Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso
Campus Cuiabá - Cel.Octayde Jorge da Silva
Departamento de Área da Construção Civil
Curso Superior de Tecnologia em Construção de Edifícios

Cuiabá 21 de setembro de 2020

Ensaio Geotécnico de Campo

Figueiredo, L. C.

Ensaio CPT
Primeira Parte

Luiz Carlos de Figueiredo[1]

[1]Professor do IFMT, Campus Cuiabá - Cel. Octayde Jorge da Silva

Sumário

1 Introdução **9**

1.1 Trajetória histórica . . . 9
1.2 Medições no CPT . . . 13
1.3 Aplicações do CPT . . . 14
1.4 Vantagens e desvantagens do CPT . . . 15
1.5 Retiradas de amostras com o CPT . . . 15
1.6 Procedimentos de Ensaio . . . 15
1.7 Tipos básicos de CPT para caracterização local . . . 16

2 Uma comparação indispensável com o SPT **18**

2.1 Perfil do subsolo . . . 18
2.2 Dificuldades do ensaio SPT *versus* CPT . . . 19
2.3 Estratificação e o problema dos ensaios de consolidação . . . 19

3 Equipamentos do CPT **20**

3.1 Cones do CPT . . . 21
3.1.1 Tamanho padrão do CPT . . . 21
3.1.2 Outros tamanhos de cone CPT . . . 22
3.1.3 Elementos filtrantes . . . 24
3.1.4 Leituras da ponta e luva . . . 24
3.1.5 Correção das leituras de ponta e luva do cone CPT . . . 25
3.2 Sensores e módulos adicionais do CPT . . . 27
3.3 Equipamentos de empuxo ou empurrar . . . 28

4 Características do ensaio **31**

4.1 Profundidade de penetração da sondagem . . . 31
4.2 Pré-perfuração . . . 31
4.3 Verticalidade . . . 32
4.4 Medições de Referência . . . 32
4.5 Taxa de penetração . . . 32
4.6 Intervalo de leituras . . . 32
4.7 Saturação do piezocone . . . 32
4.8 Testes de Dissipação . . . 33
4.9 Normalização de Dados da Dissipação . . . 33
4.10 Calibrações e manutenção do CPT . . . 34
4.11 Medida da onda de cisalhamento . . . 35
4.12 Fechamento de furo . . . 36

5 Apresentação de dados do CPT **37**

5.1 Perfil Geoestratigráfico . . . 38
5.2 Tipos de solos de acordo com a interpretação visual dos dados de CPT . . . 38

5.3 Classificação comportamental do solo 39
5.4 Procedimentos alternativos de normalização de leituras de CPT 42

Lista de Figuras

1 Melhoria do cone holandês 10
2 Luva Begemann 10
3 Primeira classificação de solos baseda no CPT feita por Begemann 11
4 Detalhe da ponta, originalmente, (ISSMFE, 1989) 11
5 Detalhe da ponta do cone holandês, (ISSMFE,1989) 12
6 Luva de atrito na ponta do CPT, (ISSMFE, 1989) 12
7 Visão geral de um CPT montado em caminhão 13
8 Detalhe da ponta do CPT. 14
9 Amostrador Mostap para retirada de amostras de solo, (ROBERTSON; CABAL, 2015). 16
10 Comparativo de perfil entre CPT e SPT, (MAYNE, 2007) 18
11 Perfil de susolo desenvolvido por uma matriz de CPT's (ROBERTSON; CABAL, 2015) 20
12 Faixa de cones de CPT: 2 cm2, 10 cm2, 15 cm2 e 40 cm2, (P K Robertson & Cabal, 2015) 21
13 Dimensões padronizadas do CPT,(DERUITER, 1971) 22
14 Penetrômetros da Fugro 23
15 Penetrômetros van den Berg 23
16 Penetrômetro da Georgia Tech 24
17 Posição dos elementos filtrantes, (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012) 24
18 Determinação da resistência total de ponta e do atrito lateral (JAMIOLKOWKI, 1988) 26
19 Calibração do CPT - resultados do ensaio triaxial 27
20 Esquema de CPT Piezocone, (P K Robertson & Cabal, 2015) 28
21 Unidade de CPT Piezocone (200 kN) montada em caminhão, (P K Robertson & Cabal, 2015) 29
22 Unidade de CPT Piezocone (pequena) montada em esteira, (P K Robertson & Cabal, 2015) 29
23 Unidade de CPT Piezocone Portátil para acesso em espaço limitado, (P K Robertson & Cabal, 2015) 30
24 CPT embarcado em cais flutuante, (ROBERTSON; CABAL, 2015) 30
25 CPT para águas profundas, sistema Seafloor (ROBERTSON; CABAL, 2015) . . 30
26 Tipos de redutores de atrito mais comuns segundo (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012) 31
27 Exemplo de ensaio para determinara t_{50}, (ROBERTSON; CABAL, 2015) 33
28 Curvas de dissipação para diferentes localizações no cone, realizadas por C. I. Teh (1987). 34
29 Configuração e procedimento para pseudo-intervalo no Seismic Cone Testing (SCPT), (MAYNE, 2007). 35

30 Métodos de fechamento de furo: (a) Técnicas de preenchimento; (b) Retração do CPT com ponta descartável (LUTENEGGER; DEGROOT, 1995) 37
31 Métodos de fechamento de furo: (a) Invólucro temporário; (b) Rejuntamento através das portas no redutor de atrito (LUTENEGGER; DEGROOT, 1995) . . 37
32 Apresentação dos resultados do CPTu, mostrando (a) Resistência total da ponta do cone, (b) Fricção da manga, (c) Ombros Porewater Pressures, e (d) Razão de atrito (FR = Rf = fs / qt) com Depth em Steele, Missouri.(MAYNE, 2007). . . 38
33 Tipos de solos CPT- classificação simplificada, (ROBERTSON; CAMPANELLA; WIGHTMAN, 1983) 40
34 CPTU -classificação SBT por camadas, (CAMPANELLA; ROBERTSON; GILLESPIE, 1986) 41
35 Resultados de CPt classificados pelo índice I_c, (MAYNE, 2007) 42
36 Aplicação do método de probabilidade de Zhang e Tumay (1999) 43

Lista de Tabelas

1 **Vantagens e desvantagens do ensaio CPT** 15
2 Tipos básicos de CPT segundo Mayne (2007). 17
3 Sumário de verificações do ensaio CPT 35
4 Tipo de comportamento do solo (SBT) de acordo com o $*I_c$, (JEFFERIES; DAVIES, 1993) 42

Apresentação

Esta apostila não tem, por parte do autor,a intenção de apresentar qualquer novidade sobre o ensaio CPT. O objetivo deste material é ancorar a elucidação desse ensaio que, com o decorrer do tempo vem se popularizando no meio geotécnico, para os alunos de graduação da engenharia civil e controle de obras.

Foi feita uma ancoragem em três trabalhos: o livro *ENSAIOS de CAMPO e suas aplicações à Engenharia de Fundações* dos professores Fernando Schnaid e Edgar Odebrecht e os guias: *GUIDE TO CONE PENETRATION TESTING* fornecido pela *Gregg Drilling & Testing Inc.* dos professores P. K. Robertson e K. L. Cabal; e *Cone Penetration Testing State-of-Practice* do professor Paul W. Mayne. Além desses autores, outros foram consultados, bem como as normas correlatas ao CTP da IRTP/TC-16 da ISSMFE ASTM. Dezenas de artigos foram, também, citados, muitos disponíveis na web, gratuitamente.

São apresentados cinco seções cujos assuntos são: introdução, comparação com o SPT, equipamentos do CPT, características do ensaio CPT e apresentação de dados que compõe a primeira parte deste material. a segnda parte será sobre avaliações de parâmetros do solo com o uso do CPT e métodos de estimativa de capacidade de carga para fundações rasas e fundações profundas e por estacas com o CPT e métodos para modificação (melhoria) do solo.

Além dessa segunda parte, será feito um questionário para auxiliar o estudo do material. A minha recomendação é que aproveitem e indiquem os erros, muito comuns em traduções através do email: *lucafi13@gmail.com*.

Professor Figueiredo

1 Introdução

Por óbvio, as investigações de solo têm caráter local e é uma condição *sine qua non* para se ter um projeto de fundações com nenor número de incertezas e baixa probabilidade de riscos. Segundo Mayne (2007), citando Broms (1998), os métodos de perfuração rotativa existem há dois milênios e estão bem estabelecidos na prática geotécnica como um meio para estudar as condições do solo e da rocha (Broms & Flodin, 1988).

Embora as práticas de perfuração e amostragem possam ser adequadas, o trabalho é manual e demorado, com testes laboratoriais de acompanhamento, muitas vezes levando até quatro semanas para a conclusão dos resultados.

Para a exploração do solo, uma abordagem moderna e conveniente é oferecida pelo teste de penetração do cone (CPT) que consiste em empurrar um penetrômetro eletrônico instrumentado no solo e registrar várias medições continuamente com profundidade (Schmertmann, 1978; Campanella & Robertson, 1988; Briaud e Miran, 1992).

Segundo Meigh (2013), no CPT, Cone Penetration Test, um cone na extremidade de uma série de hastes é empurrado para o solo a uma taxa constante e são feitas medições contínuas ou intermitentes da resistência à penetração do cone. Se necessário, também são feitas medições do atrito lateral combinada à penetração do cone e da superfície externa das hastes ou da resistência de uma luva de superfície.

1.1 Trajetória histórica

De equipamento mecânico até o advento da equipagem do CPT com sensores eletrônicos, já temos um século. Um breve resumo é apresentado a seguir:

- As primeiras versões do CPT foram desenvolvidas por volta de 1917 pelas Ferrovias Estatais Suecas e, em seguida, pelas Ferrovias Dinamarquesas por volta de 1927.
- Em 1932,segundo Robertson e Cabal (2015) , citando Sanglerat (1972) , apareceu o primeiro CPT de ϕ 35 mm.
- Somente em 1934, na Holanda, o CPT foi introduzido, (BARENTSEN, 1936)).
- Em 1935, foi projetado o primeiro equipamento, ainda manual, para o avanço controlado do CPT pela *Delf Soils Mechanics Laboratory*, (MOLLE, 2005).
- O cone mecânico holandês original foi melhorado com a adição de uma parte cônica apenas acima do cone. O objetivo da geometria era evitar que o solo entre a lacuna entre o revestimento e as hastes internas. Os cones mecânicos holandeses básicos, mostrado na Figura 1, ainda estão em uso em algumas partes do mundo.
- Em 1953 Uma luva de atrito foi adicionada atrás do cone para incluir a medição do atrito local da luva mostrada na Figura 2, (BEGEMANN, 1953).As medições foram feitas a cada 20 cm (8 polegadas) e, pela primeira vez, a razão de atrito foi utilizada para classificar o tipo de solo (veja a Figura 3).

- Em 1965 a Fugro desenvolveu um cone elétrico, cuja forma e dimensões formaram a base para os cones modernos e para o estabelecimento de procedimentos pel International Reference Test (ASTM. As principais melhorias em relação ao cone mecânico penetrômetros foram:
  - Eliminação de leituras incorretas devido ao atrito entre as hastes internas e hastes externas e, também, peso das hastes internas.
  - ensaio contínuo com taxa contínua de penetração sem a necessidade para movimentos alternados de diferentes partes do penetrômetro e dos movimentos indesejáveis do solo influenciando na resistência do cone.
  - Medição elétrica mais simples e confiável da resistência da ponta do cone e resistência ao atrito da luvaa.

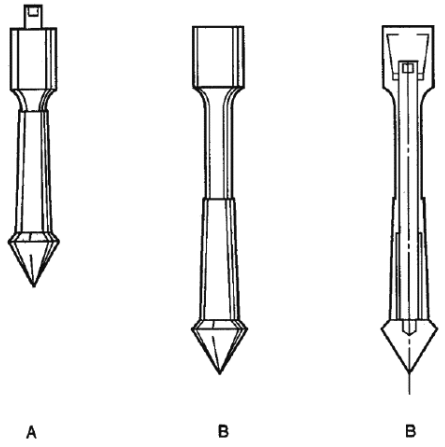


Figura 1: Melhoria do cone holandês

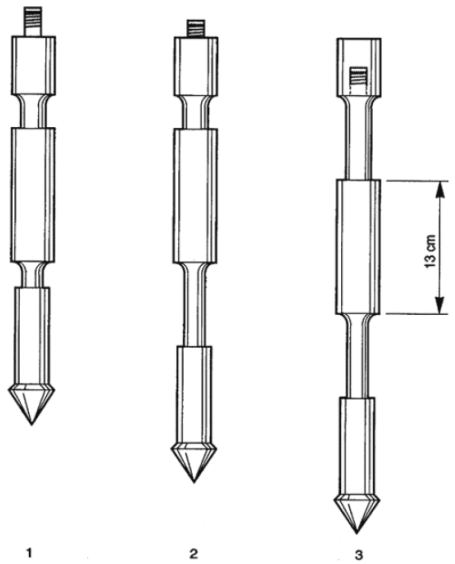


Figura 2: Luva Begemann

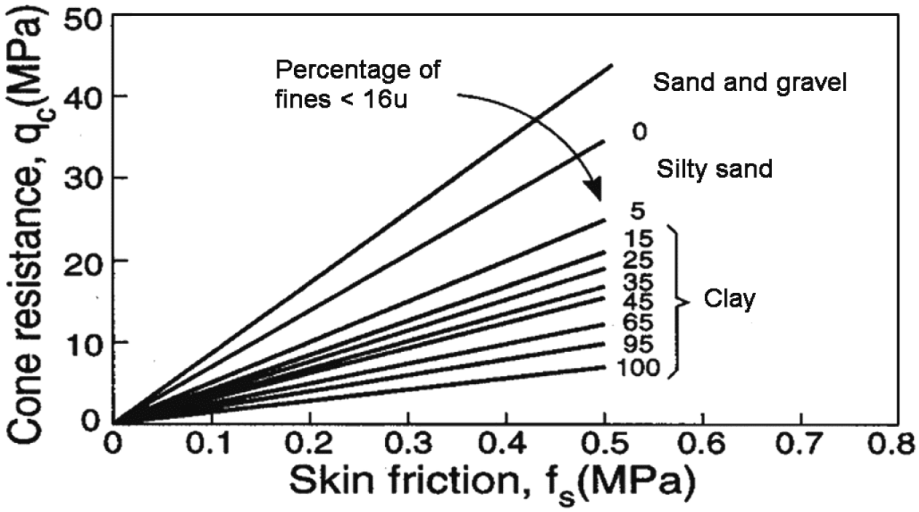


Figura 3: Primeira classificação de solos baseda no CPT feita por Begemann

Segundo Meigh (2013), o método tem sido denominado de teste de penetração estática, teste de penetração quase estática, teste de sondagem holandesa e sondagem profunda holandesa, e o termo "sondagem" ainda é usado com frequência.

O método foi particularmente adequado para a Holanda, onde o solo consiste principalmente de depósitos deltaicos, e foi usado pela primeira vez como um meio de determinar a capacidade de carga final de estacas cravadas fundadas em areia.

Inicialmente, o aparato consistia em um cone simples, mostrado na Figura 2. Depois se desenvolveu o cone holandês, mostrado na Figura 4, projetado de tal forma que se evita a entrada de partículas entre o "manto" e as hastes (VERMEIDEN, 1948).

