

O ENSAIO DE PIEZOCONE E DE MINICONE NA INVESTIGAÇÃO DO SUBSOLO: ALGUNS EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Heraldo Luiz GIACHETI & Rudney da Conceição QUEIROZ

Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, UNESP/Campus de Bauru. Avenida Engenheiro Luiz E. C. Coube, 14-01, Caixa Postal 473. CEP 17033-360. Bauru, SP. Endereços eletrônicos: giacheti@feb.unesp.br e rudney@feb.unesp.br

- Introdução
- Revisão da Literatura
 - Investigação do Subsolo
 - O Ensaio de Penetração do CPT Elétrico e do CPTU
 - O Ensaio
 - A Identificação de Perfil Geotécnico
- Interpretação Direta dos Resultados de Sondagens CPT
 - A Estimativa de Parâmetros de Projeto
 - O Ensaio de Penetração do Minicone (MCPT)
 - O Ensaio
 - Correlações entre o Minicone e o Cone Elétrico Padrão de 10 cm²
- Exemplos de Aplicação
 - Emprego do Piezocone na Investigação Geoambiental
 - Emprego do Minicone na Avaliação da Estabilidade de Taludes
 - Resultados de Ensaios MCPT
 - Correlações entre os Resultados do MCPT e o CPT Padrão
 - Classificação do Solo dos Taludes Estudados
 - Análise e Estimativa das Superfícies de Ruptura dos Taludes
- Considerações Finais
 - Ensaio CPTU na Investigação Geoambiental
 - Estabilidade de Taludes com o MCPT
 - Perspectivas de Utilização no Brasil
- Agradecimentos
- Referências Bibliográficas

RESUMO – O ensaio de penetração do cone elétrico e do piezocone pertence a um grupo de ensaios de campo, cuja utilização vem sendo cada vez mais difundida. Tanto o avanço da eletrônica como a rápida evolução da informática têm proporcionado equipamentos mais apropriados, menores, mais robustos e mais econômicos, permitindo a incorporação de diversos sensores a essa ferramenta de investigação. Isto contribuiu para que esse ensaio se consagrasse para a descrição contínua do perfil geotécnico, a definição do nível de água e para estimativa de parâmetros mecânicos do solo. Neste artigo faz-se uma breve apresentação do piezocone e do minicone elétrico: o primeiro vem sendo utilizado nos últimos anos, especialmente em geotecnia ambiental, e o segundo, na investigação da infra-estrutura de transportes. Apresentam-se e discutem-se exemplos de emprego do piezocone para identificação de regiões do maciço contaminadas e do minicone para detectar a superfície de ruptura de uma seção de um talude de aterro, para avaliar sua estabilidade através de retroanálises. Conclui-se o trabalho fazendo-se algumas considerações sobre a utilização dessa tecnologia moderna e recente em solos tropicais que ocorrem no Brasil.

Palavras-chave: Investigação do subsolo, ensaios de campo, piezocone, contaminação, minicone, estabilidade de taludes.

ABSTRACT – *H.L. Giacheti & R. da C. Queiroz - Site investigation with piezocone and mini-cone testing: some practical examples.* The electrical cone penetration and piezocone testing have become increasingly popular for in situ testing in site investigation and geotechnical design. The advances in electronics and computer engineering created smaller, stronger and cheaper devices that have been incorporated to some investigation tools. It contributed for the piezocone testing to be an unequaled logging tool with respect to the delineation of stratigraphy and the continuous quick estimative of soil mechanical parameters. This paper briefly presents the piezocone and the mini-cone testing. At the last years the piezocone has been used as a logging tool for geo-environmental site investigation, and the mini-cone gives finer details compared to the standard cone, making it more attractive for transportation infrastructure investigation. Some cases histories, where the piezocone were used to identify zones from the soil mass contaminated by salt, and the mini-cone were used to detect failure surface to assess slope stability of a landfill based on back-analysis technique, are presented and discussed. This paper is finished with some comments about the necessity of additional research to adjust this recent and modern technology for site investigation of Brazilian tropical soils.

Keywords: Site characterization, in situ testing, piezocone, contamination, mini-cone, slope stability.

INTRODUÇÃO

Em Engenharia Civil, a elaboração de projetos adequado das características e das propriedades geotécnicas, em geral, exige um conhecimento geotécnicas dos solos. Em princípio, a determinação

das propriedades geotécnicas pode ser feita, tanto através de ensaios de laboratório, como por meio de ensaios de campo.

A realização de ensaios em laboratório para obtenção de parâmetros de projeto apresenta como principal vantagem o controle das condições do ensaio, permitindo a realização de uma série de simulações. Entretanto, a qualidade dos resultados de ensaios laboratoriais realizados em amostras indeformadas depende muito da qualidade das mesmas. Dependendo do tipo de ensaio, o efeito da perturbação provocado pelo processo de amostragem pode ser significativo, especialmente no caso das areias. Além disso, muitas vezes os resultados desses ensaios não retratam algumas das características do maciço, fundamentais para a previsão do seu comportamento. Este fato tem sido relatado na literatura geotécnica por diversos pesquisadores.

As principais vantagens dos ensaios de campo residem nos fatos de serem geralmente mais econômicos e permitirem a realização de um maior número de ensaios e conseqüentemente, uma caracterização mais detalhada do solo em questão, além de os resultados ficarem prontamente disponíveis.

Entretanto, os ensaios de campo também possuem suas limitações, tais como nem sempre serem obtidas amostras, tornando a identificação e classificação do solo mais difícil, e ter-se um menor controle sobre as tensões de confinamento e sobre as condições de drenagem.

Na maioria dos casos, é necessária a utilização de correlações empíricas e calibrações para converter resultados de ensaios de campo em propriedades geotécnicas apropriadas para o projeto. Entretanto, a maioria das correlações publicadas refere-se a argilas com baixa a moderada plasticidade ou areias quartzosas, não sendo apropriadas para solos especiais, tais como argilas muito moles, solos orgânicos, argilas sensíveis, argilas fissuradas, solos cimentados, areias calcárias, areias micáceas e solos colapsíveis (Coduto, 1994).

O ensaio de penetração de cone pertence a um grupo de ensaios de campo, cuja utilização vem sendo cada vez mais difundida (Schmertmann, 1978; De Ruiter, 1981; Meigh, 1987; Robertson & Campanella, 1988). As primeiras versões do ensaio de penetração de cone foram desenvolvidas pelas Ferrovias Estatais da Suécia, em 1917. Na forma como é conhecido hoje, este ensaio foi introduzido em 1934, na Holanda. Esta é a razão pela qual o ensaio é também denominado ensaio de cone holandês (Meigh, 1987).

O ensaio de penetração de cone vem evoluindo constantemente. Assim, em 1953, Begemann introduziu

na Indonésia o cone com capacidade de medir o atrito lateral. O primeiro cone elétrico foi introduzido por Geuze em 1948, mas só começou a ser utilizado no final da década de 60. Em 1975, Wissa e Torstensson desenvolveram independentemente o ensaio com a capacidade de medir a poro-pressão gerada na ponta durante a penetração. Entretanto, em ambos os casos somente a poro-pressão podia ser determinada. Cones com a capacidade de proporcionar simultaneamente a resistência à penetração e a poro-pressão gerada durante a penetração, denominados piezocones, foram introduzidos por De Ruiter no início da década de 80 (Esquivel, 1995).

Tanto o avanço da eletrônica, como a rápida evolução da informática, têm proporcionado equipamentos mais apropriados, menores, mais robustos e mais econômicos, permitindo o projeto e a construção de novas ferramentas mais adequadas para obtenção de parâmetros dos solos. Podemos destacar aqui o conjunto de ensaios com piezocones associado a diversos dispositivos especiais, denominado tecnologia do piezocone (Davies & Campanella, 1995). O piezocone é uma ferramenta consagrada para a descrição contínua do perfil geotécnico, incluindo a definição do nível d'água e a estimativa de parâmetros mecânicos dos solos.

Chrismer & Li (1997) adaptaram um piezocone para a aplicação em infra-estrutura ferroviária, permitindo atravessar a camada de lastro e caracterizar as camadas que ocorrem sob a via permanente. Tumay & Kurup (1999) propuseram a aplicação do piezocone e principalmente do minicone, como ferramentas para estudos geotécnicos em infra-estrutura de transportes. O uso dessas ferramentas permite, com rapidez e confiabilidade, a caracterização e classificação das camadas dos solos que compõem as bases de rodovias, ferrovias e aeroportos, com a vantagem de não necessitar da obtenção direta de amostras. Para esta aplicação o minicone, pelas suas dimensões reduzidas, apresenta vantagens adicionais.

Este artigo descreve o piezocone padrão e o minicone elétrico e apresenta algumas aplicações dessas ferramentas modernas para a investigação do subsolo a partir da discussão de casos onde o piezocone foi empregado para identificar regiões do maciço onde o aquífero se encontrava contaminado. Um caso onde o emprego do ensaio com o minicone elétrico para detectar a superfície de ruptura de uma seção do talude para estimar a massa em condições de instabilidade e o fator de segurança através de retroanálises também será apresentado e discutido. Conclui-se esse trabalho discutindo as vantagens dessa tecnologia de investigação moderna e as perspectivas e necessidades de adaptações para emprego no Brasil.

