Alexandre, Daniel Coelho e Guilherme Mussi pela amizade que levarei para toda vida.

Aos amigos da Aliança Consultoria pelo companheirismo e por compreenderem e me apoiarem durante a realização deste curso de mestrado.

Aos meus demais familiares e amigos que incentivam e comemoram a alegria das minhas conquistas profissionais e acadêmicas

À minha orientadora Prof.^a. Bernadete Ragoni Danziger por me motivar através de todo seu apoio, generosidade, entusiasmo e incentivo durante a realização da presente dissertação e, especialmente, pelo convite feito durante a disciplina de Fundações II do curso de graduação de Engenharia Civil da UERJ para que eu ingressasse ao mestrado em Geotecnia.

Aos professores Marcus Peigas Pacheco, Nelson Aoki e Paulo Eduardo Lima de Santa Maria pela generosidade e disponibilidade para participar da banca examinadora.

A todos os professores do PGECIV, pelos ensinamentos, receptividade e carinho durante todo o período do mestrado e durante a graduação.

A Universidade do Estado do Rio de Janeiro por existir e resistir através da luta e competência de todos seus professores, funcionários e alunos.

Ao Projeto Social ISMART, por acreditar no meu potencial financiando um ensino médio de ótima qualidade, sem o qual, dificilmente teria acesso às minhas realizações acadêmicas.

Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas. Muito conhecimento, que se sintam humildes. É assim que as espigas sem grãos erguem desdenhosamente a cabeça para o céu, enquanto as cheias as baixam para a terra, sua mãe.

Leonardo da Vinci

RESUMO

LOPEZ, D. S. *Influência do comprimento de bucha nos métodos de previsão da resistência estática do ensaio SPT*. 2019. 242f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

Esta dissertação trata de um estudo realizado a partir de ensaios CPT e SPT executados em verticais próximas de um banco de dados selecionado e organizado pelo autor. O objetivo principal foi a comparação entre os modelos de cálculo da resistência estática mobilizada durante a penetração do amostrador propostos por Schmertmann (1979) e por Aoki (2013). A proposta mais antiga foi desenvolvida a partir da premissa do não embuchamento do amostrador durante sua penetração, enquanto a segunda proposta considerou a possibilidade do embuchamento. Aoki (2013) considerou a possibilidade de melhor interpretação do ensaio quando do conhecimento do comprimento da bucha, após o término da penetração de 45 cm. O autor procurou adaptar as equações de Schmertmann (1979) às dimensões do amostrador utilizado no Brasil, e para diferentes comprimentos de bucha, de forma a permitir sua comparação direta com o modelo de cálculo de Aoki (2013). Através da aplicação dos dois modelos de cálculo, a resistência de ponta unitária e o atrito lateral unitário no amostrador foram estimados e comparados aos resultados de q_c e f_s do CPT, em diferentes abordagens. O autor ilustrou as interpretações para uma obra específica, indicando os demais casos estudados em documentos em anexo. O autor observou que a partir da proposta de Schmertmann (1979) e de Aoki (2013) foi possível obter valores próximos aos experimentais. Os resultados indicam a maior possibilidade de embuchamento do amostrador nos solos argilosos, reproduzido nas análises por Aoki (2013), e não embuchamento nos solos arenosos, reproduzido nas hipóteses de Schmertmann (1979) e Aoki (2013). Confirmou-se as expectativas de Aoki (2013), de que a medida do comprimento da bucha ao final da penetração traz novas possibilidades de interpretação do ensaio SPT como uma ferramenta ainda mais útil ao projetista de fundações. Os resultados revelam que a execução do ensaio de forma cuidadosa, com resultados mais acurados e equipes qualificadas, bem como a instrumentação da energia que chega ao amostrador, são fundamentais à melhor interpretação do ensaio, permitindo a contínua evolução de sua interpretação.

Palavras-chave: SPT; CPT; Amostrador SPT; Comportamento Embuchado; Comportamento não Embuchado.

ABSTRACT

LOPEZ, D. S. *The influence of the sampler length in static resistance models during SPT penetration*. 2019. 242f. Dissertation (Master in Civil Engineering) – Engineering School, Rio de Janeiro State University (UERJ), Rio de Janeiro, 2019.

The present research deals with a study realized from CPT and SPT tests performed close to each other and forming a selected database organized by the author. The main objective of the research has been the comparison of two calculation models for predicting static resistance mobilized during the 45 cm sampler penetration proposed by Schmertmann (1979) and Aoki (2013). The first proposal was developed from the premise of open -ended sampler penetration, while the second proposal considered the possibility of closed ended sampler penetration. Aoki (2013) considered the possibility of better interpretation of the SPT test when the length of the soil sample is measured after the sample penetration of 45 cm. The author adapted Schmertmann's equations (1979) to the dimensions of the sampler used in Brazil, and to different soil sample lengths, in order to allow their direct comparison with Aoki's (2013) equations results. Through the application of the two calculation models, the unit tip resistance and the unit lateral friction during soil sampler penetration was estimated and compared to q_c and f_s results from CPT, using different approaches. The author detailed the interpretation for a chosen tests set, indicating the other tests results in attached documents. The author observed that from Schmertmann (1979) and Aoki's (2013) proposals, it was possible to predict values close to the experimental ones. The results indicated the great possibility of q_c predictions in clay soils when applying Aoki (2013) model, but not in sandy soils, better reproduced by Schmertmann's (1979) and Aoki (2013). Aoki (2013) expectations were confirmed: the possibility of measurement of the soil length at the end of penetration brings new possibilities for interpretation of the SPT test, allowing it to be an even more useful tool for the foundation designer. The interpretation reveals that the careful test procedure, by more qualified teams and reaching more accurate results, together with the instrumentation of the energy arriving at the sampler top are fundamental to a better interpretation of the test, allowing the continuous evolution of its interpretation.

Keywords: SPT; CPT; SPT Sampler; Closed Ended Behavior; Open-Ended Behavior.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura básica semelhante ao amostrador desenvolvido por Charles Gow para cravação dinâmica e obtenção de amostras a seco (Hvorslev,1949).	24
Figura 2 – Modelos de amostradores para reconhecimento de solos (Hvorslev, 1949).	26
Figura 3 – Martelo do tipo “pin guided hammer”, sem coxim de madeira (Hvorslev, 1949).	26
Figura 4 – Equipamento do SPT (Schnaid e Odebrecht, 2012).	36
Figura 5 – Martelos padronizados: a) com pino guia; b) cilíndrico vazado (Morais, 2014).	37
Figura 6 – Composição para cravação (Modificado de Lukiantchuki, 2012).	38
Figura 7 – Amostrador do tipo Raymond bipartido (Lukiantchuki, 2012).	39
Figura 8 – Resultados teóricos de eficiência versus comprimento de haste (adaptado de Aoki e Cintra 2000a).	43
Figura 9 – Dimensões padronizadas pelo ISSMFR (1977), Schaap e Zuidberg (1982).	46
Figura 10 – Esquema de cone elétrico de atrito convencional, Schaap e Zuidberg (1982), segundo Danziger e Schnaid (2000).	46
Figura 11 – Equipamento CPTU.	48
Figura 12 – Corte esquemático típico de um piezocone (Lunne <i>et al.</i> , 1986).	49
Figura 13 – Principais posições do elemento poroso, Danziger e Schnaid (2000).	49
Figura 15 – Poropressão influenciando a medida da resistência de ponta, Danziger e Schnaid (2000).	51
Figura 16 – Ábaco de Begemann (1965), conforme Danziger (1990)	52
Figura 17 – Gráfico de perfilagem de Schmertmann, 1978.	53
Figura 18 – Proposta de Douglas e Olsen (1981), conforme Danziger (1990).	54
Figura 19 (a) e (b) – Diagrama de classificação de solos a partir do resultado de ensaio cone elétrico e piezocone (Robertson <i>et al.</i> , 1986).	56
Figura 20 – Gráfico de perfilagem de Senneset <i>et al.</i> (1989).	57
Figura 21 – Proposta de classificação dos solos, segundo Robertson (1990), adaptado de Bezerra (1996)	58

Figura 22 – Proposta de modificação do ábaco de tipo de comportamento do solo (Robertson, 1990), adaptado de Bezerra (1996) por Nejaim, 2015.....	59
Figura 23 – Comparação entre as componentes da resistência à penetração do SPT e CPT (Schmertmann, 1979).....	62
Figura 24 – Comparação da resistência de ponta do amostrador SPT com a resistência de ponta do cone de Begemann, Schmertmann (1979).	64
Figura 25 – Valores relativos das componentes quase-estáticas da penetração do amostrador, adaptado de Schmertmann (1979).....	65
Figura 26 – Adaptação da curva proposta por SCHERTMANN (1979) de acordo com a NBR 6484 (2001) (Modificado SOUZA, 2009).....	66
Figura 27 – Energia quase-estática necessária à penetração para uma eficiência $\eta = 0,54$, Schmertmann (1979).....	68
Figura 28 – Curva resistência versus penetração correspondente ao SPT (adaptado de AOKI et al., 2004, por MORAES, 2014).	73
Figura 30 – Equilíbrio de forças atuantes no amostrador (modificado de Zapata, 2015).	77
Figura 31 – Forças atuantes na ponta aberta do amostrador (modificado de Zapata, 2015).	79
Figura 32 – Procedimento para comparação dos dados de CPT e SPT (Politano et al. 1998)	84
Figura 33 – Controle do comprimento da amostra para os casos (a) sem embuchamento ($L_i = 45$ cm) e (b) com embuchamento ($L_i < 45$ cm) (Zapata 2015) .	89
Figura 34 – Diferença entre áreas de ponta considerada pelo método de a) Schmertmann e b) Aoki.....	97
Figura 35 :Curvas correspondentes a parcela da força resistente correspondente a ponta e ao atrito, para a situação não embuchada conforme proposto por Schmertmann (1979), ($L_i=45$ cm) e para situações em que houve embuchamento (exemplos de $L_i = 25$ e $L_i = 5$ cm).	99
Figura 36 :Adaptação das curvas correspondentes a parcela da força resistente correspondente a ponta e ao atrito, para a situação não embuchada conforme proposto por Schmertmann (1979), ($L_i=45$ cm) e para situações em que houve embuchamento (exemplos de $L_i = 25$ e $L_i = 5$ cm), considerando a área de ponta anelar de acordo com Aoki (2013).	100

Figura 37 :Exemplo de comparação entre as estimativas de resistência de ponta (q_c) de Schmertmann (1979) e Aoki (2013) com os valores medidos por CPTU – SPT15 x CPTU 04.....	102
Figura 38 :Comparação entre as estimativas de resistência de ponta (q_c) de Schmertmann (1979) e Aoki (2013) com os valores medidos do CPTU, vertical SPT15 x CPTU 04 – Ajuste de desnível em 1 metro.....	105
Figura 39 :Comparação do padrão de comportamento das camadas de solo arenosos e argilosos quanto tipo de solo quanto às resistências de ponta (q_c) estimadas por Schmertmann (1979) e os medidos nas verticais SPT15 x CPTU 04	107
Figura 40 : Comparação do padrão de comportamento das camadas de solo arenosos e argilosos quanto tipo de solo quanto às resistências de ponta (q_c) estimadas por Schmertmann (1979) e os medidos nas verticais SPT15 x CPTU 04, com ajuste de $\beta = 1$ para as areias.....	108
Figura 41 :Exemplo de análise aos resultados de resistência de ponta (q_c) estimadas por Aoki (1979) e os medidos por CPTU em função do comprimento de bucha (L_i) – SPT15 x CPTU 04.....	110
Figura 42 :Exemplo de análise dos resultados de resistência de ponta (q_c) estimadas por Aoki (2013) e os medidos por CPTU em função da variação do parâmetro “a”, sendo $a=0,5$ no gráfico da esquerda e $a=4$ no da direita– SPT15 x CPTU 04.....	111
Figura 43 :Exemplo de análise do comportamento por tipo de solo quanto aos resultados de resistência de ponta (q_c) estimadas por Schmertmann (1979) e os medidos por CPTU – SPT15 x CPTU 04	112
Figura 44 :Exemplo de análise dos resultados de resistência de ponta (q_c) estimadas por Schmertmann (1979), Aoki (2013) e os medidos por CPTU – SPT15 x CPTU 04	113
Figura 45 :Comparação entre as estimativas de atrito lateral (f_s) de Schmertmann (1979) e Aoki (2013), para o SPT15 com os valores medidos pelo CPTU 04.....	115
Figura 46 :Exemplo de comparação entre as estimativas de atrito lateral externo (f_{se}) de Schmertmann (1979) com os valores medidos por CPTU – SPT15 x CPTU 04	117
Figura 47: Estimativa de atrito lateral (f_s) de Schmertmann (1979) e, à direita, nova estimativa com a análise da influência de 10% de desvio na anotação de SPT na estimativa de atrito lateral (f_s) de Schmertmann (1979) – SPT15 x CPTU 04	119
Figura 48 : Estimativa de atrito lateral (f_s) por Schmertmann (1979) com $C_2 = 1$, à esquerda, e $C_2 = 0,7$, à direita – SPT15 x CPTU 04	121

Figura 49 :Exemplo de análise do comportamento por tipo de solo quanto aos resultados de atrito lateral (f_s) estimadas por Schmertmann (1979) e os medidos por CPTU – SPT15 x CPTU 04	122
Figura 50 :Exemplo de análise dos resultados de atrito lateral (f_s) estimados por Schmertmann (1979), Aoki (2013) e os medidos por CPTU – SPT15 – CPTU 04..	123
Figura 51 :Exemplo de análise dos resultados da força correspondente à resistência estática (F) estimadas por Schmertmann (1979) e Aoki (2013)	124
Figura 52 :Análise da resistência estática (F) do amostrador SPT, calculado pelo modelo de Schmertmann (1979), a partir dos resultados do CPTU para duas interpretações de f_s	126
Figura 53 : Análise quanto ao valor medido de resistência estática (F) medido pelo CPTU calculado por Schmertmann (1979) e por Aoki (2013)	127
Figura 54: Força resistente medida pelo CPTU estimada por Aoki (2013), nas curvas em cinza do gráfico a esquerda, e por Schmertmann (1979), nas curvas em vermelho no gráfico da direita, comparadas aos valores estimados por Schmertmann (1979) e por Aoki (2013).....	128
Figura 55 : Análise por tipo de solo quanto ao valor medido de resistência estática (F) medido pelo CPTU e os valores estimados por Schmertmann (1979) e por Aoki (2013)	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –Correlações propostas entre a resistência à penetração e propriedades de solo (Hvorslev,1949).	28
Tabela 2 – Variação no número de golpes para cada equipamento (Casagrande & Casagrande, 1968, segundo Kovacs <i>et al.</i> ,1977).....	29
Tabela 3 – Estimativa da consistência de argilas e da compacidade de areias a partir dos valores da resistência à penetração medidos com o amostrador IPT (Nápoles Neto, 1961, segundo Belincanta, 1998).	31
Tabela 4 – Consistência e compacidade relativa para diversos tipos de solos em função de índices de resistência à penetração obtidos com três modelos de amostradores (adaptado de BELINCANTA, 1998).....	33
Tabela 5 – Classificação dos solos (NBR 6484, 2001)	40
Tabela 6 – Potencialidade do CPTU para investigações geotécnicas (Lunne <i>et al.</i> , 1997).	47
Tabela 7 – Ábacos de classificação dos solos da literatura (adaptado de Liao, 2005).	60
Tabela 8 – Números de golpes para cada 15 cm obtidos nos ensaios realizados por Schmertmann (1979).....	70
Tabela 9 – Variação da energia nos intervalos de tempo (t_2-t_1) e (t_3-t_2) (AOKI <i>et al.</i> , 2007)	74
Tabela 10 – Informações sobre dados utilizados no presente estudo.....	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABMS	Associação Brasileira de Mecânica dos Solos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society For Testing And Materials
CPT	Cone Penetration Test
CPTu	Piezocone Penetration Test
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo
ISSMFE	International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering
NBR	Norma Brasileira
PGECIV	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
SPT	Standard Penetration Test
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔL	Incremento de penetração do amostrador
ΔN	Número de golpes no intervalo ΔL
Δu	Variação da poropressão
α	Razão entre área da base da luva de atrito (A_N) e área da base do cone (A_T)
A	Área de ponta do amostrador SPT (superfície anelar)
A_N	Área da base da luva de atrito
A_T	Área da base do cone
Bq	Parâmetro de Poropressão
C_1	Razão entre resistência de ponta do SPT (q) e a resistência de ponta obtida no CPT (q_c)
C_2	Razão entre atrito lateral do SPT (f) e atrito lateral obtida no CPT (f_c)
d_{ext}	Diâmetro externo do amostrador SPT
D_{ext}	Diâmetro externo do amostrador = 50,8 mm
d_{int}	Diâmetro interno do amostrador SPT
D_{int}	Diâmetro interno do amostrador = 34,7 mm
DMX	Máxima penetração do amostrador no solo
D_p	Diâmetro da ponta do amostrador = 38,1 mm
E'	Energia requerida para penetração do amostrador SPT
E''	Energia transferida ao amostrador correspondente à eficiência α
E^*	Máxima energia dinâmica de impacto do martelo
E_{60}	Energia potencial para 60% da eficiência nas hastes
E_h	Energia transferida ao topo da composição de hastes
F	Força externa
f	Atrito médio por unidade de área nas paredes internas e externas do amostrador
F_0	Resistência por atrito lateral externo
f_c	Atrito lateral obtido pelo ensaio CPT
F_e	Resistência de ponta
F_i	Resistência por atrito lateral interno

F_m	Força estática média
Fr	Razão de Atrito Normalizada
f_s	Atrito lateral obtido pelo ensaio CPT
g	Aceleração da gravidade
h_q	Altura de queda
IRP	Índice de resistência à penetração obtido com o amostrador Mohr-Geotécnica
L	Penetração média do amostrador
L_a	Comprimento da amostra no interior do amostrador SPT
L_{ext}	Penetração total do amostrador
L_i	Variação do comprimento de bucha
L_p	Comprimento da seção biselada do amostrador = 21,5 mm
M_m	Massa do martelo
N_1	Número de golpes no intervalo dos primeiros 15 cm
$N_{15\ final}$	Número de golpes no intervalo últimos 15 cm
$N_{15\ inic}$	Número de golpes no intervalo dos primeiros 15 cm
$N_{15\ interm}$	Número de golpes no intervalo 15 cm intermediários
N_2	Número de golpes no intervalo 15 cm intermediários
N_3	Número de golpes no intervalo últimos 15 cm
N_{60}	Valor de NSPT para 60% média da eficiência do conjunto que é transferida às hastes
N_{SPT}	Índice de Resistência à Penetração
q	Resistência média de ponta por unidade de área
q_c	Resistência de ponta obtida pelo ensaio CPT
q_t	Resistência de ponta obtida pelo ensaio CPT corrigida
q_t	Resistência de Ponta normalizada
R_1	Força de reação na parede vertical externa do amostrador
R_2	Força de reação na parede interna do amostrador
R_3	Força de reação vertical na seção anelar de ponta do amostrador
R_4	Componente vertical da força de reação ao longo da superfície biselada tronco-cônica do amostrador
R_5	Componente horizontal da força de reação ao longo da superfície biselada tronco-cônica do amostrador

R_d	Força de reação dinâmica experimental
R_f	Razão de Atrito
r_l	atrito lateral externo
R_l	Resistência unitária na parede externa e no chanfro do amostrador
r_{li}	atrito lateral interno
R_{li}	Resistência unitária na parede interna do amostrador
RP	Resistência à penetração obtida com o amostrador tipo IPT
r_p	rp
R_s	Resistência Estática
R_s	Força resistente no ensaio estático
R_t	Força resistente no ensaio dinâmico
R_t	Força resistente no ensaio dinâmico
S	Penetração permanente
S_m	Penetração média equivalente
T	Energia cinética total no sistema
T_a	Energia cinética do sistema
U	Poropressão medida na base do cone
U_0	Poropressão in situ
u_1	Poropressão na base do cone
u_2	Poropressão na base do cone
u_3	Poropressão na base do cone
V	Energia potencial no sistema
V_a	Energia de deformação
V_e	Energia potencial elástica
W'	Peso submerso das hastes
W_a	Forças não conservativas devido à cravação
W_h	Peso das hastes e cabeça de bater
W_{nc}	Trabalho realizado por forças não conservativas
X_i	Razão entre o número de golpes necessários para cravar 15 cm do SPT e os 15 cm finais
α	Percentual da máxima energia transferida ao amostrador
β	Razão entre a parcela dinâmica e a estática necessária à penetração do amostrador

η	Eficiência
η^*	Eficiência referente ao topo do amostrador
σ_v	Tensão vertical total in situ
σ_{v0}	Tensão vertical inicial in situ
σ'_{v0}	Tensão vertical efetiva inicial in situ

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	21
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
1.1 Ensaio SPT	23
1.1.1 Histórico	23
1.1.2 SPT no Brasil	30
1.1.3 Padronização	34
1.1.4 Eficiência do Ensaio	41
1.2 Ensaio CPT	44
1.2.1 Histórico	44
1.2.2 Procedimento Executivo	48
1.2.3 Interpretação do Ensaio	51
1.3 Estática do SPT	61
1.3.1 A Proposta de Schmertmann (1979)	61
1.3.2 Resistência Estática no sistema solo-amostrador através da aplicação do Princípio de Hamilton (Aoki e al., 2007)	72
2 BANCO DE DADOS	82
2.1 Rodovia Presidente Dutra - Baixada do Jacareí	84
2.2 Obra residencial em Itapema/SC	85
2.3 Porto do Açú – São João da Barra	86
2.4 Obra Industrial na Zona Oeste	86
3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	88
3.1 Adaptação do Método de Schmertmann (1979)	88
3.2 Utilização do Método proposto por AOKI (2013)	92
3.3 Estimativa de F a partir dos resultados de CPTU	94
4 – INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA BUCHA NO MÉTODO DE SCHMMERTMAN	98
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	101
5.1 Análise de q_c estimado pelo Método de Schmertmann (1979) e Aoki (2013)	102
5.2 Análise de f_s estimado pelo Método de Schmertmann (1979) e Aoki (2013)	114

5.3 Análise da Resistência Estática (F) estimada pelo Método de Schmertmann (1979) e Aoki (2013)	124
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	131
6.1 Introdução	131
6.2 Conclusões	132
6.2.1 Influência do comprimento de bucha (L_i) no método de Schmertmann (1979).....	132
.....	132
6.2.2 Análise dos valores de resistência unitária de ponta (q_c)	132
6.2.3 Análise dos valores de resistência unitária de atrito lateral (f_s)	133
6.2.4 Análise dos valores de resistência estática (F)	134
6.2.5 Considerações quanto ao uso dos métodos de Schmertmann (1979) e Aoki (2013) para estimativas de parâmetros do solo.....	135
6.3 Sugestão para trabalhos futuros	137
REFERÊNCIAS	138
ANEXO A - DADOS DOS PARES SPT E CPTU UTILIZADOS NA PESQUISA	145
ANEXO B – RESULTADOS OBTIDOS COM SCHMERTMANN (1979) E AOKI (2013)	160

INTRODUÇÃO

Sendo o ensaio SPT muito utilizado na prática, principalmente em razão de sua simplicidade e custo, muitas pesquisas têm sido conduzidas de forma a melhor racionalizar o seu emprego, especialmente em correlações com o ensaio de cone, visando o cálculo da capacidade de carga de fundações, bem como possibilitar melhor estimativas de recalque. Embora muitas críticas tenham sido atribuídas ao seu emprego, em muitas ocasiões este ensaio é o único disponível para projeto.

Schmertmann (1979) apresentou uma análise estática da cravação do amostrador SPT no solo, comparando-se a resistência atuante durante a penetração lenta do amostrador SPT com a resistência à penetração obtida com a cravação do cone CPT.

Recentemente, estudos baseados no princípio de Hamilton procuram melhor entender os mecanismos de transferência de energia e os fatores que mais influenciam a penetração do amostrador SPT. Medições da força e velocidade no topo das hastes e logo acima do amostrador têm muito contribuído para este avanço.

Aoki, em 2013, apresentou uma proposta para a determinação da resistência de ponta do cone em função do N_{SPT} , do comprimento da bucha e da eficiência.

A presente pesquisa se propõe a contribuir com este estudo, em particular com a comparação entre a proposta original de Schmertmann (1979) e a mais recente de Aoki (2013).

Objetivos

Esta dissertação objetiva apresentar uma comparação entre as propostas de Schmertmann e Aoki acerca da análise do N_{SPT} e a forma como estes autores conduziram a análise estática do amostrador para a obtenção de uma resistência equivalente à resistência de ponta no ensaio de cone, q_c , e da resistência equivalente ao atrito lateral na luva do cone, f_s . Para isso, o autor reuniu um banco de dados de sondagens e ensaios de cone realizados em argilas e areias. O autor partiu do banco

de dados de Souza (2009), incorporando ensaios realizados mais recentemente, estendendo o banco de dados inicial.

Com base nos valores de N_{SPT} , o autor procedeu à análise de q_c e f_s através de Schmertmann (1979) e da análise estática proposta por Aoki (2013). Como o método original apresentado por Schmertmann (1979) considerava a premissa de não embuchamento do amostrador, o autor procedeu a algumas adaptações na formulação original de Schmertmann (1979) para considerar a diversidade de situações de embuchamento de forma a comparar as duas propostas. Os valores assim previstos de q_c e f_s pelos dois procedimentos de análise estática foram comparados aos valores de q_c e f_s medidos por ensaios de cone, obtidos do banco de dados.

O autor discutiu as diferenças encontradas e apresentou algumas sugestões na expectativa de contribuir para o tema.

Estrutura da dissertação

Após esta breve introdução é apresentada, no capítulo 1, a revisão bibliográfica. Mesmo com o propósito de resumir o conteúdo, o autor optou por incluir alguns aspectos objetivando uma melhor compreensão da investigação realizada.

No capítulo 2 é ilustrada a caracterização e reunião do banco de dados, bem como sua organização e seleção dos valores utilizados nesta pesquisa.

No capítulo 3 são apresentados os detalhes da adaptação do estudo de Schmertmann (1979) para contemplar também a análise do amostrador utilizado no Brasil, bem como diferentes etapas de seu embuchamento. Também são detalhadas a utilização do método proposto por Aoki (2013) e a metodologia de estimativa do valor da resistência estática correspondente ao ensaio SPT.

No capítulo 4 se apresenta a influência quanto a variação de bucha para a estimativa quanto as parcelas da resistência estática do SPT previstas pelo método de Schmertmann (1979).

No capítulo 5 o autor discute os resultados observados. São destacadas as similaridades e diferenças das interpretações de Schmertmann (1979) e Aoki (2013), ressaltando a razão das diferenças, pela interpretação do autor.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões e sugeridos temas para pesquisa futura.

Seguem as referências bibliográficas e os anexos.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica dos principais assuntos relacionados ao objeto do presente estudo, quais sejam, histórico dos ensaios *Standard Penetration Test* (SPT) e *Cone Penetration Test* (CPT) e as propostas de correlação destes a partir, especialmente, da análise da estática do ensaio SPT.

1.1 Ensaio SPT

Inicialmente faz-se importante uma revisão histórica do ensaio *Standard Penetration Test* (SPT), tanto no contexto internacional quanto no contexto brasileiro, além de abordagem sobre a padronização, metodologia do ensaio e descrição dos equipamentos utilizados. Esta revisão baseia-se principalmente nos trabalhos apresentados por Belincanta (1998), Cavalcante (2002), Odebrecht (2003), Souza (2009), Luckiantchuki (2012) e pela NBR 6484 (2001).

1.1.1 Histórico

A história do ensaio SPT pode ser dividida em 4 distintas fases caracterizadas pelos avanços obtidos, conforme apresentado por CAVALCANTE (2002). A primeira fase inicia em 1902 até aproximadamente 1920. A segunda fase começa em 1927 e é marcada pelo lançamento do livro de TERZAGHI & PECK (1948). A partir do lançamento deste livro até metade dos anos 70, tem-se a terceira fase, caracterizada

por esforços no sentido de padronização e normatização do ensaio. A quarta fase, iniciada em 1977, refere-se ao período em que se passou a estudar a questão da energia transmitida às hastes durante a execução do ensaio.

A literatura atribui ao engenheiro Charles R. Gow o início da obtenção de amostras de subsolo através de processos dinâmicos de cravação, uma vez que este introduziu tal processo nos Estados Unidos em 1902. Contudo, antes mesmo de 1902, já existia metodologia para identificação do solo, porém, baseava-se no recolhimento de detritos resultantes da perfuração com circulação d'água ou através da abertura de poços de grandes diâmetros, processos esses que provocam descaracterização na estrutura do solo, comprometendo sua correta identificação e o conhecimento de suas propriedades.

O processo introduzido pelo engenheiro Charles R. Gow em 1902 previa a cravação de um tubo de 25,4 mm de diâmetro (Figura 1), com martelo de 50 kg de massa, a partir do qual foi possível a obtenção de amostras do tipo “*Dry Sample*”, melhorando significativamente o processo de obtenção de amostras para classificação de solos, que até essa época era feito pelo recolhimento dos detritos oriundos da perfuração com circulação d'água.

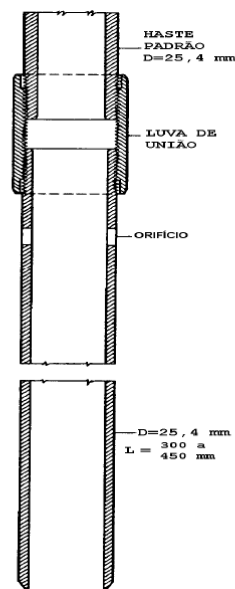


Figura 1 – Estrutura básica semelhante ao amostrador desenvolvido por Charles Gow para cravação dinâmica e obtenção de amostras a seco (Hvorslev, 1949).

O processo de cravação de tubo introduzido por Charles R. Gow, entretanto, não pode ser considerado um ensaio, pois conforme destacado por Belincanta (1998), não existem registros quanto aos procedimentos para cravação do tubo, intervalo de cravação, altura de queda do martelo, contagem de golpes etc.

Em 1927, a *Raymond Concrete Pile Company* e sua subsidiária, *The Gow Company*, desenvolveram o amostrador composto de três partes, sendo: (i) cabeça; (ii) corpo bipartido de 51 mm de diâmetro externo e 35 mm interno; (iii) sapata biselada de 35 mm de diâmetro interno. Existe registro de um amostrador similar desenvolvido na Pensilvânia na mesma época pela *Sprague Henwood* de Screnton.

O modelo Raymond representou um grande avanço na obtenção de amostras de qualidade, pois, após a cravação e abertura do amostrador bipartido passou a ser possível a visualização e retirada de amostra, mantendo preservada boa parte do estado natural do solo. Tal modelo, conforme Belincanta (1998), é similar ao que se utiliza até os dias atuais.

No mesmo período, outro amostrador foi desenvolvido, denominado de “*heavy duty*”, dotado de válvulas e ventosas para aliviar os excessos de pressão aos quais o amostrador e a amostra podem estar sujeitos durante a cravação abaixo do nível d’água, dependendo da velocidade de cravação e tipo do solo. Esse modelo diferencia-se também por possuir corpo inteiriço e diâmetro da sapata um pouco superior ao diâmetro do corpo (Cavalcante, 2002). Esses modelos podem ser visualizados na Figura 2.

A sondagem passou a ser considerada como um ensaio a partir de 1930, quando Mohr e Fletcher apresentaram as primeiras especificações da cravação do amostrador (Odebrecht, 2003). O resultado do ensaio consistia no número de golpes necessários para a cravação de 305 mm do amostrador no solo, através de golpes de martelo de 63,5 kg, caindo a uma altura de 762 mm. A massa do martelo de 63,5 kg foi adotada por Mohr como uma média das massas dos martelos utilizados na região de Boston nessa época, possuindo forma prismática, de concreto, coxim de madeira e pino-guia, similar ao existente até hoje no Brasil. A este martelo deu-se o nome de “*pin guided hammer*”, conforme Figura 3:

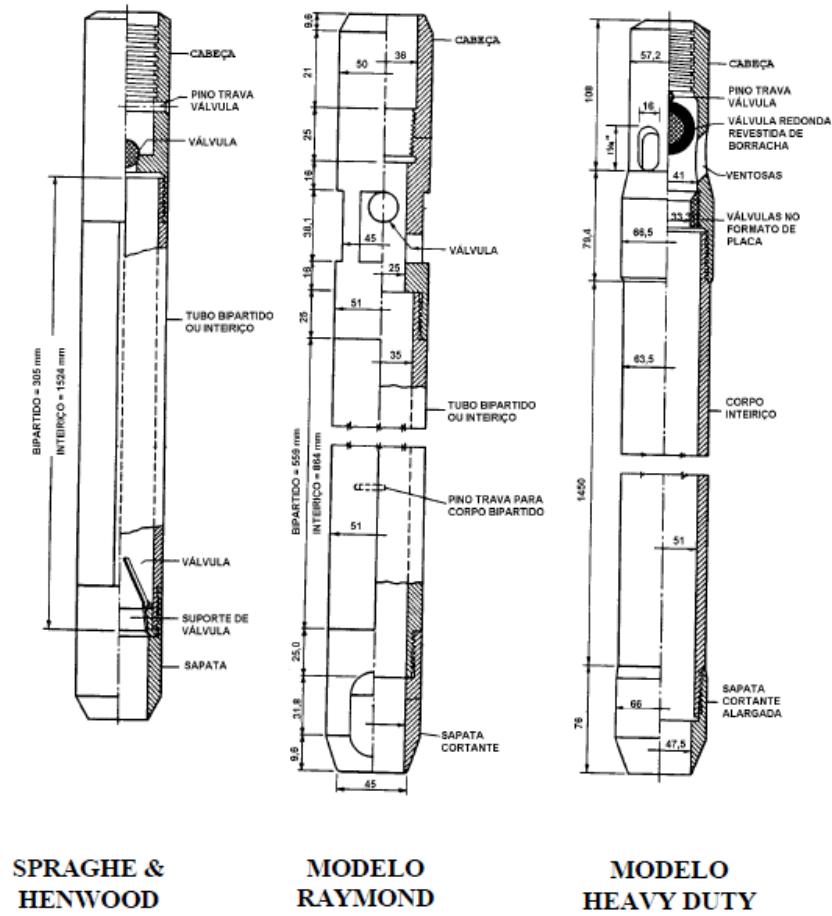


Figura 2 – Modelos de amostradores para reconhecimento de solos (Hvorslev, 1949).

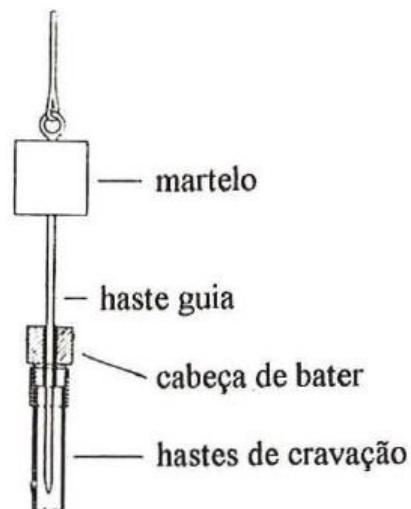


Figura 3 – Martelo do tipo “pin guided hammer”, sem coxim de madeira (Hvorslev, 1949).

A denominação de “*Standard Penetration Test*” (SPT) foi dada por Terzaghi & Peck, após divulgação do ensaio proposto por Mohr no livro “*Soil Mechanics in Engineering Practice*” de 1948. O livro descreve o procedimento de execução da sondagem com perfuração por circulação d’água, a partir do uso de tubo de revestimento com 63,5 mm de diâmetro, hastes metálicas de 25,4 mm e amostrador tipo Raymond. São apresentadas as primeiras correlações entre o número de golpes N com a compacidade das areias, a consistência das argilas e a capacidade de carga de fundações.

O resultado do ensaio SPT descrito por Terzaghi & Peck (1948) é obtido de forma similar ao apresentado por Mohr. Entretanto, antes da contagem do número de golpes é prevista a cravação inicial de 152 mm do amostrador em forma de assentamento, preocupação que até esse momento não se tinha.

O livro de Terzaghi E Peck (1948) é considerado um importante passo para análise mais racional do ensaio SPT, impulsionando o seu uso. Isso porque, além de trazer as correlações entre os resultados do ensaio com as propriedades do solo, faz recomendações quanto aos procedimentos e equipamentos utilizados, que futuramente viriam a ser incorporados quase integralmente às normas do ensaio.

Cabe destacar que nesta época inexistia ainda qualquer padronização de equipamentos e procedimentos. O trabalho de Hvorslev (1949), por exemplo, deixa claro que existia uma variedade de tipos de amostradores ao apresentar 4 tipos e as diferentes correlações entre consistência ou compacidade relativas do solo e a resistência para a penetração de cada um deles, vide Tabela 1.

Baseado na diferença significativa entre correlações apresentadas, Hvorslev (1949), embora considere os benefícios do uso do ensaio SPT, ressalva que as estimativas de consistência e compacidade devem ser analisadas com cuidado, podendo não ser confiáveis, pois são dependentes de diversos fatores associados ao equipamento, procedimento e condições do solo.

As primeiras tentativas oficiais de padronização surgiram em meados de 50, impulsionadas por James D. Parson, em 1954. A proposta desse autor defende que o registro do número de golpes deva ser feito para cada um dos 3 intervalos de 152 mm do amostrador, sendo o índice de resistência correspondente à menor soma de dois dos 3 intervalos. Tal proposta divergia da recomendação de Terzaghi & Peck em que o índice fosse representado pela soma dos últimos 2 intervalos.

Tabela 1 –Correlações propostas entre a resistência à penetração e propriedades de solo (Hvorslev,1949).

autor	H. A. MOHR		TERZAGHI & PECK		NEW YORK CITY CODE		NEW ENGLAND DIV, C. E.	
amostrador	tubo extra pesado Di=33,4mm De=24,3mm		Raymond Di=51mm De=35mm		De=63,5mm		De=76,2mm	
martelo	±63,5kg. queda±762mm		63,5kg. queda:762mm		136kg. queda:457mm		136kg. queda:457mm	
solo	designação	golpes/305mm	designação	golpes/305mm	designação	golpes/305mm	designação	golpes/305mm
Areia e Silte (compacidade)	fofa	< 9	muito fofa	< 4	fofa	0 - 15	muito fofa	< 8
	firme	9 - 13	fofa	4 - 10			fofa	8 - 16
	dura	14 - 49	média	4 - 30	compacta	16 - 50	média	16 - 55
	muito dura	> 50	compacta	30 - 50	m ^{to} compacta	> 50	compacta	55 - 110
			m ^{to} compacta	> 50			m ^{to} compacta	> 110
Argila (consistência)	mole	< 5	m ^{to} mole	< 2	m ^{to} mole	0 - 2	m ^{to} mole	< 8
	média	5 - 10	mole	2 - 4	mole	3 - 10	mole	8 - 16
			média	4 - 8			média	16 - 55
			rija	8 - 15	rija	11 - 30		
			m ^{to} rija	15 - 30			rija-dura	55 - 110
	dura	11 - 30	dura	>30	dura	> 30		
							m ^{to} dura	> 110

Segundo Cavalcante (2002), a proposta de Parson culminou com o surgimento da primeira tentativa de norma da ASTM (*American Society for Testing and Materials*), denominada “*Tentative Method for Penetration Test and Split-Barrel Sampling of Soils*” (ASTM D1586/58T). A referida norma, apesar de prever a cravação do amostrador com assentamento inicial de 152 mm e determinar o registro do segundo e terceiro intervalo de 152 mm, não especificava claramente qual seria o índice a resistência do ensaio, questão que só veio a ser esclarecida com a publicação de sua revisão, D1586-63T, que esclarece que o índice deva ser tomado pela soma dos dois últimos intervalos do amostrador.

A questão do assentamento inicial do amostrador foi objeto de discussão entre os anos 50 e 60, sendo observado que a maioria dos pesquisadores foi favorável ao registro do número de golpes para cada um dos três intervalos de 152 mm do amostrador, bem como à adoção do primeiro intervalo como de assentamento do amostrador (Cavalcante, 2002). A previsão de assentamento inicial do amostrador, justificado por Palacios (1977,) está relacionada a:

- Perturbação do solo provocado pelo processo de perfuração;
- Material do solo na base do furo oriundo da perfuração que pode não representar o tipo de solo e nem a resistência natural à penetração;
- Alívio de tensões da primeira porção do maciço provocado pela retirada da coluna de material na escavação.

Em meados dos anos 60, Mohr (1966) e Fletcher (1965) publicam trabalhos em que apresentam diversos fatores intervenientes do ensaio SPT questionando os dados obtidos a partir dele. No mesmo período começam a ser utilizados os primeiros martelos automáticos, aos quais alguns pesquisadores foram contra por considerar que havia pouco conhecimento sobre seu desempenho (Belincanta, 1998).

Casagrande & Casagrande (1968), *apud* Kovacs *et al.* (1977), realizaram um estudo comparativo entre os resultados de índices à penetração obtidos por duas empresas distintas e com diferentes equipamentos em uma mesma áreas e concluíram que existia grande diferença nos valores obtidos, vide Tabela 2:

Tabela 2 – Variação no número de golpes para cada equipamento (Casagrande & Casagrande, 1968, segundo Kovacs *et al.*,1977).

tipo de equipamento	“Original Raymond”	“Flyght Auger Raymond”	“Rotary Equipment Sprague-Henwood”	“Hollow Stem Flyght Auger”
acionamento do martelo	manual	corda com tambor (cathead)	guincho com cabo de aço	corda com tambor(cathead)
número de golpes/30,5cm (N)	10	15	45	10

Devido à desconfiança que existia na época, a continuidade do uso do SPT dependia de melhoria na confiabilidade dos seus resultados. Foi nesse contexto que, em meados de 70, começaram a ser realizados estudos da medição da energia envolvida no ensaio e identificação dos fatores que influenciam o N_{SPT} , visando sua padronização, como: Schmertmann & Palacios, 1979; Kovacs, 1979; Belincanta, 1998; Cavalcante, 2002; Odebrecht, 2003; Lobo 2009, dentre outros.

Os estudos mostraram que o N_{SPT} é afetado diretamente pela energia transmitida às hastes e ao amostrador, que varia em função dos equipamentos e procedimentos, provocando resultados discrepantes (Luckiantchuki, 2012).

Em decorrência dos estudos de determinação da energia, Seed *et al* (1985) consideram que a energia média transferida às hastes é de 60% da energia nominal do conjunto. Tal valor de 60% (N_{60}) foi recomendado por Skempton (1986) como referência para correção dos valores de N_{SPT} medidos e passou a ser adotada na prática da engenharia geotécnica mundial.

O baixo custo operacional, simplicidade e robustez fazem com que o SPT continue a ser um ensaio de referência na prática de engenharia de fundações, base para a maioria dos projetos de fundações no Brasil, Estados Unidos e Japão.

1.1.2 SPT no Brasil

Conforme relato de Belincanta (1998) a história do SPT no Brasil tem início a partir de 1939, após criação, no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), das Seções de Estrutura e Fundações no ano de 1935 e da Seção de Solos e Fundações em 1938, esta última criada após o engenheiro Odair Grillo retornar ao Brasil, vindo da Universidade de Harvard, onde teve a oportunidade de realizar curso com o Prof. H. A. Mohr.

Em 1944 as medidas de penetração já eram realizadas de forma sistemática utilizando-se o revestimento de 51 mm e amostrador padrão com 46 mm de diâmetro externo e 38,1 mm de diâmetro interno, denominado de amostrador IPT. Tal amostrador era composto de cabeça, corpo de 420 mm de comprimento e sapata biselada, cujo diâmetro interno de 36,5 mm era inferior ao diâmetro interno do corpo.

A resistência à penetração era obtida a partir do número de golpes necessários para a cravação do amostrador em 300 mm do solo, utilizando-se um martelo de 0,59 kN sob a queda de 750 mm, depois do assentamento do amostrador no fundo do furo sob a ação do peso da composição de hastes. Belincanta (1998) apresenta outros detalhes do ensaio realizado à época, quais sejam:

- As hastes utilizadas eram as de rotativa do tipo G de aproximadamente 3,2 kg/m;
- Utilização de cabeça de bater;
- Martelo cilíndrico vazado, acionado manualmente através de corda de sisal e roldana fixa;

- Frequência média de 15 golpes por minuto;
- Perfuração a trado até o nível d'água freático e através de circulação de água abaixo dele; e
- Revestimento de 51 mm de diâmetro interno.

Comparando-se os valores de resistência à penetração obtidos pelo ensaio com as estimativas qualitativas da consistência e compacidade registrada pelos sondadores da época, foi possível estabelecer as correlações de consistência e compacidade com o índice de resistência a penetração do amostrador do IPT (RP), conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Estimativa da consistência de argilas e da compacidade de areias a partir dos valores da resistência à penetração medidos com o amostrador IPT (Nápoles Neto, 1961, segundo Belincanta, 1998).

Argilas		Areias	
Consistência	RP	Compacidade	RP
mole	< 4	fofa	< 5
média	4 - 8	média	5 – 10
rija	8 – 15	compacta	10 – 25
dura	> 15	muito compacta	> 25

RP – Resistência à penetração obtida com o amostrador tipo IPT

Odair Grillo, Otelo Machado e Raimundo D'Araújo Costa foram responsáveis pela criação, em 1944, da primeira empresa de sondagens, a Geotécnica S.A., onde foi introduzido o amostrador de 41,3 mm e 25,4 mm de diâmetros externo e interno, modelo este trazido dos Estados Unidos pelo engenheiro Mohr, utilizado pela empresa Raymond Concrete Pile Co., denominado de amostrador Mohr-Geotécnica.

A empresa Geotécnica optou por este modelo por possuir paredes mais espessas do que o do IPT, e, portanto, mais resistente e durável. A resistência obtida a partir deste amostrador denominava-se IRP (Índice de resistência à penetração) e era obtida pelo número de golpes necessários para cravá-lo 30 cm, sob a ação de um

martelo de 0,64 kN caindo de 750 mm, após o assentamento no fundo do furo sob o peso da composição das hastes de 1" de diâmetro.

Belincanta (1998) também traz alguns detalhes específicos da sondagem Mohr-Geotécnica, quais sejam:

- Hastes de 25,4 mm com 3,2 kgf/m;
- Utilização de cabeça de bater;
- Não há referência quanto ao tipo do martelo, mas o mesmo era operado manualmente através de corda de sisal e roldana fixa;
- Frequência média de 15 golpes por minuto;
- Perfuração a trado até o nível de água freático e através de circulação de água abaixo do mesmo; e
- Revestimento de 51 mm de diâmetro interno.

No ano de 1947, a Geotécnica passou a utilizar o amostrador do tipo Raymond, cujos diâmetros externo e interno eram de 51 mm e 35 mm, a ser utilizado em sondagens com revestimento de 63,5 mm. As demais características do equipamento mantinham as já utilizadas nas sondagem Mohr-Geotécnica.

O procedimento para a obtenção da resistência à penetração passou a ser o número de golpes do martelo de 65 kg caindo a uma altura de 750 mm necessários para a cravação de 30 cm do amostrador, após o assentamento de 150 mm do amostrador no fundo do furo, resultando numa cravação total de 450 mm.

Considerando as diferentes correlações de índices de resistência com a compacidade e consistência dos solos existentes à época, foi apresentado por Belincanta (1998) as diferentes classificações obtidas em função de índices de resistência à penetração obtidos com os modelos de amostrador do IPT, Mohr-Geotécnica e o Raymond, conforme a Tabela 4.

Nesse sentido, em 1956 o professor Costa Nunes destaca a falta de padronização das sondagens SPT no país e, posteriormente, Teixeira (1977) relata que ainda na década de 70 a sondagem era realizada de forma artesanal com uso de diversos procedimentos e equipamentos distintos.

Tabela 4 – Consistência e compacidade relativa para diversos tipos de solos em função de índices de resistência à penetração obtidos com três modelos de amostradores (adaptado de BELINCANTA, 1998).

Tipo Solo	Consistência e Compacidade	IPT D _e = 46 mm D _i = 38 mm	MOHR- GEOTÉCNICA	RAYMOND (Terzaghi-Peck)
			D _e = 41 mm D _i = 25 mm	D _e = 51 mm D _i = 35 mm
Argilas Siltos argilosos	muito mole	–	< 1	< 2
	mole	< 4	1 – 3	2 – 5
	média	4 – 8	4 – 6	6 – 10
	rija	8 – 15	7 – 11	11 – 19
	dura	> 15	> 11	> 19
Areias Siltos arenosos	fofa	< 5	≤ 2	≤ 4
	p [∞] compacta	–	3 – 5	5 – 8
	med. compacta	5 – 10	6 – 11	9 – 18
	compacta	11 – 25	12 – 24	19 – 41
	m ^{lo} compacta	> 25	> 24	> 41

Por outro lado, em 1970 a Geotécnica e o IPT passaram a utilizar exclusivamente o amostrador Raymond de 51 mm de diâmetro externo, utilizando ainda como referência para o procedimento do ensaio a norma internacional ASTM, D1586-67, com pequenas adaptações. O amostrador passou a ser cravado por 450 mm utilizando-se martelo de 65 kg caindo de 750 mm. A resistência a penetração “N” passou a ser obtida pelo número de golpes para cravar os últimos 30 cm.

Em 1975, Aoki & Velloso (1975) fazem significativa contribuição para a difusão do ensaio SPT ao apresentarem método para estimativa de capacidade de carga de estacas, com base nas correlações existentes entre índices de resistência à penetração e a resistência de ponta e atrito lateral local do ensaio CPT.

Quanto à normatização, em 1974, foi apresentada proposta de Método de Execução de Sondagem de Simples Reconhecimento dos Solos, no 5º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos. Esta proposta de norma, após discussões em eventos, como também por usuários e pesquisadores, foi enviada à ABNT em 1977, para discussão e aprovação. Em 1979, tornou-se oficialmente a primeira norma

brasileira de sondagem SPT, “Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos”, MB 1211/79, sendo alterada posteriormente para NBR 6484/80.

A partir da década de 80, em especial após o trabalho de Belincanta (1985) intitulado “Energia Dinâmica no SPT”, iniciaram-se no Brasil as medidas de energia no ensaio SPT. Belincanta (1998) faz ampla pesquisa sobre a influência de fatores que comprometem o N_{SPT} , tais como: tipo de martelo, procedimentos de execução, sistema de levantamento do martelo, conservação das hastes, uso do coxim de madeira e peso da cabeça de bater.

O trabalho de Aoki e Cintra (2000) sobre a aplicação do Princípio de Conservação de Energia (Princípio de Hamilton) na interpretação do ensaio marca uma importante fase para o ensaio no Brasil, impulsionando uma interpretação mais racional dos seus resultados. Segundo Aoki e Cintra (2000), esta nova interpretação está diretamente relacionada com a parcela de energia disponibilizada ao amostrador, responsável pela cravação.

1.1.3 Padronização

O processo de normalização e padronização da sondagem se iniciou em 1957 quando da realização do IV Congresso Internacional da ISSMFE (*International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering*) em Londres, onde um subcomitê foi formado objetivando o estudo e a normatização de ensaios penetrométricos, tanto dinâmicos, quanto estáticos.

Odebrecht (2003) destaca que a primeira tentativa de norma foi norte americana, a D1586-58T, apresentada em 1958 pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*), sendo publicada definitivamente em 1967, conforme D1586-67.

Embora a maioria dos países adotem a norma ASTM D1586-67, alguns utilizam suas próprias normas, como é o caso do Brasil, por exemplo.

Durante o início dos anos 70, em um cenário de críticas crescentes à metodologia e aparelhagem do ensaio, a comunidade geotécnica brasileira passou a discutir mais intensamente o futuro do ensaio no país, em especial, durante o 5º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, realizado em 1974, em São Paulo.

Nesse sentido, em 1977, a Associação Brasileira de Mecânica dos Solos (ABMS) envia proposta de norma do ensaio SPT para a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), tendo se tornado em 1979 a 1ª norma brasileira para o ensaio, denominada inicialmente de “Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos”, MB 1211/79, e posteriormente recebendo a nomenclatura de NBR 6484 (1980).

Em 2001 houve nova revisão da NBR 6484, incorporando-se a ela a norma NBR 7250 – “Identificação e Descrição de Amostras de Solos Obtidas em Sondagens de Simples Reconhecimento de Solos”.

O objetivo da sondagem de simples reconhecimento de solos, na qual é realizado o ensaio SPT, conforme estabelecido na NBR 6484/2001, é de:

- Determinar os tipos de solos em suas profundidades de ocorrência;
- Determinar a posição do nível d’água;
- Determinar os índices de resistência à penetração a cada metro (através da cravação do amostrador SPT).

Conforme a norma NBR 6484/2001, a aparelhagem do SPT é formada pelos seguintes componentes ilustrados na Figura 4:

- Torre com roldana: estrutura utilizada para o levantamento do martelo;
- Trado-concha: usado para cravar o primeiro metro na superfície do perfil do terreno, possuindo diâmetro de 100 mm \pm 10 mm;
- Trado helicoidal: utilizado para abrir os furos iniciais da sondagem. Deve ter um diâmetro de 5 mm a 7 mm menor que o diâmetro dos tubos de revestimento para possibilitar sua operação no interior do revestimento;
- Trépano de lavagem: Composta por peça de aço biselada e dotada de duas saídas de água laterais. Também deve possuir dimensões compatíveis com o diâmetro do revestimento.
- Sistema de circulação da água: é constituída por uma bomba hidráulica, mangueiras de engate rápido e uma caixa para decantação de detritos;
- Martelo: Massa cilíndrica ou prismática de ferro com 65 kg. Possui na sua face inferior um coxim de madeira dura, com a finalidade de proteger o martelo e melhorar o contato entre as partes no momento do impacto. O martelo pode ser vazado ou maciço com haste guia (Figura 5). A haste-guia dos martelos maciços deve ter um comprimento de 1,2 m ao

longo do eixo de simetria longitudinal do martelo, e a 0,75 m de distância da superfície inferior do martelo deve conter uma marca para garantir a queda do martelo da altura correta.

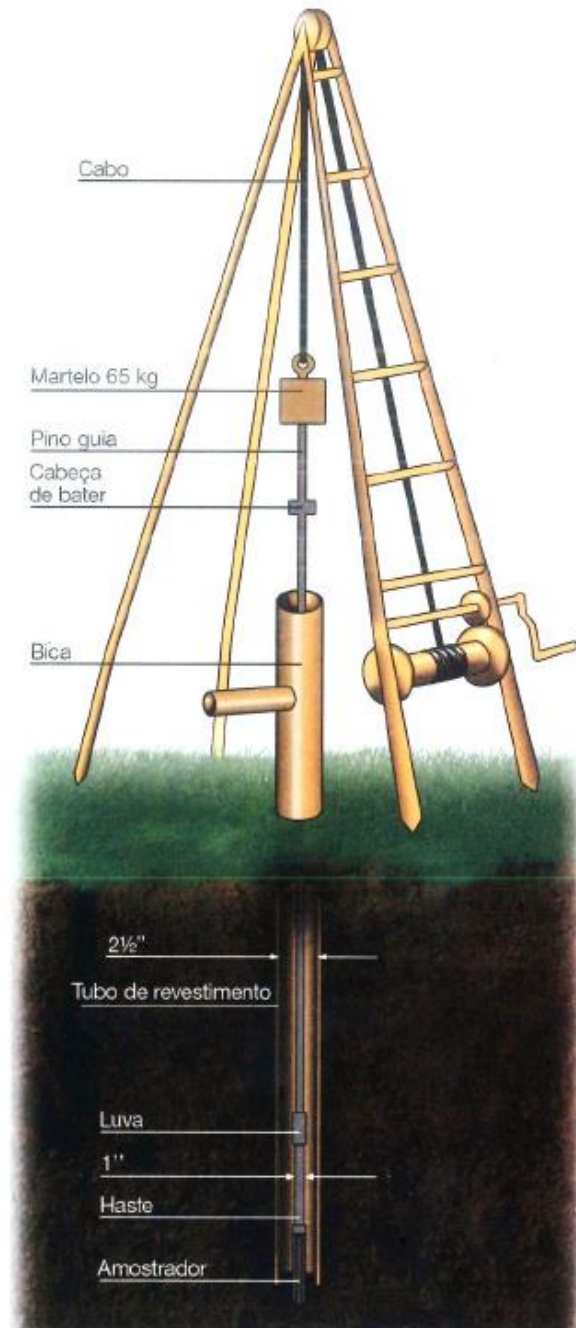


Figura 4 – Equipamento do SPT (Schnaid e Odebrecht, 2012).

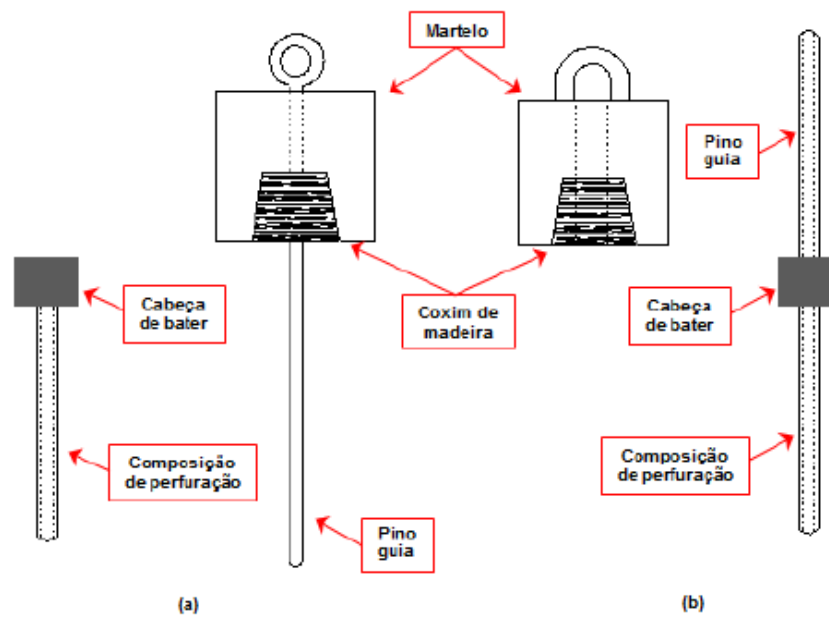


Figura 5 – Martelos padronizados: a) com pino guia; b) cilíndrico vazado (Morais, 2014).

- Cabeça de bater: constituída com um tarugo de aço de diâmetro de 83 mm \pm 5 mm, altura de 90 mm \pm 5 mm e massa nominal entre 3,5 kg e 4,5 kg, a qual recebe o impacto do martelo.
- Composição para cravação: constituída por hastes de aço com diâmetro externo de 33,4 mm \pm 2,5 mm, diâmetro interno de 24,3 mm \pm 2,5 mm (Figura 6), comprimento de 1 m ou 2 m e massa teórica linear de 32 N/m. Os segmentos de hastes são acoplados por sistema de luvas ou roscas, que devem estar atarraxadas para formar um conjunto retilíneo e apresentar um estado de conservação e uso.

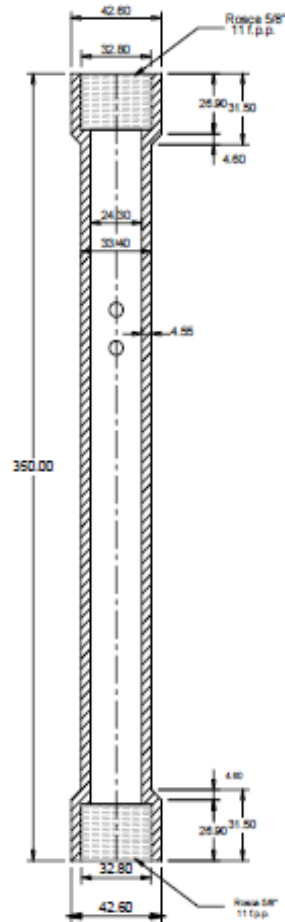


Figura 6 – Composição para cravação (Modificado de Lukiantchuki, 2012).

- Amostrador padrão tipo Raymond é composto pelas seguintes partes verificadas na Figura 7:
 - *Corpo*: constituído por um tubo de aço perfeitamente retilíneo podendo ou não ser bipartido longitudinalmente, com dimensões nominais padronizadas. O amostrador deve ter um comprimento de 609,6 mm, diâmetro interno de $34,9 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ e diâmetro externo de $50,8 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$.
 - *Cabeça*: deve ter dois orifícios laterais para saída de água e do ar, bem como devendo conter interiormente uma válvula constituída por esfera de aço recoberta de material inoxidável.
 - *Sapata ou bico*: Deve ser de aço temperado para resistir aos esforços ao qual é submetido, não deve apresentar trincas, rebordos, dentições, amassamentos ou algum tipo de deformação que altere sua seção nominal.

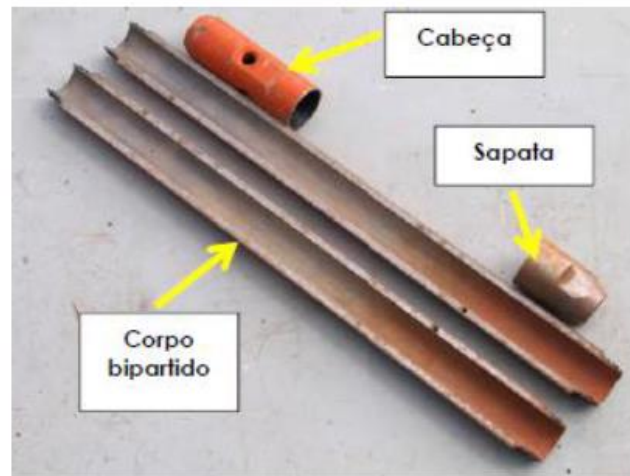


Figura 7 – Amostrador do tipo Raymond bipartido (Lukiantchuki, 2012).

Quanto ao processo executivo, a sondagem SPT é executada em três etapas que se repetem a cada metro de profundidade na seguinte sequência: perfuração, ensaio de penetração e amostragem.

De acordo com a NBR 6484/2001, a perfuração se inicia com a utilização de trado concha até o primeiro metro de profundidade e com trado helicoidal para as profundidades seguintes até o nível d'água. A partir desse ponto deve-se utilizar a perfuração com o auxílio de um trépano e com circulação d'água.

A norma brasileira estabelece que, durante o processo de perfuração, devem ser anotadas as profundidades das transições de camadas detectadas por exame táctil-visual e da mudança de coloração dos materiais trazidos à boca do furo pelo trado helicoidal ou pela água de lavagem. Deve-se classificar as diferentes camadas de solo quanto ao seu tipo, consistência ou compactidade, cor, origem e presença de materiais diversos na amostra.

A NBR 6484/2001 determina que a etapa de penetração, a partir da qual se determina o índice à penetração do solo N_{SPT} , consiste na cravação do amostrador no solo, a partir da aplicação de golpes sucessivos através do martelo de 65 kg caindo em queda livre de uma altura de 75 cm. Os golpes são aplicados de forma sucessiva até que se crave 45 cm do amostrador no solo. O índice N_{SPT} corresponde ao número de golpes necessários à cravação dos últimos 30 cm do amostrador. A norma apresenta correlação entre o valor do N_{SPT} e a classificação do material quanto sua compactidade e/ou consistência do solo, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Classificação dos solos (NBR 6484, 2001)

Solo	Índice de resistência à penetração N	Designação ¹⁾
Areias e siltes arenosos	≤ 4	Fofa(o)
	5 a 8	Pouco compacta(o)
	9 a 18	Medianamente compacta(o)
	19 a 40	Compacta(o)
	> 40	Muito compacta(o)
Argilas e siltes argilosos	≤ 2	Muito mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Média(o)
	11 a 19	Rija(o)
	> 19	Dura (o)

Na etapa de amostragem o amostrador é retirado e aberto para a identificação e classificação do tipo de solo contido no seu interior, bem como a medição do comprimento da amostra, conforme estabelece a ASTM D1586-67. Nesta etapa são determinadas as camadas de solo ao longo do perfil do terreno. A NBR 6484/2001 apresenta os cuidados na amostragem, em diferentes profundidades.

A NBR 6484/2001 estabelece que o ensaio deva ser finalizado quando da ocorrência de pelo menos um dos critérios de paralização:

- a) Quando, em 3 m sucessivos, forem necessários 30 golpes para a penetração dos 15 cm iniciais do amostrador padrão.
- b) Quando, em 4 m sucessivos, forem necessários 50 golpes para penetração dos 30 cm iniciais do amostrador padrão.
- c) Quando, em 5 m sucessivos, forem necessários 50 golpes para a penetração dos 45 cm do amostrador padrão.

A norma estabelece os dados que devem constar dos relatórios de sondagem e do relatório final, assim como alguns cuidados na apresentação dos resultados.

Atualmente, especialmente pelo avanço nas medições e interpretações quanto à energia envolvida no ensaio SPT, verifica-se que existem esforços no sentido de tornar o ensaio mais acurado e padronizado em termos de equipamento e resultados, e adaptando-o para a obtenção de outros parâmetros do solo.

1.1.4 Eficiência do Ensaio

Uma maneira para se padronizar o significado do índice de resistência à penetração do ensaio SPT (N_{SPT}) foi possível através de sua correção com base na relação entre energia efetivamente transferida durante o ensaio e uma energia de referência.

Foi estabelecido pelo ISSMFE (1989) que a energia de referência internacional seria de 60% da energia potencial teórica $E^* = 474$ J, considerando o padrão internacional do ensaio, com altura de queda de 76 cm e peso do martelo de 63,5 kgf.

Para o caso de ensaio SPT no Brasil, considerando a altura de queda de 75 cm e a massa do martelo de 65 kgf, a energia potencial teórica E^* é de 478,2 J, isto é, aproximadamente 1% superior ao padrão internacional.

Os valores de N_{SPT} podem ser corrigidos para um valor de N_{60} , conforme a equação a seguir:

$$N_{60} = N_{SPT} \frac{E}{E_{60}} \quad (1)$$

Da mesma forma o valor de N_{60} também pode ser obtido se conhecida a eficiência (η) do sistema SPT utilizado, conforme equação a seguir.

$$N_{60} = N_{SPT} \frac{\eta(\%)}{60\%} \quad (2)$$

Nesse sentido, desde a década de 70 diversos estudos tem se dedicado a analisar e medir a eficiência do ensaio (η), isto é, a parcela da energia potencial teórica (E^*) efetivamente transferida ao ensaio, tendo-se verificado desde então grande variabilidade nos valores de eficiência (η), conforme, por exemplo, trabalhos desenvolvidos por Palacios (1977), Schmertmann (1978), Schmertmann e Palacios (1979), Robertson et al. (1983), Décourt (1989), Abou-Matar e Goble (1997), Belincanta (1998), Cavalcante (2002), Odebrecht (2003), entre outros.

A eficiência do ensaio SPT (η) era obtida principalmente pela relação entre a energia transferida ao topo da composição de hastes (E_h) no primeiro golpe do martelo

e a energia potencial teórica (E^*). No caso do ensaio utilizando-se o sistema SPT brasileiro, tem-se que:

$$\eta = \frac{E_h}{E^*} \times 100\% = \frac{E_h}{478,2} \times 100\% \quad (3)$$

De acordo com Schnaid e Odebrecht (2012) é comum o uso de sistemas manuais para a liberação de queda do martelo, cuja energia aplicada (E_h) varia entre 70% e 80% da energia teórica (E^*), defendendo que o valor de eficiência (η) seja de 72% para o SPT brasileiro, conforme valor apresentado por Décourt (1989), *apud* Belincanta (2004).

Cumprir destacar que Cavalcante (2002) encontrou um valor médio de eficiência da ordem de 82% para o sistema SPT brasileiro, em pesquisa envolvendo sondagens nos estados do Rio de Janeiro e Paraíba.

No entanto, Aoki e Cintra (2000) propõem que a eficiência no ensaio SPT (η) deva ser calculada com base na relação entre a energia que é efetivamente entregue ao amostrador, T_A (obtida numa seção logo acima do amostrador) e a energia teórica do ensaio SPT (E^*).

$$\eta^* = \frac{T_A}{478,2} \times 100\% = \frac{E_{amostrador}}{478,2} \times 100\% \quad (4)$$

Os referidos autores apresentaram resultados teóricos de eficiência referentes a topo do amostrador (η^*). Tais resultados, variam aproximadamente entre 62% a 72% e, conforme verificado na Figura 8, são distintos dos resultados teóricos de Schmertmann e Palácios (1979), os quais indicam que em hastes menores a eficiência (η^*) do ensaio SPT tende a zero.

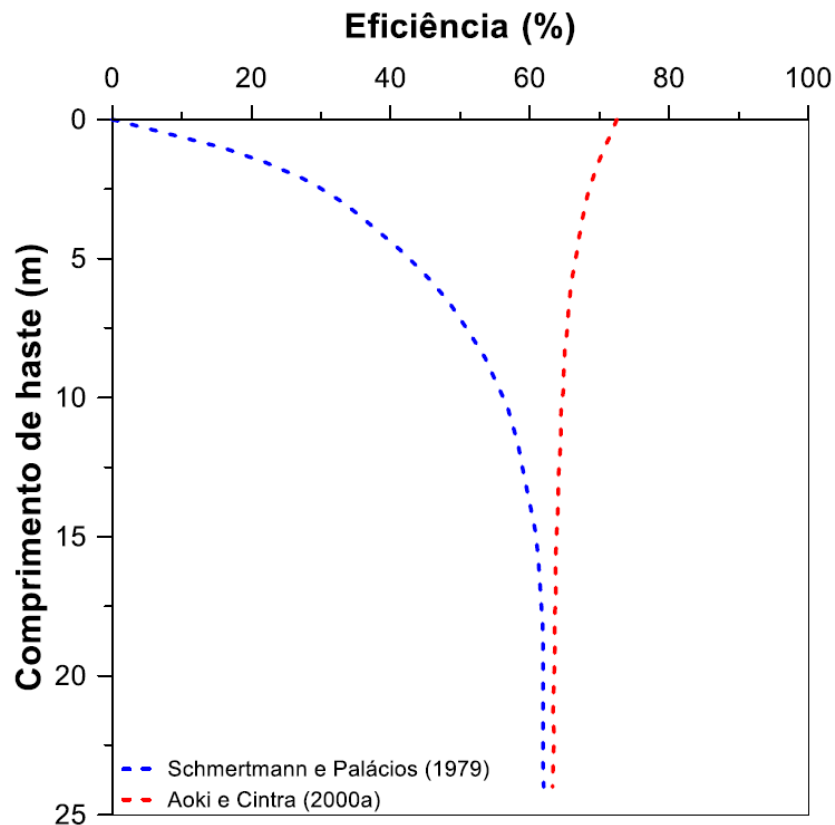


Figura 8 – Resultados teóricos de eficiência versus comprimento de haste (adaptado de Aoki e Cintra 2000a).

É importante esclarecer que Schmertmann e Palácios (1979) não consideraram a contribuição dos impactos subsequentes na cravação do amostrador no solo (propagação e reflexão das ondas longitudinais de tensão), destacado também por Cavalcante (2002).

Lukiantchuki (2012) através de resultados experimentais obtidos em sua pesquisa verificou que a eficiência média no topo do amostrador era de 57%, tendo verificado ainda que não ocorria grandes variações da eficiência em função do comprimento das hastes. Moraes (2014), por sua vez, concluiu que a eficiência medida próximo ao amostrador SPT apresentou valores médios de 62%.

1.2 Ensaio CPT

Neste item será apresentada uma revisão histórica do ensaio *Cone Penetration Test* (CPT), tratando-se de sua evolução histórica e detalhamento do procedimento executivo, além de apresentar as principais formas de interpretação desenvolvidas para os resultados obtidos com esse ensaio.

1.2.1 Histórico

De acordo com os relatos históricos, em especial Danziger (1990), os primeiros estudos relativos à ensaios de penetração estáticas remontam à década de 30, tendo sido realizados inicialmente por Terzaghi (1930) e em seguida por especialistas holandeses do Laboratório de Mecânica dos Solos de Delf (Barentsen, 1936, Laboratory of Soil Mechanics, Delft, 1936, Boonstra, 1936).

O ensaio, conforme descrito por Danziger e Schnaid (2000) consistia na medida da força necessária à cravação, a uma velocidade constante (1 cm/s) de hastes, cuja extremidade continha um cone de 10 cm² de área e ângulo de 60°. A resistência de ponta q_c era obtida através da divisão direta da força medida pela área da base do cone.

Em alguns equipamentos também eram obtidas as medidas de força necessária para a cravação de todo o conjunto, isto é, do cone e do revestimento. A diferença entre as duas medidas citadas fornecia uma estimativa do atrito lateral ao longo do revestimento, que ao ser dividido pela área lateral deste, fornecia o valor médio da resistência por atrito unitário f_s .

Sobre a obtenção do valor do atrito lateral, conforme anteriormente descrito, Begemann (1963) afirmava se tratar de uma medida não precisa, pois seria impossível através de um valor médio total, conhecer adequadamente as características das camadas individuais. O referido autor defendia a medição do atrito num tubo curto, o mais próximo da ponta possível, a fim de se obter uma melhor indicação do atrito de cada camada. Por tal razão, desenvolveu-se equipamento composto por uma luva de

atrito de 150 cm² de área lateral instalada atrás do cone, denominado “*friction jacket cone*”, e conhecido no Brasil como cone de Begemann.

Para este equipamento o processo de cravação conforme descrito por Danziger e Schnaid (2000) consistia na cravação inicial de 4 cm apenas do cone, e em seguida na cravação de mais 4 cm do conjunto cone e luva de atrito, realizando, em ambos os avanços as medidas de resistência. O processo repetia-se com o reposicionamento do equipamento após a descida de 20 cm do revestimento, 16 cm da luva de atrito e 12 cm da ponta. Tal processo permitiu a melhor visualização do atrito lateral local em cada profundidade.

No contexto brasileiro o ensaio começou a ser empregado por volta de 1950, especialmente em projetos de plataformas marítimas para prospecção de petróleo. Danziger e Schnaid (2000) relatam que diversas empresas começaram a realizar o ensaio de cone holandês trazido pela Companhia Estacas Franki, motivando estudos e métodos para a estimativa de capacidades de carga de estacas, tais como, Aoki e Velloso (1975), Décourt e Quaresma (1978) e Velloso (1981).

Danziger e Schnaid (2000) destacam que diversas correlações entre os resultados de SPT e CPT ainda utilizadas no Brasil se utilizam de medidas obtidas a partir de cone mecânico.

No entanto, há relatos que desde 1950 diversos cones elétricos já haviam sido desenvolvidos e utilizados, sendo relatado por De Ruiter (1971) que o primeiro modelo de cone elétrico era composto por sistema de corda vibrante e foi desenvolvido pelo alemão Maihak, durante a II Guerra Mundial.

Schaap e Zuidberg (1982) destacam que este equipamento foi padronizado na Europa através da ISSMFE (1977) de forma similar ao padronizado nos Estados Unidos pela ASTM D 3441 (1986), conforme Figura 9. Posteriormente, as dimensões permaneceram na referência internacional ISSMFE (1989).

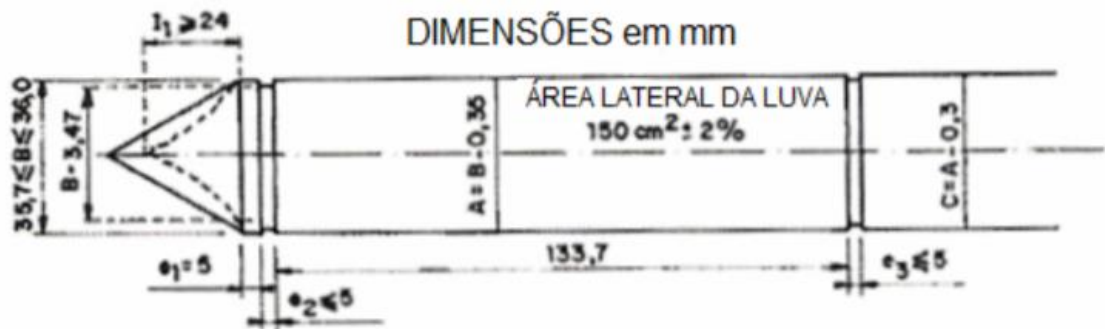


Figura 9 – Dimensões padronizadas pelo ISSMFR (1977), Schaap e Zuidberg (1982).

A grande vantagem do modelo do cone elétrico, conforme destacado por Broms e Flodin (1988), refere-se à possibilidade do registro contínuo da resistência à penetração com a profundidade, além disso, por ser mais sensível que o modelo mecânico, torna-se possível a utilização em areias muito fofas e argilas moles. Broms e Flodin (1988), ressaltam que as desvantagens estão relacionadas ao seu alto custo e sua fragilidade quando comparado ao modelo mecânico, podendo ser danificadas facilmente na presença de pedregulhos no solo.

Quanto ao seu funcionamento, Danziger e Schnaid (2000) apresentam o esquema interno convencional do cone elétrico, capaz de medir os valores de q_c e f_s , possuindo célula de carga para medição da carga de ponta funcionando à compressão e outra para medição do atrito lateral trabalhando à tração.

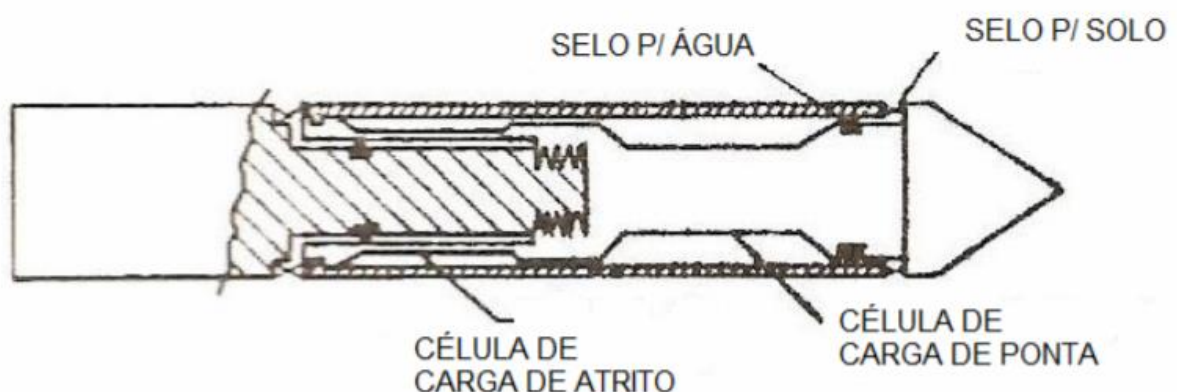


Figura 10 – Esquema de cone elétrico de atrito convencional, Schaap e Zuidberg (1982), segundo Danziger e Schnaid (2000).

Um grande avanço para o ensaio de cone elétrico ocorreu no final da década de 70 quando se passou a incorporar ao sistema existente transdutores de poropressão, que associados à elementos porosos, permitiram a leitura da poropressão durante a penetração do cone. Para o cone elétrico com medida de poropressão, conforme acima descrito, foi dado o nome de piezocone, sendo a sigla CPTU.

Atualmente, após significativos avanços na área da eletrônica, os cones fabricados são capazes de medir diversas grandezas além das resistências de ponta, atrito lateral e poropressão. Robertson *et al.* (1986) citam equipamentos capazes de medir a inclinação, variação de temperatura, resistividade/condutividade, pH etc.

Nesse sentido, Lunne *et al.* (1997) apresentam o potencial de obtenção de informações do ensaio CPTU quando comparado com outros ensaios de campo, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Potencialidade do CPTU para investigações geotécnicas (Lunne *et al.*, 1997).

