

UNIEVANGÉLICA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JAIANE PIMENTEL DE MORAIS
JHÉNIFER DE OLIVEIRA BRAGA

**INOVAÇÕES DO MÉTODO DE SONDAGEM (STANDART
PENETRATION TEST - SPT)**

ANÁPOLIS / GO
2015

**JAIANE PIMENTEL DE MORAIS
JHÉNIFER DE OLIVEIRA BRAGA**

**INOVAÇÕES DO MÉTODO DE SONDAÇÃO (STANDART
PENETRATION TEST - SPT)**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA**

ORIENTADOR: Msc. SANDOVAL JUNQUEIRA

ANÁPOLIS / GO: 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

BRAGA, JHÉNIFER DE OLIVEIRA; MORAIS, JAIANE PIMENTEL.

Inovações do método de sondagem (Standard Penetration Test - SPT) 2015.

58 P, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2015).

TCC - UniEvangélica

Curso de Engenharia Civil.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BRAGA, Jhénifer de Oliveira; MORAIS, Jaiane Pimentel. Inovações do método de sondagem (Standart Penetration Test - SPT). TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEvangélica, Anápolis, GO, 58 p. 2015.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DOS AUTORES: Jaiane Pimentel de Moraes e Jhénifer de Oliveira Braga.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Inovações no método de sondagem (Standard Penetration Test - SPT).

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil ANO: 2015

É concedida à UniEvangélica a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Jaiane Pimentel de Moraes
E-mail: jaiane012@gmail.com

Jhénifer de Oliveira Braga
E-mail: jhenifer.brg@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem ele nada sou, pela oportunidade de aprendizado diário e por ter permitido e capacitado na realização deste curso.

Aos meus pais João e Lecy, porque sempre estiveram ao meu lado nas orações, nos momentos difíceis que se tornaram mais fácil com todo o carinho incondicional, apoio, compreensão e conselhos que me deram durante esses cinco anos.

Ao meu irmão Wilson, que muito me apoiou nessa conquista. Em especial minha irmã Poliane, que sempre me incentivou e cuidou de mim, deixando muitas vezes, seus afazeres para me ajudar com tarefas do dia a dia para que esse sonho de ser uma Engenheira Civil fosse realizado.

Aos meus amigos Camilla, Fabrício e Jhénifer, Silas e Suze que sempre estiveram ao meu lado nas muitas horas compartilhadas de estudos, esclarecendo dúvidas e ajudando na realização das atividades e provas, e sempre que precisei estiveram dispostos a me ajudar em todos os momentos, seja de tristeza ou alegria o carinho e apoio proporcionado por eles permaneceu igual. Em especial a minha amiga Jhénifer que agarrou essa causa em realizar a elaboração deste trabalho juntamente comigo, que com a contribuição dela com seu jeito extrovertido e sua dedicação tornou-se fácil e divertido a realização do mesmo.

Ao meu orientador professor Sandoval Junqueira, e a professora Ana Lúcia Carrijo Adorno pelo estímulo, dedicação, interesse e conhecimentos transmitidos no desenvolvimento do presente trabalho.

A todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

Jaiane Pimentel de Morais.

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo a Deus por me capacitar e por sempre escutar minhas orações. Em momentos que pensei em desistir sempre me deu forças para continuar.

À minha família por estarem ao meu lado em todo o tempo me ajudando e compreendendo minha ausência em momentos necessários, pelo incentivo e carinhoso convívio. Aos demais parentes pelo estímulo.

Ao professor e orientador Sandoval Junqueira pela valiosa colaboração prestada durante a elaboração do trabalho de conclusão de curso, buscando explicações na sutileza de detalhes e, pela disposição de tempo oferecida para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos de curso Camilla, Fabrício, Jaiane, Silas e Suze por estarem ao meu lado durante todo esse tempo, me ajudando e apoiando não só em relação aos estudos, mas também em outras partes da minha vida. Em especial minha amiga Jaiane que sempre muito dedicada e companheira, aceitou o desafio de desenvolver este trabalho junto comigo. Muito obrigada, eu amo vocês!

Aos meus amigos Karine e Giovanni, que mesmo de longe sempre estiveram comigo me dando apoio sempre que precisei. Vocês são muito importantes para mim, espero ter a amizade de vocês por toda a vida.

Jhénifer de Oliveira Braga.

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho é mostrar a possibilidade da implementação de técnicas híbridas no decorrer e após a realização do ensaio SPT. Assim como qualquer outro ensaio de campo ou de laboratório, o SPT está sujeito a influência de diversos fatores. Na maioria dos casos esses fatores podem ser classificados como sendo de três naturezas: humana, de equipamento e de procedimento. O valor do torque (T), medido em Kgf x m, e o valor de resistência a penetração N, permite uma nova classificação do solo, que desempenha um papel fundamental na sua estrutura. Esse torque, obtido logo após a cravação do amostrador, apresenta duas aplicações: uma é ser mais refinado do que o índice de penetração dinâmica (Nspt) para caracterizar o solo, e outra é um parâmetro que pode ser utilizado para o cálculo da parcela de aderência e/ou atrito lateral de estacas, através de equações empíricas. Diversos ensaios sísmicos tais como o *cross-hole*, *down-hole*, *suspension PS logging*, SASW, entre outros podem ser feitos para a avaliação de parâmetros dinâmicos do solo, cada um com sua vantagem e particularidade. O ensaio SPT com sísmica *up-hole* é um recurso antigo, porém pouco empregado, o ensaio SCPT (*cross-hole*) tem uma série de vantagens quanto à geração de onda e tem um custo relativamente econômico na Coreia, porém, a desvantagem do SCPT é que, em terrenos onde há fragmentos de rochas ou cascalho, sua execução torna-se difícil. No Brasil pode-se considerar que existe uma visão diferente quanto ao emprego do SCPT. Aqui a maior dificuldade não se encontra em penetrar solos com cascalho ou rocha, mas sim, o fato de que este ensaio requer equipamento especial de elevado custo. Enquanto isso, o ensaio SPT em conjunto da sísmica *up-hole* é um ensaio atrativamente mais econômico devido uma adaptação do método original do ensaio *up-hole* com o ensaio SPT (na denominação de S-SPT), que tem sido bastante eficiente, pois, a energia do impacto gerado pelo SPT, pode ser utilizada como fonte do método *up-hole*.

Palavras-chave: SPT, Sísmica, Torque, *up-hole*, *cross-hole*, Investigação geotécnica.

ABSTRACT

The main objective of this work is to show the possibility of implementing hybrid techniques during and after the completion of the SPT test. Just like any other test field or laboratory, the SPT is subject to the influence of several factors. In most cases these factors may be classified as three types: human, equipment and procedure. The torque value (T) measured in Kgf thirteenth and the penetration resistance value N, a new classification allows the soil, which plays a crucial role in their structure. This torque obtained immediately after the crimping of the sampler, has two applications: one is to be more refined than the dynamic penetration index (NSPT) for characterizing the ground, and the other is a parameter that can be used to calculate the amount of adhesion and / or skin friction of piles, through empirical equations. Several seismic testing such as cross-hole, down-hole, suspension PS logging, SASW, among others can be made for the evaluation of dynamic soil parameters, each with its advantages and particularity. The SPT test with up-hole seismic is an old resort, but little used, the SCPT test (cross-hole) has a number of advantages in terms of wave generation and has a relatively economical cost in Korea, however, the disadvantage of SCPT It is that in land wave there fragments of rock or gravel, its implementation becomes difficult. In Brazil it can be considered that there is a different view as to the use of SCPT. Here the greatest difficulty is not to penetrate soil with gravel or rock, but rather the fact that this test requires special equipment of high cost. Meanwhile, the SPT test set of up-hole seismic is a more economical attractively trial because an adaptation of the original method of up-hole test with the SPT (the S-SPT name), which has been very efficient because, the impact energy generated by the PTS can be used as the source of up-hole method.

Key-words: SPT, Seismic, Torque, up-hole, cross-hole, geotechnical investigation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura básica semelhante ao amostrador desenvolvido por Charles Gow para cravação dinâmica e obtenção de amostras a seco	17
Figura 2 - Esquema base do amostrador tipo Raymond.....	18
Figura 3 - Torre de sondagem.....	23
Figura 4 - Hastes e trado helicoidal	24
Figura 5 - Modelo de Trépano	25
Figura 6 - Esquema das partes do Amostrador tipo Raymond	26
Figura 7 - Modelo para fabricação do martelo	27
Figura 8 - Torquímetro montado	33
Figura 9 - Esquema do método S-SPT	51
Figura 10 - Barra de aço cravada no solo servindo de aterramento	53
Figura 11 - Fluxograma das caixas com geofones	53
Figura 12 - Fixação das caixas no solo.....	54
Figura 13 - Fluxograma dos procedimentos de execução do ensaio <i>up-hole</i> como o SPT	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos Solos (NBR 7250, 1982; NBR 6484, 2001).....	19
Tabela 2 - Correlações propostas entre a resistência a penetração e a compacidade de solos .	20
Tabela 3 - Valores de K para cada tipo de solo	36
Tabela 4 - Valores de α em (%) para cada tipo de solo	37
Tabela 5 - Valores de F1 e F2.....	37
Tabela 6 - Valores de F1 e F2 (Aoki-Velloso)	38
Tabela 7 - Valores de F1 e F2 para Estacas Franki	38
Tabela 8 - Coeficientes de K e α	39
Tabela 9 - Valores de C	41
Tabela 10 - Valores de β , função do tipo de estaca e do solo. (Os valores marcados com asteriscos são orientativos, pois o número de ensaios é reduzido).....	41
Tabela 11 - Valores de α , função do tipo de estaca e do solo. (Os valores marcados com asteriscos são orientativos, pois o número de ensaios é reduzido).....	42
Tabela 12 - Coeficientes para Cálculo da Parcela Lateral (Camapum de Carvalho <i>et al.</i> (1998)	46
Tabela 13 - Relação entre os valores médios de f_T (SPT-T), f_c (CPT) com q_s (prova de carga instrumentada)	49

LISTA DE SÍMBOLOS

Al: Área lateral da estaca

Ap: Seção transversal da ponta

AP: Área da ponta ou base das estacas

Ca: Cota da ponta

Dexterno: Diâmetro externo

Dinterno: Diâmetro interno

d1, d2: Incrementos de profundidade

fc: Atrito lateral local (kPa)

fs: Tensão de atrito

Go: Módulo de cisalhamento máximo

h: Altura de penetração do amostrador

h0: Altura do chanfro tronco – Cônico (1,90 cm)

fi: Tensão de atrito lateral residual medida pelo torquímetro na altura do trecho elementar de ordem “i”

fi-1 é tensão máxima obtida do torquímetro um metro acima da cota da base

fi+1 é tensão máxima obtida do torquímetro um metro abaixo da cota da base

fT: Adesão-atrito solo amostrador

Fu: Atrito lateral médio

F1: Coeficiente de correção da resistência de ponta

F2: Coeficiente de correção da resistência lateral

K: Coeficiente de conversão

KN: Quilonewton

Kg: Quilogramas

K0: Coeficiente de empuxo em repouso

K1, K2: Fatores que dependem do tipo de solo

l: Comprimento da Estaca

m: Metros

m²: Metros quadrados

mm: Milímetros

N: Índice de resistência à penetração

N: Newton

\bar{N} : Resistência à penetração média do SPT ao longo do fuste

\overline{Np} : Resistência à penetração do SPT, resultante da média de três valores obtidos ao nível da ponta, imediatamente acima e abaixo.