REVISÃO DA LITERATURA

INVESTIGAÇÃO DO SUBSOLO

A investigação do subsolo deve ser feita de modo a que seja possível definir o perfil geotécnico do subsolo, o que inclui identificar as camadas, sua espessura e tipo de solo, a posição do nível d'água e seus parâmetros mecânicos e hidráulicos. Para essa finalidade pode-se utilizar tanto ensaios de campo como ensaios de laboratório. O procedimento ideal é utilizar um método de ensaio de campo que possibilite fazer a perfilagem do subsolo e a estimativa de parâmetros mecânicos de cada camada. A partir dessa investigação, se for necessário ao projeto, identifica-se as camadas críticas, para que sejam feitos ensaios específicos, no laboratório ou no próprio campo, para determinação dos parâmetros mecânicos de interesse.

A investigação geoambiental é um tema recente que vem sendo abordado no campo das Geociências e da Geotecnia. Existem diferentes interpretações para o significado da investigação e caracterização geoambiental. Campanella & Davies (1997) definem como sendo *o campo de estudo que faz a ligação entre Geologia, Geotecnia, Engenharia Ambiental e ciências correlatas, para dar origem a uma área de interesse que incluem todas as preocupações ambientais dentro do meio geológico natural ou modificado*.

Segundo a US EPA (1989), os principais fatores que devem ser considerados na investigação e geoambiental são: perfil geotécnico; posição do nível d'água; condutividade hidráulica; e composição química e fonte(s)/receptor(es) de contaminantes, potenciais ou já existentes.

A presença de contaminantes no solo tem levado a mudanças nas técnicas de investigação e caracterização do subsolo, procurando incluir a identificação do tipo, quantidade e como se dará o caminamento do mesmo através da formação de uma pluma de contaminação. Para se obter todas essas informações é necessário que durante a investigação do subsolo utilizem-se técnicas que permitam amostrar solo, água e/ou gás.

Para que um programa de investigação *in situ* seja mais eficiente, tem-se utilizado a geofísica para a determinação dos locais onde deve ser realizado um estudo mais detalhado, incluindo as amostragens. Segundo Davies & Campanella (1995), a combinação de uma campanha de campo utilizando uma sondagem elétrica de superfície, ensaios com o piezocone de resistividade e amostragens da água subterrânea proporcionam uma rápida e econômica caracterização geoambiental do subsolo. Assim, é possível detectar a presença ou se a concentração de certas substâncias

que se encontram no lençol freático está acima de um determinado valor de referência. Estes valores de referência são estabelecidos a partir da experiência de campo ou a partir de ambientes geológicos similares. Em áreas onde valores de referência são excedidos, pode-se então, efetuar uma avaliação complementar através da coleta, em profundidades discretas, de amostras da água subterrânea, para uma posterior análise química.

A investigação e caracterização geotécnica tradicional da infra-estrutura de transportes, segundo Muniz (1978) e Sauvage (1981), devem fornecer subsídios para: a análise detalhada da estratigrafia dos terrenos atravessados; a análise da compartimentação geológica dos maciços para avaliação do comportamento estrutural dos taludes; as sondagens com coletas de amostras deformadas e indeformadas para ensaios de classificação e compactação; a CBR e a determinação de parâmetros de resistência, compressibilidade e permeabilidade dos solos; as posições dos níveis d'água e condições de fluxo; a delimitações dos diferentes horizontes litológicos; as zonas de provável desencadeamento de processos erosivos; outros estudos geotécnicos mais detalhados, em função das características da via.

As camadas do subsolo de pavimentos rodoviários ou em ferrovias são submetidas a solicitações de caráter estático e dinâmico, sendo estas últimas devidas às vibrações transmitidas pelos veículos. Em um trecho existente, o comportamento resistente da plataforma nem sempre é garantido, principalmente com o aumento do tráfego, o que poderá acarretar deformações excessivas. As deformações são mais acentuadas com a presença de água no interior do maciço e a falta de drenagem.

Chrismer & Li (1997) adaptaram um piezocone para a aplicação em infra-estrutura ferroviária, permitindo atravessar a camada de lastro e caracterizar as camadas que ocorrem sob a via permanente. Tumay & Kurup (1999) propuseram, com base em estudos realizados na Highland Road, em Baton Rouge, LA, e no National Geotechnical Experimentation Site, da Universidade do Texas, em Houston, Tx, a aplicação do piezocone e principalmente do minicone, como ferramentas para estudos geotécnicos, em infra-estrutura de transportes. Segundo esses autores, o uso dessas ferramentas permite, com rapidez e confiabilidade, a caracterização e classificação das camadas dos solos que compõem as bases de rodovias, ferrovias e aeroportos, com a vantagem de não necessitar da obtenção direta de amostras. Permite também registrar a dissipação da poro-pressão e assim estimar a condu-

tividade hidráulica do solo e avaliar a drenabilidade das camadas do pavimento.

O ENSAIO DE PENETRAÇÃO DO CPT ELÉTRICO E DO CPTU

O Ensaio

O piezocone é um ensaio de penetração quasi-estática *in situ* que permite identificar o perfil geotécnico do terreno e avaliar preliminarmente os parâmetros geotécnicos do solo (Lunne et al., 1997). Nos Estados Unidos, o procedimento está normalizado de acordo com a ASTM D3441 (1986) e no Brasil pela ABNT MB-3406 (1991), tanto para o ensaio com medida de poro-pressões (CPTU), como para o ensaio sem essa medida (CPT).

Nesse ensaio, uma ponteira em forma cônica (Figura 1), que é conectada à extremidade de um conjunto de hastes, é introduzida no solo a uma velocidade constante igual a 2 cm/seg., que é aproximadamente igual a 1 m/min. O cone tem um vértice de 60° e um diâmetro típico de 35,68 mm (que corresponde a uma área de 10 cm²). O diâmetro das hastes é igual ou menor do que o diâmetro do cone. Durante o ensaio, a resistência à penetração da ponta do cone é medida constantemente. Também é medida a resistência à penetração de uma luva de atrito que é alojada logo atrás do cone.

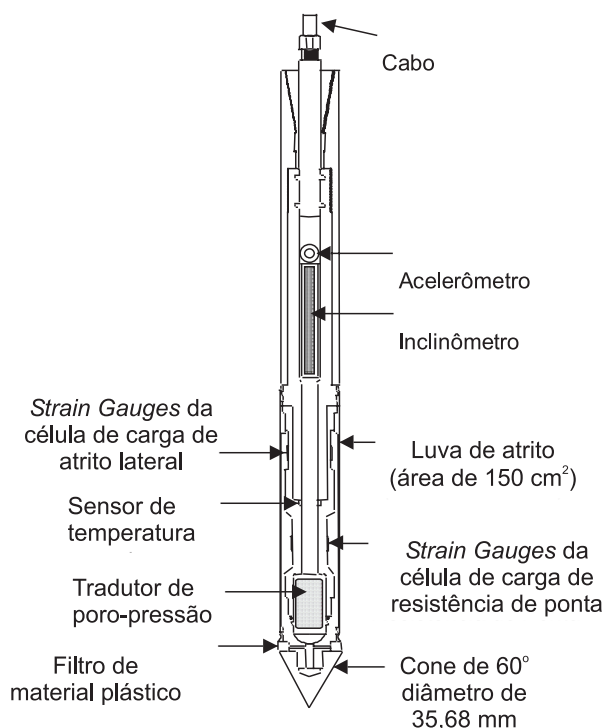


FIGURA 1. Piezocone com inclinômetro, sensor de temperatura e acelerômetro (Davies & Campanella, 1995).

Os penetrômetros eletrônicos possuem células de carga que registram a resistência de ponta (q_c) e o atrito lateral (f_s). Valores da poro-pressão (u) atrás do cone durante a penetração são determinados através de um transdutor de pressão. Alguns piezocones possuem múltiplos transdutores de pressão, permitindo determinar também a poro-pressão na ponta (u_1), atrás da ponta (u_2) e atrás da luva de atrito (u_3).

O procedimento de ensaio CPT e CPTU é o mesmo, com exceção da preparação do piezo-elemento. Essa preparação consiste na de aeração do elemento de filtro poroso e do próprio cone. O sistema de reação utilizado para penetração consiste em um sistema hidráulico, normalmente com capacidade entre 100 a 200 kN, geralmente montado sobre carretas ou carroceria de caminhões.