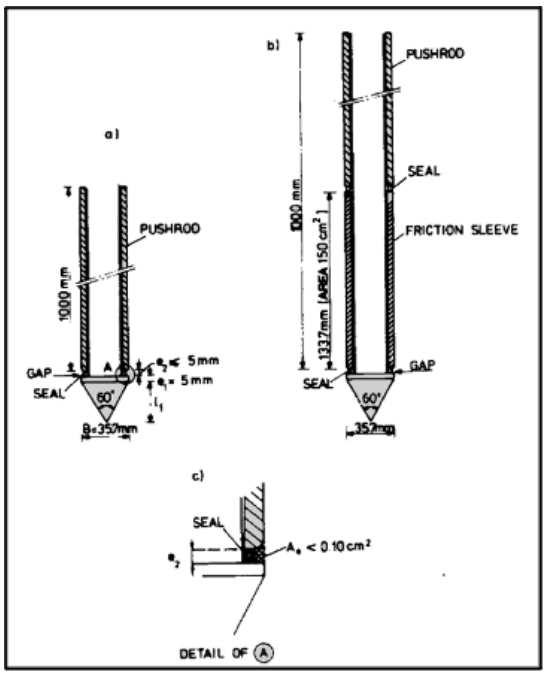


Figura 4: Detalhe da ponta, originalmente, (ISSMFE, 1989)

Na Indonésia, segundo Meigh (2013), foi introduzida uma luva ou manga de atrito, mostrada na Figura 5, de pequeno comprimento, acima do cone para medir o atrito lateral (Begemann, 1953).

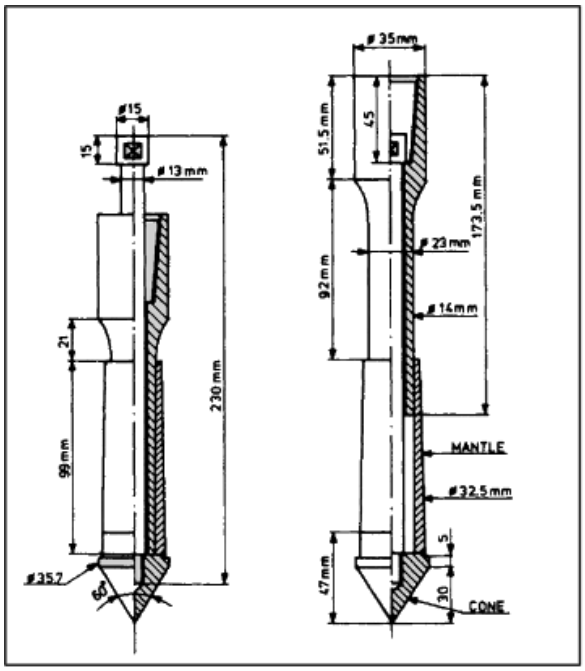


Figura 5: Detalhe da ponta do cone holandês, (ISSMFE,1989)

O penetrômetro elétrico, no qual a resistência do cone é medida por transdutores montados localizados imediatamente acima do cone e com o atrito lateral, medido de forma semelhante, foi introduzido pela primeira vez em 1948, mas só começou a ser utilizado no final dos anos 1960 (GEUZE, 1953; BEGEMANN, 1953), veja a Figura 6.

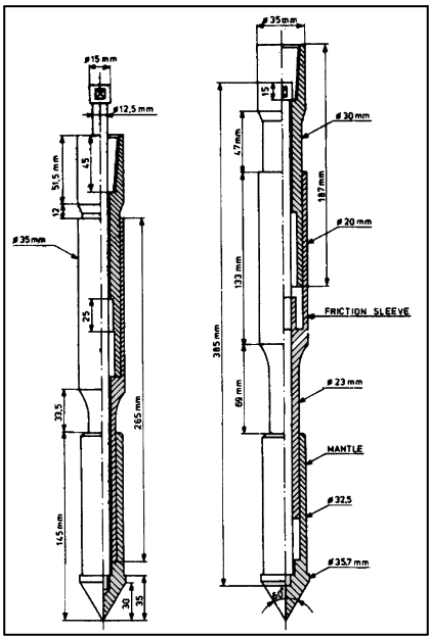


Figura 6: Luva de atrito na ponta do CPT, (ISSMFE, 1989)

Atualmente o CPT tem várias formas de equipamentos: caminhões, portáteis, offshore, em pequenos tratores com lagartas. De modo geral é transferida uma carga ou força do caminhão (massa $\times$ g), controlada hidraulicamente como mostrada na Figura 7.

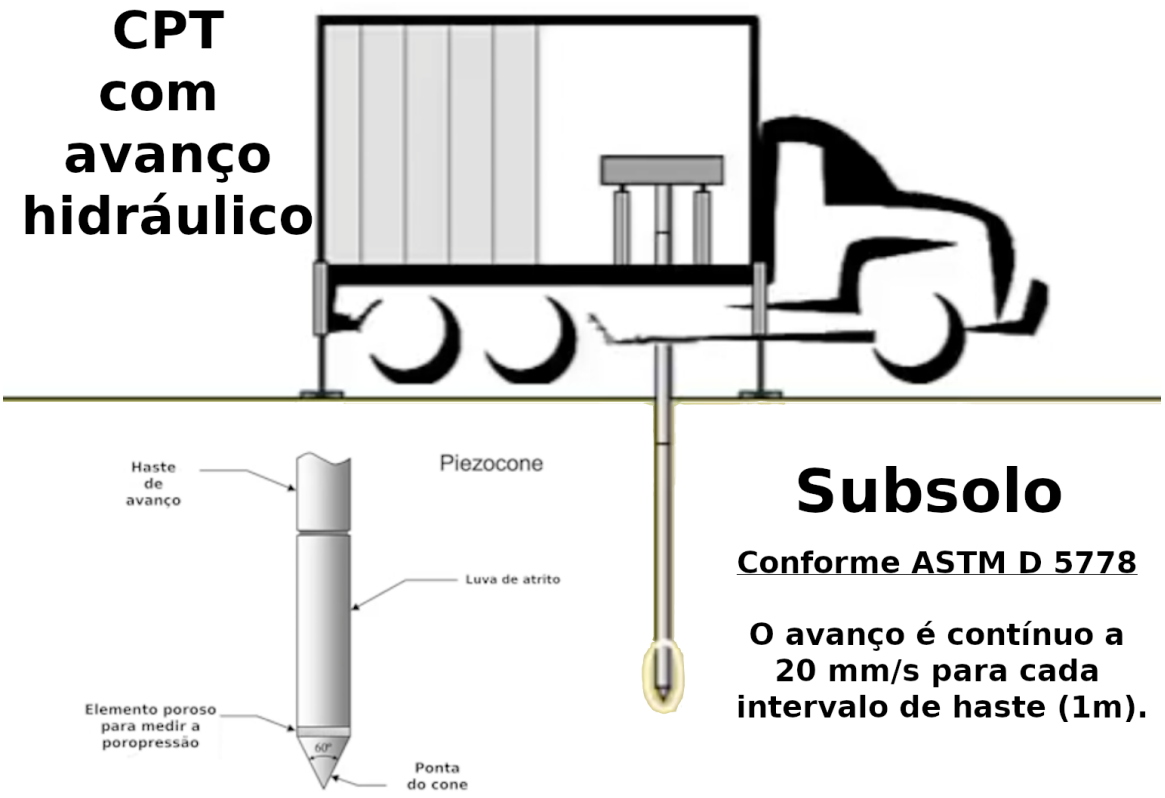


Figura 7: Visão geral de um CPT montado em caminhão

1.2 Medições no CPT

De acordo com os padrões ASTM (2000) e internacionais, três medições separadas de ponta resistência (q_c), atrito da luva (f_s) e poropressão (u) são obtidas com esse ensaio. O CPT tem versões aprimoradas, como o piezocone (CPTu) e sísmica (SCPT), têm extensas aplicações em uma ampla variedade de solos. Embora o CPT seja limitado principalmente a solos mais macios, com modernos equipamentos de empurrar grandes e cones mais robustos, o CPT pode ser realizado em solos rígidos a muito rígidos e, em alguns casos, em rocha mole. A Figura 8, simplifica o que é um CPT: uma luva de fricção ou atrito, um filtro de poropressão (U2), justapostos a um cone de ângulo de 60° na ponta.

Em certos casos, as leituras da ponta e da luva sozinhas podem ser suficientes para produzir uma sondagem que serve mutio bem para delinear a estratigrafia do solo e testar areias naturais, preenchimentos de areia e solos com lençóis freáticos profundos. Geralmente, isso é realizado usando um teste de penetração de cone elétrico (CPT) com leituras feitas a 2 cm ou 5 cm, embora seja um sistema para teste de penetração de cone mecânico (MCPT) também está disponível, o que é menos sujeito a danos, mas que é avançado mais lento e fornece reso-

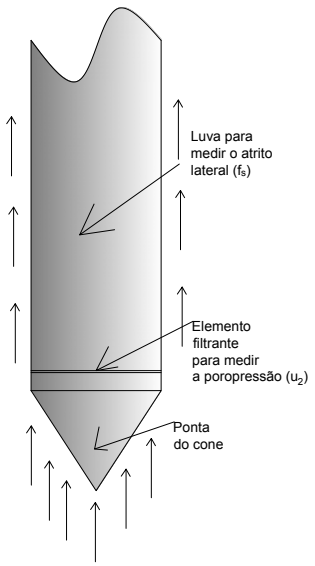


Figura 8: Detalhe da ponta do CPT.

luções usando um passo vertical incremental de intervalos de 20 cm. Com teste de penetração piezocone (CPTU), os transdutores obtêm leituras de pressões de penetração por água que são primordiais quando em solos saturados.

1.3 Aplicações do CPT

O CPT tem a três principais aplicações:

a) determinar o perfil do solo e identificar os tipos de solos presentes na sondagem;

b) interpolar as condições do solo entre os furos de controle; e

c) avaliar os parâmetros de engenharia dos solos e avaliar a capacidade de suporte e recalque.

Nesta terceira função, em relação a determinados problemas, a avaliação é essencialmente preliminar, a ser complementada por sondagens e por outros testes, quer in situ quer em laboratório. A este respeito, o CPT fornece orientação sobre a natureza de tais testes adicionais e ajuda a determinar as posições e níveis nos quais os testes in situ ou amostragem devem ser realizados. Segundo Meigh (2013), onde a geologia é bastante uniforme e as previsões baseadas nos resultados do CPT forem amplamente correlacionadas com o desempenho da construção (como em partes da Bélgica e da Holanda), o CPT pode ser usado sozinho na investigação de fundações de construção. Mesmo nessas circunstâncias, os CPTs podem ser acompanhados ou seguidos por perfurações por um ou mais dos seguintes motivos:

i) para auxiliar onde houver dificuldade na interpretação dos resultados do CPT;

ii) para investigar mais camadas com resistência de cone relativamente baixa; e

iii) para explorar abaixo da profundidade máxima atingível pelo CPT.

1.4 Vantagens e desvantagens do CPT

O Ensaio CPT e suas versões aprimoradas, como o piezocone (CPTu) e sísmica (SCPT), têm extensas aplicações para uma ampla variedade de solos. Embora o CPT seja limitado principalmente a solos moles, com modernos equipamentos de avanço e com cones mais robustos, o CPT pode ser realizado em solos rígidos a muito rígidos e, em alguns casos, em rocha mole. As vantagens e desvantagens do uso do CPT são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1: **Vantagens e desvantagens do ensaio CPT**

Vantagens	**Desvantagens**
Perfilamento rápido e contínuo	Investimento de capital relativamente alto
Dados repetíveis e confiáveis (não dependente do operador)	Requer operadores qualificados
Econômico e produtivo	Nenhuma amostra de solo, durante um ensaio CPT
Forte base teórica para interpretação	A penetração pode ser restrita em camadas de cascalho e cimentações

1.5 Retiradas de amostras com o CPT

Sempre que houver possibilidade de se retirar amostras, devem ser feitas com os devidos testes de laboratório. Deve-se sempre investigar os níveis de água subterrânea e permeabilidade, sem negligenciar os casos em que de antemão espera-se encontrar contaminantes no solo. Apesar da restrição de retirada de amostra durante o ensaio, é possível coletar amostras a profundidades de interesse com o amostrador do MOSTAP, como mostrado na Figura 9.

Alternativamente, também pode-se adaptar uma sonda para perfurar concreções e isso permite que o CPT extraia dados em solos que apresentam esse tipo de formação, especialmente os planaltos tropicais.

1.6 Procedimentos de Ensaio

Segundo Schnaid e Odebrecht (2012), princípio do ensaio de cone é bastante simples, consistindo da cravação, no terreno, de uma ponteira cônica (60° de ápice) a uma velocidade constante de 20 mm/s ± 5 mm/s. Os procedimentos de ensaio são padronizados; os equipamentos, porém, podem ser classificados em três categorias:

a) cone mecânico, caracterizado pela medida, na superfície, via transferência mecânica das hastes, dos esforços necessários para cravar a ponta cônica qc e do atrito lateral f_s;

b) cone elétrico, cuja adaptação de células de carga instrumentadas eletricamente permite a medida de qc e fs diretamente na ponteira; e

c) piezocone, que, além das medidas elétricas de q_c e f_s, permite a contínua monitoração das pressões neutras u geradas durante o processo de cravação.

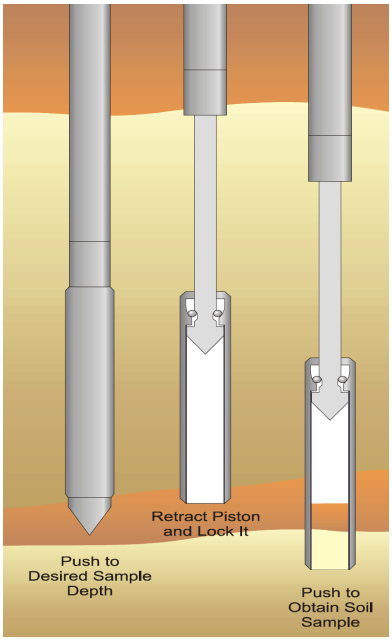


Figura 9: Amostrador Mostap para retirada de amostras de solo, (ROBERTSON; CABAL, 2015).

Durante o processo de cravação não há interferência do operador. Para tanto, é utilizado um gatilho entre a haste de cravação e o pistão hidráulico de modo a fechar um circuito elétrico com o início da cravação e concomitantemente ao registro de sinais. Em geral uma ponta de CPT constitui-se da parte mecânica em aço de grande resistência que incorpora células de carga para medirem a resistência de ponta (qc) e o atrito lateral na luva (fs), transdutor de pressão e elemento poroso.

Esse equipamento fornece uma estratigrafia do subsolo, detalhada, além do registro contínuo de resistência de ponta (q_c), atrito lateral (f_s) e poropressão (u). Não há dúvida que a estratigrafia e o registro contínuo dos parâmetros comentados são os atrativos do ensaio CPT.

1.7 Tipos básicos de CPT para caracterização local

Segundo Mayne (2007), em certos casos, as leituras da ponta e luva são suficientes para produzir uma sondagem que serve bem para delinear a estratigrafia do solo e testar areias naturais e estratos de areia e ainda solos com lençóis freáticos profundos. Geralmente, isso é realizado usando um teste de penetração de cone elétrico (ECPT) com leituras feitas a 2 cm ou 5 cm, embora seja comum o uso do CPT mecânico (MCPT), o que é menos sujeito a danos, mas que cujo avanço é mais lento e fornece resoluções usando um passo vertical incremental de intervalos de 20 cm.