N_{eq} : Resistência à penetração equivalente ao valor numérico igual a $T/1,2$

N_{spt} : Número de golpes do SPT; (N).

N_1 : Valor médio de N do ensaio SPT, calculado desde a cota da ponta da estaca até dois diâmetros acima da mesma.

N_2 : valor médio de N do ensaio SPT, calculado desde a cota da ponta da estaca até um diâmetro abaixo da mesma.

N_{72} : Resistência à penetração para eficiência de 72%

P: Carga Pontual

PL: Resistência por atrito segundo método de Décourt-Quaresma

PP: Resistência de ponta segundo método de Décourt-Quaresma

PR: Capacidade de carga

P_{bu} : Capacidade de suporte sobre a base (ponta) da estaca.

P_{su} : Capacidade de suporte por atrito, ou aderência, lateral ao longo do fuste da estaca.

qc: Resistência de ponta

ql: Atrito lateral unitário

qp: Resistência de ruptura de ponta

qu: Carga de ruptura do solo que dá suporte à estaca

R: Raio externo do amostrador (2,24 cm)

r: Raio interno da boca do amostrador (1,905 cm)

rl: Tensão limite ao longo do fuste

rp: Tensão normal ao nível da base

R_p : Resistência unitária de ponta

R'_p : Parâmetro correspondente

R_u : Fator de segurança

R_1 : Resistência lateral para uma estaca

R'_1 : Parâmetro correspondente

S: Onda de cisalhamento

T: Torque

U: Perímetro da seção transversal

V_s : Velocidade de onda cisalhante

\emptyset : Diâmetro

α : Fator de conversão

α_T : Coeficiente para cálculo da parcela lateral

β : Coeficiente de majoração ou minoração do atrito lateral em função do tipo de solo e da estaca.

Δl_i : Comprimento do trecho elementar de ordem "i"

LISTA DE SIGLAS

ABMS: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos
ASMT: American Society for Testing Materials
ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
BSP: British Standard Port (Rosca paralela)
EUA: Estados Unidos da América
CPT: Cone Penetration Test (Teste de Penetração de Cone)
IPT: Instituto de pesquisa tecnológico
NA: Nível d' água
NBR: Norma Brasileira Registrada
NI: National Instruments (Instrumentos Nacionais)
RN: Referência de Nível
SCPT: Ensaio de cone sísmico
SPT: Standard Penetration Test (Teste de penetração padrão)
S-SPT: Teste de penetração padrão com sísmica
SPT-T: Teste de penetração padrão com medida de torque
USB: Universal Serial Bus (Porta universal)
WES: Waterways Experiment Station

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	13
1.2 JUSTIFICATIVA	14
1.3 OBJETIVOS	14
1.3.1 Objetivo Geral	14
1.3.2 Objetivo Específico	15
1.4 METODOLOGIA.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DO ENSAIO SPT	16
2.1 BREVE HISTÓRIA DO SPT	16
2.2 O ENSAIO SPT NO BRASIL.....	21
2.2.1 Normatização do SPT no Brasil	22
2.3 MÉTODO DE EXECUÇÃO DA SONDAÇÃO DE SIMPLES RECONHECIMENTO..	27
2.4 DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA (N.A).....	29
2.5 FATORES QUE INFLUENCIAM NO RESULTADO DO SPT	30
3 ENSAIO SPT-T – MEDIDA DO TORQUE EM SONDAÇÃO À PERCUSSÃO	32
3.1 EQUIPAMENTO BÁSICO.....	32
3.1.1 A Medida de Torque	33
3.1.2 O Índice de Torque	34
3.1.3 Correlações entre parâmetros geotécnicos e resultados do ensaio SPT-T	34
3.2 CÁLCULO DA CAPACIDADE DE CARGA DAS ESTACAS UTILIZANDO O SPT E SPT-T	35
3.3 MÉTODO DE AOKI-VELLOSO	36
3.4 MÉTODO DE DÉCOURT - QUARESMA	40
4 ENSAIOS SÍSMICOS	43
5 A UTILIZAÇÃO DO ENSAIO SPT-T NA PREVISÃO DA CAPACIDADE DE CARGAS E DIMENSIONAMENTO DAS ESTACAS	44
6 ENSAIO S-SPT	49
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

A sondagem de simples reconhecimento associado com o ensaio SPT (*Standard Penetration Test*) tem sido muito usada tanto no Brasil quanto em outros países como EUA, Canadá e Japão (BELINCANTA & FERRAZ, 2000). Devido sua rapidez, baixo custo e simplicidade de execução, o ensaio proporciona o conhecimento dos tipos de solos, índice de resistência, nível do lençol freático, que são informações necessárias para a elaboração de projetos de fundações.

De acordo com a NBR 6484 (ABNT, 2001) o processo de execução da sondagem de simples reconhecimento dos solos com SPT é feito inicialmente com o emprego do trado-concha ou cavadeira manual até a profundidade de 1 m. Nas operações subsequentes de perfuração deve ser utilizado trado helicoidal até se atingir o nível d'água freático e, abaixo do mesmo, com perfuração através de circulação d'água, sendo também empregados tubos de aço para revestimento, de diâmetro interno de 67 mm ou de 75 mm, até a profundidade necessária à preservação do furo.

O SPT, isto é, o ensaio em si, se constitui na cravação, a partir da extremidade do furo de sondagem e a cada metro de perfuração, de um amostrador tubular padrão, de 51 mm de diâmetro externo e 35 mm de diâmetro interno, através de impacto de um martelo de 650 N, com queda de 750 mm. O índice de resistência à penetração N, proveniente do ensaio do tipo SPT, corresponde ao número de golpes necessários à cravação do amostrador em 300 mm, após a cravação inicial de 150 mm. Para a melhoria na compreensão do ensaio recomenda-se o registro do número de golpes necessário à cravação de cada parcela de 150 mm dos 450 mm que constitui cada um dos ensaios do tipo SPT (BELINCANTA & FERRAZ, 2000).

Por ser um ensaio muito simples do ponto de vista não só executivo, mas também interpretativo, desde o seu surgimento e mais fortemente nos últimos trinta anos houve uma proliferação muito grande de empresas de Geotécnica que passaram a usar o SPT acentuadamente como um ensaio de uso corrente no meio geotécnico (CAVALCANTE, 2002).

Mesmo o ensaio de simples reconhecimento SPT ser muito utilizado existe alguns aspectos que o torna objeto de críticas na comunidade acadêmica, devido sua dispersão de resultados, diversidade de equipamentos e procedimentos. Estudos estão sendo feito desde a década de 70 visando uma padronização do ensaio (LOBO, 2009). A análise de alguns fatores que ocorrem durante a realização do mesmo serve de parâmetros que podem contribuir na

interpretação dos resultados possibilitando uma maior credibilidade ao ensaio e reduzindo as limitações existentes no mesmo. Uma boa parte dos fatores intervenientes no ensaio já é conhecida, sua influência quantificada, porém existe outra parte que ainda não está totalmente identificada e avaliada a sua relevância no que se refere à sua influência nos resultados do ensaio (CAVALCANTE, 2002).

Segundo Velloso (1998) *apud* Cavalcante (2002), nada adianta a utilização dos melhores recursos da microeletrônica e dos sofisticados programas para cálculo da capacidade de carga e dos recalques das fundações, se os dados de entrada forem obtidos de maneira grosseira e sem nenhum controle.

A partir dos vários fatores intervenientes no SPT análise em relação ao fenômeno do embuchamento no amostrador e da contribuição das parcelas de atrito e resistência de ponta na cravação do amostrador pode quantificar a influência do tipo de solo e das suas condições (LUKIANCHUKI, 2012).

1.2 JUSTIFICATIVA

A relevância deste estudo se constitui na oportunidade de se aprofundar na introdução do torque e da sísmica com *up-hole*, após e durante o ensaio SPT para a obtenção da resistência lateral das estacas e do módulo de cisalhamento máximo. A introdução da medida de torque no ensaio de SPT assim como a sísmica com *up-hole* vieram para dar suporte a um dos melhores métodos de avaliação do solo.

O SPT quando realizado em solos que apresentam camadas com pedregulho pode ter seu N (numero de golpes) elevado por consequência de alguma pedra interferir no ensaio, paralelo ao SPT, a medida do torque mostra que o atrito lateral não é afetado quando ocorrido o problema.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

A sondagem SPT tem sido utilizada na grande maioria como meio de investigação para o reconhecimento dos tipos de solos, incluindo o fornecimento de parâmetros, visando uma melhor adequação as atuais necessidades com implementação de novas técnicas de

análise dos resultados tais como: melhor identificação do tipo de solo, resistência lateral das estacas e menor dependência do operador.

O trabalho visa mostrar a possibilidade da implementação de técnicas híbridas no decorrer e após a realização do ensaio SPT para corrigir erros ocorridos durante a execução do mesmo e apresentar novos parâmetros para a investigação geotécnica, além de mostrar as vantagens com a introdução desses novos métodos no ensaio.