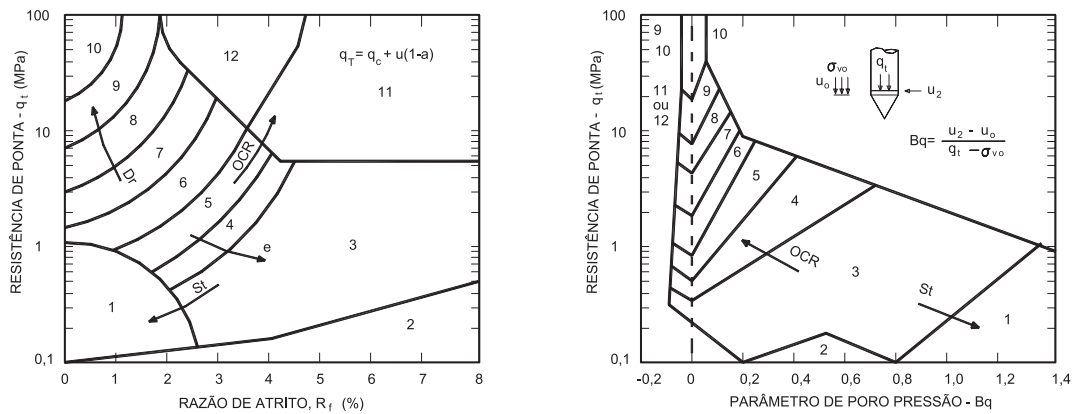
Em um piezocone eletrônico os sinais são normalmente transmitidos através de um cabo que passa pelo interior das hastes de cravação do cone. Os dados são digitalizados, e normalmente gravados a cada 25 ou 50 mm de variação da profundidade. Esses sistemas de aquisição de dados permitem a apresentação, em tempo real dos resultados obtidos durante a penetração, utilizando gráficos da variação da resistência de ponta (q_c), o atrito lateral (f_s) e a poro-pressão (u) com a profundidade. Durante uma interrupção da penetração é possível monitorar a dissipação da poro-pressão com o tempo.

A Identificação de Perfil Geotécnico

Uma das principais aplicações do piezocone é para a identificação do perfil geotécnico a partir do emprego de cartas de classificação. A experiência tem demonstrado que tipicamente a resistência de ponta (q_c) é alta em areias e baixa em argilas, e o atrito lateral (f_s) é baixo em areias e alto em argilas.

Douglas & Olsen (1981) foram os pioneiros em propor uma carta de classificação de solos a partir da resistência de ponta (q_c) e razão de atrito (R_f) determinado com cones elétricos. Uma das cartas de classificação mais utilizada é a proposta por Robertson et al. (1986), apresentada na Figura 2. Esta carta utiliza a resistência de ponta corrigida (q_t) e a razão de atrito corrigida ($R_{fc} = q_t/f_s \times 100$). A carta mostra, além da classificação dos solos, a tendência de variação da densidade relativa (D_r), do histórico de tensões (OCR), da sensibilidade (St) e do índice de vazios (e). O piezocone permite ainda que se classifique o solo utilizando a informação de poro-pressão, através do índice de poro-pressão (B_q). Este recurso é interessante especialmente para solos moles, onde os valores de resistência de ponta são baixos e a geração de poro-pressão é elevada.

A resistência de ponta e o atrito lateral aumentam



SBT	Tipo de comportamento do solo
1	Solos finos sensíveis
2	Solos orgânicos
3	Argila
4	Argila siltosa a argila
5	Silte argiloso a argila siltosa
6	Silte arenoso a silte argiloso
7	Areia siltosa a silte arenoso
8	Areia a areia siltosa
9	Areia
10	Areia pedregulhosa a areia
11	Solo fino muito rijo *
12	Areia a areia pedregulhosa *

* Pré-adensado ou cimentado

FIGURA 2. Carta de classificação de solos a partir de resultado de ensaio cone elétrico e com o piezocone (Robertson et al., 1986).

com a profundidade devido à tensão de confinamento. Portanto, os dados obtidos pelo CPT necessitam de correções, especialmente para as sondagens mais profundas. Por exemplo, em uma camada espessa de argila pré-adensada, a resistência do cone aumentará com a profundidade, resultando em mudanças aparentes na classificação (Robertson, 1998). Assim, uma outra carta de classificação com base em dados obtidos em sondagens com CPT elétrico e com CPTU foi proposta por Robertson (1990) e é recomendada para sondagens com profundidade superior a 30 m.

Interpretação Direta dos Resultados de Sondagens CPT

Uma forma de interpretação de resultados de sondagens CPT é correlacionar empiricamente q_c e f_s medidos com o comportamento observado em fundações, prática que tem sido utilizada, especialmente no Brasil, provavelmente pela dificuldade de considerar os diversos fatores que afetam o comportamento de solos residuais não saturados. Os métodos empíricos desenvolvidos para a previsão do comportamento de fundações, como por exemplo, o de Aoki & Velloso (1978) são, em geral, para valores de q_c e f_s obtidos

utilizando-se o cone mecânico. De Rutier (1971) recomenda que não se corrija o valor de q_c obtido com cone elétrico no caso de aplicação de métodos originados de dados de cone mecânico, como no caso de capacidade de carga de estacas. Entretanto, quando se utiliza um cone elétrico, as pesquisas realizadas mostram que os valores de atrito lateral medidos em cone mecânico são da ordem do dobro daqueles medidos utilizando-se um cone elétrico. De Rutier (1971) atribui tal diferença à resistência extra desenvolvida no bordo inferior da luva de atrito do cone de Begemann, a qual é incluída no registro de atrito lateral.

A Estimativa de Parâmetros de Projeto

Com base nos valores de q_c , f_s e u medidos é possível estimar os parâmetros de resistência, compressibilidade e permeabilidade do solo. Esta forma de análise de resultados de sondagens CPT ou CPTU é conhecida como abordagem indireta de interpretação. Para a obtenção desses parâmetros existem inúmeras propostas na literatura internacional, a maioria foi desenvolvida para solos sedimentares, sendo poucos os estudos existentes para avaliar o comportamento de solos residuais.

No caso de areias, os seguintes parâmetros podem ser estimados: densidade relativa (D_r), parâmetro de estado das areias (ψ), coeficiente de empuxo no repouso (K_0), ângulo de atrito interno efetivo (ϕ'), módulos de deformabilidade (E), edométrico (E_d) e de cisalhamento máximo (G_{max}). Para as argilas, os seguintes parâmetros podem ser estimados: resistência não drenada (s_u), razão de pré-adensamento (OCR), sensibilidade (S_r), módulos (E , E_d e G_{max}), coeficiente de adensamento (c_h e c_v) e permeabilidade (k_h e k_v). Embora alguns parâmetros listados acima possam ser interpretados segundo uma abordagem teórica, a maioria deles geralmente foram obtidos através de correlações com resultados de ensaios de laboratório e/ou ensaios específicos de campo (Quaresma et al., 1996). Recomenda-se sua utilização em estimativas para posterior confirmação, quando necessário utilizando ensaios específicos de campo ou de laboratório.

O ENSAIO DE PENETRAÇÃO DO MINICONE (MCPT)

O Ensaio

O ensaio de penetração do minicone, também denominado de CIMCPT (*Continuous Intrusion Miniature Cone Penetration Test System*) foi desenvolvido no LTRC (Louisiana Transportation Research Center) da LSU (Louisiana State University) e constitui uma ferramenta confiável, econômica e rápida para a caracterização *in situ* das camadas do solo quando comparada com os sistemas convencionais de ensaios *in situ* e de laboratório (Tumay & De Lima, 1992).

O minicone possui uma ponta com diâmetro de 12,7 mm e luva de atrito com 150 mm de comprimento, podendo atingir profundidades de até 12 m, sendo cravado a uma velocidade constante de 20 mm/seg.

O dispositivo de movimentação contínua de penetração, desenvolvido no sistema CIMCPT minimiza os efeitos de tensão normal e adensamento, que ocorrem frequentemente em resultados de ensaios de cone padrão, observados durante a penetração contínua no solo. O minicone pode ser operado por uma única pessoa, dispensando a colocação e emenda das hastes, como no sistema padrão de piezocone.

O minicone fornece melhores detalhes do subsolo quando comparados aos penetrômetros com cone de dimensões padrão e é mais indicado para a caracterização de infra-estrutura em pavimento rodoviário e controle de compactação, podendo fornecer dados importantes para a melhoria das condições do subsolo, para infra-estrutura de transportes de um modo geral.

Os dados obtidos com o minicone podem também ser usados para o projeto de pequenas fundações, através de correlações que poderão ser obtidas com

provas de carga, projeto e construção de aterros e na verificação da estabilidade de taludes naturais e de escavação (Tumay & Kurup, 1997).

O sistema pode ser usado para ensaios *in situ* em infra-estrutura de pavimentos rodoviários existentes, sem interferir na superfície de rolamento, pois necessita de um furo com 25,4 mm de diâmetro para acesso às camadas de solo, portanto, menor que outros sistemas de cone que exigem perfurações de diâmetros maiores.

O sistema pode ser montado em pequenos veículos, devido à necessidade de uma menor carga de reação para a penetração do minicone, comparado aos cones de tamanho padrão. A instalação em um veículo menor provê maior mobilidade e acessibilidade aos locais dos ensaios.

A haste de transmissão dos esforços de penetração é composta por um tubo contínuo, sem emendas, que vai sendo desenrolado, evitando a penetração de água do subsolo, que poderá danificar o sistema eletrônico de transmissão de dados (Figura 3).