Os ensaios piezocone(CPTU), os transdutores obtêm leituras de poropressões que são fundamentais quando as condições do subsolo apresentam águas subterrâneas rasas e solos de granulação fina consistindo de argilas, sedimentos e areias finas.

As pressões da poropressão na posição do "ombro"do cone são necessárias para corrigir a medida de q_c para a resistência total da ponta do cone, designada q_t. Isso é especialmente importante na fase do pós-processamento ao determinar os parâmetros de engenharia geotéc-

nica, por exemplo, tensão de pré-consolidação $\sigma_p^{'}$, resistência ao cisalhamento não drenada (S_u), coeficiente de empuxo, K_0, atrito lateral, f_p, etc.

Sensores adicionais podem ser fornecidos para aumentar o número e os tipos de medições realizadas, com a Tabela 2 fornecendo um resumo dos vários tipos de CPT comumente disponíveis.

Tabela 2: Tipos básicos de CPT segundo Mayne (2007).

Tipos	**Acrônimo**	**Medidas**	**Aplicações**
CPT Mecânico	MCPT	q_c e f_s a cada 20 cm.	Perfis, areia natural e solo duro
CPT elétrico	ECPT	q_c e f_s a cada 5 cm.	Solos acima do NA, areias naturais
Piezocone	CPTu	q_s e f_s tomados na face u_1 ou u_2 no "ombro"do cone com intervalos de de 1 a 5 cm.	Todos os tipos de solos; requer correnão de q_c e f_s
PIezocone com dissipação	CPTù	Mesmo que CPTu com tempos de leitura para u_1 e u_2, durante o decaimento	Nomemalmente com até 50% de dissipação em sites e argilas.
CPT Sísmico	SCPTu	O mesmo que o CPTu com medida de tensão de cisalhamento a cadametro.	Fornece o módulo de rigidez do solo com a profundidade.
CPT Resistivo	RCPTu	O mesmo que o CPTu com medida de condutividade ou resistividade elétrica	Detecta lençol d'água e contaminantes.

Reitera-se que com o CPT, os resultados ficam imediatamente disponíveis no computador para avaliação em tempo real pelo tecnólogo, engenheiro ou geólogo. Uma sondagem de 10 m pode ser concluída em cerca de 15 a 20 minutos, em comparação com uma perfuração de solo convencional que pode demorar entre 1 a 1 hora e meia.

Nenhum descarte é gerado durante o CPT, assim, o método é menos perturbador do que as operações de perfuração. Portanto, os CPTs são especialmente vantajoso ao investigar áreas ambientalmente sensíveis e ou locais potencialmente contaminados, na medida que os trabalhadores estão expostos a uma quantidade mínima de materiais perigosos. Os ensaios de penetração do cone podem ser realizados na maioria dos tipos de solo, desde argilas moles e sedimentos firmes até areias densas e duras, argilas super consolidadas, mas não são adequadas para pedregulhos, pedras ou terrenos de rocha dura.

Embora essa vantagem do tempo, as amostras de solos não são normalmente obtidas durante o CPT de rotina, portanto, pode ser uma desvantagem para aqueles que confiam estritamente em testes de laboratório para especificações e requisitos de código regional. No entanto, uma grande quantidade de dados digitais *in situ* de alta qualidade podem ser registrados diretamente pelo CPT em um período de tempo relativamente curto em campo. Esses dados podem ser posteriormente pós-processados para fornecer delineamentos rápido das condições do subsolo

incluindo camadas, tipos de solo e parâmetros de engenharia geotécnica, bem como avaliações diretas indiretas de sistemas de fundação, incluindo fundações rasas, estacas conduzidas, poços perfurados e modificação do solo.

2 Uma comparação indispensável com o SPT

Invariavelmente qualquer ensaio de penetração é comparado ao do *Standard Penetration Test*, o SPT. Por ser este o ensaio de sondagem de susolo mais empregado no mundo, é quase uma obrigatoriedade a correlação de qualquer medida de resistência do solo com o SPT. Segundo Lobo (2005, 2009) o ensaio SPT é reconhecidamente o sistema de sondagem mais utilizado no mundo. Podem-se citar vários países como o Brasil e toda a América Latina, os Estados Unidos, Canadá, Reino Unido, Japão, Austrália, Espanha, Portugal, etc em que este ensaio é usado rotineiramente. Características como simplicidade e robustez, aliado ao seu baixo custo e a experiência empírica acumulada na execução e na aplicação dos resultados, tornam esta sondagem uma ferramenta indispensável à prática de engenharia.

2.1 Perfil do subsolo

Como um complemento (ou em alguns casos, como uma substituição para) perfurações no solo com valores SPT-N, o CPT pode fornecer informações semelhantes sobre a estratigrafia de subsuperfície, camadas do solo e consistência. A Figura 10 mostra uma comparação lado a lado de um perfil de resistência de ponto CPT elétrico (q_c) com um perfil de perfuração derivado de dois furos adjacentes com resistências SPT (valores N) no centro de Memphis, Tenessee, EUA. Como se observa, o CPT tem natureza contínua, enquanto no SPT a resistência à penetração é discreta de metro em metro.

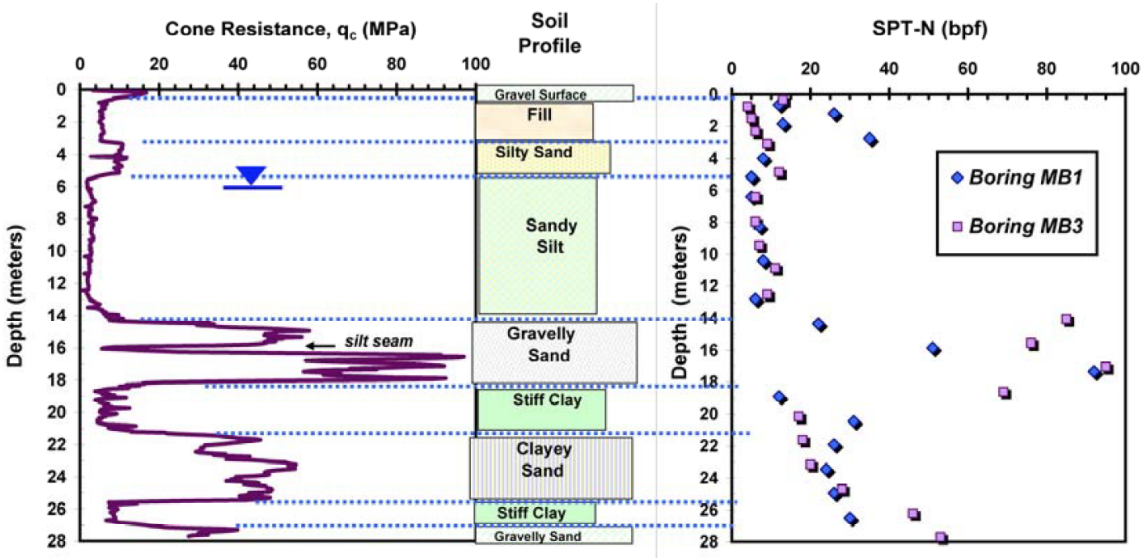


Figura 10: Comparativo de perfil entre CPT e SPT, (MAYNE, 2007)

2.2 Dificuldades do ensaio SPT *versus* CPT

Uma série de dificuldades são agora reconhecidas com as práticas de perfuração de rotina de SPT na obtenção de valores de ensaio de campo, como a exemplo de amostras que são obtidas sob a condição de amolgamento dinâmico, posto que o solo é empurrado para dentro do amostrador (TANAKA, 1999; SCHMERTMANN, 1978).

De acordo com o procedimentos ASTM D 1586 (ASTM, 1984) para o "Ensaio de penetração padrão (SPT)". O registro de número de golpes para acionar o amostrador de 0,3 metros (12 polegadas) é denominado "valor N", "contagem de golpes"ou "Índice de Resistência ao SPT". É bem conhecido que este valor de N pode ser severamente afetado por ineficiências de energia no sistema de queda do martelo, bem como influências adicionais, como diâmetro furo, sistema de martelo, comprimento da haste e outros fatores (FLETCHER, 1965; IRELAND; MORETTO; VARGAS, 1970). Os valores N_{SPT} exigem correções significativas nas medições de campo, ants de serem utilizados em projetos geotécnicos (ROBERTSON; CAMPANELLA; WIGHTMAN, 1983; SKEMPTON, 1986)

Além disso, permanece considerável incerteza na correção adequada dos valores N_{SPT} e, ainda, a repetibilidade dos SPT's usando diferentes equipamentos e perfuradores permanecem um problema (KULHAWY; MAYNE, 1990; ANDERSON; TOWSEND; HORTA, 2004).

2.3 Estratificação e o problema dos ensaios de consolidação

Se a geoestratificação em um local for o objetivo principal da investigação do local, então as sondagens CPT podem ser prontamente utilizadas para detalhar os estratos ao longo do alinhamento, por exemplo de uma rodovia. As variações tanto verticalmente quanto lateralmente podem ser rapidamente determinadas usando a resistência da ponta do cone. A Figura 11 mostra um exemplo de subsuperfície perfil desenvolvido a partir de perfis CPT q_c. As espessuras de argila compressível macia e camadas de silte podem ser mapeadas sobre a região e esta informação é útil para determinar os assentamentos de aterros e fundações rasas, bem como os comprimentos necessários de fundações de estacas cravadas ou perfuradas para o projeto.

Uma vez que os solos são materiais muito complexos e diversos dentro de um ambiente geológico natural, a confiança no SPT por si só pode levar a simplificações excessivas significativas na previsão do verdadeiro comportamento do solo. No entanto, um número de empresas geotécnicas e departamentos de rodovias dependem de SPT's para sondagens de solo como sua principal fonte de dados para projeto de pontes, paredes de contenção e estradas. Uma vantagem clara do CPT é sua capacidade de fornecer três medições independentes e simultâneas. Sensores adicionais estão disponíveis para produzir até quatro ou cinco leituras diretas com profundidade para verificar uma avaliação mais realista do comportamento do solo.

Durante as operações de perfuração de rotina na América do Norte, é prática padrão obter amostras "usando tubos de parede fina (tipo Shelby) que mais tarde pode ser usado para fornecer amostras menores para testes de laboratório de "alta qualidade", como cisalhamento triaxial, unidimensional testes de consolidação, permeabilidade, cisalhamento direto ou coluna ressonante.

No entanto, agora é bem reconhecido que "amostras não perturbadas"são muito difíceis de obter com este amostrador de tubo simples. Métodos para corrigir ensaios de laboratório para os efeitos de perturbação da amostra incluem uma fase de consolidação-descarga (por exemplo, Ladd, 1991) ou fase de reconsolidação (DeGroot & Sandven, 2004), os quais aumentam os tempos de teste de laboratório e muito mais procedimentos elaborados.

Em contraste, o CPT obtém medições diretamente no solo enquanto ainda está em seu ambientes naturais, oferecendo assim uma avaliação direta da resposta comportamental do solo ao carregamento. Talvez o melhor abordagem é aquela baseada em uma combinação de sondagens CPT rápidas para verificar as camadas fracas e zonas problemáticas, seguidas por operações de perfuração rotativa para obter amostras de solo para exame e laboratório testando.

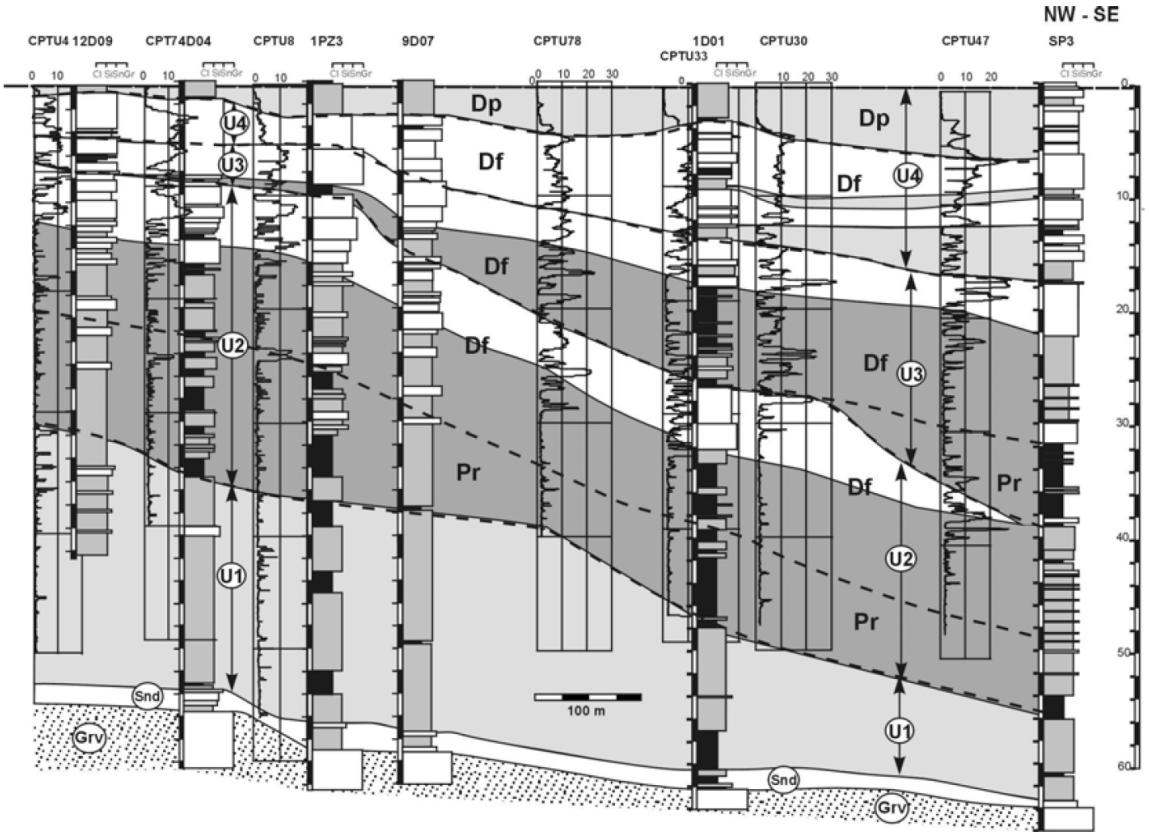


Figura 11: Perfil de susolo desenvolvido por uma matriz de CPT's (ROBERTSON; CABAL, 2015)

3 Equipamentos do CPT

Os CPT's são equipamentos com diversas partes identificáveis e arranjadas de modo a servir aos diversos propósitos de sondagens. De modo expedito tem-se:

a) pontas ou cones;

b) sensores e módulos adicionais; e

c) equipamentos de empuxo ou para empurrar a sonda;

3.1 Cones do CPT

Os CPT's têm uma variedade de tamanhos com as pontas de 10 cm2 a 15 cm2, as mais comuns. A Figura 6 mostra uma série de cones desde um minicone de 2 cm2 a um cone de 40 cm2. Os minicones são usados para investigações superficiais, enquanto os cones grandes podem ser usados em solos granulares, com a devida experimentação, antes, de um cone sem aparato eletrônico

Figura 12: Faixa de cones de CPT: 2 cm2, 10 cm2, 15 cm2 e 40 cm2, (P K Robertson & Cabal, 2015)

3.1.1 Tamanho padrão do CPT

O CPT padrão consiste de uma ponta de aço instrumentada com três canais de de captura eletrônica que medem

i - a tensão na ponta do cone q_c;

ii- o atrito lateral no corpo ou luva do cone f_s; e

iii- a poropressão (u)

A extremidade do cone consiste de uma pequena ponta cônica com ângulo de 60° de vértice, com uma pequena saliência de aproximadamente 5 mm na parte superior. A rugosidade da superfície do cone CPT não pode ser superior a $5\mu m$ e da luva $0,4\mu m$ a $0,25\mu m$, na direção longitudinal. Os CPT's são normalmente disponíveis em dois tamanhos padronizados:

- 35,7 mm de diâmetro, cuja seção transversal corresponde a $10cm^2$ e área lateral de $200cm^2$; e
- 44 mm de diâmetro, com seção transversal de $15cm^2$ e área lateral de $300cm^2$.

