

Catálogo na Publicação (CIP)

F977p NEGRO, Arsenio, (ed.) et al.
 Seminário Twin Cities: Solos das Regiões Metropolitanas de São Paulo e Curitiba / Arsenio Negro; Makoto Namba; Vivian Leme Sanches; Andrea Sell Dyminski; Alessandro Christopher Moraes Kormann, (Editores). – São Paulo : D'Livros, 2012.

512 p.; 17 x 24 cm.
 ISBN: 978-85-86438-40-0

1. Mecânica dos solos. 2. Engenharia geotécnica. 3. Geologia.
 I. Autores: FIORI, Alberto Pio et al. II. Título.

CDU: 624.131

9. Investigações de Campo 215
Arthur Quaresma Filho, Antonio Sérgio Damasco Penna e Paulo J. R. Albuquerque

Tema III: Fundações em São Paulo e Curitiba

10. Fundações Diretas na Região de Curitiba 233
Ney Augusto Nascimento, José Luiz Brandl e Rogério Francisco Puppi

Capítulo 9 - Investigações de Campo

A. Quaresma Filho

Engenheiros Engenharia de Solos e Fundações, São Paulo, SP, Brazil

A. S. D. Penna

Damasco Penna Engenharia Geotécnica, São Paulo, SP, Brazil

P. J. R. Albuquerque

Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brazil

RESUMO: Neste capítulo serão abordadas as técnicas de investigação de campo comumente utilizadas na região metropolitana de São Paulo, desde as técnicas mais simples até as mais complexas. São descritos os processos executivos, obtenção dos dados e compilação.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o Brasil tem apresentado um crescimento elevado em suas obras, tendo em vista o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) criado pelo Governo Federal para impulsionar a economia do país, além das obras para a realização da Copa do Mundo de Futebol (2014) e as Olimpíadas do Rio de Janeiro (2016). São construções de grande porte como estaleiros, refinarias, barragens, parques eólicos, portos, estádios de futebol entre outros.

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) que compreende 29 municípios, incluindo a cidade São Paulo, tem aproximadamente 20 milhões de habitantes e 8.000 km² de área. Tendo em vista se tratar do centro financeiro e de contar com o maior parque industrial do país, também apresenta elevado índice de investimentos por parte da iniciativa pública como privada, refletindo na construção de empreendimentos de elevado porte. Estes requerem projetos geotécnicos em grande parte complexos, tendo em vista os tipos de carregamentos e às características do subsolo, sendo que na maioria dos casos a área construída é grande requerendo um programa investigação do subsolo que possa investigar uma grande área em pouco tempo, mas que também que forneça parâmetros geotécnicos de qualidade, o que pode-se traduzir no emprego das técnicas de investigação de campo.

A investigação de campo é uma das ferramentas mais utilizada pelos engenheiros geotécnicos, pois a partir de determinadas técnicas é possível obter variados parâmetros geotécnicos para aplicação em projetos de fundações, contenções, escavações etc.

Das técnicas empregadas podem-se utilizar aquelas que utilizam-se ferramentas simples, como por

exemplo, os trados até as mais complexas, como por exemplo, os ensaios pressiométricos. Desta forma, apresentam-se neste capítulo as variadas técnicas de investigação de campo empregadas na região.

2. SONDAGEM A TRADO

Trata-se da forma mais simples de investigar o subsolo. Utiliza-se uma ferramenta que apresenta diversas geometrias de corte do solo, que é escolhida de acordo com a necessidade. A perfuração em geral é feita de forma braçal ou também com auxílio de motor. Os modelos mais utilizados de trado são: cavadeira, helicoidal e espiral. A profundidade de perfuração depende da resistência do solo e do comprimento de haste disponível.

3. SONDAGEM DE SIMPLES RECONHECIMENTO (SPT)

O SPT (Standard Penetration Test) permanece até a data desta publicação como sendo o ensaio principal para a elaboração de projetos de fundações na região da Grande São Paulo e no Brasil. O processo é preconizado pela NBR 6484/2001 que deverá estar em revisão até o momento em que for publicado este artigo. A revisão se faz necessária para contemplar novas técnicas de execução do ensaio, como o SPT Automático e revisão de critérios fixados pela norma em vigor.

O SPT é utilizado para a determinação das seguintes informações:

- N_{SPT} - Índice de Resistência à Penetração a cada metro de profundidade;
- Tipo de solo na região perfurada;

- Profundidade provável do nível do lençol freático.

Com auxílio de uma torre de aço com aproximadamente 6 (seis) metros de altura e auxílio de roldanas e cordas, ergue-se um peso de 65 kg (sessenta e cinco) a uma altura de 75 cm (setenta e cinco). Libera-se o peso para que caia em queda livre sobre uma composição de hastes que tem em sua extremidade inferior um amostrador padrão. Repete-se esta operação tantas vezes quantas forem necessárias para que haja penetração de 45 cm (quarenta e cinco) do amostrador padrão no solo. O número de golpes para que isto ocorra é contado, em separado, para cada trecho de 15 cm (quinze) de penetração do amostrador no solo. O resultado da soma do número de golpes dos últimos 30 (trinta) cm corresponderá ao N_{SPT} . O ensaio é realizado de metro em metro.

A NBR 6484/2001 aborda diversos outros pontos que dizem respeito à realização do ensaio, entre eles:

- Dimensionamento das hastes,
- Dimensionamento do amostrador padrão,
- Tipo de corda e método para erguer o martelo (peso de 65kg),
- Identificação das amostras,
- Critérios de paralização,
- Determinação do NA,
- Número de sondagens por área de terreno.

Algumas considerações são de extrema importância na execução de trabalhos de sondagem:

- A locação dos pontos deve sempre estar amarrada a um levantamento planialtimétrico da obra. Em especial, cada ponto de sondagem deve estar nivelado com relação à referência de nível – RN constante neste mesmo levantamento planialtimétrico.
- Quando da utilização de lamas de estabilização da parede do furo de sondagem deve-se anotar no relatório que apresentará os resultados ao cliente.
- A posição do nível d'água, quando encontrado no terreno, deve ser anotada desde seu surgimento e acompanhada de maneira que esta informação seja a mais fidedigna possível.
- A classificação dos solos deve seguir norma específica. Deve ser feita por Engenheiro ou Geólogo experiente e habituado com este tipo de classificação táctil-visual. Em caso de dúvidas, quando muito próximo dos limites de horizonte entre um tipo de material ou outro, recomenda-se a execução de um ensaio de granulometria por sedimentação para eliminar dúvidas.

Sendo o ensaio SPT a base de dado para um estudo e projeto de fundações cabe ressaltar que este método tem limitações. Estas limitações devem sempre ser lembradas e os ensaios complementados por outros mais específicos, conforme cada caso. Descreve-se a seguir alguns destes cuidados:

- Nível d'água, por exemplo, sempre que determinante para o projeto de fundação deverá ser aferido através da abertura de um poço de inspeção de maior diâmetro para diminuir os efeitos da pressão atmosférica sobre a determinação da sua correta profundidade.
- Índice de resistência determinado pelas sondagens (N_{SPT}), quando da ocorrência de grandes cortes no terreno, pode variar. Sondagens executadas lado a lado em um mesmo terreno, porém, em cotas diferentes, ou seja, antes e depois de um corte, poderá apresentar o N_{SPT} significativamente diferente dado o comprimento das hastes em cada uma destas sondagens e as questões de energia envolvidas no processo.
- Critério de paralização das sondagens é previsto para o tipo de amostrador preconizado na NBR 6484/2001. Em outras palavras, em solos de alteração de rocha podemos ter a cravação do amostrador padrão, por menor que esta seja, e não atingir o limite da norma. De outro lado, quando da escavação para certos tipos de estacas, os equipamentos encontram extrema dificuldade para avançar os furos. Este é uma dos itens que poderá ser reexaminado quando da revisão da norma em vigor.