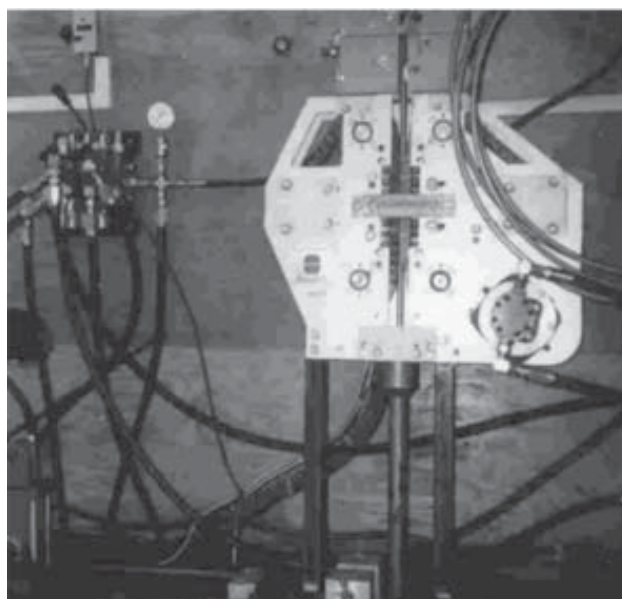


FIGURA 3. Sistema com hasteamento contínuo para penetração do CIMCPT da LSU.

Os resultados do desenvolvimento desse sistema de ensaios *in situ* têm aplicações práticas imediatas em infra-estrutura de sistemas de transportes, além de outras aplicações práticas em engenharia civil e ambiental (Tumay & Kurup, 1999).

Esse sistema é montado em um caminhão, para todo tipo de terreno (Figura 4). Para o desenvolvimento dos ensaios *in situ*, foi montado em um compartimento fechado, na carroceria do veículo, um sistema mecânico, com acionamento hidráulico para aplicação das

cargas e avanço do cone. A velocidade de penetração pode ser controlada e mantida constante a 2 cm/seg. por um sistema hidráulico de avanço da haste.



FIGURA 4. Equipamento CIMCPT montado em veículo na Louisiana State University.

O veículo é estacionado sobre o local do ensaio e posicionado para o início de operação. Após o posicionamento, um sistema hidráulico ligado a uma viga em perfil na base do veículo é acionado de forma que fique suspenso e a haste do piezocone verticalizada.

A carga é aplicada, utilizando o peso do veículo como sistema de reação. A velocidade de penetração

no terreno é controlada por um sistema de válvulas de pressão. Os esforços mecânicos são transmitidos à haste por um sistema de correntes ligados a um conector que ao girar desloca a haste verticalmente. Para manter a estabilidade à flambagem da haste, entre o sistema de aplicação de cargas e a superfície do terreno, é colocado um tubo guia, fixado na estrutura do sistema de aplicação das cargas e apoiado sobre a viga de reação (Tumay et al., 1998; Tumay & Kurup, 1999; Tumay & Titi, 2000).

Correlações entre o Minicone e o Cone Elétrico Padrão de 10 cm²

Tumay & Kurup (1999) realizaram uma série de testes *in situ* na interseção entre as rodovias Highland Road (LA SR-42) e a Interstate 10 (I-10), em Baton Rouge, LA, com o MCPT (*Miniature Cone Penetration Test*) (2 cm²), com o MPCPT (*Miniature Piezocone Penetration Test*) e o CPTU (piezocone) (10 cm²), comparando os resultados obtidos.

Esses ensaios foram também comparados com os realizados pelo National Geotechnical Experimentation Sites at Texas A & M University e a University of Houston.

Em cada um desses locais, a comparação entre os perfis dos testes MCPT, MPCPT e o CPT, indicaram o efeito de escala. Estes resultados de três locais diferentes, estão resumidos na Tabela 1.

TABELA 1. Efeito de escala no resultado dos ensaios (Tumay & Kurup, 1999).

Local dos ensaios	Prof. (m)	q_c(2cm²)/q_c(10cm²)	f_s(2cm²)/f_s(10cm²)
Highland Rd (1) Baton Rouge	4,5-7,5	1,10	0,89
NGES (2) Texas A&M Univ.	1,5-7,0	1,13	0,91
NGES (2) Univ. of Houston	1,0-8,5	1,11	0,87

(1) MCPT. (2) MPCPT.

A correção da resistência por atrito lateral [$f_{s(\text{cor})}$], devido à sensibilidade, foi investigada submetendo o minicone em testes de laboratório, que resultou, com base em análise estatística, na relação empírica seguinte:

$$f_{s(\text{cor})} = f_{s(\text{med})} + 0,015 \cdot [q_{c(\text{med})}]^{1/2} \quad (1),$$

onde, $f_{s(\text{med})}$ e $q_{c(\text{med})}$ são, respectivamente, o atrito lateral e a resistência de ponta medidas no ensaio. Esses resultados mostram que, apesar do efeito escala, existe uma relação entre valores de q_c e f_s medidos com os equipamentos com diferentes dimensões.

O sistema denominado CIMCPT (*Continuous Intrusion Miniature Cone Penetration Test*), conforme exposto anteriormente, foi desenvolvido para aplicações em transportes. O CIMCPT foi aprovado pelos testes realizados na Highland Road, em Baton Rouge e também, pelas pesquisas realizadas pelo National Geotechnical Experimentation Sites (University of Houston e pela Texas A&M University).

Os perfis de penetração obtidos, usando o minicone, mostraram a existência de efeitos de escala, quando comparados com perfis obtidos usando o cone padrão. A resistência de ponta do minicone foi 11% maior que a encontrada com o cone padrão. O atrito

lateral do minicone foi 11% menor que a atrito lateral do cone padrão.

Com essa pesquisa, Tumay & Kurup (1999) consideraram que a correção desses fatores pode ser facilmente resolvida utilizando programas de computador para o cálculo da resistência de ponta (q_c) e atrito lateral (f_s). Puderam também concluir que o CIMCPT, geralmente, produz um maior detalhamento do perfil geotécnico do que com uma sondagem com cone elétrico padrão (CPT).

Os resultados de testes realizados por Tumay & Kurup (1999) entre o minicone e o cone padrão de 10 cm^2 de área resultaram em um fator de multiplicação de 0,85 para corrigir a resistência a penetração do

minicone [$q_c (2 \text{ cm}^2)$] para o cone padrão [$q_c (10 \text{ cm}^2)$]. Portanto, tem-se:

$$q_c(10 \text{ cm}^2) = 0,85 \times q_c(2 \text{ cm}^2) \quad (2).$$

Para investigação da infra-estrutura de transportes, o minicone, pelas suas dimensões reduzidas, apresenta vantagens adicionais, pois não prejudica o pavimento rodoviário e ao atravessar a camada de lastro em ferrovia, pode ser protegido por um tubo guia. O minicone possibilita uma identificação com maior detalhamento das camadas do subsolo do que o piezocone padrão, conforme pode ser observado na Figura 5 (Tumay & Kurup, 1999). Além disso, o ensaio é mais rápido e mais prático de ser executado.

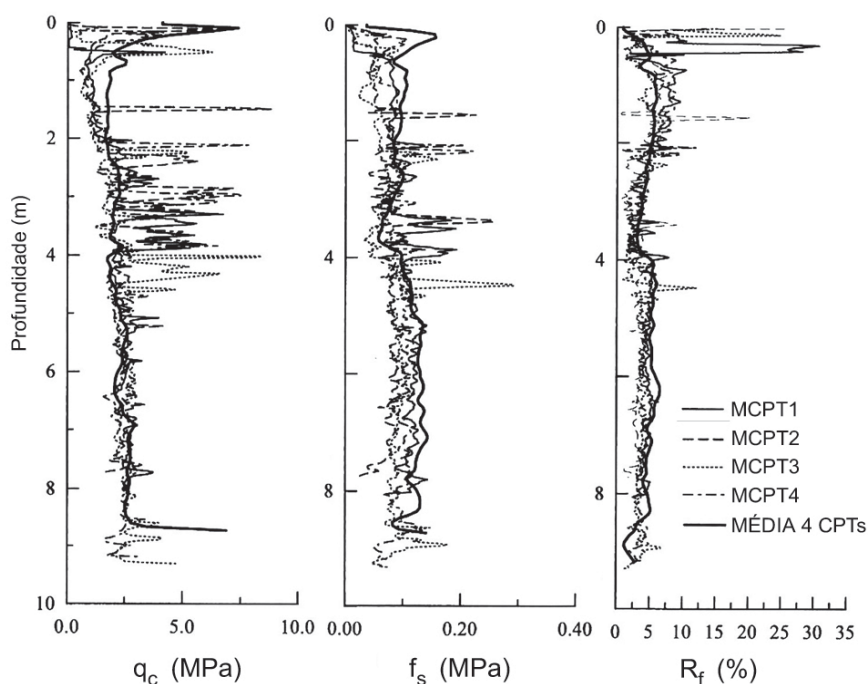


FIGURA 5. Comparação entre resultados de sondagens Mini-CPT e CPT (Tumay & Kurup, 1999).