Comercialmente o segundo tamanho é muto utilizado dado a su robustez e facilidade de agregar sensores; o diâmetro maior favorece a diminuição do atrito lateral das hastes durante o avanço do CPT. As hastes para ambos os diâmetros de cone são de $35,7\ mm$. A Figure 13 mostra os estilos básicos de penetrômetros CPT, rotineiramente utilizados (DERUITER, 1971).

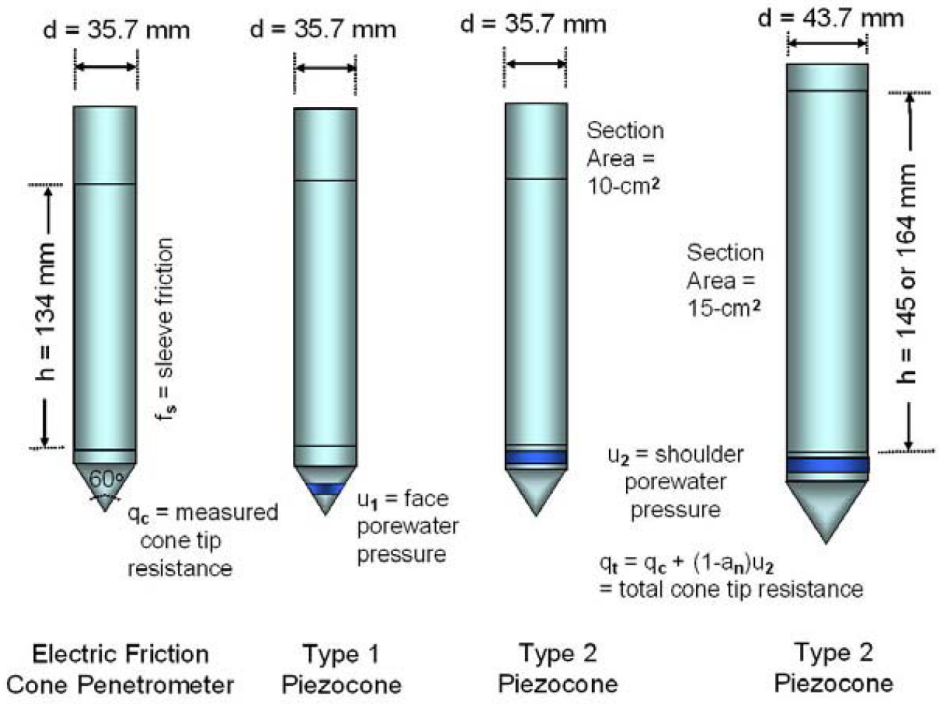


Figura 13: Dimensões padronizadas do CPT,(DERUITER, 1971)

3.1.2 Outros tamanhos de cone CPT

Em situações especiais, nas quais a miniaturização é necessária, por exemplo em calibrações de câmaras, centrífugas, experimentos em laboratórios *in door* é necessário que o cone do CPT seja menor que o padrão, neste caso há diâmetros de 5 a 1 cm^2, oferecidos comercialmente

(TUMAY; KURUP; BOGGESS, 1998). Para solos pedregulhosos já existe ponteiras de 33 e 40 cm^2. As figuras 14, 15 e 16 apresentam uma seleção de penetrômetros CPT, a maioria com seção de $10cm^2$, alguns com sensores sísmicos, de vídeo ou resistividade.

Figura 14: Penetrômetros da Fugro

Figura 15: Penetrômetros van den Berg

Especificações, tolerâncias, dimensões, requisitos das células de carga para os CPT's elétricos são regulamentados em diversas normas a exemplo do TC-16 da ISSMFE (1989) e ASTM D 5778 (2000). Para os antigos CPT's mecânicos há a norms ASTM D 3441. A maioria dos penetrômetros são construídos como ferramentas em aço usinado. Periodicamente, a ponta e a luva devem ser trocadas devido ao desgaste ou danos. Troca-se o elemento filtrante a cada

Figura 16: Penetrômetro da Georgia Tech

sondagem bem como os anéis o-ring. Existe no mercado elementos de vedação reutulizáveis feitos de metal ou cerâmica. Esses anéis devem ser limpos em banhos ultrassônicos.

3.1.3 Elementos filtrantes

A recomendação da *International Reference Testing Procedure* -IRTP, deve ser posicionada entre a ponta e a luva (U_2). Pode ser colocado elementos filtrantes na ponta cônica (U_1) e no corpo da luva (U_3). A Figura mostra s poições dos elementos filtrantes.

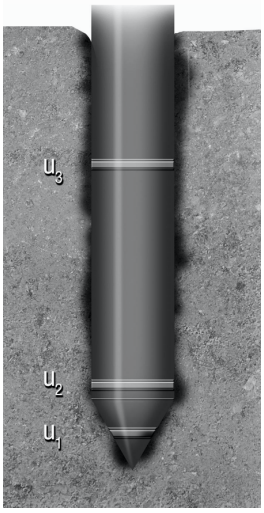


Figura 17: Posição dos elementos filtrantes, (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012)

3.1.4 Leituras da ponta e luva

A medida da força axial (F_c) difidida pela área da ponta (A_c) dá a medida de resistência de ponta (q_c). Essa tensão deve ser corrigida devido a atuação, de modo desigual, da poropressão

no solo nas áreas do cone do CPT. Isso é especialmente importante em solos moles para argilas intactas e duras e siltes (JAMIOLKOWKI, 1988; CAMPANELLA; ROBERTSON, 1988; LUNNE; ROBERTSON; POWELL, 1997). A Equação 1 traduz a resistência de ponta sem correção

$$q_c = \frac{F_c}{A_c} \tag{1}$$

A correção da tensão da ponta ou a resistência total da ponta é designada como q_t e requer dois pré-requisitos

- calibração do penetrômetro em uma câmara triaxial para determinar a área líquida (an);
- medida da poropressão no campo, na posição u_2, como ilustrado na Figura 18.

A resistência total da ponta é, então determinada como na Equação dois.

$$q_t = q_c + (1 - an)u_2 \tag{2}$$

A medida da força axial medida na luva (F_s), dividida pela área da luva do cone CPT (A_s), resulta no atrito lateral (f_s) que também, deve ser corrigido. Isso requer a colocação de dois elementos filtrantes. Em areias limpas é dispensável a correção, contudo em solos finos, argilosos e siltosos, a poropressão pode induzir a medidadas erradas de 20% a 70%, segundo Lunne et al. A Equação 3 mostra a medida do atrito lateral sem correção. (1986).

$$f_s = \frac{F_s}{A_s} \tag{3}$$

3.1.5 Correção das leituras de ponta e luva do cone CPT

A correção é extremamente importante para os dados do CPT. Sem a correção os dados paramétricos oriundos do CPT não são confiáveis (MAYNE, 2007). Com foco na Figura 18 pode-se deduzir as correções da resistência de ponta e atrito na luva do CPT, observa-se que a correção da resistência da ponta é dada pela Equação 2. A Equação 4, para o atrito total na luva é mostrada, a seguir:

Correção do atrito na luva

$$f_t = f_s - \left(\frac{\pi d_2 t_2 U_2 + \pi d_3 t_3 U_3}{\pi d_c h_s}\right) \tag{4}$$

onde
f_t = atrito total na luva;
f_s = atrito medido na luva;
d_2 = diâmetro da cavida interna da parte inferior do cone CPT;
d_3 = diâmetro da cavida interna da parte superior do cone CPT;
d_c = diâmetro externo da luva do CPT;
h_s = altura da luva;
t_2 = altura como mostrada na Figura 18;

t_3 = altura como mostrada na Figura 18;
U_2 = elemento filtrante na base da luva;
U_3 = elemento filtrante no topo da luva;

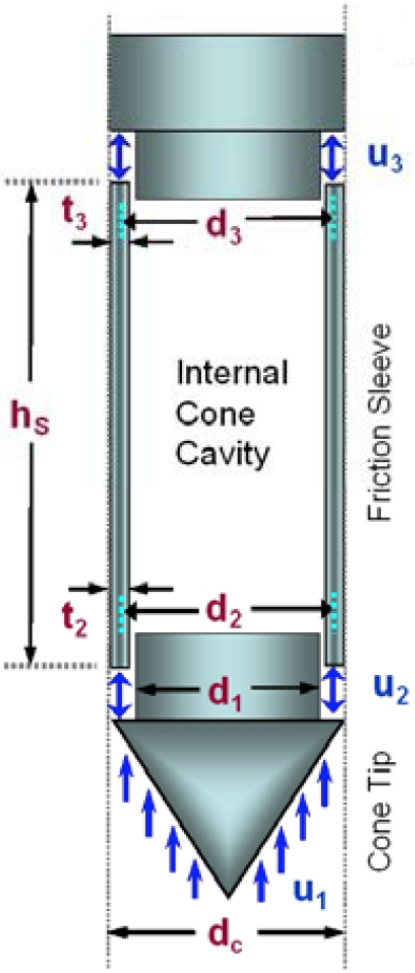


Figura 18: Determinação da resistência total de ponta e do atrito lateral (JAMIOLKOWKI, 1988)

Desse modo tem-se a Equação 5:

$$f_t \approx f_s - b_n U_2 \tag{5}$$

onde b_n = razão liquida do atrito medido no ensaio triaaxial.

Mayne (2007), apresenta um exemplo de calibração de um penetrômetro de cone (novo) dentro de uma câmara triaxial pressurizada. Todas as três leituras são apresentadas na Figura 19. Pode-se ver que o transdutor de poropressão fornece um a um correspondência com as pressões de câmara aplicadas, indicando assim uma excelente resposta (observe a linha de melhor ajuste da regressão mostrada).

A resistência da ponta do cone não corrigida (q_c) mostra significativamente menos resposta, com um razão de área líquida correspondente $an = 0,58$ para este penetrômetro específico. Também é mostrada a resposta do leitura da luva com pressão aplicada (conceitualmente, não deveria mostrar leituras). Uma correção de atrito fator (bn = 0,014) pode ser aplicado usando

as diretrizes fornecidas no padrão sueco CPTu (LUNNE; ROBERTSON; POWELL, 1997).

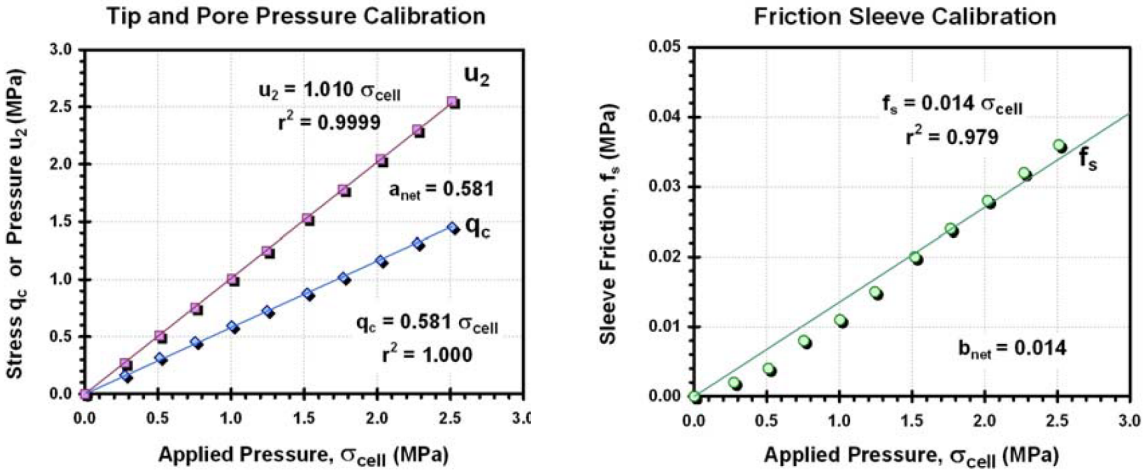


Figura 19: Calibração do CPT - resultados do ensaio triaxial

3.2 Sensores e módulos adicionais do CPT

Desde 1960, com a presença do CPT elétrico, uma gama de sensores tem sido adicionada ao penetrômetro em tela, destaque para os sensores listados a seguir:

1) Temperatura;

2) Geofones (sísmica);

3) Acelerômetros (velocidade da onda de tensão);

4) Pressurômetro (sensor de pressão);

5] Câmera (luz visível);

6) Radioisótopo (gama, neutron);

7) Resistividade e condutividade elétricas;

8) Dielétricos;

9) pH;

10) Troca de oxigênio (redox);

11) Laser e indutor fluorescente de ultravioleta (LHF/UVOST);

12) Membrana para a interface da ponta (MIP)

Um dos sensores adicionais mais comuns é um geofone ou acelerômetro que permitem a medição das velocidades das ondas sísmicas. As ondas sísmicas são importantes, a sua mensuração, em solos moles. Um esquema da sísmica é mostrado na Figura 20.

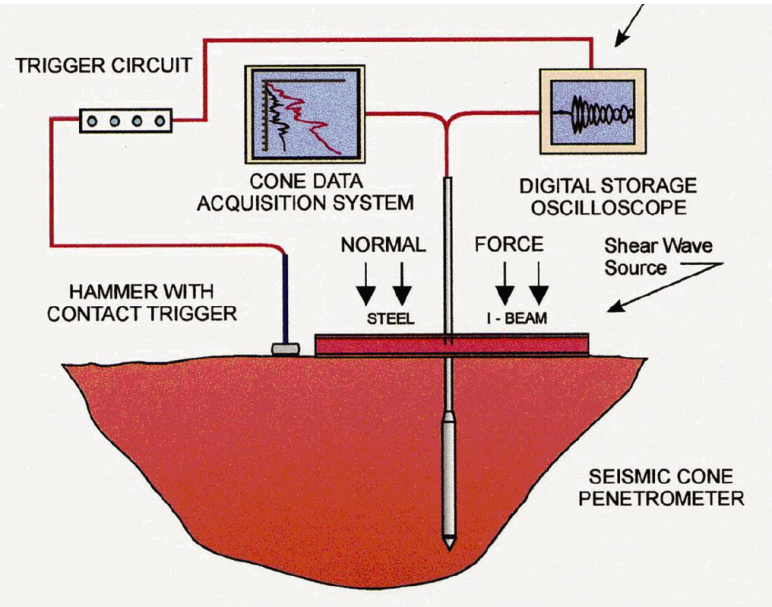


Figura 20: Esquema de CPT Piezocone, (P K Robertson & Cabal, 2015)

3.3 Equipamentos de empuxo ou empurrar

O termo “equipamentos de empuxo” ou "equipamentos de empurrar", tem origem ao fato de a penetração dos CPT’s se dar em condições quase estáticas com velocidade controlada, em geral 20 mm/s com tolerância de 5 mm/s. Assim, o equipamento funciona como reação que transfere força ao conjunto de hastes, empurrando-o para dentro do solo.