1.3.2 Objetivo Específico

Realizar uma pesquisa bibliográfica sobre as inovações no ensaio SPT, avaliando a utilização do torque logo após a realização da sondagem SPT, analisar a influência do torque nos ensaios realizados e mostrar o desenvolvimento de uma forma modificada do método original do ensaio sísmico *up-hole*.

1.4 METODOLOGIA

Este tópico define os métodos utilizados para a execução do estudo, deste modo apresenta-se a pesquisa bibliográfica através de meios técnicos - literários como livros e meios eletrônicos como sites e arquivos digitais e a interpretação da pesquisa realizada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DO ENSAIO SPT

2.1 BREVE HISTÓRIA DO SPT

A história do SPT pode ser dividida em quatro fases: a primeira, que vai de 1902 até meados dos anos 1920, quando se inicia a utilização do amostrador; a segunda, começando em 1927 e indo até o final da década de 1940, com a publicação do livro de Terzaghi & Peck (1948); a terceira que se inicia com a referida publicação e se estende até a segunda metade dos anos 1970, período marcado pelas primeiras tentativas oficiais de normatização do ensaio, abrindo caminho para a quarta fase, a partir de 1977, quando se iniciam as preocupações com a qualidade dos dados e as técnicas de interpretação (CARVALHO, 2012).

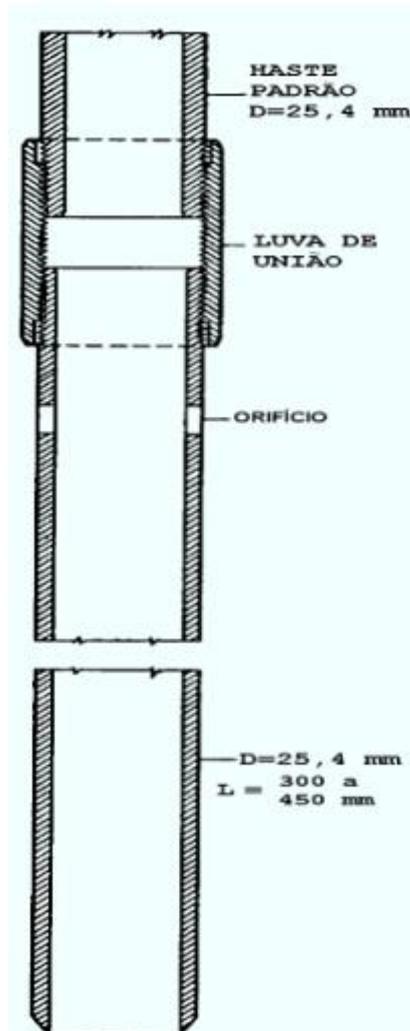
Apesar da sua utilização ainda não ser normalizada, sua simplicidade e eficácia fez com que este ensaio se espalhasse por todo o Estados Unidos e Europa. A literatura mostra uma infinidade de metodologias e padronizações que foram sendo criadas por onde o SPT era utilizado, no intuito de se estabelecer uma metodologia única para o ensaio (NEVES, 2004).

Primeira fase:

Engenheiro Charles R. Gow iniciou os processos dinâmicos de cravação em terreno obtendo assim as primeiras amostras associadas a esses processos baseado na cravação dinâmica a seco de um tubo metálico oco de 25,4 mm de diâmetro nominal e aproximadamente 450 mm de comprimento (Figura 1), sob a queda de um martelo pesando 0,49 KN (CARVALHO, 2012). Tornou-se possível obtenção de amostras de melhor qualidade, na profundidade desejada, sem causar grandes perturbações no solo, pois até então o método utilizado para fazer a identificação do solo baseava-se no recolhimento de detritos resultantes da perfuração com circulação de água, bem como através da abertura de poços de grande diâmetro e escavações em grande escala. Tal processo, segundo relata Cavalcante (2002) *apud* Souza (2009), provoca descaracterizações na estrutura natural do solo, conduzindo a uma pobre identificação do tipo de solo e de suas propriedades.

De acordo com Hvorslev (1949) *apud* Souza (2009), as amostras recolhidas passaram a ser do tipo “*dry*”. Orifícios ou válvulas (*vents*) posicionados estrategicamente no amostrador tinham por finalidade facilitar a retirada da amostra. Todavia, apenas esses orifícios não pareciam suficientes para excluir por completo os efeitos prejudiciais causados à amostra quando da sua retirada do tubo, visto que o corpo ainda não era bipartido. Inicia-se assim uma primeira fase do SPT com possível relacionamento entre os resultados obtidos com certos parâmetros geotécnicos através de métodos empíricos ou semi-empíricos.

Figura 1 - Estrutura básica semelhante ao amostrador desenvolvido por Charles Gow para cravação dinâmica e obtenção de amostras a seco



Fonte: CAVALCANTE, 2002.

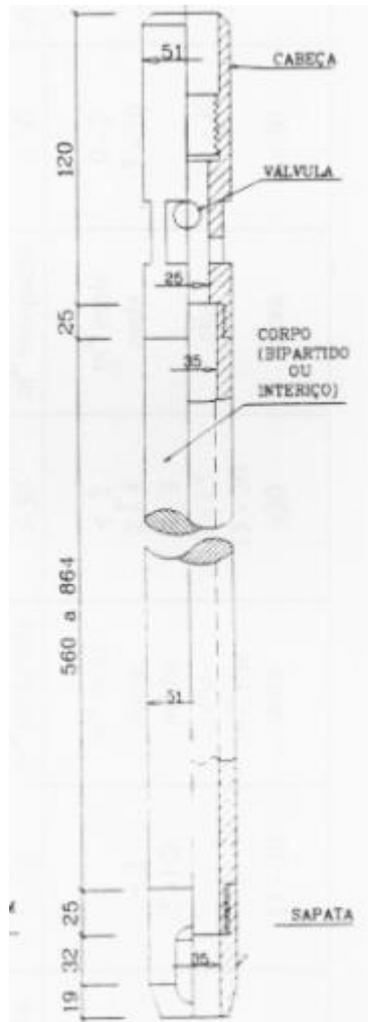
Escassez de registros (do modo de execução do ensaio dessa época, principalmente, a altura de queda do martelo, o modo de contagem do número de golpes) limitou muito a análise do ensaio.

Segunda fase:

Esse amostrador é conhecido como Raymond porque a Raymond Concrete Pile comprou em 1927 da The Gow Company empresa fundada pelo engenheiro Charles Gow, proprietário da patente do amostrador citado. Esse amostrador era constituído por três partes (cabeça, corpo central e boca). A principal característica desse amostrador era o fato de o corpo central ser bipartido, o que facilitava imensamente a recolha e visualização da amostra adquirida no ensaio. A qualidade das amostragens ficou muito mais aperfeiçoada com o

aparecimento do amostrador, isto porque este preservava grande parte das características naturais do solo.

Figura 2 - Esquema base do amostrador tipo Raymond



Fonte: AUGUSTI, 2004.

O início dos anos 30 coincide com o aparecimento das primeiras tentativas, de padronização da cravação do amostrador. O amostrador era cravado no terreno por ação da queda de um martelo de 0,62 KN. A altura da queda do martelo correspondia a 762 mm, sendo que, a resistência do solo à penetração do amostrador seria fornecida pelo número de golpes necessários para cravar o amostrador 304,8 mm Fletcher, 1965.

Segundo Broms e Flodim (1998) *apud* Neves (2004) no livro de Terzaghi e Peck, em 1948, aborda os vários aspectos do SPT e apresenta as primeiras correlações entre a resistência à penetração e a compactidade das areias. A maioria das normas relativas ao SPT existentes atualmente baseiam-se neste livro. A partir deste estudo e de propostas de outros

autores, criou-se a tabela de classificação dos solos da NBR 7250 (ABNT, 1982) que posteriormente foi incorporada à norma NBR 6484 (ABNT, 2001) (NEVES, 2004).

Tabela 1 - Classificação dos Solos (NBR 7250, 1982; NBR 6484, 2001)

Solo	Índice de resistência à penetração (Nspt)	Designação
	≤ 4	Fofa (o)
	5 a 8	Pouco compacta (o)
Areia e silte arenoso	9 a 18	Medianamente compacta (o)
	19 a 40	Compacta (o)
	> 40	Muito compacta (o)
	≤ 2	Muito mole
	3 a 5	Mole
Argila e silte argiloso	6 a 10	Média (o)
	11 a 19	Rija (o)
	> 19	Dura (o)

Fonte: NEVES, 2004.

Hvorslev, em 1949 publicou um trabalho no qual apresenta as correlações entre a resistência à penetração do amostrador e a consistência dos solos (Tabela 2).

Tabela 2 - Correlações propostas entre a resistência a penetração e a compactidade de solos

AUTOR	H.A MOHR		TERZAGHI & PECK		CODIGO DA CIDADE DE NOVA IORQUE		C.E NEW ENGLAND DIVISION	
Amostrador	Tubo Extra Pesado Dint=33,4mm Dext=24,3mm		Raymond Dint= 51mm Dext=35mm		Dext=63,5mm		Dext=76,2 mm	
Martelo	0,62 kN		0,62 kN		1,34kN		1,3kKN	
h queda	±762mm		762mm		457,2mm		457,2mm	
Solo	Classe	Golpes 305mm	Classe	Golpes 305mm	Classe	Golpes 305mm	Classe	Golpes 305mm
Capacidade de Areia e Silte			Muito fofa	<4	Muito fofa		Muito fofa	<8
	Fofa	<9	Fofa	4-10	Fofa	0-15	Fofa	8-15
	Média	9-13	Média	4-30	Média		Média	16-55
	Compacta	14-49	Compacta	30-50	Compacta	16-50	Compacta	55-110
	Muito Compacta	>50	Muito compacta	>50	Muito compacta	>50	Muito compacta	>110
Consistência de Argilas	Mole	<5	Muito mole	< 2	Muito mole	0-2	Muito mole	<8
			Mole	2-4	Mole	3-10	Mole	8-16
	Média	5-10	Média	4-8	Média	4-8	Média	16-55
	Rija		Rija	8-15	Rija	8-15	Rija-dura	55-110
	Muito rija		Muito rija	15-30	Muito rija	15-30		
	Dura	11-30	Dura	>30	Dura	>30	Muito dura	>110

Fonte: CARVALHO, 2012.