Assim, com base nos estudos já realizados, pode-se considerar que:

- Segundo Tumay & Kurup (1999), o CIMCPT foi aprovado nos testes realizados na Highland Road, em Baton Rouge, Louisiana e também, em dois locais estudados do National Geotechnical Experimentation Sites (University of Houston e em argilas,

na Texas A & M University).

- Os perfis de penetração usando o minicone mostram a existência de efeitos de escala, quando comparados com perfis obtidos usando o cone padrão de 10 cm^2 . O CIMCPT geralmente produz maiores detalhes da estratigrafia dos solos atravessados, que os resultados obtidos pelo cone padrão (CPT).

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

EMPREGO DO PIEZOCONO NA INVESTIGAÇÃO GEOAMBIENTAL

Conforme descrito anteriormente, a utilização do piezocone permite determinar a resistência à penetra-

ção da ponta (q_c), o atrito lateral (f_s) e a poro-pressão (u) gerada durante sua penetração. Esses registros podem ser visualizados em tempo real na tela do computador, em gráficos da variação desses índices

com a profundidade, conforme ilustrado na Figura 6.

A partir da interpretação desses registros é possível identificar detalhadamente o perfil geotécnico. A base dessa interpretação é diferenciar a penetração drenada (areias e alguns siltes) da penetração não-drenada (argilas e maioria dos siltes). Observa-se, na Figura 6, a riqueza de informações que se pode obter numa sondagem com o piezocone de resistividade (RCPTU), onde todos os registros de q_c e R_f e u_2 se complementam e levam a identificação de um mesmo material (Daniel et al., 1999). A base para essa identificação são os ábacos de classificação, conforme aquele sugerido por Robertson et al. (1986). As medidas de poro-pressão auxiliam a identificação do comportamento drenado do não drenado e o prolongamento da reta de poro-pressão gerada numa penetração drenada permite a identificação da posição do

nível d'água. Os valores de resistividade ($R-150$) confirmam essa posição a cerca de 1,7 m de profundidade, pois se tem uma queda brusca na resistividade quando a corrente elétrica encontra menor resistência para caminhar na água. Há um decréscimo significativo na resistividade entre 13 e 21,5 m de profundidade dentro de uma camada uniforme de areia. Essa anomalia tem sido atribuída à intrusão de água salgada no aquífero (Campanella et al., 1998). Destaca-se ainda, nesse gráfico, que a resistividade varia com as modificações na textura e mineralogia do solo, mas ela é mais sensível às modificações que ocorrem na água que ocupa poros do solo. O emprego de uma sondagem RCPTU para localizar rapidamente a presença de contaminantes aumenta a eficiência de um programa de amostragem de água subterrânea para aplicação na área ambiental.

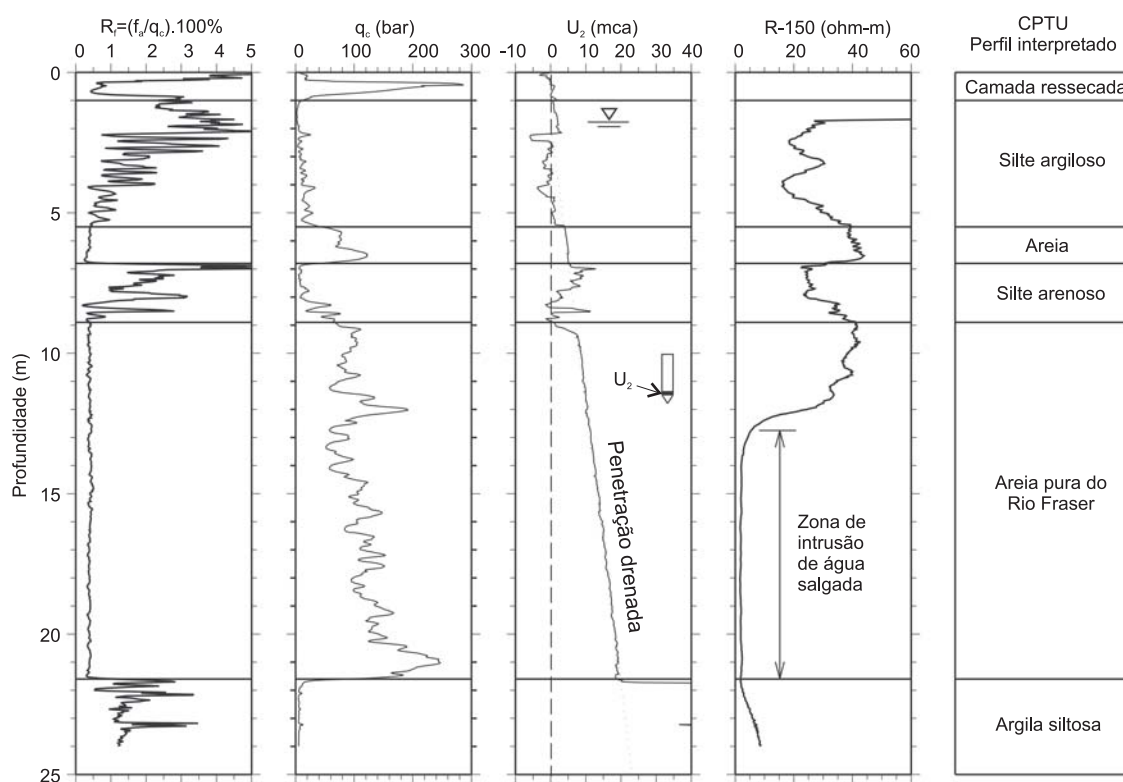


FIGURA 6. Resultado típico de uma sondagem RCPTU (Daniel et al., 1999).

Uma das principais aplicações do piezocone de resistividade relatada na literatura é a identificação da intrusão de água salina em aquíferos. Sondagens desse tipo e para essa finalidade foram recentemente realizadas na região litorânea do Paraná, Brasil. Na Figura 7 é apresentado o resultado de uma dessas sondagens que possibilitou identificar o perfil de um solo que ocorre nesse local. Nessa figura tem-se, além das informações obtidas de uma sondagem com o

piezocone, a variação da resistividade e da condutividade elétrica com a profundidade. A partir desse registro foi possível identificar a estratigrafia e especialmente localizar a região do maciço onde se concentra a água salina, entre cerca de 10 e 14 m de profundidade. Esta informação orientou a amostragem de água e a instalação de poços de monitoramento.

Nesse caso, a sondagem com o piezocone, além de fornecer um perfil geotécnico detalhado, compatível

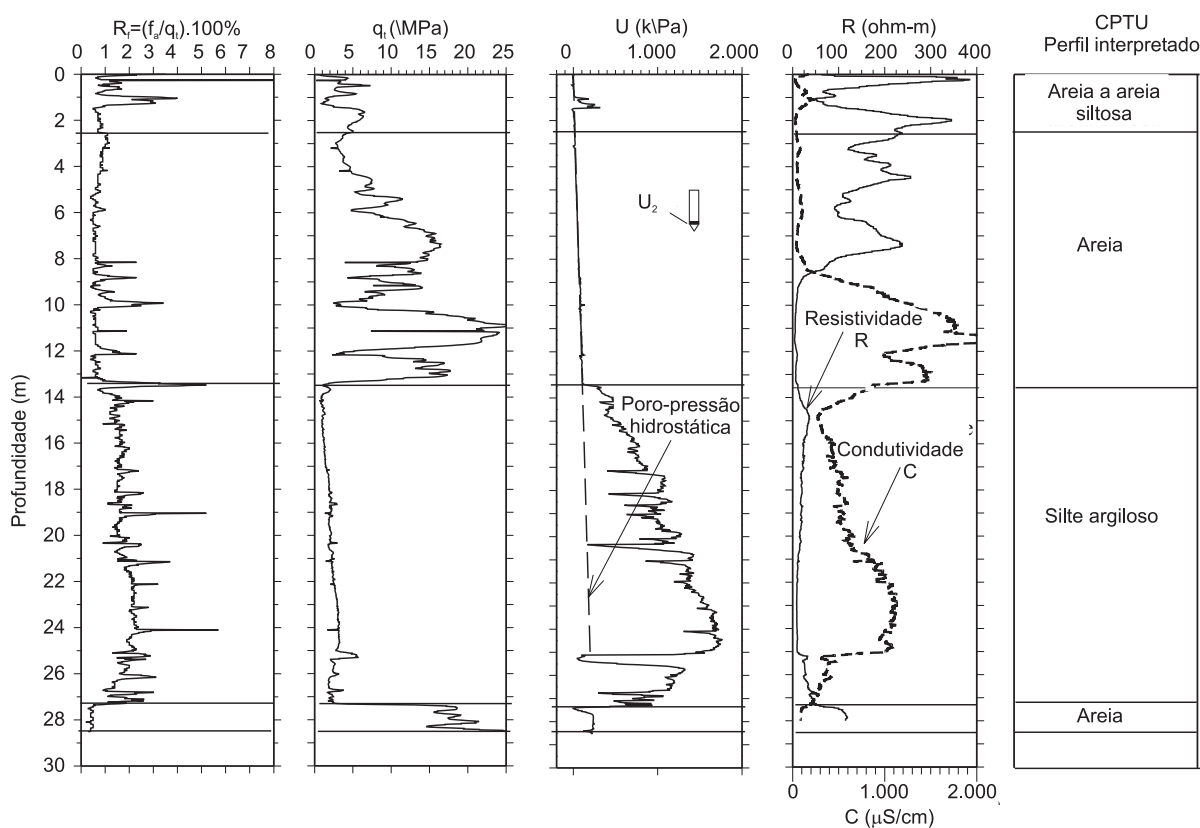


FIGURA 7. Resultado de uma sondagem RCPTU em área de intrusão de água salina no aquífero.

com as informações de sondagens de simples reconhecimento também realizadas no local, possibilitaram identificar camadas delgadas de areia e argila. Essas informações foram úteis, pois permitiram entender melhor como se dá a migração de fluidos e assim foi possível identificar os alvos de coleta de maneira mais precisa, com isso reduzindo, tanto a quantidade de ensaios em laboratório, como o tempo total gasto no programa de investigação.