Group	Device	Soil Parameters													Ground Type						
		Soil type	Profile	u	ϕ'	s_u	I_D	m_v	c_v	k	G_s	σ_h	OCR	σ - ϵ	Hard rock	Soft rock	Gravel	Sand	Silt	Clay	Peat
Penetrometers	Dynamic	C	B	-	C	C	-	-	-	C	-	C	-	-	C	B	A	B	B	B	B
	Mechanical	B	A/B	-	C	C	B	C	-	C	C	C	-	-	C	C	A	A	A	A	A
	Electric (CPT)	B	A	-	C	B	A/B	C	-	B	B/C	B	-	-	C	C	A	A	A	A	A
	Piezocone (CPTU)	A	A	A	B	B	A/B	B	A/B	B	B	B/C	B	C	-	C	-	A	A	A	A
	Seismic (SCPT/SCPTU)	A	A	A	B	A/B	A/B	B	A/B	B	A	B	B	B	-	C	-	A	A	A	A
	Flat dilatometer (DMT)	B	A	C	B	B	C	B	-	B	B	B	C	C	C	C	-	A	A	A	A
	Standard penetration test (SPT)	A	B	-	C	C	B	-	-	C	-	C	-	-	C	-	B	A	A	A	A
	Resistivity probe	B	B	-	B	C	A	C	-	-	-	-	-	-	C	-	A	A	A	A	A
	Pressurimeters	Pre-bored (PBP)	B	B	-	C	B	C	B	C	-	B	C	C	C	A	A	B	B	B	A
Self-boring (SBP)		B	B	A ¹	B	B	B	B	A ¹	B	A ²	A/B	B	A/B ²	-	B	-	B	B	A	B
Full displacement (FDP)		B	B	-	C	B	C	C	C	-	A ²	C	C	C	-	C	-	B	B	A	A
Others	Vane	B	C	-	-	A	-	-	-	-	-	B/C	B	-	-	-	-	-	-	A	B
	Plate load	C	-	-	C	B	B	B	C	C	A	C	B	B	B	A	B	B	A	A	A
	Screw plate	C	C	-	C	B	B	B	C	C	A	C	B	-	-	-	-	A	A	A	A
	Borehole permeability	C	-	A	-	-	-	-	B	A	-	-	-	-	A	A	A	A	A	A	B
	Hydraulic fracture	-	-	B	-	-	-	-	C	C	-	B	-	-	B	B	-	-	C	A	C
	Crosshole/downhole/surface seismic	C	C	-	-	-	-	-	-	-	A	-	B	-	A	A	A	A	A	A	A

Applicability: A = high; B = moderate; C = low; - = none.

¹ ϕ' = Will depend on soil type; ² = Only when displacement sensor fitted.

Soil parameter definitions: u = *in situ* static pore pressure; ϕ' = effective internal friction angle; s_u = undrained shear strength; m_v = constrained modulus; c_v = coefficient of consolidation; k = coefficient of permeability; G_s = shear modulus at small strains; σ_h = horizontal stress; OCR = overconsolidation ratio; σ - ϵ = stress-strain relationship; I_D = density index.

Os valores medidos são contínuos e automatizados ao longo da penetração, possibilitando grande sensibilidade para detecção das camadas, até mesmo muito finas, vantagem que os outros métodos dificilmente proporcionam.

Danziger e Schnaid (2000) confirmam que o ensaio de piezocone representa uma das mais importantes ferramentas para a determinação da estratigrafia do subsolo, razão pela que a técnica é consagrada e reconhecida internacionalmente.

1.2.2 Procedimento Executivo

Até o ano de 2015 os procedimentos do ensaio e as características do sistema eram normalizados no Brasil pela NBR 12069. Contudo, esta norma foi cancelada por não se adequar aos recentes equipamentos que contam cada vez mais com recursos computacionais. Normas estrangeiras passaram a ser utilizadas como referência para o ensaio, como, por exemplo, a Norma americana ASTM D-3441, *Standard test method for deep quasi-static, cone and friction-cone penetration tests of soils*. (Naresi, 2018)

Conforme descrito por Danziger (1990), o equipamento para a realização do ensaio CPTU constitui-se basicamente de três componentes, quais sejam: o piezocone, o sistema de cravação e o sistema de aquisição de dados.

O ensaio de cone consiste na cravação no terreno de uma ponteira cônica de aço de 60° de vértice, com seção transversal de 10 cm² e de luva de 150 cm² de área, conforme Figura 11 e Figura 12, A velocidade de penetração é constante no valor de 20 mm/s (considerada como velocidade lenta).



Figura 11 – Equipamento CPTU.

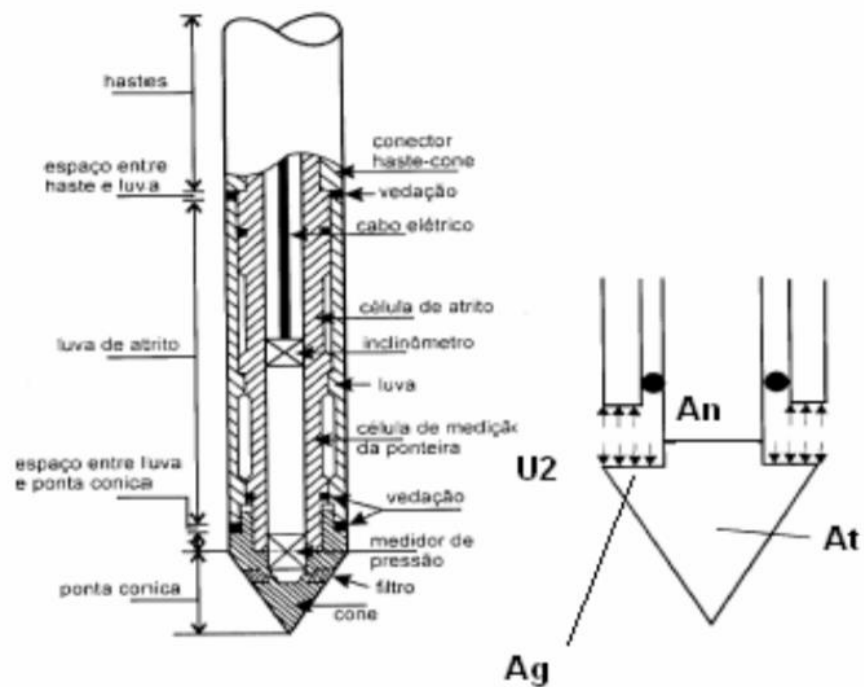


Figura 12 – Corte esquemático típico de um piezocone (Lunne *et al.*, 1986).

Uma questão que gera discussão em relação ao piezocone é o posicionamento do elemento poroso. Danziger e Schnaid (2000) confirmam a falta de consenso em relação ao tema e esclarecem que a escolha da posição dependerá da aplicação dada às poropressões registradas no ensaio. A recomendação da ISSMFE (1989) é de que, preferencialmente deva-se prever o elemento poroso na posição u_2 da Figura 13.

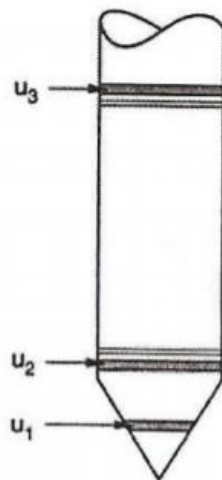


Figura 13 – Principais posições do elemento poroso, Danziger e Schnaid (2000).

O equipamento de cravação consiste em uma estrutura de reação sobre a qual monta-se um sistema de cravação, sendo um sistema hidráulico que funciona através de motor de combustão ou elétrico (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). O controle da velocidade do ensaio é realizado através de válvula reguladora de vazão. O conjunto pode ser montado diretamente sobre um caminhão, de modo que o peso próprio do veículo atue como reação para os esforços do ensaio, ou no caso destes esforços serem superiores, utiliza-se de hélice de ancoragem manual para fixação do equipamento no solo.

As medidas de resistência a penetração de ponta (q_c), resistência por atrito lateral ou atrito local (f_s) e a poropressão (U) são realizadas a cada 2 cm conforme avanço da cravação das hastes no solo.

Tais medidas são obtidas através de instrumentação de precisão instalada na extremidade do conjunto, sendo transmitidas à superfície por sistema de ondas sonoras, que integrado à um computador permite a visualização simultânea dos resultados.

Cabe ressaltar que existem diversas correlações (Robertson (1990), Senneset *et al.* (1989) e etc.) que permitem converter tais medidas de parâmetros mecânicos em fatores que permitem determinar os perfis de solo. Isto é, estando tais correlações integradas ao sistema de leitura, é possível durante a realização do ensaio conhecer o perfil do subsolo investigado.

Importante destacar que, com o desenvolvimento do piezocone, foi constatada a existência de erros nos valores medidos pelo ensaio, especialmente em argilas moles, que durante a cravação geram poropressões da ordem dos valores da resistência de ponta. Surgiu, assim, a necessidade de estabelecer correção para os valores de q_c medidos, obtendo, então, o valor de resistência corrigido q_t , obtido na forma a seguir:

$$q_t = q_c + u_2(1 - a) \quad (5)$$

Sendo:

q_c = a resistência de ponta medida;

q_t = a resistência de ponta corrigida;

u_2 = Poropressão na base do cone;

α = Razão entre área da base da luva de atrito (A_n) e área da base do cone (A_t) da Figura 14.

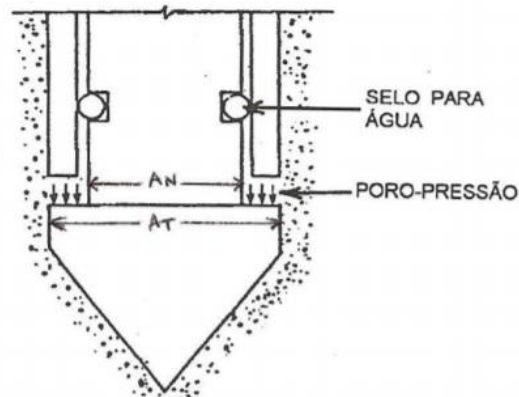


Figura 14 – Poropressão influenciando a medida da resistência de ponta, Danziger e Schnaid (2000).

Nesse sentido, Danziger e Schnaid (2000) destacam a importância da correção do valor de resistência de ponta em todos os ensaios onde há monitoramento de poropressão durante a cravação, especialmente em argila mole. Em relação à correção do atrito lateral, esta não é utilizada na prática da engenharia.

1.2.3 Interpretação do Ensaio

As interpretações dos resultados dos ensaios apresentam três finalidades distintas: estratigrafia e classificação dos solos, obtenção de parâmetros geotécnicos e aplicação direta a projetos de fundações (Danziger e Schnaid, 2000).

Begemann (1965) foi o primeiro autor a apresentar proposta de classificação dos solos a partir dos resultados de resistência de ponta (q_c) e atrito lateral (f_s), obtidos através do ensaio CPT. Foi proposto ábaco (Figura 15) a partir de ensaios de cone mecânico realizados na Holanda, razão pela qual recomenda-se a utilização do ábaco apenas nos casos de depósitos semelhantes aos holandeses.

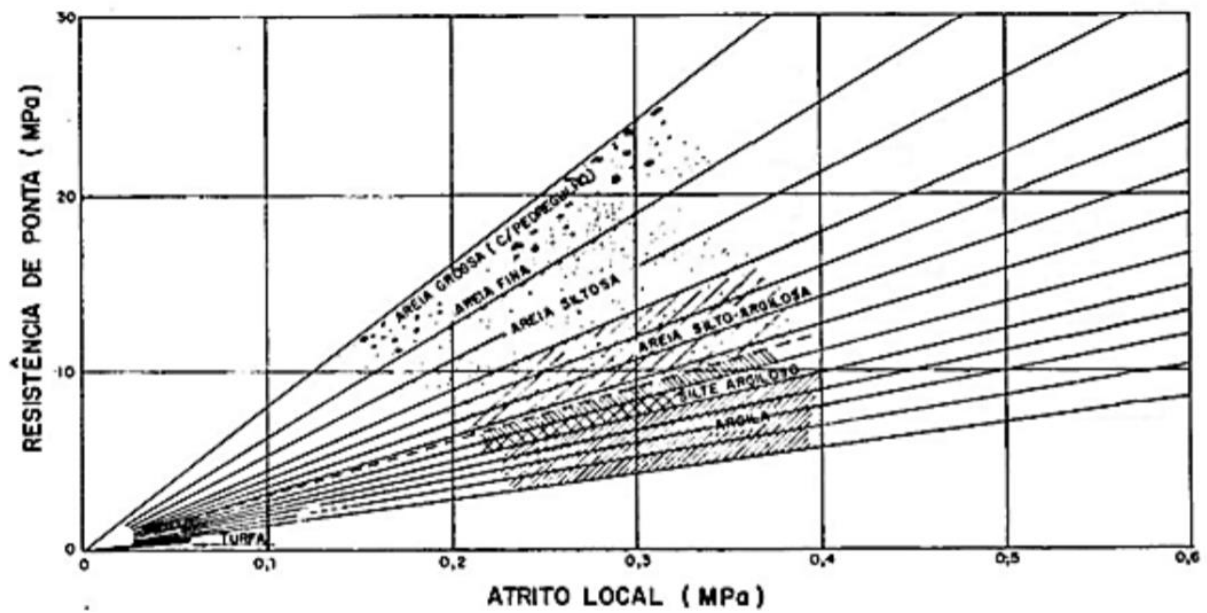


Figura 15 – Ábaco de Begemann (1965), conforme Danziger (1990)

O primeiro parâmetro derivado do ensaio CPT refere-se à razão de atrito (R_f), sendo bastante utilizado para a classificação dos solos em procedimentos gráficos. Schmertmann (1978) apresenta proposta gráfica (Figura 16) para classificação que relaciona diretamente a resistência de ponta (q_c) e a razão de atrito (R_f), sendo esta obtida da seguinte forma:

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \quad (6)$$

Sendo, =: R_f = Razão de atrito
 f_s = atrito lateral
 q_c = resistência de ponta



Figura 16 – Gráfico de perfilagem de Schmertmann, 1978.

Podem ser citadas ainda as propostas de classificação apresentadas por Sanglerat *et al.* (1974), Douglas e Olsen (1981) e Robertson e Campanella (1983). Vale destacar que Douglas e Olsen são referenciados como os primeiros a propor gráfico de classificação a partir de resultados de cones elétricos (Figura 17), além de terem confirmado as observações de especialistas holandeses de que os solos arenosos apresentam altos valores de resistência de ponta e baixos valores de razão de atrito, enquanto as argilas apresentam comportamento inverso.

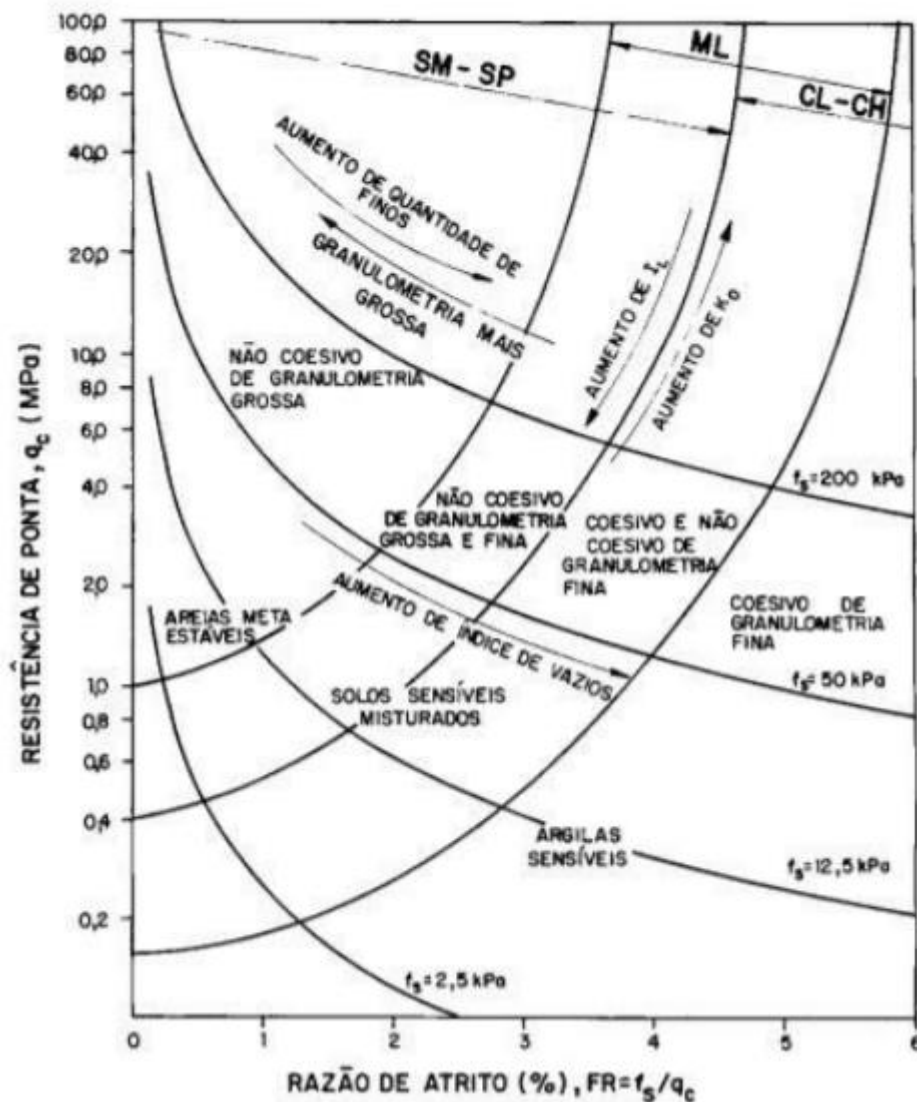


Figura 17 – Proposta de Douglas e Olsen (1981), conforme Danziger (1990).

Conforme apresentado por Fellenius e Eslami (2010), as propostas de classificação que correlacionam diretamente os valores de q_c e R_f podem causar distorções uma vez que os dois parâmetros são dependentes, estando diretamente relacionados.

Com o desenvolvimento do piezocone diversas outras classificações gráficas dos solos foram desenvolvidas principalmente para contemplar as informações de poropressão obtidas no ensaio.

Nesse contexto, Rocha Filho (1979) afirma que a correta interpretação da resistência de ponta deve levar em consideração a influência da poropressão medida

no ensaio, propondo para isso a adoção da resistência de ponta corrigida q_t , obtida conforme (5).

Passou a ser possível ainda a determinação da história de tensões através do parâmetro denominado parâmetro de poropressão B_q (Wroth, 1984), obtido conforme a seguir:

$$B_q = \frac{(U - U_o)}{(q_t - \sigma_v)} \quad (7)$$

Sendo: B_q = razão de poropressão;
 U = poropressão medida na base do cone;
 U_o = poropressão *in situ*;
 q_t = resistência de ponta corrigida;
 σ_v = tensão vertical total *in situ*.

A introdução do parâmetro de poropressão (B_q) possibilitou nova classificação gráfica dos solos sem interdependência entre este parâmetro e a resistência de ponta corrigida (q_t).

Robertson *et al.* (1986) e Campanella e Robertson (1986) foram os primeiros a propor graficamente a utilização do parâmetro de poropressão (B_q) para classificação de solos, conforme apresentado na Figura 18(b):

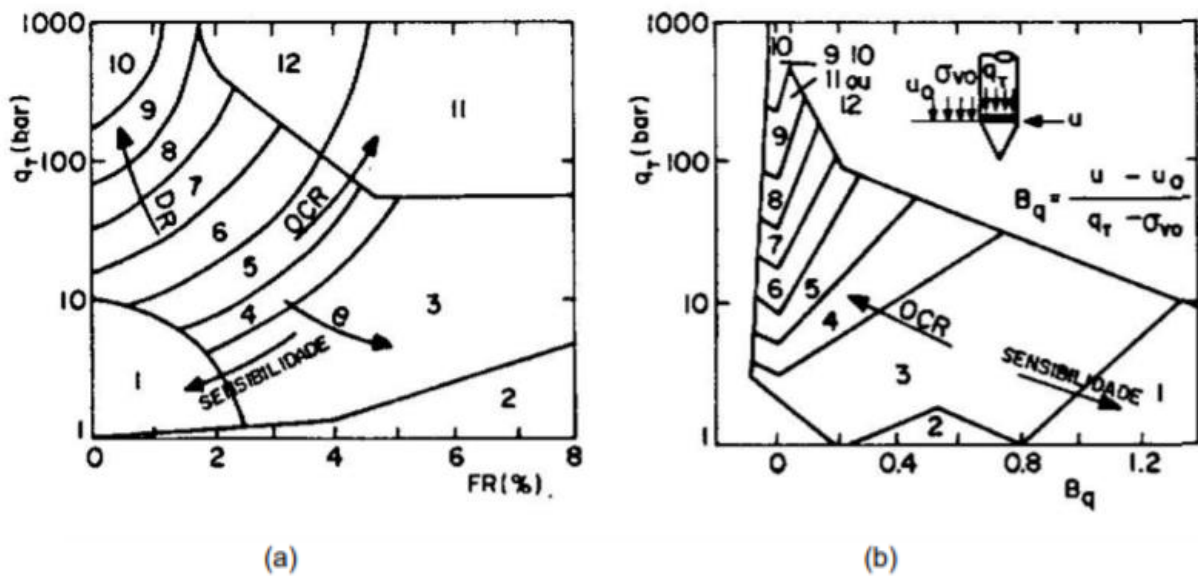


Figura 18 (a) e (b) – Diagrama de classificação de solos a partir do resultado de ensaio cone elétrico e piezocone (Robertson *et al.*, 1986).

Sendo o número de cada área correspondente à:

- 1 – Solo sensível – granulometria fina
- 2 – Solo Orgânico
- 3 - Argila
- 4 – Argila Siltosa a Argila
- 5 – Silte Argiloso a Argila siltosa
- 6 – Silte Arenoso
- 7 – Areia Siltosa a Silte Arenoso
- 8 – Areia a Areia Siltosa
- 9 – Areia
- 10 – Areia e Areia grossa
- 11 – Solo muito rijo – granulometria fina
- 12 – Areia cimentada ou pré-adensada a Areia Argilosa

Segundo a proposta de classificação de Robertson *et al.* (1986) deve-se utilizar de forma combinada os dois ábacos, utilizando no primeiro as medidas de resistência de ponta corrigida (q_t) e a Razão de atrito (R_f) e no segundo a resistência de ponta corrigida (q_t) e o parâmetro de poropressão (B_q). É possível, segundo o autor, obter

classificações diferentes de um mesmo solo em cada um dos gráficos, necessitando de uma análise mais adequada. A velocidade e a forma de dissipação do excesso de poropressão durante a pausa na cravação, por exemplo, podem auxiliar na classificação.

Senneset *et al.* (1989) também propõe gráfico de classificação de solos plotando-se a resistência de ponta corrigida (q_t) *versus* o parâmetro de poropressão (B_q), como mostrado na Figura 19 a seguir:

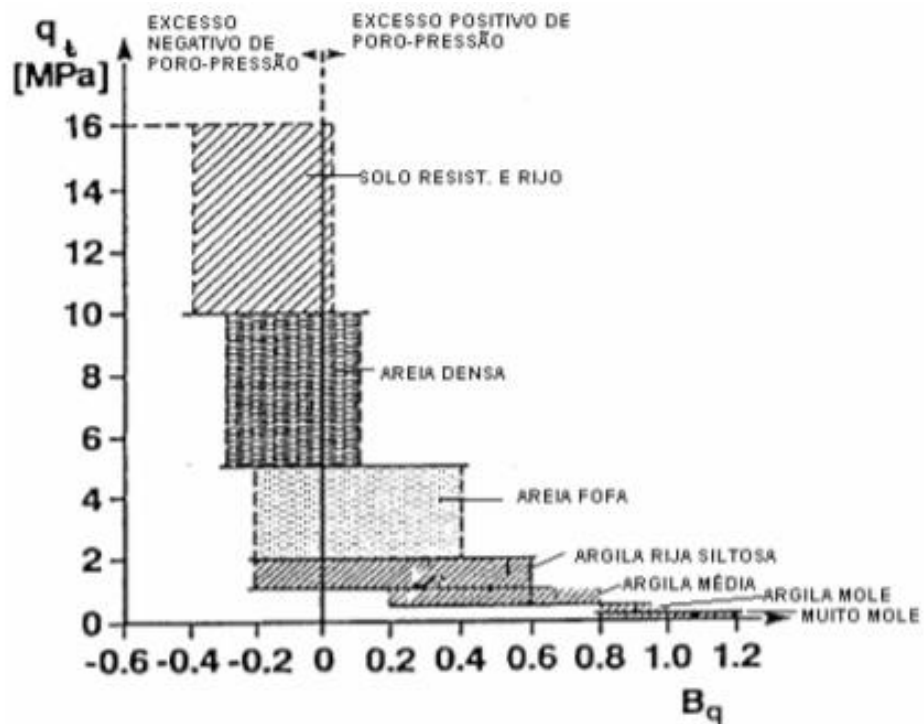


Figura 19 – Gráfico de perfilagem de Senneset *et al.* (1989).

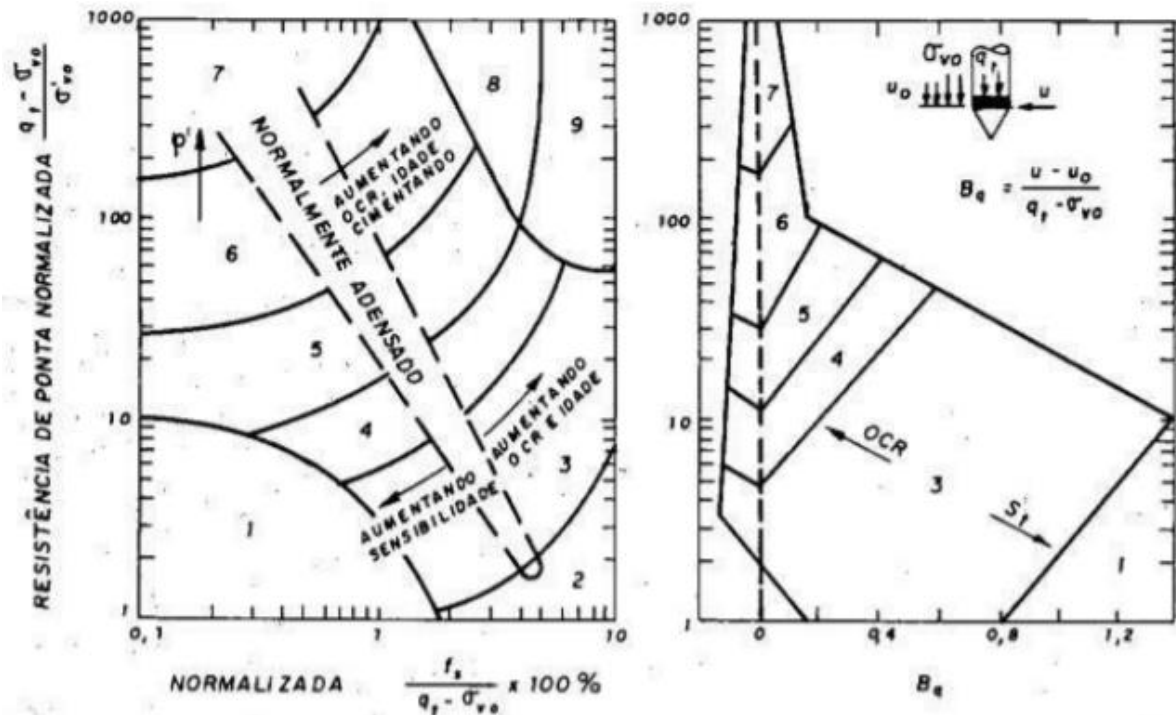
Wroth (1984,1988) propôs que os resultados dos ensaios de CPT deveriam ser normalizados seguindo os seguintes parâmetros:

$$Q_t = \frac{(q_t - \sigma_{vo})}{\sigma'_{vo}} \quad \text{Resistência de Ponta normalizada} \quad (8)$$

$$F_r = \frac{f_s}{(q_t - \sigma_{vo})} \quad \text{Razão de Atrito normalizada} \quad (9)$$

$$B_q = \frac{\Delta u}{(q_t - \sigma_{vo})} \quad \text{Parâmetro de poropressão} \quad (10)$$

Baseando-se em tais parâmetros normalizados e em dados de ensaios CPTU, Robertson (1990) sugere novos ábacos para classificação do tipo e comportamento do solo, conforme Figura 20 a seguir:



1. Solo fino sensível	6. Areia limpa e areia siltosa
2. Argila e Material orgânico	7. Areia e areia pedregulhosa
3. Argila e argila siltosa	8. Areia compacta e areia argilosa*
4. Silte argiloso e argila siltosa	9. Muito compacta; granulometria fina*
5. Areia siltosa e silte arenoso	

*pré-adensado ou cimentado

Figura 20 – Proposta de classificação dos solos, segundo Robertson (1990), adaptado de Bezerra (1996)

Para o gráfico que relaciona a resistência de ponta normalizada com o parâmetro de poro pressão, Robertson (1990) propôs a seguinte modificação (Figura 21) buscando incorporar valores de (B_q) mais negativos, além da inclusão da região 2 correspondente a solos orgânicos e turfas.

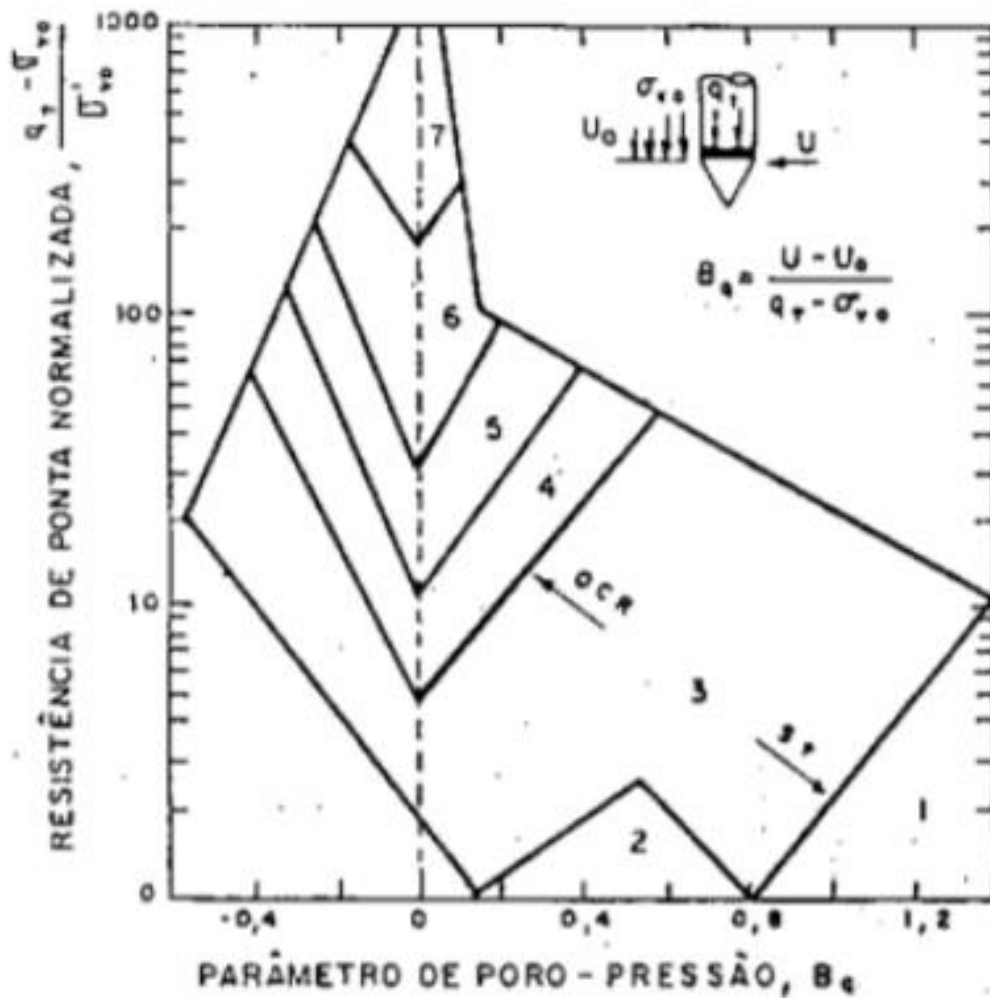


Figura 21 – Proposta de modificação do ábaco de tipo de comportamento do solo (Robertson, 1990), adaptado de Bezerra (1996) por Nejam, 2015.

No entanto, o método de Robertson (1986) possui a vantagem em relação à obtenção da classificação do solo em tempo real, durante a execução dos ensaios, já que não considera os parâmetros normalizados dependentes de dados obtidos após o ensaio, como, por exemplo, peso específico do solo e nível d'água.

Diversos são os ábacos de classificação para solos que utilizam medidas obtidas pelo CPT, destacando-se o resumo apresentado por Liao (2005), Tabela 7.

Tabela 7 – Ábacos de classificação dos solos da literatura (adaptado de Liao, 2005).

<i>(a) Baseados na resistência de ponta e atrito lateral</i>
Begemann (1965)
Sanglerat et alii (1974)
Schmertmann (1978)
Douglas e Olsen (1981)
Vos (1982)
Robertson e Campanella (1983)
Erwing (1988)
Olsen e Malone (1988)
Olsen e Mitchell (1995)
Zhang e Tumay (1999)
Eslami e Fellenius (1997)
<i>(b) Baseados na resistência de ponta e poropressão</i>
Jones et alii (1981)
Jones e Rust (1982)
Senneset e Janbu (1985)
Parez e Fauriel (1988)
Senneset et alii (1989)
Chang-hou et alii (1990)
Jian et alii (1992)
Schneider et alii (2008)
<i>(c) Baseados na resistência de ponta, atrito lateral e poropressão</i>
Robertson et alii (1986)
Robertson (1990, 1991)
Larsson e Mulabdic (1991)
Jefferies e Davies (1991, 1993)
Ramsey (2002)

1.3 Estática do SPT

O conhecimento aprofundado sobre a estática do SPT tem sido considerado uma importante forma para se estabelecer comparações teóricas adequadas entre os valores obtidos a partir do ensaio SPT e os resultados obtidos por meio de outros ensaios, como por exemplo, o ensaio CPT.

Diversos estudos foram desenvolvidos no sentido de conhecer a resistência estática durante a cravação do amostrador SPT no solo, destacando que De Mello (1971) já buscava estabelecer equações que pudessem descrever a resistência à penetração estática em função do N_{SPT} .

De Mello (1971) apresentou conclusões relevantes para pesquisas subsequentes, destacando aspectos que exercem influência na obtenção do N_{SPT} , como, a tensão efetiva, a cimentação entre as partículas e o sobre adensamento do solo.

Dos trabalhos desenvolvidos para o conhecimento da resistência estática, serão abordados na presente dissertação os trabalhos desenvolvidos por Schmertmann (1979) e Aoki et al. (2007), que apresentam métodos para estimativa da resistência estática com base em dados obtidos a partir do ensaio SPT.

1.3.1 A Proposta de Schmertmann (1979)

No estudo desenvolvido por Schmertmann (1979) é apresentada uma análise estática da cravação do amostrador SPT no solo, comparando-se a resistência atuante durante a penetração lenta do amostrador SPT com a resistência à penetração obtida com a cravação do cone CPT.

Como apresentado na Figura 22, Schmertmann (1979) apresenta o equilíbrio das forças envolvidas na penetração do amostrador SPT e do cone no solo.

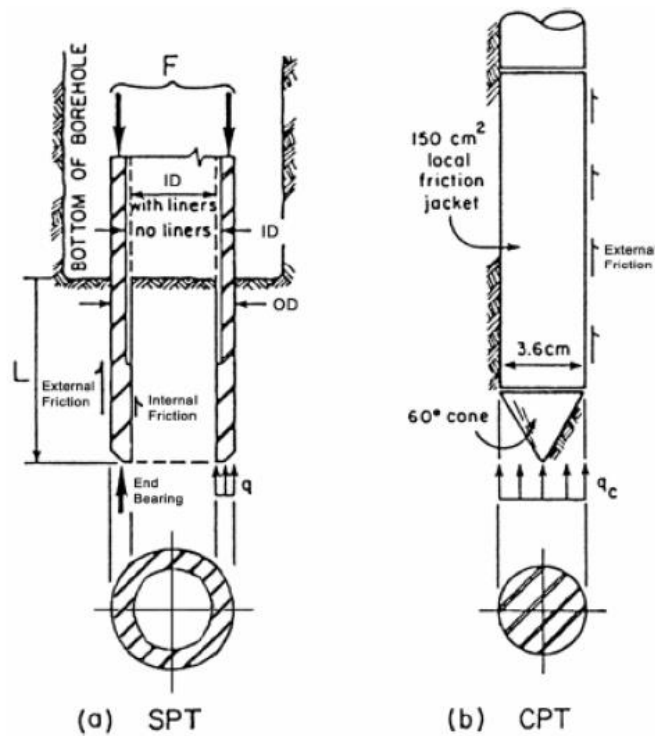


Figura 22 – Comparação entre as componentes da resistência à penetração do SPT e CPT (Schmertmann, 1979).

A partir do equilíbrio na direção vertical, verifica-se que para o caso do amostrador SPT, a força externa (F) somada ao peso submerso das hastes e amostrador (W') é igual à resistência de ponta (F_e) acrescida das resistências por atrito lateral externo (F_o) e interno (F_i), conforme expresso na equação a seguir:

$$F + W' = F_e + F_o + F_i \quad (11)$$

Ao considerar que a resistência média de ponta por unidade de área vale q , que o atrito médio por unidade de área nas paredes internas e externas do amostrador vale f e que a penetração do amostrador vale L , têm-se que:

$$F + W' = q \times A + \pi \times L \times f \times (d_{ext} + d_{int}) \quad (12)$$

Sendo:

A = Área de ponta do amostrador SPT (superfície anelar)

d_{ext} = Diâmetro externo do amostrador;

d_{int} = Diâmetro interno do amostrador;

O desenvolvimento da equação acima apresentada considera que a parcela de atrito interno e externo ocorra em todo o comprimento de penetração do amostrador ($L = 30$ cm), isto é, assume-se que a amostra de solo penetra no interior do amostrador inteiramente, não ocorrendo o embuchamento do solo. De fato, Schmertmann (1979), considera que a penetração ocorra com o amostrador não embuchado.

Nesse ponto é importante esclarecer que o fenômeno do embuchamento no ensaio SPT ocorre quando a resistência resultante do atrito lateral no interior do amostrador excede a força atuante na ponta da amostra, fazendo com que a amostra se desloque junto com o amostrador durante sua cravação, isto é, a penetração de solo no interior do amostrador será inferior à penetração do amostrador.

Schmertmann (1979) assumiu que a resistência de ponta q é igual ao resultado da multiplicação da resistência de ponta (q_c), obtida no CPT, por uma constante, denominada de C_1 . Da mesma forma, Schmertmann (1979) estabelece que o atrito f é igual ao atrito lateral do cone (f_c) multiplicado por uma constante C_2 . Tem-se, portanto, as seguintes equações:

$$q = C_1 \times q_c \quad (13)$$

$$f = C_2 \times f_c \quad (14)$$

$$F + W' = [C_1 \times A + \pi \times L \times C_2 \times R_f(d_{ext} + d_{int})] \times q_c \quad (15)$$

Sendo R_f a razão entre f_c e q_c , denominada de razão de atrito.

A partir da medida da força necessária à penetração estática do SPT (F), exibida na Figura 23, Schmertmann (1979) estimou a resistência de ponta q e a compara ao valor médio q_c dos ensaios CPT próximos, obtendo uma relação média entre elas de aproximadamente 1, independentemente do tipo do solo. Por tal razão recomendou a adoção de $C_1 = 1,0$, para cones mecânicos e elétricos.

A estimativa de q foi possível pois os resultados do ensaio de penetração estática mostram um aumento aproximadamente linear de F com a penetração L , como ilustra a Figura 23. Dessa forma é possível a extrapolação do ajuste linear dos pontos até a origem, isto é, para L igual a zero, que somado a W' deve igualar à

resistência total na ponta do amostrador F_e , permitindo assim, a determinação da resistência de ponta q .

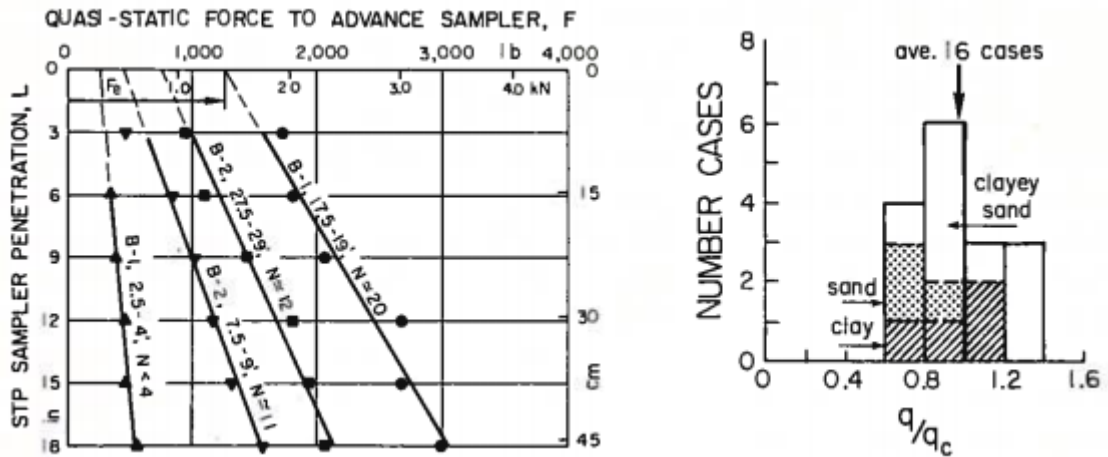


Figura 23 – Comparação da resistência de ponta do amostrador SPT com a resistência de ponta do cone de Begemann, Schmertmann (1979).

Em relação a C_2 Schmertmann (1979), analisando o mesmo banco de dados, sugere adotar $C_2 = 0,7$ para os cones mecânicos e $C_2 = 1,0$ para os elétricos.

A energia necessária para a penetração do amostrador, além da energia potencial relativa ao peso das hastes, é igual ao produto do incremento de penetração do amostrador no solo ΔL pela força estática média F_m . Considerando que, conforme

(12) indica, F varia linearmente com L , pode-se obter a força média F_m quando L é igual ao valor médio no intervalo ΔL .

Designando por ΔN o incremento do número de golpes do SPT no intervalo de penetração ΔL , e, considerando que ΔN depende linearmente do aumento de energia necessária para a penetração quase-estática no mesmo intervalo, obtêm-se a equação a seguir.

$$\Delta N \cong F_m \times \Delta L \quad (16)$$

Considerando que nos 45 cm de penetração do amostrador SPT, o ΔN é medido a cada 15 cm de penetração, o valor de ΔL deverá ser 7,5 cm, 22,5 cm e 37,5 cm, respectivamente. Assumindo-se que q_c permanece constante para os três incrementos de penetração ΔL de 15 cm, Schmertmann (1979) apresenta a razão entre cada ΔN em relação ao ΔN do intervalo final, conforme equações a seguir:

$$X_1 = \frac{\Delta N_{15_{iniciais}}}{\Delta N_{15_{finais}}} = \frac{[10,7C_1 + 2,052C_2R_f(\%)]q_c - W'}{[10,7C_1 + 10,26C_2R_f(\%)]q_c - W'} \quad (17)$$

$$X_2 = \frac{\Delta N_{15_{intermediário}}}{\Delta N_{15_{finais}}} = \frac{[10,7C_1 + 6,156C_2R_f(\%)]q_c - W'}{[10,7C_1 + 10,26C_2R_f(\%)]q_c - W'} \quad (18)$$

$$X_3 = \frac{\Delta N_{15_{final}}}{\Delta N_{15_{finais}}} = 1 \quad (19)$$

Nas equações acima apresentadas, foi considerada a área anelar da sapata do amostrador $A = 10,7 \text{ cm}^2$, $d_{int} = 3,5 \text{ cm}$, $d_{ext} = 5,1 \text{ cm}$, e que q_c tem unidade em kgf/cm^2 e W' em kgf .

Schmertmann (1979) mostrou que os valores de X_1 e X_2 determinados pelas equações acima se ajustam aos valores observados em resultados de ensaios por ele conduzidos. Além disso, observou que a partir da razão dos valores medidos de ΔN para cada 15 cm de penetração, isto é, dos valores de X_i obtidos, é possível conhecer a parcela de resistência de ponta e de atrito lateral.

O autor realizou previsões dos valores de X_1 e X_2 , para valores variáveis de R_f , considerando a premissa de C_1 e C_2 iguais à unidade e W' igual a zero. Com os valores de X_i , são conhecidas as parcelas de ponta e atrito, vide Figura 24.

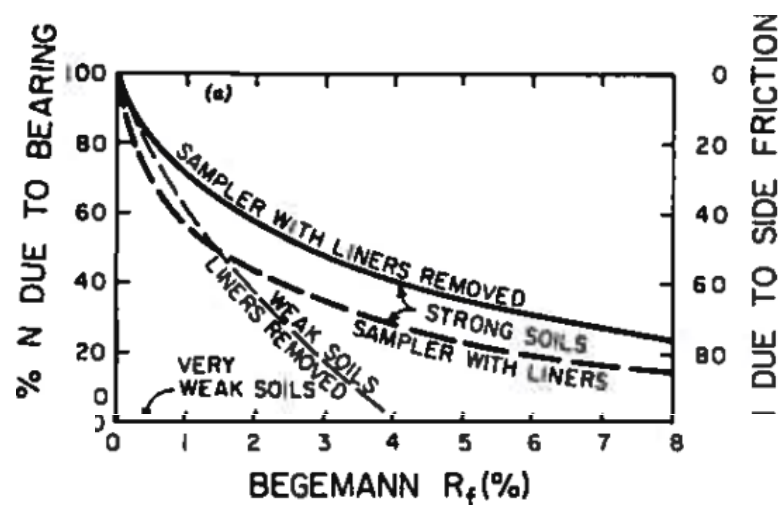


Figura 24 – Valores relativos das componentes quase-estáticas da penetração do amostrador, adaptado de Schmertmann (1979).

Destaque deve ser dado para Souza (2009) por ter desenvolvido adaptação das curvas das parcelas de ponta e atrito proposta por Schmertmann (1979) para o amostrador brasileiro especificado na NBR 6484, Figura 25.

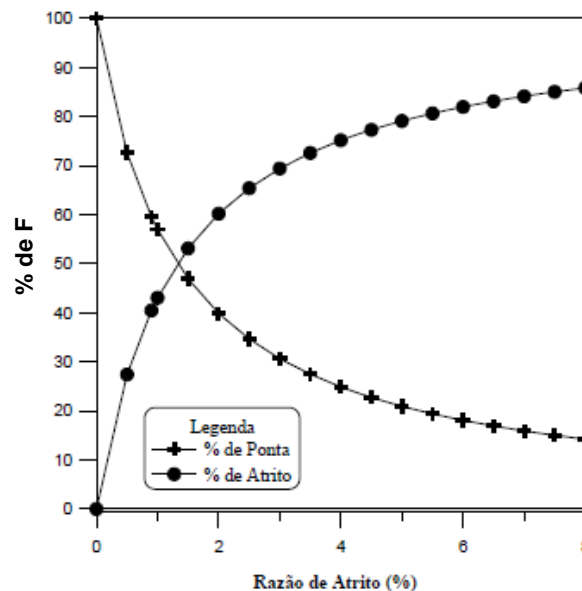


Figura 25 – Adaptação da curva proposta por SCHERTMANN (1979) de acordo com a NBR 6484 (2001) (Modificado SOUZA, 2009).

Em seu trabalho, Schmertmann (1979) deu especial destaque para o entendimento da influência do uso de liner no amostrador SPT, que é um tubo de latão de 1,5 mm de parede, bastante utilizado nas décadas de 50 e 60 para facilitar a operação de retirada e transporte da amostra. O autor mediu a recuperação em ensaios de penetração estática do SPT, com e sem liner, e apurou que a recuperação média sem a utilização do liner foi de 99%, e a recuperação com o liner foi de 66%.

Tal fato ocorre por conta do aumento do diâmetro interno com a remoção do liner, o que representa uma redução do atrito interno na amostra e conseqüente maior recuperação da amostra, e, portanto, representativa para uma situação de não embuchamento, tal como a premissa adotada por Schmertmann em sua equação.

Contudo, conforme destacado por Souza (2009), o SPT brasileiro apresenta diâmetro interno constante, similar à situação de utilização de liner, de modo que, a situação de não embuchamento considerada por Schmertmann em sua proposta não é garantida.

Para interpretar a resistência mobilizada no sistema amostrador-solo a partir de conceitos de energia, Schmertmann (1979) utilizou os dados de força obtidos no ensaio estático no amostrador SPT (vide Figura 23) para calcular a energia envolvida na cravação do amostrador.

A área à esquerda da curva ($F \times \Delta L$), no intervalo dos últimos 30 cm de penetração, na Figura 23, representa a energia E' somada à parcela de energia correspondente ao peso submerso da composição das hastes e amostrador, $W' \cdot \Delta L$, requerida para a penetração do amostrador correspondente ao N_{SPT} .

O autor plotou a variação de E' com a profundidade, e, em seguida, interpolou a curva obtida para as profundidades em que havia informação de N_{SPT} . A Figura 26 apresenta a comparação entre o N_{SPT} e o E' , tanto para o caso com liner e sem liner. Verifica-se que existe uma variação proporcional do N_{SPT} em relação à energia requerida para a penetração estática do amostrador.

Segundo Schmertmann (1979), a energia potencial adicional transmitida pelo peso do amostrador e das hastes, $W' \cdot \Delta L$, não faz parte da energia adicional resultante do uso do martelo, razão pela qual o autor não incluiu esta energia na definição de E' .

Foi definido pelo autor que E^* representa a máxima energia dinâmica de impacto do martelo, correspondente ao produto do peso do martelo e a altura de queda (673 N e 30 cm, resultando em 474 J para padrão americano). A máxima energia que o martelo do SPT pode fornecer durante a amostragem em N golpes seria igual a $N \times E^* + 190J$, esclarecendo que a parcela de 190 J representa a energia potencial do martelo pela altura de penetração correspondente ao N_{SPT} (30,5 cm para padrão americano).

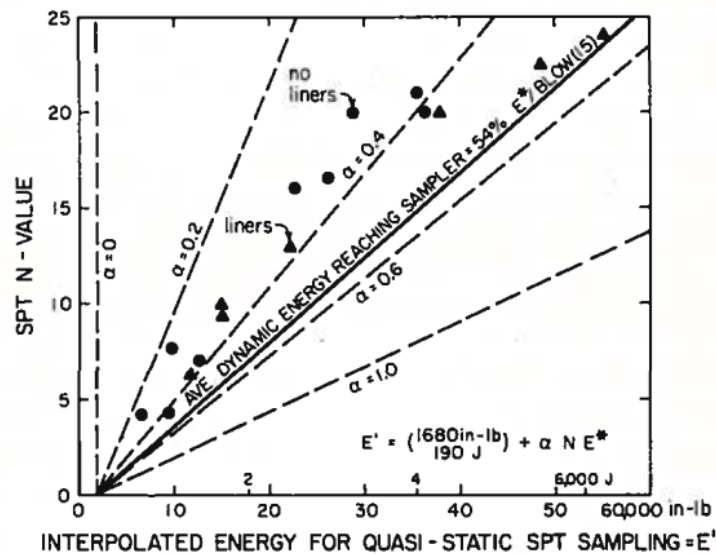


Figura 26 – Energia quase-estática necessária à penetração para uma eficiência $\eta = 0,54$, Schmertmann (1979).

As linhas apresentadas na Figura 26 representam a constante α , usada para estimar o percentual da máxima energia transmitida ao amostrador (E^*). Ao analisar os dados experimentais, verificou-se que a energia requerida para a penetração estática do amostrador SPT varia de 25% a 53% ($\alpha = 0,25$ a $0,53$) da máxima energia disponível (E^*), com valor médio de 42% ($\alpha = 0,42$) para as areias e de 33% ($\alpha = 0,33$) para solos argilosos.

Pouco tempo depois da execução dos testes, foi realizada por Smith e Ho (Schmertmann et al., 1978) calibração dinâmica do equipamento utilizado e mediu-se a eficiência, η , que é a porcentagem da energia E^* que alcançava o topo do amostrador, resultando num valor de 54% do E^* .

Schmertmann (1979) destacou que a energia necessária à penetração dinâmica do amostrador SPT, em geral, é superior à necessária para à penetração estática por conta das perdas ocorridas no deslocamento elástico do solo, aos efeitos viscosos etc. Dessa forma, verificou que, de fato, os valores experimentais se situam a esquerda da linha correspondente a $\eta = 54\%$, isto é, valores de α inferiores à 54%.

Tendo denominado de β a razão entre a parcela dinâmica e a estática necessária à penetração do amostrador ($\beta = \eta/\alpha$), o autor, considerando a maior influência dos efeitos viscosos nas argilas, concluiu que o valor médio de β para solos argilosos $\beta = 0,54/0,33 = 1,64$ excede o valor de $\beta = 0,54/0,42 = 1,29$ em solos arenosos.

Schmertmann (1979) apresentou através da (20) a expressão para as posições das linhas α , sendo $E'' = E' - 190J$.

$$E'' = a \times N \times E^* \quad (20)$$

Dessa forma, considerando que $\beta = \eta/\alpha$, Schmertmann (1979) apresentou a seguinte equação:

$$N = \frac{E''}{a \times E^*} = \frac{E'' \times \beta}{\eta \times E^*} \quad (21)$$

Considerando que os valores de α independem do valor de N para um dado solo e que a eficiência η é aproximadamente constante para um dado equipamento, Schmertmann (1979), considerou o valor de β aproximadamente constante para um dado solo. Dessa forma, com β , E^* e E'' constantes, Schmertmann apurou que o valor de N varia inversamente com a eficiência η do equipamento.

A partir do exposto, o autor afirma ser possível uma estimativa da resistência estática necessária à penetração do SPT. Considerando, $E' = F \times \Delta L$ e que $E' = \eta E^* + 190 J$, tem-se que:

$$F = \frac{E'}{\Delta L} = 623 + a \times 1557 \times N_{spt} \text{ (em Newtons)} \quad (22)$$

Vale destacar, nesse sentido, a equação para o cálculo da resistência estática média (F) no ensaio SPT na forma apresentada por Noreña (2011) a seguir:

$$F = \frac{(a \times N_{spt} \times E^* + M_m \times g \times h_q)}{\Delta L} \quad (23)$$

Onde,

M_m = Massa do martelo;

g = Aceleração da gravidade;

h_q = Altura de cravação do amostrador correspondente ao N_{SPT} ;

Schmertmann (1979) apresenta, através de exemplo numérico, a possibilidade, a partir de sua proposta, de se calcular valores estimados de resistência unitária de ponta (q_c), atrito lateral (f_c) e, conseqüentemente a razão de atrito R_f do ensaio CPT.

Através dos resultados da Tabela 8 a seguir, obtidos com três ensaios SPT próximos entre si, realizados a 8 metros de profundidade em uma camada de areia argilosa, Schmertmann (1979) obteve um valor médio de $N_{SPT} = 17$, resultando em $X_1 = 0,68$ e $X_2 = 0,82$.

Tabela 8 – Números de golpes para cada 15 cm obtidos nos ensaios realizados por Schmertmann (1979).

Valores sucessivos de penetração	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
N_1	5	6	8
N_2	8	7	8
N_3	9	9	10
N_{SPT}	17	16	18

De acordo com o estudo de Schmertmann (1979), tais resultados apontam para uma razão de atrito (R_f) de 2%, que corresponde à uma situação em que 57% da força estática média F (de 15 cm a 45 cm de penetração) corresponderá à parcela de ponta.

Considerando que o amostrador utilizado para os ensaios correspondia ao padrão americano com liner removido, com uma eficiência de $\eta = 45\%$, e a razão entre a parcela dinâmica e a estática necessária à penetração do amostrador (β) para solos arenosos equivale à 1,29, o valor de α equivale à 0,35.

Dessa forma, através da (22), tem-se:

$$F = 623 + 0,35 \times 1557 \times 17 = 9,88 \text{ kN} \quad (24)$$

Com base no peso das hastes de $W' = 0,45 \text{ kN}$, foi possível a determinação do valor da força resistida na ponta F_e , através da seguinte equação:

$$F_e = W' + F \times \% \text{ ponta (em Newtons)} \quad (25)$$

$$F_e = 0,45 + 9,88 \times 0,57 = 6,08 \text{ kN}$$

Dividindo-se tal valor pela área de ponta do amostrador de $A_e = 10,7 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, foi determinado o valor da resistência unitária na ponta do amostrador de $q = 5,70 \text{ MPa}$, que para $C_1 = 1,00$, resultará em um valor de resistência de ponta obtida pelo cone CPT de $q_c = 5,70 \text{ MPa}$.

Para a parcela da força resistida por atrito lateral, deve-se considerar a seguinte Equação:

$$F_i + F_o = F \times \% \text{ atrito (em Newtons)} \quad (26)$$

$$F_i + F_o = 9,88 \times 0,43 = 4,25 \text{ kN}$$

Considerando a área externa do amostrador igual à $\pi \cdot L \cdot d_o$, igual a $4,88 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ e a área interna de $\pi \cdot 0,04 \cdot d_i$, correspondente apenas à área do amostrador de $0,44 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ (considerando que não haverá atrito interno no trecho em que o liner foi retirado), o valor do atrito médio será aproximadamente de $f = 80 \text{ kPa}$, que, ao se considerar a constante $C_2 = 0,7$, fornecerá um valor de atrito lateral do cone CPT de $f_c = 114,00 \text{ kPa}$.

A razão de atrito R_f obtida com tais valores é de 2%, correspondente ao valor por Schmertmann (1979). Os resultados levaram a conclusão de que há convertibilidade entre os resultados dos ensaios SPT e CPT.

Conforme ressaltado por Souza (2009), todo o desenvolvimento das expressões sobre a estática do SPT, apresentadas na proposta de Schmertmann (1979), considerou a situação de não embuchamento de solo no amostrador, o que, de fato, pode representar adequadamente o aumento do diâmetro interno do amostrador causado pela remoção do liner, conforme estudado pelo autor à época.

No entanto, para a realidade dos ensaios realizados no Brasil, onde não é prática comum a utilização de amostradores SPT com previsão para liners, isto é, o

diâmetro interno é contínuo, a situação de não embuchamento nos ensaios não é garantida.

O autor da presente dissertação entende que a adaptação da proposta apresentada por Schmertmann (1979) aos casos em que ocorram embuchamento poderá refletir mais adequadamente a realidade do ensaio SPT brasileiro, podendo trazer contribuições ao entendimento da estática do SPT.

1.3.2 Resistência Estática no sistema solo-amostrador através da aplicação do Princípio de Hamilton (Aoki e al., 2007)

De acordo com Aoki e al., (2007), o princípio de Hamilton converge com a lei da conservação da energia, na qual a energia não pode ser criada e sim transformada, e está expressa pela seguinte equação variacional (Clough e Penzien, 1975):

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(T - V)dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta(W_{nc})dt = 0 \quad (27)$$

T = Energia cinética total no sistema;

V = Energia potencial no sistema;

W_{nc} = Trabalho realizado por forças não conservativas (amortecimento inclusive)

O primeiro termo da equação, corresponde a variação de energia das forças conservativas (T-V) e o segundo à variação de energia das forças não conservativas (W_{nc}), tais como, deformação permanente e amortecimento.

Baseando-se no Princípio de Conservação de Energia de Hamilton, Aoki *et al.* (2007) apresentaram proposta alternativa para o cálculo da resistência estática (R_s), a partir do ensaio de prova de carga estática no sistema haste-amostrador-solo.

As curvas típicas de resistência x penetração, apresentadas na Figura 27, correspondem às situações de carregamento e descarregamento do amostrador no ensaio SPT, onde tem-se:

T_A = Energia cinética;

V_A = Energia potencial de deformação;
 V_E = Energia potencial elástica;
 W_A = Trabalho realizado por forças não conservativas devido à cravação;
 DMX = Deslocamento total correspondente à soma do deslocamento permanente S (nega) mais o deslocamento elástico recuperado K (repique).

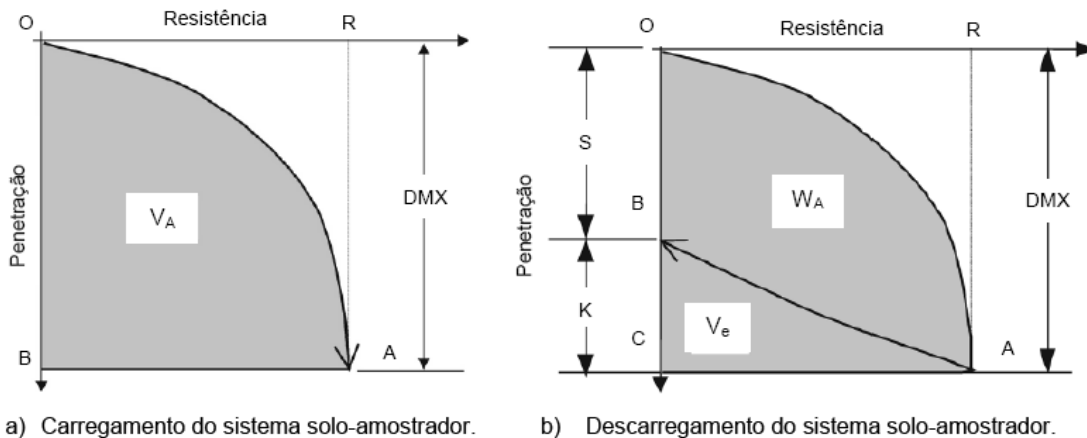


Figura 27 – Curva resistência versus penetração correspondente ao SPT (adaptado de AOKI et al., 2004, por MORAES, 2014).

No instante t_1 , em que a onda de tensão atinge o amostrador, a energia cinética (T) no sistema é igual a T_A , enquanto o trabalho realizado por forças não conservativas (W_{nc}) e a energia de deformação (V) são nulos.

Na sequência, no instante t_2 , quando ocorre a máxima penetração no amostrador no solo (DMX), a energia cinética (T) se anula e a energia de deformação (V) se iguala a V_a , correspondente a área OAC sob a curva apresentada na Figura 27b.

Considerando que a variação de trabalho realizado por forças não conservativas (W_{nc}) no amostrador SPT durante o intervalo de tempo $t_2 - t_1$ é desprezível, verifica-se que:

$$T_a \cong V_a \quad (28)$$

No instante t_3 , correspondente ao final do impacto, a energia de deformação (V_a) se transforma em energia potencial elástica (V_e) e em trabalho de forças não-conservativas devido à cravação (W_a). Através da Tabela 9 Aoki *et al.* (2007)

apresentam, resumidamente, a variação de energia a cada instante de cravação do amostrador no solo.

Tabela 9 – Variação da energia nos intervalos de tempo (t_2-t_1) e (t_3-t_2) (AOKI et al., 2007)

Tempo	T	V	W_{nc}
t_1	T_A	0	0
t_2	0	V_A	0
t_3	0	V_e	W_A
Variação δ_{12}	$(-T_A)$	(V_A)	(0)
Variação δ_{23}	0	$(V_e - V_A)$	(W_A)

Dessa forma, considerando o Princípio de Conservação de Energia de Hamilton, verifica-se que no intervalo $t_3 - t_2$, tem-se:

$$V_a = V_e + W_a \quad (29)$$

De acordo com Aoki et al. (2007), com exceção de solos resilientes, a recuperação elástica da penetração é muito pequena quando comparada com a penetração permanente. Por consequência, o trabalho das forças não conservativas (W_a) é aproximadamente igual à energia de deformação (V_a), sendo:

$$W_a \cong V_a \quad (30)$$

O trabalho das forças não conservativas é igual ao produto da força resistente (R_t) pela penetração permanente (S), conforme expressão a seguir:

$$W_a = R_t \times S \quad (31)$$

Aoki et al. (2007) consideram que a força resistente no ensaio dinâmico (R_t) é aproximadamente igual à força resistente no ensaio estático (R_s). Logo, a resistência estática pode ser estimada a partir da seguinte equação:

$$R_s = R_t = \frac{W_a}{S} = \frac{V_a}{S} = \frac{T_A}{S} \quad (32)$$

Destaca-se que Neves (2004), através de ensaios em areias e areias siltosas, também concluiu que a única parcela de reação do solo devido à penetração do amostrador é a parcela estática (R_s), independentemente do ensaio ser dinâmico ou estático, isto é, desconsiderando-se o efeito da resistência viscosa e dinâmica.

Quando o amostrador é cravado no solo a penetração S a cada golpe varia ao longo dos 30 cm correspondentes ao N_{SPT} . Nesse sentido, Aoki et al. (2007) afirmam ser possível calcular uma penetração média equivalente (S_m) a partir da seguinte equação:

$$S_m = \frac{0,30}{N_{SPT}} \quad (33)$$

Substituindo-se as equações anteriores, verifica-se que a resistência estática correspondente a um golpe pode ser determinada por:

$$R_s = \frac{T_A}{S_m} = T_A \times \frac{N_{SPT}}{0,3} \text{ (kN)} \quad (34)$$

De acordo com Aoki e Cintra (2000), a eficiência do ensaio SPT pode ser determinada pela relação entre a energia transferida ao sistema amostrador-solo (T_A) e a energia teórica do ensaio SPT (478,2 J), conforme mostrado a seguir:

$$\eta^* = \frac{T_A}{478,2} \times 100(\%) \quad (35)$$

Combinando-se as equações anteriores, obtém-se que:

$$R_s = \frac{\eta^* \times 0,478 \times N_{SPT}}{0,3} \text{ (kN)} \quad (36)$$

Verifica-se que, com base no índice N_{SPT} e na eficiência do ensaio no topo do amostrador (η^*), é possível a determinação da resistência estática mobilizada pelo sistema solo-amostrador durante a cravação (R_s). Portanto, o índice N_{SPT} passa a ser interpretado com um significado físico (Aoki et al., 2007).

Objetivando incorporar a correção de energia potencial do sistema, Aoki (2013) apresenta equação com consideração da correção proposta por Odebrecht (2003) para um referencial fixo e externo ao sistema, conforme a seguir:

$$R_S = \eta^* \times \frac{\left[M_m \times g \times 0,75 \times \left(\frac{0,3/N_{SPT} + 0,75}{0,75} \right) \right]}{1000} \times \frac{N_{SPT}}{0,3} (kN) \quad (37)$$

Aoki (2013), ainda com base no Princípio de Hamilton, afirma ser possível chegar aos valores de resistência de ponta (r_p), atrito lateral externo (r) e atrito lateral interno (r_{li}) atuantes no amostrador SPT, com base nas seguintes informações:

- a) Dimensões do amostrador SPT;
- b) Comprimento da amostra de solo recuperada no interior do amostrador (L_a);
- c) Índice de resistência N_{SPT} ;
- d) Eficiência do equipamento (η^*);
- e) Relação entre a resistência unitária nas paredes interna e externa do amostrador (a).

Conforme verifica-se, Aoki (2013) afirma que não é necessário o conhecimento do tipo de solo em que foi realizado o ensaio.

A partir das forças atuantes no amostrador durante a sua penetração no solo (Figura 28), Aoki (2013) define a equação correspondente ao equilíbrio das forças verticais não conservativas atuantes durante o impacto do martelo, conforme a seguir:

$$R_D + W_h = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (38)$$

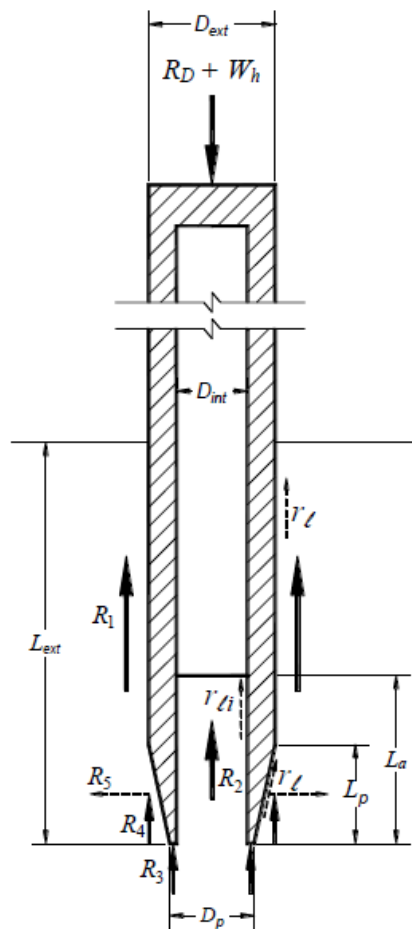


Figura 28 – Equilíbrio de forças atuantes no amostrador (modificado de Zapata, 2015).

Onde:

R_1 = força de reação na parede vertical externa do amostrador.

R_2 = força de reação na parede interna do amostrador.

R_3 = força de reação vertical na seção anelar de ponta do amostrador.

R_4 = componente vertical da força de reação ao longo da superfície biselada tronco-cônica do amostrador.

R_5 = componente horizontal da força de reação ao longo da superfície biselada tronco-cônica do amostrador.

D_{ext} = diâmetro externo do amostrador = 50,8 mm

D_{int} = diâmetro interno do amostrador = 34,7 mm

D_p = diâmetro da ponta do amostrador = 38,1 mm

L_p = comprimento da seção biselada do amostrador = 21,5 mm

L_{ext} = penetração total do amostrador

L_a = comprimento da amostra

r_i = resistência unitária na parede externa e no chanfro do amostrador

r_{ii} = resistência unitária na parede interna do amostrador

R_D = força de reação dinâmica experimental

W_h = peso das hastes e cabeça de bater

As forças de reação desenvolvidas ao longo das paredes laterais externa e interna do amostrador correspondem às reações R_1 e R_2 , e são obtidas a partir das seguintes equações:

$$R_1 = \pi \times D_{ext} \times (L_{ext} - L_p) \times r_\ell \quad (39)$$

$$R_2 = \pi \times D_{int} \times r_{\ell i} \times L_a \quad (40)$$

Aoki (2013) considera que o atrito na parede interna do amostrador é “ a ” vezes maior do que o atrito na parede externa, sugerindo, portanto, o fator de atrito (a) dado pela seguinte relação:

$$a = r_{\ell i} / r_\ell \quad (41)$$

Dessa forma, a reação R_2 , também pode ser reescrita em função do fator de atrito (a), conforme apresentado a seguir:

$$R_2 = \pi \times D_{int} \times a \times r_\ell \times L_a \quad (42)$$

Para o caso do equilíbrio das forças atuantes na ponta aberta do amostrador apresentada na Figura 29, a resultante R_2 é igual à resultante da resistência sob a ponta aberta do amostrador, isto é:

$$R_2 = \pi \times \frac{D_{int}^2}{4} \times r_p \quad (43)$$

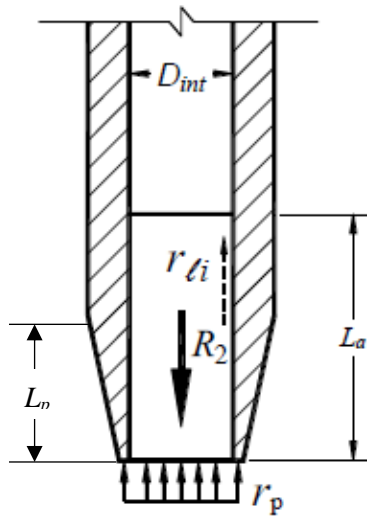


Figura 29 – Forças atuantes na ponta aberta do amostrador (modificado de Zapata, 2015).

Assim, o embuchamento do solo no interior do amostrador ocorrerá quando, durante a cravação, a resultante da resistência por atrito lateral do solo no interior do amostrador atingir a resultante da resistência sob a ponta aberta do amostrador no valor de R_2 da figura anterior.

Aoki (2013) afirma ser possível, em analogia ao ensaio CPT, determinar a razão de atrito (R_f) como a relação entre o atrito externo (r_i) com a resistência de ponta sob o amostrador (r_p), conforme equação a seguir:

$$R_f = \frac{r_\ell}{r_p} = \frac{r_{\ell i}}{a \times r_p} \quad (44)$$

Combinando as equações anteriores, tem-se que:

$$R_f = \frac{D_{int}}{4 \times a \times L_a} \quad (45)$$

Faz-se importante esclarecer que a combinação das equações acima depende do equilíbrio das forças atuantes na ponta aberta do amostrador e na parede interna do amostrador SPT. No entanto, este equilíbrio só pode ser garantido tomando-se como premissa que no intervalo de cravação correspondente ao N_{SPT} , o valor de r_p seja sempre constante. No caso, por exemplo, em que r_p fosse variável e decrescente

ao longo dos 30 cm de cravação, existiria a possibilidade de que após o equilíbrio das resultantes das forças em R_2 , a resistência correspondente à ponta aberta do amostrador se reduzisse para valores inferiores à R_2 , isto é, a resistência à cravação real a partir deste trecho seria inferior à estimada pelo método.

Além disso, para o equilíbrio apresentado, seria necessário admitir a premissa de que a resultante da resistência de atrito no interior do amostrador SPT atinge, em algum momento, o valor de R_2 . Caso contrário, não seria possível conhecer o valor da Razão de Atrito (R_f), invalidando o método proposto. Em outras palavras, admite-se que em algum momento da cravação ocorrerá a formação de bucha no interior do amostrador SPT embuchado.

Quanto às forças de reação verticais atuantes na ponta e na superfície biselada tronco-cônica do amostrador, R_3 e R_4 , respectivamente, podem ser determinadas a partir das seguintes equações apresentadas por Aoki (2013):

$$R_3 = \frac{\pi}{4} \times (D_p^2 - D_{int}^2) \times \frac{r_\ell}{R_f} \quad (46)$$

$$R_4 = r_\ell \times \left(S_L \times \frac{L_p}{L} \right) \quad (47)$$

Sendo S_L a área da superfície biselada tronco-cônica do amostrador, obtido a partir das seguintes equações:

$$S_L = \frac{\pi \times L \times (D_{ext} + D_p)}{2} \quad (48)$$

$$L = \left\{ L_p^2 + \left[\frac{(D_{ext} - D_p)}{2} \right]^2 \right\}^{0,5} \quad (49)$$

A partir do equilíbrio das forças verticais não conservativas atuantes no amostrador durante a cravação, é possível estabelecer a equação para calcular a resistência unitária de atrito na parede externa e no chanfro do amostrador, vide a seguir:

$$r_{\ell} = \frac{R_D + W_h}{\pi \times D_{ext}(L_{ext} - L_p) + \pi \times D_{int} \times a \times L_a + \frac{\pi}{4} \times \frac{(D_p^2 - D_{int}^2)}{R_f} + S_L \times \frac{L_p}{L}} \quad (50)$$

Pelo exposto, observa-se que, para a determinação das parcelas de resistência de ponta (r_p) e de atrito do solo (r_l), a proposta de Aoki (2013) depende inteiramente do conhecimento do comprimento da bucha (L_a), razão pela qual o presente trabalho de pesquisa buscará entender a influência desta parcela nos resultados obtidos pelos métodos propostos por Aoki (2013) e Schmertmann (1979).

Cabe novamente destacar que, neste método, considera-se a resistência dinâmica (R_D) igual resistência estática (R_s) e esta é obtida a partir da (37), proposta de Aoki et al. (2007), independente da ocorrência ou não do fenômeno do embuchamento da amostra no interior do amostrador SPT, fato já destacado por Souza (2009).

No entanto, verifica-se que o valor da resistência estática (R_s), obtido pela (37), representa um valor médio correspondente aos 30 cm de cravação do amostrador, enquanto que, para a determinação do valor do atrito lateral r_l , na Equação (50) são consideradas as contribuições de todas as áreas do amostrador, indicando sua completa cravação. Este autor entende que a resistência estática no trecho final de cravação deve ser superior ao valor da resistência estática média (R_s).

2 BANCO DE DADOS

O presente capítulo apresentará os dados utilizados neste estudo para a avaliação do efeito do embuchamento nos métodos de determinação da resistência estática do amostrador SPT. A seleção dos dados baseou-se inicialmente em campanhas de sondagens em que tenham sido realizados ensaios SPT e CPT, especialmente com verticais próximas, com o objetivo de se comparar os parâmetros de resistência obtidos através dos métodos propostos por Aoki (2013) e Schmertmann (1979) com aqueles efetivamente medidos através dos ensaios de cone CPT.

Os dados utilizados têm origem em 4 distintas campanhas de investigação geotécnica conforme resumo na Tabela 10 a seguir:

Tabela 10 – Informações sobre dados utilizados no presente estudo

Região	Local	Fonte
SP/Brasil	Rod. Presidente Dutra - Baixada do Jacareí	Vector Projetos LTDA
SC/Brasil	Obra Residencial em Itapema	-
RJ/Brasil	Porto do Açú - São João da Barra	LLX
	Obra Industrial na Zona Oeste	In Situ Geotecnia

Foram adotadas apenas as profundidades em que existiam informações de ambos ensaios SPT e CPT, excluindo-se boa parte das informações existentes no banco de dados.

Foi verificado também que para viabilizar a utilização do método Schmertmann (1979), seria necessário o conhecimento do número de golpes necessários para a cravação de cada um dos 15 cm do amostrador SPT no solo.

No entanto, nos casos de alguns solos muito moles, em que os 45 cm do amostrador SPT penetram no solo sob a ação do peso próprio do conjunto, ou sob a ação de um único golpe, não seria possível a obtenção de informação adequada para a utilização do método citado.

Conseqüentemente, embora a proposta inicial envolvesse a verificação de todos os resultados disponíveis, ao longo do trabalho foi necessário estabelecer um critério de exclusão dos dados, sendo selecionados apenas os dados de profundidades em que o número de golpes para cada intervalo de 15 cm fosse superior à unidade.

Faz-se importante ressaltar que boa parte dos relatórios de Sondagens SPT não apresentam os resultados dos números de golpes necessários para a cravação de cada 15 cm e sim o número de golpes necessários para a cravação dos 30 cm iniciais ($N_{inicial}$) e dos 30 cm finais, correspondente ao N_{SPT} .

Nesse contexto, o trabalho apresentado por Teixeira (1993) trouxe grande contribuição para a presente pesquisa, pois após a análise de cerca de 4000 ensaios realizados pelas empresas Geotécnica S.A. e Engesolos S.A., identificou a seguinte correlação entre os números de golpes sequenciais para a penetração de cada intervalo de 15 cm, N_1 , N_2 e N_3 em relação ao número total de golpes para cravação dos 45 cm do amostrador (N_t):

$$N_1 = 0,22 \times (N_t) \quad (51)$$

$$N_2 = 0,33 \times (N_t) \quad (52)$$

$$N_3 = 0,45 \times (N_t) \quad (53)$$

Posteriormente, Cavalcante (2002), ao analisar dez sondagens, identificou os seguintes valores, em porcentagem dos golpes totais: 23% para o primeiro segmento, 33% para o segundo segmento e 44% para o terceiro, corroborando com os valores encontrados por Teixeira (1993).

Através das correlações apresentadas acima, e conhecendo os valores de N_{1+2} ($N_{inicial}$) e N_{2+3} (N_{SPT}), foi possível através da média de dois N_t estimados, realizar uma estimativa dos valores de N_1 , N_2 e N_3 , viabilizando assim as informações de SPT necessárias para os cálculos pelo método apresentado por Schmertmann (1979).

Por outro lado, para que os valores de q_c e f_s , obtidos a partir dos ensaios de cone fossem corretamente comparados aos valores de N_{SPT} , foi utilizado o procedimento apresentado por Politano et al. (1998) em que se utiliza o valores medidos pelo cone CPT na profundidade correspondente à cravação de 30 cm do amostrador SPT, pois esta representará exatamente a profundidade média relativa ao N_{SPT} obtido, vide esquema da Figura 30.