3.1 Sondagem de Simples Reconhecimento com Leitura de Toque (SPT-T)

Em 1988 Artur Quaresma Filho (Engesolos Ltda), provocado por Stelvio Ranzini e Luciano Décourt, desenvolveu um dispositivo simples que permitiu medir a resistência lateral que um amostrador padrão SPT (NBR 6484/2001). Com auxílio de um torquímetro, uma chave soquete, ambos utilizados em mecânica de máquinas e veículos e, ainda, de um tarugo sextavado para conexão às hastes de cravação, aplica-se um movimento de rotação às hastes através do braço do torquímetro e anota-se o valor máximo registrado pelo relógio de medição acoplado a este. Este valor corresponde à resistência máxima e a residual oferecida pela composição de hastes para vencer o atrito lateral sobre o amostrador padrão após a realização do ensaio SPT.

A partir deste período diversos autores passaram a analisar e publicar dados de comparações entre o atrito lateral do amostrador SPT e o possível comportamento do atrito lateral em estacas para os mais diversos tipos de solos e profundidades.

Décourt & Quaresma Filho (1991) apresentaram correlações entre o torque obtido no SPT-T e o N_{72} para solos sedimentares e residuais.

$$T \text{ (kgf.m)} = 1,10N_{72} \text{ (sedimentares)}$$

$$T \text{ (kgf.m)} = 1,84N_{72} \text{ (residuais)}$$

Décourt (1991) apresenta uma nova relação T/N para solos da bacia sedimentar de São Paulo, modificando de 1,1 para 1,2. Desta forma, é possível calcular o N_{eq} a partir do valor do torque dividido por 1,2.

Peixoto (2001) desenvolveu uma pesquisa em que fabricou um torquímetro elétrico que foi testado em vários campos experimentais de fundações, inclusive aquele localizado na Universidade de São Paulo. Na Figura 1 é possível observar a locação dos furos de sondagem e na Figura 2 os valores de N_{SPT} máximos e mínimos. Apresenta-se a seguir alguns resultados obtidos nos ensaios realizados no local.

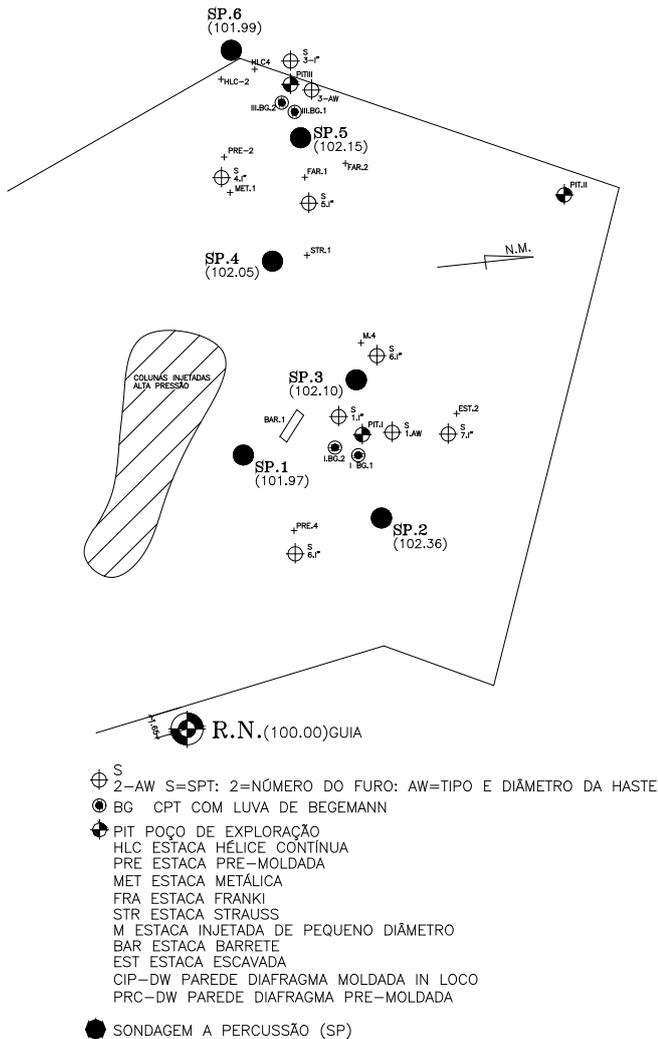


Figura 1 – Locação dos furos de sondagem (Peixoto, 2001)

De acordo com Peixoto (2001) este Campo Experimental apresenta solo predominantemente residual, constituído de silte muito arenoso com pouca argila. Os valores de torque e índice de resistência à penetração são altos, logo nos primeiros metros (N_{SPT} entre 9 e 20, $T_{máx}$ entre 18kgf.m e 35kgf.m). Assim, os valores de torque máximo e residual estão bem definidos nas curvas, como pode ser observado nas curvas das Figuras 2, 3 e 4.

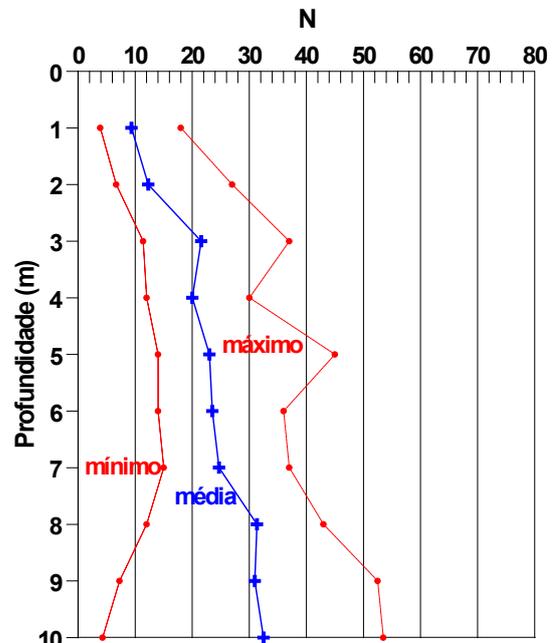


Figura 2 – Valores de N_{SPT} máximos e mínimos (Peixoto, 2001).

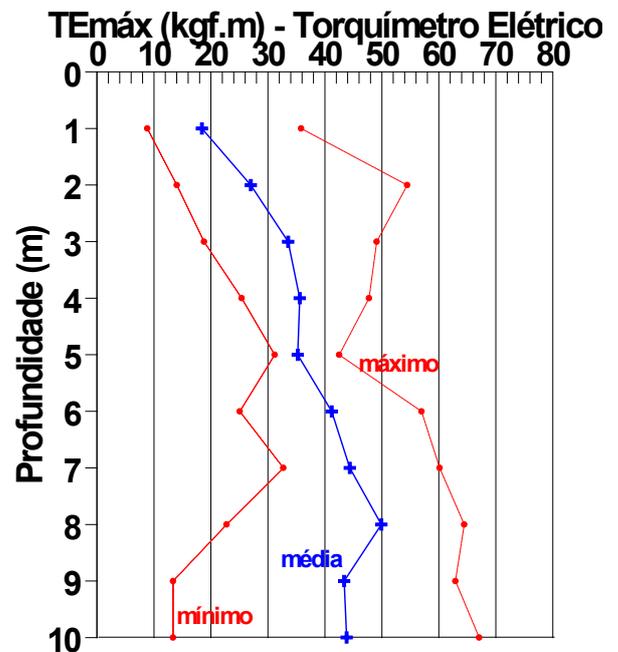


Figura 3 – Valores de $T_{máx}$ máximos e mínimos obtidos do torquímetro elétrico (Peixoto, 2001).

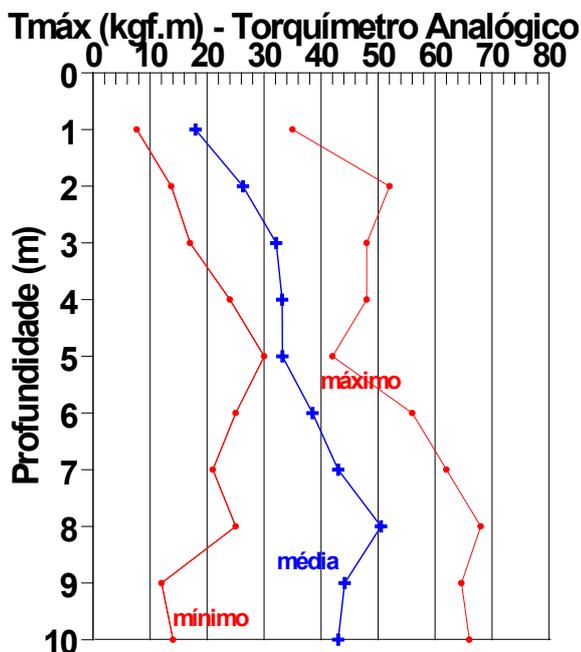


Figura 4 – Valores de Tmáx máximos e mínimos obtidos do torquímetro analógico (Peixoto, 2001).