EMPREGO DO MINICONE NA AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TALUDES

Resultados de Ensaio MCPT

Objetivando a análise das condições de estabilidade de talude de aterro rodoviário, foram realizados ensaios de campo com o minicone, na interseção da Rodovia Interstate-20 (I-20) com a Ferrovia Missouri Pacific, proximidades de Tallulah, no norte do Estado da Louisiana (USA).

Antes da realização dos ensaios, foi verificada a movimentação da massa do talude do aterro da estrada, com a formação de trincas de tração nos topos dos taludes. Essas movimentações poderiam colocar em risco a estabilidade da massa do aterro e, conseqüentemente, da pista de rolamento da rodovia.

Os testes foram realizados com o objetivo de

verificar as condições geotécnicas do perfil do aterro e procurar localizar a superfície potencial de movimentação de massa, para um estudo preventivo da estabilidade dos taludes.

Antes da realização dos ensaios, foi feito um levantamento topográfico com equipamentos eletrônicos (teodolito e nível), obtendo-se os perfis dos taludes após a movimentação. Com base na seção dos taludes próximos dos locais movimentados e em dados do projeto, obtiveram-se as seções dos taludes antes da movimentação (seção original). A seguir apresenta-se três seções obtidas do perfil do terreno com a movimentação (Figuras 8, 9 e 10). Nesses perfis são plotados as resistências de cone (q_c), atrito lateral (f_s) e razão de atrito (R_f).

Correlações entre os Resultados do MCPT e o CPT Padrão

A seguir, os resultados das sondagens realizadas com o minicone elétrico serão discutidas, especialmente com o objetivo de identificar a superfície de ruptura de um talude de aterro.

Segundo Tumay & Kurup (1999), para a identificação e classificação de solos pode-se corrigir os valores obtidos pelo minicone de 2 cm², para o cone padrão de 10 cm², utilizando as equações 1 e 2 (Tabela 1).

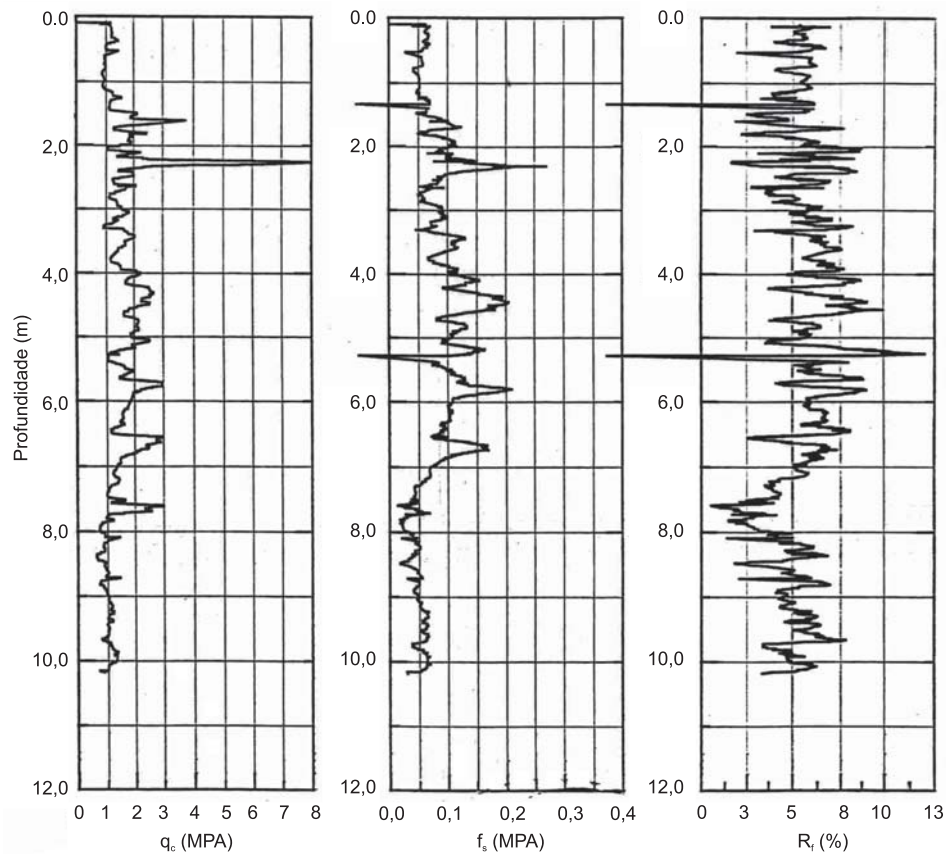


FIGURA 8. Resultado de ensaio CIMCPT na sessão 0 + 660 L, à esquerda do eixo da rodovia, a 4,0 m da lateral do acostamento – Ponto A (Tumay & Titi, 2000).

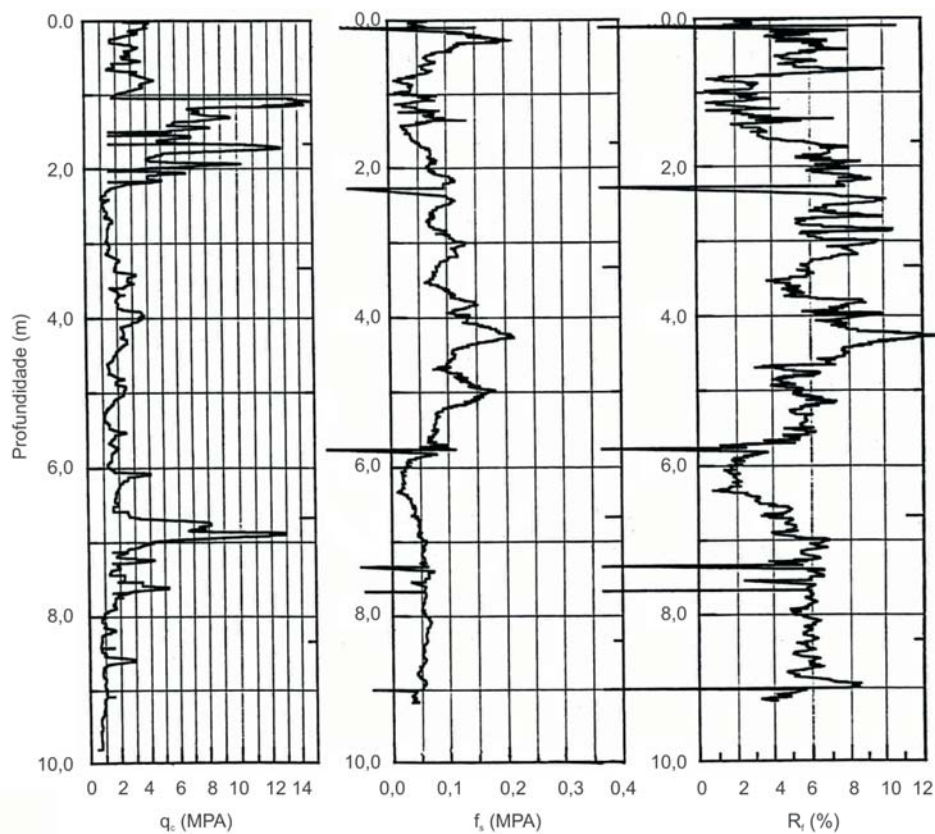


FIGURA 9. Resultado de ensaio CIMCPT na sessão 0 + 660 L, à esquerda do eixo da rodovia, a 10,0 m da lateral do acostamento – Ponto B (Tumay & Titi, 2000).