Terceira fase:

Primeiras tentativas de padronizar o ensaio, visto que até a data tal não se verificava. James D. Parson, o primeiro a tentar padronizar o SPT em 1954. Ele propôs o registro do número de pancadas necessárias para cravar o amostrador para cada um dos três intervalos de 152 em 152 mm Fletcher, 1965 e defendeu que o resultado da resistência à penetração do amostrador fosse dada pela menor soma de dois dos três intervalos ensaiados.

Terzaghi e Peck (1948) segundo a Universidade de Aveiro (2015) propuseram que o resultado do ensaio seria fornecido pela soma dos dois últimos intervalos ensaiados.

Surge a primeira norma (ASTM D1586/58T). Esta formalizou que o primeiro intervalo de cravação (152 mm) correspondia ao intervalo de assentamento do amostrador.

Tal conclusão teve como apoio trabalhos de Terzaghi e Peck (1948); Fletcher (1965 1967); Lo Pinto (1966); Schnabel (1966) e Geisser (1966). Esses trabalhos demonstram que o número de golpes necessários para cravar o amostrador nos primeiros 152 mm é inferior comparado com os restantes intervalos de penetração. Tal fato relaciona-se com as perturbações do solo na base do furo, limpeza inadequada do mesmo, ou ainda pelo alívio de tensões devido à retirada da coluna de solo pela perfuração Palacios, 1977.

Quarta fase:

Início das preocupações com as questões relacionadas com a energia que atinge o amostrador e, por consequência, com as perdas de energia no ensaio.

Esta fase fica marcada pelos primeiros trabalhos relacionados com este tema dos quais se destacam os seguintes: Palacios (1977), Schmertmann (1976, 1978, 1979), Schmertmann e Palacios (1979), Kovacs (1979, 1980, 1981 e 1994), Kovacs e Salomone (1982 e 1984), Kovacs *et al.* (1977 e 1978) (UA, 2015)

2.2. O ENSAIO SPT NO BRASIL

O ensaio de simples reconhecimento de solos foi introduzido no Brasil a partir de 1939, graças à criação da “Seção de Estruturas e Fundações” do IPT (VARGAS, 1989 *apud* CAVALCANTE, 2002). Medidas de resistência à penetração de amostrador padrão começam a serem feitas no Brasil sistematicamente pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas em 1944. Naquela época, o índice de resistência à penetração se constituía no número de golpes de um martelo de 600 N caindo de 75 cm necessários à cravação do amostrador por 30 cm no solo, a partir de seu apoio no fundo da perfuração obtido com o peso do conjunto hastes-amostrador-cabeça-de-bater (NEVES, 2004).

É sem dúvida, o Eng. Odair Grillo idealizador e iniciador da medida de resistência à penetração no Brasil. Até esta data as características do solo eram determinadas apenas por exame tátil-visual (ODEBRECHT, 2003). Por estas razões, esse processo de sondagem era ineficiente para a avaliação da compacidade das areias. Surge então a ideia de produzir algo que permitisse obter alguma característica de resistência à penetração e correlacioná-la com a compacidade das areias (CAVALCANTE, 2002).

Em 1943 iniciam-se as medidas de penetração, inicialmente de forma experimental, e em 1944 de forma sistemática. O diâmetro do tubo de revestimento utilizado era de 51 mm e o amostrador foi confeccionado com um tubo, compatível ao diâmetro do revestimento, disponível na época (Segunda Guerra Mundial). Este amostrador, denominado amostrador tipo IPT possui 38 mm e 46 mm de diâmetro interno e externo, respectivamente. Outros detalhes do sistema de sondagem utilizado pelo IPT são: a) hastes de aproximadamente 3,2 Kg/m; b) utilização de cabeça de bater; d) martelo cilíndrico vazado, acionado manualmente através de corda de sisal e roldana fixa; e) frequência média de 15 golpes por minuto; f) perfuração a trado até o nível d’água e por circulação de água abaixo do mesmo (ODEBRECHT, 2003).

Segundo De Mello (1971) *apud* Souza (2009) menciona que cerca de 99% dos edifícios e importantes fundações executadas no Brasil basearam-se simplesmente no SPT.

De acordo com Cavalcante (2002), *apud* Souza (2009) relata que em 1977 a Associação Brasileira de Mecânica dos Solos (ABMS) envia para a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), para discussão e aprovação, a proposta de norma do SPT, que se tornou em 1979, oficialmente, a primeira norma brasileira, com a denominação “Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento de Solos”, MB 1211/79, tendo recebido posteriormente a designação NBR 6484/1980.

Em fevereiro de 2001 a NBR 6484 sofreu revisão, tendo sido incorporada à mesma a NBR 7250 intitulada “Identificação e Descrição de Amostras de Solos Obtidas em Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos”. A NBR 6484 (ABNT, 2001) especifica a aparelhagem, os processos de avanço da perfuração, ensaio penetrométrico e amostragem, além da observação do nível d’água e apresentação formal dos resultados. A norma permite a classificação das camadas de solos investigadas em função do valor “N” de resistência à penetração. A norma especifica o amostrador do tipo Raymond, de 51 mm de diâmetro externo e 35 mm de diâmetro interno, composto por: cabeça com válvulas de esfera e orifícios laterais, corpo inteiriço ou bipartido e sapata biselada (SOUZA, 2009).

2.2.1 Normatização do SPT no Brasil

No Brasil, o ensaio é normatizado, em termos de equipamentos e procedimentos, pela NBR 6484 (ABNT, 2001). Basicamente, o equipamento necessário para a realização do ensaio SPT é composto por: (BELINCANTA *et al.*, 2010):

- 1) Torre de sondagem completa ou tripé de sondagem: é formada por quatro tubos de aço com 5 m de comprimento cada, e possuindo dispositivos para montagem das hastes e dos tubos de revestimento, assim como para o acionamento do martelo. (Figura 3)

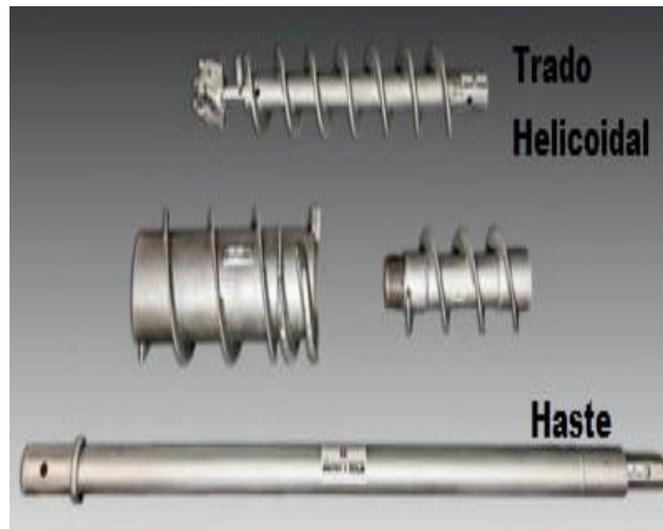
Figura 3 - Torre de sondagem



Fonte: < [http:// www.acaoengenharia.com.br/o-que-fazemos/sondagem-a-percussao/](http://www.acaoengenharia.com.br/o-que-fazemos/sondagem-a-percussao/)>

- 2) Composição para perfuração e cravação: formada por uma composição de hastes de aço ($D_{\text{externo}} = 33.4 \pm 2.5$ mm, $D_{\text{interno}} = 24.3 \pm 2.5$ mm e massa linear de 3.23 kg/m), com comprimentos de 1 m ou 2 m. Essas hastes, que tem suas extremidades roscadas são acopladas entre si por meio de luvas que são devidamente atarraxadas (Figura 4).
- 3) Tubos de revestimento: formados por tubos de aço ($D_{\text{externo}} = 76.1 \pm 5$ mm e $D_{\text{interno}} = 68.8 \pm 5$ mm) com comprimentos de 1 m ou 2 m, que podem ser emendados por meio de luvas e roscas;
- 4) Trado helicoidal: utilizado para a abertura dos furos de sondagem. O diâmetro do trado deve ser ligeiramente inferior ao diâmetro interno do tubo de revestimento, para permitir uma folga de 5 a 7 mm. Para tubos de revestimento com 63.5 mm de diâmetro interno, o diâmetro usual é de 58 mm.

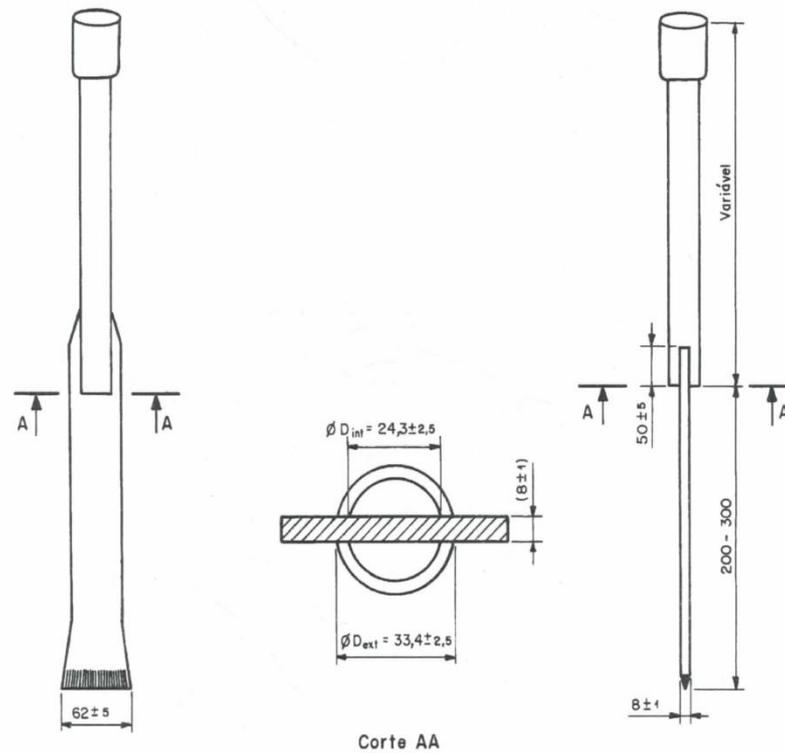
Figura 4 - Hastes e trado helicoidal



Fonte: <<http://www.anteq-group.com/pt/produtos/equipamento-para-perfuracao-de-sondagem-construcao-de-pocos-e-geotecnia/>>

- 5) Trépano ou peça de lavagem: Formado por uma peça de aço biselada que possui duas saídas laterais para a água. A largura da lamina de aço deve possuir uma folga de 3 a 5 mm em relação ao diâmetro interno dos tubos de revestimento (Figura 5).
- 6) Sistema de circulação de água: é constituído de uma bomba hidráulica, uma caixa para decantação de detritos e mangueiras de engate rápido.