Analisando os resultados obtidos através do torquímetro elétrico e o analógico à partir de análises estatísticas, Peixoto (2001) concluiu que os resultados obtidos são iguais.

Apresenta-se a seguir a variação do torque em função do número de voltas do torquímetro (Figura 5). Nota-se que a parti de meia volta (180°) os valores de torque tornam-se praticamente constantes.

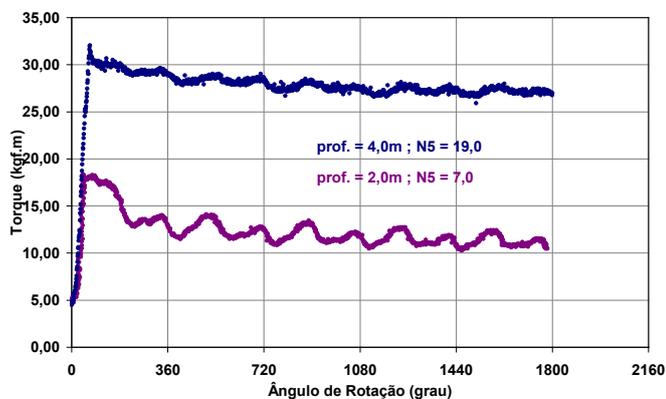


Figura 5. Curva típica para a camada silte muito arenoso, pouco argiloso (Peixoto, 2001).

3.2 Sondagem de Simples Reconhecimento – Automático

Largamente utilizado nos Estados Unidos e em outros países é ainda insipiente no Brasil. O primeiro equipamento para realização deste ensaio foi importado pela Engesolos – Engenharia de Solos e Fundações Ltda, de São Paulo, em 1997. Posteriormente tem-se notícia de importação de outros equipamentos. No total estima-se que haja hoje um número de equipamentos inferior a 10 (dez) equipados com martelo automático para realização de sondagens SPT.

Um martelo hidráulico de 65 kg (sessenta e cinco) é erguido através de um sistema hidráulico. Um gatilho libera o martelo para a queda de 75 cm (setenta e cinco), automaticamente. A queda do martelo é livre.

É possível executar-se uma sondagem a percussão para realização do ensaio SPT da mesma forma como preconiza a NBR 6484/2001. Porém, os equipamentos que suportam este tipo de martelo automático permitem a perfuração do solo com auxílio de trados ocos e são extremamente mais produtivos que os equipamentos manuais preconizados pela NBR 6484/2001.

Estudos acadêmicos foram realizados desde 1997 para avaliar eventuais diferenças de resultados entre os dois métodos: manual e mecânico. Não faz parte desta publicação a abordagem destes estudos, mas em tese concluiu-se que eventuais diferenças no índice N_{SPT} não interferem na utilização dos dados obtidos por este processo. O grande óbice para a sua utilização está no fato do método não estar previsto em Norma Brasileira. Pretende-se que a NBR 6484/2001 ao ser revisada passe a contemplar este método de execução.

4. Sondagem MISTA

Trata-se da combinação da sondagem de simples reconhecimento à percussão (SPT) e da sondagem rotativa. É comumente utilizada em formações de terreno que apresentam trechos onde é possível a realização de ensaios SPT e obstáculos rochosos ou camadas de solo impenetrável às ferramentas de percussão seguidos de solo onde novamente há possibilidade de se realizar o ensaio SPT.

4.1 Sondagem Rotativa

É realizada em solos impenetráveis pelo equipamento de sondagem a percussão. As sondagens rotativas empregam um equipamento mecânico-hidráulico para a perfuração do solo. No trecho de alteração de rocha utiliza-se uma coroa de vídea para cortar o terreno e avançar o furo. No trecho de rocha utiliza-se um “barrilhete” (amostrador para rocha) que leva na extremidade dianteira uma coroa de diamantes para corte da rocha. As “manobras” de perfuração são correspondentes ao comprimento do barrilhete. Como resultado obtemos, entre outros:

- Tipo de formação rochosa,
- Condição do maciço rochoso através da porcentagem de recuperação das amostras (índice RQD),
- Fraturas da rocha no trecho ensaiado,
- Orientação dos testemunhos,
- Ensaios de estanqueidade do maciço.

5. AMOSTRAGEM

Quando um volume de solo precisa ser caracterizado, normalmente não existe a possibilidade de que todo ele seja examinado, sendo necessário que amostras do mesmo sejam coletadas. Essas amostras devem ser as mais representativas possíveis do material original ou área a ser caracterizada.

De acordo Stancati et al. (1984), a confiabilidade dos ensaios em solo está diretamente relacionada com a representatividade e a qualidade da amostra retirada de solo, para isto devem ser tomados cuidados no processos de coleta para que se mantenha a estrutura, teor de umidade e textura.

As amostras podem ser do tipo deformadas e indeformadas, no primeiro tipo procura-se ter um material que apresente representatividade quanto a sua textura e mineralogia, e são utilizados principalmente em ensaios de classificação, por outro lado no segundo tipo procura-se manter a estrutura do solo e umidade, além das características apresentadas anteriormente.

5.1. Amostra Deformada

As amostras deformadas podem ser coletadas por meio do uso de escavações através de trados quando necessita-se obter o material em profundidade ou através do emprego de pá e picareta quando se pretende obter um solo superficial. Em geral o solo é colocado em sacos de lona identificados para serem enviados ao laboratório. Outra possibilidade de retirar esse tipo de amostra é a partir do emprego de sondas tubulares com liners (interior invólucros de amostragem reutilizáveis ou não), são recomendáveis quando pretende-se amostrar solos contaminados com substâncias voláteis.

Os equipamentos manuais podem ser utilizados em solos fofos ou moles macios, até ligeiramente compactos e duros, atingindo uma profundidade máxima de amostragem de 1 m. No aparelho mecanizado, os tubos de amostragem (barrilhetes) também são abertos em um dos lados e são conectados por meio de adaptadores a um martelo de percussão ou hidráulico. Esse equipamento pode ser utilizado em uma grande variabilidade de solos, entretanto não é recomendado para solos com grandes quantidades de cascalho. A profundidade de amostragem é bem superior ao equipamento manual, podendo chegar a até 30 m.

5.2. Amostra Indeformada

Em raras exceções os trabalhos de prospecção mecânica são acompanhados da coleta de amostras, sua coleta exige cuidados especiais que deverá ser

desde sua proteção até o transporte para o laboratório. Em solos argilosos, os amostradores mais simples utilizados em sondagens consistem num tubo aberto em uma das extremidades e fechada na outra, dependendo a escolha do amostrador mais adequado à resistência do terreno à sua penetração.

Na região metropolitana da cidade de São Paulo em geral empregam-se os amostradores Shelby e Denison para a coleta de amostras. Apresenta-se a seguir de forma sucinta os procedimentos empregados para execução destes tipos de amostradores.

- Shelby → é um amostrador de parede fina constituído de material resistente e anti-corrosivo normalmente empregado em locais de ocorrência de solos argilosos moles. É um tubo de latão ou aço inoxidável de espessura reduzida ligado a um cabeçote dotado de válvula para escape do ar e água. Sua introdução no terreno deve ser estaticamente e com velocidade constante. São coletas utilizando amostrador com pistão semi-estacionário, cravado por um equipamento tipo penetrômetro que deve possuir capacidade de reação (ancoragem) e capacidade de pressão hidráulica. Durante a penetração da camisa, o penetrômetro deverá manter a velocidade constante de $20\text{mm/s} \pm 5\text{mm/s}$. até a cota final de amostragem. Retirado o amostrador do interior da perfuração, desacopla-se a composição de hastes e executa-se a selagem das extremidades com parafina. As amostragens tipo “Shelby” são feitas de acordo com os padrões estabelecidos nas normas NBR 9820 e norma americana ASTM D1587/08 *Standard Practice for Thin-Walled Tube Sampling of Soils for Geotechnical Purposes*.
- Denison → é um amostrador de parede dupla utilizado com equipamento rotativo, contendo no seu interior um terceiro tubo (camisa) em geral de latão, onde a amostra é coletada e um tubo externo, única peça móvel no barrilhete, contendo na sua ponta uma sapata cortante em dente de serra. O tubo interno fica imóvel e tem em uma de suas extremidades uma sapata cortante em forma de bisel. A diferença entre os tubos interno e externo, incluindo as sapatas é de 1 cm para evitar a penetração de água de lavagem na amostra. Este tipo de amostrador é normalmente utilizado em solo de determinada resistência e geralmente em camadas abaixo do lençol freático. Recomenda-se não utilizar em solos que contenham pedregulhos ou fofos. É necessário o emprego de perfuração rotativa com utilização de tubo de revestimento. A pressão para o amostrador penetrar no solo deve ser compatível com a capacidade de corte da sapata do tubo externo. A pressão da bomba que injeta a água no interior da sondagem deve ser tal que traga todo

material em suspensão para a superfície. Após a extração remove-se uma determinada quantidade de solo das extremidades da camisa e em seguida protege-se com parafina, para em seguida ser transportado para o laboratório.