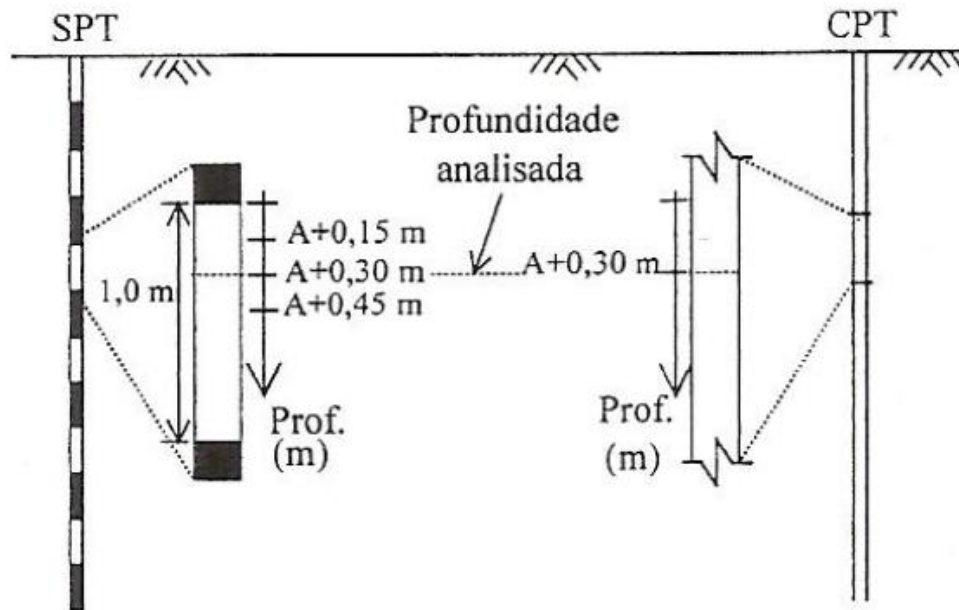


Figura 30 – Procedimento para comparação dos dados de CPT e SPT (Politano et al. 1998)

Nos intervalos em que se observou significativa variação do q_c e/ou f_s , optou-se pela adoção de um valor médio representativo correspondente à profundidade de cravação de 15 cm a 45 cm do amostrador SPT, objetivando assim minimizar possíveis discrepâncias nas comparações dos resultados.

Os subitens a seguir apresentarão de forma detalhada os dados utilizados na presente pesquisa, cabendo apenas destacar que além destes dados, também foram feitos cálculos utilizando os dados apresentados por Aoki (2013) e Schmertmann (1979), com objetivo exclusivo de validação dos cálculos realizados no presente estudo.

2.1 Rodovia Presidente Dutra - Baixada do Jacareí

Trata-se de campanha de ensaios investigativos realizados para obra na Rodovia Presidente Dutra, nas proximidades do município de Jacareí – SP. Este banco de dados foi utilizado no trabalho apresentado por Danziger et al. (1998) e do estudo realizado por Souza (2009).

Durante o ano de 1997, foram realizadas pelo menos 36 sondagens SPT com o amostrador “Terzaghi & Peck”, destacando-se que as medidas do índice N_{SPT} foram tomadas em intervalos de 0,50 m, o que não é usual, mas forneceu melhor detalhamento do perfil do subsolo. Amostras coletadas em 03 ensaios SPT foram submetidas a ensaios de granulometria.

Foram realizadas 8 verticais de ensaios piezocone (CPTU) em locais próximos à Sondagens SPT, sendo realizado também alguns ensaios de dissipação.

Os resultados obtidos através do ensaio CPTU foram disponibilizados através de tabela detalhada, o que garantiu acurácia para se conhecer os valores de q_t e f_s , nas profundidades correspondentes ao ensaio SPT.

Foi informado no relatório de ensaio CPTU que a cota inicial para o ensaio foi a mesma cota utilizada no ensaio SPT, pois foram realizados em locais terraplanados.

Dos ensaios disponíveis, através dos critérios estabelecido na presente pesquisa, puderam ser aproveitados 04 pares de ensaios CPTU e SPT, quais sejam, SPT17-CPTU06, SPT02-CPTU03, SPT06-CPTU01 e SPT15-CPTU04, cujos dados, encontram-se detalhados no Anexo A do presente estudo.

Cumpru destacar que para o presente estudo foram adotados os dados referentes a camadas de areias e de argilas, enquanto Souza (2009) apresentou estudo exclusivamente para dados de areias.

2.2 Obra residencial em Itapema/SC

Ao longo do ano de 1998, no município de Itapema, em Santa Catarina, foram realizadas 03 sondagens SPT para a investigação e conhecimento do solo sob o terreno.

Posteriormente, para basear o projeto da construção de edifício residencial, foram realizados 08 verticais de CPT no terreno, sendo 03 no ano de 2007 e outras 5 no anos de 2011, dos quais estão disponíveis os resultados de q_c e f_s através de gráficos e através de tabela, para cada 20 cm, o que garantiu boa acurácia para a correspondência com os valores do ensaio SPT.

Os referidos ensaios mostraram que o solo do terreno é heterogêneo, composto predominantemente por areia siltosa e com camadas de areia siltosa pouco argilosas nas profundidades próximas a 4 metros.

Dos ensaios disponíveis, através dos critérios estabelecido na presente pesquisa, puderam ser aproveitados 03 pares de ensaios CPTU e SPT, quais sejam, SPTF1 - CPTU02 (2007), SPTF2 - CPTU01 (2011) e SPTF3 - CPTU05 (2011), cujos dados, encontram-se detalhados no Anexo A do presente estudo.

2.3 Porto do Açu – São João da Barra

Através do estudo apresentado por Souza (2009), também foi possível ter acesso aos resultados dos ensaios SPT e CPTU realizados para a construção do Porto de Açu, no município de São João da Barra.

Verificou-se a execução de mais de 50 sondagens SPT e 9 ensaios CPTU, a partir dos quais pôde-se verificar que o subsolo é composto por uma camada superior de areia, com cerca de 10 a 15 metros de profundidade sobre camada de argila orgânica de baixa consistência de aproximadamente 20 m de espessura.

Os valores de q_t e f_s obtidos pelo ensaio CPTU foram disponibilizados apenas através de gráficos, o que pode não garantir boa acurácia para as estimativas do presente estudo.

Dos ensaios disponíveis, através dos critérios estabelecido na presente pesquisa, puderam ser aproveitados 04 pares de ensaios CPTU e SPT, quais sejam, SPS-04 – EC-SPS04, SPS-19 – EC-SPS19, SPS-22 – EC-SPS22 e SPS-23 – EC-SPS23, cujos dados, encontram-se detalhados no Anexo A do presente estudo.

2.4 Obra Industrial na Zona Oeste

Foram disponibilizados ensaios geotécnicos realizados para projeto de um pátio de estocagem de material a granel de uma indústria do setor siderúrgico localizada na zona oeste do Rio de Janeiro.

Durante os anos de 2005 e 2006 foram realizadas diversas ilhas de investigações contemplando ensaios de SPT, CPTU e Ensaio de Palheta (Vane Test), além de terem sido coletadas amostras para realização de ensaios de caracterização e de adensamento.

Destes ensaios, estão disponíveis para o presente estudo os relatórios de ensaios SPT e CPTU, conforme dados utilizados no trabalho apresentado por Souza (2009).

Os ensaios apontam para a existência de um depósito sedimentar superficial de argila mole, de baixa consistência, com cerca de 14 m de espessura sobre camadas predominantemente arenosas de espessura variando de 6 m a 20 m.

Os valores de q_t e f_s obtidos pelo ensaio CPTU foram disponibilizados apenas através de gráficos, o que pode não garantir boa acurácia para as estimativas do presente estudo.

Dos ensaios disponíveis, através dos critérios estabelecido na presente pesquisa, puderam ser aproveitados 16 pares de ensaios CPTU e SPT, quais sejam, SPT304 – CPTU304, SPT305 – CPTU305, SPT308 – CPTU308, SPT309 – CPTU309, SPT310 – CPTU310, SPT314 – CPTU314, SPT315 – CPTU315, SPT319 – CPTU319, SPT321 – CPTU321, SPT325 – CPTU325, SPT327 – CPTU327, SPT328 – CPTU328, SPT331 – CPTU331, SPT332 – CPTU332, SPT334 – CPTU334 e SPT118 – CPTU118, cujos dados, encontram-se detalhados no Anexo A do presente estudo.

3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

3.1 Adaptação do Método de Schmertmann (1979)

Conforme já abordado, as expressões sobre a estática do SPT, apresentadas na proposta de Schmertmann (1979), não refletem adequadamente a realidade dos ensaios realizados no Brasil atualmente, especialmente por não considerar a situação de embuchamento de solo no amostrador, já que, à época, era comum a utilização de amostradores com maior diâmetro interno para utilização de liners.

O autor da presente dissertação entende que a adaptação da proposta apresentada por Schmertmann (1979) aos casos em que ocorra embuchamento poderá refletir mais adequadamente a realidade do ensaio SPT brasileiro, podendo trazer contribuições ao entendimento da estática do SPT.

Neste item serão descritos todos os procedimentos e considerações que foram necessários para se chegar numa adaptação da proposta do método de Schmertmann (1979) correspondente ao ensaio SPT no Brasil.

Inicialmente, deve-se novamente destacar que Souza (2009) apresentou adaptação do método proposto por Schmertmann (1979) para o amostrador brasileiro, através da consideração da geometria do amostrador SPT estabelecida na norma brasileira.

Souza (2009) pôde então, para diferentes valores de Razão de Atrito (R_f) variando de 0% a 8%, determinar novos percentuais entre a parcela resistida pela ponta (F_e) e a parcela resistida por atrito lateral ($F_0 + F_i$), resultando nas curvas já apresentadas na Figura 25. No entanto, tal adaptação não contemplou a possibilidade de ocorrência do embuchamento, ou seja, penetração de amostra do solo no interior do amostrador em comprimento inferior à penetração do amostrador no solo, conforme verificado comumente em ensaios realizados com o amostrador brasileiro, vide registro recentemente documentado do comprimento da amostra por Zapata (2015) na Figura 31 a seguir.

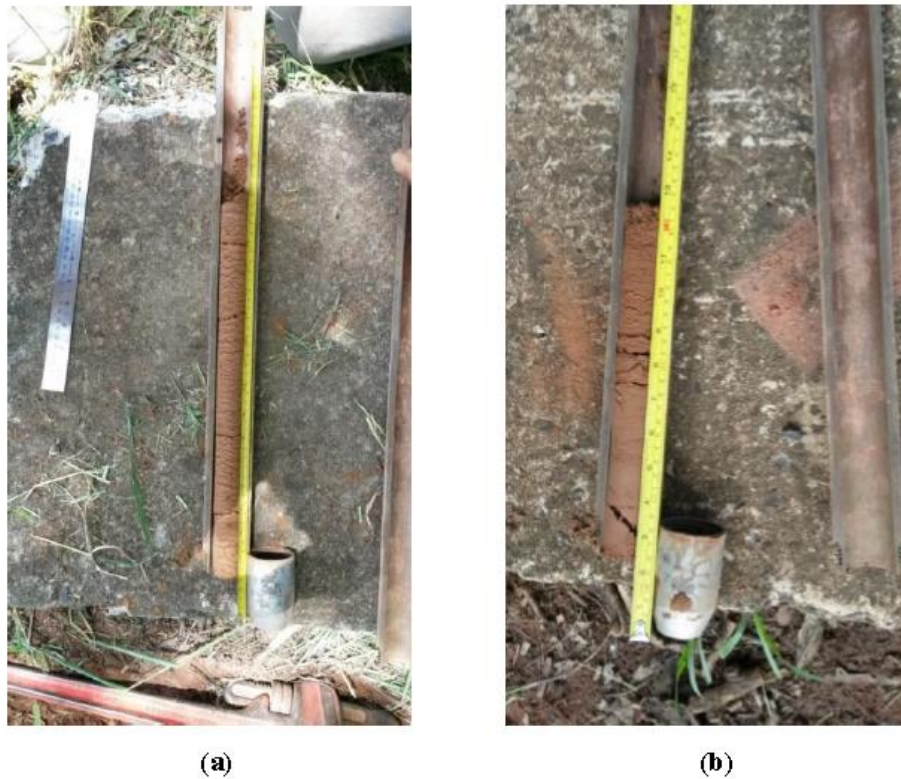


Figura 31 – Controle do comprimento da amostra para os casos (a) sem embuchamento ($L_i = 45$ cm) e (b) com embuchamento ($L_i < 45$ cm) (Zapata 2015)

Para a verificação da influência do fenômeno do embuchamento nos resultados obtidos a partir do método proposto por Schmertmann (1979), o presente estudo prosseguiu com novos cálculos, considerando a hipótese de 9 diferentes comprimentos de bucha (L_i), sendo, 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm, 35 cm, 40 cm e 45 cm, sendo este último valor, correspondente a situação de não embuchamento, tal qual considerado por Schmertmann (1979) e Souza (2009).

Considerando a variação no valor do comprimento da amostra no interior do amostrador (L_i), foi necessário adaptar a (12), separando-se as parcelas correspondentes ao atrito lateral interno e externo (F_i e F_0), uma vez que o atrito interno atuará somente no comprimento da bucha considerada (L_i), vide a seguir:

$$F + W' = q \times A + \pi \times L \times f \times d_{ext} + \pi \times L_i \times f \times d_{int} \quad (54)$$

Da mesma forma, a (15) anteriormente apresentada foi adaptada para a forma a seguir:

$$F + W' = [C_1 \times A + \pi \times L \times C_2 \times R_f \times d_{ext} + \pi \times Li \times C_2 \times R_f \times d_{int}] \times q_c \quad (55)$$

Conseqüentemente, os valores de X_1 , X_2 e X_3 (equações 17 a 19) passam a ser obtidos pelas seguintes equações:

$$X_1 = \frac{\Delta N_{15_{iniciais}}}{\Delta N_{15_{finais}}} = \frac{[C_1 \cdot A + \pi \cdot 7,5 \cdot C_2 \cdot R_f \cdot d_{ext} + \pi \cdot \Delta Li \cdot C_2 \cdot R_f \cdot d_{int}]}{[C_1 \cdot A + \pi \cdot 37,5 \cdot C_2 \cdot R_f \cdot d_{ext} + \pi \cdot \Delta Li \cdot C_2 \cdot R_f \cdot d_{int}]} \quad (56)$$

$$X_2 = \frac{\Delta N_{15_{interm.}}}{\Delta N_{15_{finais}}} = \frac{[C_1 \cdot A + \pi \cdot 22,5 \cdot C_2 \cdot R_f \cdot d_{ext} + \pi \cdot \Delta Li \cdot C_2 \cdot R_f \cdot d_{int}]}{[C_1 \cdot A + \pi \cdot 37,5 \cdot C_2 \cdot R_f \cdot d_{ext} + \pi \cdot \Delta Li \cdot C_2 \cdot R_f \cdot d_{int}]} \quad (57)$$

$$X_3 = \frac{\Delta N_{15_{final}}}{\Delta N_{15_{finais}}} = 1 \quad (58)$$

Da mesma forma que Schmertmann (1979), considerou-se que W' é igual a zero, C_1 e C_2 iguais à unidade e que q_c permanece constante para os três incrementos de penetração ΔL de 15 cm.

Os valores do comprimento médio ΔL de 7,5 cm, 22,5 cm e 37,5 cm, foram utilizados nas parcelas correspondentes ao atrito externo, tal qual considerado pelo autor do método.

Para a parcela interna, no entanto, os valores de ΔLi , devem ser obtidos em função do comprimento considerado de bucha (Li). Além disso, o valor de ΔLi deverá corresponder à profundidade em que o valor da resistência por atrito lateral interno F_i represente a média no intervalo de cravação.

Dessa forma, para uma bucha de 25 cm, por exemplo, o valor de ΔLi para o primeiro trecho de 15 cm será de 7,5 cm, pois ocorrerá penetração da amostra de 0 cm a 15 cm, sendo o valor médio de 7,5 cm correspondente ao trecho de atuação da força média resistida pelo atrito interno. O valor de ΔLi para o segundo trecho de 15 cm será de 21,66 cm, pois ocorrerá penetração da amostra de 15 cm até 25 cm, e a profundidade 21,66 cm se dará a força média resistida pelo atrito interno entre 15 cm e 30 cm. E por fim, para o último trecho de 15 cm, o valor de ΔLi será de 25 cm, pois não ocorrerá penetração adicional de solo no amostrador, tendo a parcela da resistência interna atuado apenas nos 25 cm da amostra.

Para esta estimativa foi considerado que, até se atingir o comprimento da bucha considerada, a amostra de solo irá penetrar no amostrador em valor igual ao da penetração do amostrador do solo.

Outra possibilidade seria considerar que a formação da bucha ocorreu de forma proporcional ao comprimento de penetração do amostrador no solo. Esta avaliação, no entanto, não foi realizada no presente estudo.

Foi realizado, para cada um dos 9 comprimentos de bucha estudados (L_i), o cálculo dos percentuais da resistência estática correspondente a ponta (F_e) e ao atrito lateral ($F_0 + F_i$), variando-se o valor da razão de Atrito (R_f) de 0% a 8%, com intervalos de 0,01%, que resultou em 9 pares de curvas das quais 3 serão apresentadas e discutidas adiante.

Dessa forma, a partir dos valores de X_1 , obtidos através dos resultados do SPT, e da resistência estática (F), é possível estimar os valores das resistências de ponta (F_e) e de atrito lateral ($F_0 + F_i$) para cada comprimento de bucha (L_i) desde que se adote o par de curva adequado ao comprimento de bucha considerado.

Para a estimativa do valor da resistência estática média (F) no ensaio SPT, conforme proposto por Schmertmann (1979) e considerando os valores correspondentes ao amostrador brasileiro, têm-se a seguinte equação:

$$F = \frac{(a \times N_{spt} \times 478,2 + 191,2)}{0,3} \quad (59)$$

O valor de α foi calculado, com base na equação $\alpha = \eta^* \beta$, sendo adotado inicialmente os valores de β (razão entre a parcela dinâmica e a estática necessária à penetração do amostrador) observados por Schmertmann (1979), isto é, 1,64 para solos argilosos e 1,29 em solos arenosos. O valor da eficiência η^* foi adotado conforme informações disponíveis dos ensaios, e/ou, quando inexistentes, adotou-se o valor de 62% como representativo para a realidade dos ensaios SPT brasileiros, conforme valor verificado por Morais (2014), já abordado anteriormente.

A partir dos valores das resistências de ponta (F_e) e de atrito lateral ($F_0 + F_i$) para cada comprimento de bucha (L_i), foi possível o cálculo dos parâmetros de resistências unitárias q e f do ensaio estático SPT, comparáveis com a resistência unitária de ponta q_c e a resistência unitária por atrito f_s , obtidos no ensaio CPTU.

Vale observar que o valor de f é estimado pelo presente método através da divisão entre a força total resistida por atrito ($F_0 + F_i$) e a soma das áreas laterais externas e internas (variável em função do comprimento da bucha L_i) e, portanto, corresponde à uma média ponderada, não sendo possível conhecer, por Schmertmann (1979), os valores de atrito lateral interno e externo.

Os valores da resistência de ponta q_c e da resistência por atrito f_s estimados a partir de resultados de SPT foram comparados aos resultados efetivamente obtidos por ensaios CPTU, permitindo um melhor entendimento da influência do comprimento de bucha L_i na determinação da resistência estática pelo método de Schmertmann (1979).

3.2 Utilização do Método proposto por AOKI (2013)

Com base na proposta de Aoki *et al.* (2007), descrita no item 1.3.2, foram realizados os cálculos para a obtenção da Resistência Estática (R_s), atrito lateral interno (r_{li}), atrito lateral externo (r_l) e resistência de ponta (r_p).

A partir da (37) proposta de Aoki (2013), reapresentada a seguir, foi possível obter a resistência estática (R_s) utilizando-se os valores do índice N_{SPT} e da eficiência do ensaio (η^*) do ensaio SPT.

$$R_s = \eta^* \times \frac{\left[M_m \times g \times 0,75 \times \left(\frac{0,3/N_{SPT} + 0,75}{0,75} \right) \right]}{1000} \times \frac{N_{SPT}}{0,3} (kN) \quad (37)$$

A referida equação já incorpora a correção de energia potencial do sistema, proposta por Odebrecht (2003), em função da altura de queda adicional do martelo correspondente à penetração do amostrador SPT no solo.

Interessante notar que a (37), proposta por Aoki *et al.* (2007), difere em relação à (22) proposta por Schmertmann (1979) apenas por não contemplar a parcela de correção entre ensaio dinâmico e estático (parâmetro β). De

fato, Aoki (2013) considera que a força resistente no ensaio dinâmico (R_D) é aproximadamente igual à força resistente no ensaio estático (R_S).

O valor da eficiência η^* foi adotado conforme informações disponíveis dos ensaios, e/ou, quando inexistentes, adotou-se o valor de 62% como representativo para a realidade dos ensaios SPT brasileiros, conforme valor verificado por Moraes (2014), já abordado anteriormente.

Para a estimativa aos valores de resistência de ponta (r_p), atrito lateral externo (r_e) e atrito lateral interno (r_i) proposta por Aoki (2013), foram necessárias as seguintes informações:

- a) Dimensões do amostrador;
- b) Comprimento da amostra de solo recuperada no interior do amostrador (L_i);
- c) Índice de resistência N_{SPT} ;
- d) Eficiência do equipamento (η);
- e) Relação entre a resistência unitária nas paredes interna e externa do amostrador (fator de atrito “ a ”).

Como se vê, diferentemente do método proposto por Schmertmann (1979), a proposta de Aoki (2013) depende diretamente da informação quanto o comprimento da amostra de solo recuperada no interior do amostrador (L_i). Portanto, não foi necessária adaptação das fórmulas apresentadas neste método para que fosse possível a análise da influência do comprimento da bucha (L_i).

Para possibilitar a comparação dos métodos foram feitos os cálculos, utilizando-se os resultados de SPT e considerando os mesmos 9 diferentes comprimentos hipotéticos de bucha (L_i) de 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm, 35 cm, 40 cm e 45 cm, sendo este último valor, correspondente a situação de não embuchamento, tal qual considerado por Schmertmann (1979) e Souza (2009).

Vale destacar que não se tem informações nos relatórios de ensaios SPT sobre a relação entre a resistência unitária nas paredes interna e externa do amostrador (fator de atrito “ a ”), necessária ao método. Também não foi encontrada na literatura valor de referência consensual que pudesse ser utilizado no presente estudo, destacando que Ferreira (2015) encontrou valores de “ a ” variando de 2,4 a 3,3 para areia silto-argilosa e de 8,8 a 13,6 para areia siltosa, Moraes (2014) identificou valores variando de 2,3 a 11,3 para argila e de 1,2 a 2,2 para silte arenoso e Zapata (2015), através de equipamento desenvolvido para seu trabalho identificou valores aproximadamente iguais à unidade.

Diante disto, admitiu-se inicialmente que o valor do atrito lateral interno (r_{li}) fosse o dobro do atrito lateral externo (r_l), isto é, fator de atrito “a” igual a 2, o que se mostrou razoável diante da compatibilidade dos resultados que serão apresentados adiante.

Cabe esclarecer que o método proposto por Aoki (2013), conforme visto na Figura 29 anteriormente, propõe o equilíbrio entre a força atuantes na ponta aberta do amostrador e a força de reação na parede interna do amostrador (R_2). Somente a partir deste equilíbrio é possível a obtenção do valor de Razão de Atrito (R_f).

Sobre isso, faz-se importante esclarecer novamente que tal equilíbrio só é garantido tomando-se como premissa que no intervalo de cravação correspondente ao N_{SPT} , o valor de r_p será sempre constante.

Além disso, é necessário admitir que em algum momento da cravação ocorrerá a formação de bucha no interior do amostrador SPT, isto é, a resultante da resistência de atrito no interior do amostrador SPT atinge, em algum momento, o valor de R_2 .

Pelo exposto, para viabilizar o método de Aoki (2013) será admitido que no início da cravação a penetração se dará de forma não embuchada até que, em algum trecho da cravação, a força de reação na parede interna do amostrador (R_2) se igualará à força atuante na ponta aberta do amostrador, neste momento a amostra embuchará. Depois do embuchamento a força atuante na ponta aberta do amostrador não se alterará até o final da cravação, sendo esta parcela da resistência estática sempre igual a R_2 .

Serão consideradas todas as hipóteses empregadas pelos autores, ou seja, utilização das equações por eles propostas, para os mesmos valores variáveis de bucha selecionadas pelo presente autor.

3.3 Estimativa de F a partir dos resultados de CPTU

Conforme já explanado, a partir dos resultados obtidos através dos métodos de Schmertmann (1979) e Aoki (2013) baseados na análise da estática do SPT, foi possível realizar comparação com os valores de resistência unitária de ponta q_c e atrito lateral f_s obtidos com ensaios CPTU. O objetivo foi a verificação da aplicabilidade dos métodos citados como possibilidade de interpretação de parâmetros físicos do

solo a partir do ensaio SPT. Além disso buscou-se melhor entendimento sobre a influência do comprimento de bucha (L_i) para cada um dos métodos e as principais diferenças entre estes.

Nesse sentido, além da análise comparativa dos valores de ponta q_t e atrito lateral f_s , buscou-se comparar os valores de resistência estática (R_s) obtido por cada método com a força necessária à cravação do amostrador SPT.

Considerando que para o banco de dados de SPT utilizado no presente estudo não foram realizados ensaios de carregamento estático do amostrador SPT, foi estimado o valor da força necessária à cravação do amostrador SPT (F) a partir dos valores de ponta q_c e atrito lateral f_s obtidos com ensaios CPTU.

Para isso, admite-se que, conforme verificado por Schmertmann (1979), a resistência unitária de ponta atuante no anel do amostrador SPT q e a resistência unitária de ponta q_c obtida no CPTU são equivalentes ($C_1 = 1$).

Da mesma forma, admitiu-se inicialmente que, conforme verificado por Schmertmann (1979), os valores da resistência de atrito unitário atuante do amostrador SPT f e o valor o atrito unitário f_s obtido no CPTU, são equivalentes ($C_2 = 1$).

Com base na equivalência entre as resistências de ambos os ensaios ($C_1=C_2=1$), é possível estimar o valor da força necessária para a cravação do amostrador SPT pela soma entre o produto das resistências q_c e f_s pelas áreas do amostrador SPT sobre qual atuam, conforme equação a seguir:

$$F = A_p \times q_c + f_s \times A_l \quad (60)$$

Vale destacar, no entanto, que o valor de f , conforme Schmertmann (1979), corresponde à uma média ponderada do atrito lateral externo e interno no amostrador SPT, enquanto o valor f_s é obtido pela resistência na área da luva do CPTU. Por esta razão, este autor entende que o valor de f_s obtido pelo ensaio CPTU esteja relacionado de forma mais próxima com o atrito externo no amostrador SPT do que com a média entre o atrito interno e externo (f). Buscando uma melhor análise sobre este ponto, também foram feitas estimativas da resistência estática (F^*) a partir dos valores de f_s e q_c , considerando as áreas compatíveis com o entendimento de Schmertmann (1979), porém, adotando-se que o valor do atrito interno seja “a” vezes o valor do atrito f_s obtido pelo CPTU.

Além disso, em análise aos métodos propostos por Schmertmann (1979) e Aoki (2013), verificou-se significativa diferença no entendimento quanto as áreas a serem consideradas.

Como já visto, Schmertmann (1979) propõe que a resistência estática (R_s) seja dada pela força média necessária a cravação do amostrador SPT no trecho correspondente ao N_{SPT} , isto é, na profundidade correspondente aos 30 cm de cravação do amostrador. Assim, quando da obtenção dos valores de atrito lateral médio f , utiliza-se no cálculo a área lateral do amostrador correspondente aos 30 cm de cravação do amostrador.

A proposta de Aoki (2013) também sugere que a resistência estática (R_s) seja estimada pela força média necessária a cravação do amostrador SPT no trecho correspondente ao N_{SPT} . No entanto, o cálculo da resistência unitária de atrito externo, r_l , considera a área lateral do amostrador SPT correspondente aos 45 cm de cravação. Entende o presente autor que esta premissa fornecerá um valor da resistência unitária de atrito lateral externo não compatível com a força média necessária para a cravação de 15 cm a 45 cm do amostrador, e conseqüentemente, não seria comparável com os valores de índice N_{SPT} utilizado no método. Este entendimento será retomado adiante quando da análise dos resultados.

Além disso, conforme se verifica na Figura 32, há significativa diferença entre as áreas utilizadas nos dois métodos para o cálculo da força resistente correspondente a ponta do amostrador. Enquanto Schmertmann (1979) considera a resistência de ponta (q) atuante em toda a projeção da ponta do amostrador SPT, AOKI propõe que a resistência de ponta (r_p) atue apenas em trecho da ponta, pois, em seu entendimento, na área tronco cônica deverá atuar a componente vertical do atrito lateral (r_l).

Por conta dessas diferenças apresentadas, o valor da força estática necessária à cravação do amostrador SPT foi estimada de duas formas, seguindo os entendimentos quanto às áreas propostas pelos autores dos métodos em estudo.

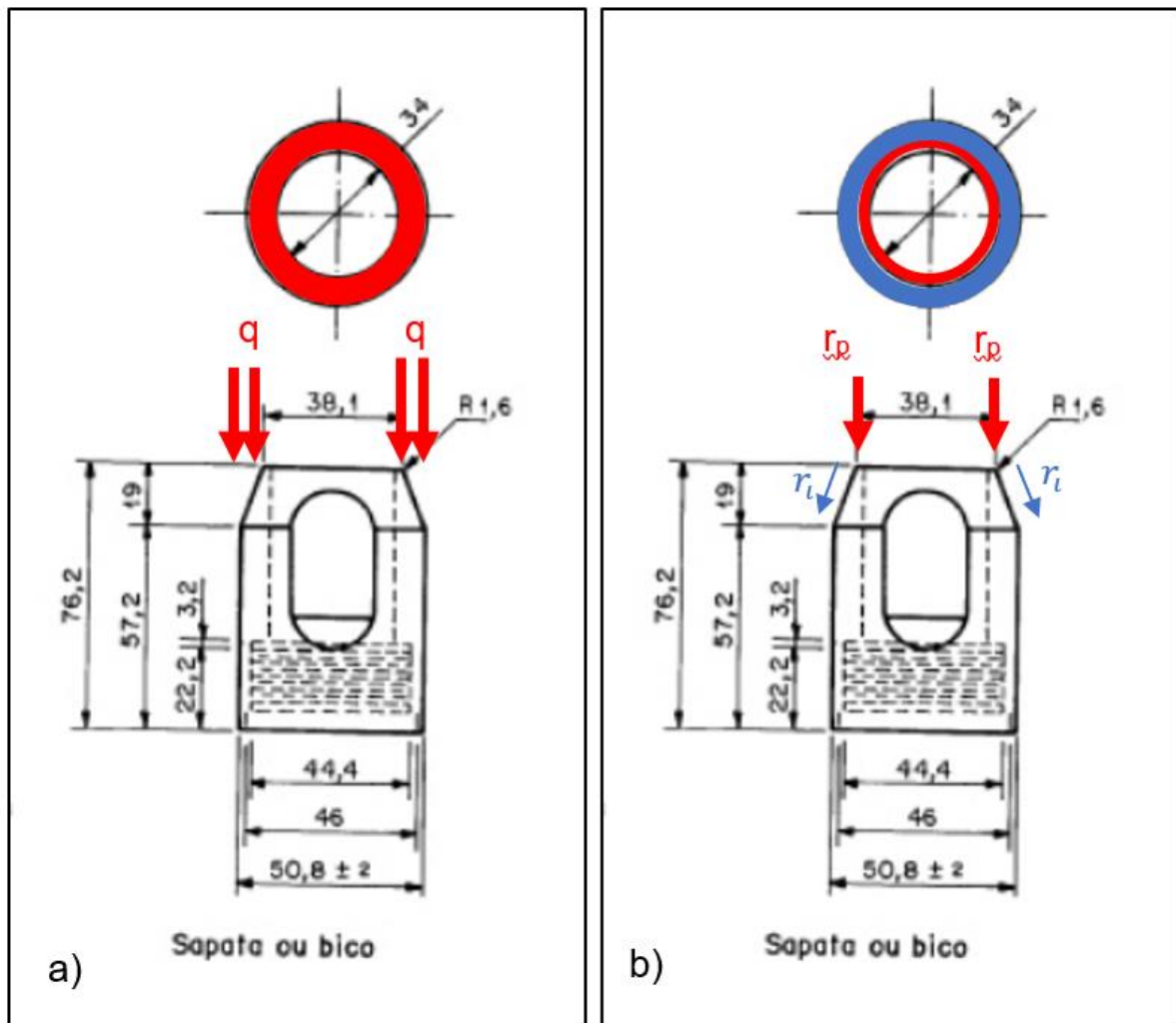


Figura 32 – Diferença entre áreas de ponta considerada pelo método de a) Schmertmann e b) Aoki.

Importante destacar que em função da variação do comprimento da bucha de solo no interior do amostrador (L_i), o valor da área lateral interna sofrerá influência, e consequentemente, os valores da força estática estimada pelo CPTU. Dessa forma, foram obtidas as forças necessárias para a cravação do amostrador SPT, a partir dos parâmetros de resistência f_s e q_c obtidos pelo CPT e considerando-se diferentes comprimentos de bucha.

A comparação destas diferentes estimativas de resistência estática poderá trazer elementos que permitam avaliar a adequação dos métodos e premissas adotadas, como se verá adiante.

4 – INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA BUCHA NO MÉTODO DE SCHMERTMAN

A adaptação da proposta de Schmertmann (1979) para a realidade dos resultados de SPT brasileiro conforme apresentada por Souza (2009) buscou a adequação dos cálculos através da consideração das medidas do amostrador SPT brasileiro.

Ainda assim, a estimativa da resistência estática do SPT apresentada na proposta de Schmertmann (1979), conforme já abordado, pode não refletir adequadamente a realidade dos ensaios realizados no Brasil, pois não consideram a situação de embuchamento de solo no amostrador, já que, à época, era comum a utilização de amostradores com variação do diâmetro interno para utilização de liners.

Através dos procedimentos descritos no item 3.1 anterior, o autor da presente dissertação buscou a adaptação da proposta apresentada por Schmertmann (1979) para diferentes situações de embuchamento, o que possibilitou o entendimento quanto a influência do comprimento de bucha para o método proposto por Schmertmann (1979).

Considerando que a variação do comprimento de bucha (L_i) a ser considerado implica em uma mudança da área interna do amostrador SPT em contato com o solo, e ainda, que a área interna em contato com o solo contribui na parcela de resistência por atrito lateral no método de Schmertmann (1979), é esperado que as diferentes medidas de bucha considerada nos cálculos tivessem alguma influência nos percentuais entre a parcela resistida pela ponta (F_e) e a parcela resistida por atrito lateral ($F_0 + F_i$) fornecidos pelo referido método.

Para diferentes valores de Razão de Atrito (R_f) variando de 0% a 8%, foi possível determinar novos percentuais entre a parcela resistida pela ponta (F_e) e a parcela resistida por atrito lateral ($F_0 + F_i$) para três diferentes comprimentos de buchas, quais sejam, $L_i = 5$ cm e $L_i = 25$ cm, correspondente a situação embuchada, e ainda, $L_i = 45$ cm, correspondente a situação não embuchada tal qual apresentado originalmente por Schmertmann (1979).

Os resultados estão representados graficamente na Figura 33 a seguir:

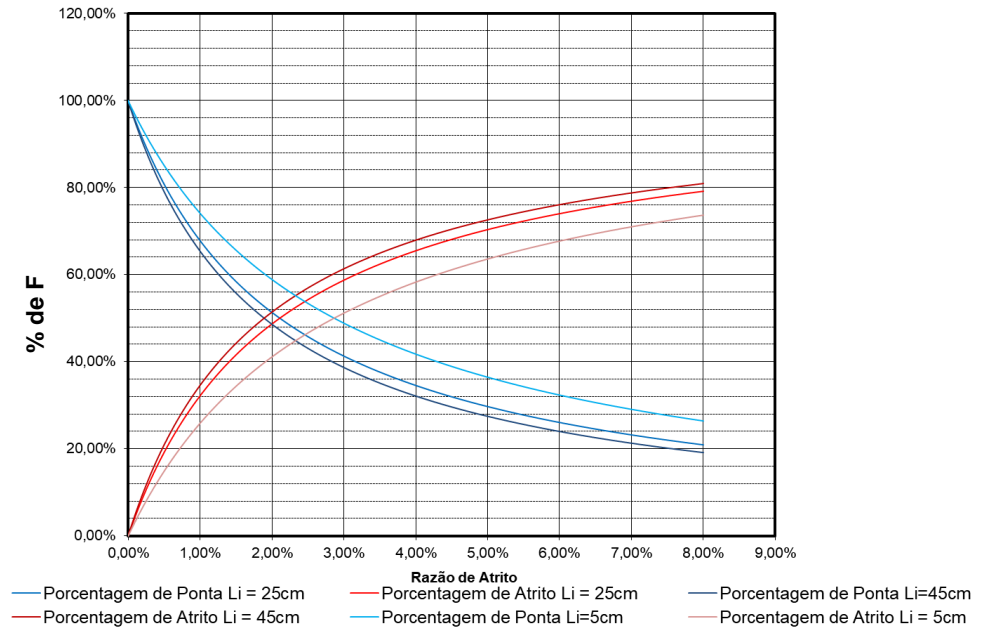


Figura 33 :Curvas correspondentes a parcela da força resistente correspondente a ponta e ao atrito, para a situação não embuchada conforme proposto por Schmertmann (1979), ($L_i=45$ cm) e para situações em que houve embuchamento (exemplos de $L_i = 25$ e $L_i = 5$ cm).

Os resultados comprovam que a consideração quanto ao fenômeno do embuchamento pode alterar significativamente os valores da parcela resistência estática que é resistida pela ponta (F_e) e a parcela resistida por atrito lateral ($F_0 + F_i$), estimadas pelo método proposto por Schmertmann (1979).

Verifica-se que, para um mesmo valor de Razão de Atrito (R_f), quanto menores os comprimentos de bucha considerados, menor será a parcela resistida por atrito lateral, uma vez que a parcela do atrito interno (F_0) será menor em função da redução de área interna. Conseqüentemente, a parcela resistida pela ponta (F_e) será maior quanto menor for o comprimento de bucha considerado.

Tais variações entre as parcelas da resistência estática influenciam diretamente nas estimativas de q_c e f_s . Portanto, a não consideração quanto o fenômeno do embuchamento e do correto comprimento de bucha (L_i), pode resultar em uma estimativa de parâmetros de resistência do solo não compatíveis com a realidade.

A medida do comprimento da bucha formada no interior do amostrador (L_i) se mostra como um procedimento importante para garantir a acurácia do método de Schmertmann (1979). Este procedimento de medida da bucha, no entanto, não é usual e é frequentemente ignorado durante a realização de ensaios SPT.

No presente estudo, em função do desconhecimento quanto ao comprimento da bucha (L_i), os 3 diferentes pares de curvas serão utilizados para a estimativa dos parâmetros q_c e f_s , sendo comparados aos resultados efetivamente obtidos através dos ensaios CPT.

Adicionalmente, em função da diferença entre as áreas utilizadas nos métodos de Schmertmann (1979) e Aoki (2013) para o cálculo da força resistente correspondente a ponta do amostrador (F_e), citado anteriormente, buscou-se verificar o método de Schmertmann (1979) considerando a área de ponta considerada pelo Aoki (2013). Como resultado, apresentado na Figura 34, tem-se uma nova distribuição entre as parcelas da resistência estática resistida pela ponta (F_e) e a parcela resistida por atrito lateral ($F_0 + F_i$), na qual a parcela lateral passa a ter maiores valores em relação a parcela da ponta.

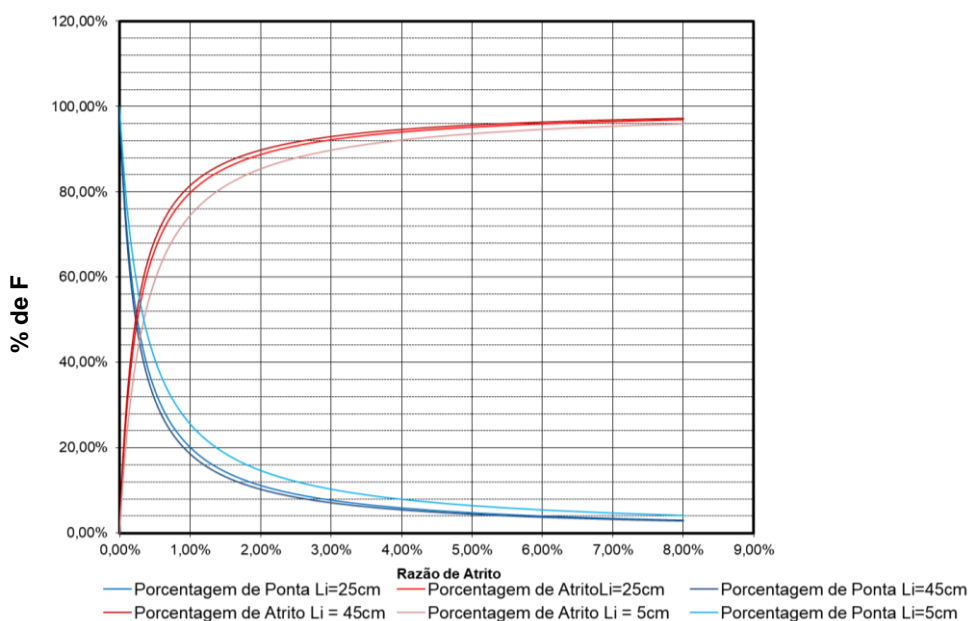


Figura 34 :Adaptação das curvas correspondentes a parcela da força resistente correspondente a ponta e ao atrito, para a situação não embuchada conforme proposto por Schmertmann (1979), ($L_i=45$ cm) e para situações em que houve embuchamento (exemplos de $L_i = 25$ e $L_i = 5$ cm), considerando a área de ponta anelar de acordo com Aoki (2013).

Essa nova distribuição entre as parcelas da resistência estática será adotada posteriormente na comparação entre os valores estimados e os medidos pelo CPT, para a avaliar qual a área mais adequada de ponta a ser considerada no método de Schmertmann (1979).

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Através das propostas apresentadas por Schmertmann (1979) e Aoki (2013) e dos procedimentos detalhados no item 3 do presente estudo, foram realizadas estimativas de valores de resistência unitária de ponta e da resistência unitária por atrito a partir de resultados de SPT extraídos do banco de dados descritos no item 2.

Todos os valores calculados puderam ser comparados aos resultados de resistência de ponta q_t e da resistência por atrito f_s obtidos a partir de resultados de CPTU.

Ao todo, foram utilizados 27 pares de verticais SPT e CPT de 4 diferentes campanhas de investigação geotécnica que forneceram 378 pontos a serem analisados e interpretados.

Os cálculos foram realizados para cada ponto, considerando 9 diferentes possibilidades de comprimento de bucha (L_i) formada no interior do amostrador SPT objetivando interpretar adequadamente a sua influência nos métodos citados.

Através do ajuste entre os resultados estimados pelos métodos e dos valores efetivamente medidos pelo CPTU, buscou-se avaliar as informações consideradas para os métodos, tais como, eficiência (η), razão entre resistência dinâmica e estática (β), razão entre atrito lateral interno e externo (a), peso das hastes (W_D), além, é claro, do valor do comprimento da bucha (L_i).

Contudo, considerando que os resultados estimados são função das diversas variáveis citadas, não é possível analisar de forma isolada cada uma das variáveis responsáveis pelas incertezas encontradas. Ainda assim, foi possível identificar padrões de comportamento nos resultados obtidos que auxiliaram o entendimento quanto aos métodos em estudo e a influência das variáveis consideradas.

Embora o estudo e análise tenha sido realizado para todos os 378 pares de resultados, para simplificar a explanação, serão apresentados nos subitens a seguir somente a análise e comentários feitos para os 18 resultados do ensaio SPT15 e CPTU 04, especialmente quanto às conclusões que se repetiram nos demais ensaios estudados. A escolha da vertical do ensaio SPT15 e CPTU 04 se deveu, principalmente, ao fato de se dispor de valores de N_{SPT} a cada 0,5 m, o que resulta numa continuidade de resultados mais próxima ao perfil do CPTU, além de conter resultados para camadas de argilas e areias. Os resultados dos demais pontos estão apresentados no Anexo B.

5.1 Análise de q_c estimado pelo Método de Schmertmann (1979) e Aoki (2013)

Nos gráficos da Figura 35 a seguir estão apresentados os valores de q_c inicialmente estimados pelos métodos propostos por Schmertmann (1979), representados por 3 curvas azuis no gráfico da esquerda, e por Aoki (2013), representado por 3 curvas verdes no gráfico da direita, ambos obtidos a partir do ensaio SPT 15, da campanha realizada na Baixada do Jacareí-RJ, conforme já descrito. Os 3 diferentes tons utilizados, do escuro ao mais claro, representam a situação de $L_i = 45$ cm (não embuchado), $L_i = 25$ cm e $L_i = 5$ cm, respectivamente.

Também estão representados os valores de q_t efetivamente medidos pelo ensaio CPTU 04, representado nos dois gráficos pelos dados em vermelho.

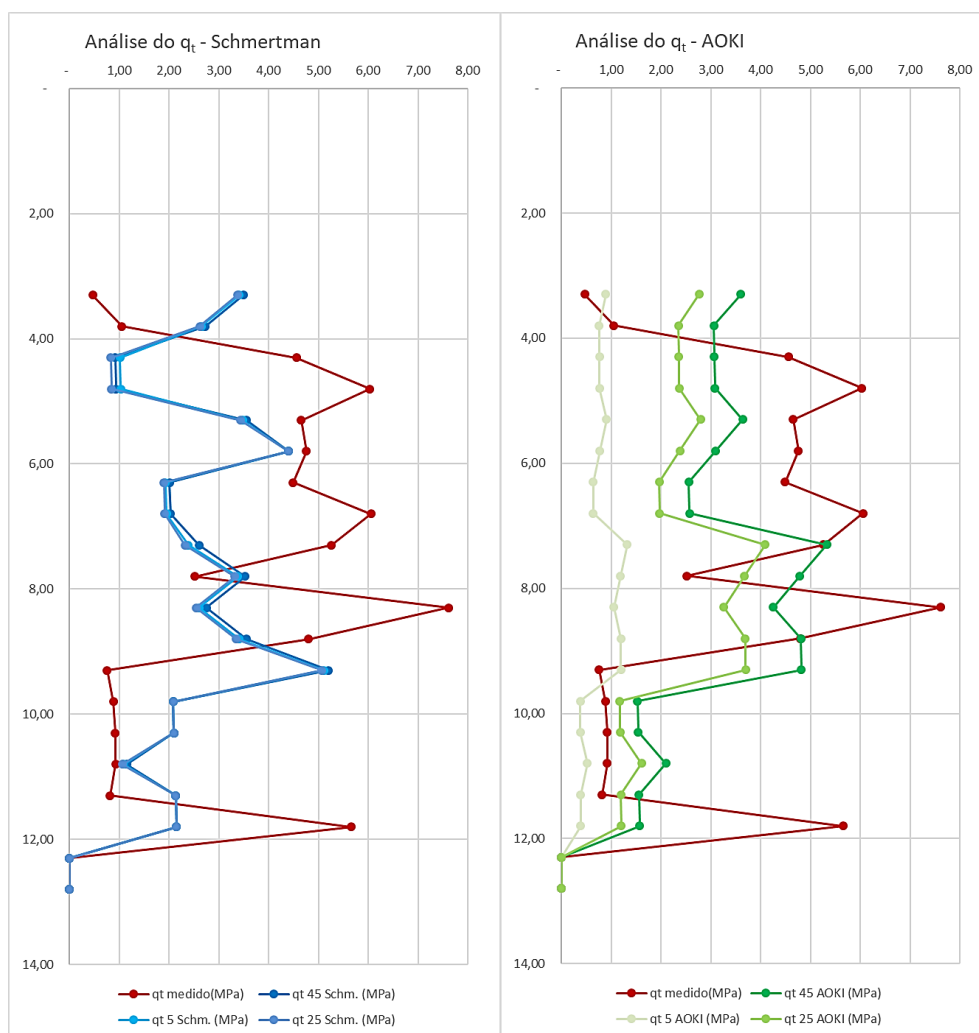


Figura 35 :Exemplo de comparação entre as estimativas de resistência de ponta (q_c) de Schmertmann (1979) e Aoki (2013) com os valores medidos por CPTU – SPT15 x CPTU 04

Estes resultados foram obtidos conforme procedimentos de cálculos e valores já detalhados anteriormente e apontam para uma razoável compatibilidade entre os valores estimados e os valores efetivamente medidos.

De início, foi possível identificar que para a estimativa de q_c realizada pelo método de Schmertmann (1979) não houve significativa variação em função do comprimento de bucha considerado. De fato, a variação na parcela da resistência estática resistida pela ponta (F_e) varia pouco, no máximo 10%, como indicou as Figura 33 e Figura 34, enquanto a área da ponta não se altera, isto resultou em pouca variação dos valores estimados de q_c .

Por outro lado, existe significativa variação nos valores de q_c estimados pelo Método de Aoki (2013) ao se variar o comprimento de bucha (L_a). Tal fato era esperado, uma vez que o valor de q_c estimado por Aoki (2013) depende diretamente da razão de atrito (R_f) e esta é obtida com base no valor do comprimento da bucha (L_a), vide novamente a (45) a seguir:

$$R_f = \frac{D_{int}}{4 \times a \times L_a} \quad (45)$$

Verifica-se, pela estimativa de Aoki (2013) apresentada no gráfico anterior, que quanto menor o comprimento da bucha, menores serão os valores estimados de q_c . Este comportamento está coerente com a equação acima, pois quanto menor o valor do comprimento da bucha (L_a) considerado, maior será a razão de atrito, e conseqüentemente, menor será a parcela de ponta em relação ao atrito lateral r_l calculado.

Uma análise mais detalhada dos resultados referentes ao SPT15 x CPTU04, sugere que os resultados estimados se ajustam melhor aos valores medidos pelo CPTU defasando estes de um intervalo de 1 metro acima do que foi adotado. Além disso, na profundidade 11,80 m o ensaio de piezocone indica a ocorrência de uma camada resistente ainda não atingida pelo SPT.

A hipótese inicial investigada para explicar tal defasagem foi a diferença entre a escala dos ensaios, uma vez que o diâmetro externo do amostrador SPT (5,08 cm) é superior ao diâmetro externo do CPT (3,60 cm). Velloso e Lopes (2014), afirmam que o cone, com menor dimensão, precisa de uma menor penetração, na camada

resistente, para desenvolver toda a resistência de ponta. Raciocínio análogo ocorre quando se passa de uma camada resistente para uma camada fraca.

O efeito de escala costuma ser considerado pelo fator β , utilizado por Velloso (1981) e designado como fator da dimensão da base, sendo calculado pela seguinte equação:

$$\beta = 1,016 - 0,016 x \frac{D_{estaca}}{D_{cone}} \quad (61)$$

Assumindo-se o D_{estaca} correspondente ao diâmetro do amostrador SPT, tem-se que:

$$\beta = 1,016 - 0,016 x \frac{5,08}{3,60} = 0,99 \quad (62)$$

O valor de $\beta = 0,99$, mostra que o fator de escala é mesmo próximo de 1, confirmando a premissa de Schmertmann (1979). Como a figura de ruptura da resistência mobilizada pelo cone é de 8B, acima da ponta, e 3,5B, abaixo, a diferença de profundidade entre os valores máximos de resistência de ponta do SPT e do cone é da ordem de:

$$\Delta z = 3,5 (0,0508 - 0,036) \text{ a } 8 (0,0508 - 0,036) = 0,05 \text{ a } 0,11m \quad (63)$$

O fator de escala não explica, portanto, as diferenças encontradas entre os máximos, que sugerem valores de Δz superiores aos calculados acima.

Buscou-se então investigar a hipótese quanto a existência de um desnível de aproximadamente 1 metro entre a cota de início de cada ensaio. No relatório de ensaio CPTU, no entanto, há informação de que ambos os ensaios foram realizados na mesma cota, ou seja, em terreno planificado.

Buscando verificar tal divergência, foram realizados novos cálculos admitindo-se a existência de desnível de 1 metro entre ensaios, resultando nos seguintes gráficos da Figura 36.

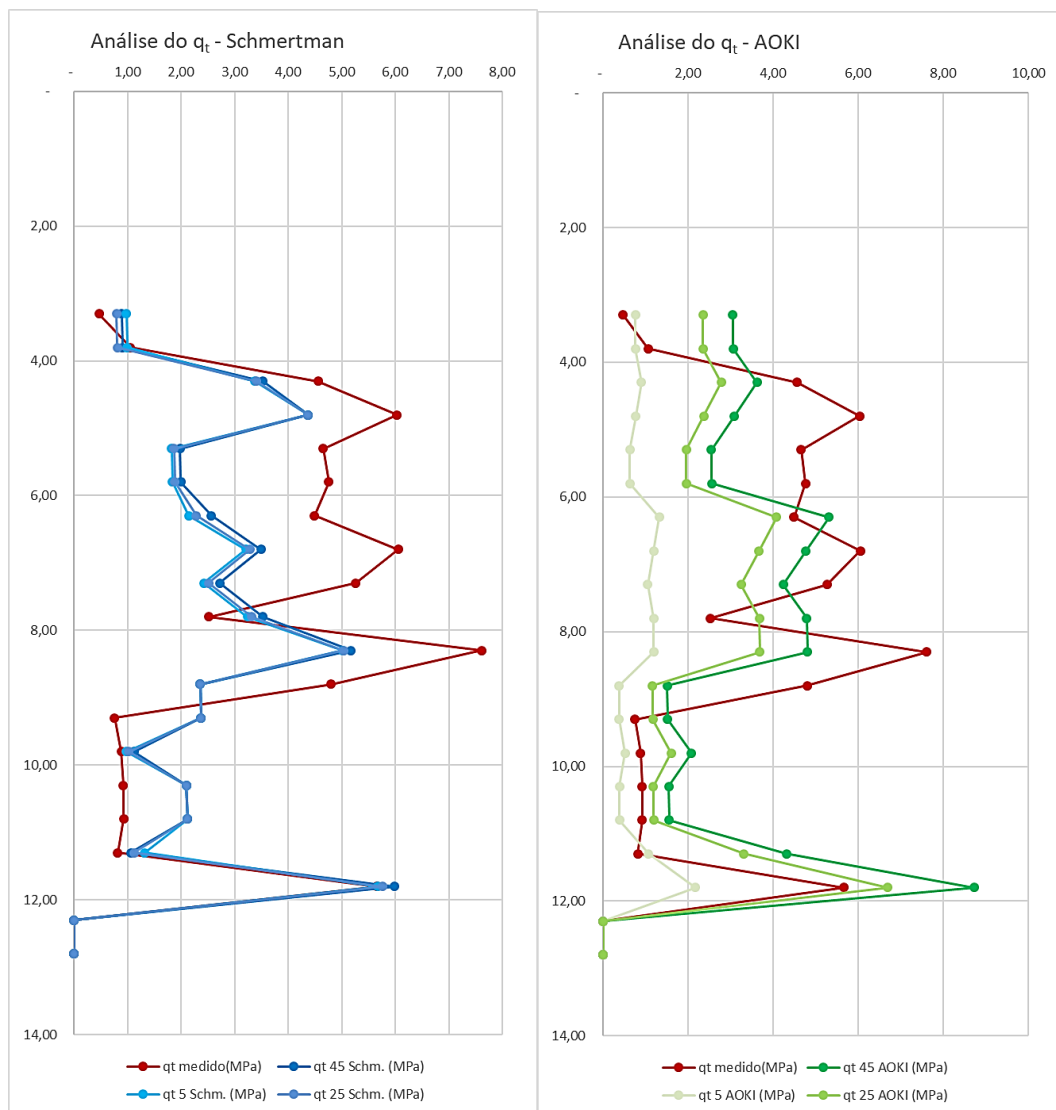


Figura 36 :Comparação entre as estimativas de resistência de ponta (q_c) de Schmertmann (1979) e Aoki (2013) com os valores medidos do CPTU, vertical SPT15 x CPTU 04 – Ajuste de desnível em 1 metro

Como se observa, houve um ótimo ajuste do padrão, ao longo da profundidade, dos resultados estimados com os valores medidos de q_t , especialmente em relação aos valores estimados por Schmertmann (1979). Esta ocorrência corrobora para que, diferentemente do que consta no relatório do ensaio do CPTU, houve, muito provavelmente, uma diferença entre as cotas de realização dos ensaios SPT e CPTU. Outra possibilidade, em se confirmando as cotas do topo dos furos, seria uma declividade do perfil equivalente a uma diferença de 1 m no intervalo em planta entre as verticais dos 2 furos.

Fica evidenciada a importância quanto à confiabilidade e acurácia das informações provenientes dos ensaios SPT e CPTU para garantir a correta utilização dos métodos propostos por Schmertmann (1979) e Aoki (2013).

Como já abordado anteriormente, as estimativas apresentadas dependem de algumas variáveis, tais como, eficiência (n), razão entre a resistência dinâmica e estática (β), razão entre atrito lateral interno e externo (a), peso das hastes (W_D) e do valor do comprimento da bucha (L_i).

Portanto, ajustar os resultados de q_c estimados aos valores medidos com base em apenas uma das variáveis pode não refletir fielmente a realidade estudada. Ainda assim, foi possível identificar clara distinção entre valores estimados para solos argilosos e solos arenosos.

A classificação do solo pôde ser obtida a partir das informações constantes nos relatórios de sondagem SPT, conforme Figura 37.

Em conformidade com o que foi estabelecido por Schmertmann (1979), para os solos argilosos, adotou-se inicialmente o valor de β (razão entre a parcela dinâmica e a estática necessária à penetração do amostrador) de 1,64 e, para os solos arenosos, 1,29.

Foi verificado que, em geral, para as camadas de argila o valor estimado de q_c por Schmertmann (1979) supera o valor experimental. Por outro lado, para as areias o valor estimado se mostrou inferior ao medido. Este fato sugere que o valor de β para as argilas seria ainda maior para a camada de argila local e inferior, no caso das areias. De fato, o mais provável, em areias, é o não embuchamento da amostra.

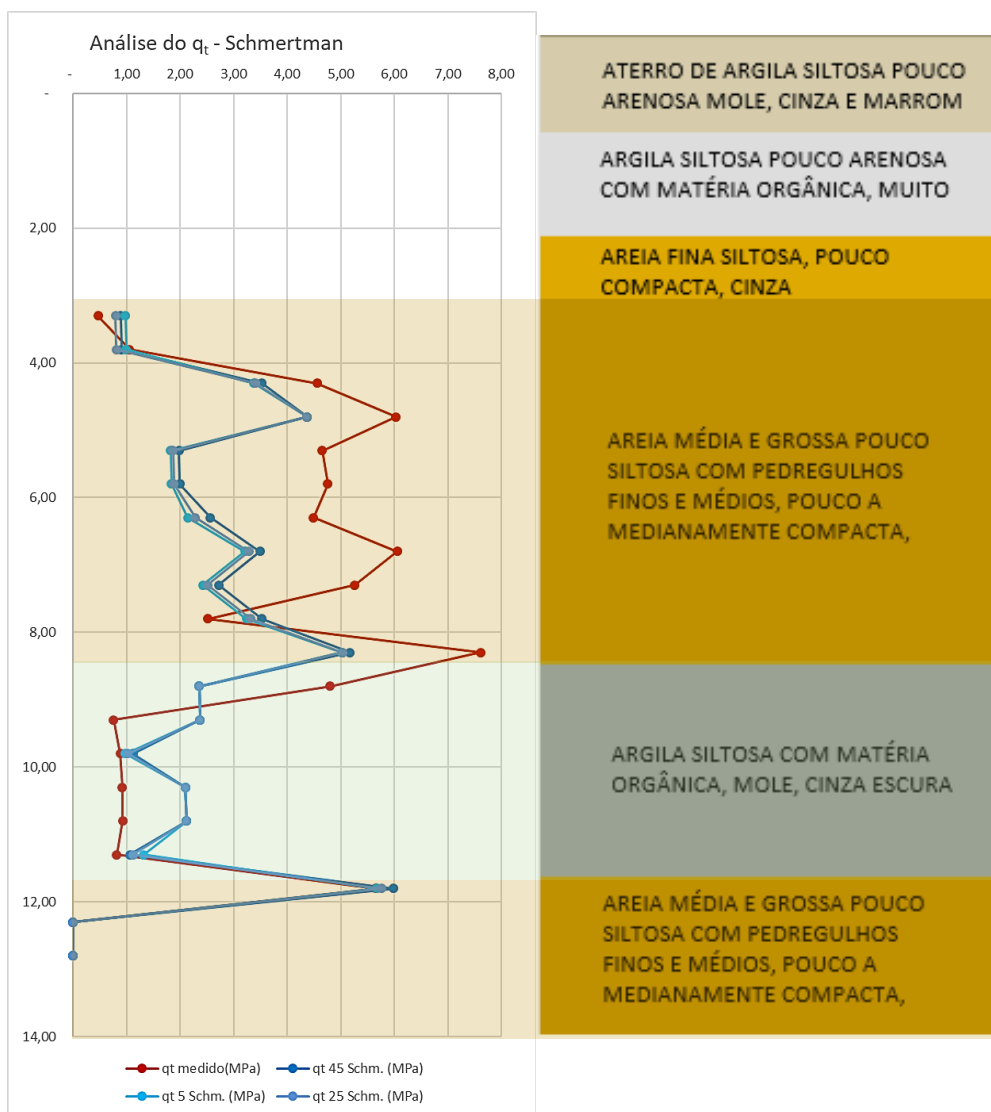


Figura 37 :Comparação do padrão de comportamento das camadas de solo arenosos e argilosos quanto tipo de solo quanto às resistências de ponta (q_c) estimadas por Schmertmann (1979) e os medidos nas verticais SPT15 x CPTU 04

Uma vez que a única diferença entre as estimativas em solos de comportamento argiloso e arenoso, nos cálculos segundo o procedimento de Schmertmann, é o parâmetro β , este parâmetro se mostra como determinante no comportamento observado. Este parâmetro é análogo ao amortecimento em carregamentos dinâmicos, maior em argilas e menor em areias.

Observa-se assim, como já sugerido anteriormente, que o valor de 1,29 para as areias, proposto por Schmertmann (1979), esteja superior à realidade. Em outras palavras, a razão entre a parcela dinâmica e a estática necessária à penetração do

amostrador para as areias pode não ser tão grande quanto o que foi considerado pelo autor do método.

De acordo com Neves e (2004) e Aoki et al. (2007), em solos arenosos a força resistente no ensaio dinâmico é aproximadamente igual à força resistente no ensaio estático. Nesse sentido, buscou-se a nova simulação dos resultados de Schmertmann (1979) com a consideração de $\beta = 1$ para as areias (Figura 38), isto é, considerando que para as areias não há diferença entre a resistência dinâmica e a estática.

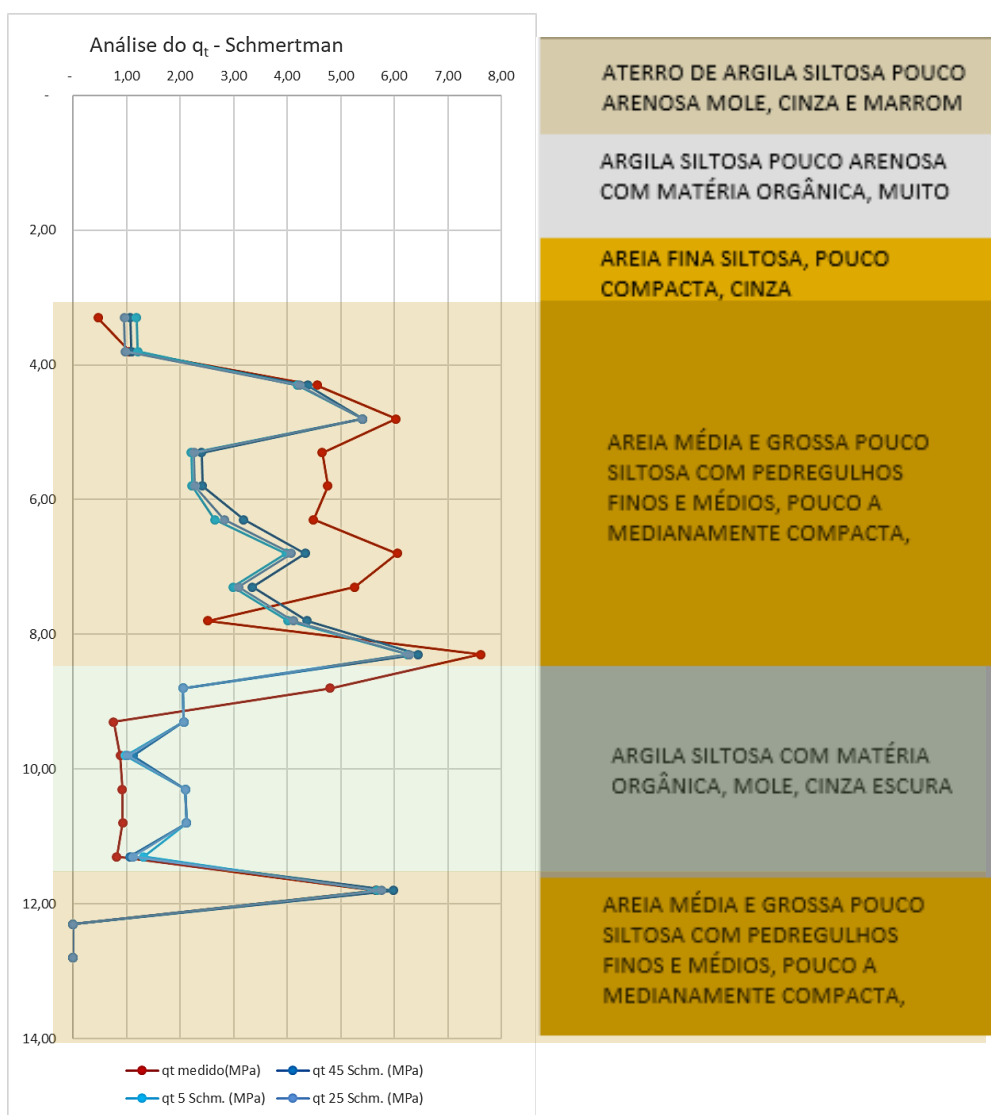


Figura 38 : Comparação do padrão de comportamento das camadas de solo arenosos e argilosos quanto tipo de solo quanto às resistências de ponta (q_c) estimadas por Schmertmann (1979) e os medidos nas verticais SPT15 x CPTU 04, com ajuste de $\beta = 1$ para as areias.

Verificou-se uma melhor aproximação dos resultados de q_c estimado aos medidos pelo CPTU para a camada de areia, quando se considerou $\beta = 1$, reforçando o entendimento apresentado por Neves e (2004) e Aoki et al. (2007) de que a força resistente no ensaio dinâmico é aproximadamente igual à força resistente no ensaio estático.

Por outro lado, o comportamento verificado para as camadas de argila indica que o valor de 1,64, proposto por Schmertmann (1979), esteja inferior à realidade. Em outras palavras, a razão entre a parcela dinâmica e a estática necessária à penetração do amostrador para as argilas pode ser superior ao que foi considerado pelo autor do método ($\beta = 1,64$).

Em função da pouca variação nos valores de q_c obtidos pelo método de Schmertmann (1979) não foi possível interpretar a influência do comprimento da bucha no interior do amostrador (L_i). Entretanto, através dos resultados obtidos pela proposta de Aoki (2013) tal análise se tornou possível, conforme Figura 39.

Interessante notar na Figura 39 a diferença no comportamento da camada de argila e da camada de areia no que se refere ao comprimento da bucha (L_i). Verificou-se que para os solos arenosos os resultados medidos pelo CPTU se aproximam ou são superiores aos valores estimados por Aoki (2013) para a situação de comprimento de bucha de 45 cm, isto é, indicando situação não embuchada. Para a camada de argila, os valores medidos pelo CPTU se situam, em geral, entre o intervalo dos valores estimados para a situação de embuchamento, com bucha reduzida.

Tal resultado corresponde ao comportamento usualmente verificado em ensaios SPT realizados em argilas e areias. É frequente a ocorrência de comprimentos maiores de amostras recuperadas em areias, compatível com o não embuchamento, e pequenos comprimentos de amostra recuperada em camadas de argila, com formação de embuchamento nas amostras.

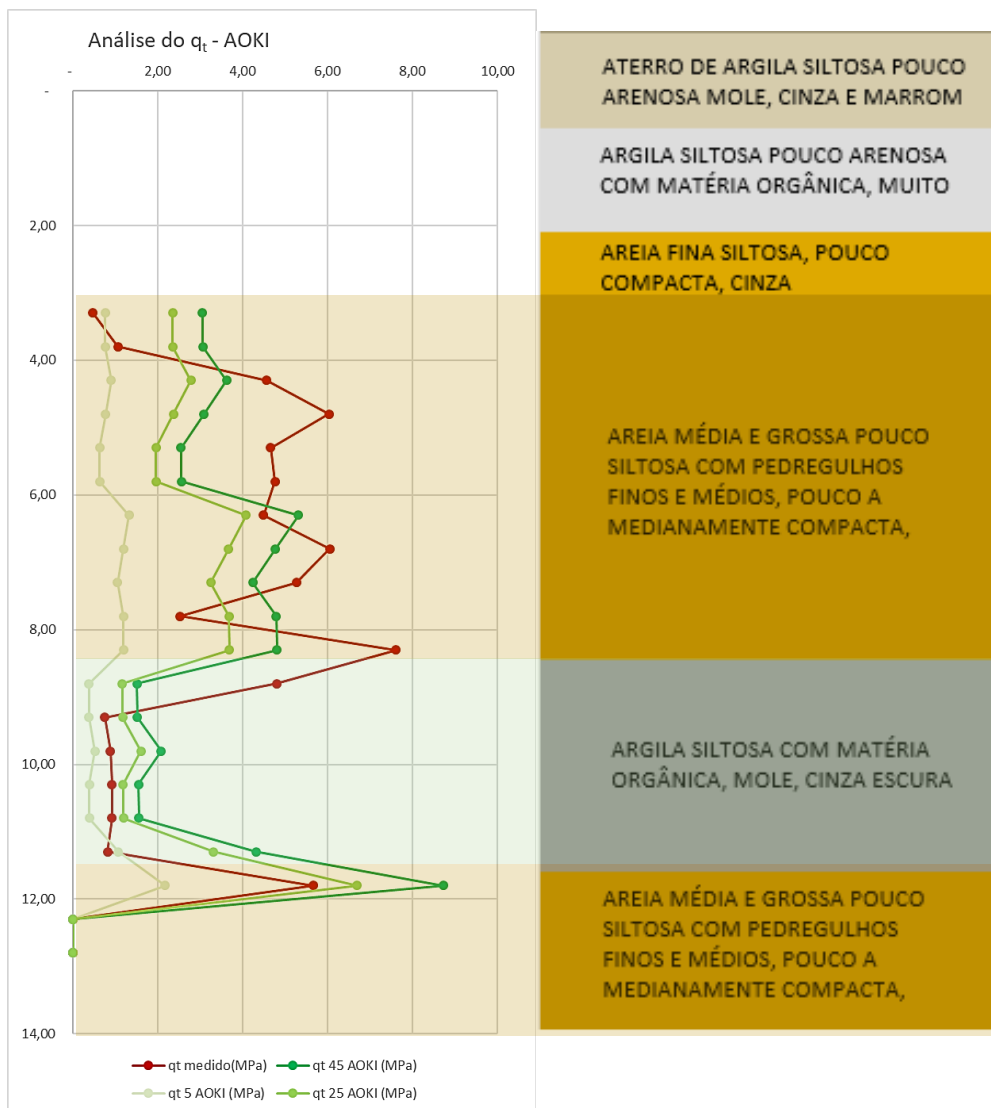


Figura 39 :Exemplo de análise aos resultados de resistência de ponta (q_c) estimadas por Aoki (1979) e os medidos por CPTU em função do comprimento de bucha (L_i) – SPT15 x CPTU 04

A Figura 40 pode ser analisada quanto um possível ajuste da melhor relação entre o atrito lateral unitário interno e externo “ a ”, utilizado na estimativa segundo a proposta de Aoki (2013). Considerando a grande variabilidade dos valores de a sugeridos na literatura, conforme já citado, buscou-se avaliar os resultados obtidos pelo método de Aoki para valores além da faixa de variação de a entre 1 e 3, conforme apresentado a seguir.

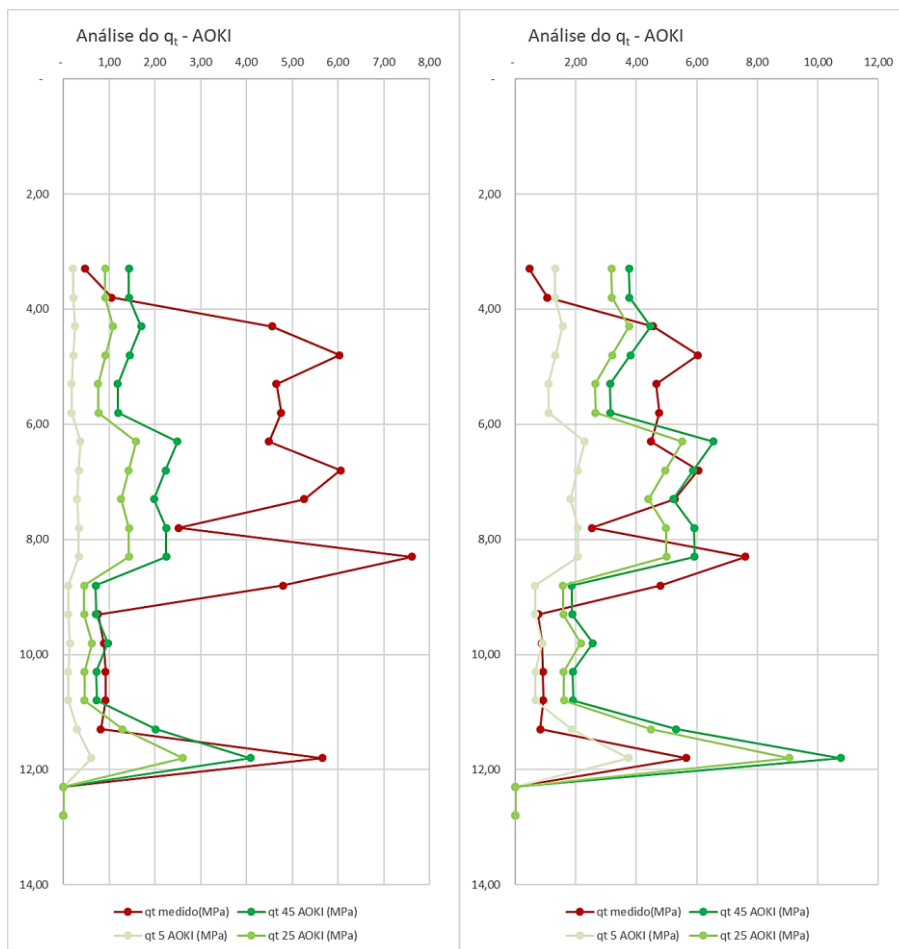


Figura 40 :Exemplo de análise dos resultados de resistência de ponta (q_c) estimadas por Aoki (2013) e os medidos por CPTU em função da variação do parâmetro “a”, sendo $a=0,5$ no gráfico da esquerda e $a=4$ no da direita– SPT15 x CPTU 04

Conforme verifica-se no gráfico da esquerda, ao se considerar a hipótese de a com valor de 0,5, os valores estimados de q_c para a camada de argila apontam para a situação de não embuchamento. Por outro lado, no gráfico da direita, ao se adotar valores superiores a 4, os valores de q_c estimados para a camada de argila, convergem para a formação de bucha com comprimento menores do que 5 cm.

Sabe-se que nenhuma das duas situações é usualmente verificada na amostragem de SPT, e, portanto, há indicativos de que a razão de atrito a no valor de 2, tal qual proposta pelo autor do método, parece ser adequada. Devendo-se ressaltar que os valores de a para solos argilosos encontrados por Morais (2014) são superiores à 2.

Buscou-se avaliar também a influência na variação do parâmetro C_2 , utilizado na proposta de Schmertmann (1979), uma vez que o referido autor recomenda $C_2 = 1$

para cones elétricos e $C_2 = 0,7$ para cones mecânicos. Embora tenha-se a informação de que os resultados tenham sido obtidos com cone elétrico, realizou-se estimativa com $C_2 = 0,7$; no entanto, tal variação também não se mostrou significativa para a estimativa dos valores de q_c .

Quanto à adaptação do método de Schmertmann (1979) para a área de ponta considerada por Aoki (2013), conforme Figura 32, esta não se mostrou razoável, uma vez que os valores de q_c estimados passaram a ser muito superiores aos valores medidos pelo CPTU, vide Figura 41.

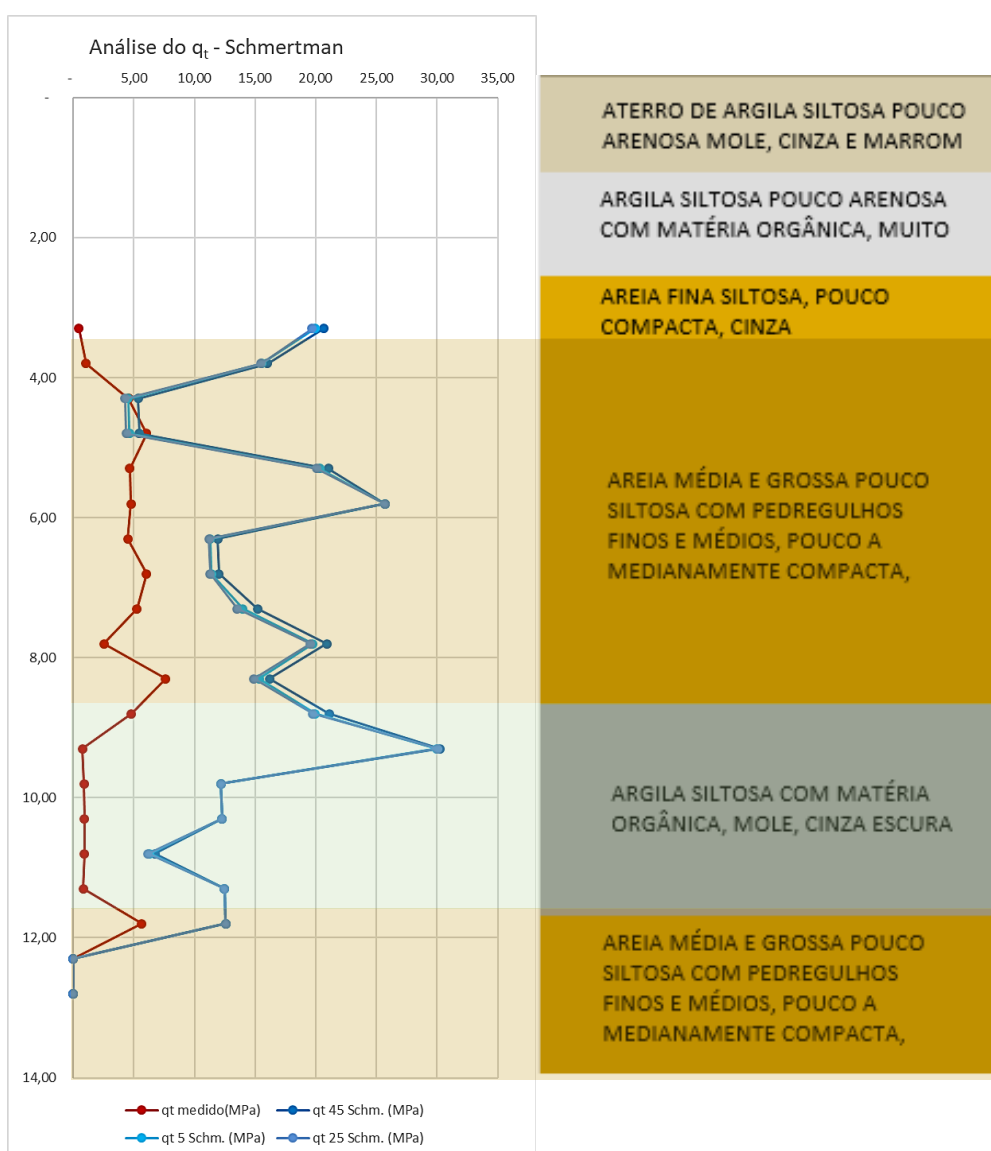


Figura 41 :Exemplo de análise do comportamento por tipo de solo quanto aos resultados de resistência de ponta (q_c) estimadas por Schmertmann (1979) e os medidos por CPTU – SPT15 x CPTU 04

A área de ponta considerada por Aoki (2013) não se aplica, portanto, ao método apresentado por Schmertmann (1979), não cabendo qualquer adaptação neste sentido.