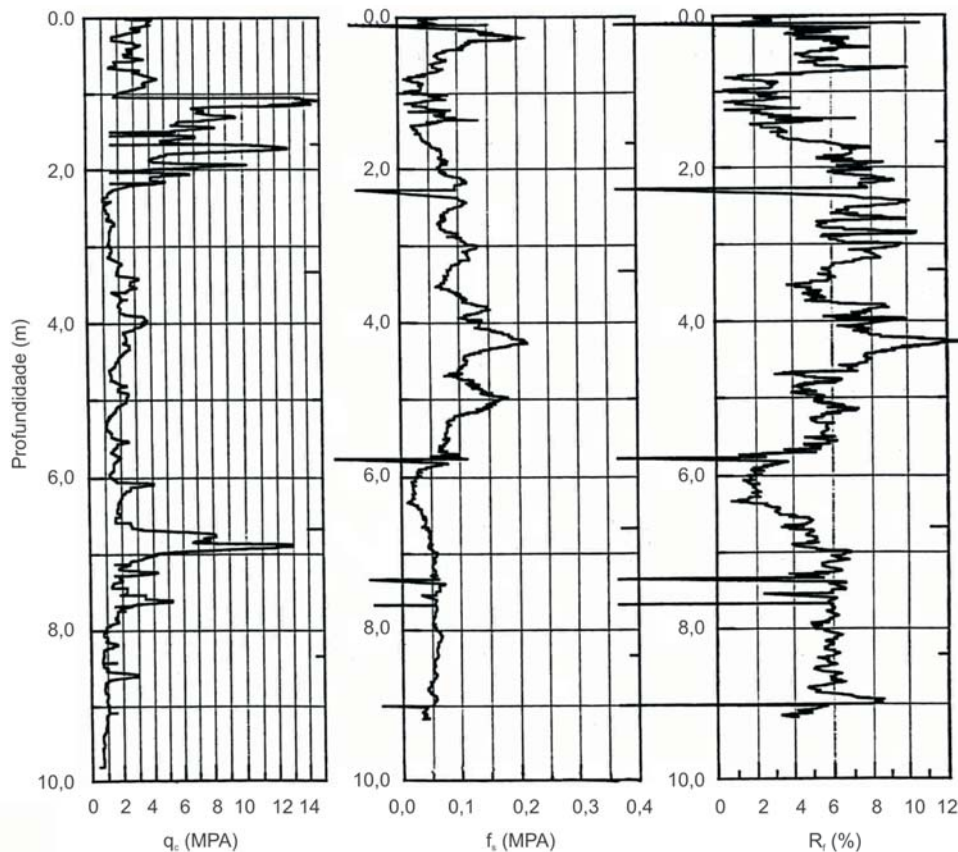


FIGURA 10. Resultado de ensaio CIMCPT na sessão 0 + 660 L, à esquerda do eixo da rodovia, a 16,5 m da lateral do acostamento – Ponto C (Tumay & Titi, 2000).

Analisando os valores médios da resistência de ponta, do atrito lateral e da razão de atrito, ao longo das seções pesquisadas, faz-se a identificação dos solos que ocorrem na subsuperfície dos taludes.

Classificação do Solo dos Taludes Estudados

Com os valores médios de q_c e f_s correlacionados com aqueles obtidos com o cone padrão (10 cm²) e utilizando a carta de classificação dos solos proposta por Robertson et al. (1986), da Tabela 1, tem-se como solo representativo desse perfil o seguinte:

Até 7,0 m de profundidade:

$$q_c(2 \text{ cm}^2)_{\text{med}} = 2,0 \text{ MPa},$$

$$f_s(2 \text{ cm}^2)_{\text{med}} = 0,10 \text{ MPa}$$

$$R_f = 4,9\%.$$

Portanto:

$$q_c(10 \text{ cm}^2) = 1,77 \times 2,0 = 3,5 \text{ MPa},$$

$$f_s(10 \text{ cm}^2) = 0,15 + 0,02 = 0,17 \text{ MPa}.$$

Assim o tipo de solo é: Zona 3 = Argila.

Nessas condições, a metodologia de classificação

do tipo de solo pelo minicone, admitindo válida a correlação com resultados de sondagens CPT, serve somente como uma estimativa dos materiais que ocorrem na subsuperfície, devendo, no atual estágio de conhecimentos, para maior segurança, proceder a coleta de amostras deformadas e a classificação através de ensaios de laboratório.

Análise e Estimativa das Superfícies de Ruptura dos Taludes

Cada seção dos taludes foi analisada em função do perfil topográfico e dos dados obtidos nos ensaios *in situ* pelo minicone. Como resultado dessas análises, foram gerados os perfis dos taludes, considerando cada ensaio realizado na seção.

De acordo com Tumay & Titi (2000), a superfície em processo de ruptura de talude pode ser estimada quando ocorre juntamente, a queda da resistência de ponta (q_c) e do atrito lateral (f_s).

Com os perfis topográficos e os dados do minicone, pode-se obter as seções estudadas, com a estimativa da superfície de movimentação (superfície potencial de ruptura), de cada local ensaiado (Figura 11).

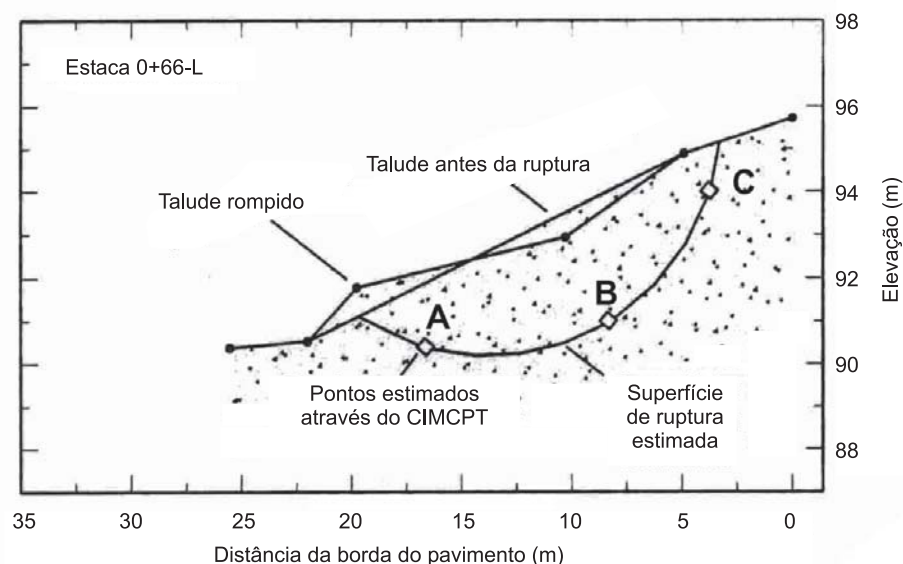


FIGURA 11. Seção 0+660L do talude, com estimativa da superfície de ruptura.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

ENSAIOS CPTU NA INVESTIGAÇÃO GEOAMBIENTAL

Nos países desenvolvidos tem sido crescente a aplicação da tecnologia do piezocone, especialmente para a investigação geoambiental. Na área ambiental essa tecnologia tem sido empregada para as mais diversas aplicações, como na investigação de contaminação provocada por barragens de rejeitos (Campanella & Davies, 1997), identificação de intrusão de água salgada em aquífero (Campanella et al., 1998), investigação de áreas com presença de contaminantes orgânicos, óleos pesados e creosoto (Campanella et al., 1994).

A principal característica da tecnologia do piezocone é a possibilidade de identificar com detalhes o perfil geotécnico a partir de ábacos de classificação e estimar parâmetros geotécnicos de cada camada (permeabilidade, compressibilidade e resistência ao cisalhamento). O uso de acessórios incorporados ao piezocone permite a obtenção de informações adicionais sobre a condutividade hidráulica, regime hidrológico e presença de contaminantes. Como a penetração do piezocone e dos acessórios se dá por cravação, sem necessidade de escavar material algum, tem-se uma amostragem “limpa”, reduzindo a contaminação do local investigado e a exposição do operador ao material contaminado.

ESTABILIDADE DE TALUDES COM O MCPT

Na área de infra-estrutura de transportes, estudos realizados por Kurup & Tumay (1998) e Tumay & Kurup (1999) têm demonstrado a viabilidade da

aplicação dessa metodologia para a caracterização e investigação do sub-grade de rodovias, controle de compactação de aterros e na avaliação das condições geotécnicas de rodovias e ferrovias existentes.

Conforme verificado no exemplo apresentado, o minicone, interpretado a partir da metodologia desenvolvida para ensaios CPT, produz resultados que podem ser utilizados para a estimativa do tipo de solo que ocorre em um perfil estudado, bem como para inferir a provável superfície de ruptura em taludes, em fase de instabilização.

Dessa forma, torna-se uma ferramenta prática e rápida, na avaliação das condições estruturais de maciços, em infra-estrutura de transportes, como em rodovias e ferrovias, entre outros.

Quanto à estratigrafia, conforme já demonstrado por Tumay & Kurup (1997), Tumay et al. (1998) e Tumay & Kurup (1999), esse equipamento possui uma maior sensibilidade que o cone padrão, podendo detectar com maior precisão, finas camadas de materiais diferentes, como argilas ou areias.

PERSPECTIVAS DE UTILIZAÇÃO NO BRASIL

Apesar da experiência adquirida com os métodos tradicionais de investigação do subsolo, estes apresentam uma série de desvantagens. Entre tais desvantagens, pode-se citar a falta de padronização, amostragem descontínua (muitas vezes fora da zona crítica), possibilidade de comprometimento da qualidade das amostras, geração de grande quantidade de material, o que se torna ainda mais crítico quando os ensaios

estão sendo realizados em áreas com ocorrência de contaminação. Assim, esses fatos tendem a aumentar o custo final do programa de investigação.