5.3 Água (poços de monitoramento)

Nas décadas de 80 e 90 quando se iniciaram os primeiros estudos do monitoramento da contaminação da água subterrânea, recomendava-se a instalação de poços com seção filtrante única, geralmente longa, variando entre 3 (três) a 9 (nove) metros de comprimento, como um retrato em miniatura dos poços de captação de água e acreditava-se que a pluma de contaminação possuía uma distribuição vertical homogênea. Até então, imaginava-se que a concentração medida nas amostras coletadas nestes poços era representativa da concentração da pluma dissolvida no aquífero interceptado por toda a seção filtrante do poço.

Estudos mais recentes indicaram que estas amostras não representavam as plumas existentes na formação e sim, produziam amostras compostas que mascaravam a verdadeira distribuição vertical das plumas de contaminantes dissolvidas no aquífero. Concluiu-se, então, que a distribuição vertical estratificada dos contaminantes nos aquíferos é uma regra e não uma exceção. A partir desta conclusão verificou-se a necessidade de um mapeamento tridimensional da água subterrânea que deve ser implantado em função de um Programa de Monitoramento e Amostras de Água Subterrânea.

Para um programa de monitoramento e amostras de água subterrânea faz-se necessário à caracterização da área através do conhecimento da geologia, hidrogeologia e a geoquímica dos contaminantes alvos, assim como, o design e instalação do sistema de monitoramento em função do posicionamento espacial dos poços de monitoramento e vertical das seções filtrantes. Necessita-se, também, da definição do programa de amostragem, onde se levará em conta a frequência das amostras, método de amostragem a ser seguido e os procedimentos de coleta e manuseio das amostras. Como objetivos genéricos de um plano de amostragem podem-se citar:

- detecção da presença de contaminantes no aquífero,
- determinar a fonte ou fontes de contaminação,
- delimitar a extensão da contaminação, a concentração dos contaminantes, a taxa e a direção de sua movimentação,
- determinar a tendência do comportamento da contaminação,
- determinar a susceptibilidade de impacto da contaminação sob os receptores potenciais

- determinar a eficiência das ações de remediação

Desta forma recomenda-se que o desenvolvimento do projeto e construção dos poços de monitoramento tenha como base o modelo conceitual hidrogeológico ou em modelos conceituais previamente definidos em função da etapa de investigação e gerenciamento da área.

Diversos sistemas de monitoramento multinível podem ser empregados como o Westbay MP System, Solinst Waterloo System, Solinst CMT System, Water FLUTE Method, porém, no Brasil estas técnicas raramente são empregadas. Os poços de monitoramento multinível podem ser instalados de diversas maneiras e diâmetros, sendo que o mais comum no Brasil, em função da litologia encontrada e das técnicas e equipamentos utilizados, são os denominados Well Clusters (Poço multinível em furo individual). Trata-se de um grupo de poços individuais, normalmente no diâmetro de 2", com a seção filtrante curta (1 metro) instalada em diferentes profundidades de interesse, estando um ao lado do outro (máximo 1 metro de distância entre si).

Após a instalação dos poços de monitoramento de maneira adequada, efetua-se as amostras de água, sendo que atualmente a metodologia mais empregada no Brasil é a denominada Low Flow ou Baixa Vazão ou Micropurga e refere-se à velocidade com que a água entra na captação da bomba com o objetivo de se obter uma amostra representativa do aquífero, minimizando uma possível perda de compostos de interesse. Durante a micropurga alguns parâmetros físicos devem ser monitorados na célula de fluxo como o pH, OD, CE, ORP, turbidez e temperatura. Quando tais parâmetros se estabilizam, isto indica que a amostra a ser coletada é representativa do aquífero monitorado.

Para o emprego desta metodologia alguns equipamentos como a célula de fluxo contínuo, bomba peristáltica (máximo 8 metros de profundidade) ou bomba bexiga, medidores multiparâmetro, medidores de nível de água e turbidímetro devem ser utilizados.

Em alguns casos, vale mencionar, que amostradores de água como Bailers ainda são empregados, ou amostras de água com o sistema Direct Push ou o sistema BAT (ambos eficientes em aquíferos granulares), ou ainda amostras passivas como o Hydra Sleeve, Diffusion Bags (para poços com recarga lenta) podem ser bastante efetivos, porém, ainda pouco empregados no Brasil.

6. ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE CONE

Esse ensaio está descrito na norma brasileira da ABNT – Solo - Ensaio de Penetração de Cone “in-situ” (CPT), datada de junho de 1991, de número

12069. O surgimento desse teste ocorreu em 1932 na Holanda, por P. Barentsen.

No Brasil esse ensaio passou a ser executado desde a década de 1950. Sua utilização sempre ocorreu como forma complementar de investigação, após a execução de sondagens convencionais a percussão (SPT) e dessa maneira, sempre foi visto como um processo de maior precisão de avaliação de resistência.

6.1 Cone Mecânico

No laboratório de mecânica dos solos da Universidade de Delft, na Holanda, em 1935, T.K. Huizinga projetou o primeiro equipamento mecânico de uso comercial, com 10 tf de capacidade.

O teste envolvia, nessa época, apenas a anotação, a cada 20 cm de profundidade, da pressão exercida na ponta cônica com ângulo de 60 graus e área de 10 cm².

Em 1953 H.K.S. Begemann, desenvolveu uma luva de atrito, posicionada logo acima da ponteira cônica, com a qual passou a ser possível a medição do atrito lateral entre o solo e a ponteira, simulando o comportamento de estacas, que transferem o esforço axial de carregamento, ao solo por ação da ponta e da lateral.

Os valores das resistências medidas na ponta do cone sempre foram utilizados nas avaliações das capacidades de carga das fundações, nesse período.

É dessa ocasião uma publicação clássica referente aos ensaios de penetração, em geral (SPT, CPT etc), “Le penetromètre et la reconnaissance des sols” de Guy Sanglerat, em 1965, na qual apresenta recomendações para aplicação direta dos resultados no dimensionamento de sapatas e estacas. Algumas dessas recomendações foram obtidas a partir de contatos com engenheiros brasileiros (Milton Vargas, Antonio José da Costa Nunes e Victor F.B. de Mello).

Em 1965, H.K.S. Begemann, foi o primeiro a propor uma forma de classificação dos solos a partir da denominada “razão de atrito” (proporção entre a resistência de atrito lateral e a resistência de ponta do cone), dando início a uma amplitude muito maior no uso desse ensaio. Na região metropolitana de São Paulo, desde a década de 1970, algumas empresas operam (ainda hoje) esse tipo de equipamento mecânico, com medida da resistência da ponta e do atrito lateral, em leituras realizadas em intervalos de 5 cm de profundidade.

6.2 Cone Elétrico

O desenvolvimento desse equipamento ocorreu na Alemanha, durante a segunda guerra mundial. Em 1948 na cidade de Rotterdam, na Holanda, esse tipo

de equipamento passou a ser utilizado de forma rotineira, proporcionando maior precisão no ensaio, com o uso de células de carga, posicionadas no interior da ponteira, para as medidas das resistências de ponta e de atrito lateral.

Na região metropolitana de São Paulo, o uso do cone elétrico é da década de 1990.