Os métodos de Schmertmann (1979) e Aoki (2013), de forma geral, forneceram estimativas de q_c próximas entre si, além de estarem aproximadamente compatíveis com os resultados medidos por ensaios CPTU, conforme sobreposição de resultados a seguir:

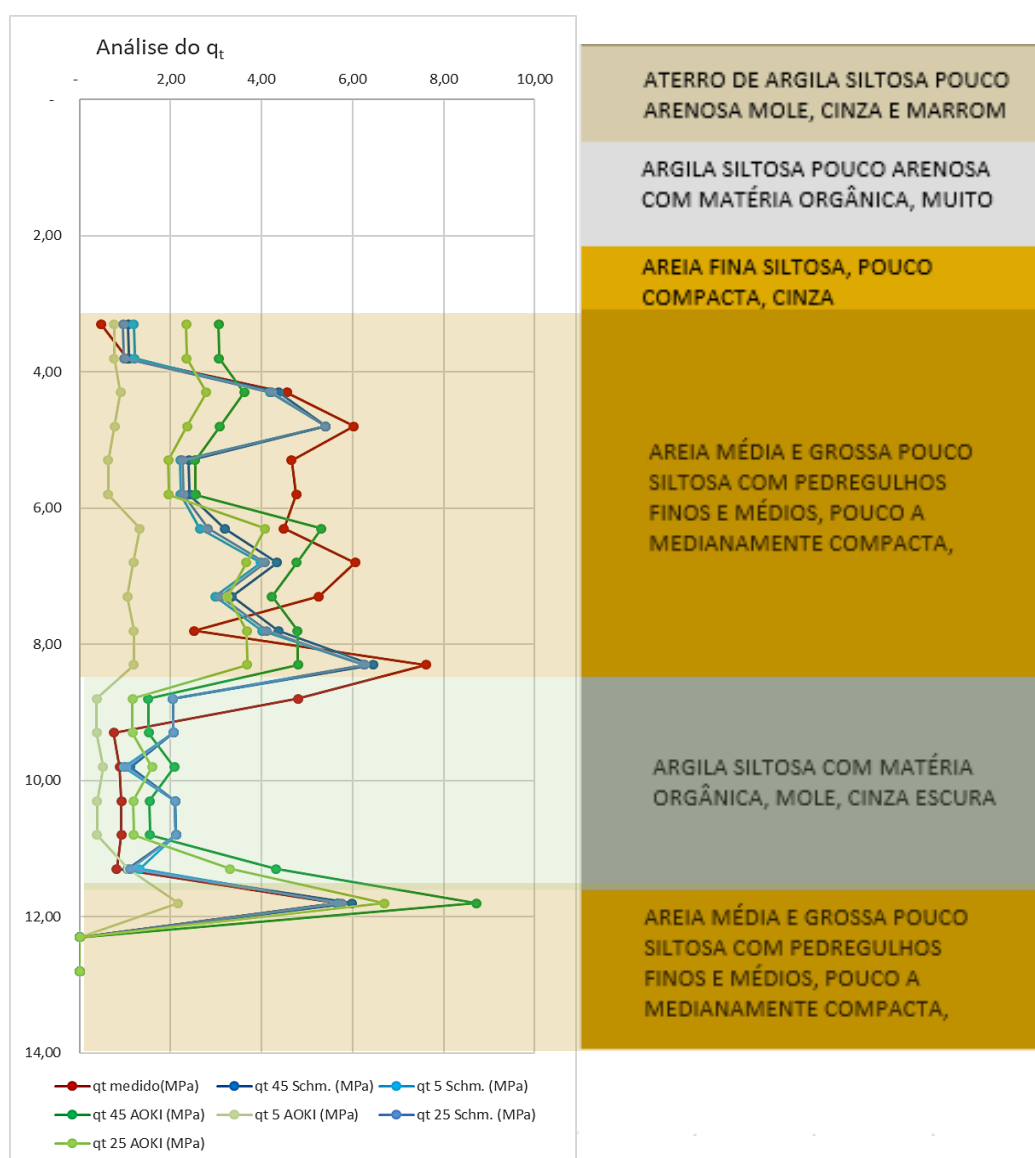


Figura 42 :Exemplo de análise dos resultados de resistência de ponta (q_c) estimadas por Schmertmann (1979), Aoki (2013) e os medidos por CPTU – SPT15 x CPTU 04

Quanto ao padrão de variação de q_c com a profundidade, no trecho em areia a os valores estimados por Schmertmann e por Aoki, em geral, mostram boa compatibilidade aos dados experimentais, especialmente aos valores obtidos correspondentes a situação de não embuchamento ($L_i = 45$ cm). Por outro lado, no trecho em argila o padrão de comportamento, ao longo da profundidade, obtido por Aoki (2013) melhor reproduz o comportamento experimental, principalmente ao se considerar buchas de pequeno comprimento. Quanto menor o comprimento interno da bucha, mais uniforme a variação da resistência de ponta unitária com a profundidade. Outra observação digna de nota é a variação brusca no padrão de comportamento quanto muda a natureza do solo, indicando a variação brusca do comportamento embuchado para não embuchado e vice-versa.

Os resultados mostram que a tentativa de análise estática do ensaio SPT revela sua capacidade de vislumbrar informações ainda mais relevantes, ao projetista de fundações, com recursos além daqueles que têm sido empregados em sua utilização continuada na prática da história das fundações no Brasil.

O autor, neste seu estudo, observa que, com a continuidade de estudos nesta linha, muitos outros recursos do ensaio podem vir a ser revelados pela incorporação da medida da eficiência no topo do amostrador, registro do comprimento da bucha, ensaios de natureza estática e dinâmica, após penetração. O autor entende que esta ferramenta tão simples e robusta ainda tem muito a auxiliar a melhor conhecer sobre a interpretação de parâmetros de resistência do solo a partir da interpretação mais apurada dos resultados dos registros dos ensaios SPT.

5.2 Análise de f_s estimado pelo Método de Schmertmann (1979) e Aoki (2013)

Nos gráficos da Figura 43 a seguir estão apresentados os valores de f_s estimados pelos métodos propostos por Schmertmann (1979), representados por 3 curvas azuis no gráfico da esquerda, e por Aoki (2013), representado por 3 curvas verdes no gráfico da direita, ambos obtidos a partir do ensaio SPT 15, da campanha realizada na Baixada do Jacaré-RJ, conforme já descrito. Os 3 diferentes tons utilizados, do escuro ao mais claro, representam a situação de $L_i = 45$ cm (não embuchado), $L_i = 25$ cm e $L_i = 5$ cm, respectivamente.

Também estão representados os valores de f_s efetivamente medidos pelo ensaio CPTU 04, representado nos dois gráficos pelos dados em vermelho.

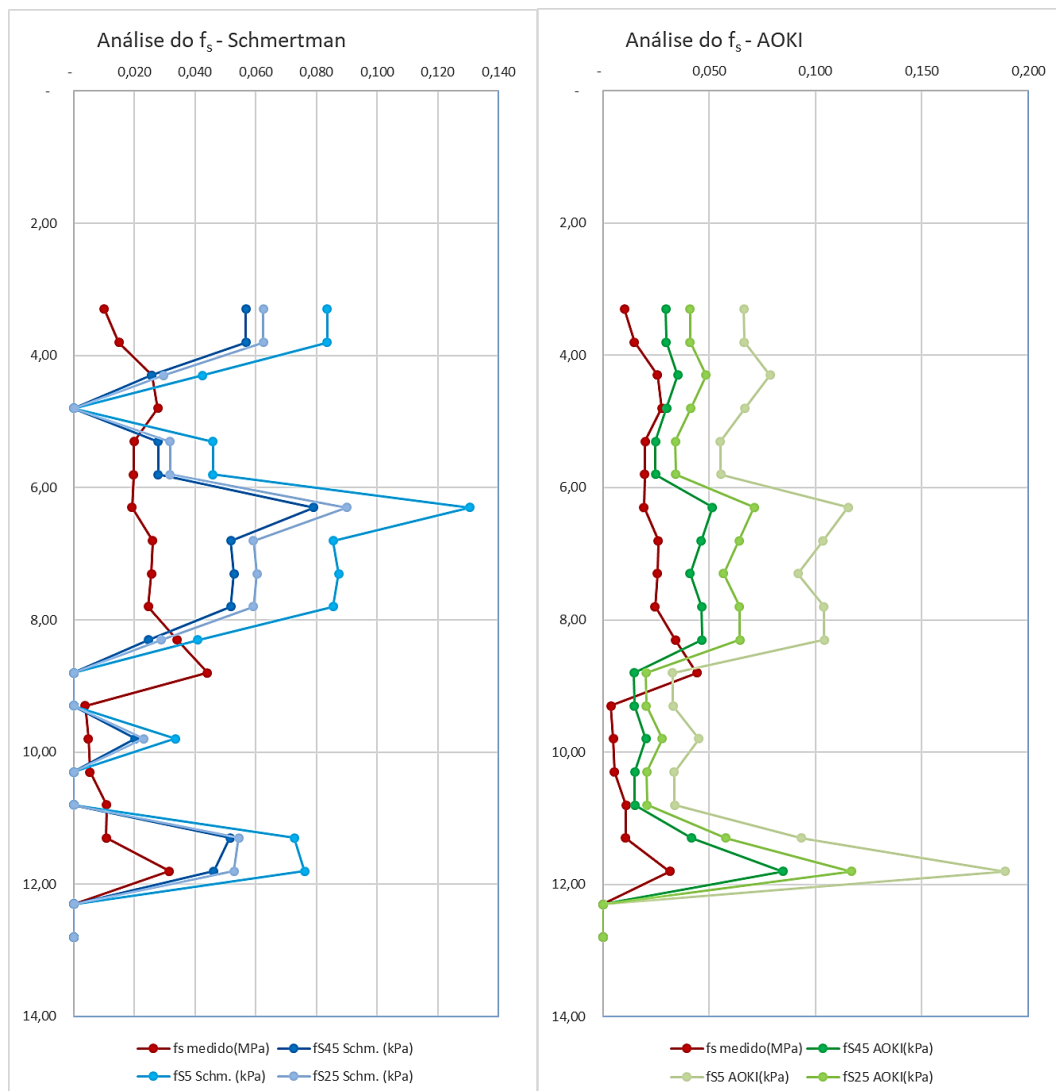


Figura 43 :Comparação entre as estimativas de atrito lateral (f_s) de Schmertmann (1979) e Aoki (2013), para o SPT15 com os valores medidos pelo CPTU 04

Cumpra esclarecer que os valores acima apresentados já contemplam o ajuste de 1 metro de desnível identificado entre o ensaio SPT 15 e o CPTU 04, conforme abordado no item anterior, além de incorporarem o valor de $\beta = 1$ para as areias.

Foi possível identificar que para a estimativa de f_s realizada pelo método de Schmertmann (1979) houve variação em função do comprimento de bucha considerado, de forma que quanto menor o comprimento de bucha (L_i) maiores serão os valores de f_s . De fato, ao reduzir o comprimento de bucha (L_i) a força total resistida

por atrito ($F_0 + F_i$) variará pouco, enquanto a área lateral interna será consideravelmente reduzida, resultando em valores de f_s cada vez maiores.

Também é verificada a variação nos valores de f_s estimados pelo Método de Aoki (2013) ao se variar o comprimento de bucha (L_a). Tal fato também era esperado, uma vez que o valor estimado de f_s representa o valor do atrito externo r_l , o qual correlaciona-se inversamente ao valor do comprimento da bucha (L_a), conforme verifica-se através da Equação (50) a seguir.

$$r_l = \frac{R_D + W_h}{\pi \times D_{ext}(L_{ext} - L_p) + \pi \times D_{int} \times a \times L_a + \frac{\pi}{4} \times \frac{(D_p^2 - D_{int}^2)}{R_f} + S_L \times \frac{L_p}{L}} \quad (50)$$

Conforme verifica-se nos gráficos, os valores estimados de f_s por ambos os métodos são superiores aos valores efetivamente medidos. No caso específico do valor de f_s estimado pelo método de Schmertmann (1979), é importante lembrar que este representa uma média entre o atrito interno e externo no amostrador SPT. Por outro lado, o valor de f_s medido pelo CPTU, é resultado da força de atrito exercida na luva do piezocone, e, portanto, deve se correlacionar melhor à parcela de atrito externo exercida no amostrador SPT.

Através dos valores das áreas do amostrador SPT e, adotando-se a razão entre o atrito interno e externo de $a = 2$, foi possível calcular a parcela de f_s estimada por Schmertmann (1979) correspondente ao valor do atrito lateral exercida exclusivamente na parte externa do amostrado SPT, o qual, será denominado de f_{se} , conforme apresentado na Figura 44.

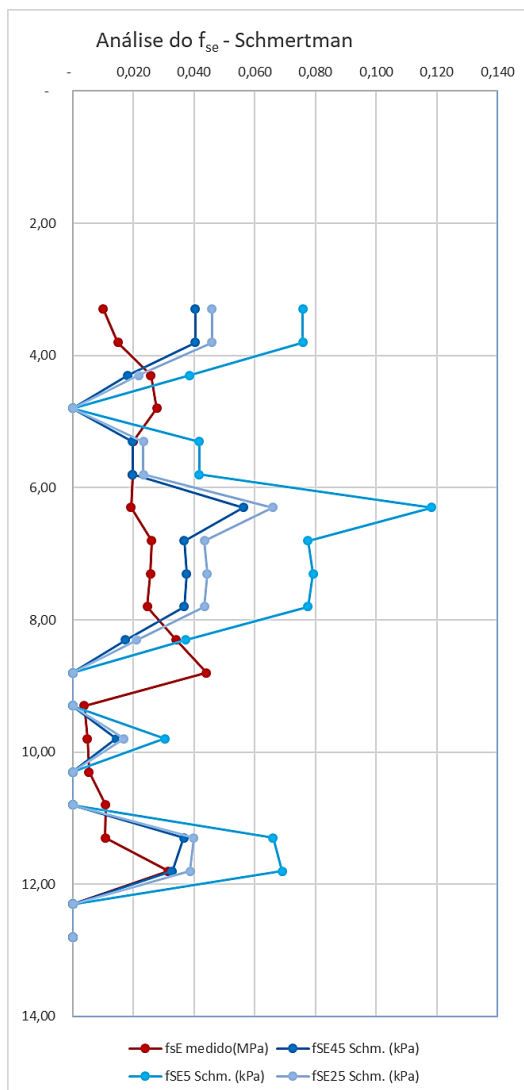


Figura 44 :Exemplo de comparação entre as estimativas de atrito lateral externo (f_{se}) de Schmertmann (1979) com os valores medidos por CPTU – SPT15 x CPTU 04

Os valores de f_{se} correspondente ao atrito lateral externo no amostrador SPT estimado pelo método de Schmertmann (1979) são inferiores aos valores de atrito lateral médio f_s , e, portanto, se ajustam melhor aos valores efetivamente medidos pelo CPTU. Portanto, no que se refere a estimativa para valores de atrito médio f_s apresentada por Schmertmann (1979), há indicativo de que este valor não represente adequadamente a resistência unitária por atrito lateral obtida através do CPTU, devendo-se calcular a parcela do atrito externa f_{se} para um melhor ajuste.

Outro aspecto interessante a se abordar em relação ao método de Schmertmann (1979) refere-se aos resultados que indicam valores nulos de atrito

lateral f_s , conforme ocorre nas profundidades, 4,80m, 8,80m, 9,30m, 10,30 m e 10,80m.

Após análise aos resultados específicos dessas profundidades, verificou-se que se trata das profundidades nas quais o número de golpes para cravação dos 30 cm iniciais do SPT ($N_{inicial}$) foi o mesmo para cravação dos 30 cm finais (N_{SPT}).

De acordo com proposta de Schmertmann (1979) já detalhada, considera-se a resistência de ponta q_c constante no trecho de cravação do N_{SPT} , assim assume-se que a resistência à cravação do amostrador aumentará ao longo da penetração em função da maior contribuição da parcela de atrito lateral, resultando em maiores números de golpes para cravação de cada intervalo de 15 cm do amostrador SPT.

Nesse sentido, casos em que ocorram números iguais de golpes para cravação dos 30 cm iniciais e dos 30 cm finais, representariam ausência de qualquer contribuição por atrito lateral ao longo do amostrador, isto é, $f_s = 0$, tal como evidenciado nos resultados.

Porém, é incorreto admitir que o solo possa ter um comportamento com nenhuma resistência por atrito lateral. Passou-se então a investigar a possibilidade dos números de golpes registrados durante os ensaios de SPT não refletirem de forma acurada os deslocamentos observados durante o ensaio. Por exemplo, se durante a realização do ensaio SPT, o primeiro golpe cravar 16 cm, o segundo 15 cm e o último 14 cm, é possível que o profissional sondador anote em seu relatório o valor de 1 golpe para cada 15 cm, resultando em $N_{inicial} = 2$ e $N_{SPT} = 2$. Para fins de interpretação, esta variação de 1 cm poderia não comprometer a qualidade dos ensaios, mas para o uso correto da proposta de Schmertmann (1979) existe significativa influência nos resultados obtidos, como será exposto.

Ao considerar $N_{inicial} = 2$ e $N_{SPT} = 2$ para o caso descrito, não será representado o aumento de resistência do solo em função da parcela de atrito lateral, crescente ao longo da cravação, resultando em $f_s = 0$. Se houvesse melhor acurácia nos valores verificados, o valor de 2 golpes para cravar 31 cm iniciais representaria um $N_{inicial} = 1,93$, enquanto o valor de 2 golpes para cravar os últimos 29 cm resultaria num $N_{SPT} = 2,07$.

Tal acurácia, embora indique pequena diferença em relação ao valor inicialmente informado, é capaz de fornecer melhoria significativa nos valores estimados por Schmertmann (1979). Para as profundidades em que $f_s = 0$, foi feita uma simulação com base no anteriormente exposto, admitindo-se a possibilidade dos

valores do N_{SPT} serem 10% superiores aos valores dos $N_{iniciais}$. Assim procedendo, para a profundidade 10,80m, por exemplo, onde o relatório de sondagem SPT indica $N_{inicial} = 2$ e $N_{SPT} = 2$, adotou-se os valores de $N_{inicial} = 2$ e $N_{SPT} = 2,2$, resultando em valores mais representativos e comparáveis aos resultados de CPTU, conforme ilustra a Figura 45 a seguir:

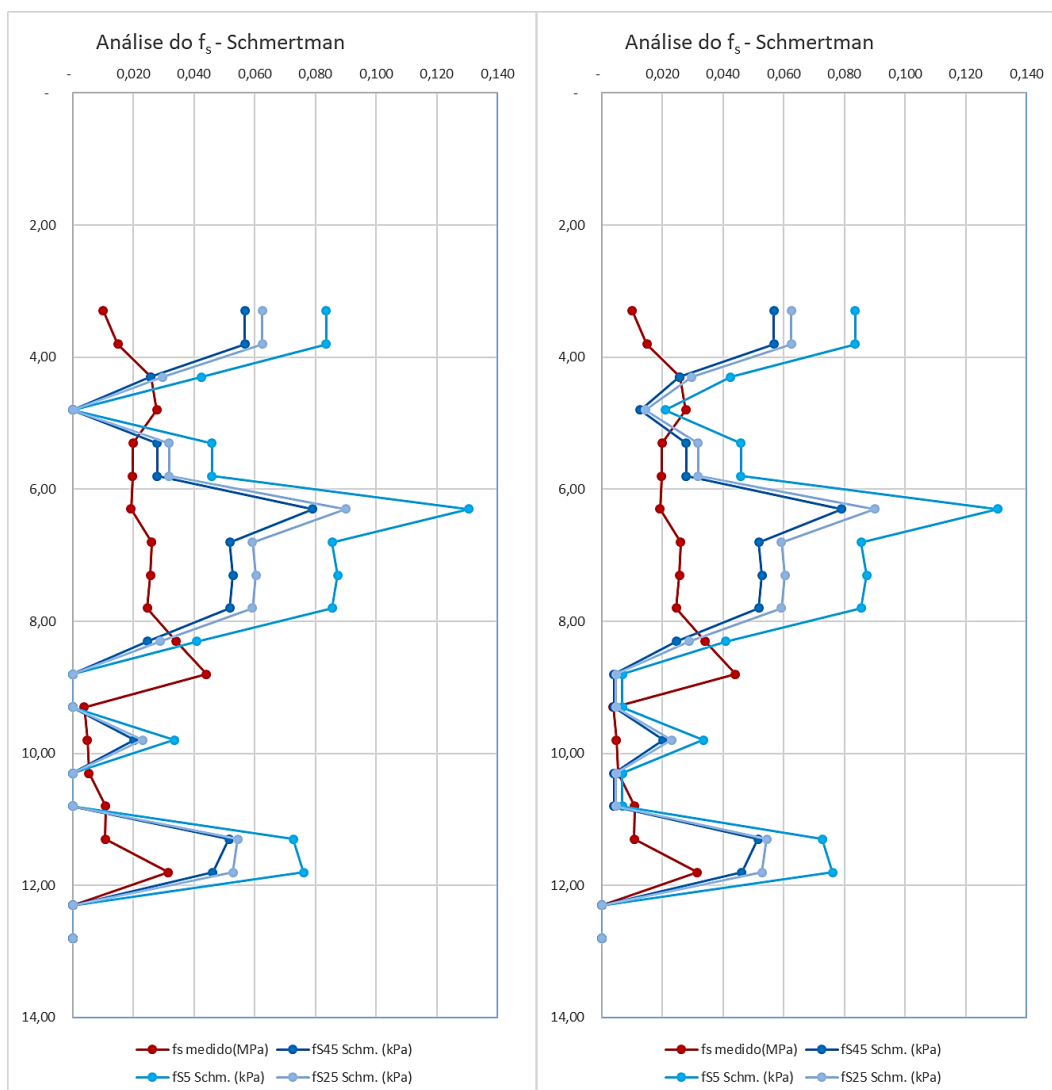


Figura 45: Estimativa de atrito lateral (f_s) de Schmertmann (1979) e, à direita, nova estimativa com a análise da influência de 10% de desvio na anotação de SPT na estimativa de atrito lateral (f_s) de Schmertmann (1979) – SPT15 x CPTU 04

O ajuste verificado em relação aos valores medidos por CPTU indica que a possibilidade de uma falta de acurácia (da ordem de 10%) originada pela falta de cuidado quando da anotação da penetração para o número de golpes do ensaio SPT

pode comprometer significativamente a estimativa de f_s através da proposta de Schmertmann (1979). Considerando que a falta de cuidados nestes pequenos detalhes da execução de sondagens SPT não é apenas possível, mas também muito provável, o autor considera relevante a atenção das empresas executoras com a melhor qualificação das equipes de sondagem de forma que sua cuidadosa execução possibilite uma interpretação mais rica dos resultados dos ensaios. Ao mesmo tempo, deve-se ter cuidado no uso de estimativas de atrito lateral unitário pela proposta de Schmertmann (1979), especialmente para solos de baixa capacidade de suporte, com valores baixos de N_{SPT} .

Fica novamente evidenciada a importância quanto à confiabilidade e acurácia das informações provenientes dos ensaios SPT para garantir uma melhor interpretação das ferramentas disponíveis pelas equações propostas por Schmertmann (1979) e Aoki (2013).

Buscou-se avaliar também a influência na variação do parâmetro C_2 , utilizado na proposta de Schmertmann (1979), uma vez que o referido autor recomenda $C_2 = 1$ para cones elétricos e $C_2 = 0,7$ para cones mecânicos.

Verificou-se na Figura 46 que, de fato, os valores estimados de f_s considerando $C_2 = 1$ forneceram maior proximidade aos valores medidos pelo CPTU comparado ao valor $C_2 = 0,7$, o que já se esperava, considerando tratar-se de resultados medidos a partir de cone elétrico.

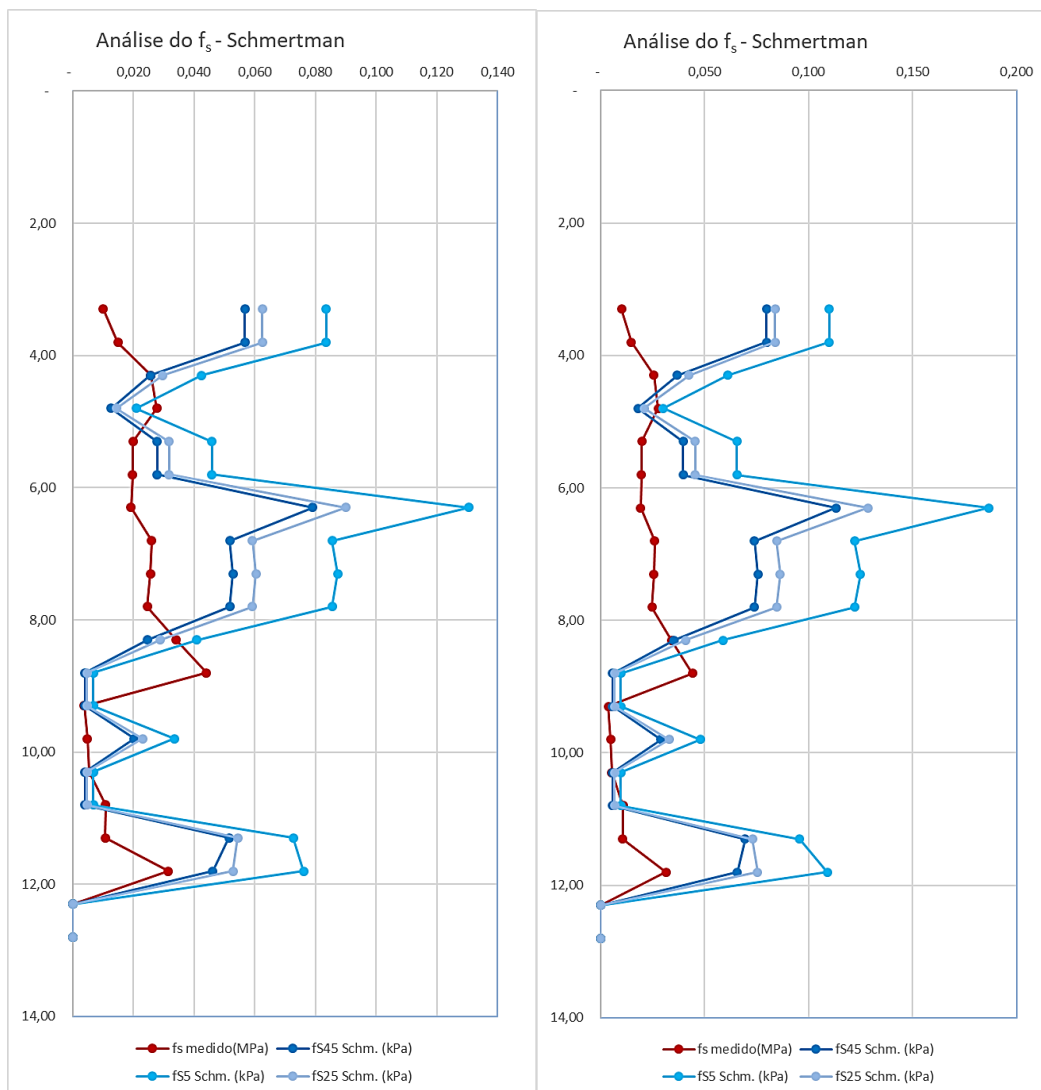


Figura 46 : Estimativa de atrito lateral (f_s) por Schmertman (1979) com $C_2 = 1$, à esquerda, e $C_2 = 0,7$, à direita – SPT15 x CPTU 04

Embora, em geral, os valores estimados se mostrem superiores aos valores medidos, foi possível identificar na Figura 47 que para a camada de argila os valores estimados de f_s se aproximam mais dos valores medidos por CPTU do que os valores correspondentes as camadas arenosas, quando utilizado o método de Schmertman, vide Figura 47 a seguir:

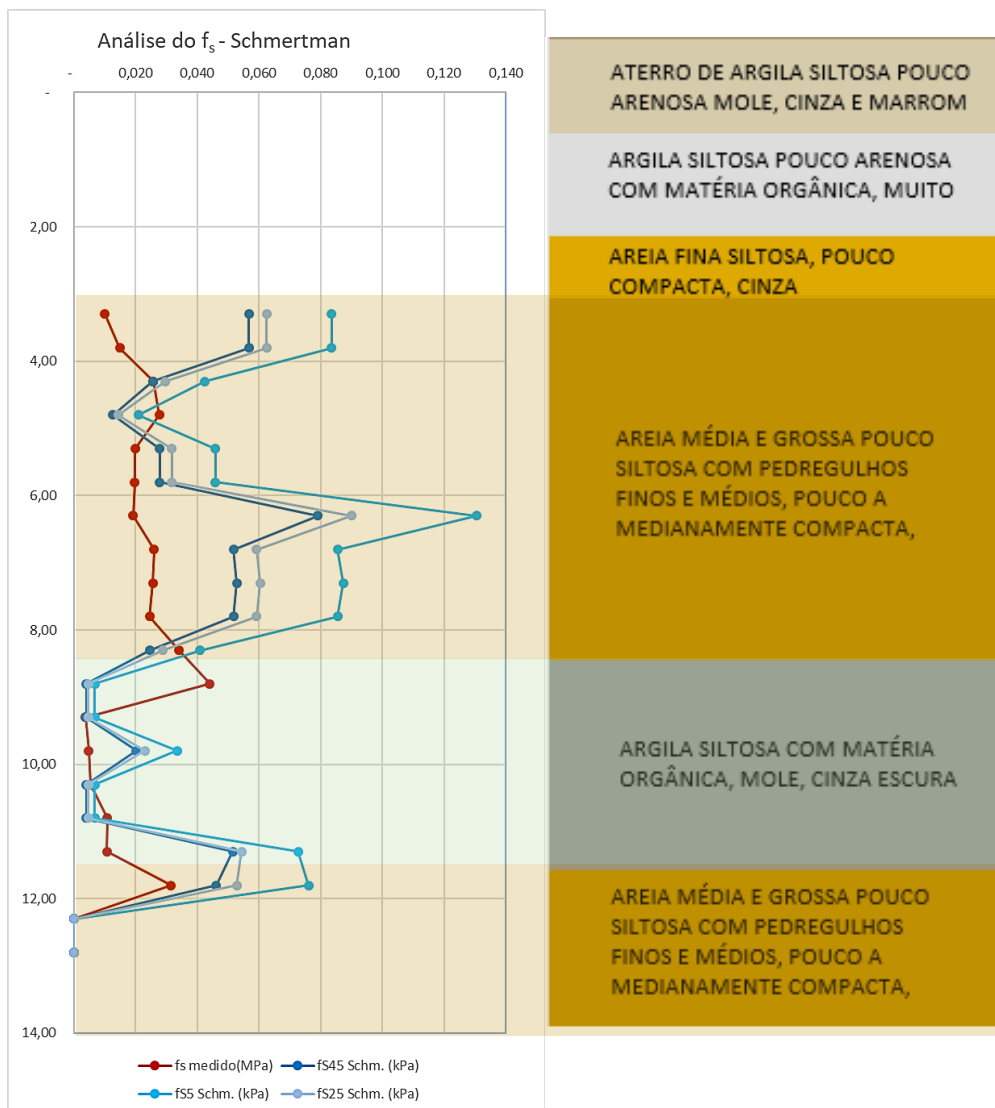


Figura 47 :Exemplo de análise do comportamento por tipo de solo quanto aos resultados de atrito lateral (f_s) estimadas por Schmertmann (1979) e os medidos por CPTU – SPT15 x CPTU 04

Verificou-se, em geral, que os valores de f_s medidos por ensaios CPTU para as camadas de areias, concordam melhor com os valores estimados por Schmertmann (1979) e Aoki (2013) para a situação de não embuchamento ($L_i = 45$ cm) enquanto os valores correspondentes às camadas de argila apresentam melhor compatibilidade com os valores estimados para a situações de embuchamento, com valores de L_i inferiores à 45 cm. Tal resultado, novamente, corresponde ao comportamento usualmente verificado em ensaios SPT realizados em argilas e areias, uma vez que é frequente a ocorrência de comprimentos maiores de amostras recuperadas em areias, compatível com o não embuchamento, e pequenos comprimentos de amostra

recuperada em camadas de argila, resultado de, com formação de embuchamento nas amostras.

Os métodos de Schmertmann (1979) e Aoki (2013), de forma geral, forneceram estimativas de f_s razoavelmente próximas entre si, embora ambas indicaram valores superiores aos resultados medidos por ensaios CPTU, conforme sobreposição de resultados na Figura 48 seguir:

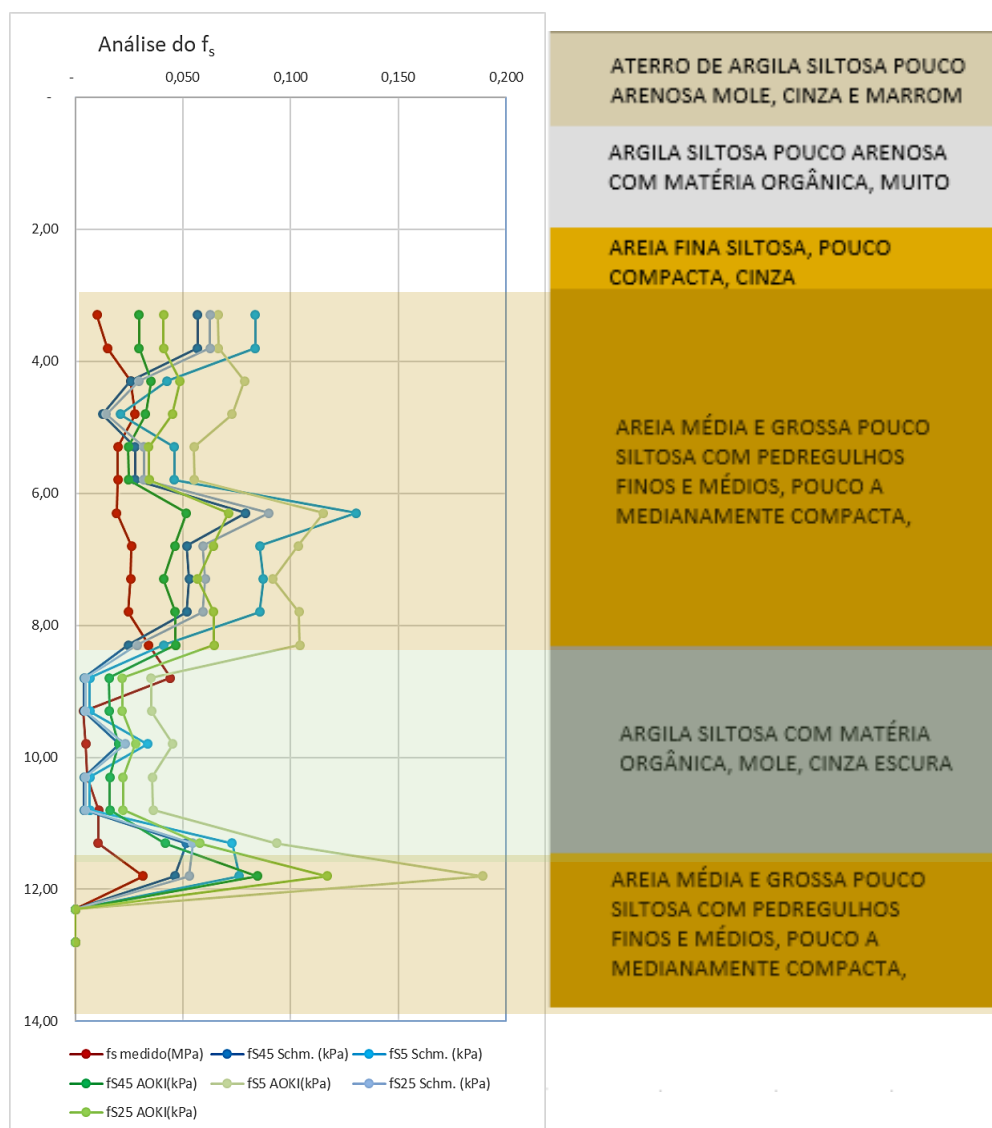


Figura 48 :Exemplo de análise dos resultados de atrito lateral (f_s) estimados por Schmertmann (1979), Aoki (2013) e os medidos por CPTU – SPT15 – CPTU 04

Tais resultados corroboram com os métodos propostos por Schmertmann (1979) e Aoki (2013) em sua capacidade de permitir maiores recursos na interpretação de parâmetros de resistência de atrito lateral e de ponta unitários mobilizados na

interface solo x amostrador durante os ensaios, através da interpretação mais acurada dos resultados de ensaios de SPT.

5.3 Análise da Resistência Estática (F) estimada pelo Método de Schmertmann (1979) e Aoki (2013)

Além da comparação dos valores de resistência de ponta q_c e atrito lateral f_s estimados através dos métodos de Schmertmann (1979) e Aoki (2013) com os valores medidos através de ensaios CPTU, buscou-se também comparar os valores da resistência estática (F) correspondente à força necessária à cravação do amostrador SPT. Através da (22) e da (37), foram obtidos os valores da resistência estática estimados por Schmertmann (1979) e Aoki (2013), respectivamente, vide Figura 49:

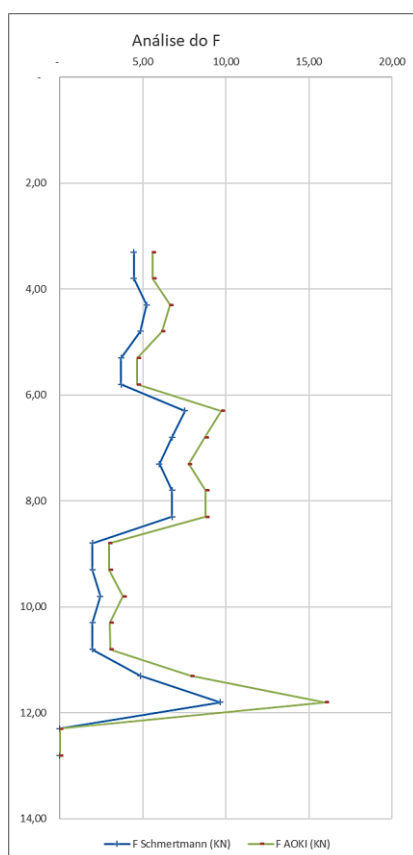


Figura 49 :Exemplo de análise dos resultados da força correspondente à resistência estática (F) estimadas por Schmertmann (1979) e Aoki (2013)

Os valores da resistência estática inicialmente estimados por Schmertmann (1979) foram inferiores aos que foram estimados por Aoki (2013) pois Schmertmann (1979) considera que, em função dos efeitos viscosos, a resistência a cravação estática do amostrador é inferior à resistência à cravação dinâmica, propondo a redução desta força através dos valores de β propostos para argilas e areias.

Para a avaliação das forças resistentes à penetração do amostrador pelos dois modelos de cálculo, Schmertmann e Aoki, o autor buscou compará-las aos valores de resistência estática do amostrador SPT efetivamente medidos. No entanto, em função da ausência de ensaios de carregamento estático para o banco de dados utilizados no presente estudo, optou-se por estimar a força necessária para cravação estática do amostrador SPT (F) a partir dos dados de resistência obtidos na penetração do CPTU.

O procedimento adotado pelo autor foi, basicamente, inverso ao de Schmertmann (1979) e Aoki (2013) para a estimativa de resistência de ponta q_c e atrito lateral f_s . Enquanto Schmertmann (1979) e Aoki (2013) propõem a estimativa das resistências unitárias a partir da divisão das parcelas da força resistente por atrito e ponta pelas áreas em que estas resistências atuam, o autor avaliou a força resistente (F) a partir da multiplicação das resistências unitárias q_c e f_s medidas pelo cone pelas áreas em que atuam no amostrador SPT.

De início, foi necessário realizar análise específica da influência do valor do atrito lateral f_s na estimativa por Schmertmann (1979), uma vez que, conforme já abordado, o valor medido pelo CPTU se correlaciona melhor ao valor de atrito unitário f_{se} , do que a média do atrito interno e externo adotada pelo autor do método. Foi então realizada estimativas da força F de duas formas: a primeira, apresentada em roxo na Figura 50, considerando que o valor de f_s obtido pelo ensaio CPTU representasse o valor da média do atrito interno e externo no SPT (f), conforme adotado por Schmertmann (1979), e a segunda, em vermelho, denominada de F^* , considerando que o valor medido pelo CPTU represente unicamente o valor do atrito lateral externo (f_{se}).

Verificou-se na Figura 50 comportamentos próximos, independentemente da consideração da média entre atritos interno e externo (f) ou apenas do valor do atrito externo (f_{se}). Esperava-se um valor de F^* (em vermelho) algo superior aos valores de F , face à consideração de um maior valor de atrito lateral no interior do amostrador.

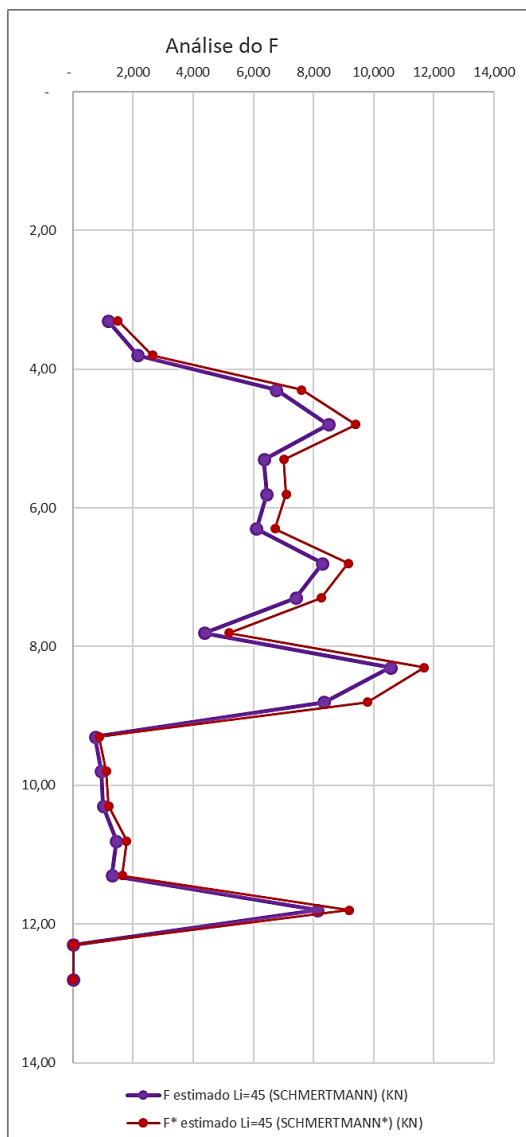


Figura 50 :Análise da resistência estática (F) do amostrador SPT, calculado pelo modelo de Schmertmann (1979), a partir dos resultados do CPTU para duas interpretações de f_s .

O autor entende que o valor da força resistente F^* (em vermelho) medida pelo CPTU a partir das áreas consideradas por Schmertmann (1979) são mais adequados do que os valores de F (em roxo), pois os valores medidos através do CPTU, pela forma como são obtidos, corresponderiam ao atrito lateral externo no amostrador SPT.

No entanto, existe ainda significativa diferença na estimativa da força resistente medida pelo CPTU entre os métodos propostos por Schmertmann (1979) e Aoki (2013), uma vez que cada um apresenta diferentes considerações em relação as áreas a serem adotadas, conforme descrito anteriormente. Por conta dessas diferenças, o autor estimou a força estática (F) necessária à cravação do amostrador

SPT de duas formas, seguindo os entendimentos quanto às áreas propostas pelos dois modelos em estudo e ainda para três comprimentos de buchas ($L_i = 5 \text{ cm}$, 25 cm e 45 cm), conforme apresentado na Figura 51

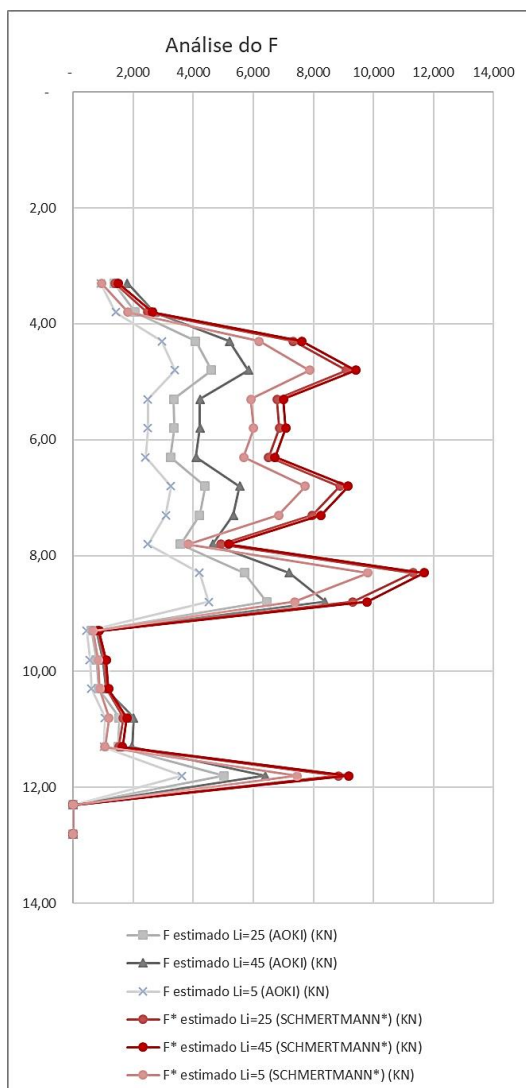


Figura 51 : Análise quanto ao valor medido de resistência estática (F) medido pelo CPTU calculado por Schmertmann (1979) e por Aoki (2013)

Os valores da força estática para a cravação do amostrador SPT medida pelo CPTU, estimada de acordo com as áreas consideradas por Aoki (2013) e representados pelas curvas em tons cinzas, forneceram valores, em geral, inferiores aos que foram estimados adotando-se as áreas de Schmertmann (1979). De fato, embora Aoki (2013) considere uma contribuição de atrito lateral maior do que a considerada por Schmertmann (1979), a diferença da área de ponta considerada entre

os métodos se mostrou determinante para a diferença verificada. Apurou-se que, em função da diferença de área de ponta considerada para o cálculo da resistência correspondente à ponta, o valor estimado por Schmertmann (1979) será sempre cerca de 6 vezes maior do que o estimado por Aoki (2013).

Além disso, verifica-se que pelas duas propostas, a resistência estática estimada será menor quanto menor for o comprimento da bucha (L_i) no interior do amostrador, o que se mostra condizente. Os valores medidos puderam ser comparados aos estimados através da estática do SPT em ambos os métodos, resultando no comportamento ilustrado na Figura 52.

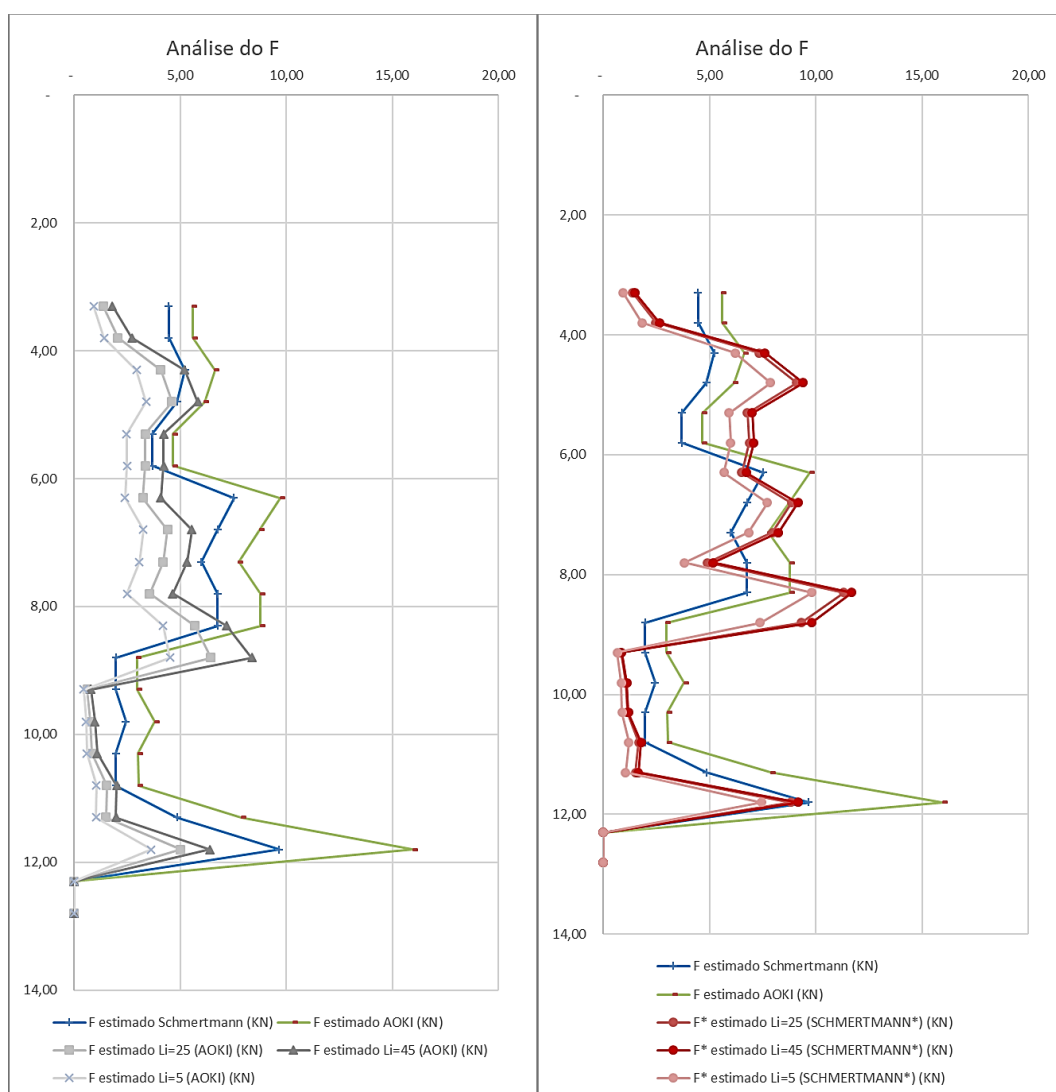


Figura 52: Força resistente medida pelo CPTU estimada por Aoki (2013), nas curvas em cinza do gráfico a esquerda, e por Schmertmann (1979), nas curvas em vermelho no gráfico da direita, comparadas aos valores estimados por Schmertmann (1979) e por Aoki (2013)

De forma geral, os valores F^* correspondentes à resistência estática à cravação do SPT medida pelo CPTU e estimados a partir das áreas consideradas por Schmertmann (1979), parecem se ajustar melhor aos valores estimados pelos métodos em estudo.

Interessante notar que os valores estimados por Schmertmann (1979) e Aoki (2013) são, em geral, superiores aos valores “medidos” através dos dados de CPTU nos casos de solos argilosos e inferiores ou iguais nos casos de solos arenosos, vide a Figura 53:

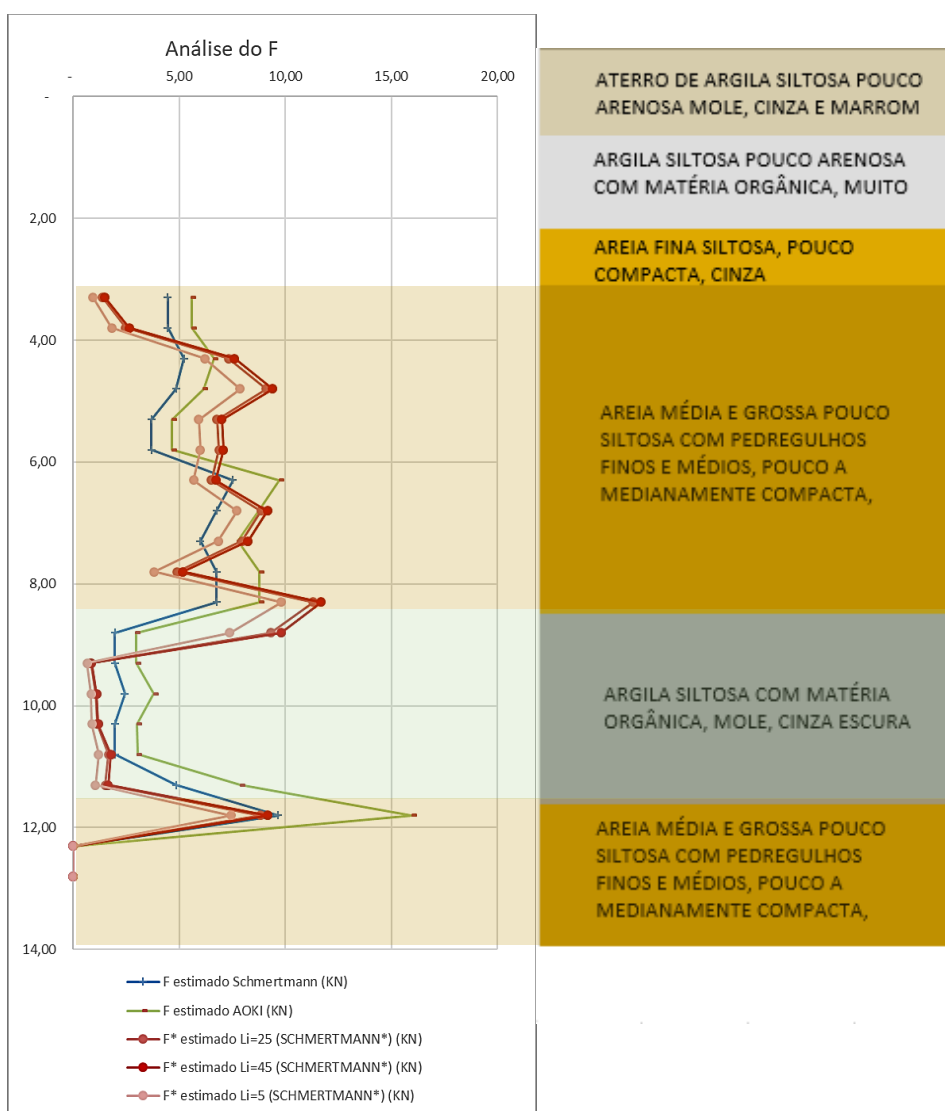


Figura 53 : Análise por tipo de solo quanto ao valor medido de resistência estática (F) medido pelo CPTU e os valores estimados por Schmertmann (1979) e por Aoki (2013)

Este comportamento reforça o entendimento de que nas camadas de argila o efeito da viscosidade pode ser mais representativo do que considerado por Schmertmann (1979) e Aoki (2013), e, para solos arenosos, diferentemente do considerado por Schmertmann (1979), pode-se assumir a parcela dinâmica igual à estática.

De forma geral, os valores estimados pelos métodos apresentam bom ajuste aos valores “medidos” pelo CPTU, corroborando com o uso destes como importante ferramenta na interpretação de parâmetros de resistência do solo a partir de dados de SPT.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Introdução

O conhecimento aprofundado sobre a estática do SPT tem sido considerado uma importante forma para racionalizar o seu emprego, especialmente em correlações com o ensaio de cone, visando a obtenção de informações a respeito dos parâmetros de resistência do solo.

A presente pesquisa buscou contribuir com um melhor entendimento quanto a estática da cravação do amostrador SPT no solo através da comparação entre a proposta de estimativa da resistência estática de Schmertmann (1979) e a de Aoki (2013).

Foi possível, com base nos resultados obtidos por ensaios CPTU, avaliar a metodologia e premissas utilizadas em cada proposta para a obtenção de uma resistência equivalente à resistência de ponta no ensaio de cone (q_c) e da resistência equivalente ao atrito lateral na luva do cone (f_s) a partir dos resultados do ensaio SPT.

Buscou-se avaliar especialmente a influência do comprimento da bucha nas estimativas da resistência estática, especialmente pela consideração de Schmertmann (1979) quanto ao fenômeno do embuchamento não refletir a realidade observada em ensaios SPT brasileiros.

Foram utilizados 27 pares de verticais SPT e CPT de 4 diferentes campanhas de investigação geotécnica que forneceram 378 pontos que foram analisados e interpretados para diferentes possibilidades de comprimento de bucha (L_i) formada no interior do amostrador SPT objetivando interpretar adequadamente a sua influência nos métodos citados.

A partir de todos os resultados obtidos foi possível identificar padrões de comportamento comuns que levaram ao autor a conclusões expressas a seguir.

6.2 Conclusões

6.2.1 Influência do comprimento de bucha (L_i) no método de Schmertmann (1979)

- A adaptação do método proposto por Schmertmann (1979) para diferentes comprimentos de bucha comprovou que quanto menores os comprimentos de bucha considerados neste método, menor será a parcela resistida por atrito lateral ($F_0 + F_i$) e maior será a parcela resistida pela ponta (F_e). Portanto, como esperado, a consideração de embuchamento, no caso de argilas, é indicada para uma interpretação melhor do método, neste caso.
- As variações entre as parcelas da resistência estática, ponta e atrito, influenciam diretamente nas estimativas de q_c e f_s . Portanto, a não consideração quanto o fenômeno do embuchamento e do correto comprimento de bucha (L_i) resultará em estimativas de parâmetros de resistência do solo não compatíveis com a realidade.

6.2.2 Análise dos valores de resistência unitária de ponta (q_c)

- Foi possível identificar que para a estimativa de q_c realizada pelo método de Schmertmann (1979) houve pequena variação em função do comprimento de bucha considerado, pois, a variação na parcela da resistência estática resistida pela ponta (F_e) varia pouco, enquanto a área da ponta não se altera.
- Verificou-se, para a camada de areia, uma melhor aproximação dos resultados de q_c estimado aos medidos pelo CPTU, quando se considerou $\beta = 1$, reforçando o entendimento apresentado por Neves e (2004) e Aoki et al. (2007) de que a força resistente no ensaio dinâmico é aproximadamente igual à força resistente no ensaio estático. Por outro lado, o comportamento verificado para as camadas de argila indica que a razão entre a parcela dinâmica e a estática necessária à penetração pode ser superior ao que foi considerado pelo autor do método ($\beta = 1,64$).

- Pela estimativa de Aoki (2013), verificou-se que quanto menor o comprimento da bucha, menores serão os valores estimados de q_c . Este comportamento está coerente, pois quanto menor o valor do comprimento da bucha (L_a) considerado, maior será a razão de atrito calculada, e conseqüentemente, menor será a parcela de ponta em relação ao atrito lateral.
- Os métodos de Schmertmann (1979) e Aoki (2013), de forma geral, forneceram estimativas de q_c próximas entre si, além de estarem aproximadamente compatíveis com os resultados medidos por ensaios CPTU.
- Em Aoki (2013) e Schmertmann (1979) verificou-se que para os solos arenosos os resultados de q_c medidos pelo CPTU se aproximam ou são superiores aos valores estimados para a situação não embuchada (45 cm). Para a camada de argila, os valores medidos pelo CPTU se situam, em geral, entre o intervalo dos valores estimados por Aoki (2013) para a situação de embuchamento, com bucha bem mais reduzida. Este aspecto está em concordância com o esperado, uma vez que a situação embuchada é mais provável para os solos argilosos.

6.2.3 Análise dos valores de resistência unitária de atrito lateral (f_s)

- Foi possível identificar que para a estimativa de f_s realizada pelo método de Schmertmann (1979) houve variação em função do comprimento de bucha considerado, de forma que quanto menor o comprimento de bucha (L_i) maiores serão os valores de f_s . De fato, ao reduzir o comprimento de bucha (L_i) a força total resistida por atrito ($F_0 + F_i$) variou pouco, enquanto a área lateral interna se reduziu consideravelmente, resultando em valores de f_s cada vez maiores.
- O valor de f_s estimado por Schmertmann (1979) corresponde à uma média ponderada do atrito lateral externo e interno no amostrador SPT, enquanto o valor f_s é obtido pela resistência na área da luva do CPTU. Através dos cálculos realizados verificou-se que o valor de f_s obtido pelo ensaio CPTU está relacionado de forma mais próxima com o atrito externo no amostrador SPT do

que com a média entre o atrito interno e externo, indicando a necessidade de adequação desta parcela para comparação aos valores medidos.

- Verificou-se que, de fato, os valores estimados de f_s por Schmertmann (1979) considerando $C_2 = 1$ forneceram maior proximidade aos valores medidos pelo CPTU comparado ao valor $C_2 = 0,7$, o que já se esperava, considerando tratar-se de resultados medidos a partir de cone elétrico.
- Verificou-se variação nos valores de f_s estimados pelo Método de Aoki (2013) ao se variar o comprimento de bucha (L_a). Tal fato era esperado, uma vez que o valor estimado de f_s correlaciona-se inversamente ao valor do comprimento da bucha (L_a).
- Verificou-se, em geral, que os valores de f_s medidos por ensaios CPTU para as camadas de areias, concordam melhor com os valores estimados por Schmertmann (1979) e Aoki (2013) para a situação de não embuchamento ($L_i = 45$ cm) enquanto os valores correspondentes às camadas de argila apresentam melhor compatibilidade com os valores estimados para a situações de embuchamento, com valores de L_i inferiores à 45 cm. Este aspecto está em concordância com o esperado, uma vez que a situação embuchada é mais provável para os solos argilosos.

6.2.4 Análise dos valores de resistência estática (F)

- Os valores da resistência estática estimados por Schmertmann (1979) são inferiores aos que foram estimados por Aoki (2013) pois Schmertmann (1979) considera que, em função dos efeitos viscosos, a resistência a cravação estática do amostrador é inferior à resistência à cravação dinâmica, propondo a redução desta força através dos valores de β propostos para argilas e areias.
- Foi possível estimar o valor de uma força estática F necessária para a cravação do amostrador SPT “medida” pelo CPTU através da soma do produto das resistências q_c e f_s pelas áreas do amostrador SPT sobre qual atuam. Adotou-se o procedimento inverso ao de Schmertmann (1979) e Aoki (2013) para a estimativa de resistência de ponta q_t e atrito lateral f_s , resultando em duas

possibilidades de estimativas distintas. De forma geral, os valores de F estimados a partir das áreas consideradas por Schmertmann (1979), parecem se ajustar melhor aos valores de resistência estática obtidos pelos métodos em estudo.

- Os valores da resistência estática estimadas por Schmertmann (1979) e Aoki (2013) são, em geral, superiores aos valores “medidos” através do dados de CPTU nos casos de solos argilosos e inferiores ou iguais nos casos de solos arenosos, reforçando o entendimento que nas camadas de argila o efeito da viscosidade pode ser mais representativo do que considerado por Schmertmann (1979) e Aoki (2013), e, para solos arenosos, diferentemente do considerado por Schmertmann (1979), pode-se assumir a parcela dinâmica igual à estática.
- De forma geral, os valores estimados pelos métodos apresentam bom ajuste aos valores “medidos” pelo CPTU, corroborando com o uso destes como importante ferramenta na interpretação de parâmetros de resistência do solo a partir de dados de SPT.

6.2.5 Considerações quanto ao uso dos métodos de Schmertmann (1979) e Aoki (2013) para estimativas de parâmetros do solo

- Verificou-se que a possibilidade de uma falta de acurácia (da ordem de 10%) originada pela falta cuidado quando da anotação da penetração para o número de golpes do ensaio SPT pode comprometer significativamente a estimativa de f_s através da proposta de Schmertmann (1979).
- Através de correlações apresentadas por Teixeira (1993) foi possível realizar uma estimativa dos valores de N_1 , N_2 e N_3 a partir do número de golpes necessários para a cravação dos 30 cm iniciais ($N_{inicial}$) e dos 30 cm finais (N_{SPT}), viabilizando a utilização do método apresentado por Schmertmann (1979).
- Nos casos de solos em que os 45 cm do amostrador SPT penetram no solo sob a ação do peso próprio do conjunto, ou sob a ação de um único golpe, não é

possível a obtenção de informação adequada para a utilização do método de Schmertmann (1979).

- Após a constatação de incompatibilidade entre os resultados estimados devido a desnível não informado, ficou evidenciada a importância quanto à confiabilidade e acurácia das informações provenientes dos ensaios SPT e CPTU para garantir a correta utilização dos métodos propostos por Schmertmann (1979) e Aoki (2013).
- O método proposto por Schmertmann (1979) considera que a resistência de ponta q_c é constante no trecho de cravação do N_{SPT} , o que pode não representar adequadamente a realidade estudada.
- O equilíbrio das forças atuantes na ponta aberta do amostrador e na parede interna do amostrador SPT como proposto no método de Aoki (2013) também depende da premissa de que, no intervalo de cravação correspondente ao N_{SPT} , o valor de r_p será sempre constante e ainda, que a resultante da resistência de atrito no interior do amostrador SPT atingirá, em algum momento, o valor de R_2 , isto é, ocorrerá a formação de bucha no interior do amostrador SPT.
- O valor da resistência estática (R_s) de Aoki et al. (2007) representa um valor médio correspondente aos 30 cm de cravação do amostrador, enquanto, para a determinação do valor do atrito lateral r_l por Aoki (2013), são consideradas as contribuições de todas as áreas do amostrador, indicando sua completa cravação (45 cm). Entende o presente autor que esta premissa fornecerá valores de resistência unitária não compatíveis com a força média necessária para a cravação de 15 cm a 45 cm do amostrador, e conseqüentemente, não seria comparável com os valores de índice N_{SPT} utilizado no método.
- Após simulações com diferentes valores de razão de atrito, há indicativo de melhor compatibilidade dos resultados ao adotar-se o valor de $a = 2$. Contudo, existem estudos que apontam que, para solos argilosos este valor seja superior à 2.
- A medida do comprimento da bucha formada no interior do amostrador (L_i) se mostra como um procedimento importante para garantir a acurácia do método de Schmertmann (1979). Este procedimento de medida da bucha, no entanto, não é usual e é frequentemente ignorado durante a realização de ensaios SPT.

- O autor, neste seu estudo, observa que, com a continuidade de estudos nesta linha, muitos outros recursos do ensaio podem vir a ser revelados pela incorporação da medida da eficiência no topo do amostrador, registro do comprimento da bucha, ensaios de natureza estática e dinâmica, após penetração. O autor entende que esta ferramenta tão simples e robusta ainda tem muito a auxiliar a melhor conhecer sobre a interpretação de parâmetros de resistência do solo a partir da interpretação mais apurada dos resultados dos registros dos ensaios SPT.

6.3 Sugestão para trabalhos futuros

A simulação do ensaio SPT através de programas de equação da onda, em especial o programa DINEXP, disponível para utilização em pesquisa na UERJ, pode ser uma ferramenta muito importante em trabalhos futuros nesta área, pela possibilidade de se obter análises de sensibilidade em relação às questões observadas no presente estudo. Questões observadas de forma qualitativa poderão ser estudadas também de forma quantitativa.

Valores de q_c obtidos nesta pesquisa, diretamente do SPT, podem ser empregados para, em conjunto do N_{SPT} medido, retro analisar valores de K da correlação entre q_c e N_{SPT} da literatura. Souza (2009) obteve valores de K que variam em função da compacidade, propondo uma correlação potencial. Este comportamento, potencial, pode ser verificado através do mesmo banco de dados aqui estudado, partindo unicamente da análise do N_{SPT} para areias de diferentes compacidades e argilas com diferentes consistências.

Registros de campo de força em ensaios instrumentados, como os realizados por Cavalcante (2002) e Santana (2015) também poderão ser revisitados, visando obter respostas compatíveis com os estudos elaborados nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] ABNT NBR 12069: Solo – Ensaio de penetração de cone in situ (CPT) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 11p., 1991.
- [2] ABNT NBR 6484: Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de Ensaio. ABNT, 17p., 2001.
- [3] ABNT NBR 7250: Solo – Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento de solos. Rio de Janeiro, 3p., 1982.
- [4] ABOU-MATAR H.; GOBLE, G. G.; SPT Dynamic Analysis and Measurements. Journal of Geotechnical and Environmental Engineering, v,123, n,10, p,921-928, 1997.
- [5] AOKI, N.; CINTRA, J. C. A., The application of energy conservation Hamilton's principle to the determination of energy efficiency in SPT Tests. In: Proceedings of the VI International Conference on the Application of the Stress- Wave Theory to Piles, Volume único; p. 457 - 460, São Paulo, 2000.
- [6] AOKI, N.; VELLOSO, D. A., An approximated method to estimate the bearing capacity of piles. In: Proceedings of the V Panamerican Conference on Soil and Foundation Engineering, Vol. 5, p. 367 - 377, Buenos Aires, 1975.
- [7] AOKI, N., NEVES, L.F., ESQUIVEL, E.R., & CINTRA, J.C. Prova de carga estática no amostrador SPT para obtenção da eficiência e da resistência estática em solos arenosos. Solos e Rochas. São Paulo, v. 27, p. 147-160, 2004.
- [8] AOKI, N., ESQUIVEL, E.R., NEVES, L.F., & CINTRA, J.C. The impact efficiency obtained from static load test performed on the SPT sampler. Soils and Foundation, 47, 1045-1052, 2007.
- [9] AOKI, N. Inovação no SPT. In: CINTRA, J.C.A.; AOKI, N; TSUHA, C; GIACHETI, H.L. Fundações, Ensaio estáticos e dinâmicos. São Paulo: Oficina de Textos, P. 25-38, 2013.
- [10] ASTM D1586-58T, Tentative method for penetration test and split-barrel sampling of soils. ASTM, 1958.
- [11] ASTM D1586-67, Standard method for penetration test and split-barrel sampling of soils, In: Annual Book of Standard; p. 1110 - 1112, Philadelphia, 1967.
- [12] ASTM, D. 3441. Standard test method for deep quasistatic, cone and friction-cone penetration tests of soils, p. 414-419, 1986.

- [13] BARENTSEN, P. Short description of a field testing method with cone-shaped sounding apparatus. In: Proceedings 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. p. 6-10, 1936.
- [14] BEGEMANN, H. K. S. The friction jacket cone as an aid in determining the soil profile. In: Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, ICSMFE, Montreal, September. p. 8-15, 1965.
- [15] BEGEMANN, HKS Ph et al. The use of the static soil penetrometer in Holland. *New Zealand Engineering*, v. 18, n. 2, p. 41, 1963.
- [16] BELINCANTA, A., Avaliação de fatores intervenientes no índice de resistência à penetração do SPT. Tese de D.Sc., Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1998.
- [17] BELINCANTA, A., Energia dinâmica no SPT: resultados de uma investigação teórico-experimental. Dissertação de M.Sc., EPUSP, São Paulo, SP, 1985.
- [18] BELINCANTA, A. & MIGUEL, M. G., Avaliação do Coeficiente de Majoração da Resistência Lateral para Estacas Escavadas com Trado Manual em Solo Laterítico de Londrina/PR. Anais do IV Seminário de Fundações Especiais (SEFE) – Curitiba/Paraná, 2004.
- [19] BEZERRA, R.L., Desenvolvimento do Piezocone COPPE de terceira Geração e sua utilização em argilas moles. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 1996.
- [20] BOONSTRA, G.C., Pile loading tests at Zwijndrecht, Holland. Proc. of the I Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Cambridge, Mass, v. 1, pp. 185-194, 1936.
- [21] BROMS, B. B.; FLODIN, N., History of soil penetration testing, In: Proceedings of the Penetration Testing – ISOPT-1, J. DE RUITER Ed., p. 178 - 186, Orlando, 1988.
- [22] CASAGRANDE, A.; CASAGRANDE, L. Report to the American Electric Power Service Corporation on Foundation Investigations for the Donald E. Cook Nuclear Power Plant. Appendix G of Amendment, v. 5, 1968.
- [23] CAVALCANTE, E. H., Investigação teórico-experimental do SPT. Tese de D. Sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.
- [24] CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J., Dynamics of structures. In: McGraw-Hill, Inc., 1975.
- [25] COSTA NUNES, A. J. Curso de mecânica dos solos e fundações. Editora Globo, Rio de Janeiro, RJ, 1956.

- [26] DANZIGER, F. A. B., Desenvolvimento de equipamento para realização de ensaios de piezocone: aplicação a argilas moles. Tese D.Sc., COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1990.
- [27] DANZIGER, F. A. B.; ALMEIDA, M. S. S.; PAIVA, E. N.; MELLO, L. G. F. S.; DANZIGER, B. R., O piezocone como ferramenta de definição da estratigrafia e da classificação dos solos. XI COMBRANSEG, Brasília, Vol. 2, p. 917 – 926, 1998.
- [28] DANZIGER, F. A. B.; SCHNAID, F., Ensaios de piezocone: procedimentos, recomendações e interpretação. Conferência SEFE IV/BIC I, V.3, p.52 – 79, 2000.
- [29] DE MELLO, V. F. B., Standard penetration test. In: Proceedings of the IV Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 1., p.1 - 86, Porto Rico, 1971.
- [30] DE RUITER, J., Electric penetrometer for site investigations. Journal of the Soil Mechanical and Foundations Division. ASCE, Vol. 97, N° SM2, p 457 – 473, 1971.
- [31] DÉCOURT, L.; QUARESMA, A. R., Capacidade de carga de estacas a partir de valores do SPT. In: Anais do VI COBRAMSEF, p. 45 - 53, Rio de Janeiro, 1978.
- [32] DÉCOURT, L. The standard penetration test – state of the art, In: XII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, v. 4, 1989.
- [33] DOUGLAS, B. J.; OLSEN, R. S., Soil classification using electric cone penetrometer. Proc. Symp. on Cone Penetration Testing and Experience, ASCE, p. 209 - 227, St. Louis, 1981.
- [34] FELLENIUS, B. H., ESLAMI, A., Soil profile interpreted from CPTU data. 2º International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT'10, Huntington Beach, CA, EUA, www.cpt10.com, 2010.
- [35] FERREIRA, M.Q., Adaptação do ensaio SPT para determinação de parâmetros adicionais para o dimensionamento de fundações. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2015.
- [36] FLETCHER, G. F. A., Standard Penetration Test: Its Uses and Abuses. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division – ASCE – Vol. 91, nº. SM4, p. 67 – 75, 1965.
- [37] HVORSLEV, M. J., Sampling methods and requirements, Subsurface exploration and sampling of soils for civil engineering purpose, 1 ed., Chapter 4, Vicksburg, Mississippi, USA, Waterways Experiment Station, 1949.

- [38] ISSMFE, International reference test procedure for the standard penetration test (SPT), In: Report of the ISSMFE – TC 16 – Technical committee on penetration testing of soils, with reference test procedures – CPT- SPT – DP - WST – p. 17 - 19, 1989.
- [39] ISSMFE, Report of the subcommittee on standardization of penetration test in Europe. Proc., IX ICSMFE, Tokyo, Vol. 3, 1977.
- [40] KOVACS, W. D., Velocity Measurement of Free-fall SPT Hammer. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 105, N° GT1, p. 1-10, 1979.
- [41] KOVACS, W.D.; EVANS, S.C.; GRIFFITH, A.L., Towards a more standardized SPT. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 9, Tokio. Proceedings, v.2, p.269-276, 1977.
- [42] LABORATORY OF SOIL MECHANICS, Delft, The predetermination of the required length and the prediction of the toe resistance of piles. Proc., I ICSMFE, Cambridge, Mass., v.1, pp. 181-184, 1936.
- [43] LIAO, T., Post Processing of Cone Penetration Data for Assessing Seismic Ground Hazards, with Application to the New Madrid Seismic Zone. Tese de Ph.D, Georgia Institute of Technology, Georgia, EUA, 2005.
- [44] LOBO, B.O. Mecanismos de penetração dinâmica em solos granulares. 2009. 231p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- [45] LUKIANTCHUKI, Juliana Azoia. Interpretação de resultados do ensaio SPT com base em instrumentação dinâmica. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 358p, 2012.
- [46] LUNNE, T., ROBERTSON, P.K. & POWELL, J.J.M. "Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice", Ed. Blackie Academic e Professional, London, 1997.
- [47] LUNNE, T.; EIDSMOEN, T. E.; GILLESPIE, D.; HOWLAND, J. D., Laboratory and field evaluation of cone penetrometers. Proc., In-Situ 86, Specialty Conference, ASCE, Blackburg, p. 714-729, 1986.
- [48] MOHR, H.A., Discussion of "standard penetration test: its uses and abuses". Journal of the soil mechanics and foundation division, ASCE, v. 92, n. SM1, p. 196-199, Jan.1966.
- [49] MORAIS, T.D.O. Interpretação racional de resultados de ensaios SPT com base em conceitos de energia. Tese (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 228 p., 2014.

- [50] NÁPOLES NETO, A. D. F., Medida de resistência à penetração dos solos em sondagens de reconhecimento, Estado Atual do Problema no Brasil e, em Particular, no IPT: Relatório Interno, São Paulo, 1961, citado por Belincanta, 1998.
- [51] NARESI, L.A., Métodos diretos de investigação do subsolo CPT e CPT – “<https://sites.google.com/site/geotecniaefundacaolan/145-investigacao-do-subsolo-cpt-e-CPTU>” página web criada em junho 2018.
- [52] NEJAIM, P.F. Análise do tipo de comportamento do solo do depósito de Sarapuí II através de ensaios de piezocone com ênfase na camada do Pleistoceno. Dissertação de Mestrado. UFRJ, Rio de Janeiro, 2015.
- [53] NEVES, L. F. Metodologia para a determinação da eficiência do ensaio SPT através de prova de carga estática sobre o amostrador padrão. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2004.
- [54] NOREÑA, P. Estimativa da eficiência do ensaio SPT através da execução da prova de carga estática sobre o amostrador. Dissertação de Mestrado, Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2011.
- [55] ODEBRECHT, E., Medidas de energia no ensaio do SPT. Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre; 2003.
- [56] PALACIOS, A., Theory and measurements of energy transfer during standard penetration test sampling. Ph.D. Thesis, University of Florida, Gainesville, USA, 1977.
- [57] POLITANO, C. F.; DANZIGER, F. A. B.; DANZIGER, B. R. CPT-SPT Correlations for some Brazilian residual soils. International Site Characterization ISC'98, p. 907 – 912, 1998.
- [58] ROBERTSON, P. K., Soil classification using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 27, Nº 1, p 151 – 158, 1990.
- [59] ROBERTSON, P. K.; CAMPANELLA, R. G., Interpretation of cone penetration tests, part 1. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20, Nº 4, p. 718 – 745, 1983.
- [60] ROBERTSON, P. K.; CAMPANELLA, R. G.; GILLESPIE, D.; GREIG, J., Use of piezometer cone data. Proc., In-Situ 86, Specialty Conf., ASCE, Blacksburg, p. 1263 - 1280, 1986.
- [61] ROBERTSON, P. K.; CAMPANELLA, R. G.; WIGHTMAN, A. Spt-Cpt Correlations. journal of geotechnical engineering, v. 109, n. 11, p. 1449-1459, 1983.
- [62] ROCHA FILHO, P., Behavior in cone penetration test in saturated sands. Ph.D. thesis, University of London, 1979.

- [63] SANGLERAT, G., NHIM, T. V., SEJOURNE, M., ANDINA, R., Direct soil classification by static penetrometer with special friction sleeve. Proceedings of the First European Symposium on Penetration Testing, ESOPT-1, June 5 - 7, Stockholm, v. 2, pp. 337 – 344, 1974.
- [64] SCHAAP, L. H. J.; ZUIDBERG, H. M., Mechanical and electrical aspects of the electric cone penetrometer tip. In: Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, Vol. 2, p. 841 - 851, 1982.
- [65] SCHMERTMANN, J. H., Interpreting the dynamics of the standard penetration test, final Report on Project D-636 to the Florida Department of Transportation, Research Division. Waldo Road, Gainesville, Fla. 32601, 1976, citado por Schmertmann, 1978.
- [66] SCHMERTMANN, J. H., SMITH T., and HO, R., “Example of an Energy Calibration Report on a Standard Penetration Test (ASTM Standard D1586-67) Drill Rig,” Geotechnical Testing Journal, American Society for Testing and Materials, Vol. 1, No. 1, p. 57-61, 1978. Interpreting the dynamics of the standard penetration test, final Report on Project D-636 to the Florida Department of Transportation, Research Division. Waldo Road, Gainesville, Fla. 32601, 1976, citado por Schmertmann, 1978.
- [67] SCHMERTMANN, J. H., Statics of SPT. ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1979, Vol.105, N° 105, p.655 - 669, 1979.
- [68] SCHMERTMANN, John H.; PALACIOS, Alejandro. Energy dynamics of SPT. Journal of the Geotechnical Engineering Division, v. 105, n. 8, p. 909-926, 1979.
- [69] SCHNAID, Fernando; ODEBRECHT, Edgar. Ensaio de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações: 2ª edição. Oficina de Textos, 2012.
- [70] SEED, R.B.; TOKIMATSU, K.; HARDER, L.F.; CHUNG, R.M. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 111, No. 12, p.1425-1445, 1985.
- [71] SENNESET, K.; SANDVEN, R.; JANBU, N., The evaluation of soil parameters from piezocone tests. Transportation Research Record, N° 1235, p. 24 – 37, 1989.
- [72] SKEMPTON, A.W., Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, aging and overconsolidation. Géotechnique, Vol. 36, nº. 3, p. 425 - 447, 1986.
- [73] SOUZA, J.M.S. “A influência da Compacidade das Areias nas Correlações entre os Ensaio de Cone e o SPT”, Dissertação de Mestrado, UERJ, 2009.