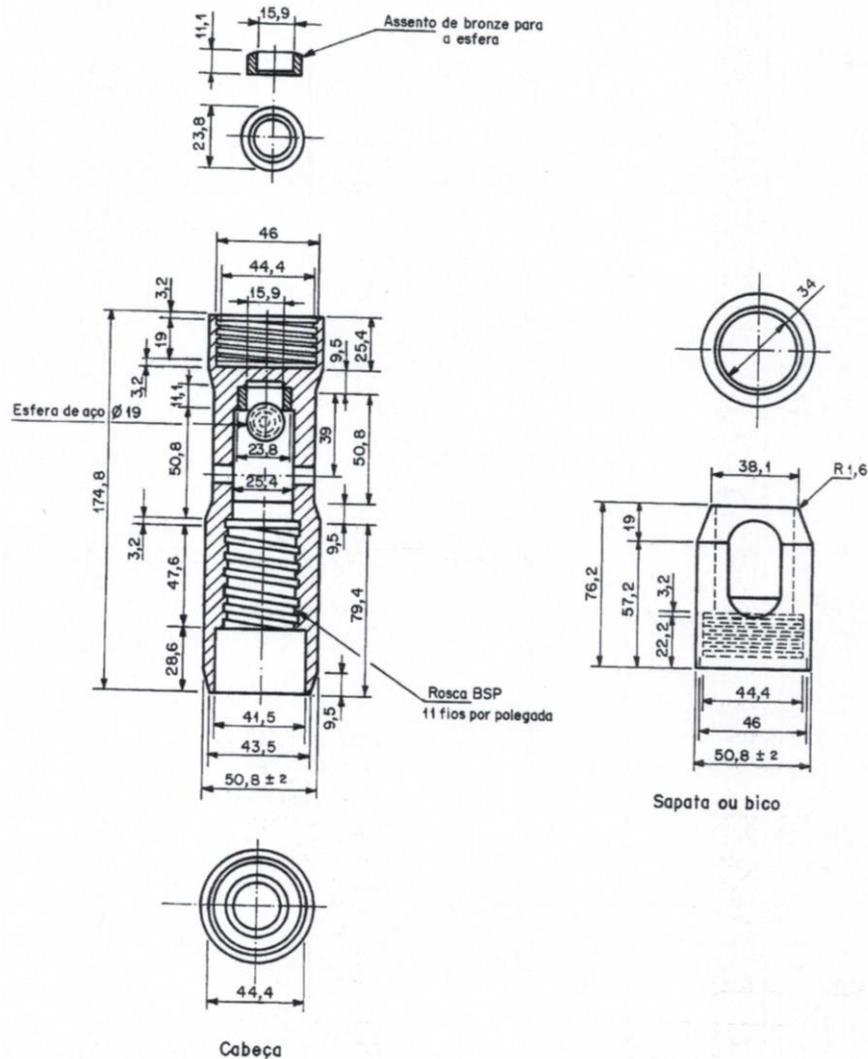
Figura 5 - Modelo de Trépano



Fonte: NBR 6484 (ABNT, 2001).

- 7) Amostrador padrão tipo Raymond: é constituído por três partes: cabeça, corpo e sapata (Figura 6). O corpo do amostrador é formado por um tubo de aço bipartido com dimensões nominais padronizadas (comprimento de 609.6 mm, $D_{externo} = 50.8 \pm 2$ mm e $D_{interno} = 34,9 \pm 2$ mm). A cabeça do amostrador é formada por dois orifícios laterais, para a saída de água e ar, e uma interna constituída por uma esfera de aço inoxidável. Esses dispositivos permitem o balanceamento e o alívio da pressão interna do amostrador, durante a entrada da amostra na fase de cravação e durante a retirada da composição de hastes. A sapata do amostrador de ser confeccionada com aço temperado para melhor suportar os esforços ao qual é submetido.

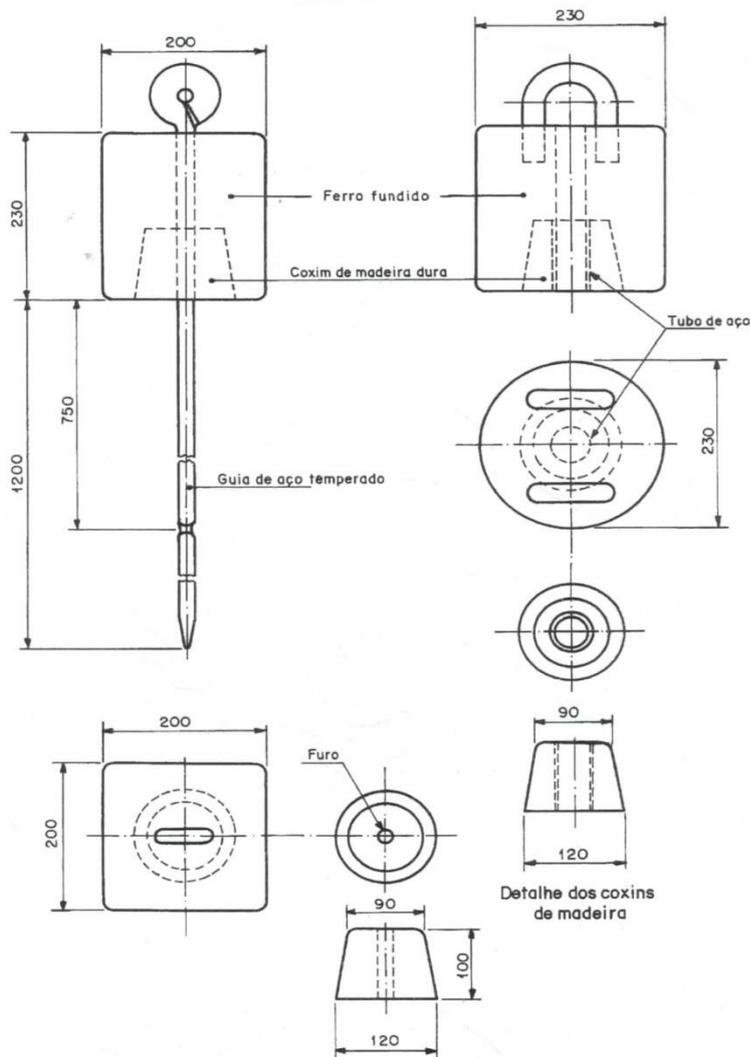
Figura 6 - Esquema das partes do Amostrador tipo Raymond



Fonte: NBR 6484 (ABNT, 2001).

- 8) Cabeça de bater: constituída de um tarugo de aço com diâmetro de 83 ± 5 mm, altura de 90 ± 5 mm e massa nominal entre 3,5 e 4,5 Kg;
- 9) Martelo padronizado: constituído por uma massa de ferro de 65 Kg, podendo ser maciço ou vazado e em formato cilíndrico ou prismático. Os martelos maciços possuem haste-guia ou pino-guia de 1,2 m ao longo do eixo de simetria longitudinal do martelo (Figura7). Os martelos devem possuir um coxim de madeira dura, embutida na sua face interior, com o objetivo de proteger o martelo e melhorar o contato entre as seções no instante do impacto. A figura apresenta os sistemas de martelo recomendadas pela NBR 6484 (ABNT, 2001), (LUKJANTCHUKI, 2012).

Figura 7 - Modelo para fabricação do martelo



Fonte: NBR 6484 (ABNT, 2001).

2.3 MÉTODO DE EXECUÇÃO DA SONDAGEM DE SIMPLES RECONHECIMENTO

A execução dos serviços de sondagem à percussão inicia-se pelo posicionamento da torre (tripé) num ponto locado e nivelado em relação a um RN fixo e bem determinado no terreno, ou num ponto pré-determinado num espelho d'água. O posicionamento da torre de sondagem em terra firme é realizado, com o levantamento e o nivelamento da torre (tripé) sobre a superfície do terreno, tendo-se o cuidado de que as pernas de apoio estejam firmemente assentadas.

O processo de perfuração é iniciado através de trado ou cavadeira, até a profundidade de 1,00 m. O material coletado através do trado ou da cavadeira deve ser identificado, como amostra inicial de trado, e colocado em saco plástico apropriado.

O ensaio de penetração SPT é iniciado, com a descida das hastes, por dentro do furo, acopladas ao amostrador padrão, que é posicionado no fundo do furo. A cabeça de bater é conectada no topo da haste, o peso batente será apoiado sobre ela devendo ser anotada uma eventual penetração do amostrador no terreno. O ensaio de penetração SPT – *Standard Penetration Test* consiste na cravação dinâmica de 45 cm do barrilete amostrador padrão tipo Raymond, no solo. O topo do tubo de revestimento de 2 1/2” de diâmetro é usado como nível de referência, e na haste de perfuração marca-se de forma visível (com giz), um segmento de 0,45 m, dividido em três segmentos iguais de 0,15 m cada um. O peso batente de 65 Kg é levantado por meio de cabo de aço e sarilho, até a altura de 0,75 m, marcada na haste guia do peso. Deve-se observar que os eixos longitudinais do peso batente e a composição de cravação do amostrador, estejam rigorosamente coincidentes e verticalizados. A queda do peso batente deve ser totalmente livre, por gravidade, para ser evitada perda de energia de cravação por atrito, principalmente, quando for utilizado equipamento mecanizado, o qual deve ser dotado de dispositivo disparador que garanta a queda totalmente livre do peso. Procede-se a coleta. Uma parte representativa da amostra é colocada em saco plástico próprio, etiquetado, principalmente a parte relativa ao bico do amostrador. Na etiqueta gomada utilizada deve constar o número do furo, o cravação do amostrador, através da queda livre do peso de 65 Kg a uma altura de 0,75 m, anotando-se separadamente o número de golpes necessários para a cravação de cada segmento de 0,15 m. De acordo como definido por Terzaghi-Peck (*Soil Mechanics in Engineering Practice*), e normalizado pela NBR 6484, o índice de resistência a penetração, é a soma do número de golpes necessários a cravação no solo dos 0,30 m finais do amostrador. Após a realização do ensaio de penetração, a composição da sondagem, composta pelas hastes e barrilete, será retirada do subsolo através de manobra com auxílio da torre, cabeça de alçar hastes, cabo de aço, sarilho e chaves. O amostrador bipartido é aberto para retirada da amostra, tendo-se o cuidado de anotar uma possível mudança de material, na amostra número da amostra, a profundidade e os números de golpes, relativos a cada segmento de 0,15 m.