6.3 Piezocone

Na conferência ESPOT-1 em 1974 (European Conference on Penetration Testing) realizada em Estocolmo, na Suécia, foram apresentados por N. Janbu e K.Senneset do “Norwegian Geotechnical Institute” (NGI) e por John H. Schmertmann da Universidade da Flórida, os resultados dos primeiros ensaios com a associação de um pedra porosa e um sensor da pressão neutra desenvolvida no solo pela cravação do cone. Essa condição é a representativa da técnica atual do ensaio, com leituras das resistências de ponta e de atrito lateral e da poro-pressão desenvolvida pela inserção da ponteira no terreno. As leituras são realizadas a cada 1,0 cm de profundidade.

No Brasil essa sistemática foi iniciada no ano de 1990. Os resultados obtidos permitem a compreensão do comportamento dos solos, baseado em inúmeras correlações que permitem as avaliações dos parâmetros da resistência, compressibilidade e adensamento. A identificação estratigráfica do terreno é também uma forte habilidade desse ensaio.

A prática da engenharia geotécnica baseada nos resultados dos ensaios de piezocone (CPTU) está entre as mais sofisticadas técnicas atualmente disponíveis.

No Brasil, atualmente, é muito frequente o uso desse ensaio em regiões de solos argilosos de baixa consistência. É incomparável a quantidade e a qualidade das informações desse ensaio. Com leituras a cada 1,0 cm, em três diferentes canais (ponta, lateral e neutra) a cada metro o conjunto de dados é de 300 informações, sempre em unidades de pressão, com alta precisão, enquanto no ensaio “SPT” se obtém apenas uma informação a cada metro e sem unidade (golpes ou marteladas!).

A tendência é que essa técnica venha a ser cada vez mais utilizada, em complementação da sondagem a percussão (SPT). Na figura 6 adiante, está apresentando um exemplo de ensaio CPTU realizado na área central da cidade de São Paulo, à Rua Conselheiro Crispiano.

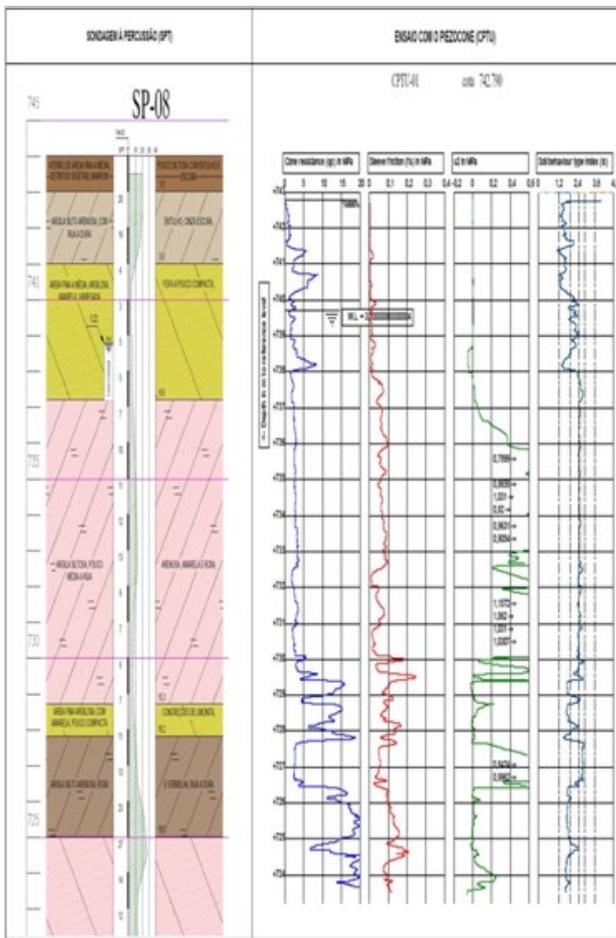


Figura 6 – ensaio CPTU em São Paulo/SP.

6.4 Sísmico (SCPT)

O desenvolvimento do equipamento SCPT foi resultado da iniciativa conjunta entre a empresa Fulgro Inc. com UBC (University British of Columbia) no início da década de 80, sendo o primeiro protótipo desenvolvido pela referida empresa (Campanella & Stewart, 1992). A adição de transdutores sísmicos (geralmente geofones e acelerômetros) ao cone padrão do ensaio CPT da origem ao cone sísmico. O ensaio é denominado, em literatura anglo-saxônica, SCPT (Seismic Cone Penetration Test). O piezocone sísmico apresenta as mesmas características de um cone padrão, acrescido de um geofone, ou um acelerômetro localizado no seu interior. As informações possíveis de serem obtidas através do SCPT, são: tipo de solo e estratigrafia; medida direta da velocidade de ondas cisalhantes (V_s), e conseqüentemente o módulo de Cisalhamento Máximo ($G_{máx}$) e estimativa de propriedades geotécnicas.

O ensaio SCPT é realizado da mesma forma que é feito com o cone elétrico no que diz respeito ao procedimento de preparação e medidas de resistência de ponta (q_c) e atrito lateral (f_s). O ensaio downhole com a utilização do SCPT consiste em 3 etapas: medida do tempo de chegada das ondas S, determinação da velocidade da onda S (V_s) para cada profundidade de ensaio e cálculo do módulo de

cisalhamento máximo ($G_{máx}$) para cada uma dessas profundidades.

A determinação da velocidade de propagação das ondas pode ser feita a cada parada de penetração do cone, seja tanto no momento da cravação, como no momento da sua retirada. Quando não se conhece o perfil do terreno, a realização do ensaio sísmico à medida que o cone é retirado apresenta vantagens (Souza, 2011);

7. ENSAIO DILATOMÉTRICO - DMT

Esse ensaio foi criado pelo engenheiro Silvano Marchetti, professor da Universidade Áquila, na Itália, em 1975. Passou a ser utilizado no Brasil na década de 1990. Não há norma brasileira para esse ensaio.

O ensaio é realizado pela introdução estática, no terreno, de uma lâmina delgada de aço, de alta resistência, munida de uma membrana, também de aço, de muita pequena espessura, que é expandida contra o terreno pela ação do gás nitrogênio extra-seco, que é insuflado pelo interior da lâmina. Os testes são sempre executados com a lâmina estacionada e ocorrem a cada 20 cm de profundidade.

São realizadas duas leituras de pressões em cada teste, a primeira representativa do início da expansão da membrana e a segunda representativa da expansão de 1,1 mm, no centro da membrana, contra o terreno. Nesses mais de 35 anos de evolução da técnica, em uso em 40 países no mundo, foram desenvolvidas inúmeras correlações com parâmetros de resistência e deformabilidade.

O reconhecimento estratigráfico do terreno também é uma característica forte desse ensaio. É de se destacar o predicado forte desse ensaio nas avaliações de recalques, com o uso do módulo edométrico “M”, que representa a proporção entre o acréscimo de pressão e a deformação axial específica, em condição de compressão confirmada.

O equipamento é muito robusto e simples, envolvendo apenas um par de manômetros na superfície e uma lâmina com a membrana expansível, introduzida no terreno. Não há nenhum componente eletrônico no equipamento. O sistema de cravação compreende uma prensa hidráulica, igual à utilizada no ensaio CPTU.

No Brasil esse ensaio vem sendo muito utilizado nos projetos de pisos de industriais e de galpões de armazenamento, pois permite avaliar os recalques que ocorrerão quando da aplicação dos carregamentos.

Na figura 7 adiante, estão apresentados os resultados de um ensaio DMT realizado à Rua Campo Largo, no bairro da Moóca, na cidade de São Paulo/SP.

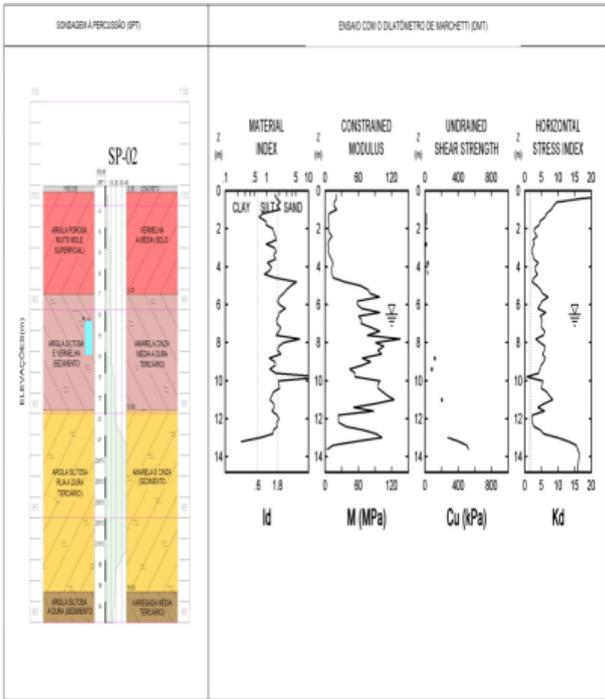


Figura 7 – ensaio DMT na Moóca, em São Paulo/SP.