- [74] TEIXEIRA, A.H., “Sondagens: Metodologia, Erros mais Comuns, Normas de Execução”, I Simpósio de Prospecção do Subsolo – ABMS – Núcleo Nordeste, pp. 41-61, Recife, 1977.
- [75] TEIXEIRA, A.H., “Um aperfeiçoamento das sondagens de simples reconhecimento à percussão.” ABMS, EESC/USP, Solos do Interior de São Paulo, Capítulo 4, São Carlos, SP, Brasil, p. 75-93, 1993.
- [76] TERZAGHI, K., Die Tragfähigkeit von “Pfahlgrundungen” in Die “Bautechnik”, 1930.
- [77] TERZAGHI, K.; PECK, R. B., Soil exploration, soil mechanics in engineering practice. 1 ed., Chapter 7, New York, John Willey & Sons, Inc, 1948.
- [78] VELLOSO, P. P. C., Estacas escavadas: aspectos geotécnicos do projeto. Anais, Ciclo de Palestras sobre estacas Escavadas, Clube de Engenharia, Rio de Janeiro, 1981.
- [79] WROTH, P., Penetration testing – A more rigorous approach to interpretation. Proc., ISOPT-1, Vol. 1, p. 303-311, Orlando, 1988.
- [80] WROTH, P., The interpretation of in situ soil tests. Géotechnique, Vol. 34, Nº 4, p. 449 - 489, 1984.
- [81] ZAPATA, J. Estimativa das tensões internas e externas atuantes no amostrador SPT durante sua cravação. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2015.

ANEXO A - DADOS DOS PARES SPT E CPTU UTILIZADOS NA PESQUISA

Os valores apresentados a seguir foram extraídos dos relatórios das campanhas de ensaios SPT e CPTU já descritas no banco de dados, cabendo destacar que o parâmetro β previsto por Schmertmann (1979) foi considerado 1,00 para as camadas de areias e 1,64 para argila.

Também foram feitos ajustes aos valores de N_{SPT} para os casos em que estes eram iguais ou inferiores ao valor do $N_{INICIAL}$, objetivando minimizar possíveis erros causados por imprecisões nas medições, conforme já abordado.

1. Rodovia Presidente Dutra - Baixada do Jacareí/SP

Tabela A.1 – Dados do SPT15 e CPTU 04 utilizados na presente pesquisa

Prof.(m)	SPT 15				CPTU 04	
	Prof. Média(m)	Valor de β	Ninicial	NSPT	qt(kPa)	fS(kPa)
3	3,30	1,00	3	5	468	10,13
	3,80	1,00	3	5	1056	14,86
4	4,30	1,00	5	6	4558	25,70
	4,80	1,00	5	5,5*	6030	27,78
5	5,30	1,00	3	4	4655	19,82
	5,80	1,00	3	4	4759	19,69
6	6,30	1,00	6	9	4490	19,21
	6,80	1,00	6	8	6051	26,07
7	7,30	1,00	5	7	5263	25,67
	7,80	1,00	6	8	2523	24,62
8	8,30	1,00	7	8	7607	34,12
	8,80	1,64	2	2,2*	4798	44,11
9	9,30	1,64	2	2,2*	756	3,79
	9,80	1,64	2	3	882	4,85
10	10,30	1,64	2	2,2*	918	5,38
	10,80	1,64	2	2,2*	924	10,81
11	11,30	1,64	2	7	819	10,66
	11,80	1,64	12	15	5658	31,51

Tabela A.2 – Dados do SPT06 e CPTU 01 utilizados na presente pesquisa

SPT 06					CPTU 01	
Prof.(m)	Prof. Média(m)	Valor de β	N _{inicial}	N _{SPT}	q _t (kPa)	f _s (kPa)
3	3,30	1,00	3	8	6.001,41	30,01
	3,80	1,00	5	6	4.551,94	23,12
4	4,30	1,00	5	6	3.797,64	15,22
	4,80	1,00	7	9	3.762,20	35,64
5	5,30	1,00	5	7	7.955,00	28,71
	5,80	1,00	7	8	7.538,24	33,00
6	6,30	1,00	7	10	6.235,14	22,81
	6,80	1,00	9	12	8.429,80	30,21
7	7,30	1,00	7	10	6.906,39	46,49
	7,80	1,00	9	11	8.456,37	53,78
8	8,30	1,00	11	12	9.432,82	52,41
	8,80	1,00	8	10	8.935,07	44,48

Tabela A.3 – Dados do SPT17 e CPTU 06 utilizados na presente pesquisa

SPT 17					CPTU 06	
Prof.(m)	Prof. Média(m)	Valor de β	N _{inicial}	N _{SPT}	q _t (kPa)	f _s (kPa)
7	7,30	1,00	2	4	739	14,93
	7,80	1,00	6	8	2207	27,91
8	8,30	1,00	5	11	5623	28,97
	8,80	1,00	10	13	6243	24,50
9	9,30	1,00	9	11	3991	20,35
	9,80	1,00	12	15	8328	36,27

Tabela A.4 – Dados do SPT02 e CPTU 03 utilizados na presente pesquisa

SPT 02					CPTU 03	
Prof.(m)	Prof. Média(m)	Valor de β	N _{inicial}	N _{SPT}	q _t (kPa)	f _s (kPa)
6	6,30	1,64	2	2,2*	447	13,47
	6,80	1,64	2	2,2*	5413	31,40
7	7,30	1,00	7	11	8172	49,71
	7,80	1,00	9	12	6819	45,20
8	8,30	1,00	13	14	6802	49,52

	8,80	1,00	10	14	3045	27,45
9	9,30	1,00	11	17	1365	24,91
	9,80	1,00	14	21	513	6,75
10	10,30	1,00	21	28	6654	27,69
	10,80	1,00	17	22	9244	37,95
11	11,30	1,00	16	18	2975	64,18
	11,80	1,00	5	5,5*	699	12,79
12	12,30	1,64	4	4,4*	689	6,26
	12,80	1,64	4	4,4*	2596	8,71

2. Obra Residencial – ITAPEMA/SC

Tabela A.21 – Dados do SPT F1 e CPTU 2 (07) utilizados na presente pesquisa

SPT F1					CPTU 2 (07)	
Prof.(m)	Prof. Média(m)	Valor de β	N _{inicial}	N _{SPT}	q _c (kPa)	f _s (kPa)
1	1,30	1,00	6	7	800,0	117,7
2	2,30	1,00	7	8	13175,0	340,1
3	3,30	1,00	3	5	11325,0	320,5
4	4,30	1,00	11	14	25315,0	497,0
5	5,30	1,00	20	25	23120,0	722,7
6	6,30	1,00	20	26	14845,0	510,1
7	7,30	1,00	17	23	16180,0	552,6
8	8,30	1,00	24	31	14380,0	523,2
9	9,30	1,00	25	39	15470,0	431,6
10	10,30	1,00	31	40	9405,0	209,3
11	11,30	1,64	3	3,3*	12505,0	431,6
12	12,30	1,64	2	3	1040,0	29,4
13	13,30	1,64	3	3,3*	1100,0	55,6

Tabela A.22 – Dados do SPT F2 e CPTU 1 (11) utilizados na presente pesquisa

SPT F2					CPTU 1 (11)	
Prof.(m)	Prof. Média(m)	Valor de β	N _{inicial}	N _{SPT}	q _c (kPa)	f _s (kPa)
1	1,30	1,00	9	10	3055,0	98,100
2	2,30	1,00	9	11	9395,0	271,410
3	3,30	1,00	3	4	16030,0	582,060
4	4,30	1,00	14	18	18545,0	461,070
5	5,30	1,00	18	22	21205,0	582,060
6	6,30	1,00	22	26	14695,0	444,720
7	7,30	1,00	26	31	15345,0	510,120

8	8,30	1,00	26	28	19035,0	595,140
9	9,30	1,00	26	30	16695,0	539,550
10	10,30	1,00	30	36	11215,0	411,830
11	11,30	1,64	3	3,3*	880,0	22,890

Tabela A.23 – Dados do SPT F2 e CPTU 1 (11) utilizados na presente pesquisa

SPT F3					CPTU 5 (11)	
Prof.(m)	Prof. Média(m)	Valor de β	N _{inicial}	N _{SPT}	q _c (kPa)	f _s (kPa)
1	1,30	1,00	9	11	12770,0	284,5
2	2,30	1,00	11	13	16460,0	461,1
3	3,30	1,00	2	5	5095,0	157,0
4	4,30	1,00	16	19	17615,0	428,4
5	5,30	1,00	19	20	17140,0	438,2
6	6,30	1,00	22	26	15630,0	614,3
7	7,30	1,00	25	29	11470,0	336,8
8	8,30	1,00	26	31	16290,0	477,4
9	9,30	1,00	31	37	13705,0	366,2
10	10,30	1,00	36	42	9255,0	304,1
11	11,30	1,64	3	3,3*	1175,0	85,0

3. PORTO DO AÇU – São João da Barra/RJ

Tabela A.24 – Dados do SPT SPS04 e CPTU ECSPS04 utilizados na presente pesquisa

SPS-04					EC-SPS-04	
Prof.(m)	Prof. Média(m)	Valor de β	N _{inicial}	N _{SPT}	q _t (kPa)	f _s (kPa)
1	1,30	1,00	4	5	7000,0	20,0
2	2,30	1,00	7	9	3000,0	40,0
3	3,30	1,00	9	10	6000,0	45,0
4	4,30	1,00	7	9	5000,0	40,0
5	5,30	1,00	20	26	40000,0	100,0

Tabela A.25 – Dados do SPT SPS19 e CPTU ECSPS19 utilizados na presente pesquisa

SPS-19					EC-SPS-19	
Prof.(m)	Prof. Média(m)	Valor de β	N _{inicial}	N _{SPT}	q _t (kPa)	f _s (kPa)
11	11,30	1,00	12	13*	200,0	3,0
12	12,30	1,00	11	13	5000,0	60,0
13	13,30	1,64	22	26	5500,0	60,0
14	14,30	1,64	16	17*	1000,0	24,0
20	20,30	1,64	20	26	4000,0	70,0

Tabela A.26 – Dados do SPT SPS23 e CPTU ECSPS23 utilizados na presente pesquisa

SPS-23					EC-SPS-23	
Prof.(m)	Prof. Média(m)	Valor de β	N _{inicial}	N _{SPT}	q _t (kPa)	f _s (kPa)
2	2,30	1,00	15	21	20000,0	50,0
3	3,30	1,00	12	16	23000,0	60,0
4	4,30	1,00	17	20	15000,0	30,0
5	5,30	1,00	22	28	5000,0	20,0
6	6,30	1,00	16	22	10000,0	40,0
7	7,30	1,00	25	26*	25000,0	30,0
13	13,30	1,00	13	14*	6500,0	80,0
14	14,30	1,00	6	6,6*	4500,0	100,0
18	18,30	1,00	7	10	1000,0	18,0
19	19,30	1,00	10	11	3000,0	36,0

20	20,30	1,64	16	20	2000,0	25,0
21	21,30	1,64	17	20	2200,0	35,0
22	22,30	1,64	20	28	2000,0	35,0
23	23,30	1,64	27	34	3500,0	40,0

Tabela A.27 – Dados do SPT SPS22 e CPTU ECSPS22 utilizados na presente pesquisa

SPS-22					EC-SPS-22	
Prof.(m)	Prof. Média(m)	Valor de β	N _{inicial}	N _{SPT}	q _t (kPa)	f _s (kPa)
1	1,30	1,00	12	16	25000,0	50,0
2	2,30	1,00	23	28	11500,0	20,0
3	3,30	1,00	15	19	4000,0	20,0
4	4,30	1,00	18	21	6000,0	30,0
5	5,30	1,00	16	17*	27000,0	35,0
6	6,30	1,00	22	27	30000,0	40,0
7	7,30	1,00	15	19	45000,0	100,0

4. Obra industrial na Zona Oeste do Rio de Janeiro

Tabela A.5 – Dados do SPT309 e CPTU309 utilizados na presente pesquisa

SP-309					CPTU-309	
Prof.(m)	Prof. Média(m)	Valor de β	N _{inicial}	N _{SPT}	q _t (kPa)	f _s (kPa)
9	9,30	1,64	2	2,2*	1300,0	80,0
10	10,30	1,64	3	4	1300,0	34,0
11	11,30	1,64	3	6	800,0	11,0
12	12,30	1,64	3	5	800,0	11,0
13	13,30	1,64	2	3	800,0	15,0
14	14,30	1,64	3	4	7800,0	80,0
15	15,30	1,00	6	12	5000,0	12,0
16	16,30	1,00	10	14	10000,0	28,0
17	17,30	1,00	14	20	15300,0	60,0
18	18,30	1,00	10	15	13000,0	60,0
19	19,30	1,00	14	20	12200,0	44,0
20	20,30	1,00	13	20	10000,0	12,0
21	21,30	1,00	12	19	16000,0	12,0
25	25,30	1,00	3	6	1500,0	24,0
26	26,30	1,00	21	25	7300,0	0,0
27	27,30	1,00	21	26	8000,0	20,0
28	28,30	1,00	10	16	8000,0	20,0

Tabela A.6 – Dados do SPT304 e CPTU304 utilizados na presente pesquisa

SP-304					CPTU-304	
Prof.(m)	Prof. Média(m)	Valor de β	N _{inicial}	N _{SPT}	q _t (kPa)	f _s (kPa)
12	12,30	1,00	3	4	1000,0	10,0
13	13,30	1,00	4	5	2000,0	50,0
14	14,30	1,00	6	8	11000,0	45,0
15	15,30	1,00	7	10	12000,0	40,0
16	16,30	1,00	8	11	4000,0	10,0
17	17,30	1,00	9	12	14000,0	40,0
18	18,30	1,00	9	11	14000,0	30,0
19	19,30	1,00	12	15	14000,0	20,0
20	20,30	1,00	12	13*	1200,0	40,0
21	21,30	1,64	2	2,2*	1300,0	15,0
22	22,30	1,00	6	9	10000,0	20,0
23	23,30	1,00	6	10	3000,0	60,0
24	24,30	1,64	2	2,2*	2000,0	24,0

25	25,30	1,00	5	8	12000,0	25,0
26	26,30	1,00	10	13	16000,0	40,0
27	27,30	1,00	12	15	13000,0	35,0
28	28,30	1,00	15	18	12000,0	27,0
29	29,30	1,00	14	17	8000,0	20,0
30	30,30	1,00	17	20	10000,0	17,0
31	31,30	1,00	13	16	12000,0	25,0
32	32,30	1,00	14	17	9000,0	80,0
33	33,30	1,00	16	19	9000,0	25,0

Tabela A.7 – Dados do SPT305 e CPTU305 utilizados na presente pesquisa

SP-305					CPTU-305	
Prof.(m)	Prof. Média(m)	Valor de β	N _{inicial}	N _{SPT}	q _t (kPa)	f _s (kPa)
5	5,30	1,64	3	3,3*	250,0	8,0
6	6,30	1,64	3	4	100,0	54,0
7	7,30	1,64	4	5	900,0	46,0
8	8,30	1,64	5	5,5*	1000,0	36,0
9	9,30	1,64	4	4,4*	800,0	10,0
10	10,30	1,64	5	6	700,0	18,0
11	11,30	1,64	6	9	1100,0	20,0
12	12,30	1,64	4	5	14000,0	100,0
13	13,30	1,64	4	5	14000,0	60,0
14	14,30	1,00	24	25*	13000,0	40,0
15	15,30	1,00	17	19	11000,0	26,0
16	16,30	1,00	18	21	12000,0	36,0
17	17,30	1,00	20	23	13000,0	34,0
18	18,30	1,00	19	20	9500,0	26,0
19	19,30	1,00	15	16	12000,0	24,0
20	20,30	1,00	11	12*	20000,0	120,0
21	21,30	1,00	30	40	20000,0	60,0
22	22,30	1,00	14	15*	8000,0	40,0
23	23,30	1,00	9	12	3000,0	54,0
24	24,30	1,00	7	8	1500,0	10,0
25	25,30	1,00	9	12	12000,0	40,0
26	26,30	1,00	17	23	13000,0	50,0
27	27,30	1,00	18	23	19000,0	60,0

Tabela A.8 – Dados do SPT308 e CPTU308 utilizados na presente pesquisa

SP-308					CPTU-308	
Prof.(m)	Prof. Média(m)	Valor de β	N _{inicial}	N _{SPT}	q _t (kPa)	f _s (kPa)
13	13,30	1,64	4	4,4*	1000,0	16,0
14	14,30	1,64	3	4	1500,0	20,0
15	15,30	1,64	4	5	5000,0	26,0
16	16,30	1,64	5	5,5*	18000,0	50,0
17	17,30	1,00	17	18	13000,0	80,0
18	18,30	1,00	17	18*	8000,0	20,0
19	19,30	1,00	9	11	8000,0	10,0
20	20,30	1,00	13	14	10000,0	30,0
21	21,30	1,00	11	12	1000,0	20,0
22	22,30	1,00	14	15*	3000,0	40,0
23	23,30	1,00	13	15	16000,0	60,0
24	24,30	1,00	12	13	4000,0	80,0

Tabela A.9 – Dados do SPT310 e CPTU310 utilizados na presente pesquisa

SP-310					CPTU-310	
Prof.(m)	Prof. Média(m)	Valor de β	N _{inicial}	N _{SPT}	q _t (kPa)	f _s (kPa)
10	10,30	1,64	2	2,2*	700,0	18,0
11	11,30	1,64	3	4	700,0	10,0
12	12,30	1,00	2	3	700,0	10,0
13	13,30	1,00	3	5	700,0	14,0
14	14,30	1,00	6	12	1000,0	16,0
15	15,30	1,00	6	11	4000,0	30,0
16	16,30	1,00	12	17	14500,0	30,0
17	17,30	1,00	16	21	8000,0	60,0
18	18,30	1,00	19	21	8000,0	60,0
19	19,30	1,00	15	22	12000,0	40,0
20	20,30	1,00	12	14	20000,0	80,0
21	21,30	1,00	16	20	12000,0	38,0
22	22,30	1,00	14	19	1100,0	26,0
23	23,30	1,00	5	11	1700,0	40,0
24	24,30	1,64	6	7	8000,0	40,0
25	25,30	1,00	15	22	16000,0	80,0
26	26,30	1,00	43	56	16000,0	60,0
27	27,30	1,00	24	29	14000,0	40,0
28	28,30	1,00	16	22	10000,0	30,0
29	29,30	1,00	18	21	13000,0	30,0
30	30,30	1,00	21	26	10000,0	30,0
31	31,30	1,00	24	26	4000,0	120,0

Tabela A.10 – Dados do SPT314 e CPTU314 utilizados na presente pesquisa

SP-314					CPTU-314	
Prof.(m)	Prof. Média(m)	Valor de β	N _{inicial}	N _{SPT}	q _t (kPa)	f _s (kPa)
13	13,30	1,00	2	3	7000,0	20,0
14	14,30	1,00	3	5	9000,0	30,0
15	15,30	1,00	6	13	5500,0	20,0
16	16,30	1,00	14	19	17000,0	40,0
17	17,30	1,00	13	17	15000,0	35,0
18	18,30	1,00	12	17	2000,0	80,0
19	19,30	1,00	12	18	12500,0	30,0
20	20,30	1,64	6	10	9000,0	20,0
21	21,30	1,64	5	9	1200,0	40,0
22	22,30	1,64	4	5	1200,0	15,0
23	23,30	1,64	3	4	1500,0	23,0
24	24,30	1,64	2	3	2000,0	40,0
25	25,30	1,64	3	5	2000,0	80,0
26	26,30	1,64	3	6	18000,0	40,0
27	27,30	1,64	6	8	15000,0	30,0
28	28,30	1,00	13	16	10000,0	20,0
29	29,30	1,00	12	17	15000,0	30,0
30	30,30	1,00	14	20	10000,0	20,0
31	31,30	1,00	11	17	11000,0	40,0

Tabela A.11 – Dados do SPT315 e CPTU315 utilizados na presente pesquisa

SP-315					CPTU-315	
Prof.(m)	Prof. Média(m)	Valor de β	N _{inicial}	N _{SPT}	q _t (kPa)	f _s (kPa)
8	8,30	1,64	4	5	1000,0	60,0
9	9,30	1,64	3	3,3*	750,0	35,0
10	10,30	1,64	5	5,5*	750,0	20,0
11	11,30	1,64	5	5,5*	600,0	20,0
12	12,30	1,64	3	3,3*	2000,0	60,0
13	13,30	1,64	6	9	1500,0	25,0
14	14,30	1,64	5	9	1050,0	25,0
15	15,30	1,64	7	8	10000,0	35,0
16	16,30	1,64	6	12	8000,0	40,0
17	17,30	1,00	10	11	10000,0	45,0

18	18,30	1,00	11	13	10000,0	35,0
19	19,30	1,00	11	12	7500,0	25,0
20	20,30	1,00	11	12*	10000,0	30,0
21	21,30	1,00	12	13*	2000,0	30,0
22	22,30	1,00	11	13	1500,0	15,0
23	23,30	1,00	12	13	2000,0	35,0
24	24,30	1,00	13	16	2000,0	35,0
25	25,30	1,00	12	13	1750,0	35,0
26	26,30	1,00	11	14	9000,0	50,0

Tabela A.12 – Dados do SPT319 e CPTU319 utilizados na presente pesquisa

SP-319					CPTU-319	
Prof.(m)	Prof. Média(m)	Valor de β	N _{inicial}	N _{SPT}	q _t (kPa)	f _s (kPa)
7	7,30	1,00	3	4	8000,0	20,0
8	8,30	1,00	6	12	12000,0	40,0
9	9,30	1,64	2	3	1800,0	60,0
10	10,30	1,64	3	4	1000,0	40,0
15	15,30	1,00	3	6	9000,0	40,0
16	16,30	1,00	6	12	8000,0	40,0
17	17,30	1,00	11	19	12000,0	40,0
18	18,30	1,00	14	21	16000,0	40,0
19	19,30	1,00	14	19	12000,0	50,0
20	20,30	1,00	14	23	8000,0	50,0
21	21,30	1,00	13	20	1100,0	15,0
23	23,30	1,64	2	3	2000,0	30,0
24	24,30	1,64	2	2,2*	2000,0	40,0
25	25,30	1,64	2	3	2300,0	70,0
26	26,30	1,64	2	2,2*	16000,0	50,0
27	27,30	1,64	9	16	16000,0	50,0

Tabela A.13 – Dados do SPT321 e CPTU321 utilizados na presente pesquisa

SP-321					CPTU-321	
Prof.(m)	Prof. Média(m)	Valor de β	N _{inicial}	N _{SPT}	q _t (kPa)	f _s (kPa)
7	7,30	1,00	7	7,7*	1000,0	45,0
8	8,30	1,00	7	7,7*	1500,0	50,0
9	9,30	1,00	6	7	1250,0	30,0
10	10,30	1,00	8	8,8*	1250,0	15,0

11	11,30	1,00	2	2,2*	1000,0	15,0
12	12,30	1,00	3	3,3*	2000,0	40,0
13	13,30	1,00	5	7	1500,0	30,0
14	14,30	1,00	6	7	1500,0	30,0
15	15,30	1,00	3	4	1500,0	20,0

Tabela A.14 – Dados do SPT325 e CPTU325 utilizados na presente pesquisa

SP-325					CPTU-325	
Prof.(m)	Prof. Média(m)	Valor de β	N _{inicial}	N _{SPT}	qt(kPa)	fS(kPa)
6	6,30	1,00	4	7	1000,0	60,0
7	7,30	1,00	9	14	1000,0	60,0
8	8,30	1,00	15	25	4000,0	20,0
9	9,30	1,00	14	16	550,0	7,0
13	13,30	1,64	11	15	6000,0	50,0

Tabela A.15 – Dados do SPT327 e CPTU327 utilizados na presente pesquisa

SP-327					CPTU-327	
Prof.(m)	Prof. Média(m)	Valor de β	N _{inicial}	N _{SPT}	qt(kPa)	fs(kPa)
7	7,30	1,00	5	6	2500,0	1,0
8	8,30	1,00	4	5	3500,0	1,0
9	9,30	1,00	6	7	1000,0	25,0
14	14,30	1,00	8	10	1000,0	20,0
15	15,30	1,00	4	5	8000,0	20,0
16	16,30	1,00	8	14	14000,0	40,0
17	17,30	1,00	10	14	12000,0	40,0
18	18,30	1,00	13	14	7000,0	15,0
19	19,30	1,00	9	10	15000,0	45,0
20	20,30	1,00	12	13	6500,0	17,0
21	21,30	1,00	11	12	3000,0	60,0
22	22,30	1,00	9	11	1100,0	20,0
23	23,30	1,00	10	11*	2000,0	40,0
24	24,30	1,64	2	2,2*	16000,0	60,0
25	25,30	1,00	6	10	13500,0	38,0
26	26,30	1,00	13	19	14000,0	45,0
27	27,30	1,00	13	17	12000,0	50,0
28	28,30	1,00	10	14	13000,0	55,0
29	29,30	1,00	13	17	2000,0	1,0

Tabela A.16 – Dados do SPT328 e CPTU328 utilizados na presente pesquisa

SP-328					CPTU-328	
Prof.(m)	Prof. Média(m)	Valor de β	N _{inicial}	N _{SPT}	q _t (kPa)	f _s (kPa)
6	6,30	1,64	1	4	1000,0	50,0
7	7,30	1,64	6	10	4000,0	40,0
8	8,30	1,00	10	14	9000,0	4,0
9	9,30	1,00	3	4	1800,0	60,0
10	10,30	1,64	2	3	1500,0	70,0
11	11,30	1,64	2	2,2*	1000,0	30,0
14	14,30	1,00	7	10	6000,0	40,0
15	15,30	1,00	9	12	12000,0	20,0
17	17,30	1,00	10	13	16000,0	30,0
18	18,30	1,00	14	18	16000,0	30,0
19	19,30	1,00	9	12	16000,0	30,0
20	20,30	1,00	11	14	1300,0	20,0
21	21,30	1,64	2	2,2*	1300,0	14,0
23	23,30	1,64	7	8	16000,0	100,0
24	24,30	1,64	14	21	12000,0	120,0
25	25,30	1,00	3	4	2000,0	50,0
26	26,30	1,00	5	8	3000,0	90,0
27	27,30	1,00	7	10	16000,0	50,0
28	28,30	1,00	9	12	10000,0	20,0
29	29,30	1,00	7	9	12000,0	30,0
30	30,30	1,00	7	12	8000,0	80,0

Tabela A.17 – Dados do SPT331 e CPTU331 utilizados na presente pesquisa

SP-331					CPTU-331	
Prof.(m)	Prof. Média(m)	Valor de β	N _{inicial}	N _{SPT}	q _t (kPa)	f _s (kPa)
7	7,30	1,00	7	8	4000,0	3,0
8	8,30	1,00	8	9	1000,0	20,0
13	13,30	1,64	3	4	12000,0	60,0
14	14,30	1,64	8	10	8000,0	20,0
15	15,30	1,00	8	12	5000,0	40,0
16	16,30	1,00	11	14	13000,0	45,0
17	17,30	1,00	10	12	4000,0	30,0
18	18,30	1,00	9	12	16000,0	30,0

19	19,30	1,00	11	14	11000,0	20,0
20	20,30	1,00	10	11	12000,0	15,0
21	21,30	1,00	13	15	12000,0	15,0
22	22,30	1,00	2	2,2*	1300,0	20,0
24	24,30	1,00	2	3	1600,0	30,0
27	27,30	1,00	8	14	18000,0	50,0
28	28,30	1,64	10	13	11000,0	20,0
29	29,30	1,64	10	11*	13500,0	40,0
30	30,30	1,64	11	15	15000,0	40,0
31	31,30	1,64	10	13	8000,0	15,0
32	32,30	1,64	11	14	10500,0	90,0

Tabela A.18 – Dados do SPT332 e CPTU332 utilizados na presente pesquisa

Prof.(m)	SP-332				CPTU-332	
	Prof. Média(m)	Valor de β	N _{inicial}	N _{SPT}	q _t (kPa)	f _s (kPa)
7	7,30	1,00	7	10	1500,0	60,0
8	8,30	1,00	6	10	1000,0	20,0
9	9,30	1,00	5	8	1000,0	20,0
10	10,30	1,00	3	3,3*	1000,0	20,0
11	11,30	1,64	2	3	2000,0	40,0
12	12,30	1,64	4	4,4*	900,0	25,0
13	13,30	1,64	1	5	900,0	15,0
14	14,30	1,64	4	7	4000,0	30,0
15	15,30	1,64	6	10	1500,0	60,0
16	16,30	1,64	5	8	16000,0	100,0
17	17,30	1,64	4	5	20000,0	80,0
18	18,30	1,00	25	28	13500,0	22,0
19	19,30	1,00	23	26	10000,0	20,0
20	20,30	1,00	32	36	8000,0	40,0
21	21,30	1,64	4	4,4*	5000,0	15,0
22	22,30	1,64	4	4,4*	1500,0	12,0
23	23,30	1,64	7	10	1800,0	30,0
24	24,30	1,00	10	13	1900,0	30,0
25	25,30	1,00	13	17	2800,0	50,0
26	26,30	1,00	14	18	4000,0	80,0
27	27,30	1,00	15	19	12000,0	37,0
28	28,30	1,00	17	21	20000,0	60,0
29	29,30	1,00	17	18	17000,0	50,0

Tabela A.19 – Dados do SPT334 e CPTU334 utilizados na presente pesquisa

SP-334					CPTU-334	
Prof.(m)	Prof. Média(m)	Valor de β	N _{inicial}	N _{SPT}	q _t (kPa)	f _s (kPa)
8	8,30	1,00	3	6	4000,0	60,0
9	9,30	1,64	5	6	1600,0	60,0
10	10,30	1,64	5	6	1500,0	45,0
11	11,30	1,64	5	6	1350,0	40,0
12	12,30	1,64	4	6	2000,0	70,0
13	13,30	1,00	3	3,3*	1250,0	50,0
14	14,30	1,64	3	4	4000,0	80,0
15	15,30	1,64	1	4	1500,0	37,0

Tabela A.20 – Dados do SPT118 e CPTU118 utilizados na presente pesquisa

SP-118					CPTU-118	
Prof.(m)	Prof. Média(m)	Valor de β	N _{inicial}	N _{SPT}	q _t (kPa)	f _s (kPa)
8	8,30	1,64	3	4	1200,0	45,0
9	9,30	1,64	2	3	1200,0	25,0
10	10,30	1,64	4	5	1400,0	28,0
11	11,30	1,64	3	4	1200,0	30,0
12	12,30	1,64	2	3	1000,0	15,0
14	14,30	1,00	2	3	3000,0	25,0
15	15,30	1,00	3	4	2500,0	50,0

ANEXO B – RESULTADOS OBTIDOS COM SCHMERTMANN (1979) E AOKI (2013)

1. Rodovia Presidente Dutra - Baixada do Jacareí/SP:

i.SPT15 e CPTU 04;

ii.SPT06 e CPTU 01;

iii.SPT17 e CPTU 06;

iv.SPT02 e CPTU 03;

2. Obra Residencial – ITAPEMA/SC:

v.SPT F1 e CPTU 2 (07);

vi.SPT F2 e CPTU 1 (11);

vii.SPT F3 e CPTU 5 (11);

3. PORTO DO AÇU – São João da Barra/RJ:

viii.SPT SPS04 e CPTU ECSPS04;

ix.SPT SPS19 e CPTU ECSPS19;

x.SPT SPS23 e CPTU ECSPS23;

xi.SPT SPS22 e CPTU ECSPS22;

4. Obra Industrial na Zona Oeste do Rio de Janeiro:

- xii.SPT309 e CPTU309;
- xiii.SPT304 e CPTU304;
- xiv.SPT305 e CPTU305;
- xv.SPT308 e CPTU308;
- xvi.SPT310 e CPTU310;
- xvii.SPT314 e CPTU314;
- xviii.SPT315 e CPTU315;
- xix.SPT319 e CPTU319;
- xx.SPT321 e CPTU321;
- xxi.SPT325 e CPTU325;
- xxii.SPT327 e CPTU327;
- xxiii.SPT328 e CPTU328;
- xxiv.SPT331 e CPTU331;
- xxv.SPT332 e CPTU332;
- xxvi.SPT334 e CPTU334;
- xxvii.SPT118 e CPTU118;

i. SPT15 e CPTU 04

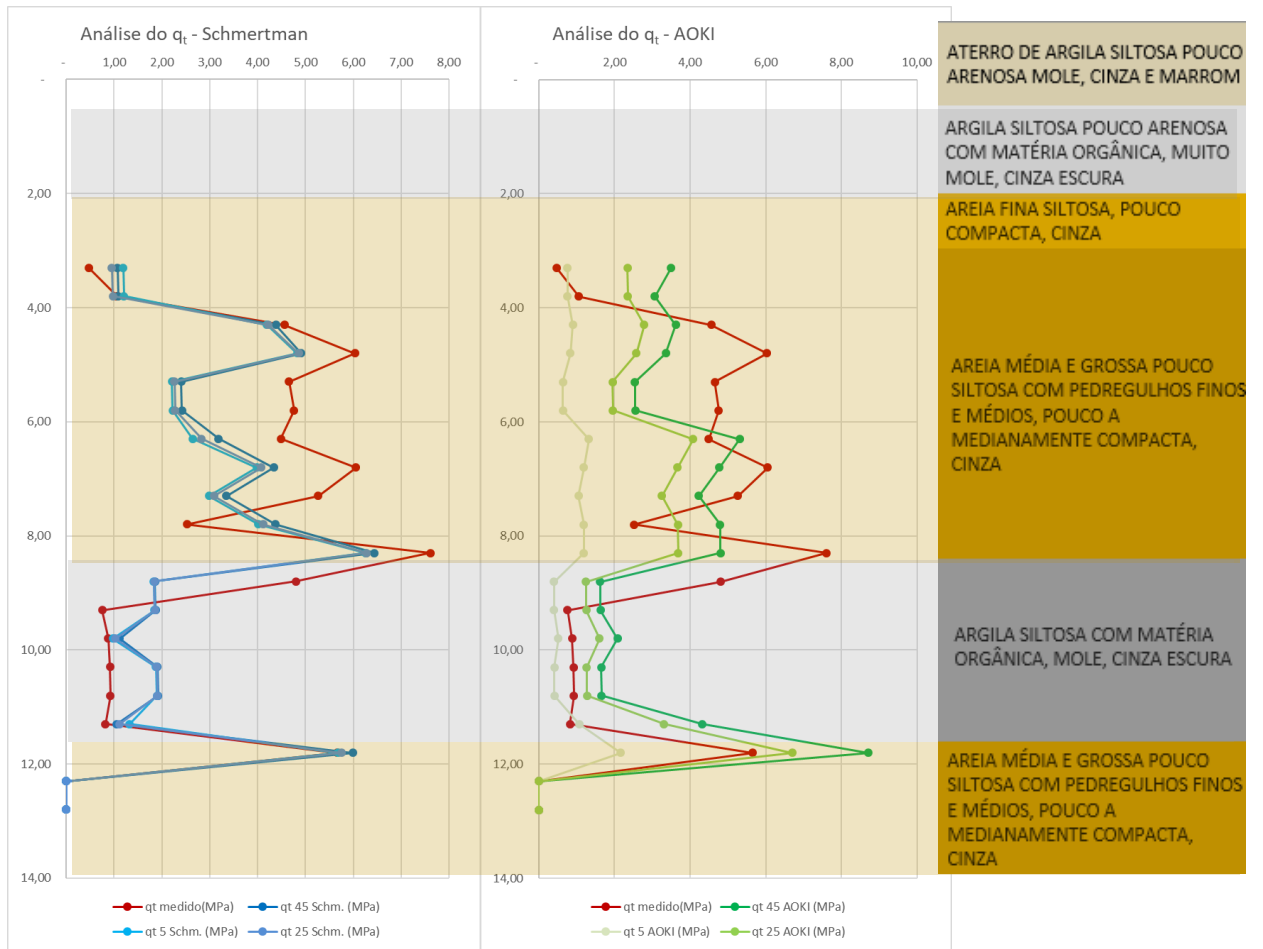


Figura B.1: Comparação das estimativas de resistência unitária de ponta (q_c) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT15 x CPTU 04.

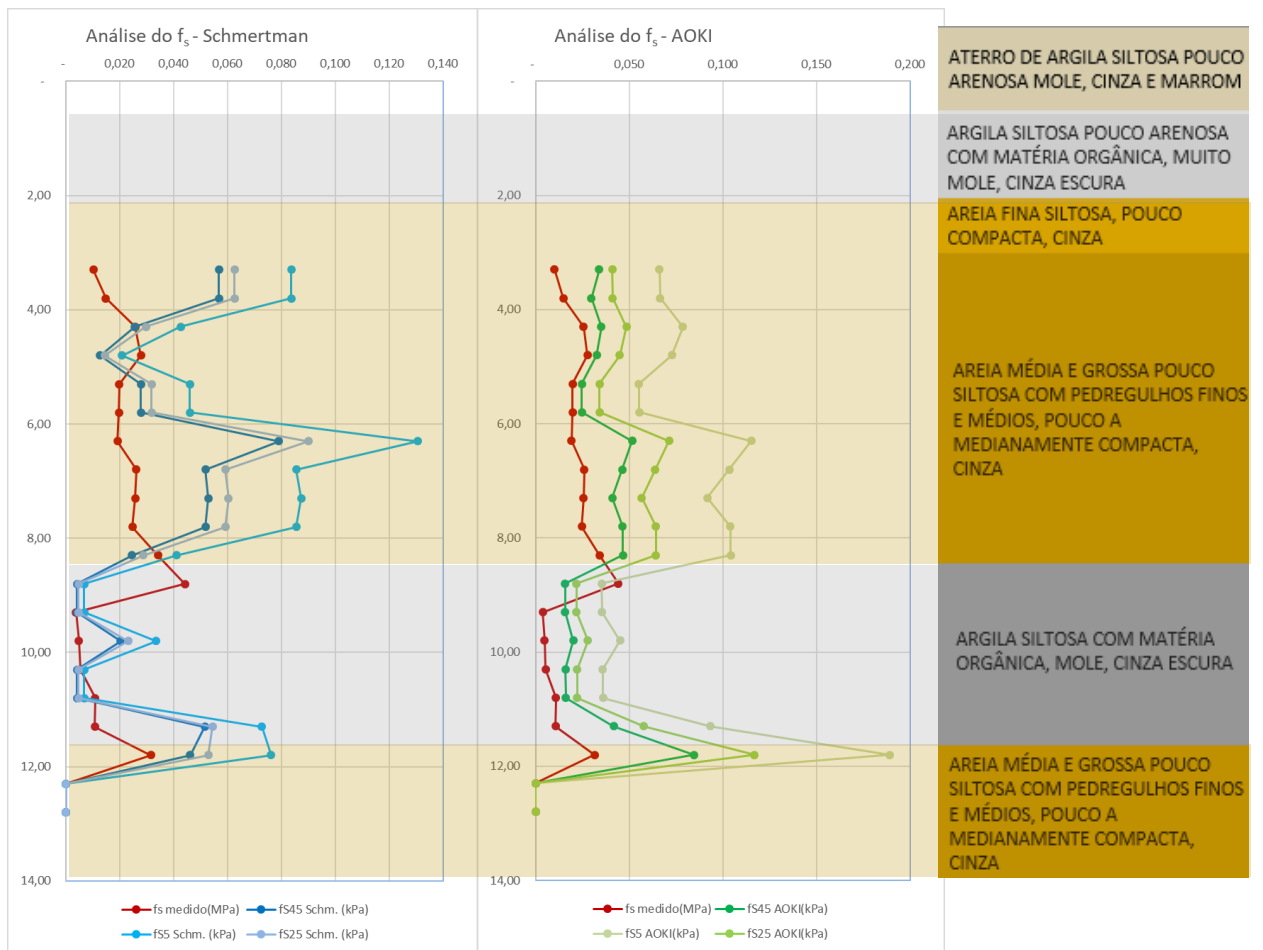


Figura B.2: Comparação das estimativas de resistência unitária de atrito lateral (f_s) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT15 x CPTU 04.

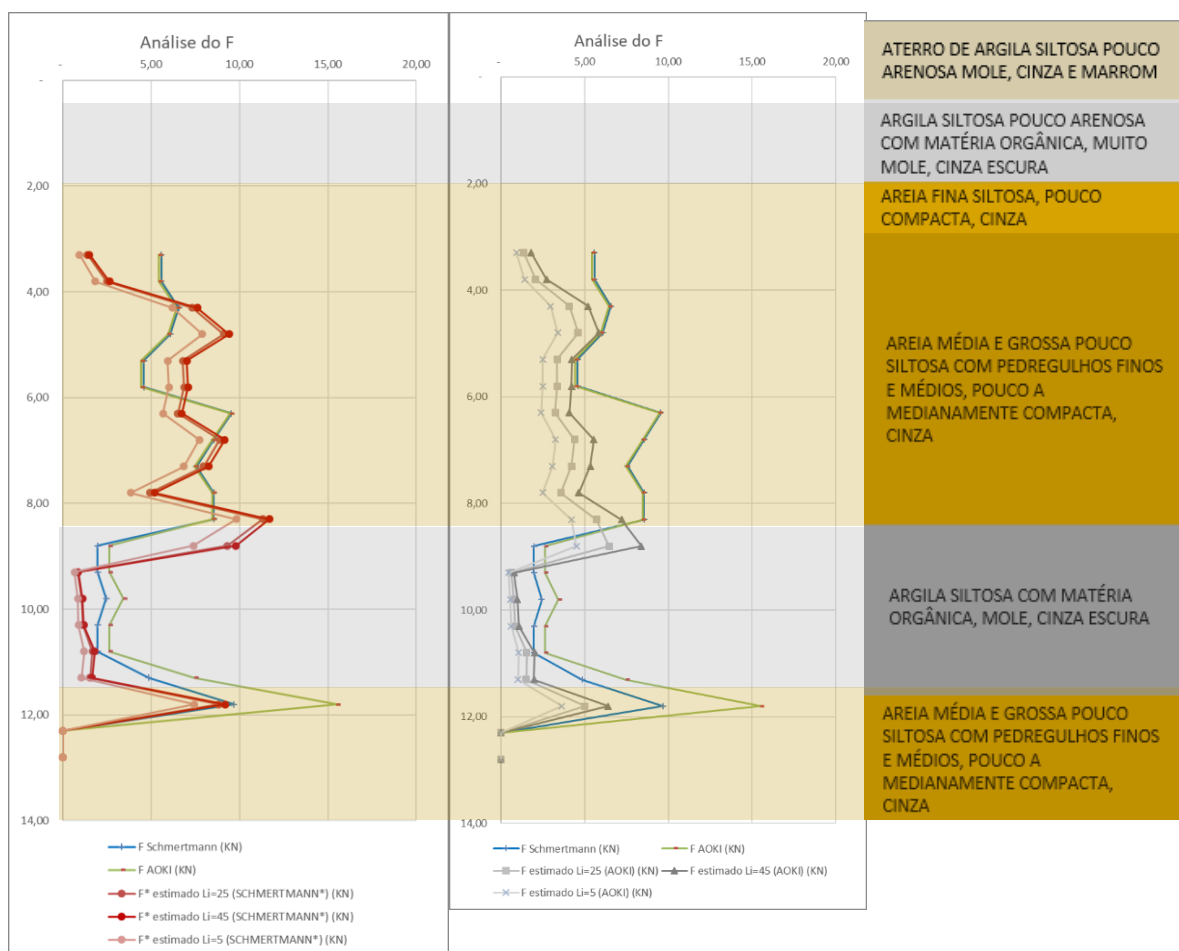


Figura B.3: Comparação da resistência estática (F) calculadas pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores “medidos” estimados através do CPTU para as áreas do amostrador SPT consideradas por Schmertmann (1979), em vermelho, e Aoki (2013) em cinza - SPT15 x CPTU 04.

ii. SPT06 e CPTU 01

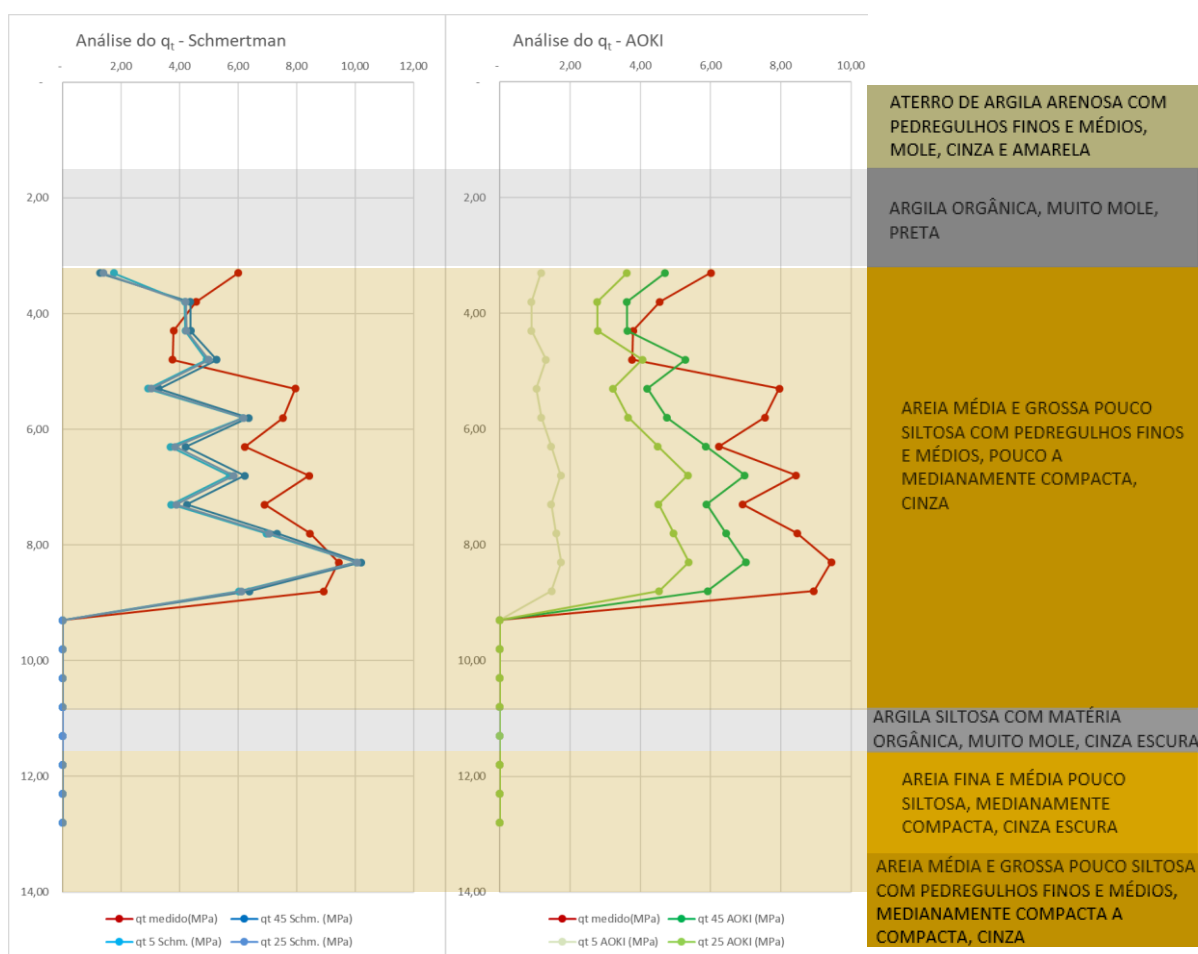


Figura B.4: Comparação das estimativas de resistência unitária de ponta (q_c) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU , em vermelho – SPT06 e CPTU 01.

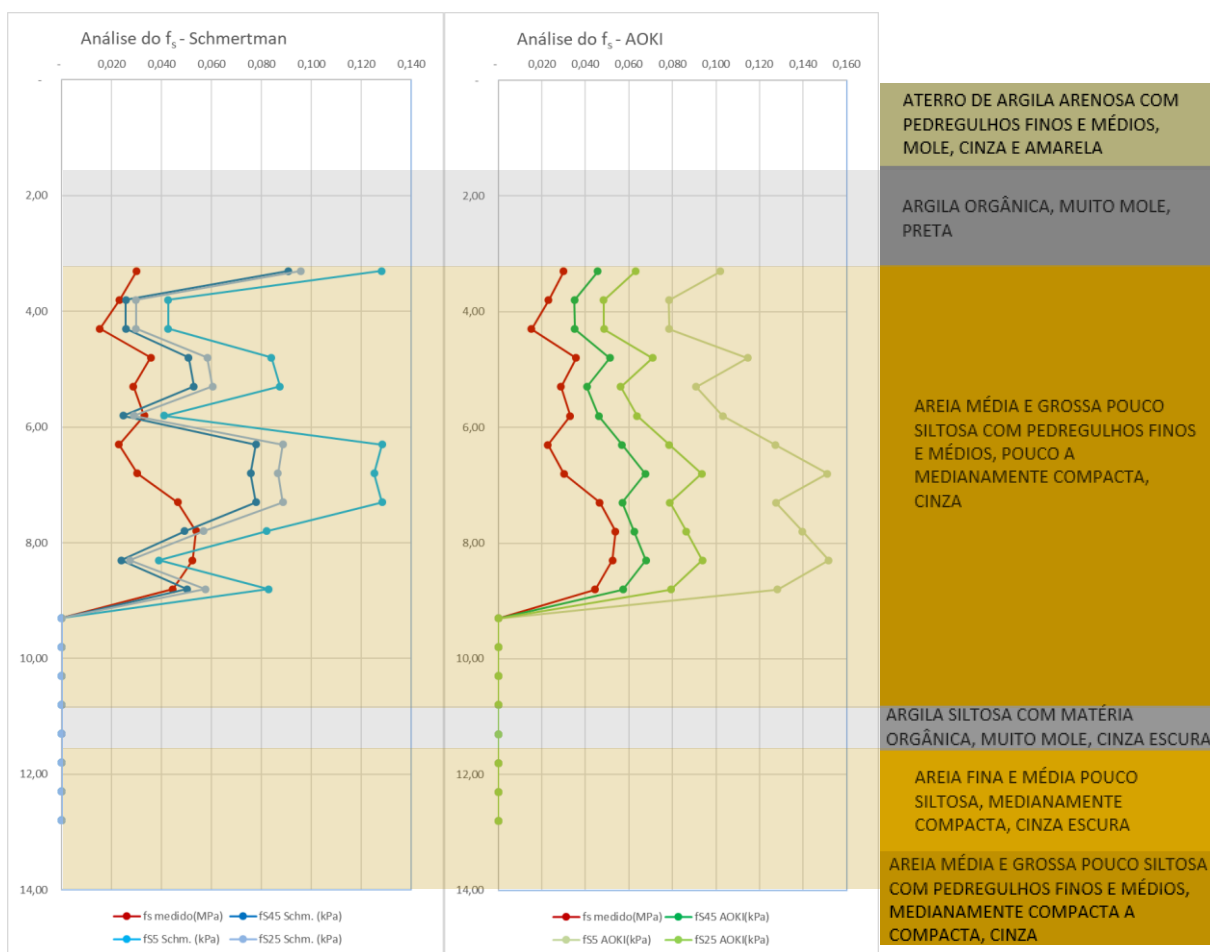


Figura B.5: Comparação das estimativas de resistência unitária de atrito lateral (f_s) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT06 e CPTU 01.

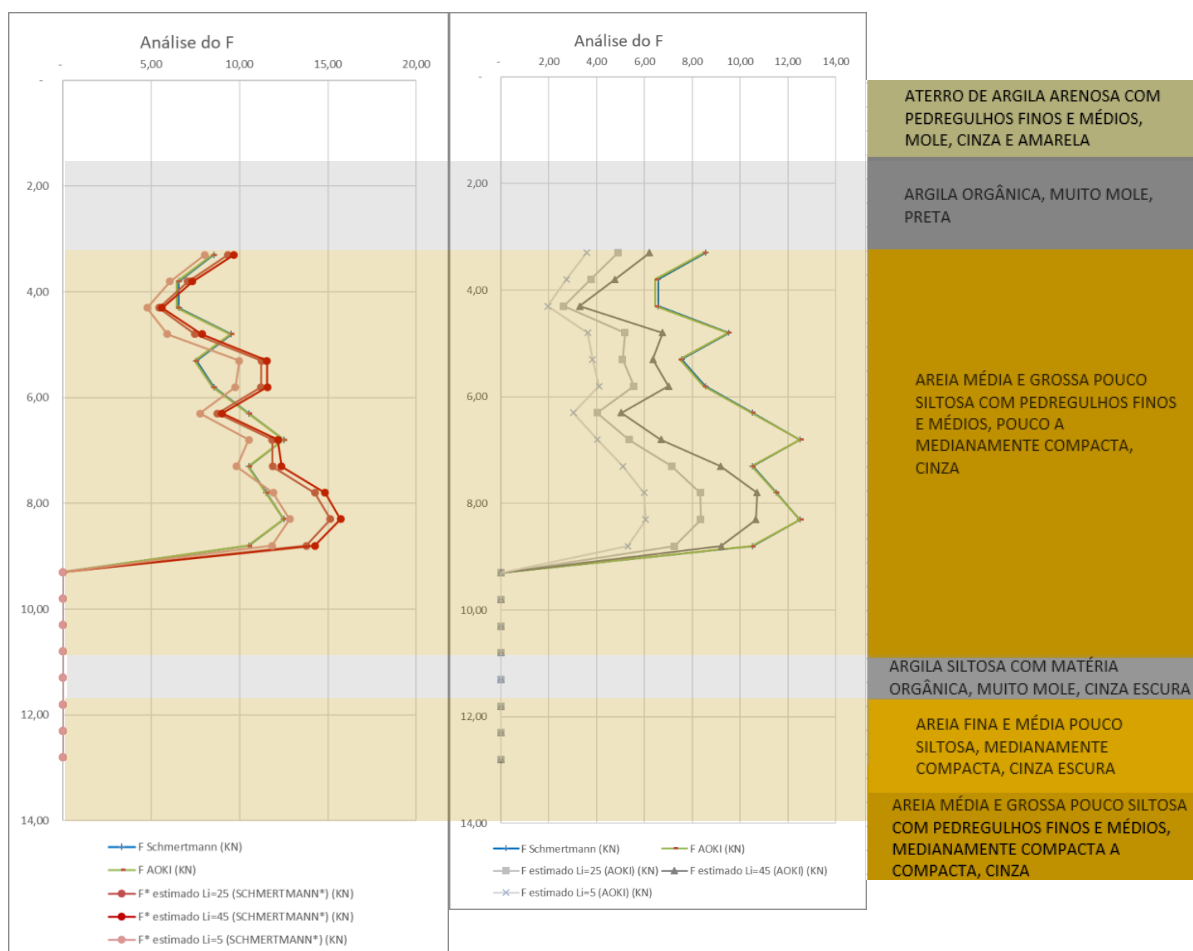


Figura B.6: Comparação das resistência estática (F) calculadas pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores “medidos” estimados através do CPTU para as áreas do amostrador SPT consideradas por Schmertmann (1979), em vermelho, e Aoki (2013) em cinza - SPT06 e CPTU 01.

iii. SPT17 e CPTU 06

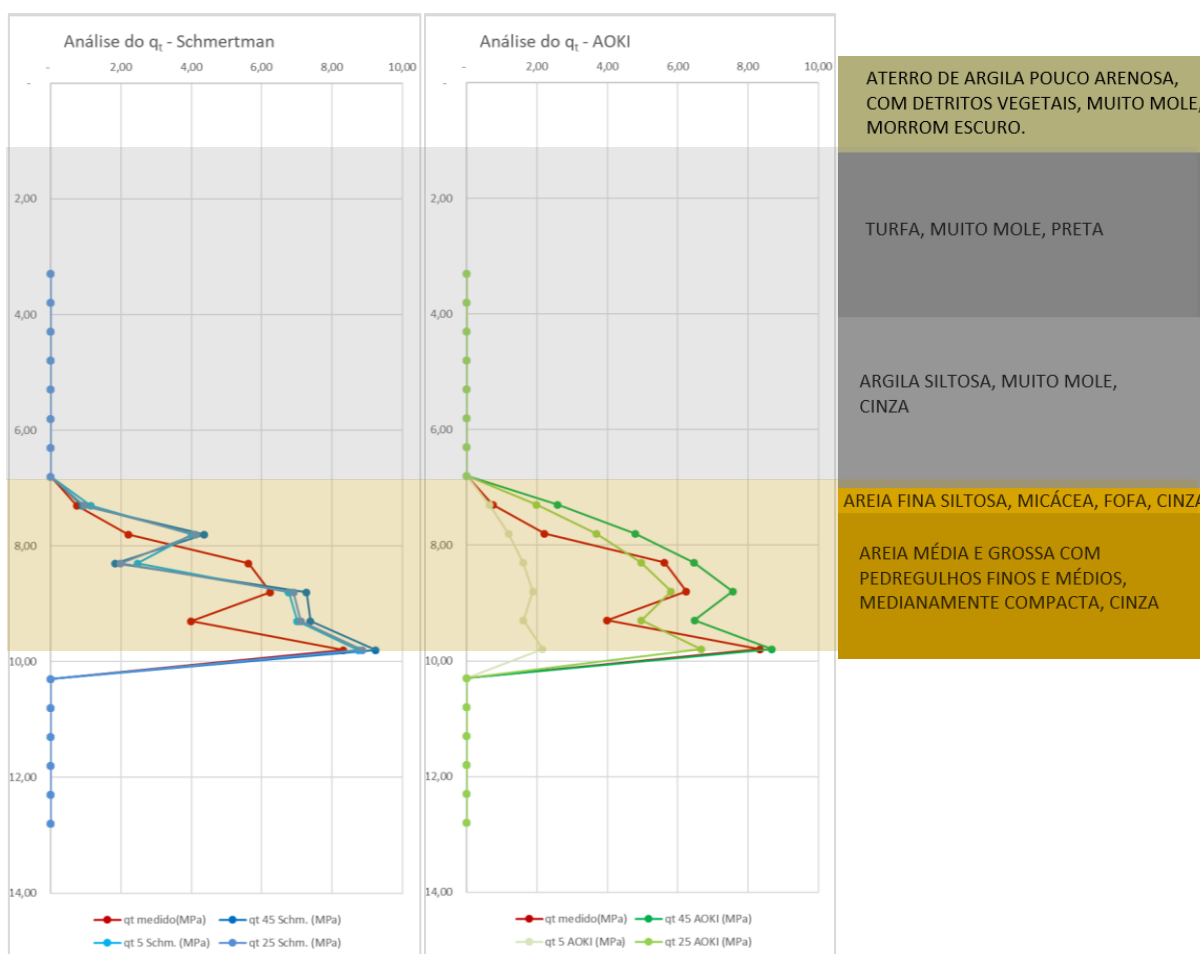


Figura B.7: Comparação das estimativas de resistência unitária de ponta (q_c) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT17 e CPTU 06.

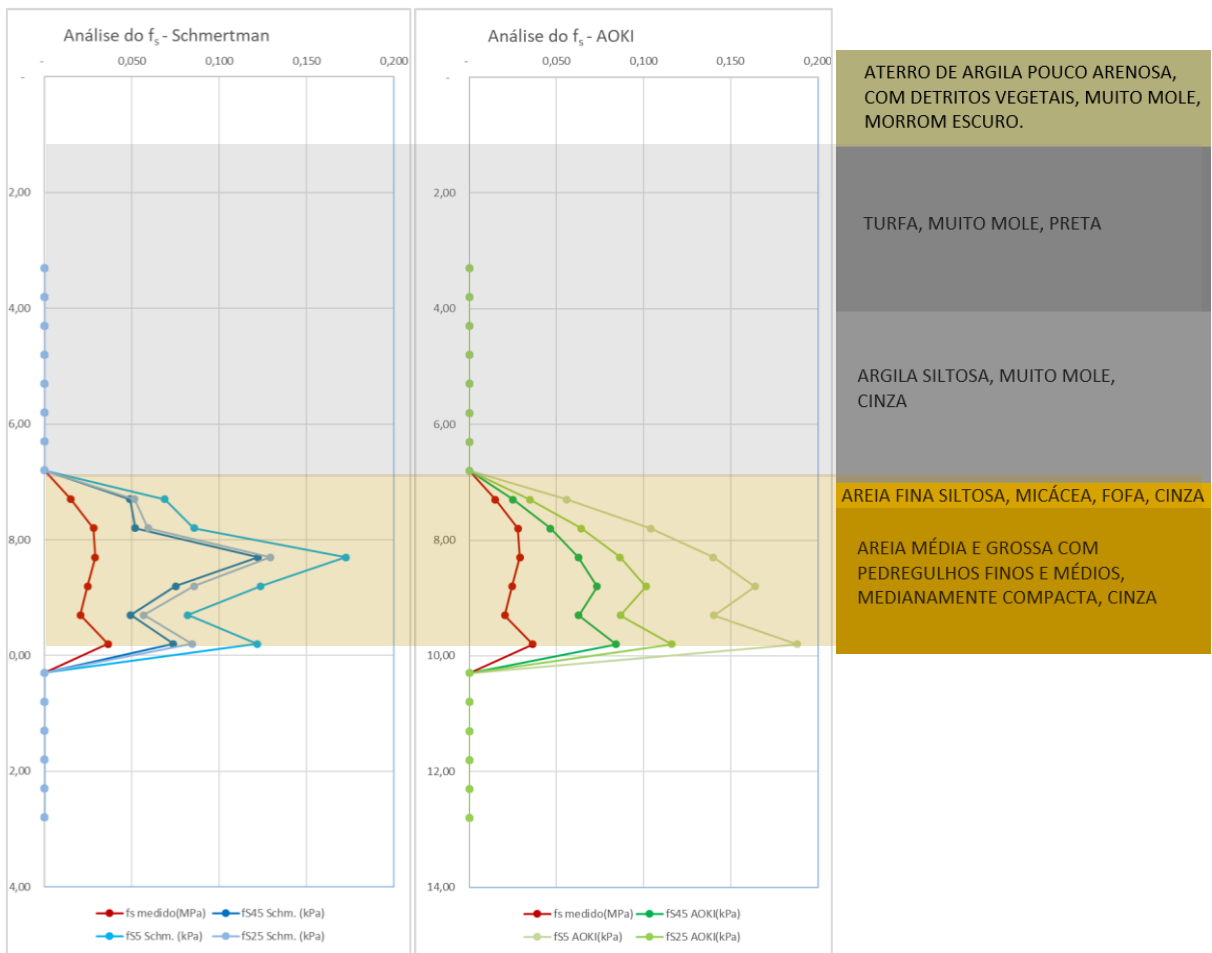


Figura B.8: Comparação das estimativas de resistência unitária de atrito lateral (f_s) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT17 e CPTU 06.

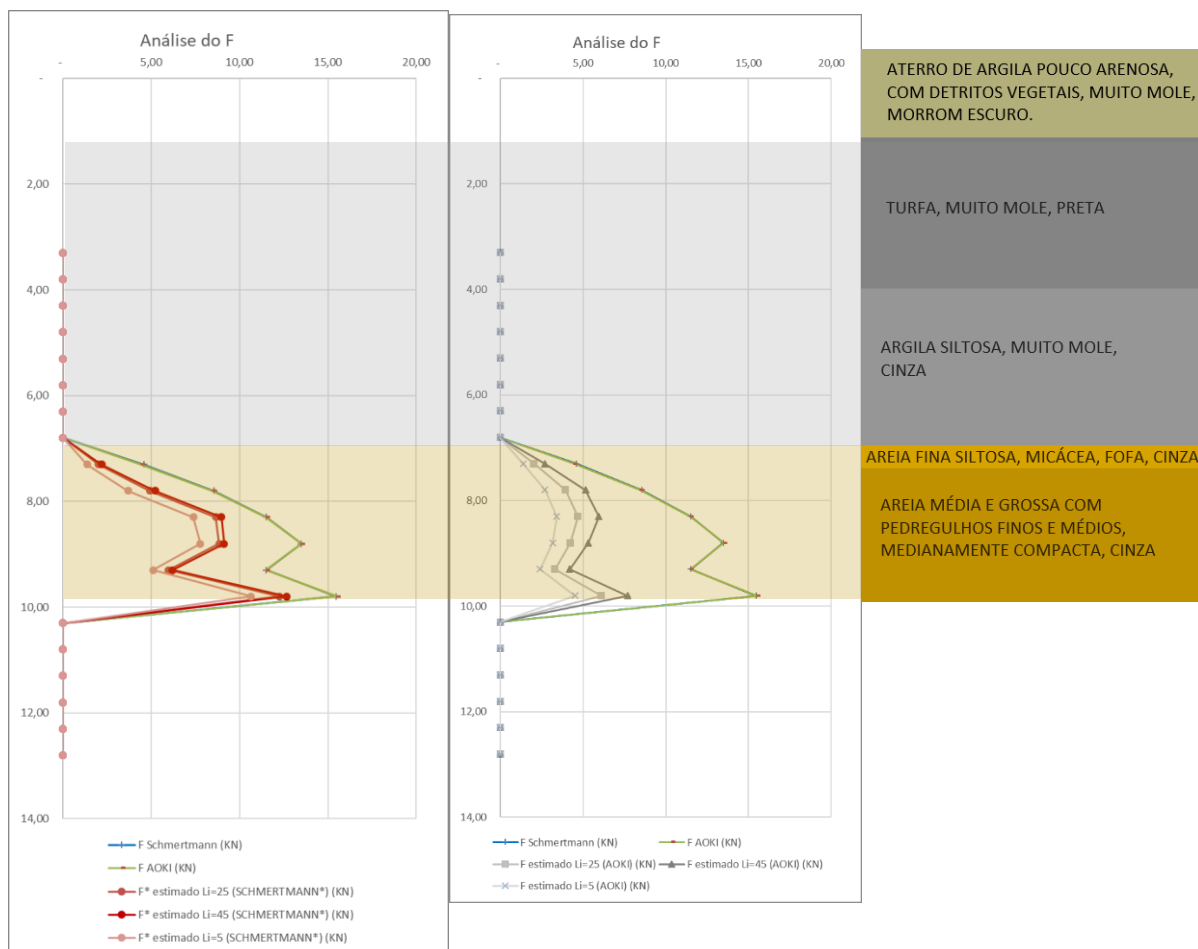


Figura B.9: Comparação das resistência estática (F) calculadas pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores “medidos” estimados através do CPTU para as áreas do amostrador SPT consideradas por Schmertmann (1979), em vermelho, e Aoki (2013) em cinza - SPT17 e CPTU 06.

iv. SPT02 e CPTU 03

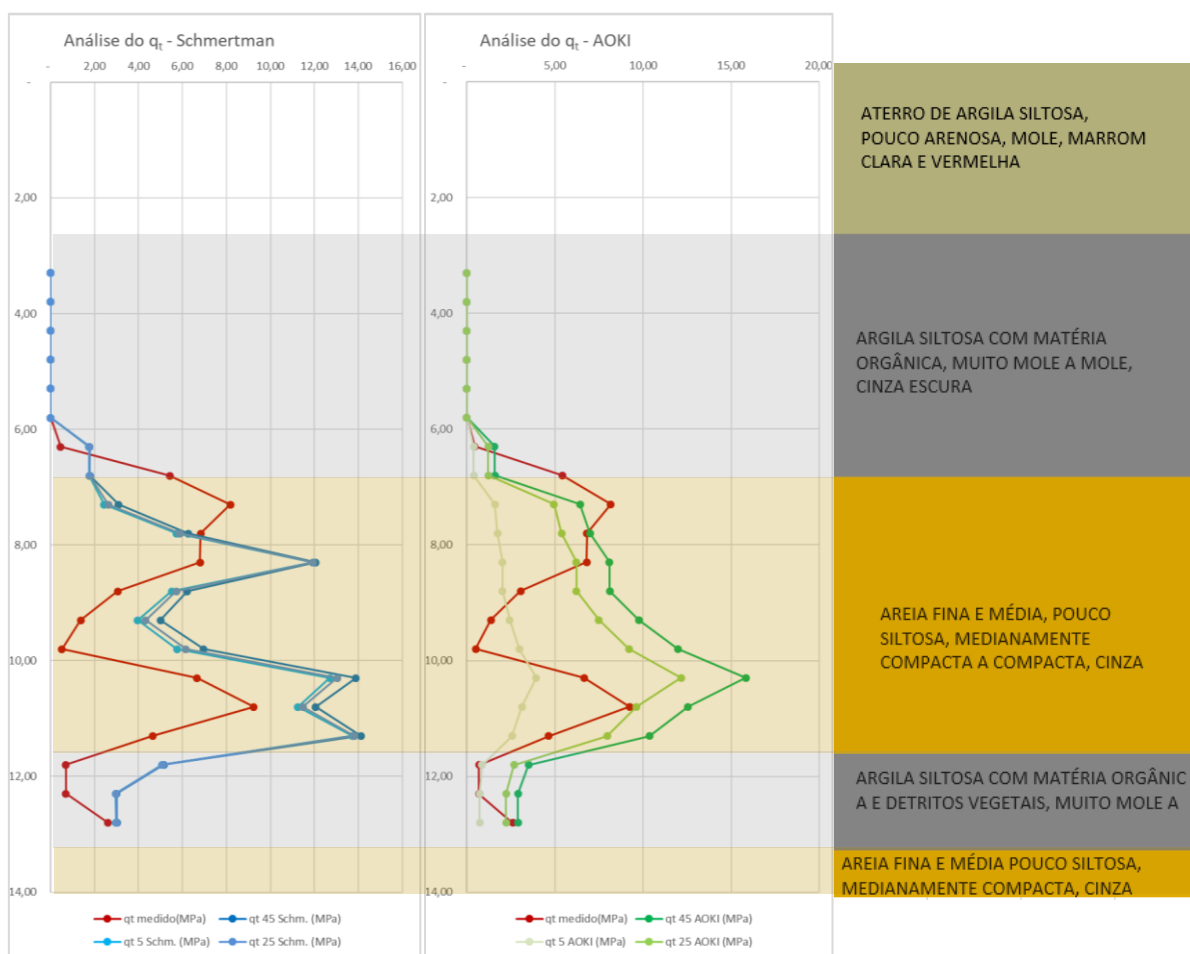


Figura B.10: Comparação das estimativas de resistência unitária de ponta (q_c) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT02 e CPTU 03.

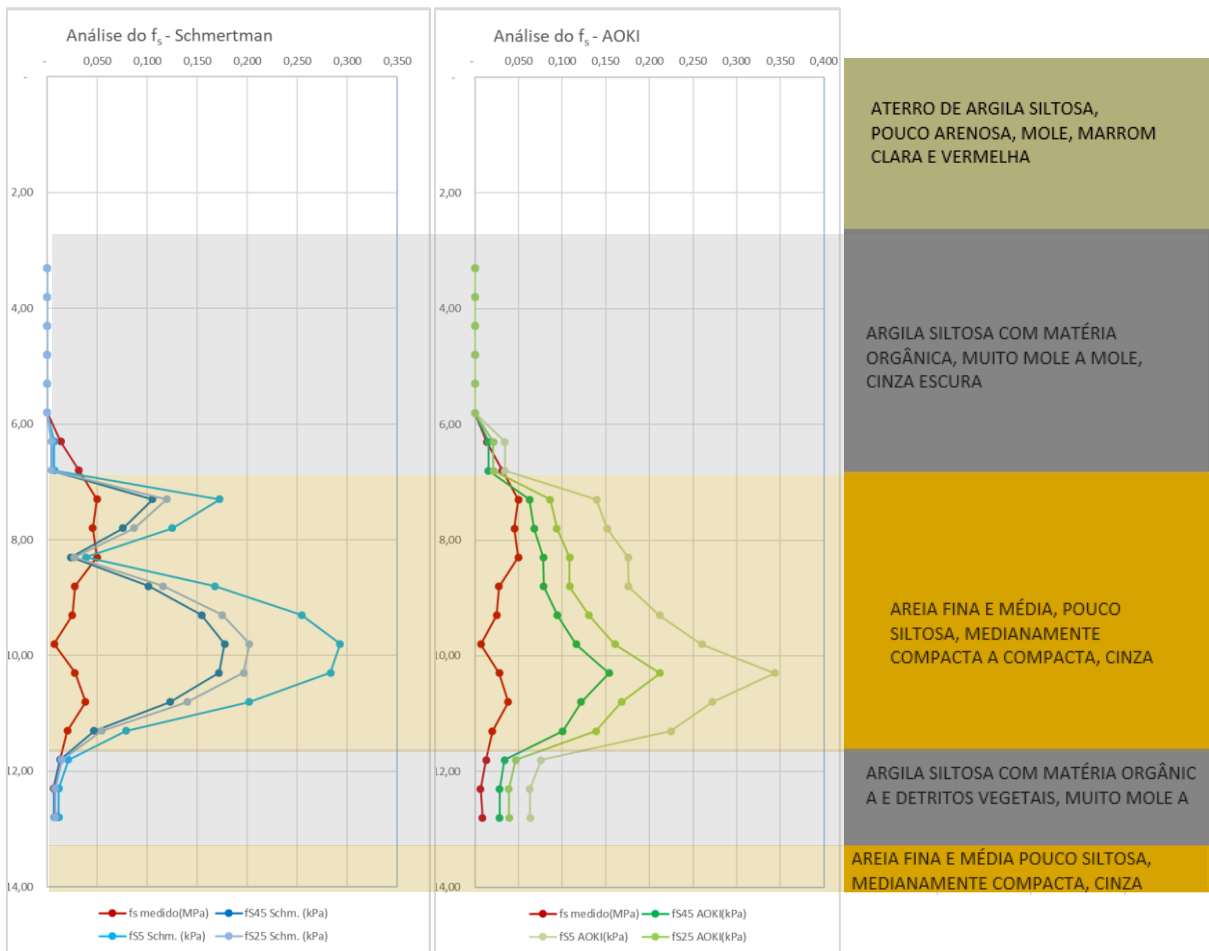


Figura B.11: Comparação das estimativas de resistência unitária de atrito lateral (f_s) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT02 e CPTU 03.

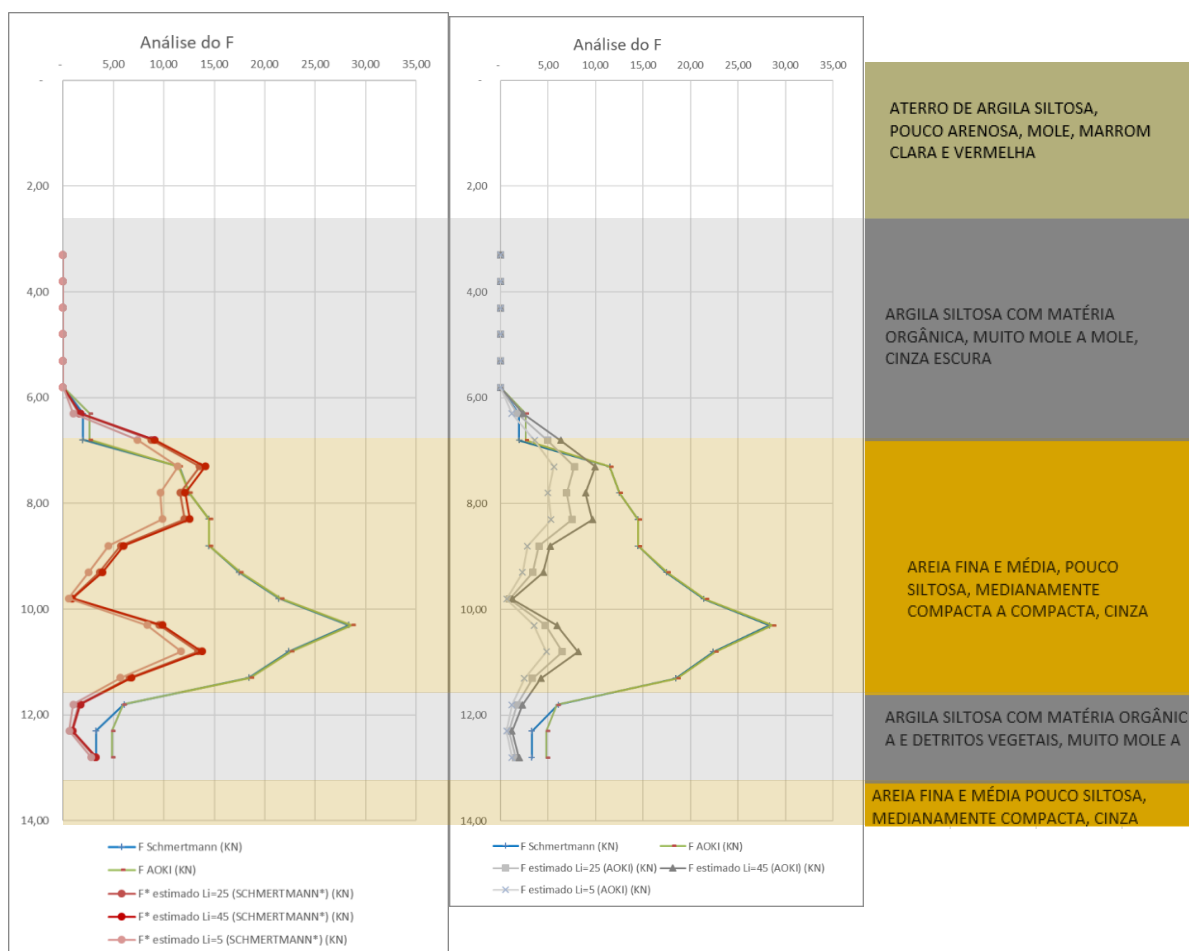


Figura B.12: Comparação das resistência estática (F) calculadas pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores “medidos” estimados através do CPTU para as áreas do amostrador SPT consideradas por Schmertmann (1979), em vermelho, e Aoki (2013) em cinza - SPT02 e CPTU 03.

v. SPT F1 e CPTU 2 (07)

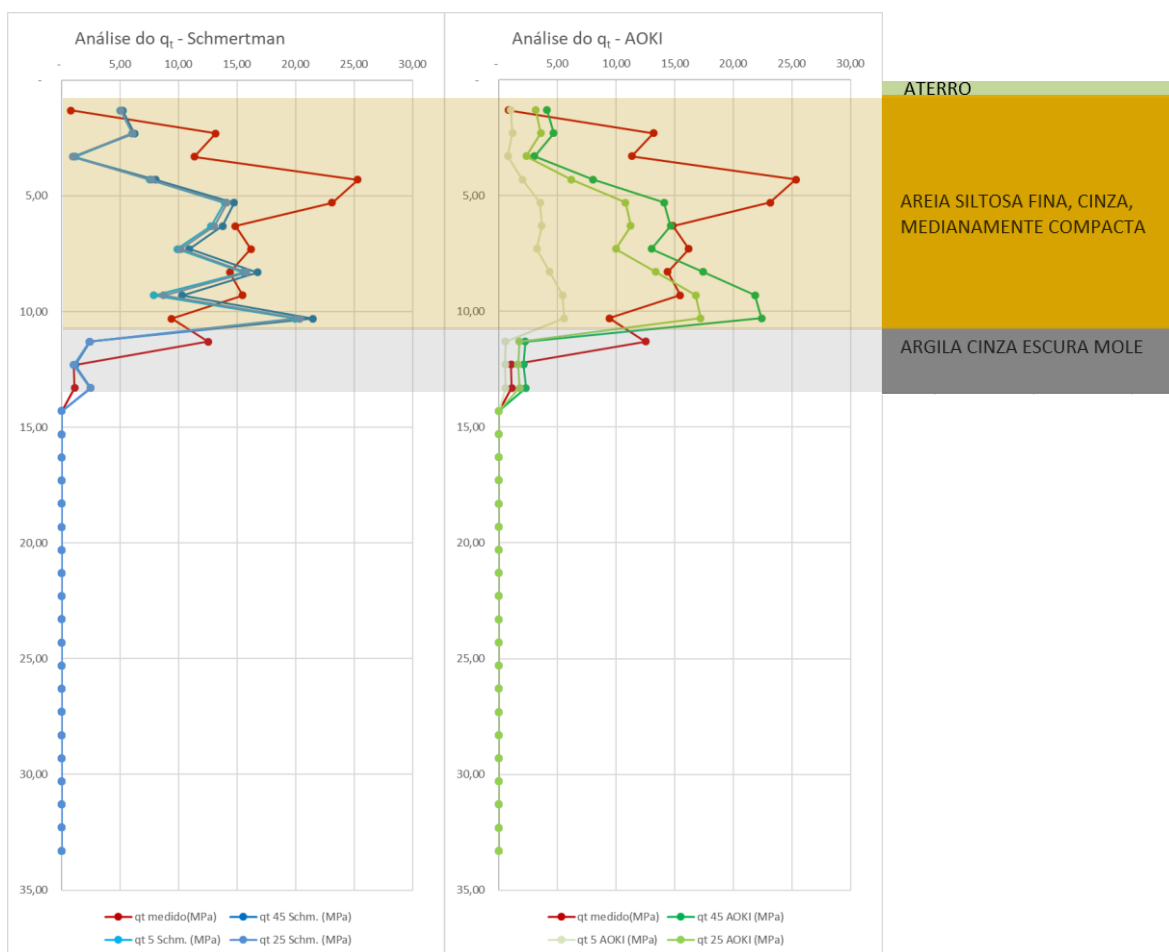


Figura B.13: Comparação das estimativas de resistência unitária de ponta (q_c) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU , em vermelho – SPT F1 e CPTU 2 (07).