Após a execução do primeiro ensaio SPT em terreno firme, a perfuração do subsolo é prosseguida, através do uso de trado até que o mesmo se torne inoperante, ou o nível d'água (N.A) seja encontrado. A partir daí, a sondagem é realizada com a utilização do processo de perfuração por circulação d'água, no qual, usa-se o trépano de lavagem como ferramenta para

escavação do subsolo. O material escavado pela ação do trépano acoplado às hastes é removido por meio de circulação d'água impulsionaada pelo conjunto moto-bomba.

Se as paredes do furo durante a sua perfuração tornarem-se instáveis, isto é, o furo tendendo a fechar, o revestimento de 2 1/2" deve ser descido através de sua cravação dinâmica com o uso do peso batente, até onde se fizer necessário, para evitar o fechamento da perfuração. O revestimento deve ficar posicionado sempre acima da cota de realização do ensaio SPT, de 0,50 m. Somente, em casos de fluência do solo para o interior do furo, será admitido deixá-lo a mesma profundidade do fundo do furo. Em alguns casos pode-se usar a lama betonítica para revestir as paredes do furo, sendo a mesma, previamente preparada, 12:00 h antes de uma utilização. A lama betonítica não poderá ser usada em sondagem à percussão que também se pretenda instalar medidor de nível d'água subterrâneo ou piezômetro.

A sondagem prossegue com a cravação dinâmica do amostrador, isto é, realização do ensaio SPT, a cada metro, sendo utilizado como método de avanço da sondagem a circulação d'água por lavagem, entre duas penetrações sucessivas, portanto, para cada 0,45 m penetrados no terreno, serão lavados 0,55 m para se atingir a nova cota de penetração.

Na sondagem executada dentro d'água, inicialmente o tripé é instalado sobre o flutuante ou plataforma, posicionado e poitado, e o revestimento é descido até o fundo do espelho d'água, sendo o mesmo, a partir daí, cravado no terreno, usando-se os mesmos critérios utilizados em terra firme.

2.4 DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA (N.A)

Na realização da sondagem à percussão, a determinação da profundidade de ocorrência do nível d'água subterrâneo – "N.A", é também um valioso subsídio para qualquer tipo de obra que se pretenda edificar. Deste modo, durante a execução da sondagem, deverá ser observado o seguinte:

- cota do nível d'água (N.A);
- registro da pressão (no caso de artesianismo) e a altura atingida pela coluna d'água em relação à superfície do terreno;
- subida ou descida da coluna d'água de circulação da sondagem, durante a operação de prospecção;
- a cota de fuga ou perda total da água de circulação de lavagem, bem como a metragem;

- final de revestimento $\varnothing 2\ 1/2''$ utilizado.

O nível d'água deve ser anotado desde a sua evidência de ocorrência, quando o solo, por exemplo, se apresentar mais úmido, durante o avanço da sondagem atrado. Neste caso, deve-se esperar um certo lapso de tempo, para que o surgimento d'água no fundo do furo, possibilite a medida da sua profundidade. O nível d'água final da sondagem é determinado no término do furo, após o esgotamento do mesmo, com a utilização da bomba balde e da retirada do tubo de revestimento, e após decorridas, no mínimo, doze horas da sua conclusão (ABPv. *et.al*, 2002) .

2.5. FATORES QUE INFLUENCIAM NO RESULTADO DO SPT

Ainda no início da década de 1970 o SPT passava por uma fase de relativo descrédito. Esse fato decorria em função do desconhecimento da influência do grande número de fatores que supostamente afetavam seus resultados. Enquanto alguns pesquisadores como Ireland *et al.* (1970) se reportavam ao ensaio como não padronizado, outros como Fletcher (1965) apontava seus usos e abusos questionando a acurácia dos projetos com base nos seus dados. Mesmo sob essas críticas o SPT resistiu e permaneceu sendo o método de investigação de campo mais utilizado em todo o mundo Palacios, 1977.

Assim como qualquer outro ensaio de campo ou de laboratório, o SPT está sujeito à influência de diversos fatores. Na maioria dos casos esses fatores podem ser classificados como sendo de três naturezas: humana, de equipamento e de procedimento.

No tocante a resistência à penetração do SPT, os fatores intervenientes têm sido constantemente reiterados por Hvorslev (1949), Fletcher (1965), Mohr (1966), Teixeira (1974, 1977) e Palacios (1977). Em seu trabalho Hvorslev (1949) *apud* Belincanta (1998) reúne os fatores influenciadores em três classes básicas: aparelhagem, procedimento e condições do solo.

De acordo com Palacios (1977) *apud* Carvalho (2012) os elementos básicos associados à aparelhagem são: martelo, hastes, revestimento do furo e amostrador. No que diz respeito ao martelo, os principais fatores capazes de influenciar os resultados são o peso e a altura de queda. Com relação às hastes, os fatores mais importantes são o seu tipo e o comprimento da composição, ao passo que a influência do revestimento está na razão entre seu diâmetro interno e o externo do amostrador. Finalmente Palacios (1977) detalha:

Fatores relacionados ao solo:

- resistência;

- compacidade relativa ou consistência;
- permeabilidade;
- grau de saturação;
- sensibilidade (argilas);
- forma, distribuição e tamanho dos grãos (areias).

Fatores relacionados aos procedimentos:

- avanço, limpeza e estabilidade do furo;
- profundidade relativa do furo e do revestimento;
- intervalo de tempo entre a perfuração e a amostragem;
- espaçamento entre amostragens subseqüentes;
- profundidade de penetração do amostrador.

Fatores ligados ao amostrador:

- Diâmetro;
- razão da área projetada;
- rugosidade externa e interna (uso ou não de líner);
- forma e estado da sapata cortante;
- alargamento externo e interno (*clearance*);
- área e forma das aberturas de alívio de pressão ou ventosas (*vents*).

Em seu trabalho Hvorslev (1949) *apud* Carvalho (2012) também relata os efeitos do desbalanceamento hidráulico do furo em relação ao solo, que pode alterar sensivelmente a resistência no furo da perfuração. Estudos feitos à época com o auxílio da “*Waterways Experiment Station*” (WES) confirmaram que esse efeito causa significativa alteração na resistência à penetração de depósitos de areias com compacidade média e compacta. O supracitado autor avaliou qualitativamente o que ocorre com a resistência à penetração durante o processo de cravação do amostrador.

Na década de 1960, Fletcher (1965) e Mohr (1966) ofertaram uma valiosa contribuição para o melhor conhecimento dos fatores que afetam o ensaio de SPT. Além dos fatores relacionados à aparelhagem e aos procedimentos de ensaio, esses autores trouxeram à tela, com muita propriedade, os fatores de natureza humana.

Sem a preocupação de realizar um agrupamento por classes, Fletcher (1965) lista uma série de fatores que podem ser responsáveis por discrepâncias significativas nos resultados de SPT. Posteriormente, Mohr (1966) completa essa lista com outras indicações. Em nosso país, esses fatores foram discutidos por Teixeira (1974, 1977), Décourt (1989) e Belincanta (1985 1998) (CARVALHO, 2012).

3 ENSAIO SPT-T – MEDIDA DO TORQUE EM SONDAGEM À PERCUSSÃO

O ensaio SPT – T (SPT-Torque) foi proposto por Ranzini (1988), e consiste na medida após a cravação do barrilete amostrador padrão Raymond, do momento de torção do referido amostrador, conforme Ranzini, UR Alonso e L. Décourt, publicada no número 511 da revista “Engenharia” de S. Paulo.

O primeiro a usar a medida do torque foi o Eng. Luciano Décourt que sugeriu a relação T/N_{spt} como forma de aferição do valor N_{spt} e também como parâmetro de classificação geotécnica dos solos. O Eng. Urbano Rodrigues Alonso seguiu a proposta original de Ranzini (1988), a qual consistia em utilizar o torque para a previsão da adesão-atrito lateral de estacas (PEIXOTO, 2001).

3.1 EQUIPAMENTO BÁSICO

Constituído pelo equipamento completo de sondagem à percussão de simples reconhecimento, acrescido de:

Torquímetro: ferramenta mecanizada de controle manual para medição de torque. A capacidade mínima do torquímetro deve ser de 50 Kgf x m. Entretanto, recomenda-se o torquímetro com capacidade de 80 Kgf x m, preferencialmente com ponteiro de arraste.

Chave soquete: ferramenta de encaixe sextavado utilizado para atarraxar e desatarraxar pinos ou porcas.

Disco centralizador: disco de aço carbono especial, com diâmetro externo de 3”, e furo central de 1 1/4”, cujo objetivo é manter a composição das hastes de 1” da sondagem à percussão centralizada em relação ao tubo de revestimento de 2 1/2”. A face inferior do disco tem um sulco de 4 mm de largura por 4 mm de profundidade, com diâmetro de 2 1/2” para encaixe do tubo guia ou revestimento, de 2 1/2”.

Pino adaptador: constituído de aço, na forma de um tarugo sextavado com diâmetro de 1 1/4” e rosca BSP de 1” numa das suas extremidades.

Na figura 8 podemos ver um torquímetro já montado depois que o ensaio SPT foi realizado.

Figura 8 - Torquímetro montado

Fonte:< <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAflpkAK/ensaio-spt-t>>.

3.1.1 A Medida de Torque

O Torque é efetuado, conforme sequência abaixo, após a realização de cada ensaio SPT, de acordo com a NBR 6484 (ABNT, 2001).