O ensaio compreende a inserção estática e cuidadosa de uma palheta com quatro aletas em aço, com largura de 65 mm e altura de 130 mm. Essa palheta é forçada a rodar no interior do terreno, pela aplicação de um momento torsor.

Depois de ser atingida a máxima resistência à rotação, deve-se aplicar dez voltas completas da palheta no terreno e então voltar a medir a resistência, nesse caso, após completo amolgamento, como mostra a figura 9 adiante.

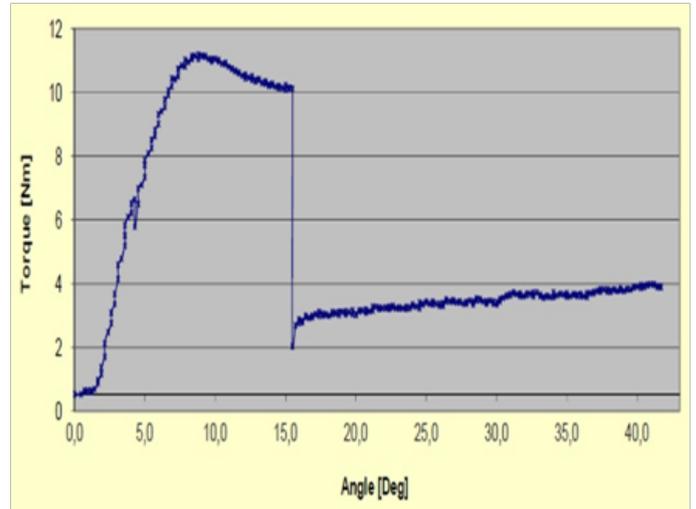


Figura 9 – Resultado típico de ensaio de palheta “Vane-test”

8. VANE TEST

Esse ensaio foi desenvolvido na Suécia em 1919, por John Olsson, e se aplica exclusivamente à determinação da resistência não drenada e sensibilidade de argilas moles.

No Brasil passou a ser executado desde 1949, inicialmente pelo instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo e pela empresa Geotécnica.

Há norma da ABNT – Solo – Ensaio de Palheta “in-situ” – NBR 10905, datada de outubro de 1999, entretanto, nessa norma, a descrição ainda é do antigo equipamento mecânico e hoje em dia todos os equipamentos são eletrônicos, como o da figura 8 adiante.

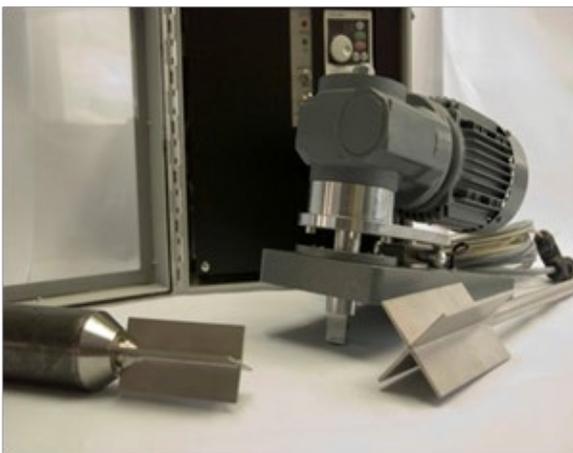


Figura 8 – Equipamento VaneTest.

Na figura 10 adiante estão apresentados alguns resultados de ensaios vane-test realizados em Itaquaquecetuba/SP.

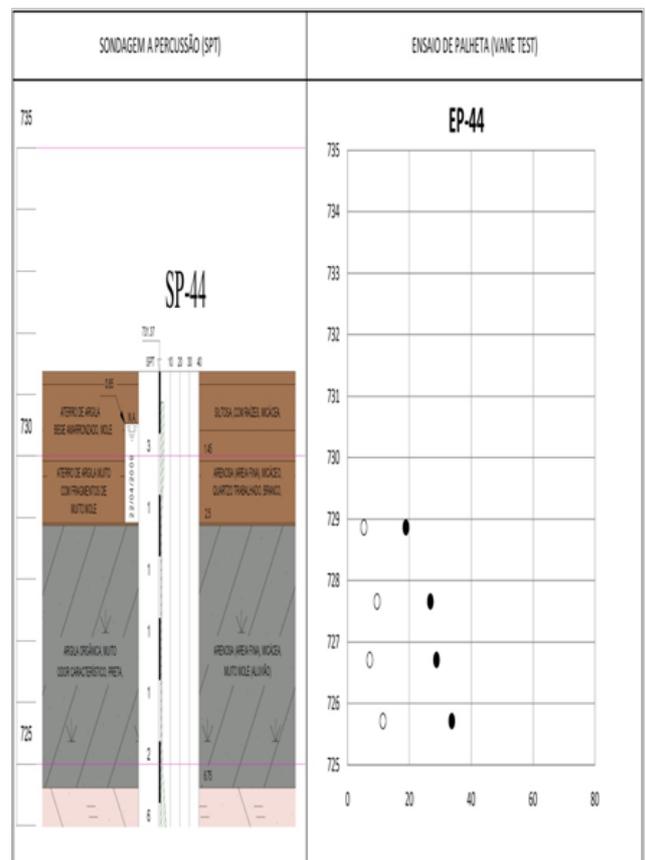


Figura 10 – Resultados de ensaios Vane Test

9. ENSAIO PRESSIOMÉTRICO

Esse ensaio foi concebido por Louis Ménard, em 1955, na França. Não há norma da ABNT para esse ensaio no Brasil.

O teste compreende a introdução no terreno, de um cilindro munido de uma câmara expansível, que é forçada pela pressão de uma coluna de água e gás, criando a condição de expansão de uma cavidade cilíndrica, de cujo equacionamento matemático é possível a extração de parâmetros geotécnicos.

Esse ensaio é pouco utilizado no Brasil, mas é extremamente interessante, uma vez que é o único que simula condições de carregamento desde a fase de proporcionalidade entre tensão e deformação, até a fase de ruptura.

9.1 *Pressiômetro de Ménard*

Representa a técnica original, na qual a sonda pressiométrica é inserida em uma perfuração já realizada. Hoje em dia, com o equipamento denominado STAF “Système de tube fendu auto-fore”, produzido na França, é possível perfurar o terreno, mesmo em solos de muito alta resistência, com sonda rotativa, usando a circulação de água só pelo interior do revestimento.

Posteriormente, do fundo da perfuração para o topo, os ensaios são realizados com a sonda pressiométrica sempre protegida por um tubo fendido, denominado “lanterna chinesa”

9.2 *Pressiômetro “Camkometer”*

Esse sistema foi desenvolvido na Universidade de Cambridge, na Inglaterra em 1971. O objetivo dessa técnica alternativa é minimizar os efeitos da perturbação do solo ao redor da sonda pressiométrica. Esse equipamento é auto-perfurante e dessa maneira, a perfuração é realizada juntamente com a introdução de sondas.

10. GEOFÍSICA

A Geofísica faz um estudo a partir do emprego de medidas físicas obtidas em superfície. Nesta se faz um estudo das partes profundas do globo, impossibilitada pela dificuldade de se fazer medidas diretas. Neste tipo de investigação estudam-se as partes profundas da Terra que não são possíveis de observar através de processos diretos. Para isso utilizam-se ferramentas sofisticadas para a obtenção das propriedades físicas que geralmente são colocadas em superfície. Envolve-se também nestes estudos, a interpretação dos dados obtidos para que se possam obter as informações sobre a composição

e estrutura dos maciços em níveis muito profundos, inclusive com a definição de grandes feições, como contatos litológicos, zonas de fraturas e profundidade do topo rochoso. É importante ressaltar que em qualquer fase de aplicação dos métodos geofísicos, a utilização na construção civil tem o caráter complementar às informações obtidas através dos métodos indiretos de investigação.