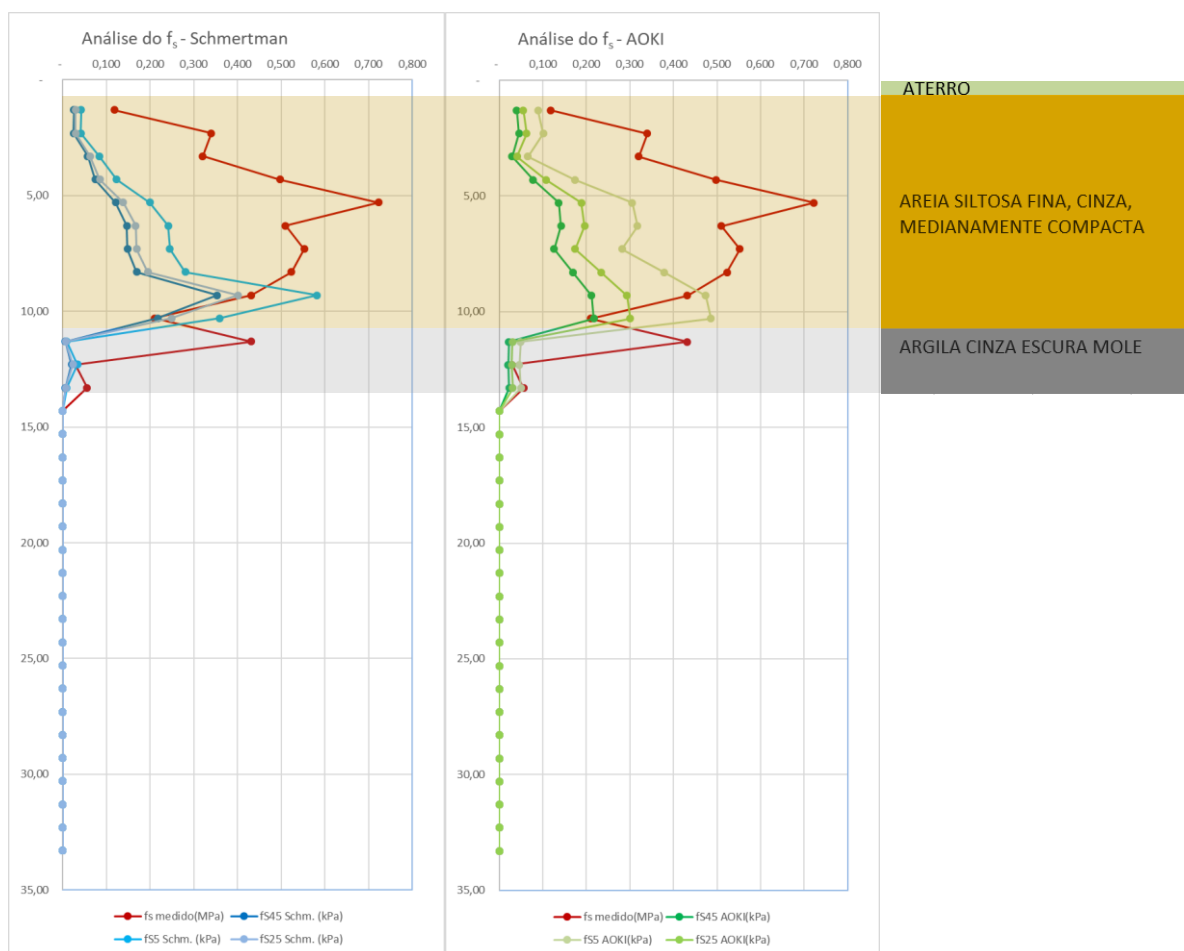


Figura B.14: Comparação das estimativas de resistência unitária de atrito lateral (f_s) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT F1 e CPTU 2 (07).

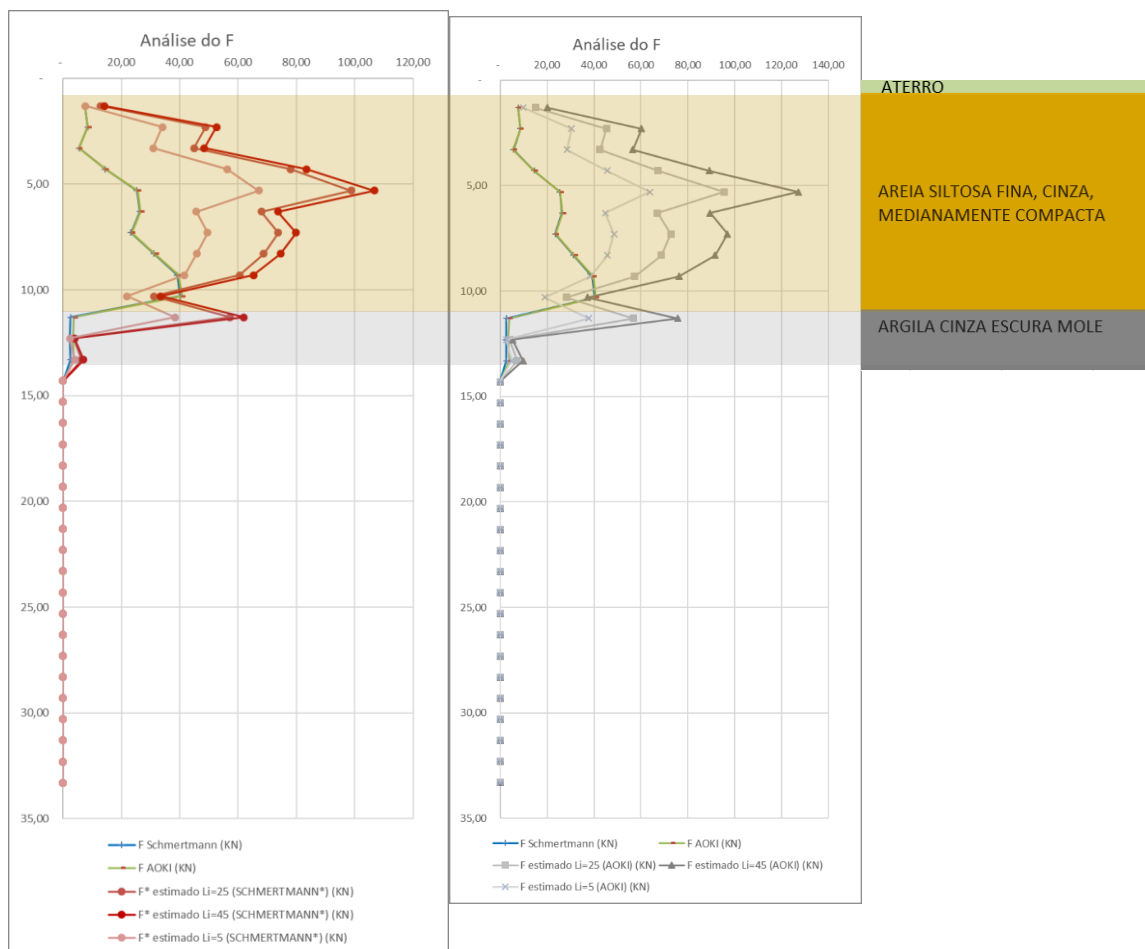


Figura B.15: Comparação das resistência estática (F) calculadas pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores “medidos” estimados através do CPTU para as áreas do amostrador SPT consideradas por Schmertmann (1979), em vermelho, e Aoki (2013) em cinza - SPT F1 e CPTU 2 (07).

vi. SPT F2 e CPTU 1 (11)

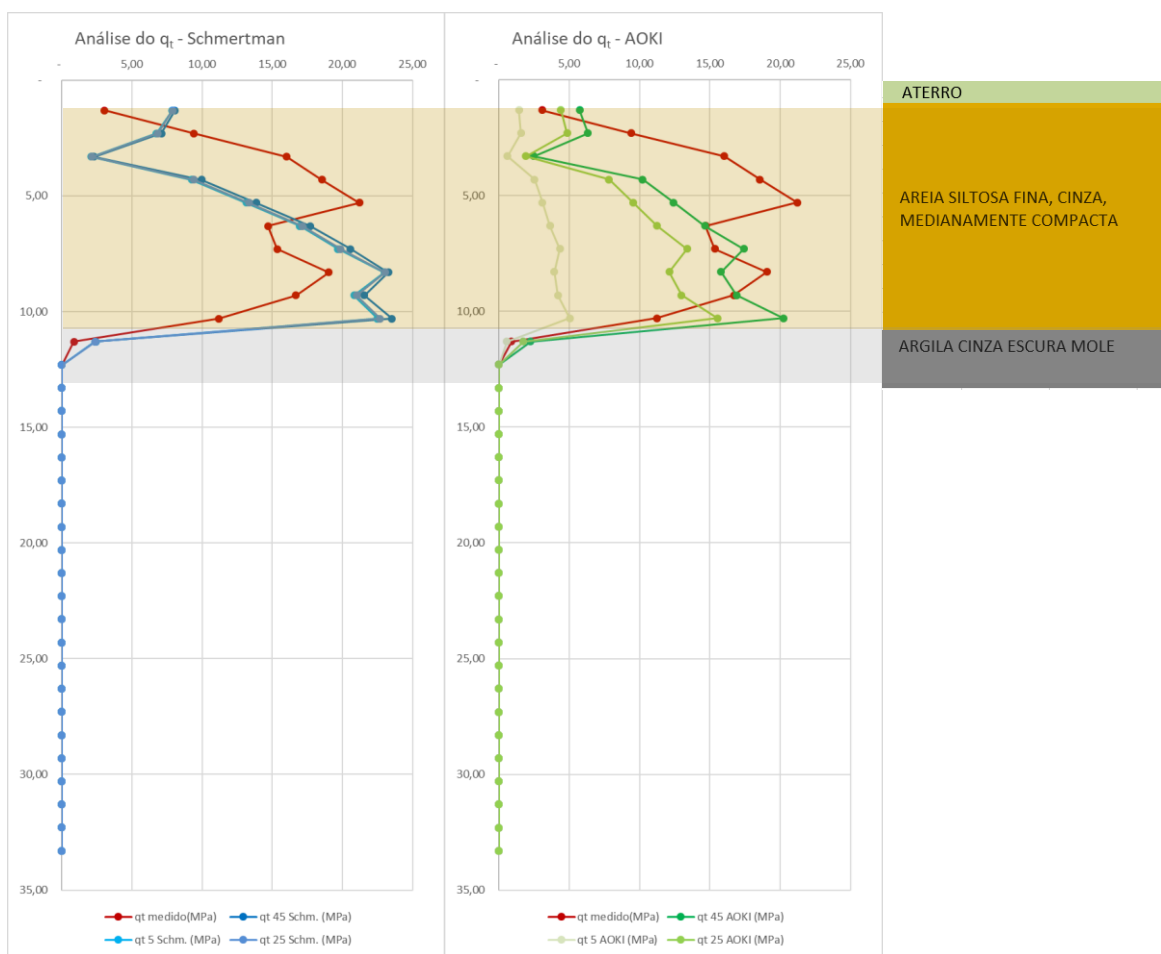


Figura B.16: Comparação das estimativas de resistência unitária de ponta (q_c) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU , em vermelho – SPT F2 e CPTU 1 (11).

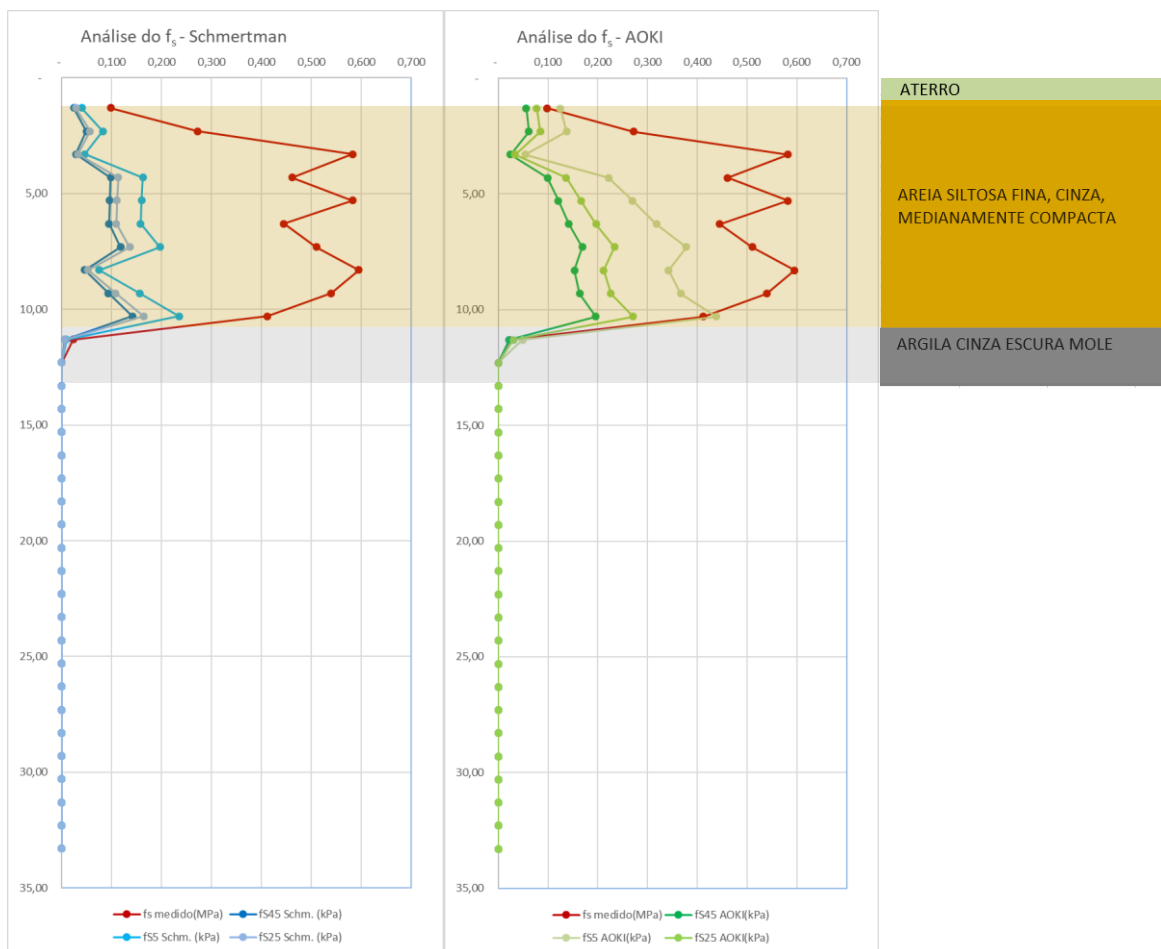


Figura B.17: Comparação das estimativas de resistência unitária de atrito lateral (f_s) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT F2 e CPTU 1 (11).

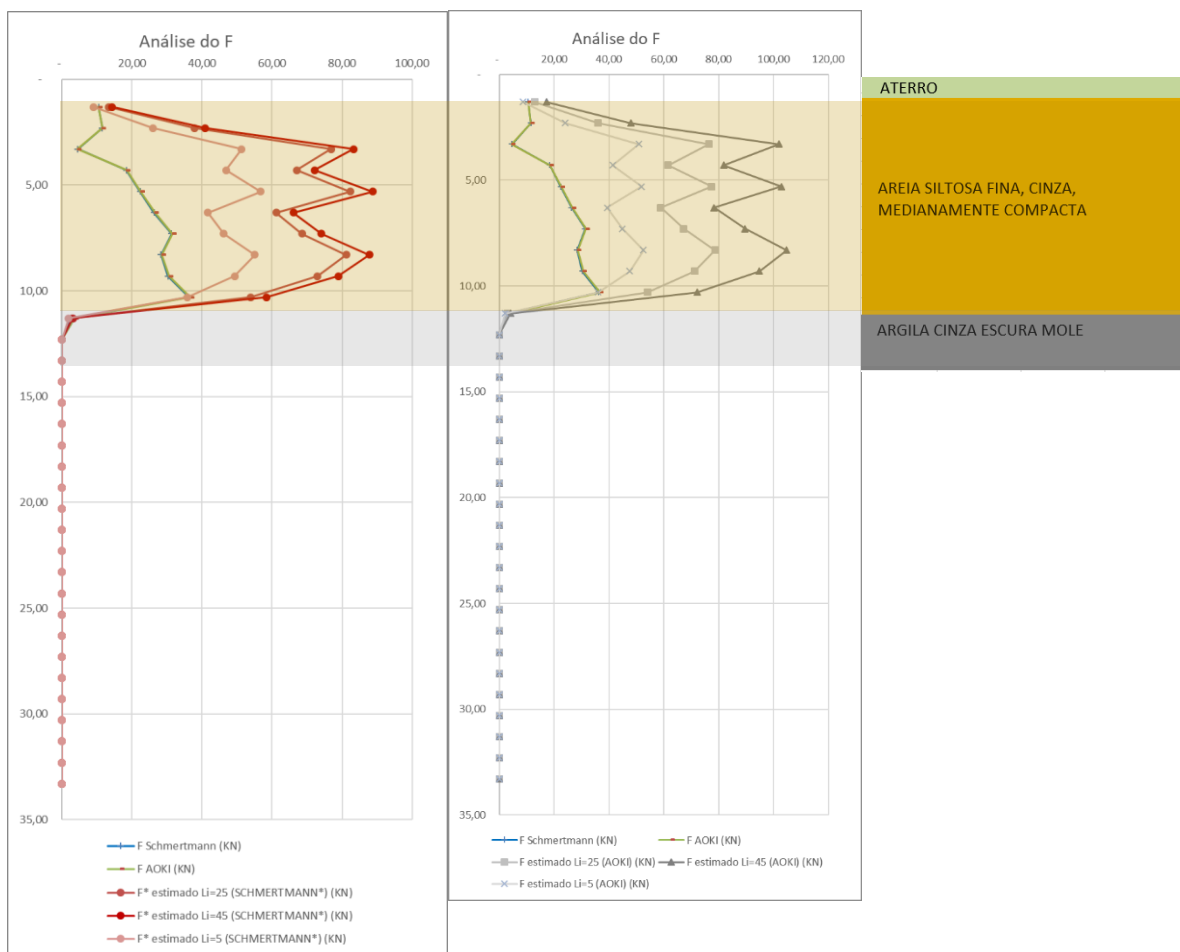


Figura B.18: Comparação das resistência estática (F) calculadas pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores “medidos” estimados através do CPTU para as áreas do amostrador SPT consideradas por Schmertmann (1979), em vermelho, e Aoki (2013) em cinza - SPT F2 e CPTU 1 (11).

vii. SPT F3 e CPTU 5 (11)

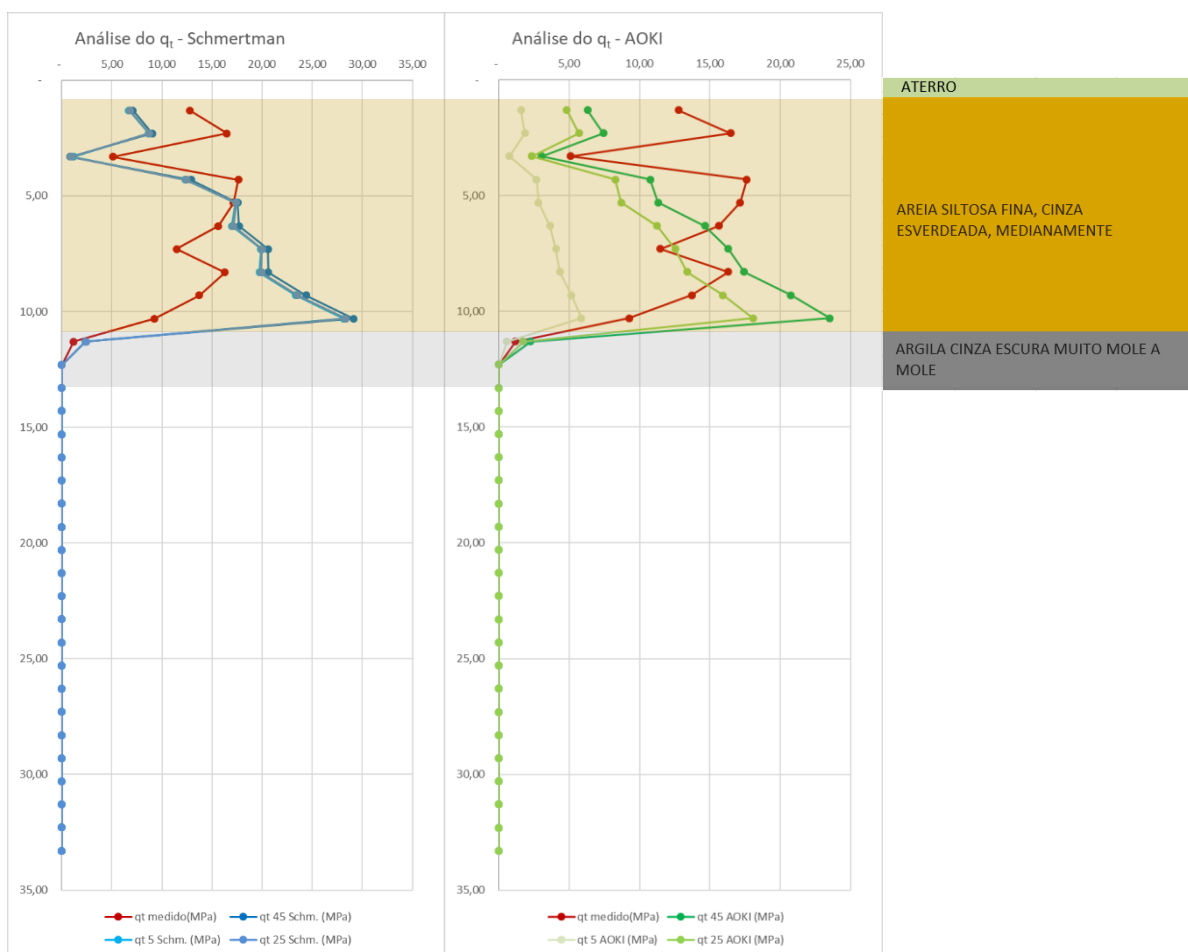


Figura B.19: Comparação das estimativas de resistência unitária de ponta (q_c) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU , em vermelho – SPT F3 e CPTU 5 (11).

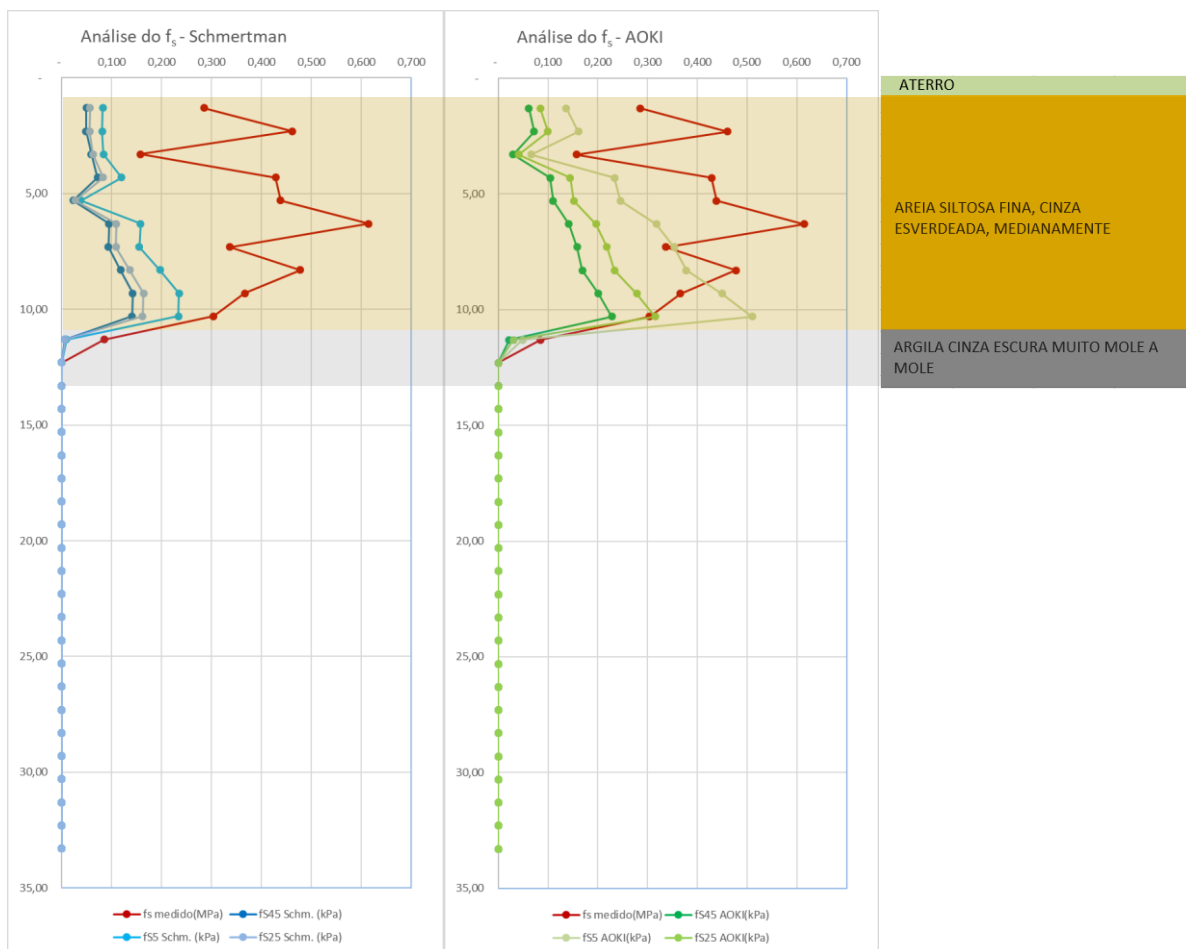


Figura B.20: Comparação das estimativas de resistência unitária de atrito lateral (f_s) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT F3 e CPTU 5 (11).

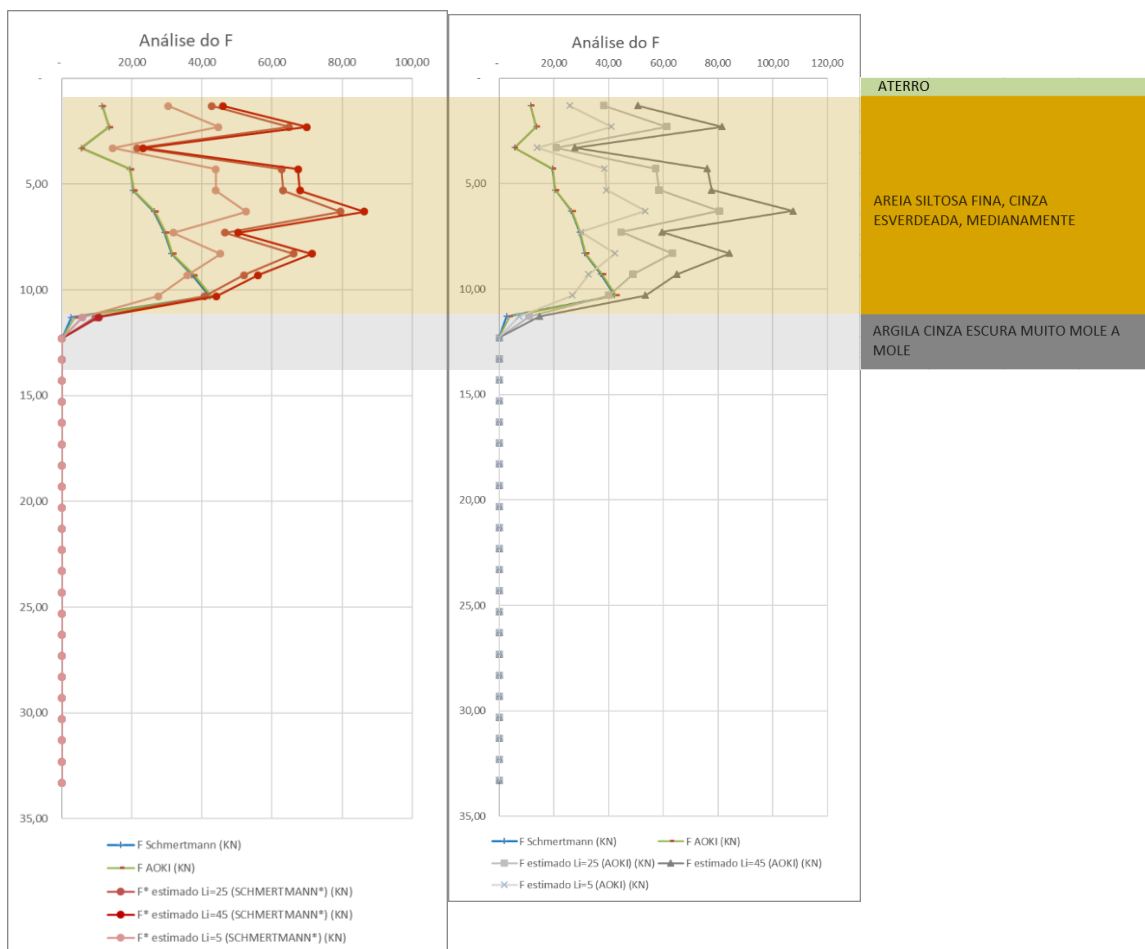


Figura B.21: Comparação das resistência estática (F) calculadas pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores “medidos” estimados através do CPTU para as áreas do amostrador SPT consideradas por Schmertmann (1979), em vermelho, e Aoki (2013) em cinza - SPT F3 e CPTU 5 (11).

viii. SPT SPS04 e CPTU ECSPS04

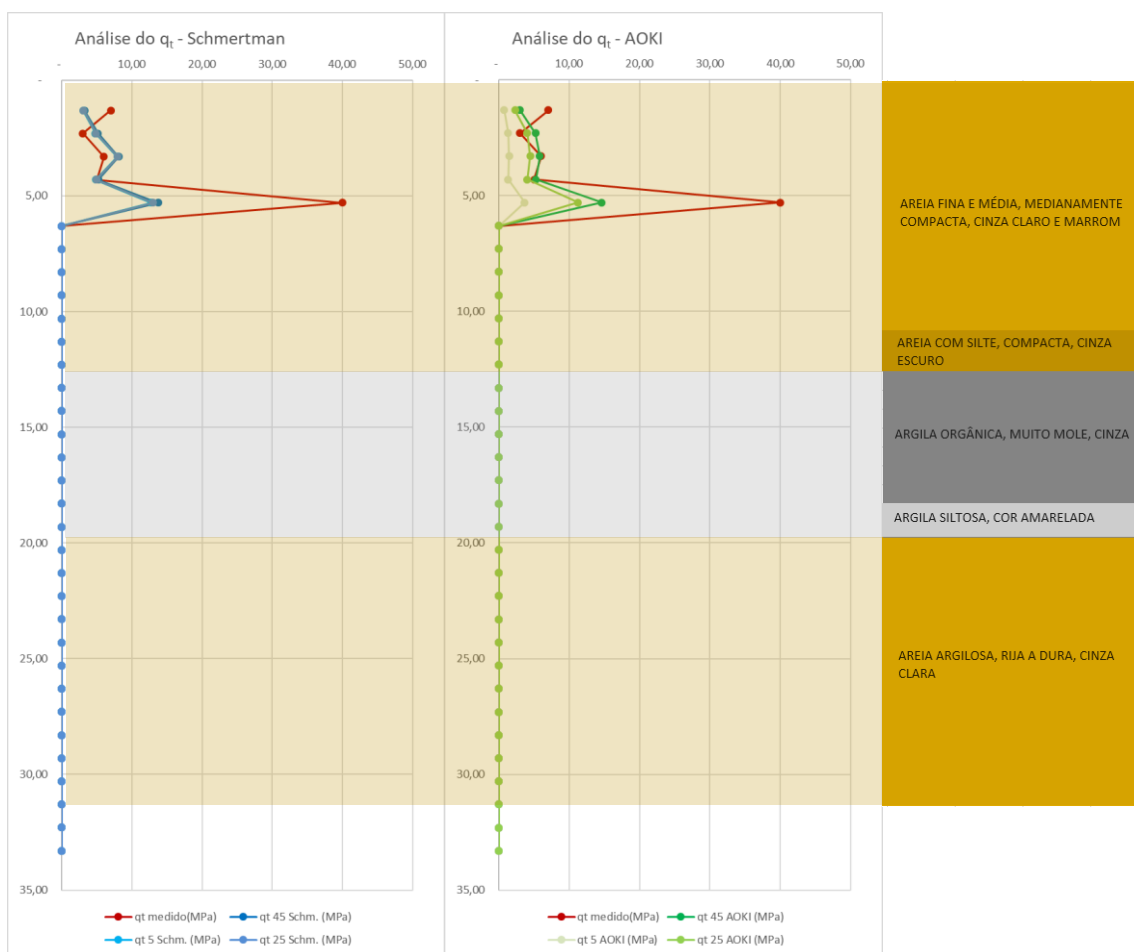


Figura B.22: Comparação das estimativas de resistência unitária de ponta (q_c) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT SPS04 e CPTU ECSPS04.

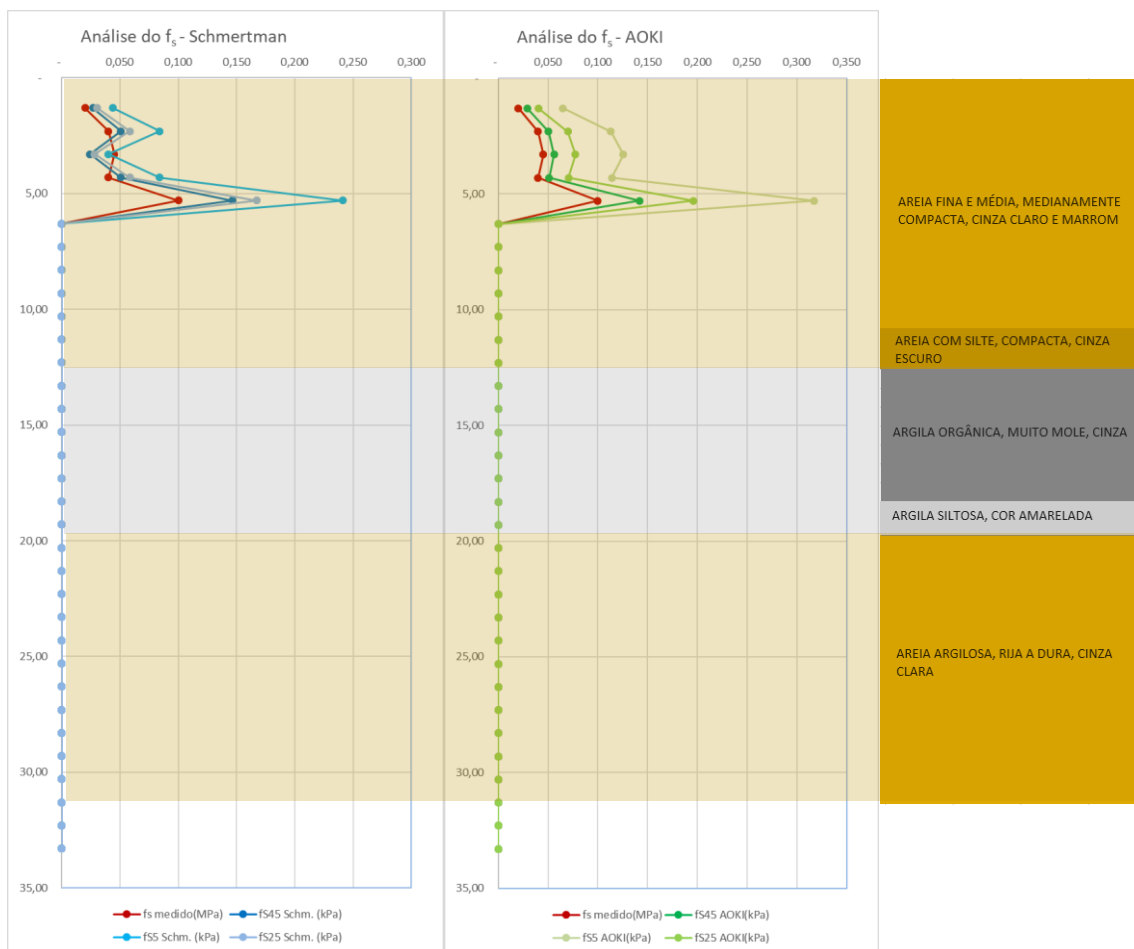


Figura B.23: Comparação das estimativas de resistência unitária de atrito lateral (f_s) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT SPS04 e CPTU ECSPS04.

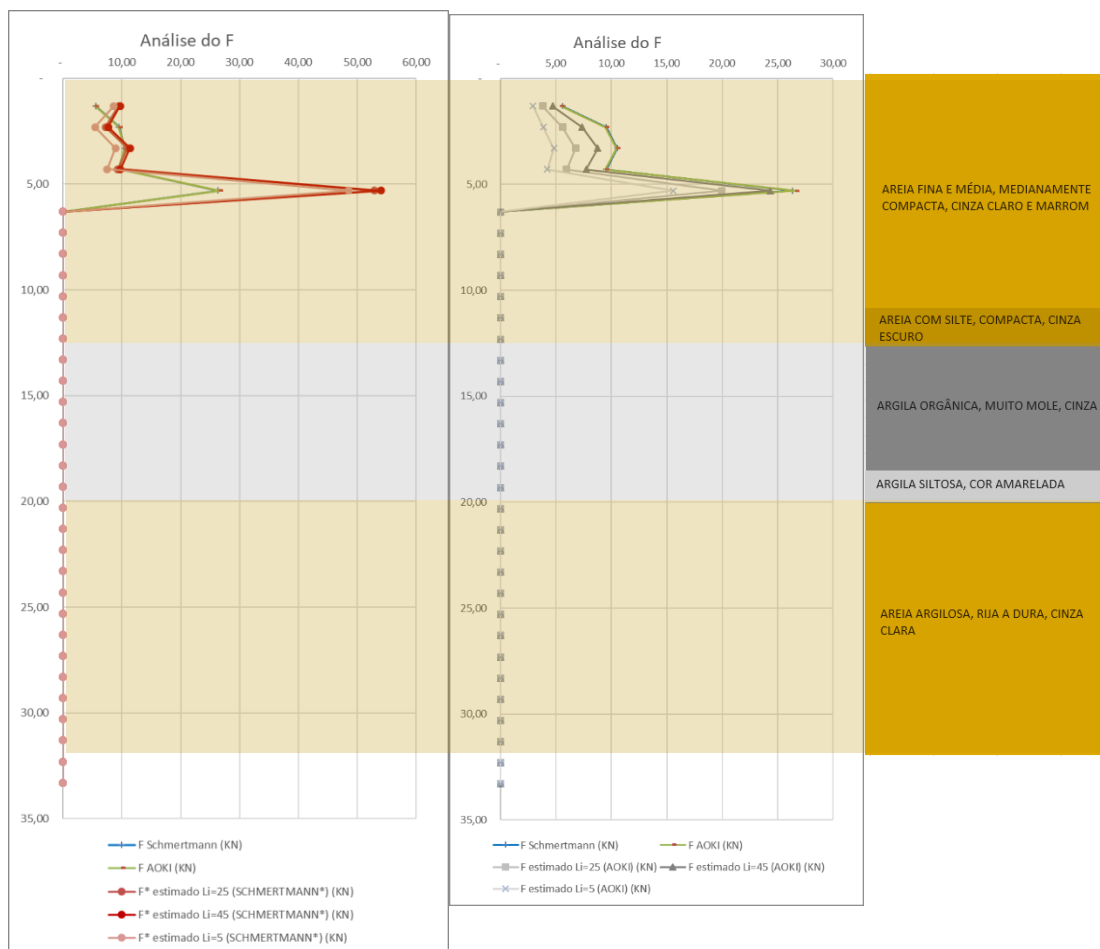


Figura B.24: Comparação das resistência estática (F) calculadas pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores “medidos” estimados através do CPTU para as áreas do amostrador SPT consideradas por Schmertmann (1979), em vermelho, e Aoki (2013) em cinza - SPT SPS04 e CPTU ECSPS04.

ix. SPT SPS19 e CPTU ECSPS19

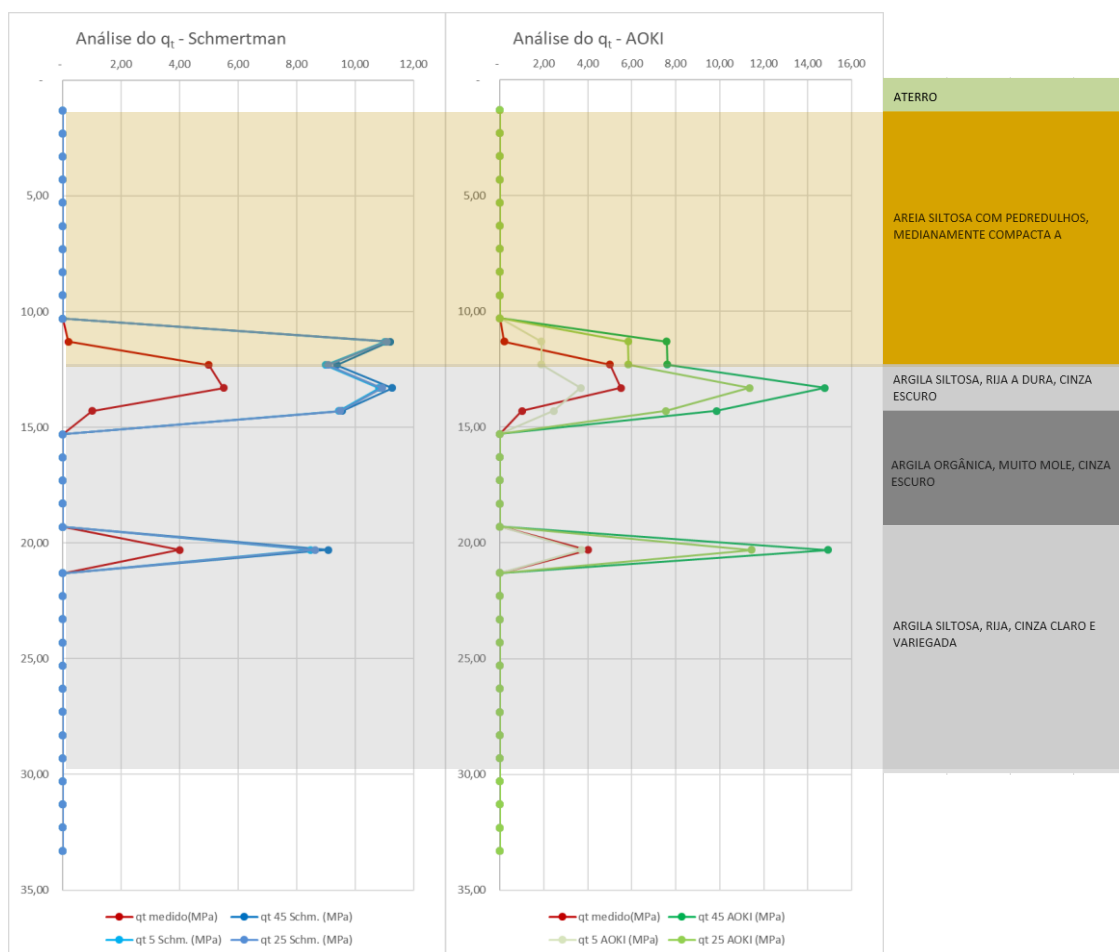


Figura B.25: Comparação das estimativas de resistência unitária de ponta (q_c) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU , em vermelho – SPT SPS19 e CPTU ECSPS19.

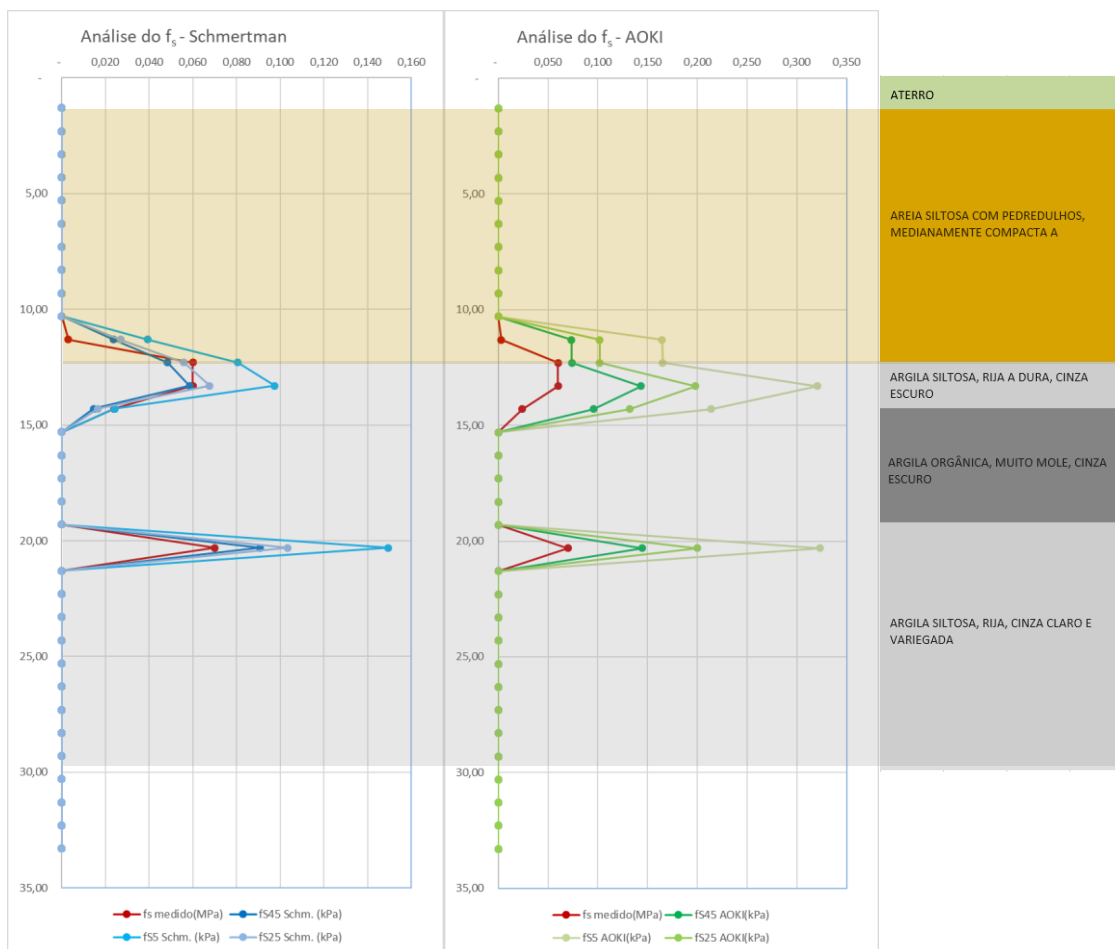


Figura B.26: Comparação das estimativas de resistência unitária de atrito lateral (f_s) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT SPS19 e CPTU ECSPS19.

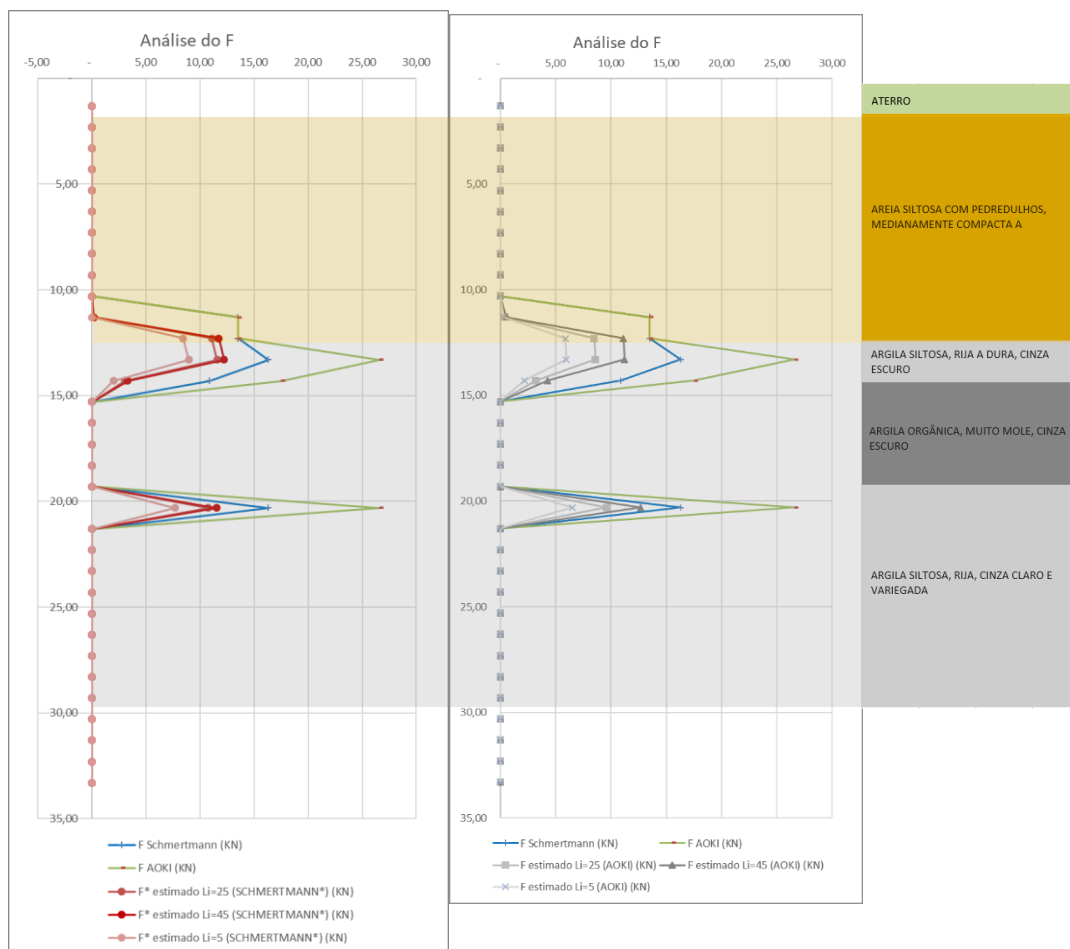


Figura B.27: Comparação das resistências estáticas (F) calculadas pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores “medidos” estimados através do CPTU para as áreas do amostrador SPT consideradas por Schmertmann (1979), em vermelho, e Aoki (2013) em cinza - SPT SPS19 e CPTU ECSPS19.

x. SPT SPS23 e CPTU ECSPS23

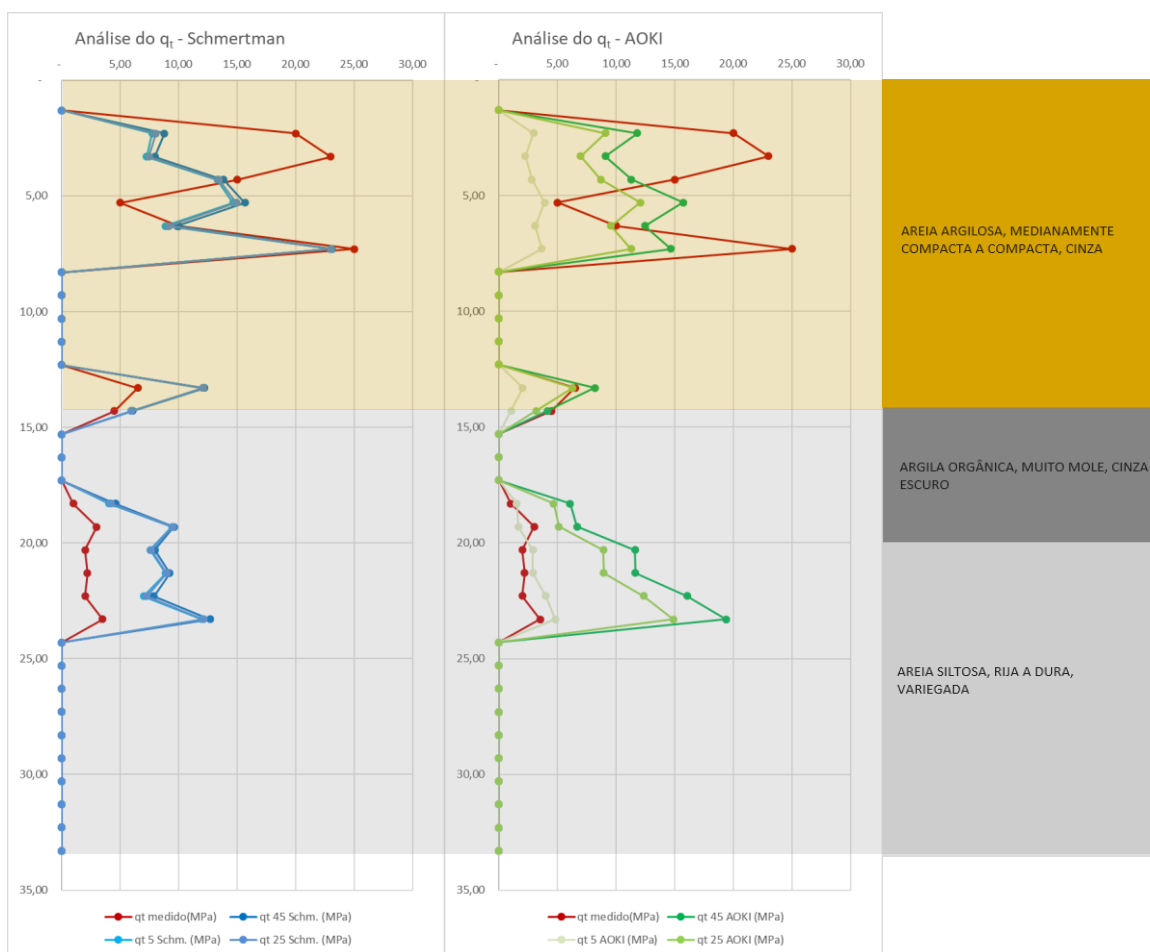


Figura B.28: Comparação das estimativas de resistência unitária de ponta (q_c) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT SPS23 e CPTU ECSPS23.

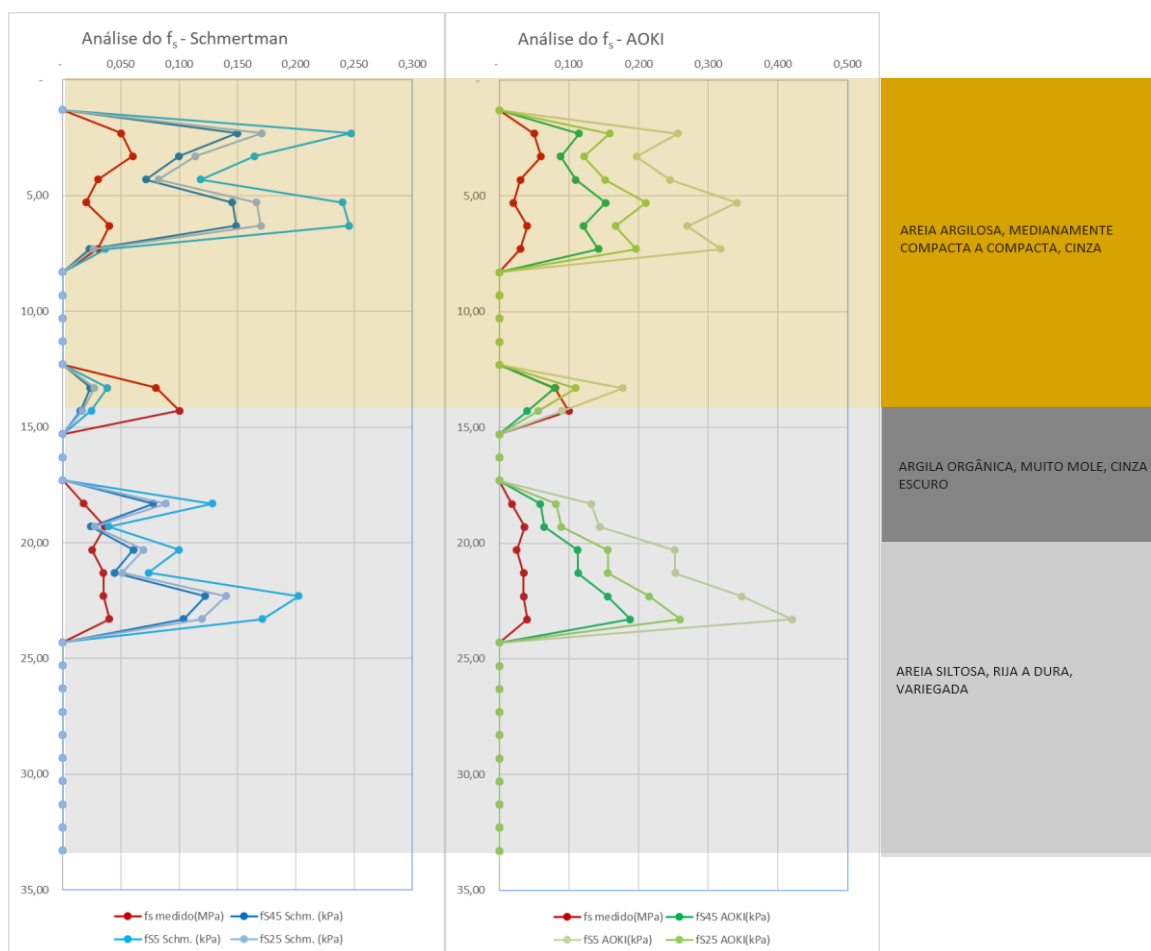


Figura B.29: Comparação das estimativas de resistência unitária de atrito lateral (f_s) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT SPS23 e CPTU ECSPS23.

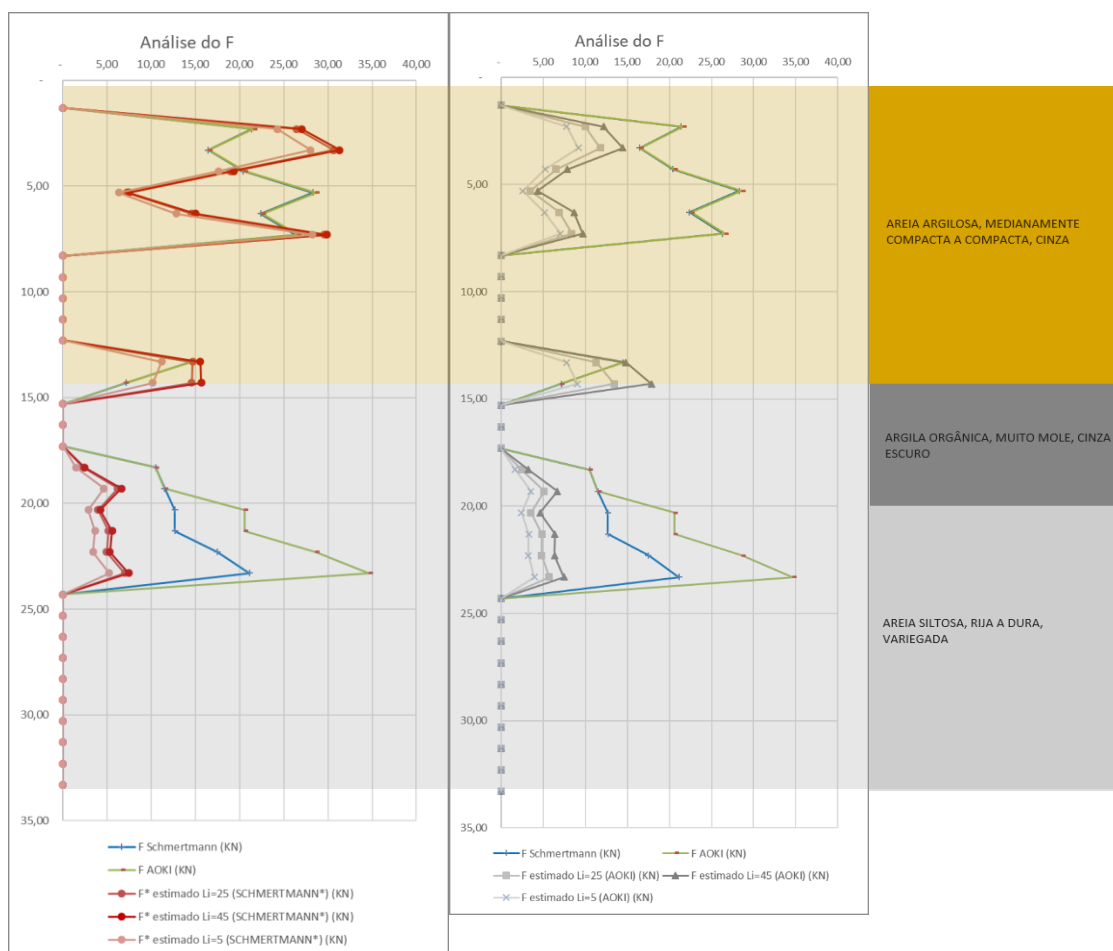


Figura B.30: Comparação das resistência estática (F) calculadas pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores “medidos” estimados através do CPTU para as áreas do amostrador SPT consideradas por Schmertmann (1979), em vermelho, e Aoki (2013) em cinza - SPT SPS23 e CPTU ECSPS23.

xi. SPT SPS22 e CPTU ECSPS22

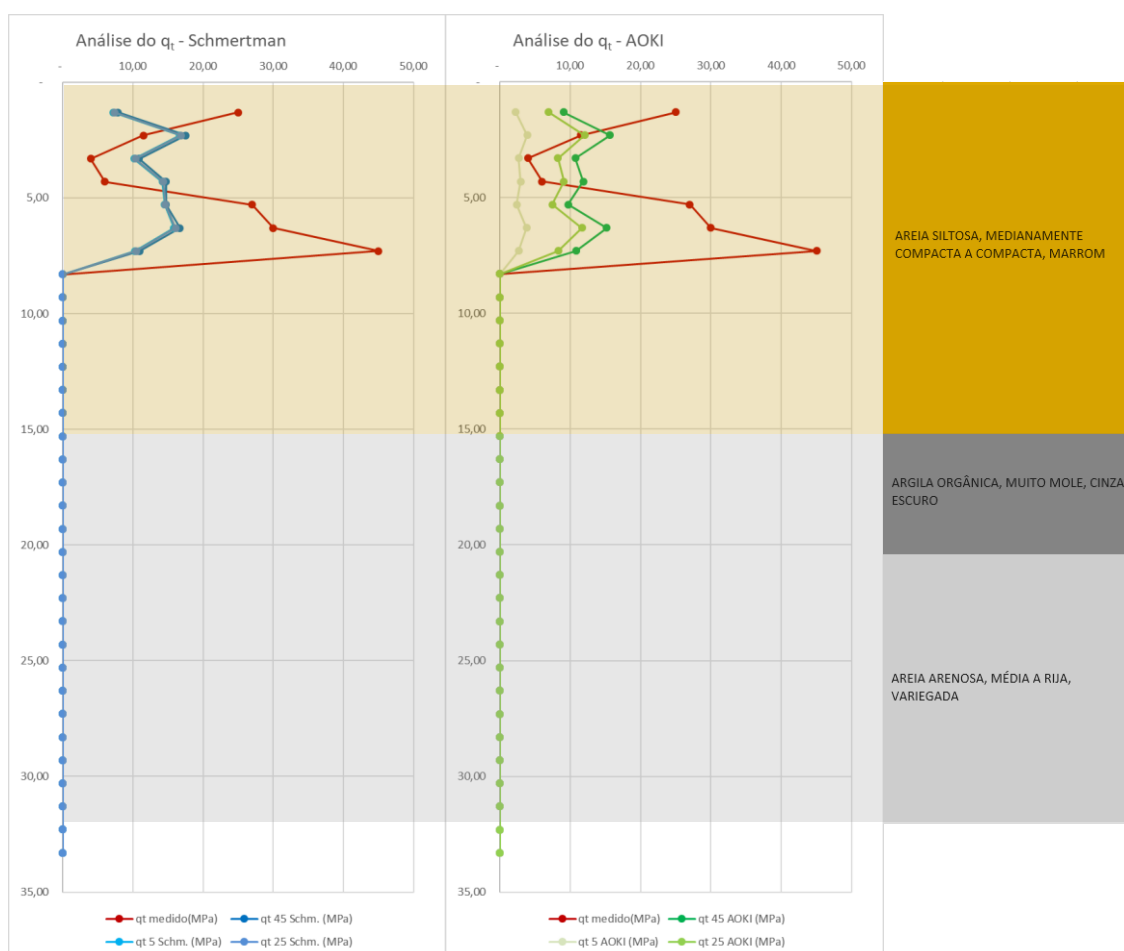


Figura B.31: Comparação das estimativas de resistência unitária de ponta (q_c) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU , em vermelho – SPT SPS22 e CPTU ECSPS22.

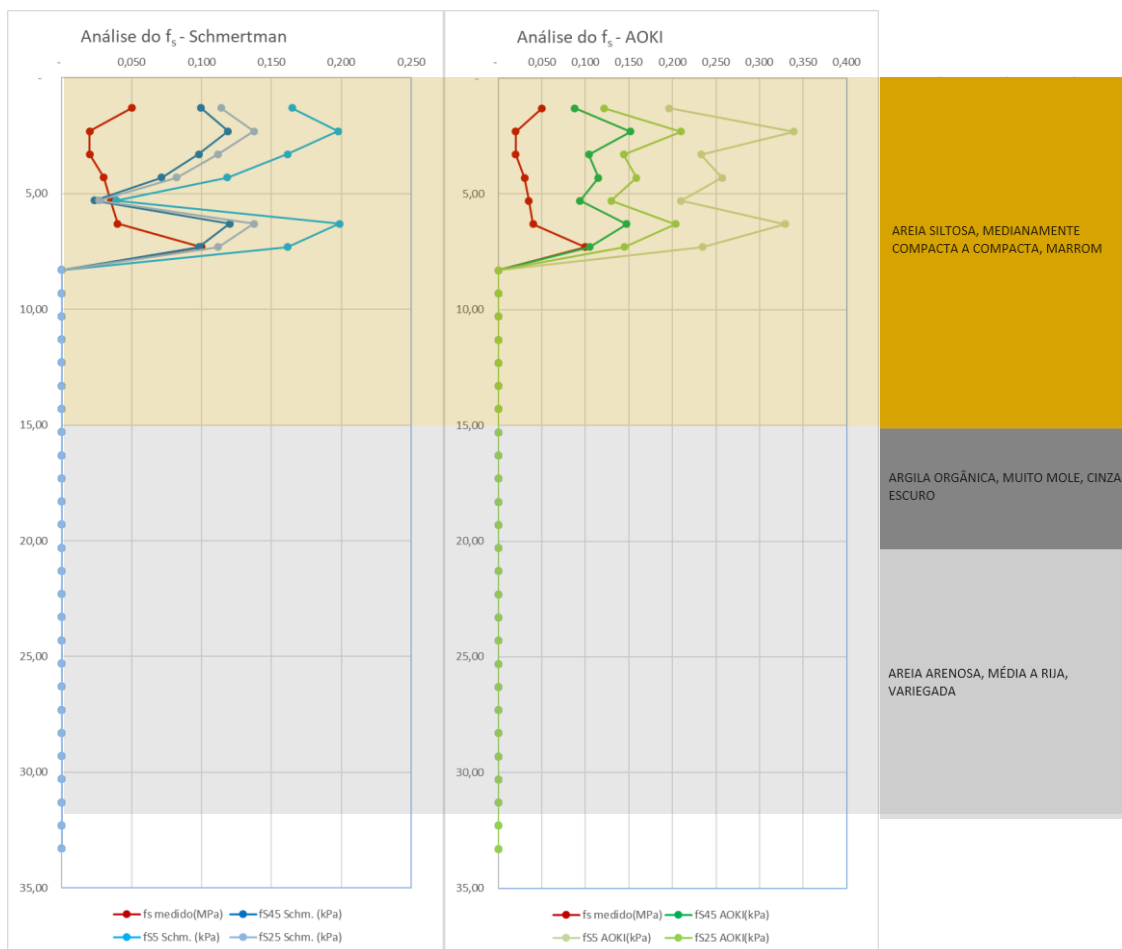


Figura B.32: Comparação das estimativas de resistência unitária de atrito lateral (f_s) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT SPS22 e CPTU ECSPS22.

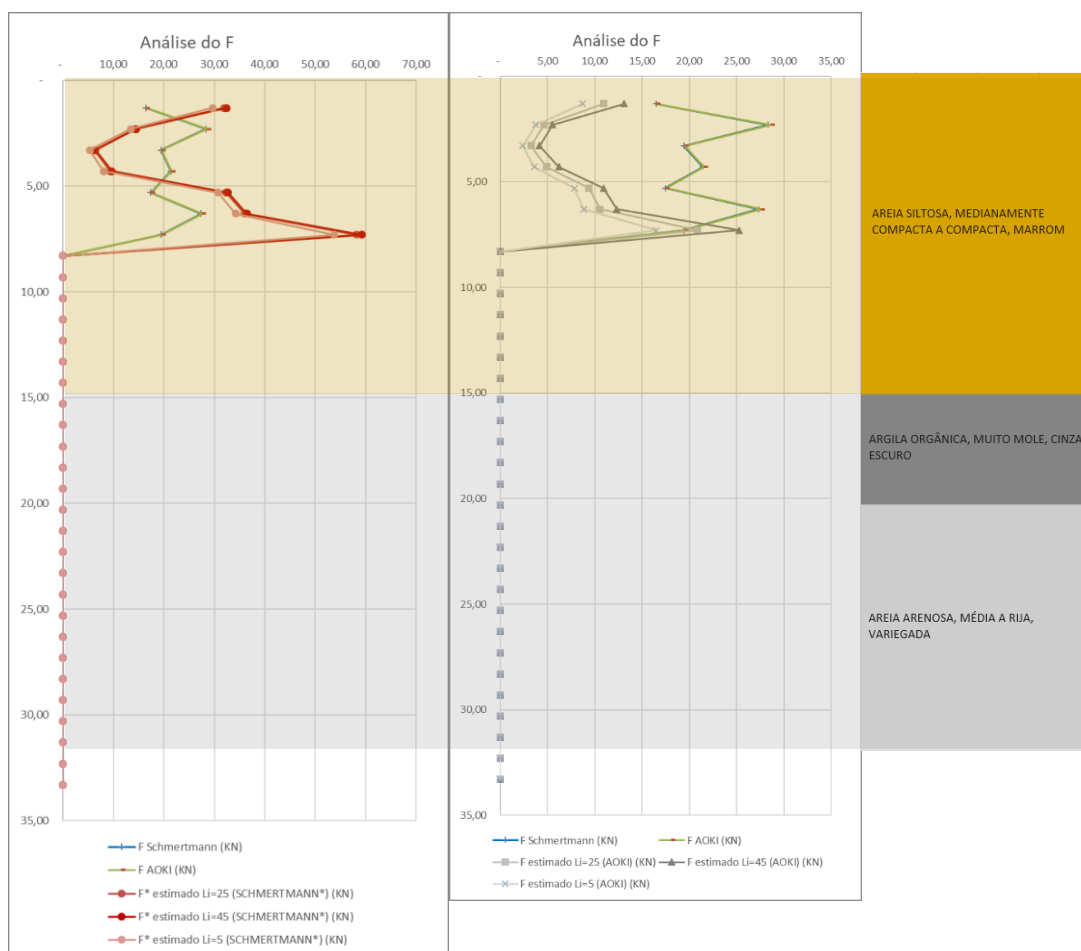


Figura B.33: Comparação das resistência estática (F) calculadas pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores “medidos” estimados através do CPTU para as áreas do amostrador SPT consideradas por Schmertmann (1979), em vermelho, e Aoki (2013) em cinza - SPT SPS22 e CPTU ECSPS22.

xii. SPT309 e CPTU309

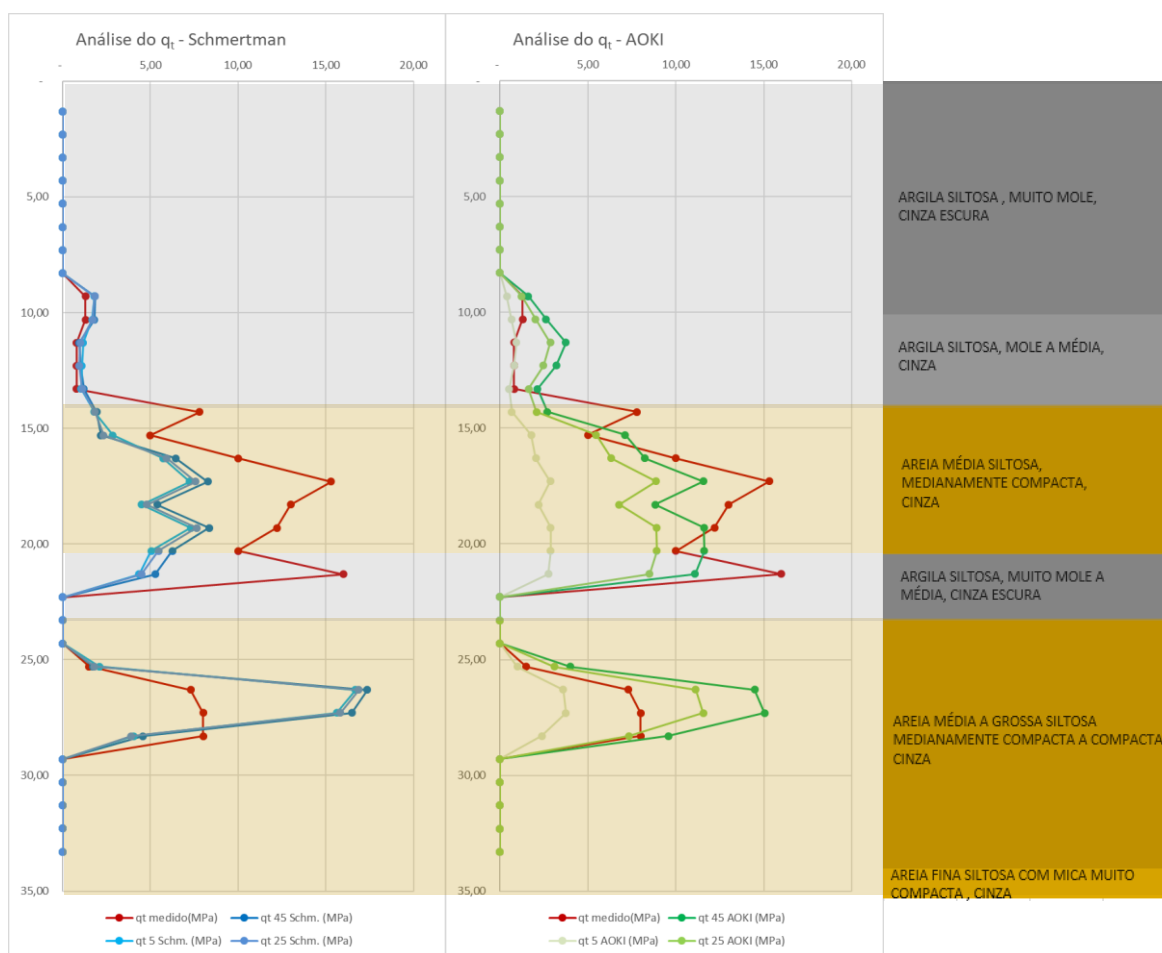


Figura B.34: Comparação das estimativas de resistência unitária de ponta (q_c) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU , em vermelho – SPT309 e CPTU309.

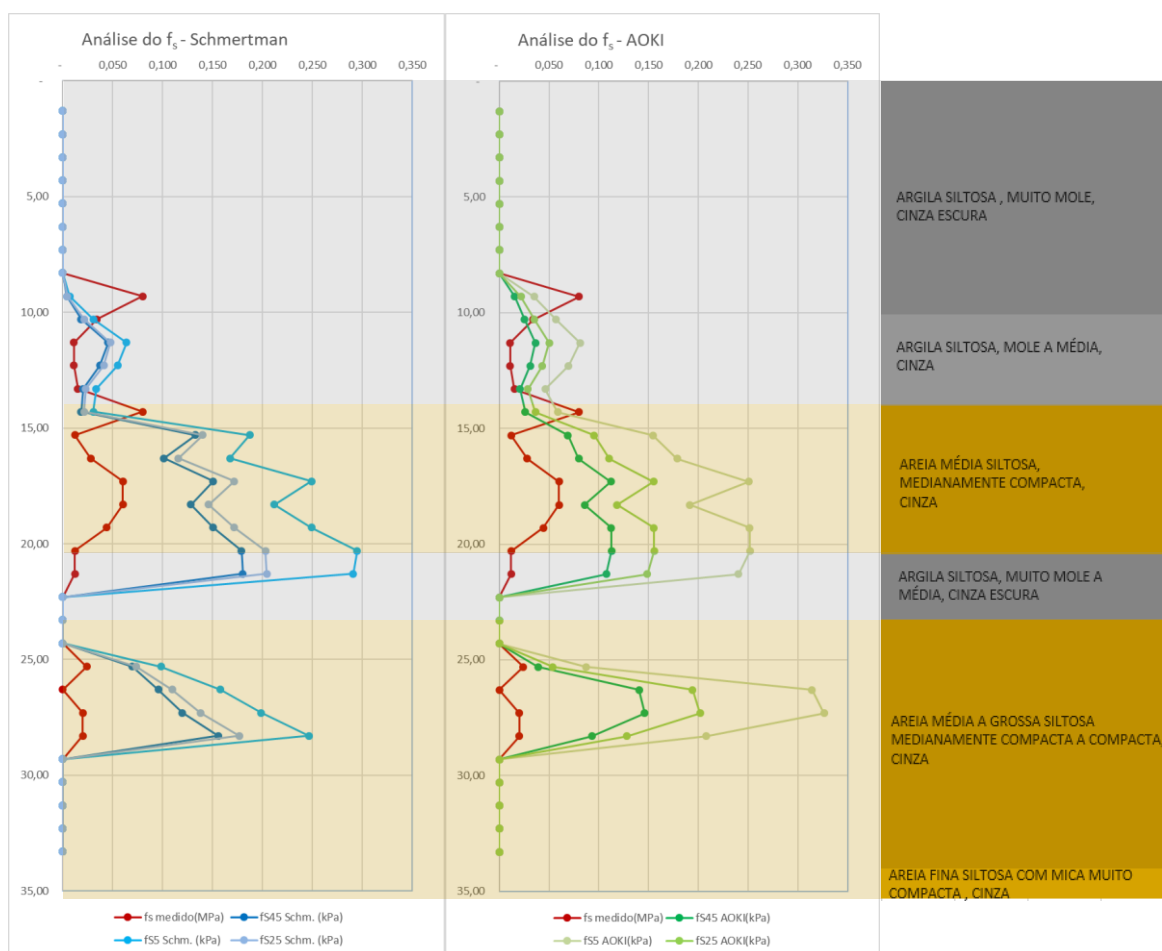


Figura B.35: Comparação das estimativas de resistência unitária de atrito lateral (f_s) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT309 e CPTU309.