O sistema de reação é controlado com sistemas hidráulicos que transferem as solicitações das molas do veículo para as hastes, de modo controlado e alinhada a reação vertical com a vericalida das hastes do CPT.

De modo geral os equipamentos podem ser portáteis, operados externamente ou integrados a caminhões ou tratores. Em termos de carga de empuxo tem-se equipamentos de até 200 kN (caminhões trucados). Robertson & Cabal (2015), dividem os equipamentos em: terrestres e aquáticos. A seguir é mostrada uma sequência de imagens com equipamentos terrestres e os que atuam sob água.

O Equipamento montado em caminhão, mostrado na Figura 21, é uma unidade, em geral de 200 kN, de carga estática. Em aterros moles torna-se inconveniente pela própria dificuldade de ancoragem do equipamento.

A unidade acoplada a um trator, mostrado na Figura 22, com lagartas é própria para terrenos agrestes. Do mesmo modo que o montado em caminhão tem seu acesso dificultado pela própria massa. há unidades menores que permitem acesso a locais restritos, mostrado na Figura 23.

Há equipamentos CPT especializados para sondagens em águas profundas para até 400 mca de pressão. Para águas rasas, menos que 30 m de profundidade, utiliza-se as versões embarcadas em barcaças ancoradas, Figura 24.

Para águas profundas há sistemas especializados para o avanço do CPT para até profundidades de 100 m, visto na Figura 25.

Figura 21: Unidade de CPT Piezocone (200 kN) montada em caminhão, (P K Robertson & Cabal, 2015)

Figura 22: Unidade de CPT Piezocone (pequena) montada em esteira, (P K Robertson & Cabal, 2015)

Figura 23: Unidade de CPT Piezocone Portátil para acesso em espaço limitado, (P K Robertson & Cabal, 2015)

Figura 24: CPT embarcado em cais flutuante, (ROBERTSON; CABAL, 2015)

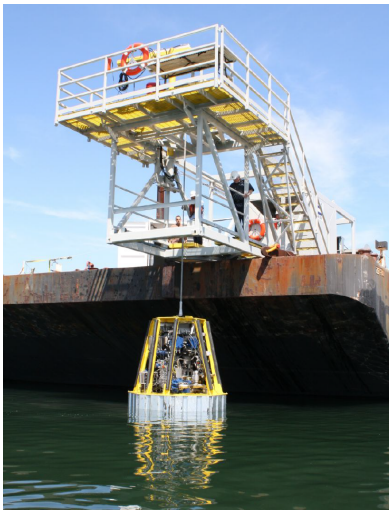


Figura 25: CPT para águas profundas, sistema Seafloor (ROBERTSON; CABAL, 2015)

4 Características do ensaio

Nesta seção apresentam-se as características de ensaio do CPT, dado que esse penetrômetro tem embarcado sensores eletrônicos e necessitam de cuidados mais acurados que, por exemplo, o SPT.

4.1 Profundidade de penetração da sondagem

Os ensaios CPT's podem ser realizados em profundidades superiores a 100 m em solos moles. Para melhorar a profundidade de penetração, o atrito ao longo das hastes deve ser reduzido, veja a Figura 26. Isso pode ser feito usando um acoplamento expandido (isto é, redutor de atrito) a uma curta distância, normalmente 1m, atrás do cone. A penetração será limitada se, solos muito duros, camadas de cascalho ou rocha são encontrados. É comum usar cones de 15 cm2 para aumentar a penetração. Os tirantes também podem ser lubrificados com lama de perfuração para remover a fricção da haste para sondagens profundas. A profundidade de penetração também pode ser aumentada usando técnicas de fundo de poço com uma plataforma de perfuração.

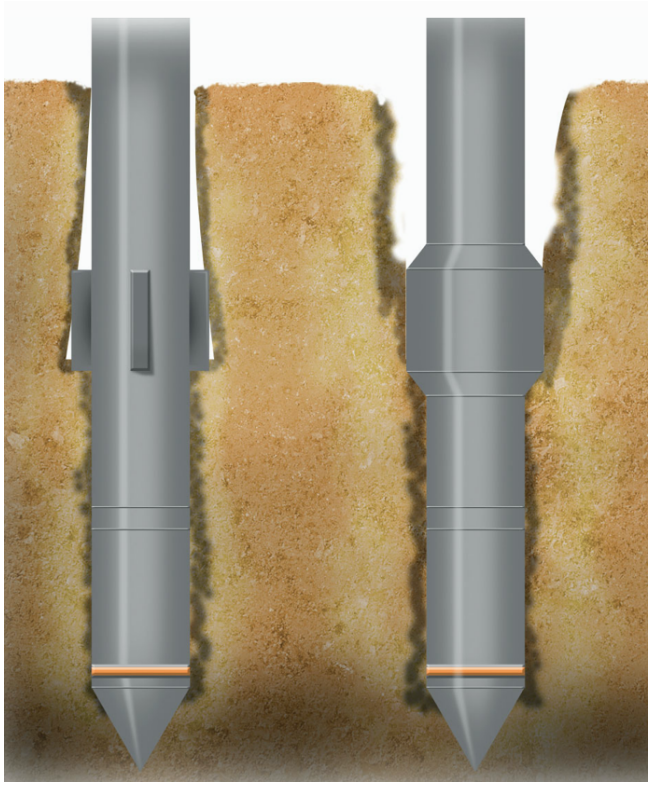


Figura 26: Tipos de redutores de atrito mais comuns segundo (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012)

4.2 Pré-perfuração

Para penetração em aterros ou solos duros, pode ser necessário pré-perfurar para evitar danos ao cone. A pré-perfuração, em certos casos, pode ser substituída por um orifício através do material duro superior com um aço sólido, utilizando, para isso, uma sonda 'fictícia' com

um diâmetro ligeiramente maior do que o do cone. Também é comum empregar o trado até 1,5 m, em áreas urbanas, para evitar interferências subterrâneas.

4.3 Verticalidade

O equipamento de reação deve ser configurado de modo a obter uma direção de impulso tão próxima quanto possível da vertical. O desvio da direção de impulso inicial da vertical não deve exceder 2 graus e os tirantes devem ser verificados quanto à retidão. Cones modernos têm sensores de inclinação simples incorporados para permitir uma medida de não verticalidade da sondagem. Isso é útil para evitar danos a equipamentos e quebra de hastes. Para profundidades menores que 15m, a não verticalidade significativa é incomum, desde que a direção de impulso inicial seja bem calibrada verticalmente.

4.4 Medições de Referência

Cones modernos têm potencial para um alto grau de precisão e repetibilidade (0,1% da saída em escala real). Os ensaios com sensores de carga, já são consensuados que a saída em carga zero pode ser sensível a mudanças de temperatura, embora a maioria dos cones agora incluam alguma compensação de temperatura. É prática comum registrar o zero antes de carregar as leituras de todos os sensores para rastrear essas mudanças. As leituras de carga zero deve ser monitoradas e registradas no início e no final de cada CPT.

4.5 Taxa de penetração

A taxa padrão de penetração é 2 cm/s. Portanto, uma sondagem de 20 m pode ser concluída em cerca de 30 minutos. No ensaio CPT, os resultados geralmente não são sensíveis a pequenas variações na taxa de penetração.

4.6 Intervalo de leituras

Cones elétricos produzem dados analógicos contínuos. No entanto, a maioria dos sistemas converte os dados em formato digital em intervalos selecionados. A maioria dos padrões requer o um intervalo que não deve ser superior a 200 mm. Em geral, a maioria dos sistemas coleta dados em intervalos entre 10 - 50 mm, sendo 20 mm, o mais comum.

4.7 Saturação do piezocone

Deve-se manter completamente saturados o elemento poroso, o canal entre o elemento poroso e o transdutor de poropressão e a cavidade onde se encontra o transdutor (PEREIRA, 2017). Os fluidos utilizados para a saturação são a água desareada, óleo de silicone ou glicerina (LUNNE; POWELL; ROBERTSON, 2002). Em uma câmara de saturação se aplica vácuo no elemento poroso em simultaneidade ao fluido durante 24 horas (Mayne, 2007).

4.8 Testes de Dissipação

Durante uma pausa na penetração, qualquer excesso de pressão de poropressão, gerado em torno do cone começará a se dissipar. A taxa de dissipação depende do coeficiente de consolidação, que por sua vez, depende da compressibilidade e permeabilidade do solo. A taxa de dissipação também depende do diâmetro da sonda. O teste de dissipação pode ser realizado em qualquer profundidade necessária, interrompendo a penetração e medição do decaimento da pressão dos poros com o tempo. É comum, para registrar o tempo para atingir a dissipação de 50% (t50). A poropressão de equilíbrio é necessária, o teste de dissipação deve continuar até que nenhuma dissipação adicional seja observada.

Por óbvio, isso pode ocorrer rapidamente nas areias, mas pode demorar muitas horas em argilas alta plasticidade. A taxa de dissipação aumenta conforme o tamanho da sonda diminui. O teste de dissipação passou a ser parâmetro importante para a medida do coeficiente de consolidação de solos finos no campo. Há vários trabalhos que tratam do tema na literatura geotécnica (ANSARI; MERIFIELD; SHENG, 2014; ARULRAJAH et al., 2007; KIM; LEE, 2000; MANTARAS; ODEBRECHT; SCHNAID, 2015). A Figura 27 mostra gráficos resultantes do ensaio para determinar t_{50}.

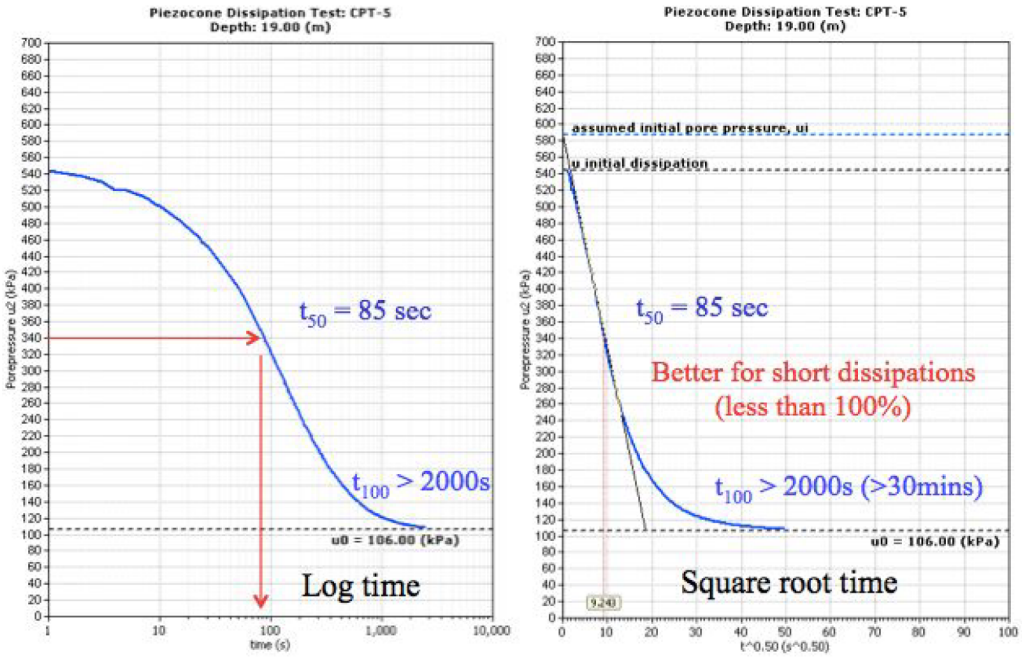


Figura 27: Exemplo de ensaio para determinara t_{50}, (ROBERTSON; CABAL, 2015)

4.9 Normalização de Dados da Dissipação

Os dados de dissipação requerem algum tipo de normalização para examinar as mudanças na resposta de dissipação em relação às mudanças nos parâmetros do solo ou nas condições de teste. Essas normalizações se aplicam ao componente de poropressão em excesso ou ao componente de tempo ou, em alguns casos, a ambos.

Um método comum de normalização para excesso de poropressão é baseado no valor inicial de excesso de poropressão medido nos elementos do filtro (TORSTENSSON, 1977; TEH; HOULSBY, 1991).

A Figura 28 apresenta o resultado de ensaio de dissipação realizado por C. I. Teh para diferentes localizações no cone (TEH, 1987). As equações 6 e 7 detalham a medida da poropressão normalizada (U):

$$U = \frac{U_t - U_0}{U_i - U_0} \tag{6}$$

$$U = \frac{\Delta_{U_t}}{\Delta_{U_i}} \tag{7}$$

onde u_0 é a poropressão hidrostática inicial;
u_i é a poropressão no início da dissipação;
u_t é a poropressão no tempo t;

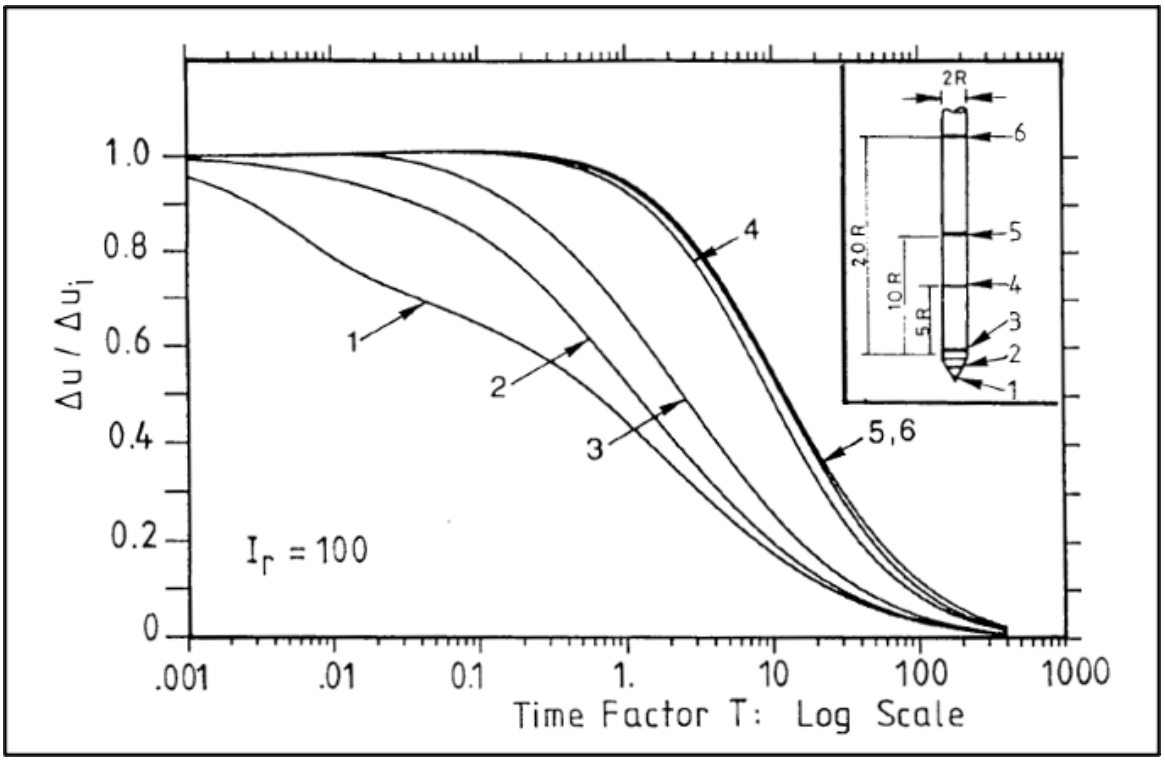


Figura 28: Curvas de dissipação para diferentes localizações no cone, realizadas por C. I. Teh (1987).