Depois de cravado o amostrador Raymond padrão, retira-se a cabeça de bater, e coloca-se o disco centralizador até o mesmo ficar apoiado no tubo guia e rosqueia-se na mesma luva, onde estava anteriormente a cabeça de bater, o pino adaptador. A chave soquete de medida é encaixada perfeitamente no pino sextavado, e acopla-se ao torquímetro, a chave soquete. O operador inicia o movimento de rotação do conjunto de hastes de 1", usando o torquímetro como braço de alavanca, tendo o cuidado de manter o mesmo na horizontal, não forçando o encaixe do torquímetro com a chave soquete, e desta com o pino sextavado, isto é, o conjunto está perfeitamente encaixado, e o torquímetro na horizontal. Um observador bem posicionado lê no instrumento de leitura do torquímetro, o valor máximo obtido na operação de torque e avisa ao operador que interrompa a rotação após ter sido alcançada aquela leitura máxima. Às vezes, é anotado também, o valor residual após o torque máximo.

As anotações devem ser feitas no próprio boletim de sondagem, em coluna própria, ao lado da que contém o SPT. A operação é realizada, a cada metro, sendo observada a capacidade do torquímetro.

3.1.2 O Índice de Torque

É a relação existente entre o valor do torque, medido em Kgf x m, pelo valor N do SPT (T/N). O estabelecimento de correlações estatísticas entre o valor do torque (T), medido em Kgf x m, e o valor de resistência à penetração N, permite uma nova classificação de solos, que desempenha um papel fundamental na estrutura destes solos (ABPv, 2002).

3.1.3 Correlações entre parâmetros geotécnicos e resultados do ensaio SPT-T

Os estudos nesta área iniciaram-se com Décourt e Quaresma Filho (1991) *apud* Peixoto (2001), os quais apresentaram correlações entre torque obtido do SPT-T e o N_{72} . Cabe ressaltar que o N_{72} é o valor de N para uma eficiência de cravação de 72%, que corresponde à média das energias de cravação obtidas com os equipamentos utilizados no Brasil.

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

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

Décourt e Quaresma Filho (1991) concluíram que esta diferença entre as equações mostra que o K_0 , coeficiente de empuxo em repouso para solos residuais, é maior do que para solos sedimentares. Para esses autores, essas correlações, quando bem definidas, podem tornar perceptíveis certos problemas com os valores de N no SPT, como por exemplo, camadas de areia com alguns pedregulhos conduzem a valores de N mais altos do que o real.

Nesse mesmo ano, Décourt (1991) *apud* Peixoto (2001) apresentou uma nova relação T/N para os solos da bacia sedimentar de São Paulo, ao invés do 1,1, esse valor seria 1,2.

Além disso, considerando esses solos os mais estudados do Brasil, propôs um Neq como sendo o valor do torque (Kgf.m) dividido por 1,2.

Assim, para um solo qualquer, com uma relação T/N qualquer, poderia se obter um Neq , o qual corresponderia ao valor que uma sondagem SPT daria se, em lugar do solo local, estivessem os solos da bacia sedimentar terciária de São Paulo, sendo esse um solo pouco estruturado e para o qual já foram estabelecidas várias correlações.

Desta maneira, se fosse feito um ensaio em um local "X" cujo torque resultasse em 12 kgf.m, o Neq seria 10, o qual corresponderia ao valor de N se o solo correspondesse a bacia sedimentar terciária de São Paulo. O autor ainda apresentou as seguintes análises T x N_{72} para diferentes tipos de solo:

- solos terciários da bacia de São Paulo (geral): $T = 1,2 N_{72}$. Valores não válidos para solos com presença de pedregulhos;
- solos residuais de granito, gnaisse e migmatito: $T = 1,84 * N_{72}$;
- Areias finas, quase puras, da baixada Santista: – acima do lençol freático, $T \cong N_{72}$
– abaixo do lençol freático com N_{72} maior que 20, T entre N_{72} e $0,5 * N_{72}$
– para N_{72} inferior a 20, maiores dispersões;
- argilas moles (sedimentos quaternários): a relação Neq/N_{72} apresenta uma boa correlação com a sensibilidade obtida do Vane Test:
 - $T = 0,4 * z$ relação obtida estatisticamente em que z é a profundidade em que foi realizado o ensaio.

Um ano depois, Décourt (1992) *apud* Peixoto (2001) atentou para a grande vantagem da medida de torque sobre o valor N do SPT, pois o primeiro é uma medida estática, enquanto o segundo é dinâmica. Outra vantagem é que, embora durante a realização do SPT, a estrutura do solo seja quebrada dentro do amostrador, o torque mede o atrito lateral numa região em que, apesar de parcialmente perturbada, ainda preserva a estrutura original.

3.2 CÁLCULO DA CAPACIDADE DE CARGA DAS ESTACAS UTILIZANDO O SPT E SPT-T

No Brasil, o ensaio mais utilizado para cálculo da previsão de capacidade de carga é o Standard Penetration Test, SPT.

Mello (1971), referindo-se a estacas cravadas e, baseado no fato de que tanto o amostrador como a estaca são cravados por processos dinâmicos, propôs que para estacas de madeira a equação (1) deveria ter a seguinte forma:

$$P = K_1 * (d_1 * N_1) + K_2 * (d_2 * N_2) + K_n * (d_n * N_n) \quad (1)$$

Sendo:

P : resistência pontual.

K_1, K_2, \dots : fatores que dependem do tipo de solo.

d_1, d_2, \dots : incrementos de profundidade.

N_1, N_2, \dots : número de golpes nos correspondentes incrementos de profundidade.

Atualmente, existem métodos de cálculo de capacidade de carga que utilizam o SPT. Os mais difundidos no Brasil são o Método Aoki e Velloso (1975) e o Método Décourt e Quaresma (1978) (PEIXOTO, 2001).

3.3 MÉTODO DE AOKI-VELLOSO

Este método foi originalmente concebido a partir de correlações entre os resultados dos ensaios de penetração estática (cone, CPT) e dinâmicos (amostrador, SPT).

Os autores partiram de correlações estabelecidas para os solos brasileiros entre o N e a resistência unitária de ponta R_p em Kgf/cm^2 , conforme equação (2):

$$R_p = K * N \quad (2)$$

Para K (em Kgf/cm^2) foram determinados inicialmente os seguintes valores (Costa Nunes e Velloso, 1996):

Tabela 3 - Valores de K para cada tipo de solo

TIPO DE SOLO	K
Argilas, argilas siltosas e siltes argilosos.	2,0
Argilas arenosas e siltes arenosos	3,5
Siltes arenosos	5,5
Areias argilosas	6,0
Areias	10,0

Fonte: Prof. M. Marangon, 2009.

Para a resistência unitária por atrito lateral local no ensaio do cone, preferiu-se adotar correlações estabelecidas por Begemann (1965) *apud* Marangon (2009) entre este parâmetro e a resistência de ponta, equação (3):

$$R_1 = \alpha * R_p \quad (3)$$

Tabela 4 - Valores de α em (%) para cada tipo de solo

TIPO DE SOLO	α (%)
Areias finas e médias	1,2 - 1,6
Areias siltsosas	1,6 - 2,2
Siltes areno-argilosos	2,2 - 4,0
Argilas	> 4,0

Fonte: Prof. M. Marangon, 2009.

O conhecimento dessas correlações permite a estimativa dos parâmetros correspondentes para uma estaca pelas equações (4) e (5):

$$R'_p = \frac{R_p}{f_1} = \frac{K * N}{F_1} \quad (4)$$

$$R'_1 = \frac{R_1}{F_1} = \frac{\alpha * K * N}{F_2} \quad (5)$$

Os coeficientes F1 e F2 levam em consideração a diferença de comportamento entre a estaca (protótipo) e o cone (modelo). Seus valores foram, determinados por comparações com resultados de provas de carga:

Os valores de F1 e F2 foram inicialmente avaliados para estaca Franki, Metálica, Pré-moldada de concreto e depois escavada sem distinção de diâmetro. Posteriormente estes valores foram reavaliados (1998) e sugeridos para outras estacas, assim como, para os valores apresentados na Tabela 8 – de Coeficientes K e α .

Tabela 5 - Valores de F1 e F2

TIPO DE ESTACAS	F1 - reavaliados (1988)	F2 - reavaliados (1988)
Franki	2,5	5,0 - 2,0
Metálica	1,75 - 1,7	3,5 - 3,0
Pré-moldada de concreto D < 60 cm	1,75 - 1,9	3,5 - 1,4
Pré-moldada de concreto D > 60 cm	2,5	1,4
Escavada D < 60 cm	3,0 - 6,1	6,0 - 5,2
Strauss	4,2	3,8

Fonte: Prof. M. Marangon, 2009.

Observa-se que na versão original a relação entre os coeficientes foi de F2/F1, exceto para as estacas Strauss. Em uma segunda versão foram publicados os seguintes valores para F1 e F2:

Tabela 6 - Valores de F1 e F2 (Aoki-Velloso)

Tipo de Estaca	F1	F2
Pré-moldadas	1,75	3,50
Metálicas	1,75	3,50
Franki	2,50	5,00
Escavadas	3,50	7,00

Fonte: Prof. M. Marangon, 2009.

Registra-se também publicação da Estaca Franki – Eng. Frederico de Figueiredo Monteiro – Gerente Técnico:

Tabela 7 - Valores de F1 e F2 para Estacas Franki

VALORES DOS COEFICIENTES: F1 e F2		
Tipo de Estacas	F1	F2
Escavada com lama Betonítica	3,5	4,5
FRANKI fuste apiloado	2,3	3,0
FRANKI fuste vibrado	2,3	3,2
Hélice contínua (CFA)	3,0	3,8
Injetadas		
Microestacas	2,2	2,5
Raiz	2,2	2,4
Presso ancoragem	2,2	2,1
Metálica	1,8	3,5
Pré-moldada de concreto		
Cravada à percussão	2,5	3,5
Cravada com prensagem	1,2	2,3
Strauss	4,2	3,9
VibroFRANKI	2,40	3,20

Fonte: Prof. M. Marangon, 2009.

A fórmula geral para o cálculo da capacidade de carga é, equação (6):

$$P_R = \Delta_p \cdot \frac{K \cdot N}{F_1} + \sum \frac{C_a}{C_p} \cdot U \cdot \Delta_l \cdot \frac{\alpha \cdot K \cdot N}{F_2} \quad (6)$$

Onde:

A_p = área da ponta ou base das estaca;

U = perímetro da seção transversal da estaca;

C_a = cota da ponta.