Em geral todas as informações obtidas em grandes profundidades são advindas das técnicas geofísicas. As propriedades da crosta terrestre, do manto e do núcleo são determinadas basicamente a partir de observações das ondas sísmicas geradas por tremores, assim como por medições das propriedades gravitacionais, magnéticos e térmicos da Terra, além de que tais técnicas são muito empregadas para observações de reservas de petróleo, minérios etc. Dentre os métodos geofísicos que podem ser utilizados destacam-se os sísmicos e os geoeletricos que podem ser utilizados em ambientes urbanos:

10.1. *Métodos Sísmicos*

Dos métodos físicos que podem ser utilizados em regiões urbanas destacam-se: crosshole, downhole, sísmica de reflexão, sísmica de refração, MASW e a tomografia sísmica entre furos. Nestes métodos objetiva-se o estudo da distribuição em profundidade do parâmetro de velocidade de propagação de ondas acústicas. Este parâmetro está relacionado diretamente com as características físicas do meio geológico, como por exemplo: porosidade, composição mineralógica e química, densidade, tensão de confinamento etc. Estes tipos de ensaios têm uma grande vantagem por amostrar grandes volumes do maciço na condição não perturbada.

10.1.1 *Cross-Hole*

Este ensaio tem o objetivo de captar a onda transmitida entre a fonte e os receptores com o objetivo de obter valores das velocidades de propagação das ondas P e S no maciço. Com os resultados obtidos determinam-se os módulos de elasticidade dinâmicos de maciços e na identificação de anomalias entre furos. Para a realização do ensaio monta-se um arranjo fonte-receptores que pode ter um espaçamento ente 2 m e 6 m para maciços em solo e de no máximo 15 m para maciços rochosos. Os módulos dinâmicos obtidos atuam em uma pequena faixa de valores podendo ser de 5 a 15 vezes superiores aos módulos estáticos. O módulo de cisalhamento (G) e o coeficiente de Poisson são parâmetros que podem ser obtidos a partir da realização deste ensaio. Na Figura 11 observa-se um gráfico onde se compara a média aritmética das

ondas S em relação a profundidade, com o perfil tipo da Formação São Paulo, em local muito próximo daquele em que se obteve a maioria das médias de Vs, permitindo verificar que em ambos horizontes ocorre material limonítico, em que, devido à concentração anômala de óxido de ferro, pode-se esperar uma maior velocidade de propagação de ondas P e S.

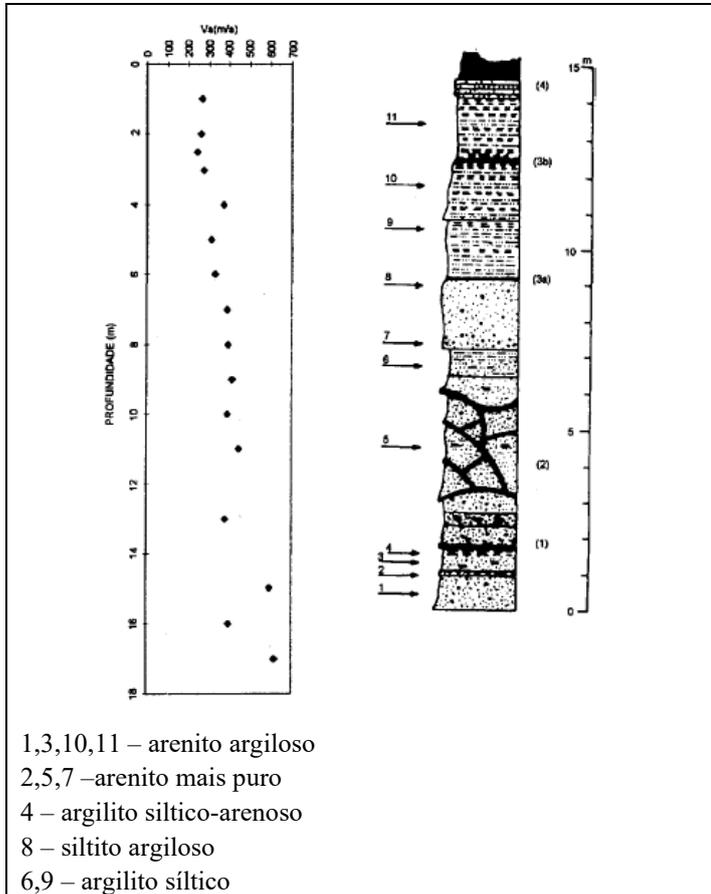


Figura 11 - Comparação entre velocidade médias de onda S e a seção tipo da Formação São Paulo (Taioli, 1999).

10.1.2 Sísmica de Reflexão

O método tem como base a propagação do sinal acústico emitido na superfície em camadas geológicas subjacentes. A energia emitida se irradia de forma esférica de um ponto de origem, penetrando nas camadas, retornando à superfície ao atingir regiões com contrastes de impedância acústica, que é produto da densidade e da velocidade de propagação de ondas acústicas no maciço. O emprego deste método está relacionado à existência de contrastes de impedância acústica em subsuperfície, o que geralmente ocorre no contato entre as camadas geológicas, ou também em obras civis como escavações e na mineração, que apresentam contrastes possíveis de se identificar. Ressalta-se que a metodologia é dependente dos equipamentos geofísicos de transmissão e detecção de altas frequências do sinal refletido e das características do meio geológico. Na escolha da

fonte, deve-se atentar a portabilidade, segurança, frequência, custos e energia emitida. O que difere a sísmica de refração da sísmica de reflexão é que neste último, parte da energia transmitida irá sempre retornar ao sensor ao encontrar contrastes de impedância acústica, independente da velocidade de propagação das ondas, que pode aumentar e diminuir com a profundidade.

Uma das vantagens é a determinação de configurações espaciais de unidades geológicas, caracterizando cavidades, pequenas estruturas, presença de matacões, lentes de areia e argila entre outros.

10.1.3 Sísmica de Refração

Esta técnica trata-se do fenômeno que gera um desvio na direção de propagação de uma onda quando ela passa de um meio para outro, quando as ondas de propagação são diferentes. Tem por objetivo detectar em superfície as ondas sísmicas refratadas em profundidade e desta maneira determinar as velocidades de propagação da onda bem como as espessuras dos estratos em subsuperfície. Este método utiliza fontes de energia de natureza impulsiva que produzem deformações elásticas no meio, gerando ondas acústicas que se propagam através das diferentes interfaces geológicas. Em geral utilizam-se explosivos, que fornecem energia apropriada e também a emissão de um amplo espectro de frequências. Em regiões urbanas, por motivos de segurança, utilizam-se fontes alternativas (martelo, rifle sísmicos e simples quedas de peso).

Sua aplicação, além de fornecer importantes informações a respeito do topo rochoso e a espessuras das camadas, fornece também subsídios que possibilitam a avaliação do grau de escarificabilidade do maciço.

De acordo com Souza et al. (1998) as velocidades representativas para solos são da ordem de valores inferiores a 1.000 m/s e para rochas mais resistentes a velocidades são da ordem de valores superiores a 4.000 m/s. os mesmos autores ainda citam que este tipo de ensaio quando se utilizam ondas secundárias ou cisalhantes (ondas S) podem muitas vezes ser de grande utilidade na determinação da posição do embasamento abaixo de pacotes de sedimentos arenosos com a porção inferior saturada, pois a propagação não é afetada nestas condições

10.1.4 MASW (Análise Multicanal de Superfícies De Onda)

Esta técnica é utilizada em lugares onde métodos convencionais de refração sísmica não podem ser usados. A coleta de dados consiste de um

sismógrafo, geofones e fonte. Ao invés de analisar a onda (P) primária como em levantamentos de refração, o método MASW usa ondas de cisalhamento ou ondas S que são gerados em uma onda sísmica de superfície. MASW é tipicamente eficaz para uma profundidade de aproximadamente 30 metros.