4.10 Calibrações e manutenção do CPT

As calibrações devem ser realizadas em intervalos com base na estabilidade das leituras de zero carga. Normalmente, se as leituras de carga zero permanecem estáveis, as células de carga não requerem uma calibração de verificação. Para grandes projetos, as calibrações de verificação podem ser realizadas antes e depois do trabalho de campo, com verificações funcionais durante os trabalhos. As verificações funcionais devem incluir o registro e avaliação da carga zero. Com

projeto cuidadoso, calibração e manutenção, células de carga de extensômetros e transdutores de pressão podem ter uma precisão e repetibilidade melhor do que +/- 0,1% da leitura em escala real. Em relação à manutenção (Robertson & Cabal (2015) apresentam a Tabela 3.

Tabela 3: Sumário de verificações do ensaio CPT

Manutenção	**Início do projeto**	**Início do Ensaio**	**Final do Ensaio**	**Diário**	**Mensal**	**Trimestral**
Geral	X	X		X		
Anéis	X			X		
Hastes		X				
Filtros	X	X				
Calibração						X
Computador					X	
Cone					X	
Zeragem		X	X			
Cabos	X				X	

4.11 Medida da onda de cisalhamento

A adição de sensores sismícos possibilita medir a onda de cilhamento, a velocidade (V_s) da onda de acordo com a profundidade (profundidade do sensor sísmico-geofones adpatados ao cone).Campanella et al 1986 propuseram a medida com um geofone que segundo Mayne (2007) fornece um pseudo-intervalo de V_s no fundo do sondagem, conform se observa na Figura 29. Esta abordagem é suficiente em precisão, desde que o eixo do geofone seja mantido paralelo ao alinhamento da fonte (sem rotação de hastes ou cone) e uma fonte de onda de cisalhamento repetível é gerada, em cada metro, para os sucessivos intervalos.

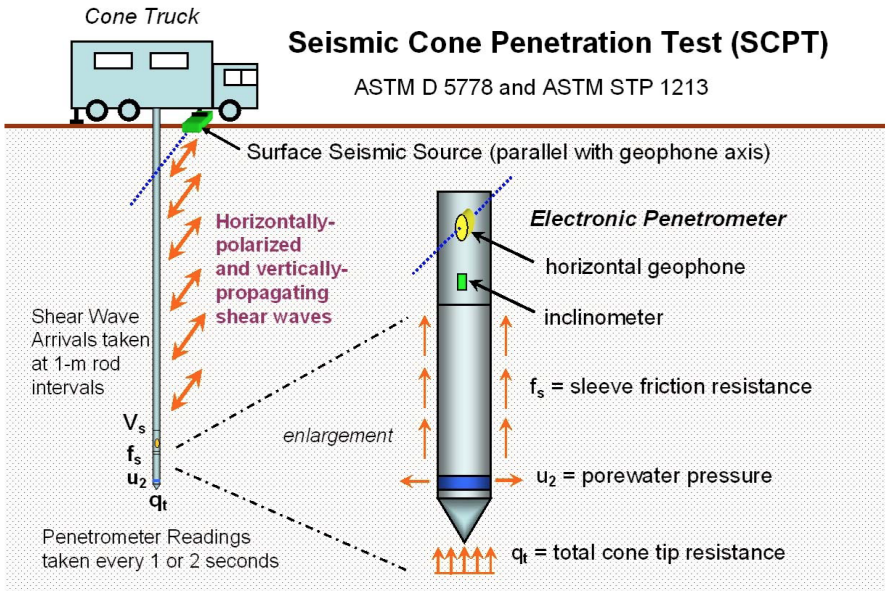


Figura 29: Configuração e procedimento para pseudo-intervalo no Seismic Cone Testing (SCPT), (MAYNE, 2007).

Segundo Mayne (2007), uma velocidade de cisalhamento mais confiável, V_s, é obtida por

meio de testes de fundo de poço em intervalo verdadeiro, mas isso requer dois ou mais geofones em duas elevações, no penetrômetro (geralmente 0,5 ou 1,0 m verticalmente separados). Fornecimento de um arranjo biaxial de dois geofones em cada elevação permite a correção para possível rotação da haste do cone, a onda resultante pode ser calculada como se segue na Equação 5:

$$R_v = x^2 + y\hat{}2 \tag{8}$$

Ainda segundo Mayne (2007), a incorporação de um geofone triaxial como componente vertical realmente não oferece nenhum benefício, uma vez que as ondas de cisalhamento têm movimento linear de modo polarizado, de movimento e direção, então apenas duas das três direções de coordenadas cartesianas Segundo Baldi er al.,(1988), a componente vertical poderia ser usada em um arranjo de teste de furo cruzado.

4.12 Fechamento de furo

Depois que a sondagem é finalizada, uma série de procedimentos possíveis podem ser seguidos durante ou após a extração da sonda:

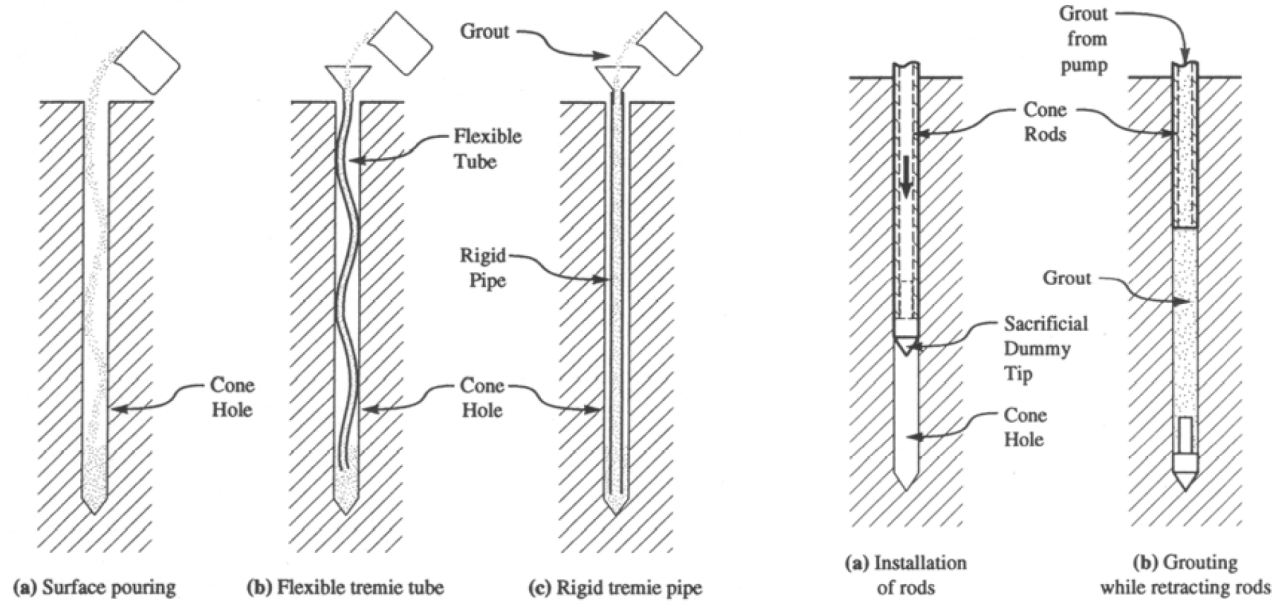
- o orifício do CPT é deixado aberto;
- o furo é preenchido com solo nativo com pedregulho e ou areia; e
- a cavidade é fechada durante a retirada usando uma dispositivo retrátil com a ponta sendo descartada; e
- após a retirada da haste, o orifício é preenchido usando um sistema de "grout".

A necessidade de fechamento de furo pode ser uma exigência de normas ambientais regionais ou derivadas da necessidade tecnológica, como é o caso de furos de sondagens feitos em camadas de solos pavimentadas. Nesse último caso, a vedação mitigaria a possibilidade de infiltração de águas superficiais. Otras situações exigem a vedação do furo, pós sondagem CPT. Em situações cujas configurações geológicas específicas, caso de aquíferos subterrâneos, estes precisa m ser protegidos contra contaminação ou transmissão de água. Segundo Mayne (2007), a exigência de fechamento do poço pode significativamente reduzir as taxas de produção de CPT.

A vedação do furo pode ser realizada usando uma pasta de bentonita ou uma argamassa magra feita de cimento Portland, gesso ou uma combinação de mistura de cimento-bentonita. Os rejuntes à base de pozolana também podem ser adequados, mas eles tendem a curar mais lentamente (LEE; MALONE; ROBITAILLE, 1998).

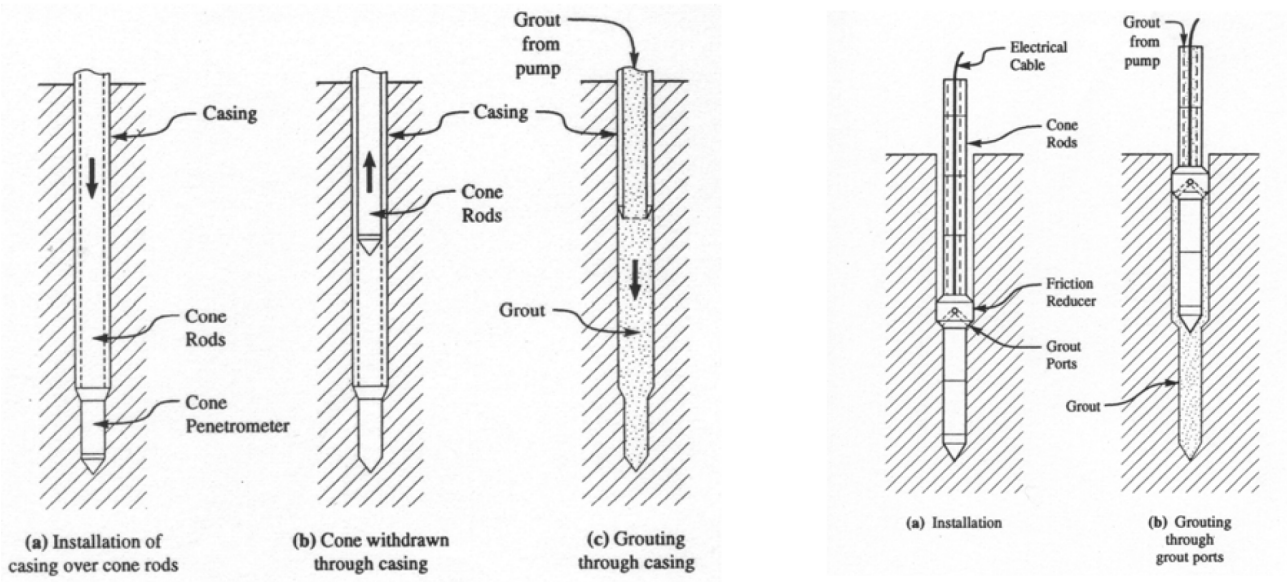
Os selantes de argamassa ou pasta podem ser colocados usando métodos de vazamento de superfície, tubos flexíveis ou rígidos ou sistemas especiais de CPT que fornecem rejuntamento durante o avanço ou a retirada, conforme ilustrado nas Figuras 30 e 31.

Uma discussão completa desses sistemas e suas vantagens e desvantagens são fornecidas por Lutenegger & DeGroot (1995a, 1995b) . Os resultados do questionário sobre o assunto do fechamento do orifício CPT indicaram que 43% permitem que o orifício permanecem abertos, 20% de aterro com solo, 18% de argamassa durante a retração e 18% de argamassa usando um secundário sistema de implantação - geoprobe.



(a) (b)

Figura 30: Métodos de fechamento de furo: (a) Técnicas de preenchimento; (b) Retração do CPT com ponta descartável (LUTENEGGER; DEGROOT, 1995)



(a) (b)

Figura 31: Métodos de fechamento de furo: (a) Invólucro temporário; (b) Rejuntamento através das portas no redutor de atrito (LUTENEGGER; DEGROOT, 1995)

5 Apresentação de dados do CPT

Neste capítulo, a apresentação de dados CPT para uso no detalhamento de recursos estratigráficos de subsolos serão apresentados, além do tipo e comportamento do solo e sua identificação geotécnica.

5.1 Perfil Geoestratigráfico

Ao registrar três variáveis, de modo contínuo, verticalmente com a profundidade, o CPT torna-se uma excelente ferramenta para perfilamento do subsoto, mudanças de estratos, delineamento das interfaces entre as camadas do subsolo e um excelente detector de pequenas lentes (geralmente concreções), dentro do solo.

A apresentação de dados de uma sondagem CPT deve incluir as leituras de ponta, luva e poropressão traçadas ao longo da profundidade em gráficos lado a lado, conforme ilustrado pela Figura 32.

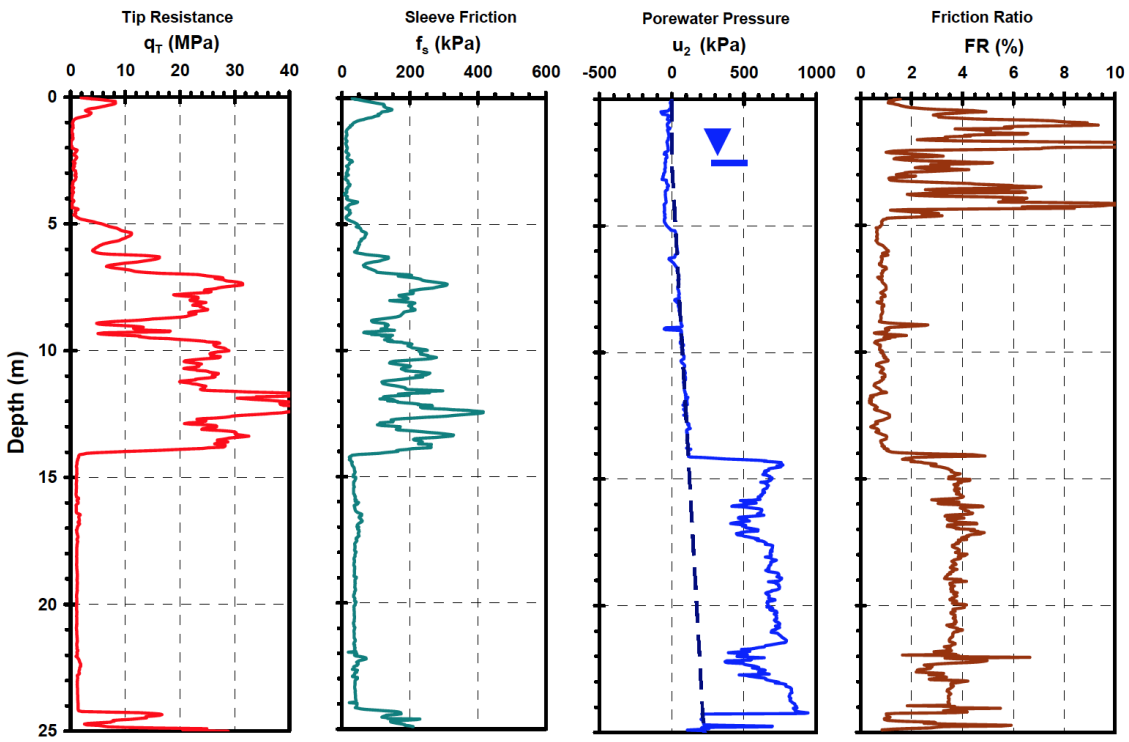


Figura 32: Apresentação dos resultados do CPTu, mostrando (a) Resistência total da ponta do cone, (b) Fricção da manga, (c) Ombros Porewater Pressures, e (d) Razão de atrito (FR = Rf = fs / qt) com Depth em Steele, Missouri.(MAYNE, 2007).