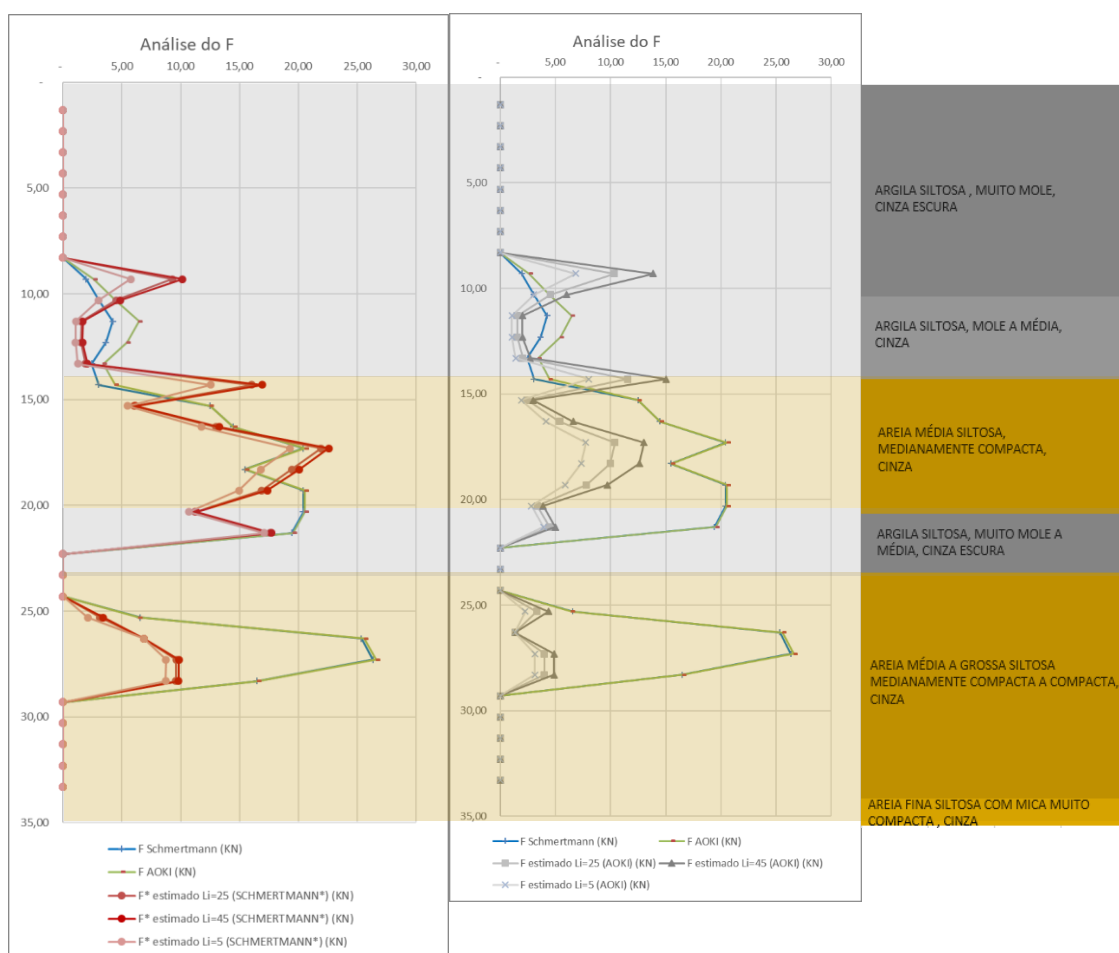


Figura B.36: Comparação das resistência estática (F) calculadas pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores “medidos” estimados através do CPTU para as áreas do amostrador SPT consideradas por Schmertmann (1979), em vermelho, e Aoki (2013) em cinza - SPT309 e CPTU309.

xiii. SPT304 e CPTU304

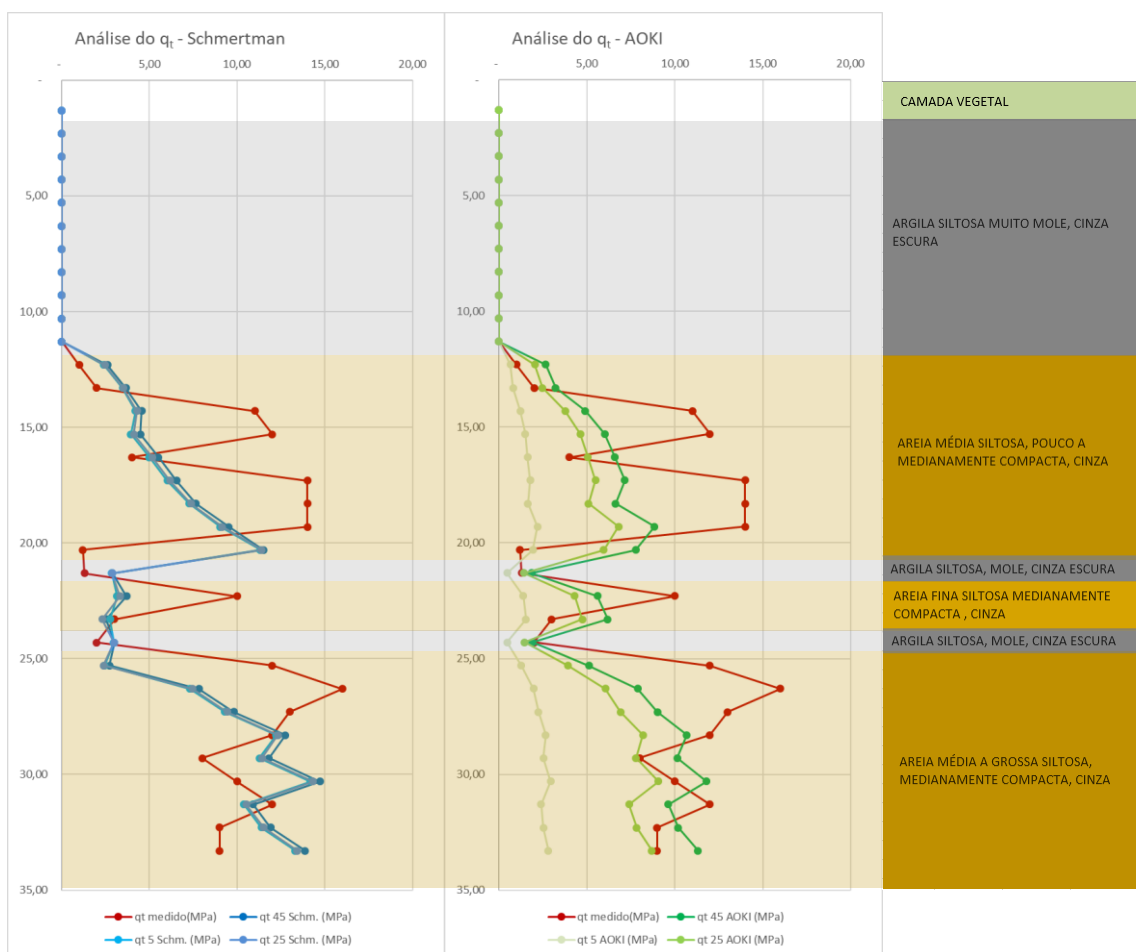


Figura B.37: Comparação das estimativas de resistência unitária de ponta (q_c) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU , em vermelho – SPT304 e CPTU304.

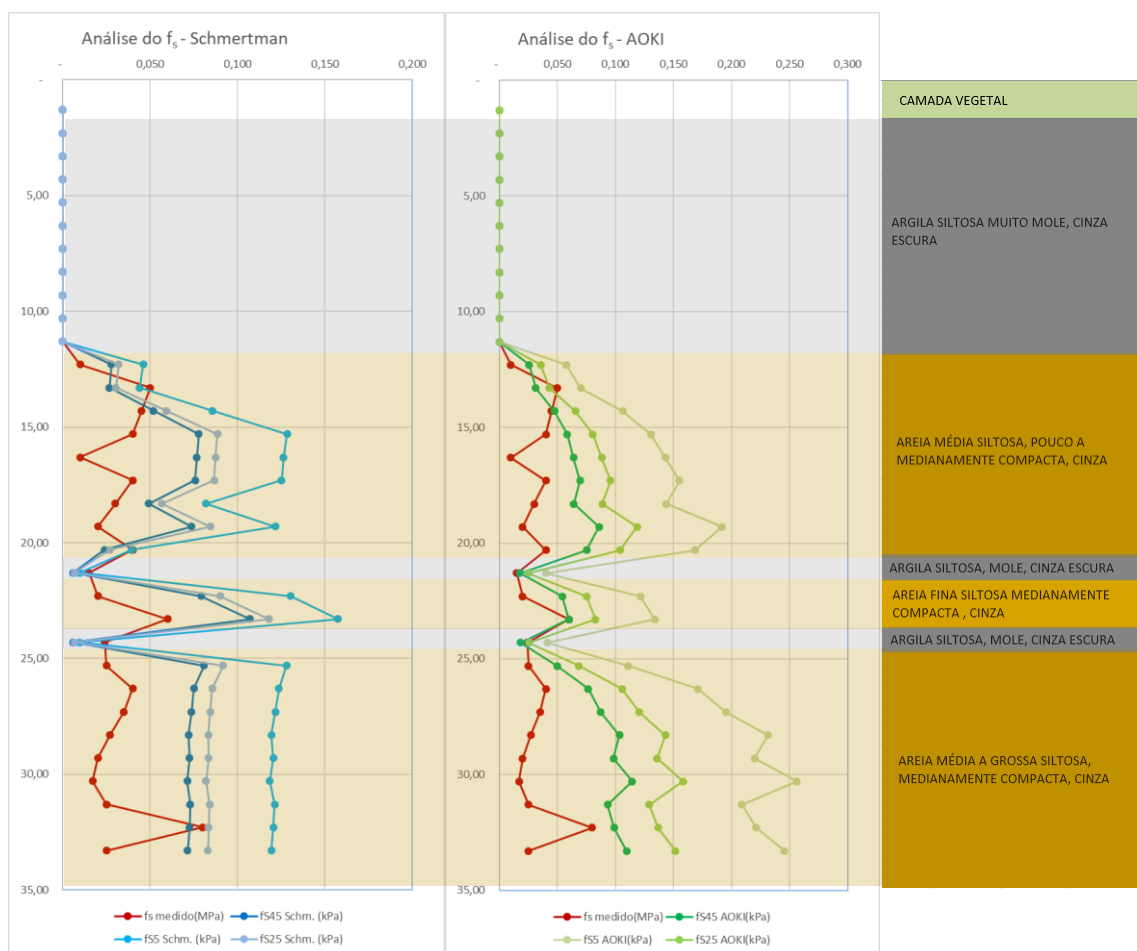


Figura B.38: Comparação das estimativas de resistência unitária de atrito lateral (f_s) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT304 e CPTU304.

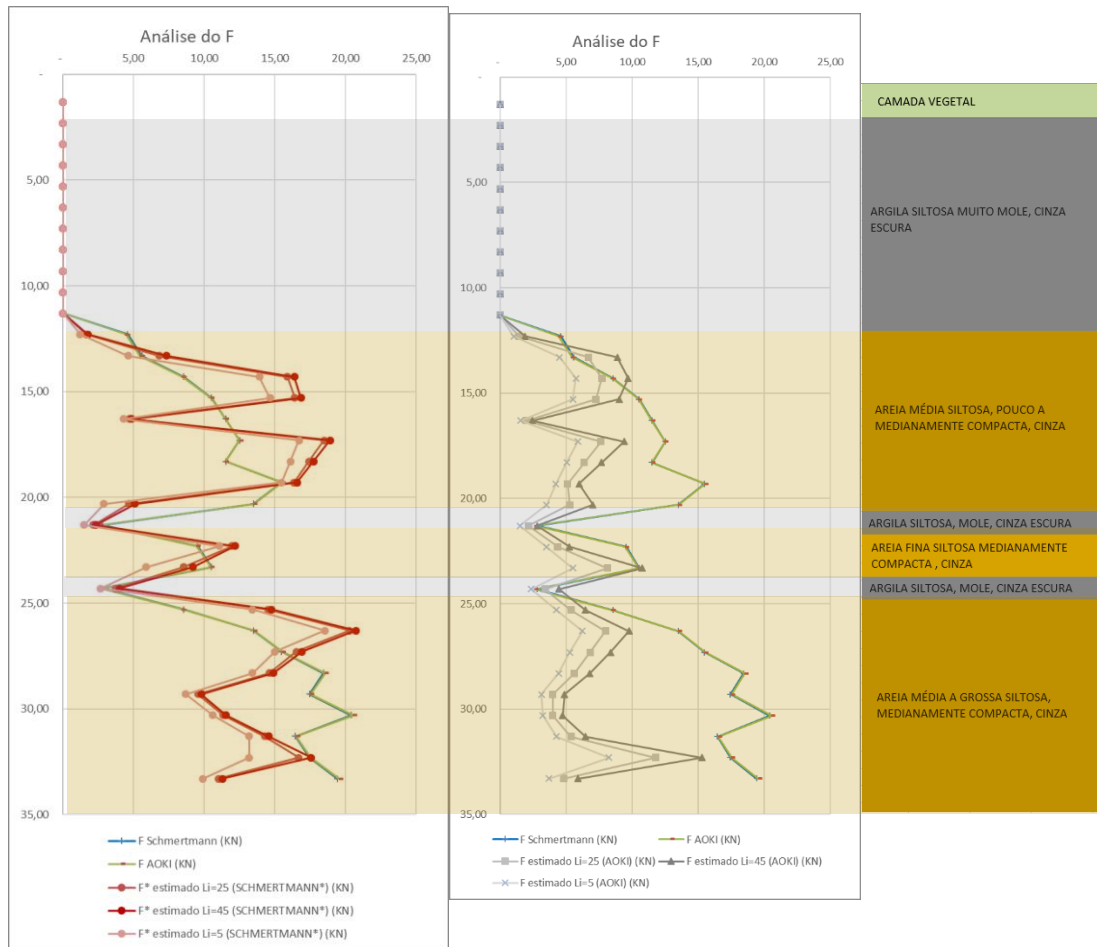


Figura B.39: Comparação das resistência estática (F) calculadas pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores “medidos” estimados através do CPTU para as áreas do amostrador SPT consideradas por Schmertmann (1979), em vermelho, e Aoki (2013) em cinza - SPT304 e CPTU304.

xiv. SPT305 e CPTU305

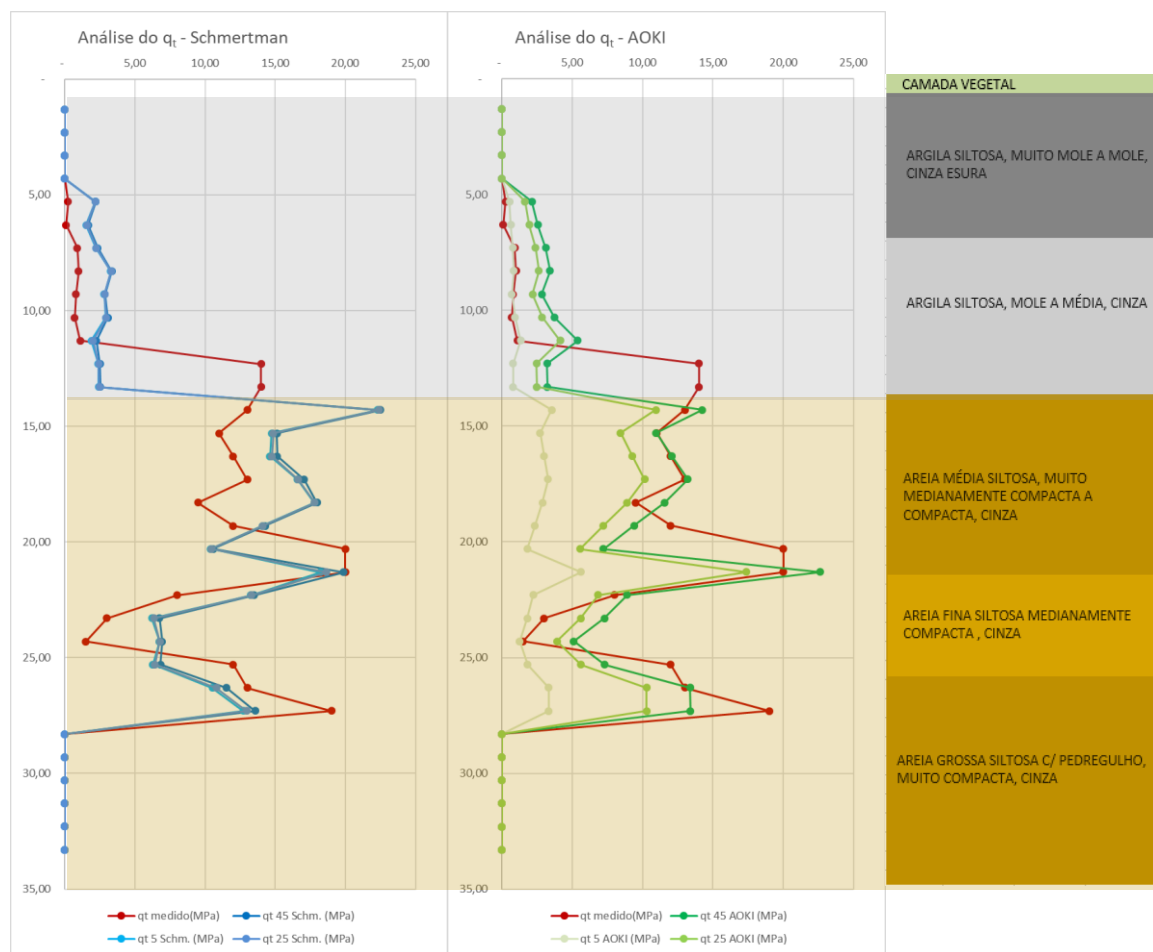


Figura B.40: Comparação das estimativas de resistência unitária de ponta (q_c) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT305 e CPTU305.

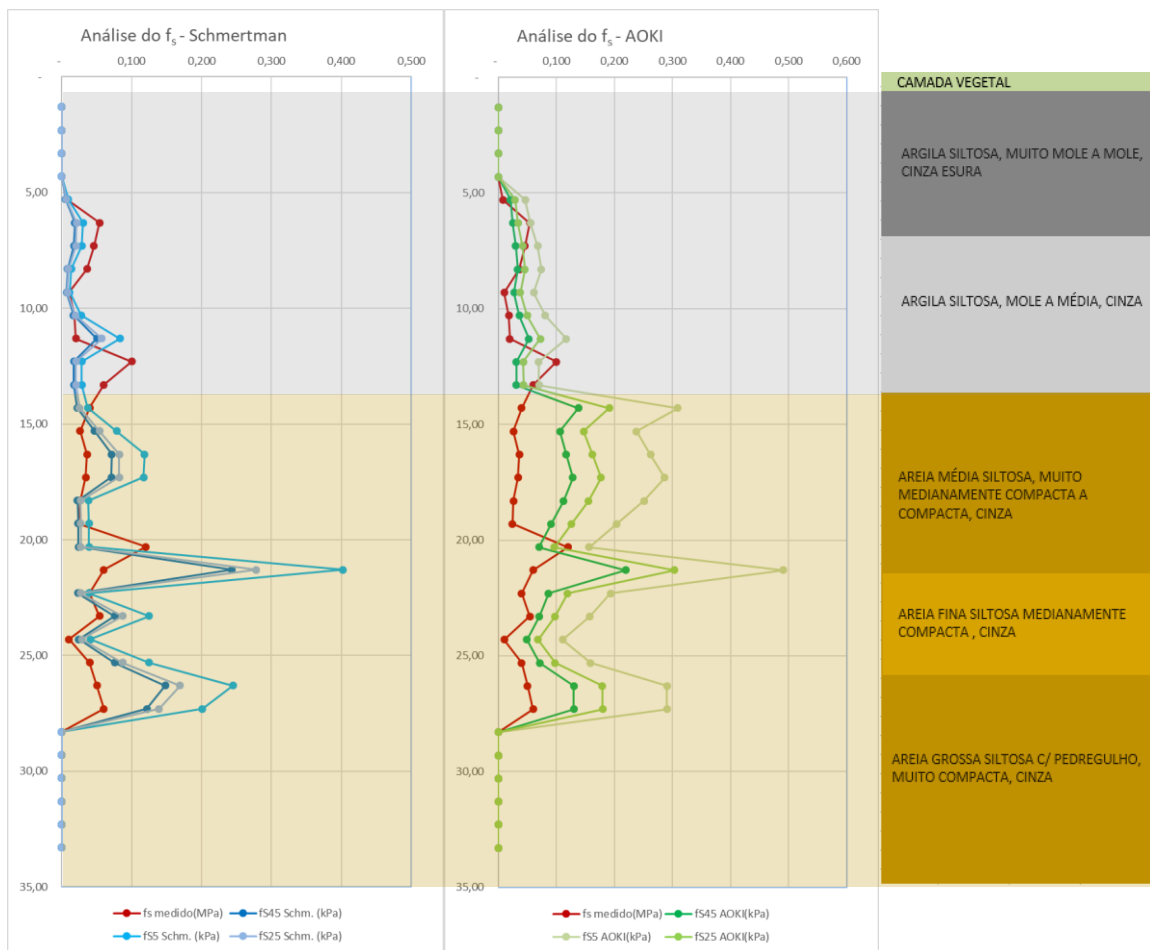


Figura B.41: Comparação das estimativas de resistência unitária de atrito lateral (f_s) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT305 e CPTU305.

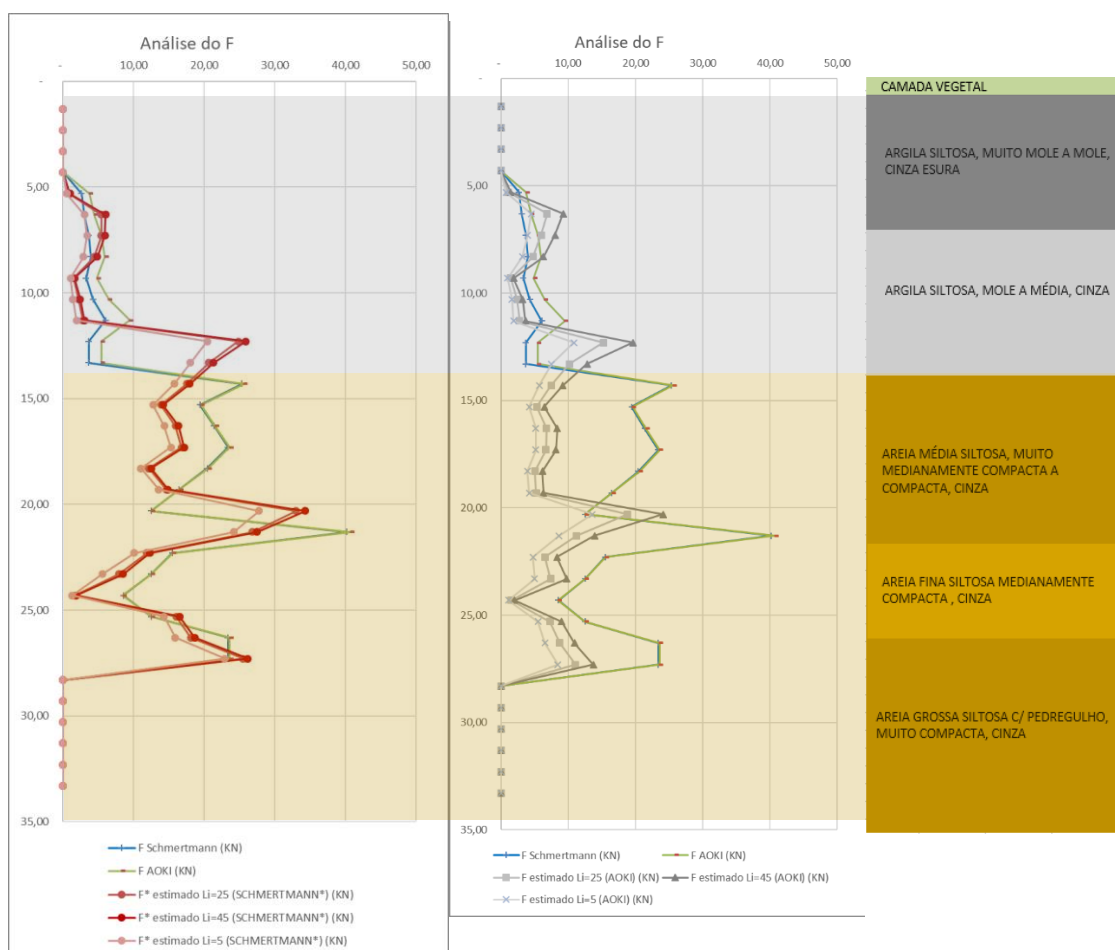


Figura B.42: Comparação das resistência estática (F) calculadas pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores “medidos” estimados através do CPTU para as áreas do amostrador SPT consideradas por Schmertmann (1979), em vermelho, e Aoki (2013) em cinza - SPT305 e CPTU305.

xv. SPT308 e CPTU308

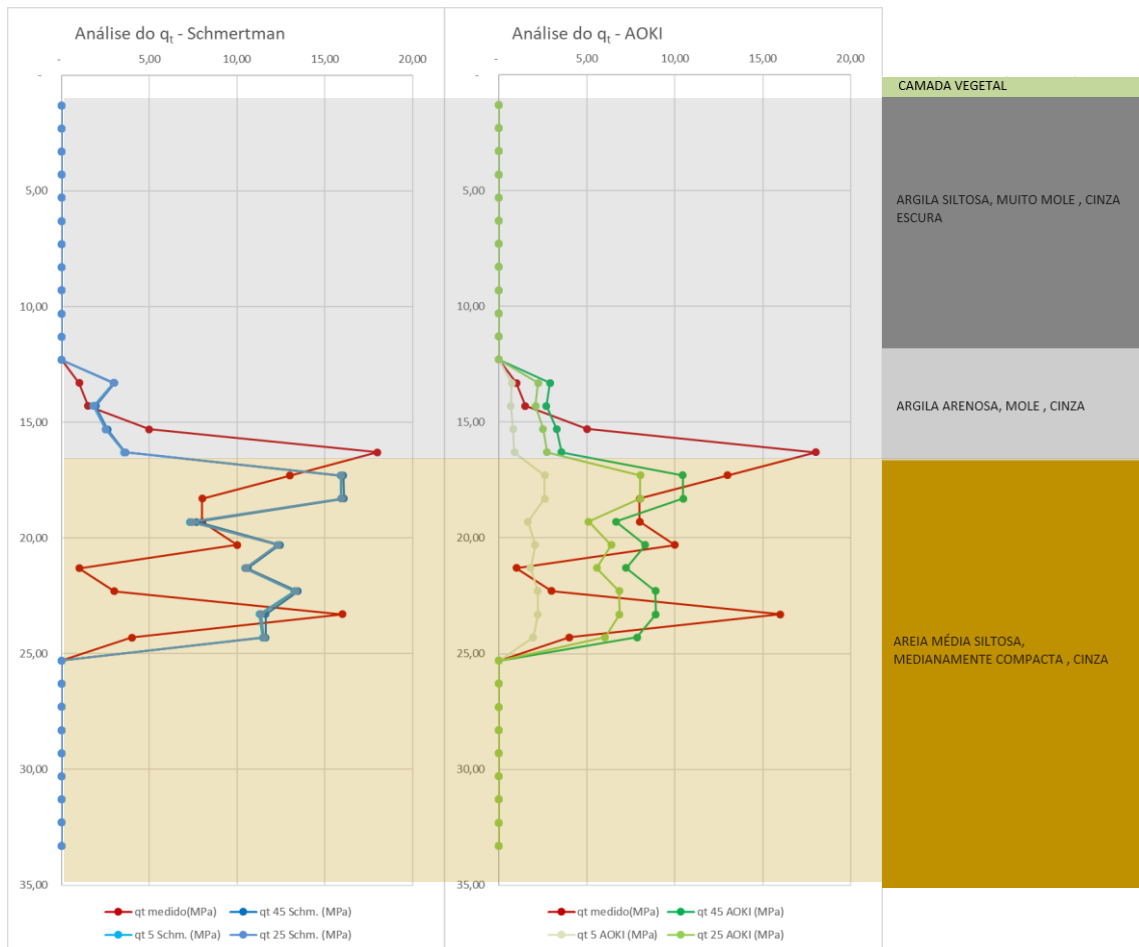


Figura B.43: Comparação das estimativas de resistência unitária de ponta (q_c) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU , em vermelho – SPT308 e CPTU308.

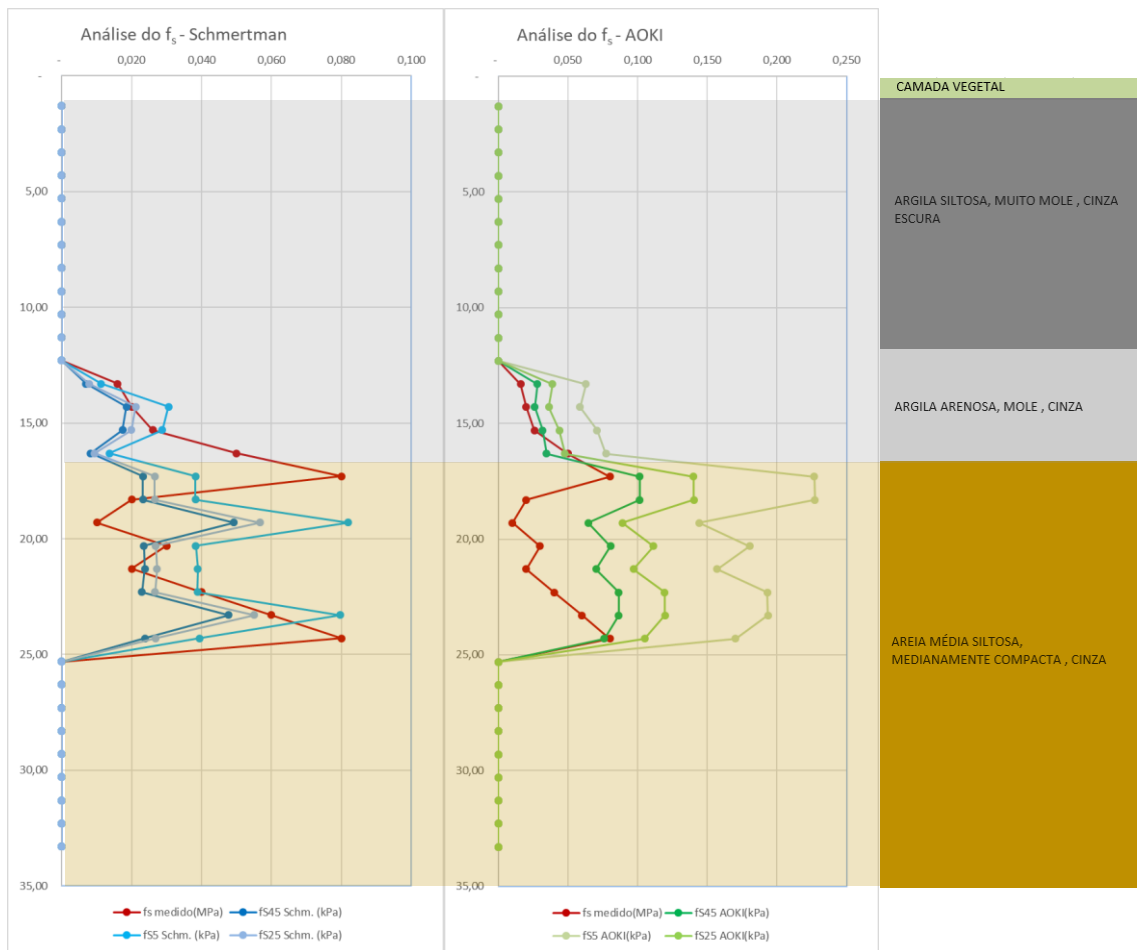


Figura B.44: Comparação das estimativas de resistência unitária de atrito lateral (f_s) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertman (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT308 e CPTU308.

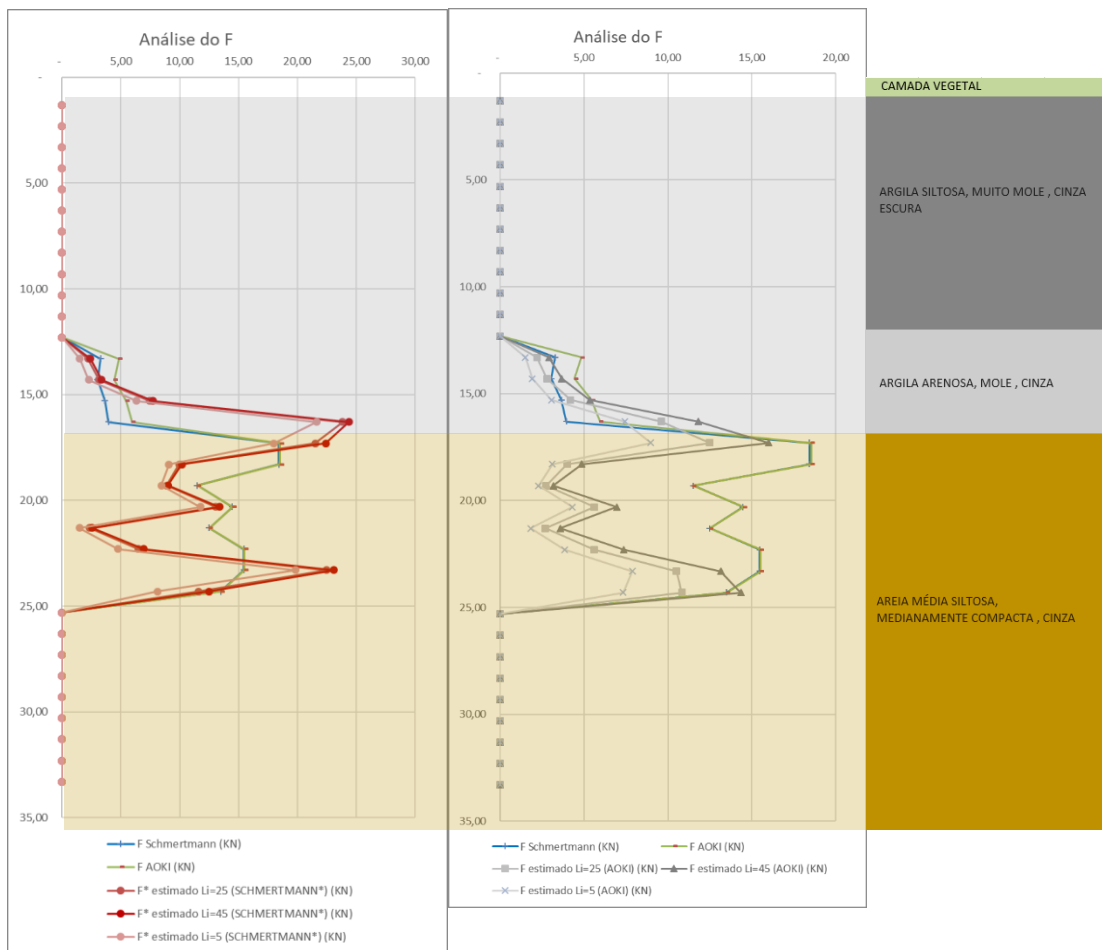


Figura B.45: Comparação das resistência estática (F) calculadas pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores “medidos” estimados através do CPTU para as áreas do amostrador SPT consideradas por Schmertmann (1979), em vermelho, e Aoki (2013) em cinza - SPT308 e CPTU308.

xvi. SPT310 e CPTU310

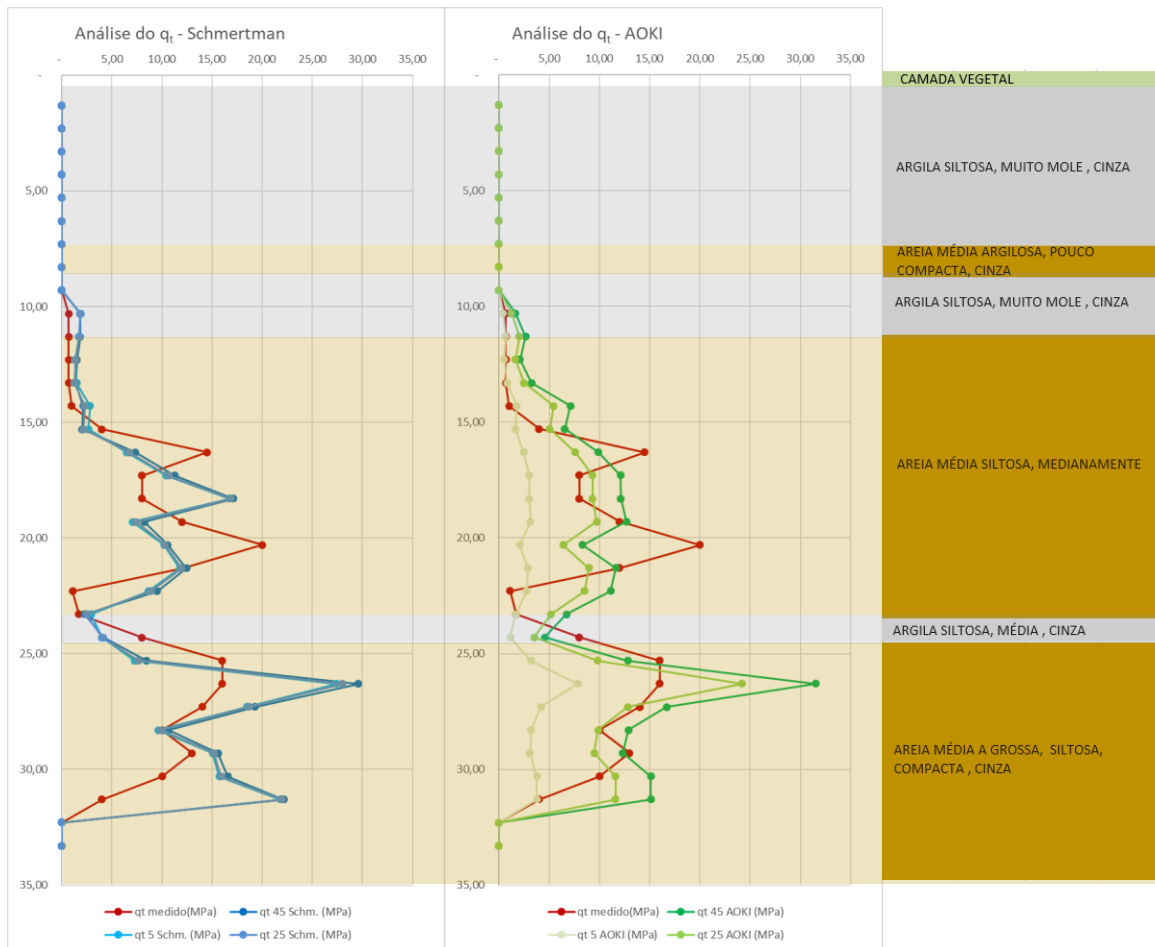


Figura B.46: Comparação das estimativas de resistência unitária de ponta (q_c) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU , em vermelho – SPT310 e CPTU310.

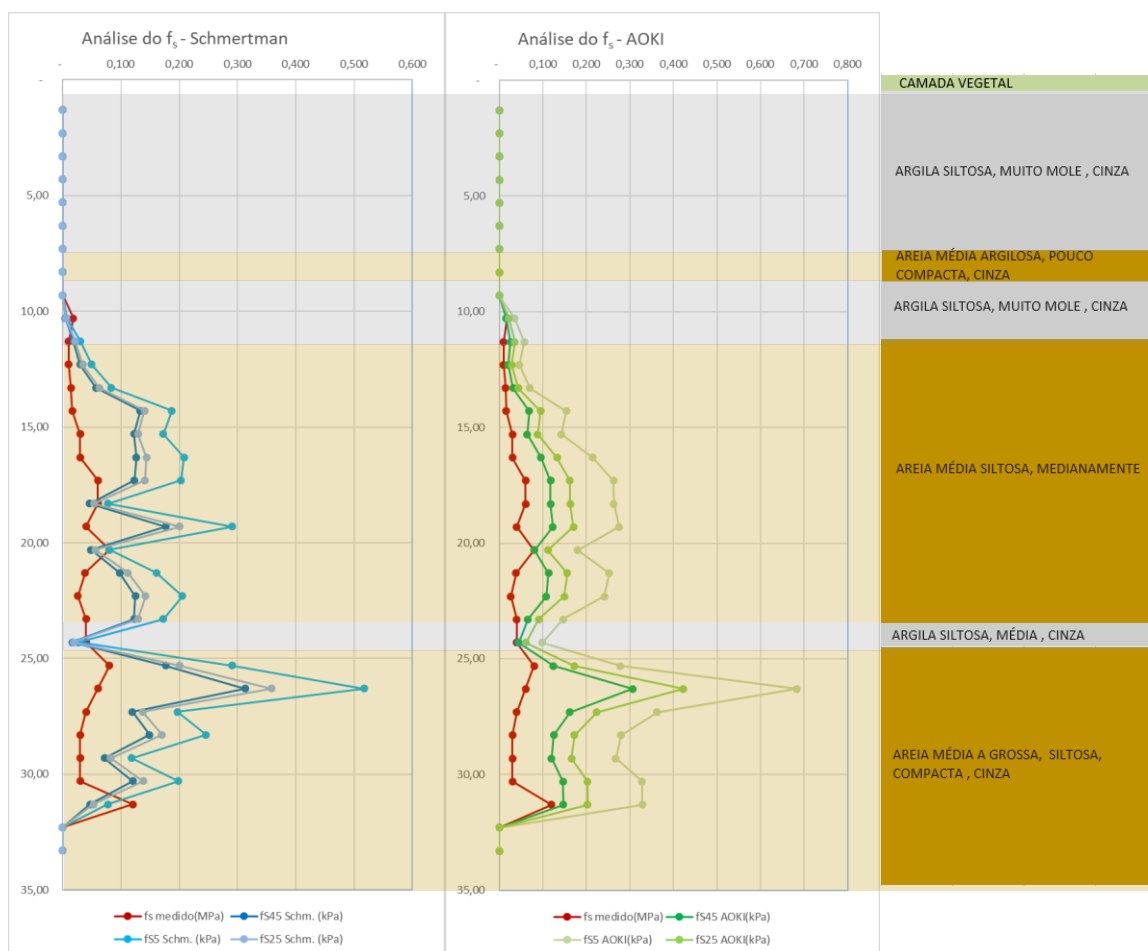


Figura B.47: Comparação das estimativas de resistência unitária de atrito lateral (f_s) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT310 e CPTU310.

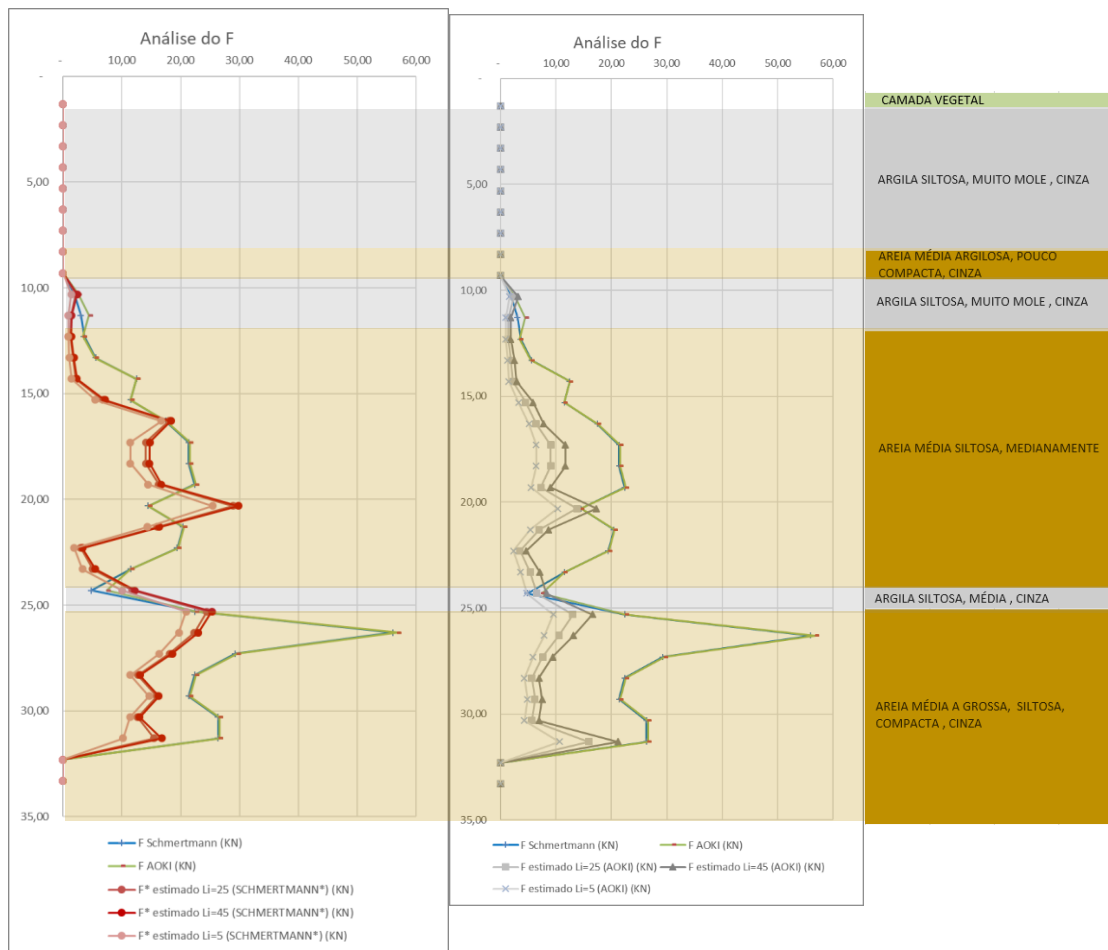


Figura B.48: Comparação das resistências estáticas (F) calculadas pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores “medidos” estimados através do CPTU para as áreas do amostrador SPT consideradas por Schmertmann (1979), em vermelho, e Aoki (2013) em cinza - SPT310 e CPTU310.

xvii. SPT314 e CPTU314

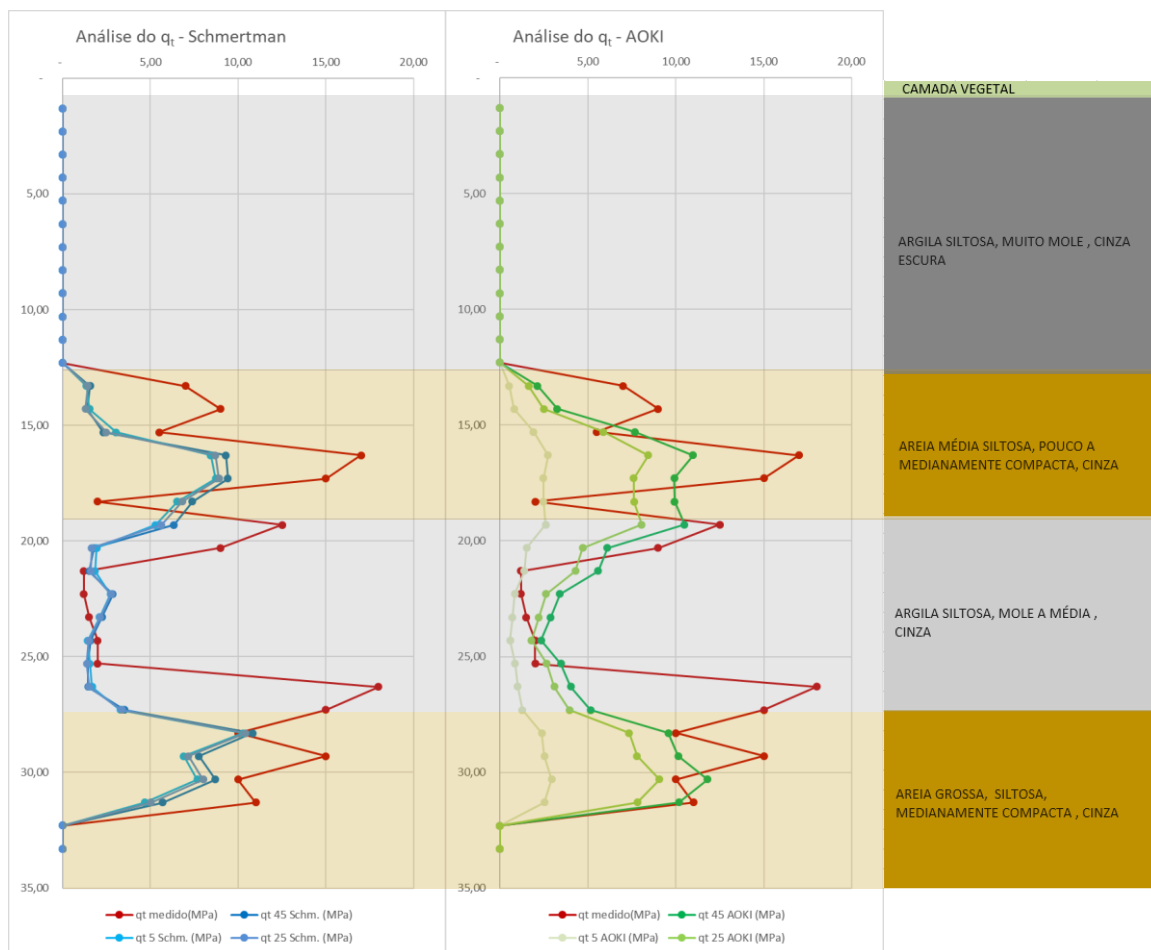


Figura B.49: Comparação das estimativas de resistência unitária de ponta (q_c) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU , em vermelho – SPT314 e CPTU314.

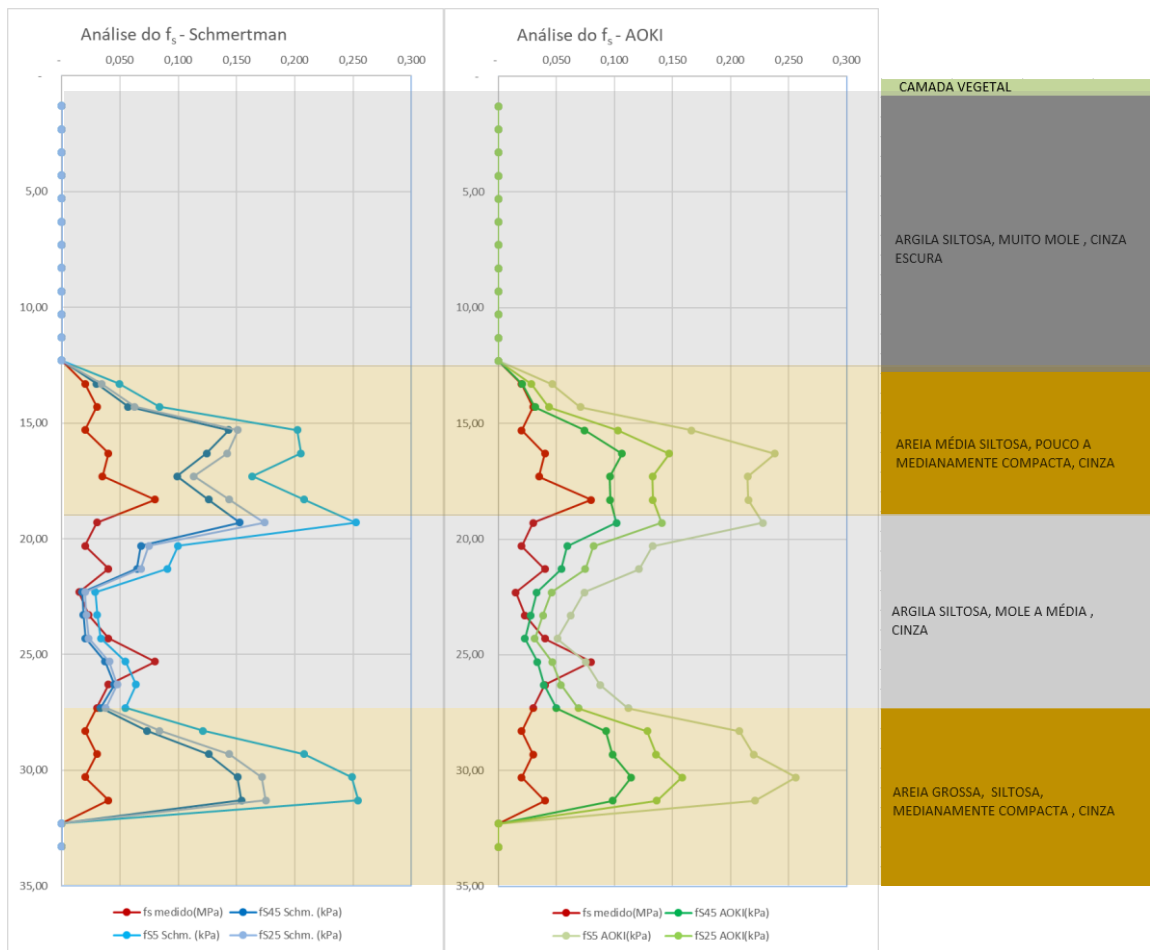


Figura B.50: Comparação das estimativas de resistência unitária de atrito lateral (f_s) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertman (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT314 e CPTU314.

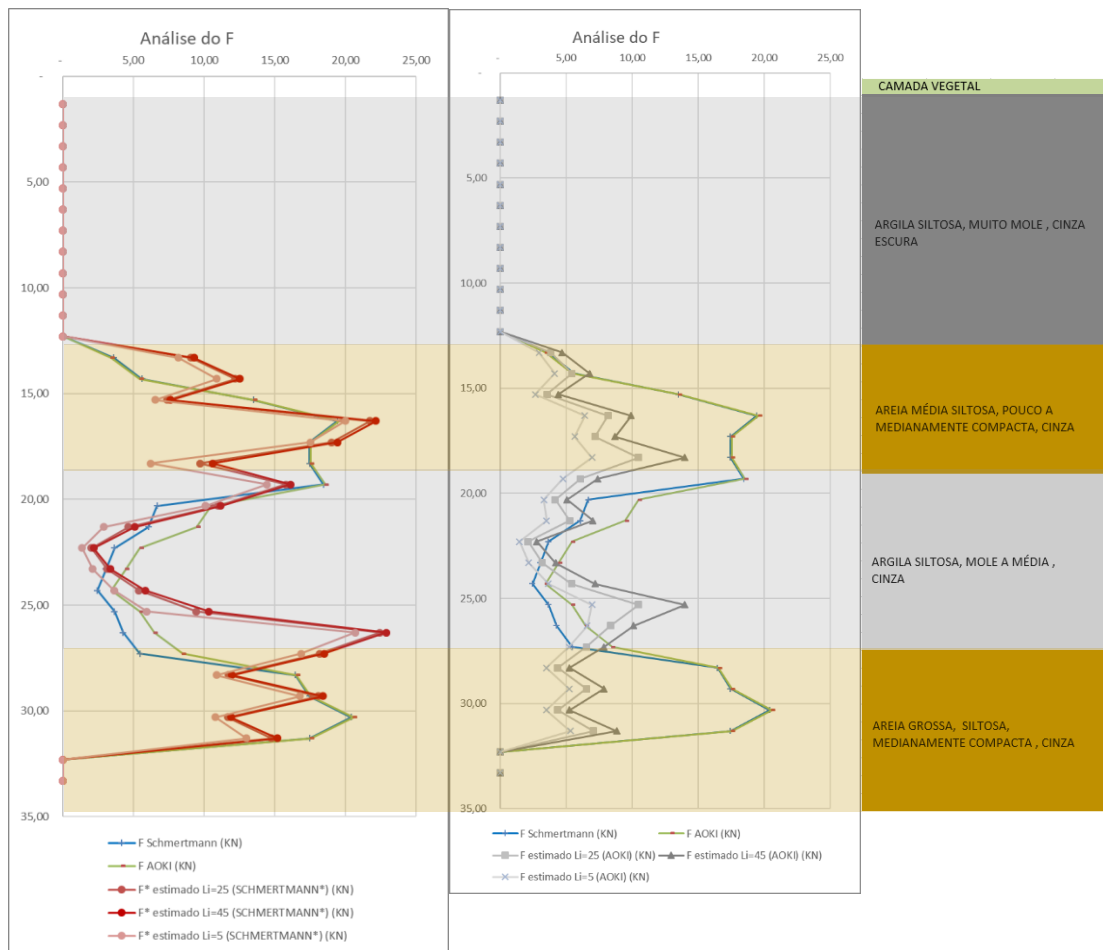


Figura B.51: Comparação das resistência estática (F) calculadas pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores “medidos” estimados através do CPTU para as áreas do amostrador SPT consideradas por Schmertmann (1979), em vermelho, e Aoki (2013) em cinza - SPT314 e CPTU314.

xviii. SPT315 e CPTU315

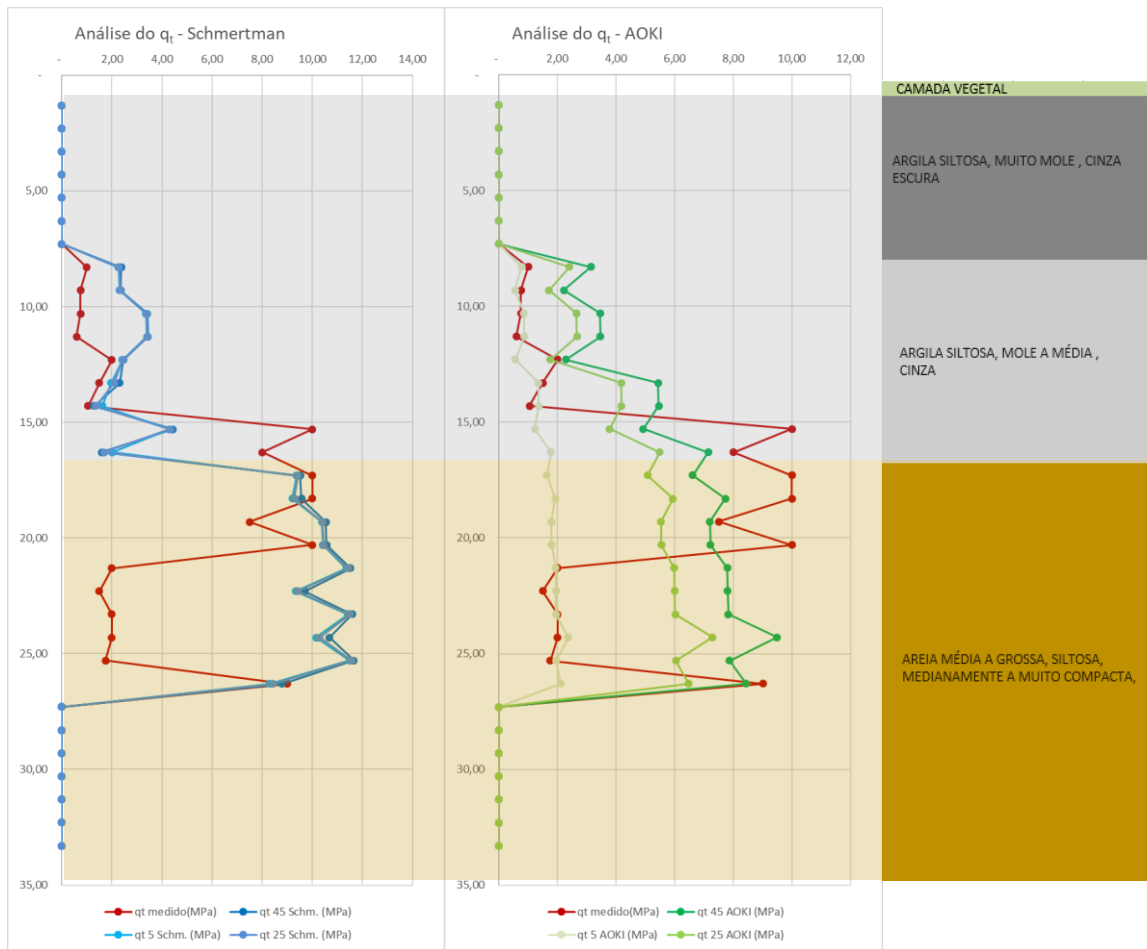


Figura B.52: Comparação das estimativas de resistência unitária de ponta (q_c) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT315 e CPTU315.

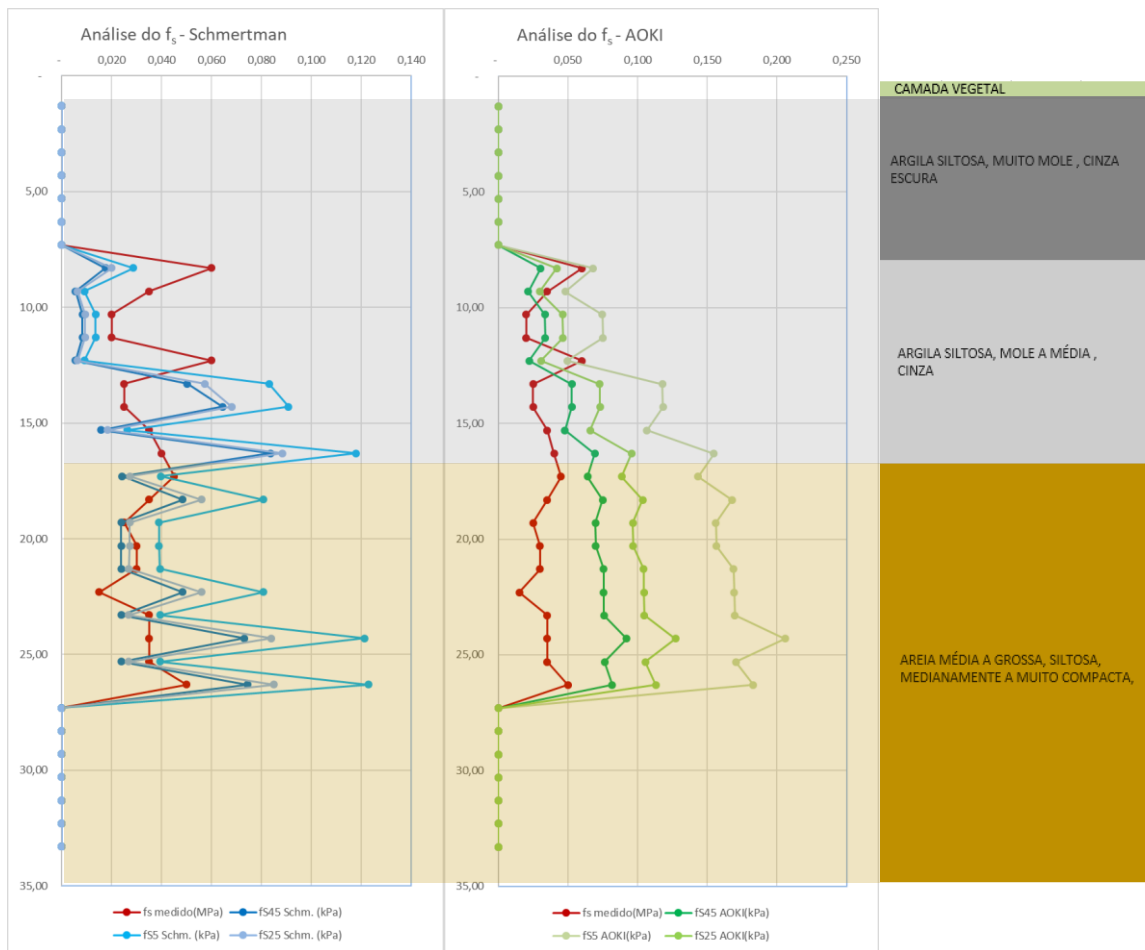


Figura B.53: Comparação das estimativas de resistência unitária de atrito lateral (f_s) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertman (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT315 e CPTU315.

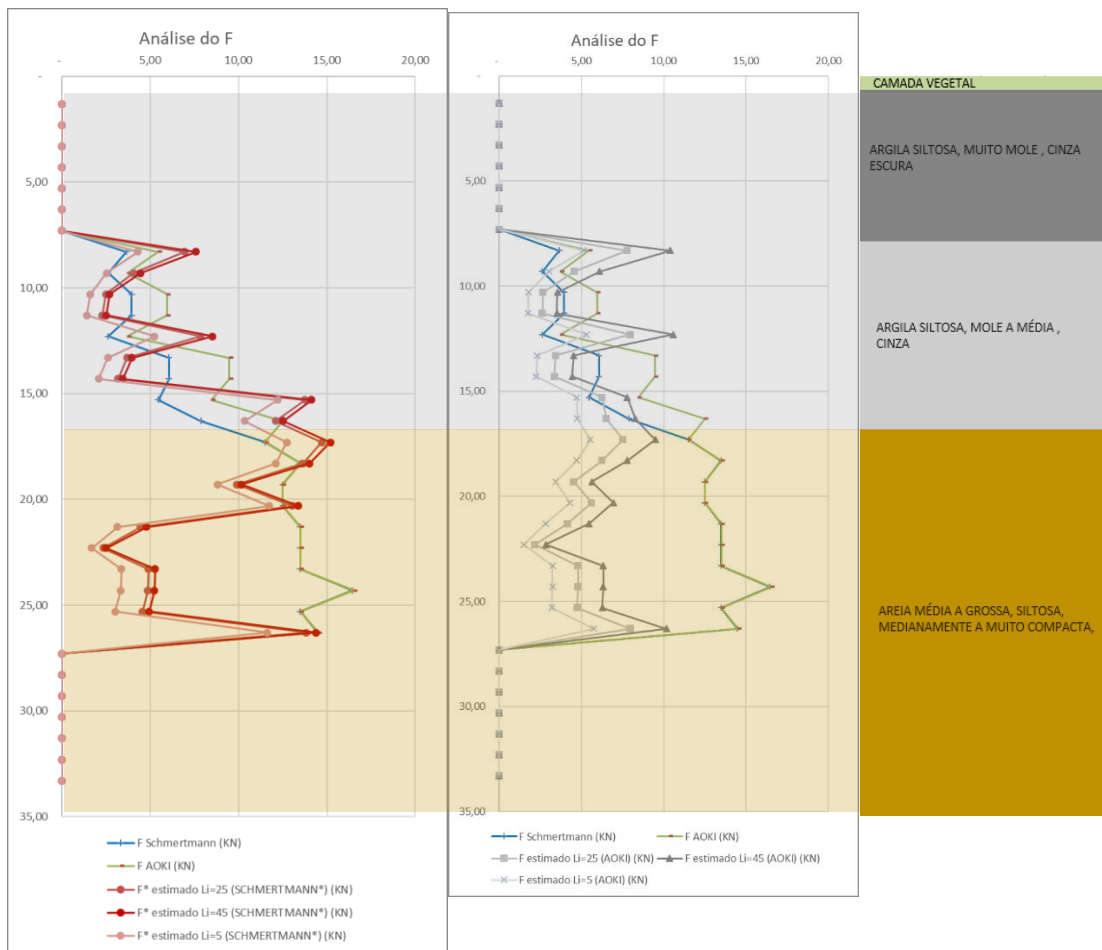


Figura B.54: Comparação das resistências estáticas (F) calculadas pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores “medidos” estimados através do CPTU para as áreas do amostrador SPT consideradas por Schmertmann (1979), em vermelho, e Aoki (2013) em cinza - SPT315 e CPTU315.

xix. SPT319 e CPTU319

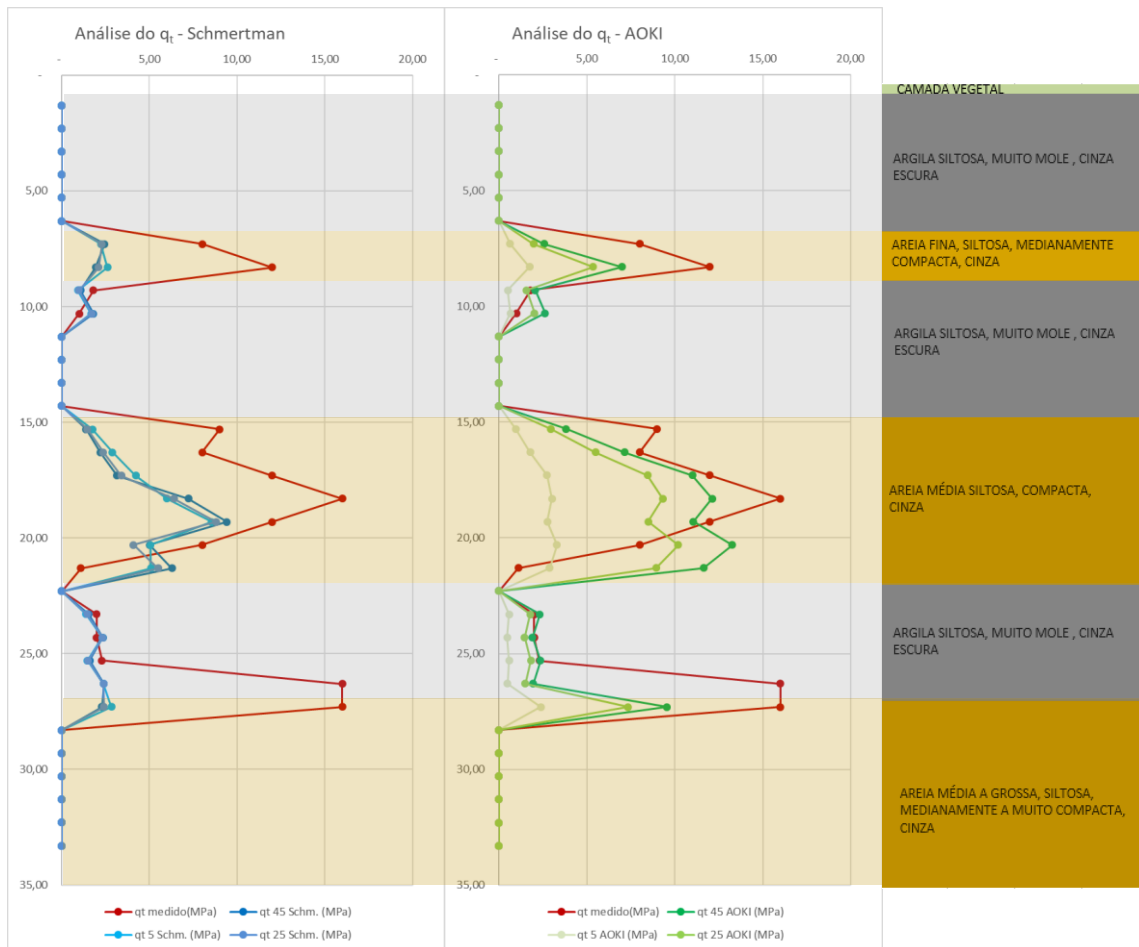


Figura B.55: Comparação das estimativas de resistência unitária de ponta (q_c) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT319 e CPTU319.

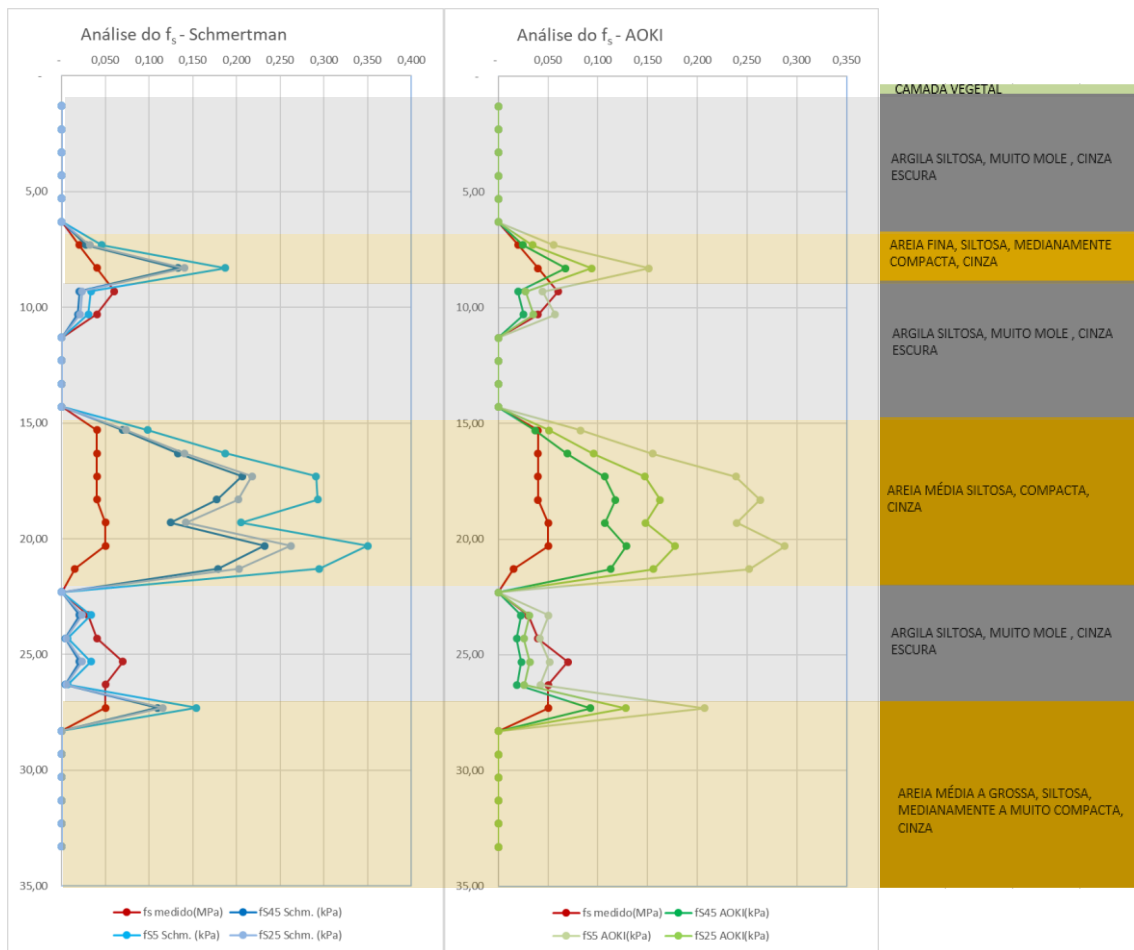


Figura B.56: Comparação das estimativas de resistência unitária de atrito lateral (f_s) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT319 e CPTU319.

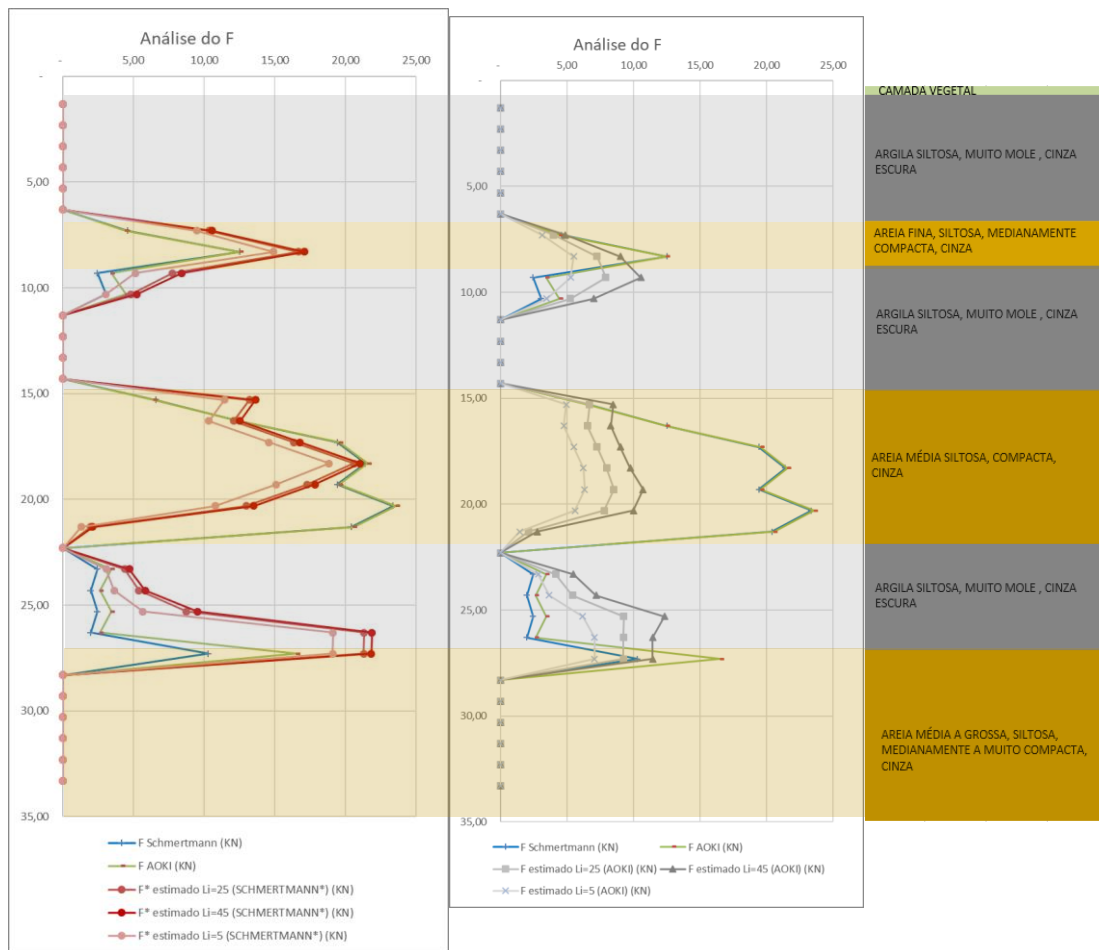


Figura B.57: Comparação das resistências estáticas (F) calculadas pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores “medidos” estimados através do CPTU para as áreas do amostrador SPT consideradas por Schmertmann (1979), em vermelho, e Aoki (2013) em cinza - SPT319 e CPTU319.

xx. SPT321 e CPTU321

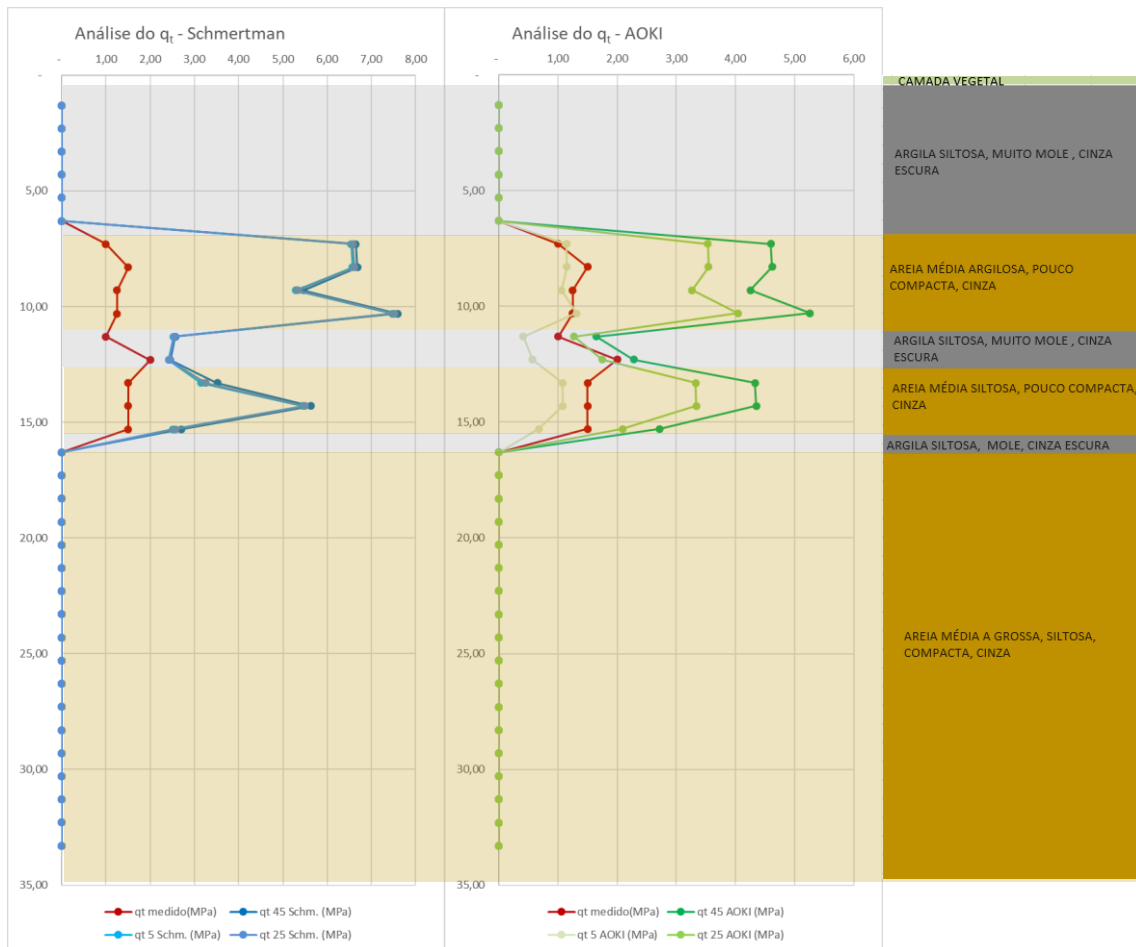


Figura B.58: Comparação das estimativas de resistência unitária de ponta (q_c) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU , em vermelho – SPT321 e CPTU321.