10.1.5 Tomografia Sísmica entre furos

Método de investigação que permite o zoneamento de maciços em função da variação da velocidade de propagação das ondas elásticas, tendo em vista que é função da densidade dos materiais, possibilitando também um estudo detalhado da integridade de estruturas de concreto. Em geral para a realização dos ensaios envolve a utilização de dois furos de sondagem posicionados no mesmo plano, da mesma forma que o ensaio Cross-Hole.

10.2 Métodos Geométricos

Os métodos geométricos de investigação geofísica envolvem a detecção em superfície, das decorrências produzidas pelo fluxo de corrente elétrica em subsuperfície. Os métodos disponíveis podem ser divididos em aqueles que utilizam fontes naturais e os artificiais, para a medida dos parâmetros relacionados ao fluxo de corrente elétrica. Os métodos medem as impedâncias que permitem avaliar a distribuição geométrica em subsuperfície. Os contrastes existentes entre os materiais (sedimentos, rochas etc) permitem a utilização da metodologia.

10.2.1 Eletroresistividade (Caminhamento elétrico)

O ensaio é realizado a partir da injeção de corrente elétrica no solo por meio de eletrodos cravados na superfície do terreno, desta forma é possível medir e mapear um maciço com base da variação da resistividade elétrica. A profundidade atingida depende das características do maciço que a corrente elétrica atravessa, e também da extensão entre os eletrodos de corrente. A profundidade de analisada é função do distanciamento dos eletrodos, sendo que quanto maior for essa separação, maiores profundidades poderão ser investigadas.

Este método permite a análise das variações laterais da resistividade aparente do subsolo, o caminhamento de contatos geológicos verticais e inclinados, mineralizações, diques, fraturamentos, falhamentos e quaisquer outras heterogeneidades laterais de resistividade.

Os dados de eletroresistividade podem ser apresentados de variadas formas, como perfis,

seções, pseudo-seções e plantas de isovalores de resistividades aparentes. Gandolfo et al. (2005) fizeram uma utilização conjunta de métodos geofísicos e técnicas de geoprocessamento para avaliação de processo de afundamento para adoção de medidas preventivas e/ou corretivas em área localizada em Pirapora de Bom Jesus/SP, pois havia indícios na área de uma cava de mineração. Analisando os resultados obtidos a partir de dados da Eletroresistividade observados na Figura 12 que os valores mais baixos de resistividade representados pelas tonalidades em azul, podem estar associados à zonas de maior permeabilidade do maciço. As tonalidades em vermelho representam altos valores de resistividade, correspondendo ao maciço são. Encontram-se em destaque na seção uma anomalia condutiva encaixada em uma porção resistente em local coincidente a suposta posição da antiga cava.

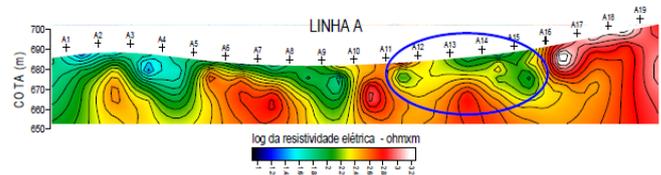


Figura 12 Seção de resistividade com anomalia (Gandolfo et al, 2005)

10.2.2 GPR (Radar)

É um método que fornece seções contínuas dos perfis, produzindo imagens em subsuperfície. O equipamento transmite pulsos de ondas de radio de alta frequência, que podem variar de 25 MHz a 2500 MHz em profundidade. A onda eletromagnética transmitida é refletida a partir das estruturas existentes no terreno ou através diferentes contatos entre os diferentes materiais geológicos. Quando o sinal é transmitido em profundidade e atinge corpos ou estratos com diferentes permissividades dielétricas, parte da onda reflete nesses objetos ou interfaces sendo captada na antena receptora, enquanto outra parte da energia se propaga até a próxima descontinuidade.

10.2.3 Potencial Espontâneo (SP)

De acordo com Gallas (2005) é um método de campo natural que baseia-se no fato de que na ausência de um campo elétrico criado artificialmente, é possível medir uma diferença de potencial entre dois eletrodos introduzidos no terreno. Em alguns casos, na presença de bons condutores (sulfetos maciços, preenchimento de fraturas com argilas saturadas, tubulações

metálicas), esta tensão pode atingir algumas centenas de milivolts. A principal vantagem é sua simplicidade, tanto instrumental como operação de campo, além dos baixos custos envolvidos. Para um levantamento SP necessitam-se basicamente dois eletrodos, um milivoltímetro e fios devidamente isolados para as conexões. O potencial natural ou espontâneo (SP) é causado por atividade eletroquímica ou mecânica. A água subterrânea é o agente mais importante no mecanismo de geração de SP. Os potenciais podem estar associados à presença de corpos metálicos, contatos entre rochas de diferentes propriedades elétricas (principalmente condutividade), atividade bioelétrica de materiais orgânicos, corrosão, gradientes térmicos e de pressão nos fluidos de subsuperfície.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as seguintes pessoas que contribuíram diretamente para o desenvolvimento deste trabalho: Otávio Gandolfo (IPT), Márcio Santos (Fundsolo), Tiago Souza (Fugro In-Situ), Anna S. P. Peixoto (Unesp)

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 12069 (1991) *Solo - Ensaio de penetração de Cone In-Situ (CPT) - Método de Ensaio*. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 12905 (1989) *Solo - Ensaio de palheta in situ - Método de Ensaio*. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 6484 (2001) *Solo - Sondagens de Simples Reconhecimentos com SPT - Método de Ensaio*. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 9820 (1997) *Coleta De Amostras Indeformadas de Solos de Baixa Consistência em Furos de Sondagem – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- ASTM D1587 (2008) *Standard Practice for Thin-Walled Tube Sampling of Soils for Geotechnical Purposes*. USA.
- Campanella, R.G. and Stewart, W.P. (1992) Seismic Cone Analysis Using Digital Signal Processing for Dynamic Site Characterization. *Soil Mechanics Series N° 144*, UBC, Civil Eng. Dept.
- Décourt, L. (1991) Bearing Capacity of Displacement Piles in Residual Soils on Basis of SPT - L. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS, II. 1991. *Anais...* São Paulo. v.1, p. 111-119.
- Décourt, L.; Quaresma Filho, A.R. (1991) The SPT-F, an Improved SPT. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS, II. 1991. *Anais...* São Paulo. Vol 2, p. 106-110.
- Dourado, J.C. ; Prado, R. L. ; Malagutti filho, W.; Cordeiro, R. P. (1997) A Sísmica de Reflexão de Alta Resolução em Ambiente Urbano - Exemplo dos Ensaio na Linha 4 do Metrô de São Paulo. In: 5 Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 1997, Sao Paulo - SP. *Anais...* p. 426-429.
- Gallas, J. D. F. (2005) O Método do Potencial Espontâneo (SP) - Uma Revisão Sobre Suas Causas, Seu Uso Histórico e Suas Aplicações Atuais. *Revista Brasileira de Geofísica*. 23(2) p.133-144.
- Gandolfo, O.C.B., Marrano, A., Birelli, C.A., Dehira, L.K. (2005) *Caracterização do Afundamento Ocorrido na Rua Camilo Sipola (Antiga Rua 13), Bairro Jardim Bom Jesus, Pirapora do Bom Jesus - SP*. (IPT N° 9.653-301),
- Peixoto, A.S.P. (2001) *Estudo do Ensaio SPT-T e Sua Aplicação na Prática de Engenharia de Fundações*. Tese de Doutorado. Feagri/Unicamp. Campinas, SP: 466p.
- Souza, L.A.P.; Silva, R.F.;Iyomassa, W.S. (1998) Capítulo 11 - Métodos de Investigação. In: Oliveira, A.M.S.; Brito, S.N.A. (Ed.). *Geologia de Engenharia*. São Paulo: Oficina de Textos, p.163-210.
- Souza, T. J. (2011) *Previsão da Curva Tensão-Recalque em Solos Tropicais Arenosos a Partir de Ensaio de Cone Sísmico*. Dissertação de Mestrado. EESC/USP, São Carlos. 86p.
- Stancati, G., Nogueira, J. B., Vilar (1984) *Ensaio de Laboratório de Mecânica dos Solos*. EESC/USP. São Carlos. Publicação 018/84. 280p.
- Taioli, F.J.D.F. (1999) Comportamento elástico dinâmico da formação São Paulo. *Revista Brasileira de Geofísica*. 29 (4) p.657-662.