A resistência total da ponta do cone (qt) é sempre preferível ao valor bruto medido (qc). Para unidades SI, o profundidade (z) é apresentada em metros (m), tensão da ponta do cone (q_t) em quiloascais ($1/kPa = 1/kN/m^2$) ou megapascais ($1/MPa = 1000/kN/m^2$) e resistência da luva (f_s) e poropressões em kPa.

5.2 Tipos de solos de acordo com a interpretação visual dos dados de CPT

Como regra geral, as magnitudes das medições de CPT e indicativos típicos caem na seguinte ordem:

i $q_t > f_s$ e $q_t > u1 > u2 > u3$;

ii As tensões da ponta do cone medidas nas areias são bastante altas ($q_t > 5/MPa$), refletindo

as condições prevalentes de resistência drenada, enquanto os valores medidos em argilas são baixos ($q_t < 5\ MPa$), indicativo de resposta de solo saturado, não drenado, devido à baixa permeabilidade;

iii as poropressões dependem da posição do elemento do filtro e do nível do lençol freático;

iv Em profundidades, acima do lençol freático, leituras de poropressão variam com a capilaridade, umidade, grau de saturação e outros fatores, portanto as leituras dvem ser consideradas provisórias;

v areias limpas saturadas mostram poropressões, muitas vezes perto da hidrostática ($u_2 \approx u_0$), enquanto as argilas intactas exibem valores consideravelmente mais elevados do que hidrostáticos (u2> u0).

vi a proporção u_2/u_0 aumenta com a dureza da argila. Para argilas moles intactas, a proporção pode ser em torno de $u_2/u_0 \approx \pm 3$ que aumenta para cerca de $u_2/u_0 \approx \pm 10$ para argilas duras, mas tão alto quanto 30 ou mais para argilas muito duras, se as argilas estão fissuradas, são observadas poropressões negativas;

vii em areias limpas de quartzo e areias silicosas (feldspato e quartzo), observa-se que as razões de atrito são baixas ($R_f < 1\%$), enquanro que em argilas e solos orgânicos com presença de argilas de baixa sensibilidade, $R_f > 4\%$. Contudo, em argilas sensíveis , a razão de atrito pode ser baixa, mutos casos igual a zero.

5.3 Classificação comportamental do solo

Segundo Mayne (2007), pelo menos 20 métodos diferentes de classificação de solo CPT foram desenvolvidos, incluindo os bem conhecidos métodos por Begemann (1965), Schmertmann (1978) e Robertson (1990). Os métodos mais populares em uso incluem o método simplificado por Robertson & Campanella (1983) para o cone elétrico e os gráficos para todos os três piezocones apresentados por Robertson, et al. (1986) e Robertson (1990)(ROBERTSON, 1990).

No método simplificado de gráfico CPT (Robertson & Campanella, 1983), o logaritmo da resistência da ponta do cone (q_t) é plotado *versus* a razão de atrito (FR) para delinear cinco principais tipos de solo: areias, areias siltosas, siltes arenosos, argiloso silts e argilas. O método é ilustrado na Figura 33.

O método foi expandido para incluir o uso de um parâmetro de pressão normalizado de água porosa definido na Equação 9 :

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} \tag{9}$$

onde σ_{v0} = tensão de sobrecarga vertical total na profundidade z, correspondente com as leituras.

O total a sobrecarga em cada camada i é obtida d a Equação 10:

$$\sigma_{v0} = \Sigma(\gamma_{ti}\Delta Z_i) \tag{10}$$

A tensão efetiva , então, é dada pela Equação 11:

$$\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0 \tag{11}$$

onde u_0 = poropressão hidrostática.

Abaixo do lençol freático, bem como para as condições de aumento de capilaridade total acima do lençol freático, tem-se a Equação 12:

$$u_0 = \gamma_w(z - z_w) \tag{12}$$

onde z = profundidade,

z_w = profundidade para o lençol freático; e

γ_w = peso específico da água.

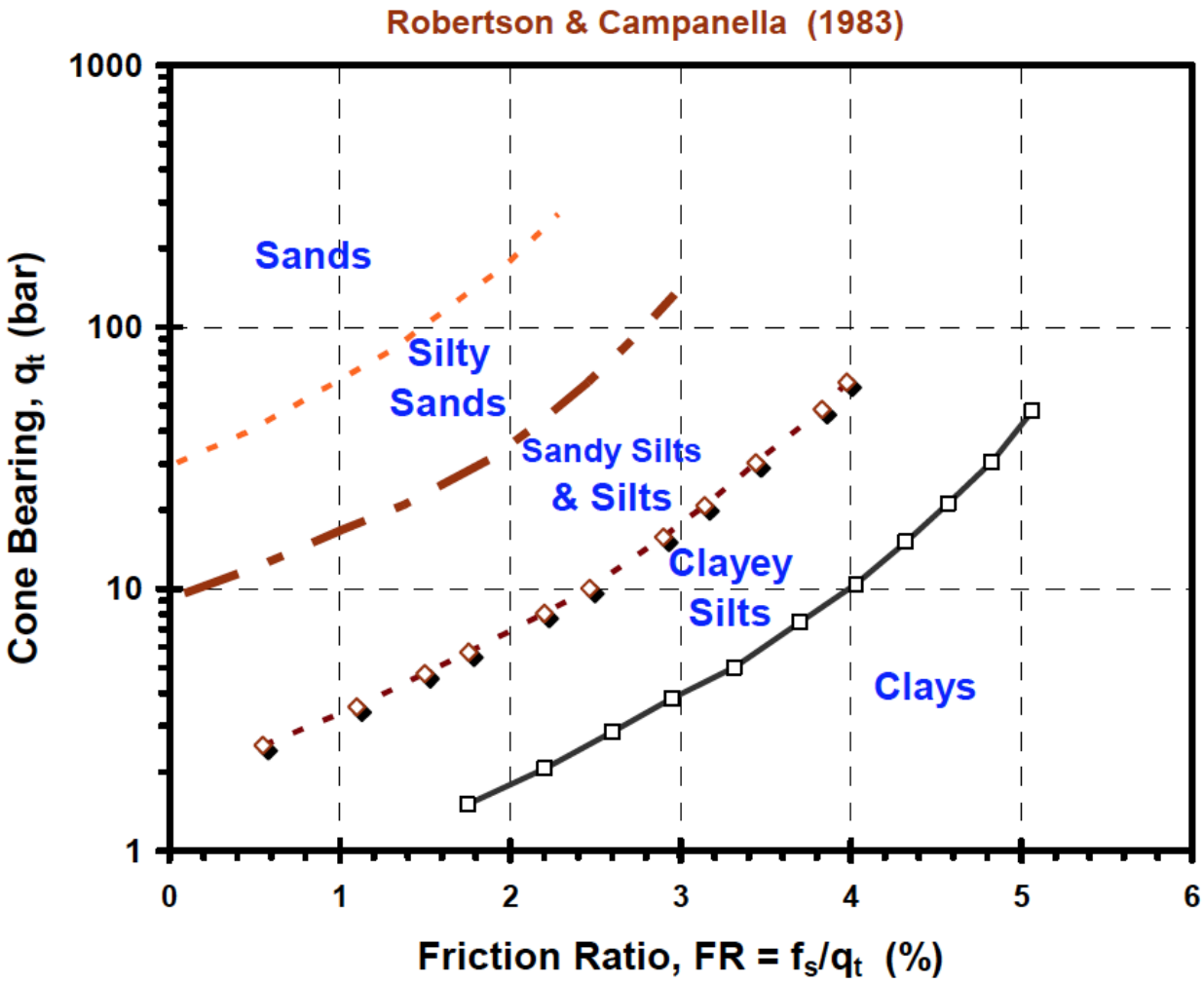


Figura 33: Tipos de solos CPT- classificação simplificada, (ROBERTSON; CAMPANELLA; WIGHTMAN, 1983)

Para solo seco, acima do lençol freático, $u_0 = 0$. Geralmente, para areias limpas, $B_q \approx 0$, enquanto em argilas moles a firmes intactas, $Bq \approx \pm 0,2$ a $\pm\, 0,6$. O tipo comportamental do solo (SBT) representa uma resposta aparente do solo à penetração do cone.

O gráfico na Figura 33 indica doze possíveis zonas SBT ou categorias de solo, obtidas plotando $log\ q_t$ *versus* FR com conjuntos emparelhados de $log\ q_t$ *versus* B_q.

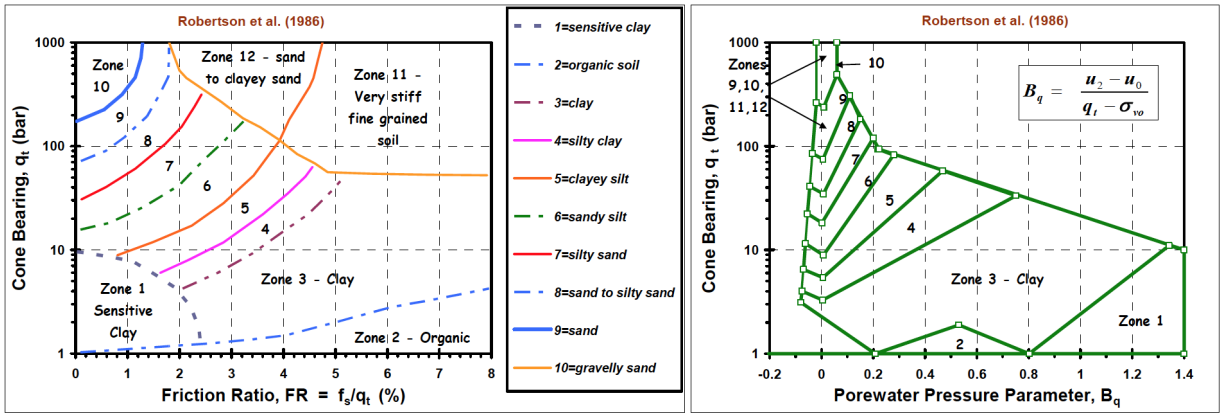


Figura 34: CPTU -classificação SBT por camadas, (CAMPANELLA; ROBERTSON; GILLESPIE, 1986)

A tensão de carregamento e a profundidade influenciam as resistências de penetração medidas (Wroth, 1988). Portanto, é mais rigoroso no pós-processamento dos dados do CPT considerar esquemas de normalização de tensão para todos três das leituras de piezocone. Neste caso, além do parâmetro B_q, mencionado acima, é conveniente definir parâmetros normalizados para resistência da ponta (Q) e atrito (F) de acordo com as equações 13 e 14:

$$Q = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma_{v0}} \tag{13}$$

$$F = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} \tag{14}$$

onde $\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0 =$ tensão efetiva vertical devido ao acarregamento correspondente à profundidade da sondagem.

Um gráfico de nove zonas que leva em conta os três parâmetros normalizados (Q, F, B_q), pode ser visto em Robertson (1990) e Lunne et al. (1997). Conflitos ocasionais surgem ao usar os gráficos de 3 partes, acima mencionados, uma vez que um SBT pode ser identificado pelo diagrama $Q - F$, enquanto um SBT diferente é sugerido pelo gráfico $Q - B_q$. Para uso geral, Jefferies & Davies (1993) mostraram que um índice de classificação de solo de cone ($*I_c$) poderia ser determinado a partir dos três parâmetros CPT normalizados pela Equação 15:

$$*I_c = \sqrt{(3 - log(1 - B_q))^2 + (1,5 + 1,3(logF))^2} \tag{15}$$

A vantagem do parâmetro $*I_c$ calculado é que ele pode ser usado para classificar os tipos de solo de acordo com os intervalos dados na Tabela 4 e facilmente implementados em uma planilha para resultados de pós-processamento. Usando a abordagem SBT da Tabela 2, vista acima, os dados do CPTu são reavaliados em termos de índice $*I_c$ para delinear as camadas e os tipos de solo, conforme apresentado na Figura 35. Os resultados são em geral de acordo com

o método visual descrito anteriormente.