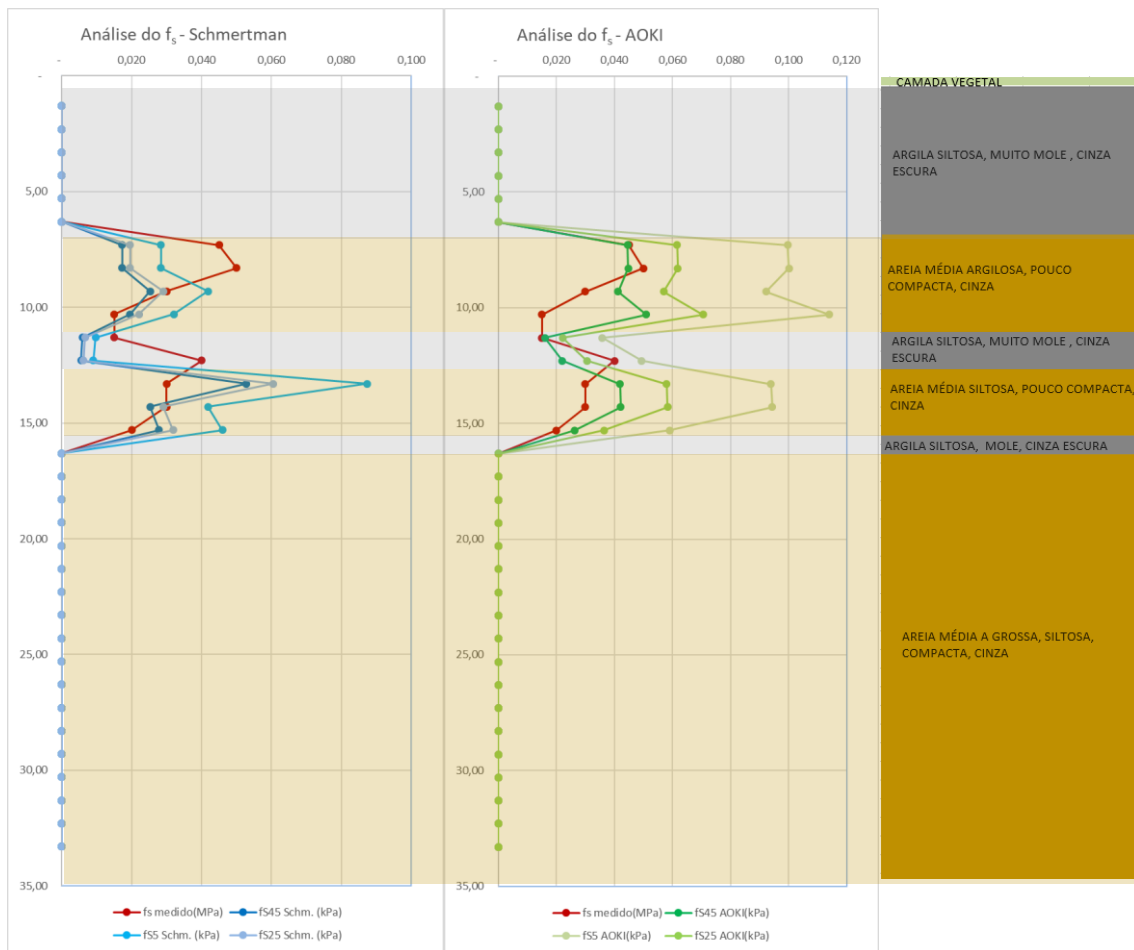


Figura B.59: Comparação das estimativas de resistência unitária de atrito lateral (f_s) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT321 e CPTU321.

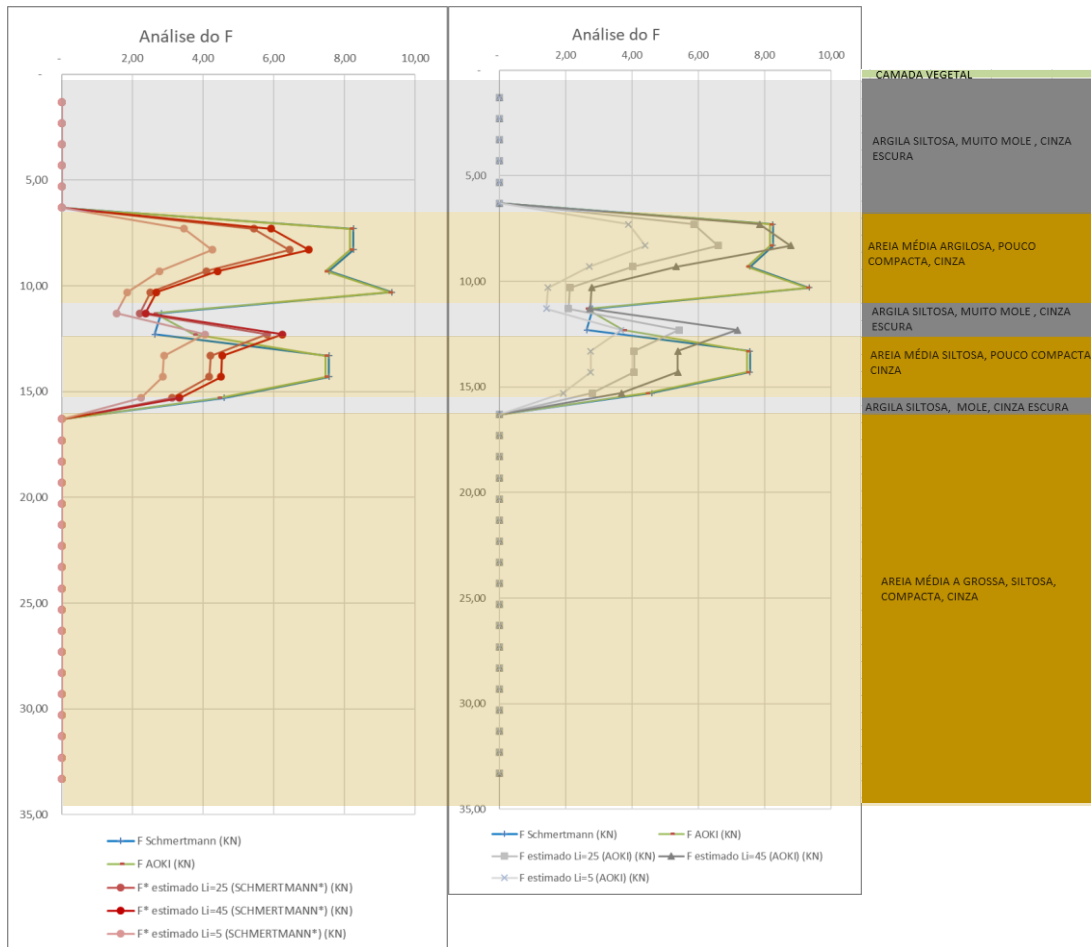


Figura B.60: Comparação das resistência estática (F) calculadas pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores “medidos” estimados através do CPTU para as áreas do amostrador SPT consideradas por Schmertmann (1979), em vermelho, e Aoki (2013) em cinza - SPT321 e CPTU321.

xxi. SPT325 e CPTU325

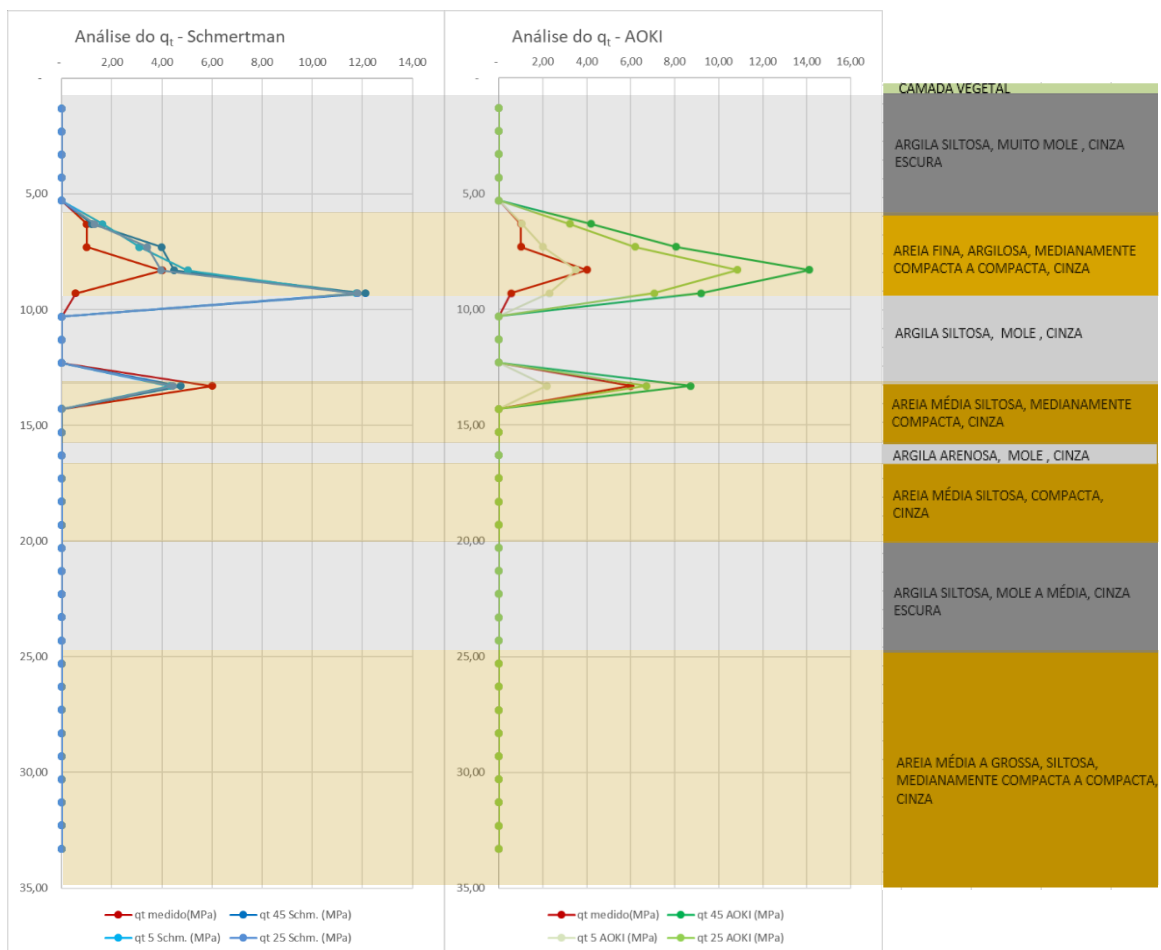


Figura B.61: Comparação das estimativas de resistência unitária de ponta (q_c) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU , em vermelho – SPT325 e CPTU325.

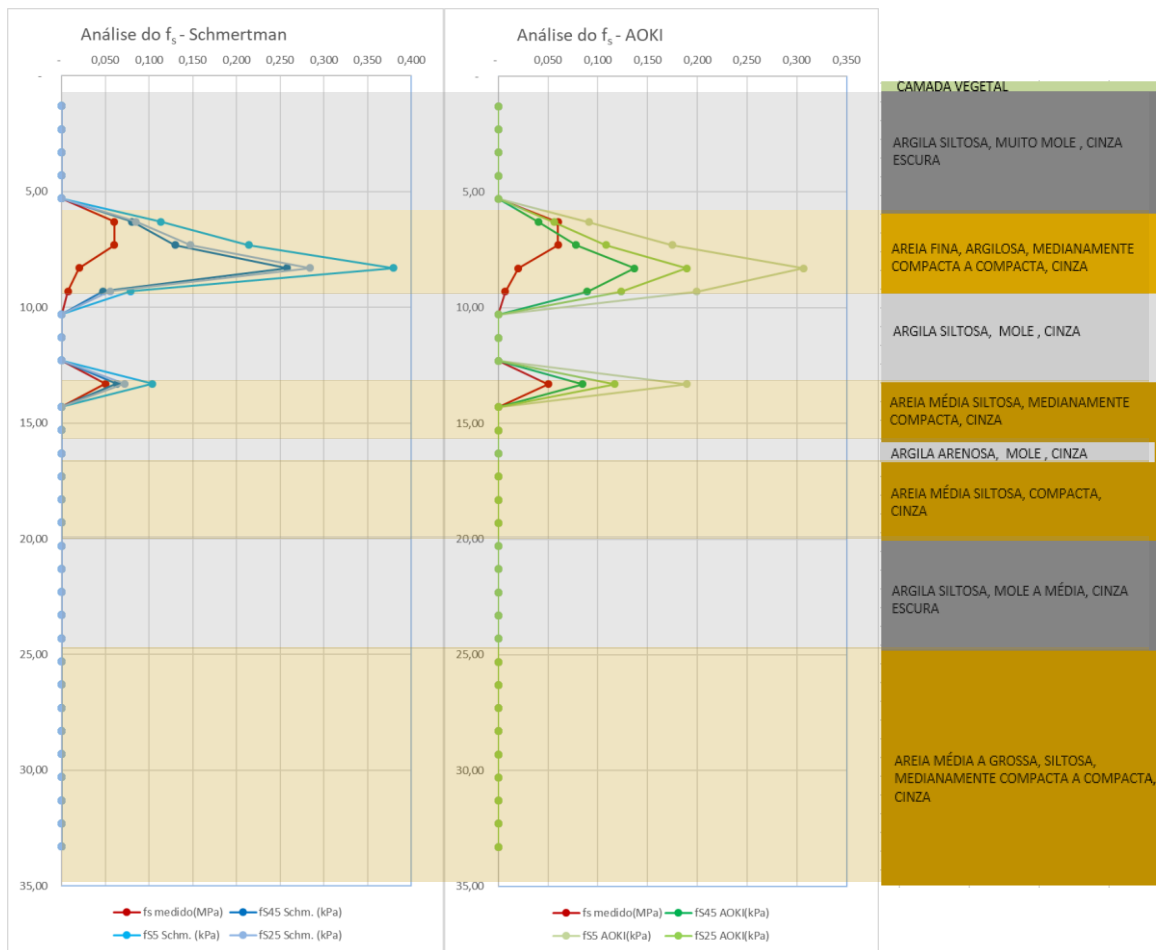


Figura B.62: Comparação das estimativas de resistência unitária de atrito lateral (f_s) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT325 e CPTU325.

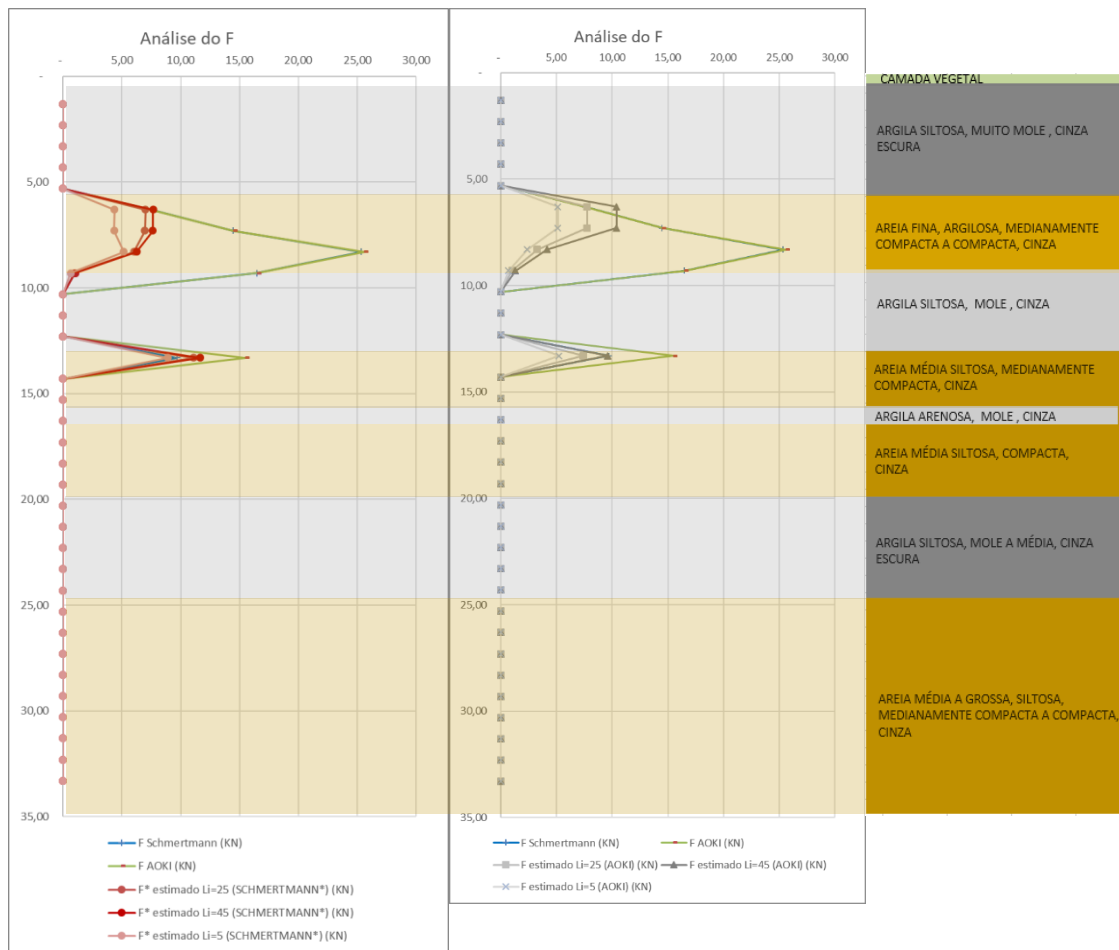


Figura B.63: Comparação das resistência estática (F) calculadas pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores “medidos” estimados através do CPTU para as áreas do amostrador SPT consideradas por Schmertmann (1979), em vermelho, e Aoki (2013) em cinza - SPT325 e CPTU325.

xxii. SPT327 e CPTU327

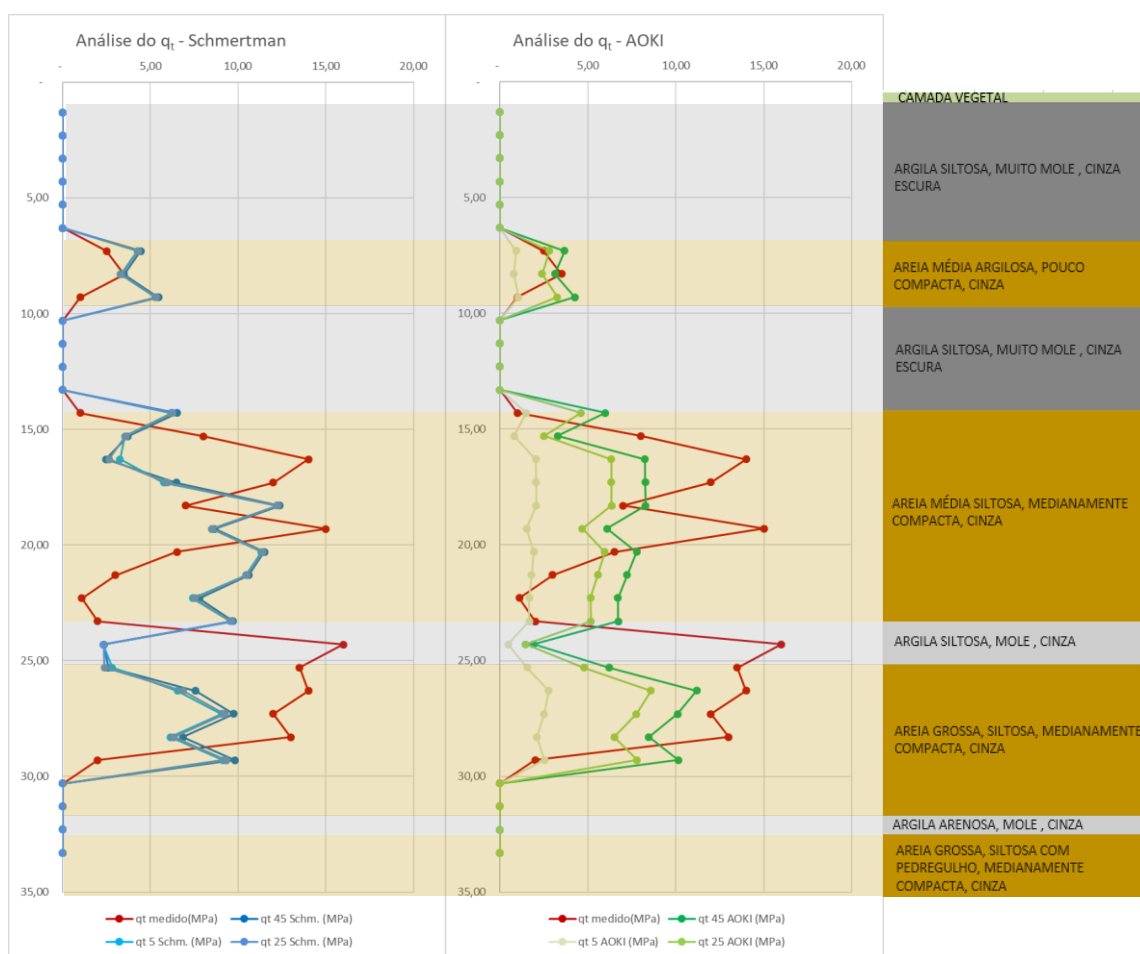


Figura B.64: Comparação das estimativas de resistência unitária de ponta (q_c) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU , em vermelho – SPT327 e CPTU327.

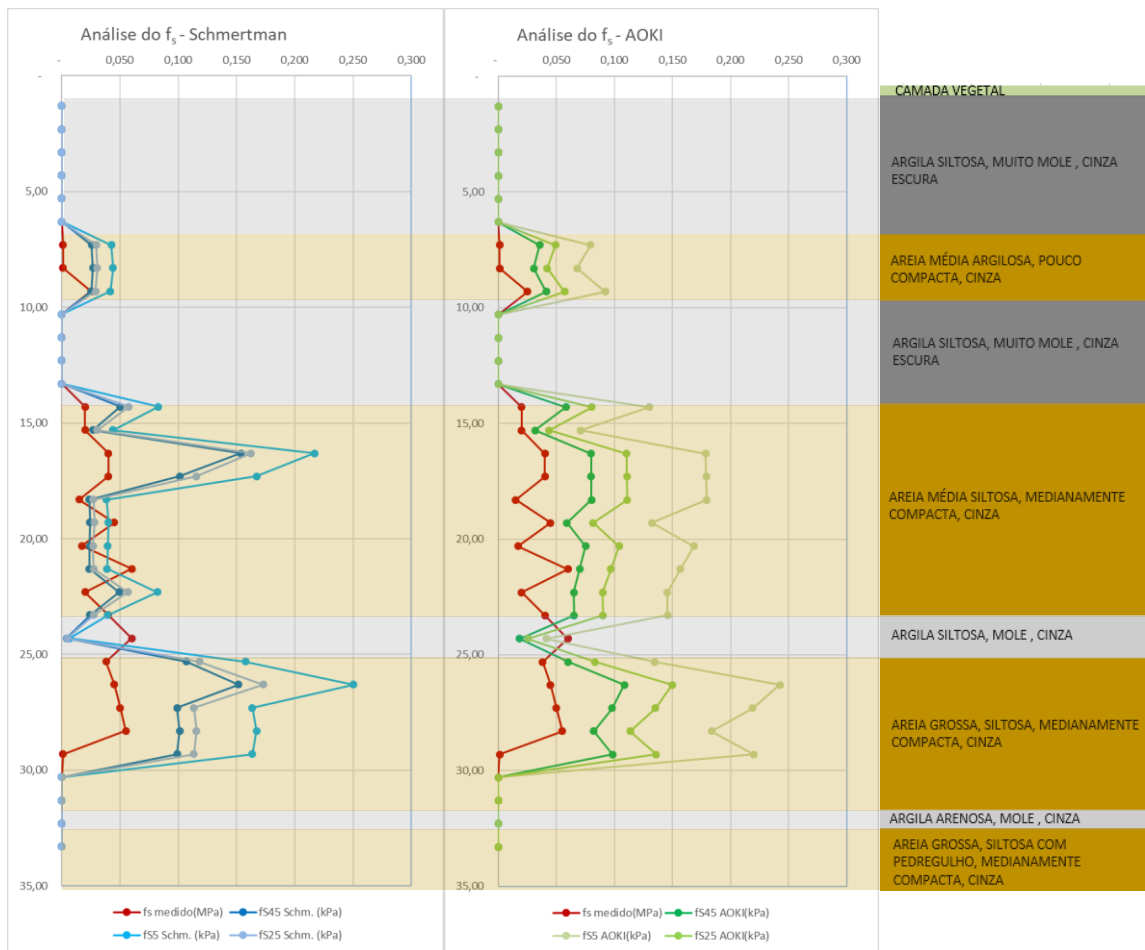


Figura B.65: Comparação das estimativas de resistência unitária de atrito lateral (f_s) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT327 e CPTU327.

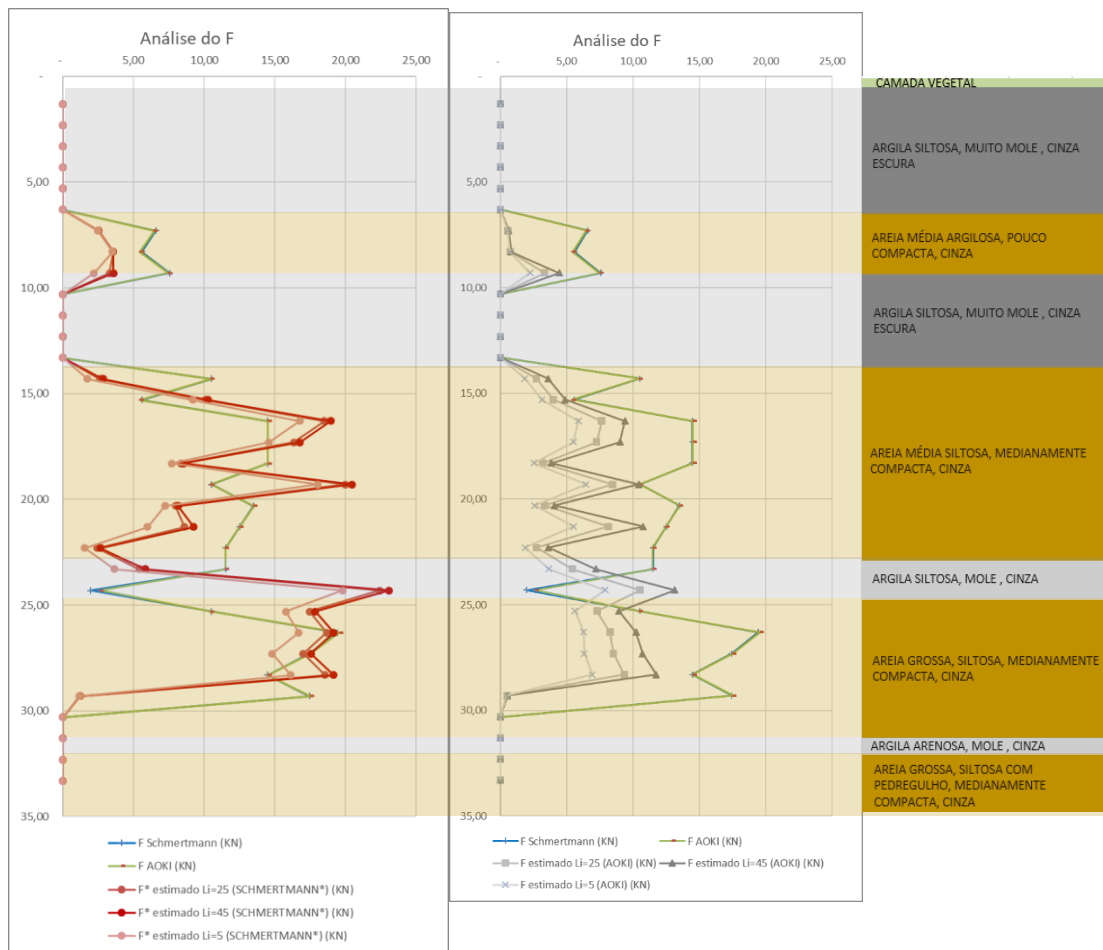


Figura B.66: Comparação das resistência estática (F) calculadas pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores “medidos” estimados através do CPTU para as áreas do amostrador SPT consideradas por Schmertmann (1979), em vermelho, e Aoki (2013) em cinza - SPT327 e CPTU327.

xxiii. SPT328 e CPTU328

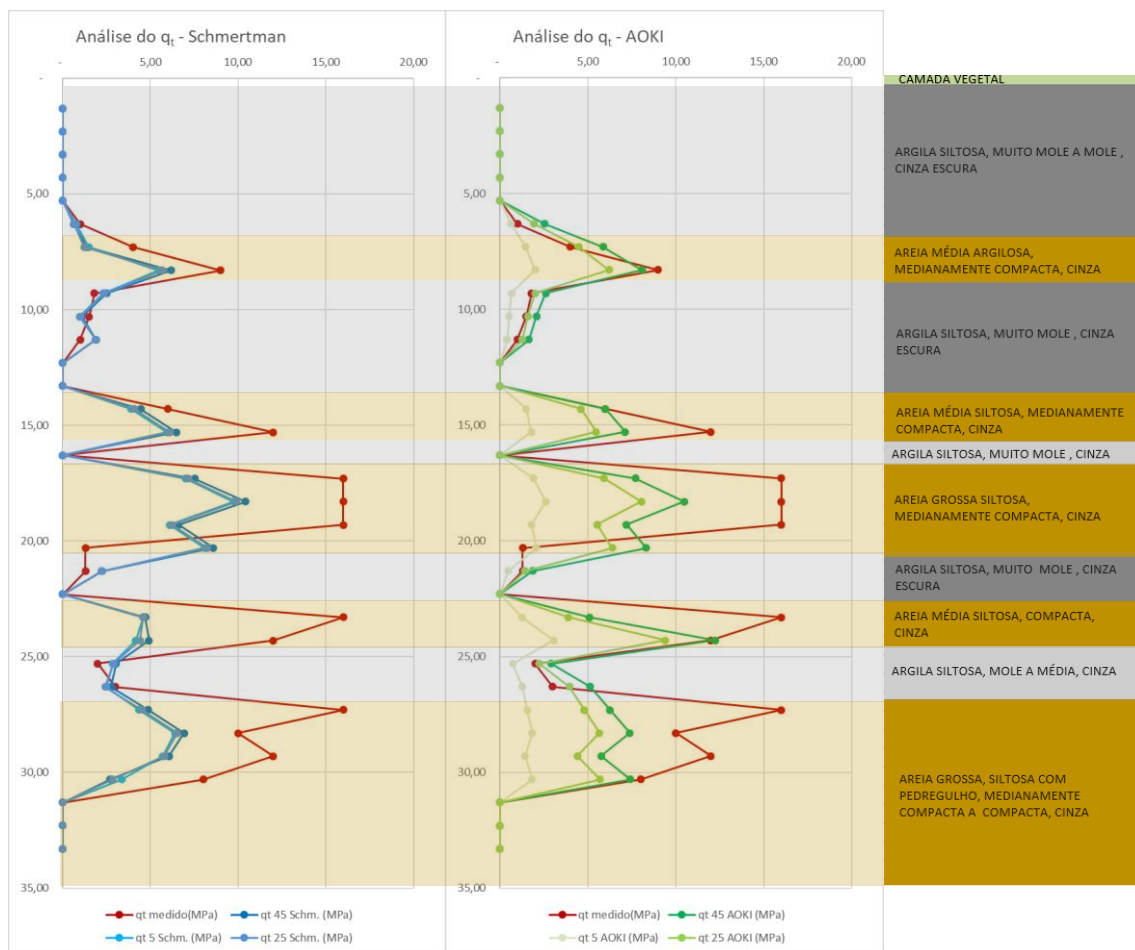


Figura B.67: Comparação das estimativas de resistência unitária de ponta (q_c) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU , em vermelho – SPT328 e CPTU328.



Figura B.68: Comparação das estimativas de resistência unitária de atrito lateral (f_s) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertman (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT328 e CPTU328.

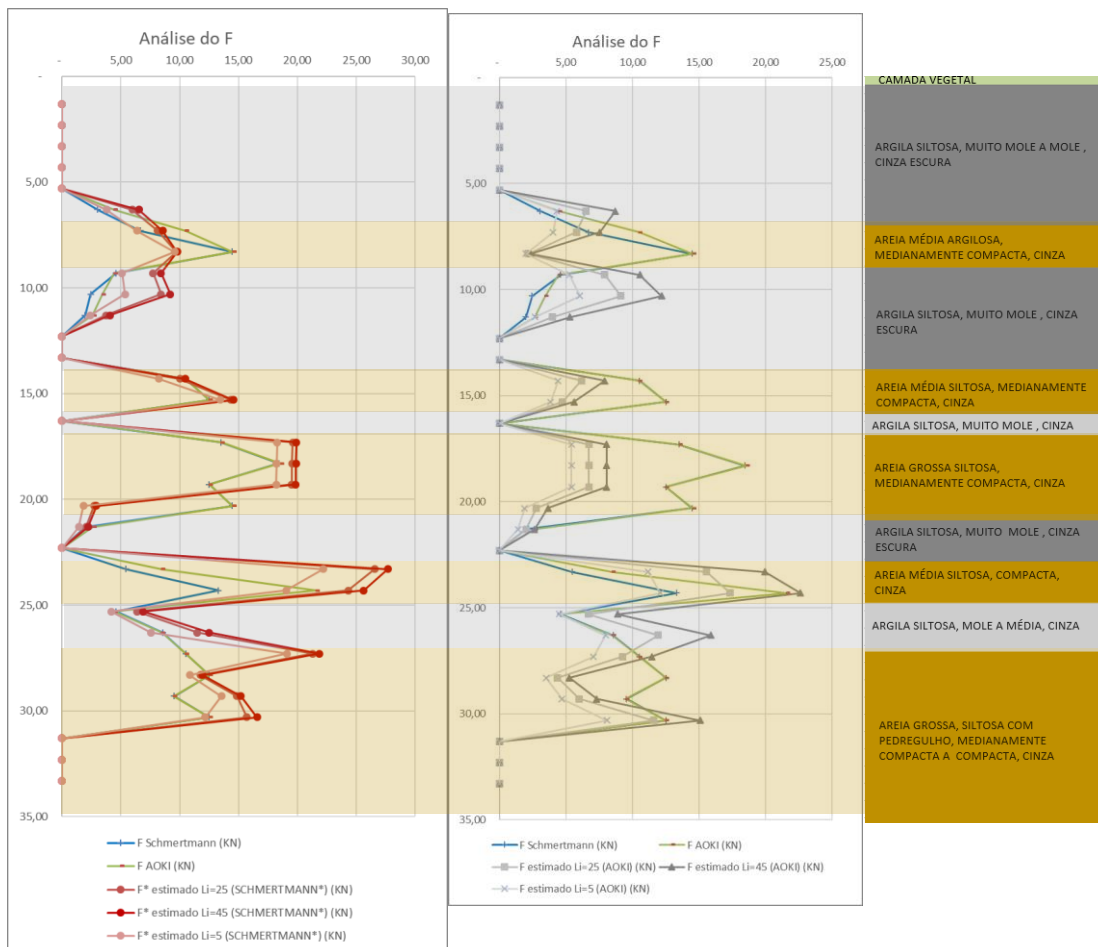


Figura B.69: Comparação das resistências estáticas (F) calculadas pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores “medidos” estimados através do CPTU para as áreas do amostrador SPT consideradas por Schmertmann (1979), em vermelho, e Aoki (2013) em cinza - SPT328 e CPTU328.

xxiv. SPT331 e CPTU331

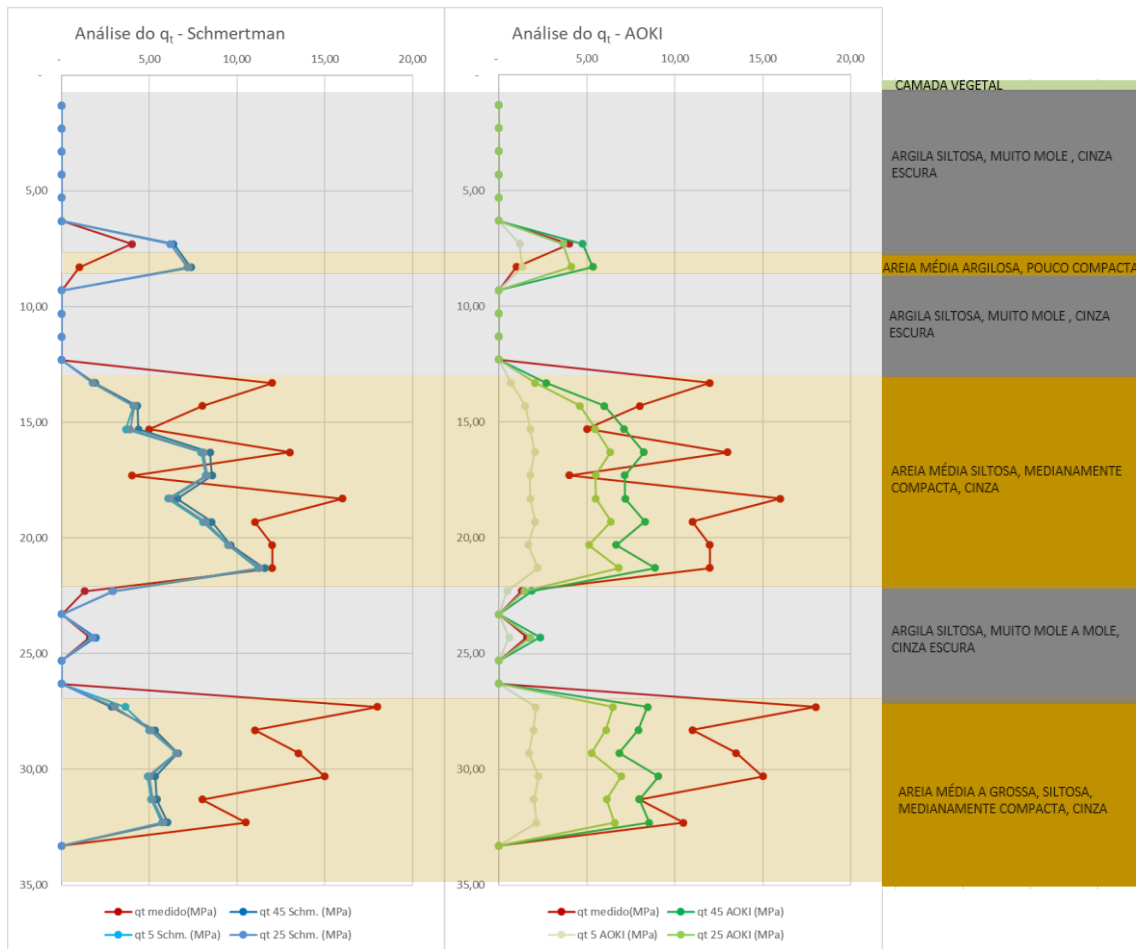


Figura B.70: Comparação das estimativas de resistência unitária de ponta (q_c) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU , em vermelho – SPT331 e CPTU331.

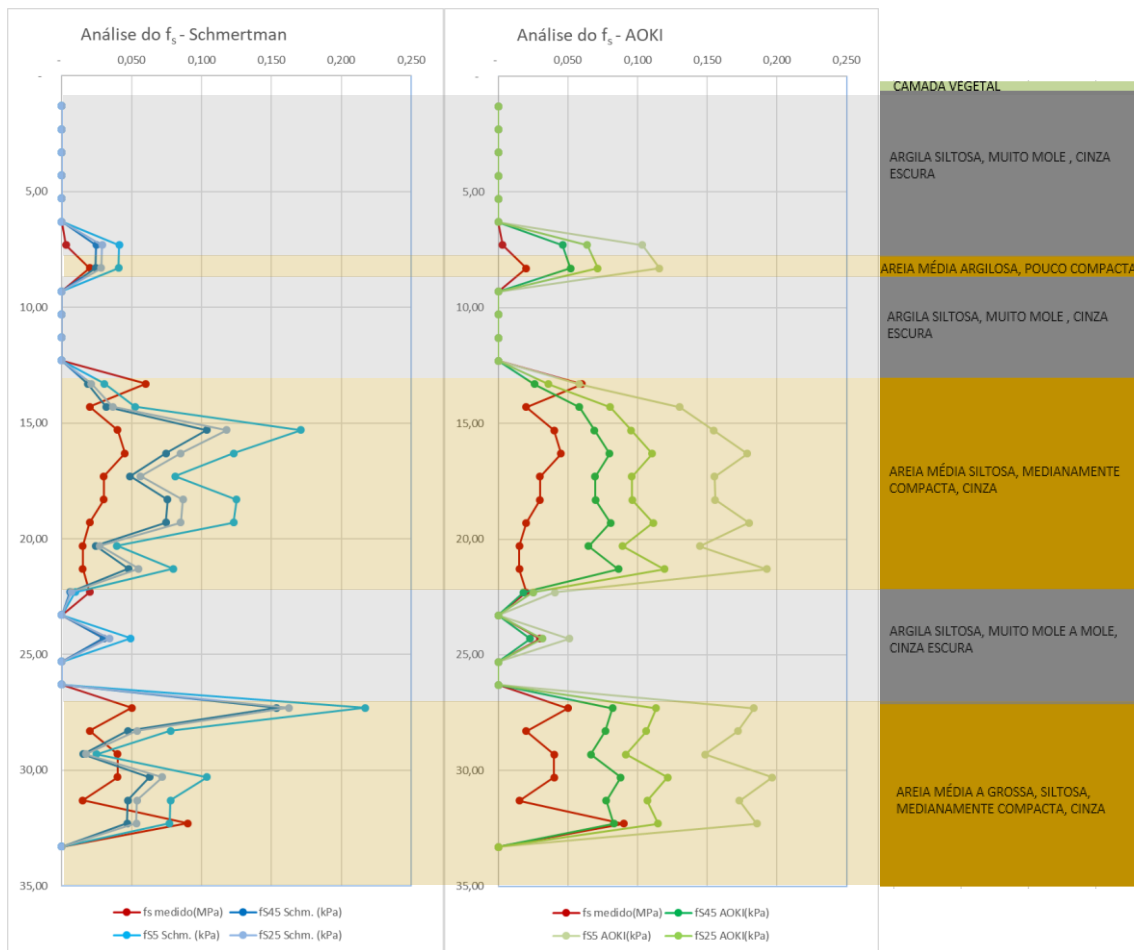


Figura B.71: Comparação das estimativas de resistência unitária de atrito lateral (f_s) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT331 e CPTU331.

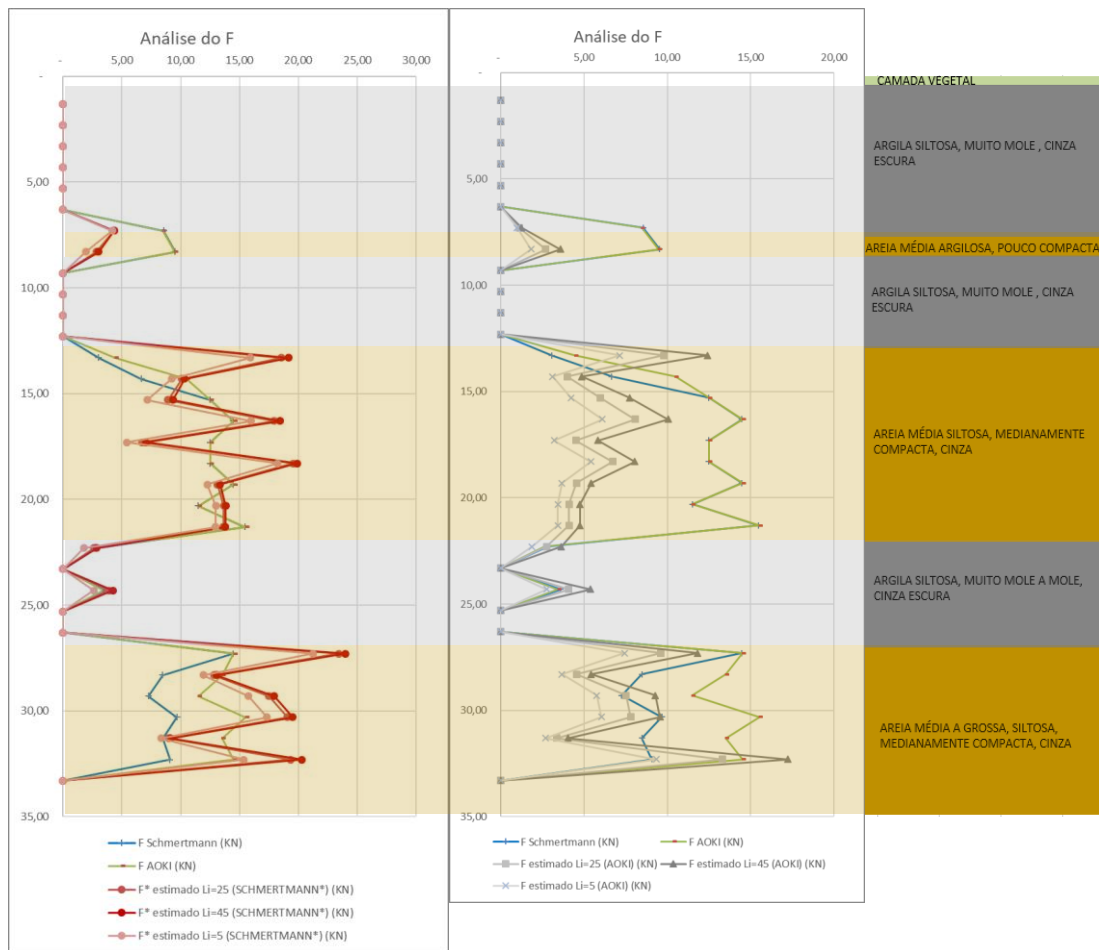


Figura B.72: Comparação das resistência estática (F) calculadas pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores “medidos” estimados através do CPTU para as áreas do amostrador SPT consideradas por Schmertmann (1979), em vermelho, e Aoki (2013) em cinza - SPT331 e CPTU331.

xxv. SPT332 e CPTU332

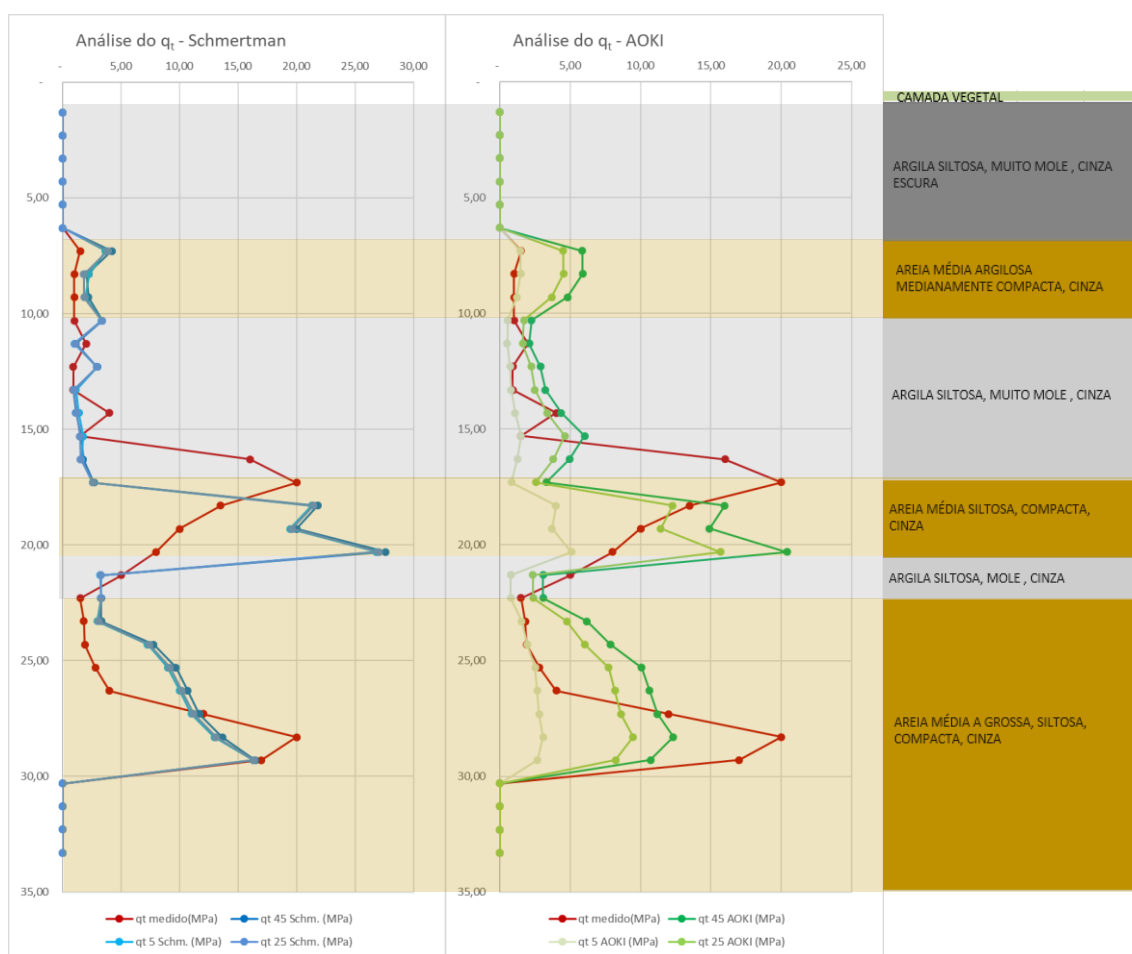


Figura B.73: Comparação das estimativas de resistência unitária de ponta (q_c) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU , em vermelho – SPT332 e CPTU332.

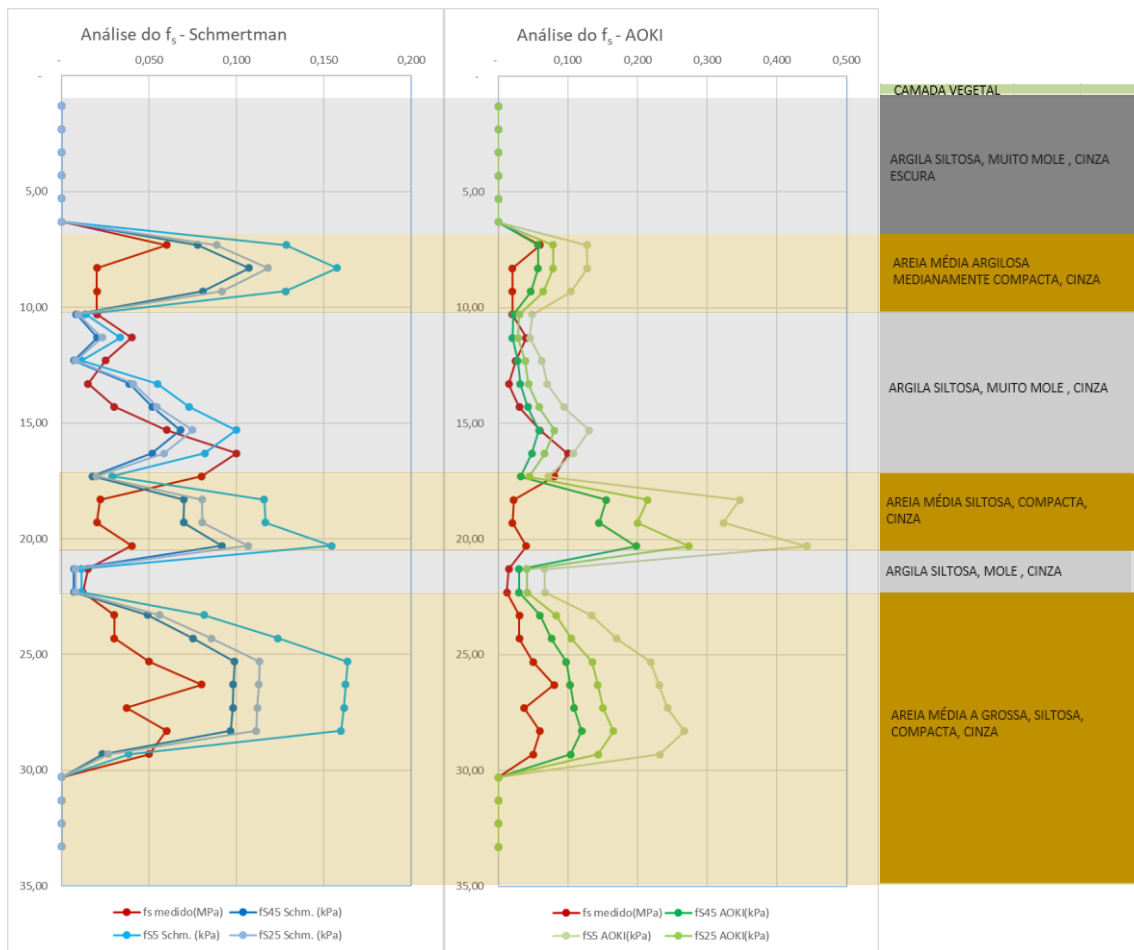


Figura B.74: Comparação das estimativas de resistência unitária de atrito lateral (f_s) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT332 e CPTU332.

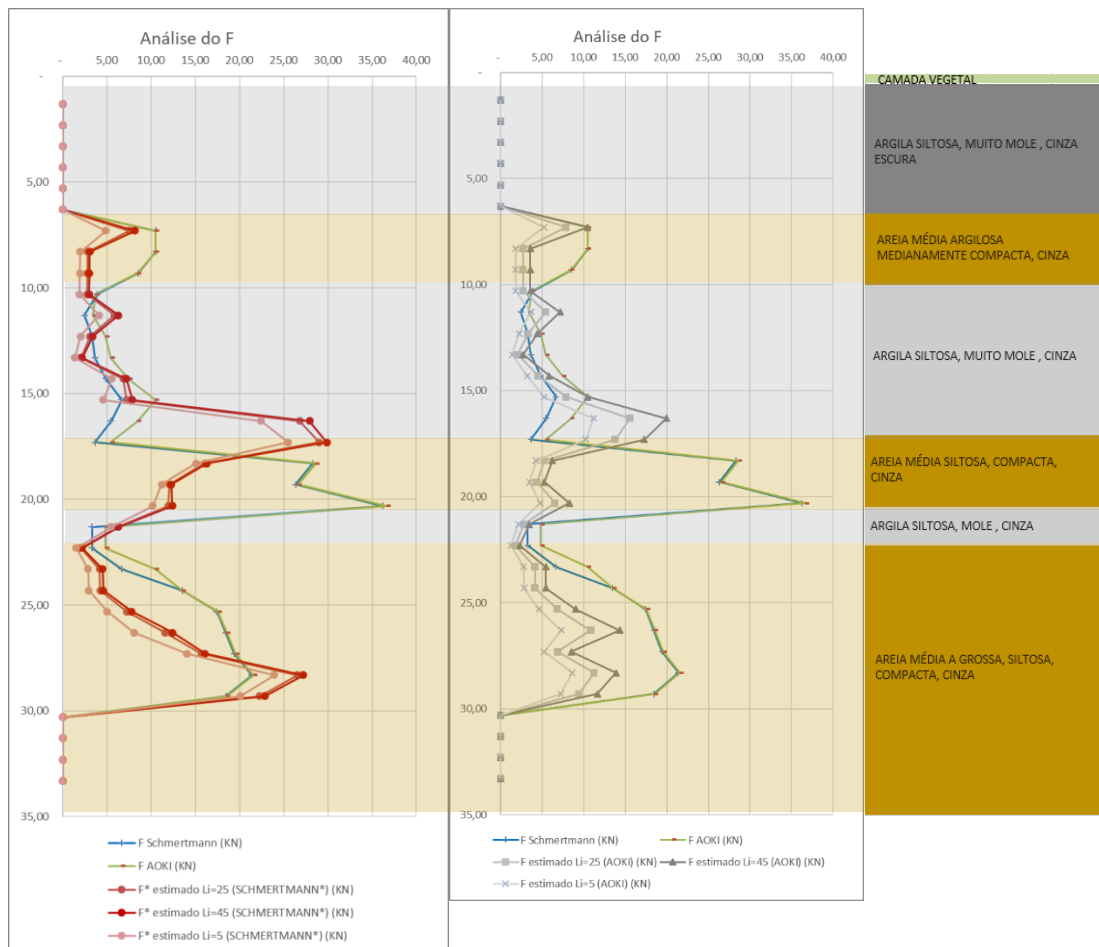


Figura B.75: Comparação das resistência estática (F) calculadas pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores “medidos” estimados através do CPTU para as áreas do amostrador SPT consideradas por Schmertmann (1979), em vermelho, e Aoki (2013) em cinza - SPT332 e CPTU332.

xxvi. SPT334 e CPTU334

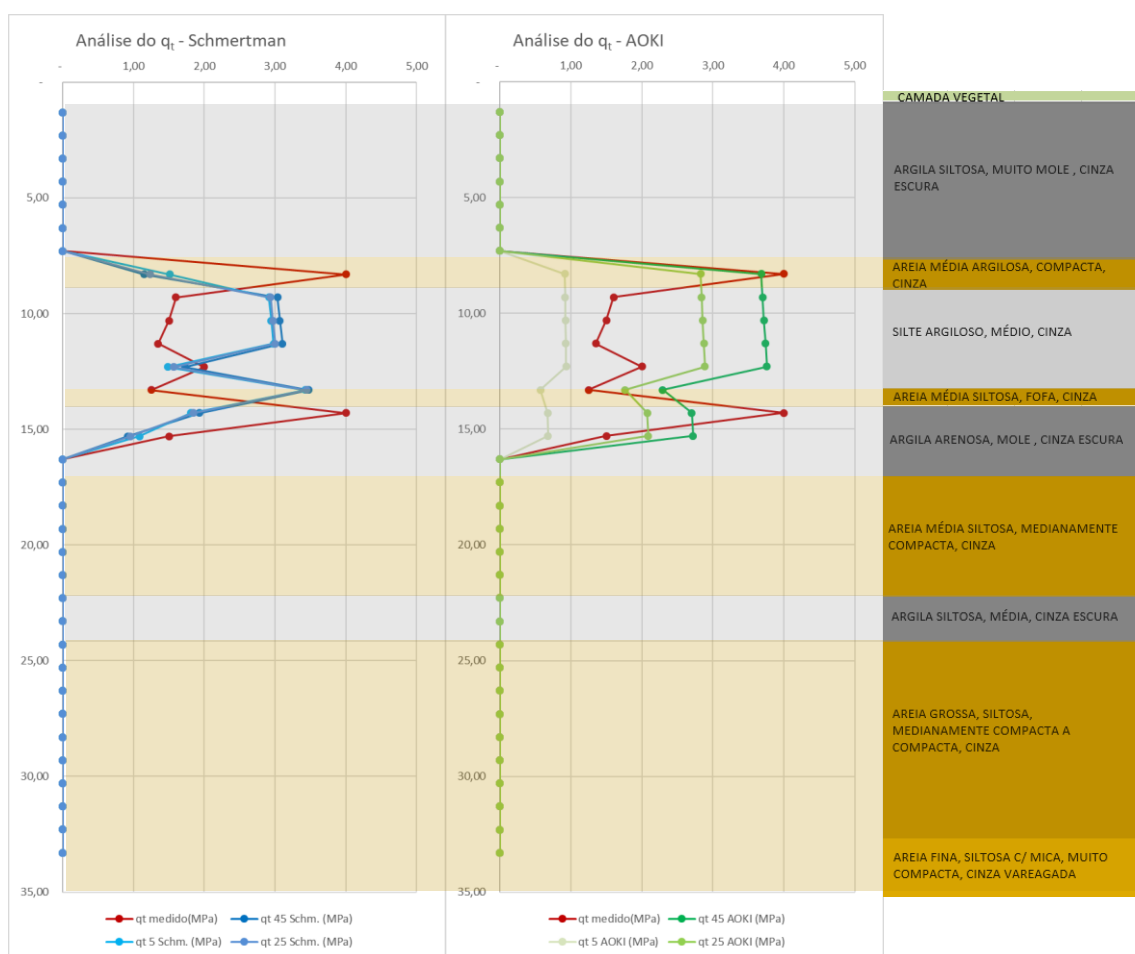


Figura B.76: Comparação das estimativas de resistência unitária de ponta (q_c) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT334 e CPTU334.

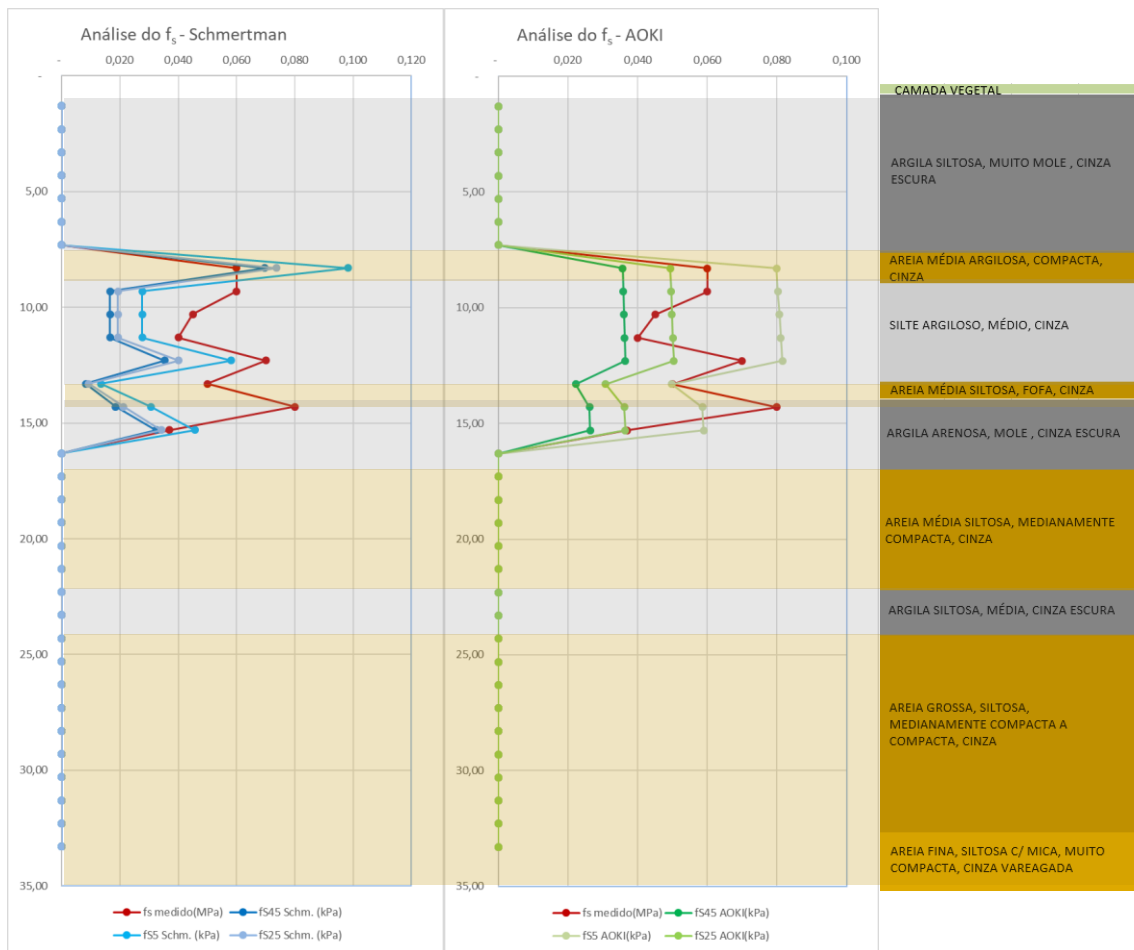


Figura B.77: Comparação das estimativas de resistência unitária de atrito lateral (f_s) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT334 e CPTU334.

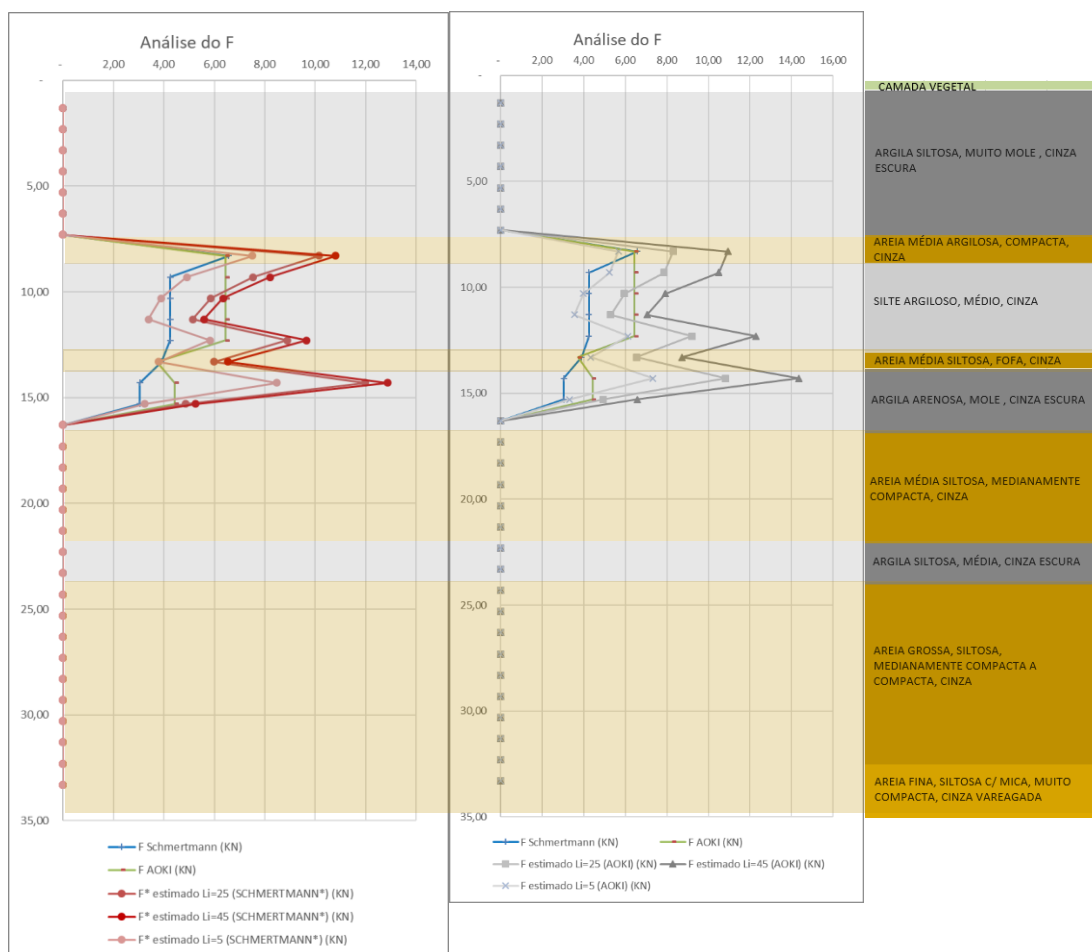


Figura B.78: Comparação das resistência estática (F) calculadas pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores “medidos” estimados através do CPTU para as áreas do amostrador SPT consideradas por Schmertmann (1979), em vermelho, e Aoki (2013) em cinza - SPT334 e CPTU334.

xxvii. SPT118 e CPTU118

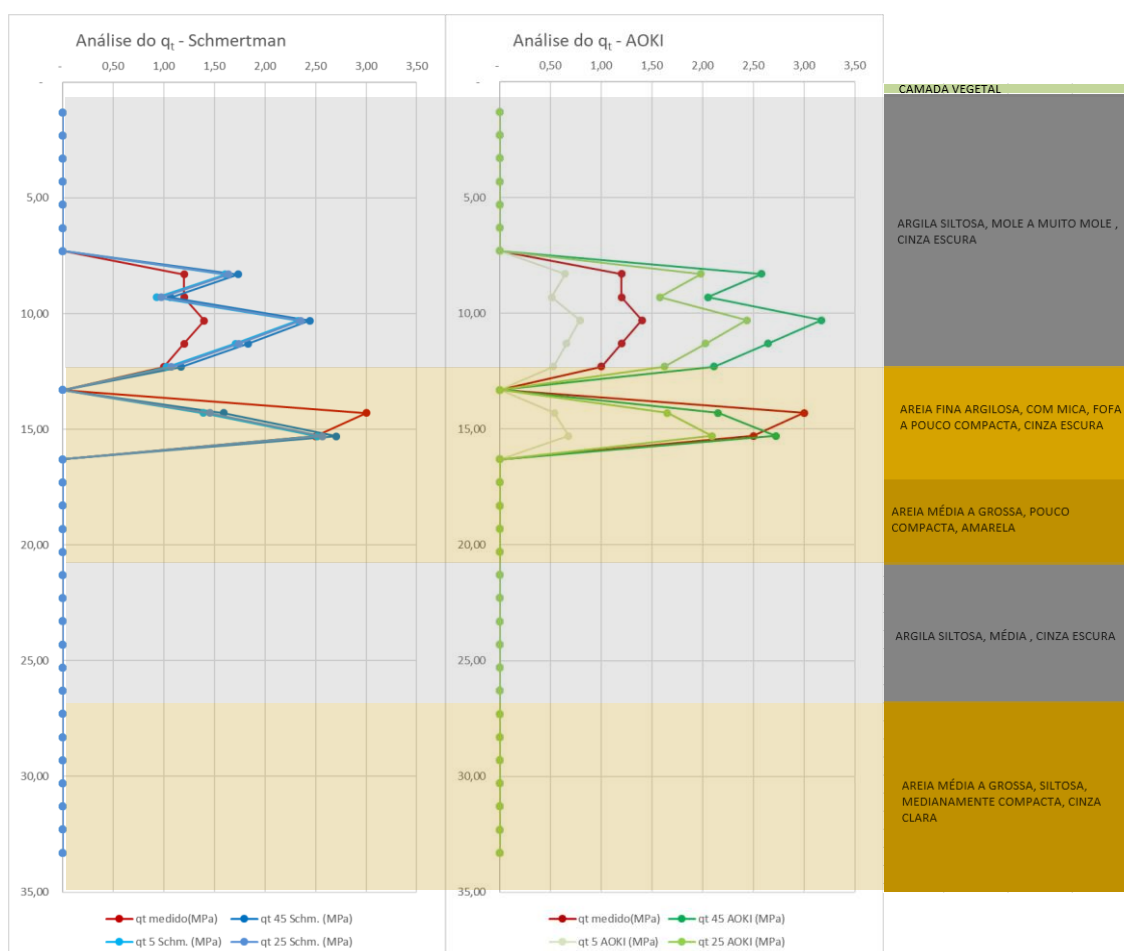


Figura B.79: Comparação das estimativas de resistência unitária de ponta (q_c) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT118 e CPTU118.

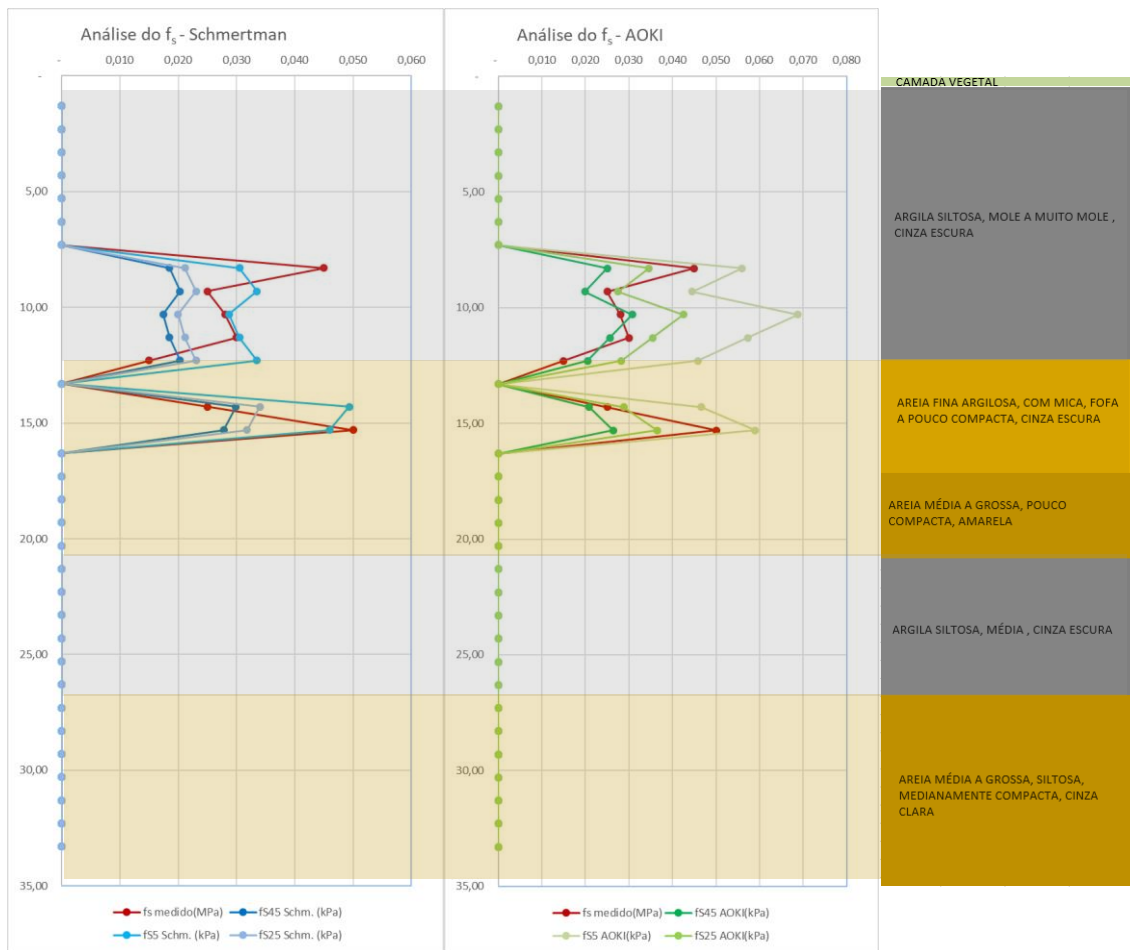


Figura B.80: Comparação das estimativas de resistência unitária de atrito lateral (f_s) para diferentes comprimentos de bucha pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores medidos por CPTU, em vermelho – SPT118 e CPTU118.

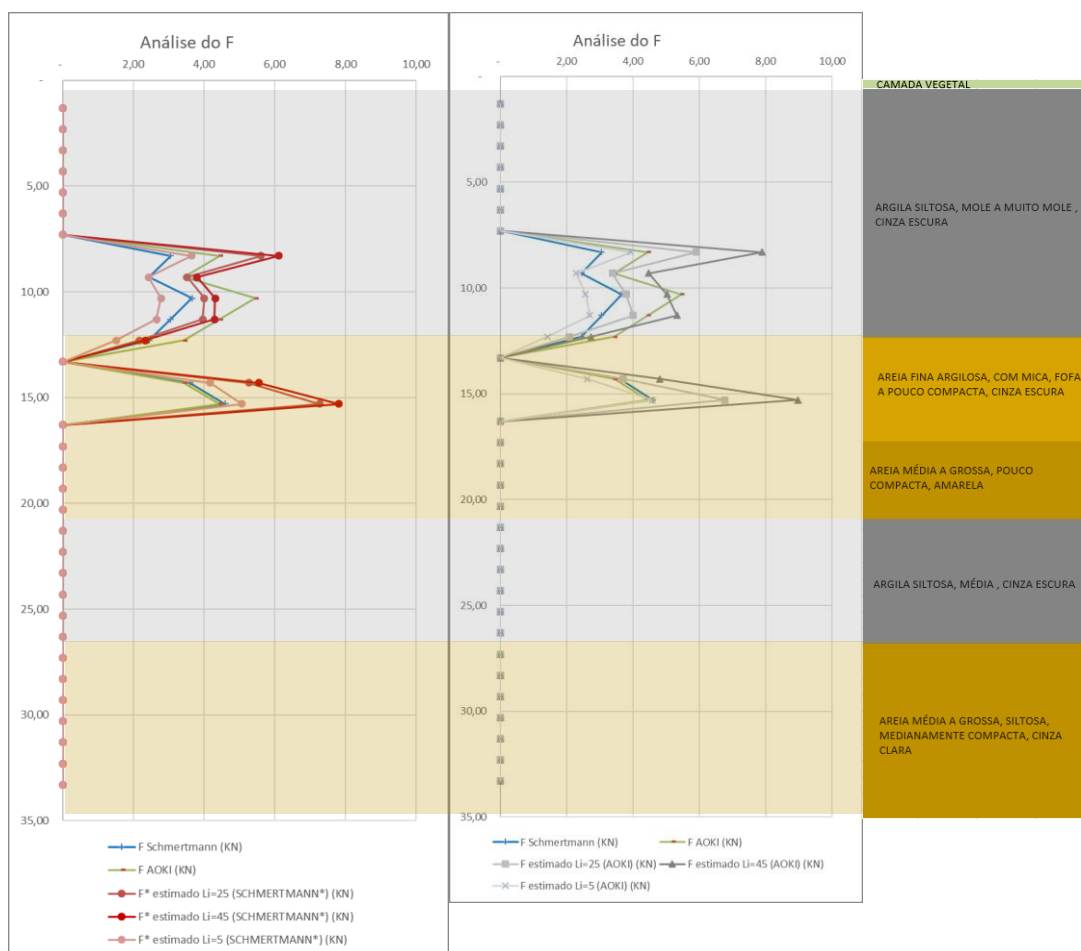


Figura B.81: Comparação das resistências estáticas (F) calculadas pelo método de Schmertmann (1979), em azul, e Aoki (2013), em verde, com os valores “medidos” estimados através do CPTU para as áreas do amostrador SPT consideradas por Schmertmann (1979), em vermelho, e Aoki (2013) em cinza - SPT118 e CPTU118.