Novas técnicas de ensaios *in situ*, em especial aquelas que podem ser incluídas na tecnologia do piezocone, permitem uma investigação do subsolo mais completa. Portanto, o piezocone em suas várias formas e acessórios, possui uma vasta gama de aplicações na engenharia moderna, principalmente na área ambiental

e de infra-estrutura de transportes.

Em países tropicais existe um vasto campo para pesquisa visando a adequação dessa tecnologia para investigação e caracterização de solos tropicais. Acredita-se que com o passar do tempo e com um maior rigor e preocupação com as questões ambientais e de transportes, essa tecnologia deverá ser desenvolvida e empregada para utilização corrente em países de clima tropical, como o Brasil.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece aos Profs. Drs. R.G. Campanella e J.A. Howie a oportunidade de estagiar junto ao In Situ Testing Group da University of British Columbia, em Vancouver, no Canadá. O segundo autor agradece aos Profs. Drs. Mehmet T. Tumay e Emir J. Macari pelo estágio realizado no Department of Civil and Environmental Engineering e no Louisiana Transportation Research Center da Louisiana State University, Baton Rouge, USA. Agradecem ainda à FAPESP, pelo suporte durante seus programas de pós-doutorado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo – **Ensaio de penetração de cone *in situ* – CPT. Método de ensaio**. Rio de Janeiro: (MB-3406), CB-O2, 1991, 10 p.
2. AOKI, N. & VELLOSO, D.A. An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. In: PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 5, 1978, Buenos Aires. **Proceedings...** Buenos Aires: International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 1978, p. 367-376.
3. ASTM – AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **Standard test method for deep quasi-static, cone and friction-cone penetration tests of soils**. D-3441, 1986, p. 414-419.
4. CAMPANELLA, R.G. & DAVIES, M.P. In-situ testing for geo-environmental site characterization: a mine tailings example. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 14, 1997, Hamburg. **Proceedings...** Hamburg (Germany): International Association of Engineering Geology, 1997, v. 1, p. 43-46.
5. CAMPANELLA, R.G.; DAVIES, M.P.; BOYD, T.J.; EVERARD, J.L. In-situ testing methods for groundwater contamination studies. In: SYMPOSIUM ON DEVELOPMENTS IN GEOTECHNICAL ENGINEERING, 13, 1994, New Delhi. **Proceedings...** New Delhi: From Harvard to New Delhi, p. 1936-1994. [A.A. Balkema Publication, 1994, p. 371-382].
6. CAMPANELLA, R.G.; DAVIES, M.P.; KRISTIANSEN, H.; DANIEL, C. Site characterization of soil deposits using recent advances in piezocone technology. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SITE CHARACTERIZATION – ISC'98, 1, 1998, Atlanta. **Proceedings...** Atlanta, Georgia, 1998, p. 995-1000.
7. CHRISMER, S. & LI, D. Substructure investigation assessment: cone penetrometer test. **Railway Track & Structures**, October 1997, p. 11-15.
8. CODUTO, D.P. **Foundation design: principles and practice**. New Jersey: Prentice Hall, 1994, 796 p.
9. DANIEL, C.; GIACHETI, H.L.; CAMPANELLA, R.G.; HOWIE, J.A. Resistivity piezocone: data interpretation and potential applications. In: PANAMERICAN CONFERENCE OF SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING, 11, 1999, Foz do Iguaçu, PR. **Proceedings...** São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica do Solo e Engenharia/International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 1999, v. 1, p. 361-368.
10. DAVIES, M.P. & CAMPANELLA, R.G. Piezocone technology: downhole geophysics for the geo-environmental characterization of soil. In: SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS TO ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS, SAGEEP'95, 1995, Orlando. **Proceedings...** Orlando (Florida, USA), 1995, 11 p.
11. DE RUTIER, J. Electric penetrometer for site investigations. American Society Civil Engineers (ASCE), **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, v. 97, SM2, p. 457-473, 1971.
12. DE RUITER, J. Current penetrometer practice. In: SYMPOSIUM CONE PENETRATION TESTING AND EXPERIENCE, October 26-30, 1981, St. Louis. **Proceedings...** St. Louis: American Society of Civil Engineers (ASCE), National Convention, 1981, p. 1-48.
13. DOUGLAS, B.J. & OLSEN, R.S. Soil classification using electric cone penetrometer. In: SYMPOSIUM CONE PENETRATION TESTING AND EXPERIENCE, October 26-30, 1981, St. Louis. **Proceedings...** St. Louis: American Society of Civil Engineers (ASCE), National Convention, 1981, p. 209-227.
14. ESQUIVEL, E.R. **Piezocone testing: centrifuge modeling and interpretation**. Boulder, 1995. 260 p. Thesis (Ph.D.) – University of Colorado at Boulder, Boulder (Colorado, USA).
15. KURUP, P. & TUMAY, M.T. Calibration of a miniature cone penetrometer for highway applications. Calibration of in situ test methods for transportation related structures design. In: MEETING, TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 77, 1998, Washington D.C. **Proceedings...** Washington: American Society for Testing Materials, 1998, p. 11-15.
16. LUNNE, T.; ROBERTSON, P.K.; POWELL, J.J.M. **Cone penetration testing in geotechnical practice**. London (England), Blackie Academic & Professional, Chapman & Hall, 1ª ed., 1997, 312 p.

17. MEIGH, A.C. **Cone penetration testing: methods and interpretation**. London, CIRIA ground engineering report: in-situ testing. Butterworths, 1987, 141 p.
18. MUNIZ, W. Diretrizes básicas para um projeto final de engenharia ferroviária. São Paulo, **Revista Ferrovia**, Maio/Junho, p. 21-26, 1978.
19. QUARESMA, A.R.; DECOURT, L.; QUARESMA FILHO, A.R.; ALMEIDA, M.S.S.; DANZIGER, F. Investigações geotécnicas. In: HACHICH, W.; FALCONI, F.; SAES, J.; FROTA, R.; CARVALHO, C.; SUSSUMU (Coordenadores), **Fundações: teoria e prática**. São Paulo, Editora PINI, Cap. 3, 1996, p. 119-162.
20. ROBERTSON, P.K. Geo-environmental investigation, characterization and monitoring using penetration techniques. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, SIGA 98, 1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 1998, CD-ROM.
21. ROBERTSON, P.K. Soil classification and using the cone penetration test. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 27, n. 1, p. 151-158, 1990.
22. ROBERTSON, P.K. & CAMPANELLA, R.G. **Guidelines for geotechnical design using CPT and CPTU data**. Report, Federal Highway Administration (FHWA), 1988, 340 p.
23. ROBERTSON, P.K.; CAMPANELLA, R.G.; GILLESPIE, D. & GREIG, J. Use of piezometer cone data. In: SPECIALTY CONFERENCE IN SITU'86: USE OF IN SITU TEST IN GEOTECHNICAL ENGINEERING, 1986, Blacksburg. **Proceedings...** Blacksburg (USA), American Society of Civil Engineers (ASCE), p. 1263-1280.
24. SAUVAGE, R. **Obras ferroviárias: novo conceito de via permanente**. São Paulo, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos (ABMS), 1981, 50 p. Tradução, n. 2.
25. SCHMERTMANN, J.H. Guidelines for cone penetration test, performance and design. Washington (DC), Federal Highway Administration (FHWA), Report, n. TS-787-209, 1978.
26. TUMAY, M.T. & DE LIMA, D.C. **Calibration and implementation of miniature electronic cone penetrometer and development, fabrication and verification of the LSU in situ testing calibration chamber**. Washington: Louisiana State University Calibration Chamber – LSU CALCHAS/Louisiana Transportation (LTRC) / Federal Highway Administration (FHWA), Report, n. GE-92/08, 1992, 240 p.
27. TUMAY, M.T. & KURUP, P.U. **Calibration and implementation of miniature electronic cone penetrometer for road and highway design and construction**. Washington: Federal Highway Administration/Louisiana Transportation Research Center, Louisiana State University/ Federal Highway Administration (FHWA), Report, n. LA 97/305, 1997, 91 p.
28. TUMAY, M.T. & KURUP, P.U. **A continuous intrusion miniature cone penetration test system for transportation applications**. Washington, Federal Highway Administration (FHWA), Louisiana Transportation Research, Report, 1999, n. LA 88/311, 60 p.
29. TUMAY, M.T., KURUP, P.; BOGGESS, R.L. A continuous intrusion electronic miniature cone penetration system for site characterization. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SITE CHARACTERIZATION – ISC'98, 1, 1998, Atlanta. **Proceedings...** Atlanta, Georgia: Geotechnical Site Characterization, 1998, v. 2, p. 1183-1188.
30. TUMAY, M.T. & TITI, H.H. Louisiana continuous intrusion miniature cone penetration test (CIMCPT) system. Washington (D.C.), **TR News**, 2000, n. 205, 6 p.
31. US EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Seminar on Site Characterization for Subsurface Remediations**. Washington, Technology Transfer, Report, 1989, n. CER-89-224, 350 p.