Tabela 4: Tipo de comportamento do solo (SBT) de acordo com o $*I_c$, (JEFFERIES; DAVIES, 1993)

Classificação do solos	**Zona**	**Faixa de** $*I_c$
Solos argilosos orgânicos	2	I_c>3,22
Argilas	3	2,82<I_c<3,22
Solos siltosos	4	2,54<I_c<2,82
Solos arenosos	5	1,90<I_c<2,54
Areias	6	1,25<I_c<1,90
Pedregulhos com areias	7	I_c<1,25

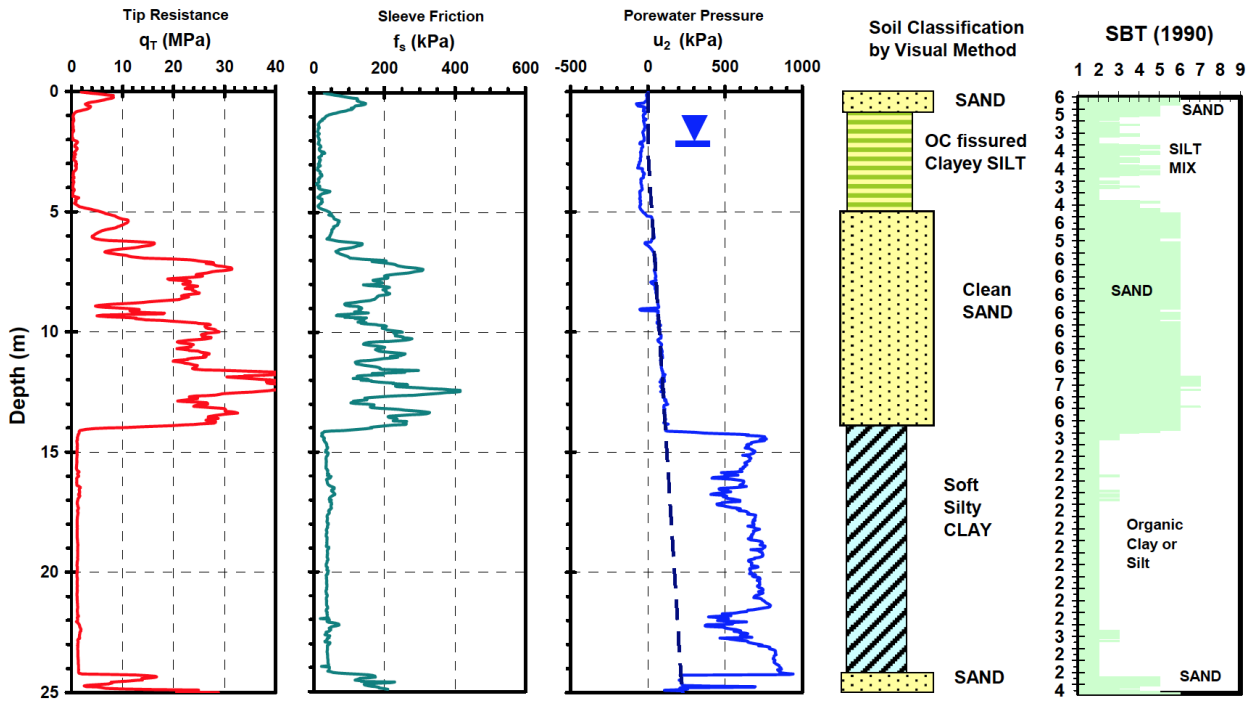


Figura 35: Resultados de CPt classificados pelo índice I_c, (MAYNE, 2007)

5.4 Procedimentos alternativos de normalização de leituras de CPT

Há várias proposições para as leituras de cone por exemplo (KULHAWY; MAYNE, 1990; JAMIOLKOWSKI; PRESTI; MANASSERO, 2001). Em areias limpas, com a ponta normalizada por tensão a resistência é freqüentemente apresentada no seguinte formato, conforme a Equação 16:

$$q_{t1} = \frac{\left(\frac{q_t}{\sigma_{atm}}\right)}{\left(\frac{\sigma'_{v0}}{\sigma_{atm}}\right)^{0,5}} = \frac{q_t}{(\sigma'_{v0}.\sigma_{atm})^{0,5}} \tag{16}$$

onde $\sigma_{atm} = 1/atm = 100/kPa$

Além disso, o atrito lateral normalizado pode ser expresso como na Equação 17:

$$F' = \frac{f_s}{\sigma'_{v0}} \tag{17}$$

A poropressão normalizada é dada pela Equação 18:

$$U' = \frac{\Delta_u}{\sigma'_{v0}} \tag{18}$$

A Equação 18 oferece a possibilidade conjecturar que que $U' < 1!$ (areia) e $U' > 3$ (argila). Uma análise similar pode ser feita em relação a leituras de B_q: $B_q < 0,1$ (areia); $B_q > 0,3$ (argila); valores entre esses limites indicam solos misttos de areia e argila ou siltosos ou, ainda, altamente intercalados (lentes concrecionadas e e camadas de argilas e areias).

Outros procedimentos alternativos e mais elaborados de normalização de tensão para o CPT foram propostos (OLSEN, 1995; IDRISS; BOULANGER, 2004; MOSS; SEED; OLSEN, 2006), mas aqui não serão analisados.

Segundo Mayne (2007) em uma abordagem recente e inovadora para classificação indireta de solos pelo CPT, um método probabilístico de avaliação de percentagens de argila, silte e areia foi desenvolvido por Zhang e Tumay (1999). O método usa a resistência da ponta do cone e o atrito da luva para avaliar a probabilidade do tipo de solo. É totalmente automatizado por software de computador. Usando a mesma sondagem de CPT apresentada nas Figuras 32 e 35, esta abordagem foi aplicada para determinar a probabilidade de frações de areia, silte e argila com a profundidade, conforme mostrado na Figura 36 com bons resultados.

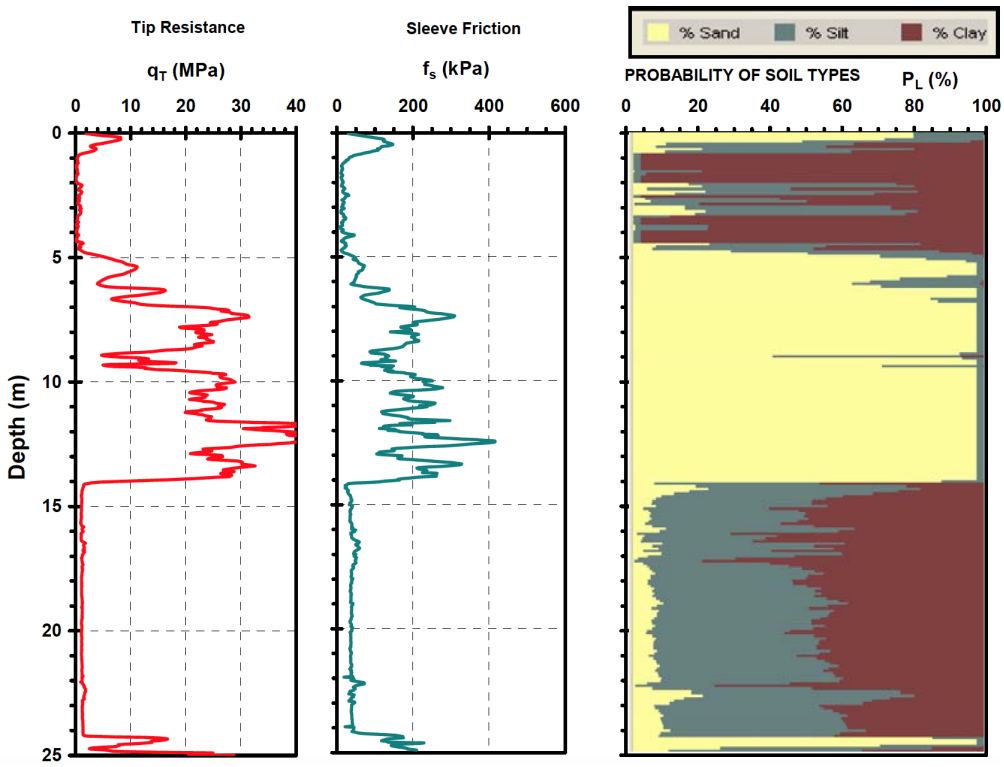


Figura 36: Aplicação do método de probabilidade de Zhang e Tumay (1999)

FIM DA PRIMEIRA PARTE

Referências

AMERICAN SOCIETY TEST OF MATERIALS. *D 1586*: Standard test method for penetration test and split-barrel sampling of soils. Conshoken, Pennsylvania, 1984.

AMERICAN SOCIETY TEST OF MATERIALS. *D 5778*: Standard test method for performing electronic friction cone and piezocone penetration testing of soils. Conshoken, Pennsylvania, 2000.

ANDERSON, J. B.; TOWSEND, F. C.; HORTA, E. A brief study on the repeatability of in-situ tests at the florida department of transportation deep foundations research site in orlando, florida. In: *Geotechnical & Geophysical Site Characterization, Vol. 2, (ISC-2, Porto), Millpress, Rotterdam.* [S.l.: s.n.], 2004. p. 1597–1604.

ANSARI, Y.; MERIFIELD, R.; SHENG, D. A piezocone dissipation test interpretation method for hydraulic conductivity of soft clays. *Soils and Foundations*, Elsevier, v. 54, n. 6, p. 1104–1116, 2014.

ARULRAJAH, A. et al. Dissipation testing of singapore marine clay by piezocone tests. *Geotechnical and Geological Engineering*, Springer, v. 25, n. 6, p. 647–656, 2007.

BARENTSEN, P. Short description of field testing method with cone shaped sounding apparatus. In: *Proceedings 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.* [S.l.: s.n.], 1936. p. 6–10.

BEGEMANN, H. K. S. Improved method of determining resistance to adhesion by sounding through a loose sleeve placed behind the cone. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, ICSMFE, August.* Zurich: ICSCMFE, 1953. p. 16–27.

BRIAUD, J.-L. Evaluation of cone penetration test methods using 98 pile load tests. In: *International Symposium on penetration testing; ISOPT-1. 1.* [S.l.: s.n.], 1988. p. 687–697.

BROMS, B. B.; N.FLODIN. History of soil penetration testing. In: . Balkema, Rotterdam: ISSMFE, 1988. p. 157–220, Vol 1.

CAMPANELLA, R.; ROBERTSON, P. Current status of the piezocone test. In: *International Symposium on penetration testing; ISOPT-1. 1.* [S.l.: s.n.], 1988. p. 93–116.

CAMPANELLA, R.; ROBERTSON, P.; GILLESPIE, D. Seismic cone penetration test. In: ASCE. *Use of in situ tests in geotechnical engineering.* [S.l.], 1986. p. 116–130.

DERUITER, J. Electric penetrometer for site investigations. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division (ASCE)*, v. 97, n. SM2, p. 457–472, 1971.

FLETCHER, G. F. Standard penetration test'its uses and abuses. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, v. 91, n. SM4, Proc Paper 4395, 1965.

GEUZE, E. Résultats d'essais de pénétration en profondeur et de mise en charge de pieux-modèle. *Annales Inst Tech Bâtiment Travaux Publics Paris*, v. 63, p. 313–319, 1953.

IDRISS, J.; BOULANGER, R. State normalization of penetration resistances and the effect of overburden stress on liquefaction resistance. In: *Proceedings.* [S.l.: s.n.], 2004. p. 22–56.

IRELAND, H.; MORETTO, O.; VARGAS, M. The dynamic penetration test: A standard that is not standardized. *Geotechnique*, Thomas Telford Ltd, v. 20, n. 2, p. 185–192, 1970.

ISSMFE. *Report of the ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing of Soils-TC 16 with Reference Test Procedures: CPT, SPT,*

DP, WST. The Government Offices SE-103 33 Stockholm Sweden: Statens geotekniska Institut, 1989.

JAMIOLKOWKI, M. New developments in field and laboratory testing of soils. In: *International conference on soil mechanics and foundation engineering. 11*. [S.l.: s.n.], 1988.

JAMIOLKOWSKI, M.; PRESTI, D. L.; MANASSERO, M. Evaluation of relative density and shear strength of sands from cpt and dmt. In: *Soil behavior and soft ground construction*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 201–238.

JEFFERIES, M. G.; DAVIES, M. P. Use of cptu to estimate equivalent spt n 60. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM International, v. 16, n. 4, p. 458–468, 1993.

KIM, Y.; LEE, S. R. Prediction of long-term pore pressure dissipation behavior by short-term piezocone dissipation test. *Computers and Geotechnics*, Elsevier, v. 27, n. 4, p. 273–287, 2000.

KULHAWY, F. H.; MAYNE, P. W. *Manual on estimating soil properties for foundation design*. [S.l.], 1990.

LEE, L.; MALONE, P.; ROBITAILLE, G. Grouting on retraction of cone penetrometer. In: *Geotechnical site characterization*. [S.l.: s.n.], 1998. p. 641–643.

LOBO, B. O. Método De Previsão De Capacidade De Carga De Estacas: Aplicação Dos Conceitos De Energia Do Ensaio SPT. p. 121, 2005.

LOBO, B. O. Mecanismos de penetração dinâmica em solos granulares. p. 231, 2009.

LUNNE, T. et al. Laboratory and field evaluation of cone penetrometers. In: ASCE. *Use of In situ Tests in Geotechnical Engineering*. [S.l.], 1986. p. 714–729.

LUNNE, T.; POWELL, J. J.; ROBERTSON, P. K. *Cone penetration testing in geotechnical practice.* [S.l.]: CRC Press, 2002.

LUNNE, T.; ROBERTSON, P.; POWELL, J. *Cone penetration testing in geotechnical practice. Blackie Academic. Chapman.* [S.l.]: Hall Publishers, UK, 1997.

LUTENEGGER, A. J.; DEGROOT, D. J. Techniques for sealing cone penetrometer holes. *Canadian geotechnical journal*, NRC Research Press, v. 32, n. 5, p. 880–891, 1995.

LUTENEGGER, A. J. et al. *Recommended guidelines for sealing geotechnical exploratory holes.* [S.l.: s.n.], 1995.

MANTARAS, F.; ODEBRECHT, E.; SCHNAID, F. Using piezocone dissipation test to estimate the undrained shear strength in cohesive soil. *Canadian Geotechnical Journal*, NRC Research Press, v. 52, n. 3, p. 318–325, 2015.

MAYNE, P. W. *Cone penetration testing.* 500 Fifth Street, NW Washington, DC 20001: Transportation Research Board, 2007. v. 368.

MEIGH, A. C. *Cone penetration testing: methods and interpretation.* London SW1 3AU, United Kingdom: Elsevier, 2013. ISBN 1483102262.

MOLLE, J. The accuracy of the interpretation of cpt-based soil classification methods in soft soils. *Delft University of Technology*, 2005.

MOSS, R.; SEED, R. B.; OLSEN, R. S. Normalizing the cpt for overburden stress. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 132, n. 3, p. 378–387, 2006.

OLSEN, R. S. Cpt stress normalization and prediction of soil classification. In: *Proceedings of the International Symposium*

on Cone Penetration Testing, CPT'95. [S.l.: s.n.], 1995. v. 2, p. 257–262.

PEREIRA, F. d. S. Nova metodologia para interpretação de ensaios de dissipação do piezocone. 2017.

ROBERTSON, P.; CAMPANELLA, R.; WIGHTMAN, A. Spt-cpt correlations. *journal of geotechnical engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 109, n. 11, p. 1449–1459, 1983.

ROBERTSON, P. K. Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, NRC Research Press, v. 27, n. 1, p. 151–158, 1990.

ROBERTSON, P. K.; CABAL, K. L. *Guide to Cone Penetration Testing For Geotechnical Engineering (California: Gregg Drilling & Testing)*. 2726 Walnut Avenue Signal Hill, California 90755: Inc, 2015.

SANGLERAT, G. *The penetrometer and soil exploration*. [S.l.]: Elsevier, 2012.

SCHMERTMANN, J. H. *Guidelines for cone penetration test: performance and design*. [S.l.], 1978.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. *Ensaios de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações: 2ª edição*. [S.l.]: Oficina de Textos, 2012.

SKEMPTON, A. Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation. *Geotechnique*, Thomas Telford Ltd, v. 36, n. 3, p. 425–447, 1986.

TANAKA, H. Key factors governing sample quality. *Characterization of soft marine clays*, 1999.

TEH, C.; HOULSBY, G. An analytical study of the cone penetration test in clay. *Geotechnique*, Thomas Telford Ltd, v. 41, n. 1, p. 17–34, 1991.

TEH, C.-I. An analytical study of the cone penetration test. 1987.

TORSTENSSON, B.-A. The pore pressure probe. *Nordiske Geotekniske M* te*, p. 1–15, 1977.

TUMAY, M.; KURUP, P.; BOGGESS, R. A continuous intrusion electronic miniature cone penetration test system for site characterization. In: *Geotechnical site characterization*. [S.l.: s.n.], 1998. p. 1183–1188.

VERMEIDEN, J. Improved sounding apparatus as developed in Holland since 1936. In: *Proc. 2nd Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Rotterdam*. [S.l.: s.n.], 1948. v. 1, p. 280–287.

ZHANG, Z.; TUMAY, M. T. Statistical to fuzzy approach toward cpt soil classification. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 125, n. 3, p. 179–186, 1999.