Partindo das tabelas 4 e 5 foram estabelecidos para K e α os valores constantes da tabela 8. (obs: $1 \text{ Kg/cm}^2 = 100 \text{ Kpa} = 0,1 \text{ Mpa}$)

Tabela 8 - Coeficientes de K e α

TIPO DE SOLO	K (Kgf/cm²) - reavaliados (1988)	α (%) - reavaliados (1988)
Areia	10,0 - 6,0	1,4
Areia siltosa	8,0 - 5,3	2,0 - 1,9
Areia silto argilosa	7,0 - 5,3	2,4
Areia argilosa	6,0 - 5,3	3,0
Areias argilo-siltosa	5,0 - 5,3	2,8
Silte	4,0 - 4,8	3,0
Silte arenoso	5,5 - 4,8	2,2 - 3,0
Silte areno-argiloso	4,5 - 3,8	2,8 - 3,0
Silte argiloso	2,3 - 3,0	3,4
Silte argilo-arenoso	2,5 - 3,8	3,0
Argila	2,0 - 2,5	6,0
Argila arenosa	3,5 - 4,8	2,4 - 4,0
Argila areno-siltosa	3,0 - 3,0	2,8 - 4,5
Argila siltosa	2,2 - 2,5	4,0 - 5,5
Argila silto-arenosa	3,3 - 3,0	3,0 - 5,0

Fonte: Prof. M. Marangon, 2009.

Obtidos os valores de atrito e base unitários, tem-se o valor final de capacidade de carga na ruptura (último) multiplicando-se estes valores pelas suas áreas correspondentes conforme apresentado nas equações (7) e (8):

$$P_{bu} = A_{base} * q_u \rightarrow \text{Resistência de ponta.} \quad (7)$$

$$P_{su} = A_{fuste} * f_u \rightarrow \text{Atrito lateral médio.} \quad (8)$$

A profundidade de assentamento da base ou ponta da estaca é aquela, como recomenda a Norma de Fundações NBR – 6122/96, correspondente a uma carga de ruptura

mínima de pelo menos duas vezes a carga admissível (útil) da estaca, equação (9). Ou seja: adota-se no método o Fator de Segurança igual a 2 (MARANGON, 2009).

$$R_u \geq 2 * \text{Carga útil da estaca} \quad (9)$$

3.4 MÉTODO DE DÉCOURT - QUARESMA

Décourt e Quaresma (1978) *apud* Abreu (2013) apresentaram um método extremamente simples para determinar a capacidade de carga de uma estaca com base exclusivamente nos valores do SPT.

O método foi utilizado em um Class A Evento realizado em 1982, Décourt (2012). Esse evento teve como objetivo premiar a melhor previsão da carga de ruptura de uma estaca pré- moldada de concreto cravada em Amsterdam, Países Baixos, Décourt (1982). O método previu a ruptura da estaca quando fosse atingida a carga de 1179 KN o que ocorreu com uma carga entre 1150 e 1240 KN. O método sofreu uma adaptação para generalizar a sua aplicação Hachich *et al* (1996).

Os valores correspondentes à resistência por atrito e a resistência de ponta são obtidos das sondagens SPT, equações (10) e (11).

$$PL = \beta U.l.q_l \quad (10)$$

$$PP = \alpha q_p A_p \quad (11)$$

α = coeficiente de majoração ou minoração da resistência de ponta em função do tipo de solo e da estaca;

β = coeficiente de majoração ou minoração do atrito lateral em função do tipo de solo e da estaca;

l = comprimento da estaca.

Para se obter o valor de PL, o valor médio do SPT é tomado entre os valores correspondente ao fuste excluindo-se os valores correspondentes à ponta e àquele

imediatamente anterior à ponta. Obtém-se assim o SPT médio ao longo do fuste \bar{N}_f . O valor do atrito lateral unitário q_l é, em kPa, dado então pela equação (12):

$$q_t = 10. \left(\frac{\overline{N}_t}{3} + 1 \right) \quad (12)$$

Para a ponta da estaca obtém-se a resistência utilizando-se três valores de SPT: o da ponta, o anterior à ponta e o imediatamente posterior à ponta. O valor médio assim obtido, \overline{N}_p , é usado para se obter a resistência de ruptura da ponta q_p da seguinte forma, equação (13): (ABREU, 2013).

$$q_p = C. \overline{N}_p \quad (13)$$

Os valores de C estão apresentados na Tabela 9 em função do tipo de solo:

Tabela 9 - Valores de C

Tipo de solo	Valores de C (kPa)
Argilas	120
Siltes argilosos	200
Siltes arenosos	250
Areias	400

Fonte: ABREU, 2013.

Os valores de β e α dependem do tipo de estaca e do solo e estão apresentados nas tabelas Tabela 10 e Tabela 11.

Tabela 10 - Valores de β , função do tipo de estaca e do solo. (Os valores marcados com asteriscos são orientativos, pois o número de ensaios é reduzido)

Tipo de solo	Escavada em geral	Escavada (lama betonítica)	Hélice Contínua	Raiz	Injetada sob altas pressões
Argilas	0,80	0,90*	1,00*	1,50*	3,00*
Intermediários	0,65	0,75*	1,00*	1,50*	3,00*
Areias	0,50	0,60*	1,00*	1,50*	3,00*

Fonte: ABREU, 2013

Tabela 11 - Valores de α , função do tipo de estaca e do solo. (Os valores marcados com asteriscos são orientativos, pois o número de ensaios é reduzido)

Tipo de solo	Escavada em geral	Escavada (lama betonítica)	Hélice Contínua	Raiz	Injetada sob altas pressões
Argilas	0,85	0,85	0,30*	0,85*	1,00*
Intermediários	0,60	0,60	0,30*	0,60*	1,00*
Areias	0,50	0,50	0,30*	0,50*	1,00*

Fonte: ABREU, 2013.

4 ENSAIOS SÍSMICOS

Diversos ensaios sísmicos tais como o *cross-hole*, *down-hole*, *suspension PS logging*, SASW, entre outros podem ser feitos para a avaliação de parâmetros dinâmicos do solo, cada um com sua vantagem e particularidade.

O ensaio SPT com sísmica *up-hole* é um recurso antigo, porém pouco empregado. Ohta *et al* (1978) destaca esse novo método de medida da velocidade das ondas cisalhantes em campo que poderia ser amplamente utilizado, uma vez que o SPT é empregado largamente na engenharia de solos por causa de sua simplicidade e o uso comum.

Atualmente, o ensaio SPT com sísmica *up-hole* foi detalhadamente descrito em Bang & Kim (2007), inclusive com a criação de um modelo numérico em elementos finitos para estudar a geração e propagação da onda, e posteriormente ainda apresenta alguns métodos que possibilitam o cálculo da velocidade de onda cisalhante. Há alguns exemplos de utilização do SPT com sísmica *up-hole* no mundo como, por exemplo, na Turquia, onde foi empregado por Akin *et al* (2011).

Bang & Kim (2007) *apud* Pedrini (2012) discutem e comparam a utilização do método *up-hole* com SPT com o método *down-hole*, utilizado, por exemplo, no SCPT. Este último tem uma série de vantagens quanto à geração de onda e tem um custo relativamente econômico na Coreia, país onde estes autores realizaram suas pesquisas. A desvantagem do SCPT é que, em terrenos onde há fragmentos de rochas ou cascalho, sua execução torna-se difícil.

No Brasil pode-se considerar que existe uma visão diferente quanto ao emprego do SCPT. Aqui a maior dificuldade não se encontra em penetrar solos com cascalho ou rocha, mas sim, no fato de que este ensaio requer equipamento especial de elevado custo, enquanto isso, o ensaio SPT em conjunto da sísmica *up-hole* é um ensaio atrativamente mais econômico.

Bang & Kim (2007) mostram que este método adaptado do ensaio *up-hole* com o ensaio SPT (na denominação de S-SPT), tem sido bastante eficiente. De acordo com Ohta *et al* (1978) e Bang & Kim (2007), a energia do impacto gerado pelo SPT, pode ser utilizada como fonte do método *up-hole* (PEDRINI, 2012).

5 A UTILIZAÇÃO DO ENSAIO SPT-T NA PREVISÃO DA CAPACIDADE DE CARGAS E DIMENSIONAMENTO DAS ESTACAS

O ensaio SPT com medidas de torque é conhecido pela sigla SPT-T. Esta pesquisa verifica a possibilidade da utilização do SPT e SPT-T no dimensionamento de estacas escavadas.

Para o ensaio SPT, sem alterar a metodologia tradicional, Ranzini (1998) propôs adicionar-se a medição do torque (T) necessário para romper a adesão e/ou atrito solo/amostrador buscando obter-se mais um parâmetro desse ensaio. Esse torque, obtido logo após a cravação do amostrador, apresenta duas aplicações: uma é ser mais refinado do que o índice de penetração dinâmica (Nspt) para caracterizar o solo, e outra é um parâmetro que pode ser utilizado para o cálculo da parcela de aderência e/ou atrito lateral de estacas, através de equações semi-empíricas. A sondagem SPT T não afeta de maneira significativa a produtividade da sondagem SPT e nem provoca custo adicional representativo a obra. Outra vantagem observada nesta pesquisa uma melhoria na qualidade da sondagem a percussão em si (NETO, *et.al*, 2010)

Carga admissível de uma estaca é a força aplicada sobre esta, provocando apenas recalques que a construção pode suportar sem inconvenientes e oferecendo, simultaneamente, segurança satisfatória contra a ruptura ou o escoamento do solo ou do elemento estrutural de fundação. É obtida dividindo-se a capacidade de carga por um coeficiente de segurança, sendo iguais a 1,6 e 2,0 quando se dispõe ou não, respectivamente, de resultados de provas de carga, segundo a NBR 6122.

Uma estaca submetida a um carregamento vertical irá resistir a essa solicitação parcialmente pela resistência ao cisalhamento gerada ao longo de seu fuste e parcialmente pelas tensões normais geradas ao nível de sua ponta.

A capacidade de carga P_r é definida como a soma das cargas máximas que podem ser suportadas pelo atrito lateral P_l e pela ponta P_p , equação (14):

$$P_r = P_l + P_p \quad (14)$$

Designando-se por r_l e r_p as tensões limites de cisalhamento ao longo do fuste e normal ao nível da base e A_l e A_p , respectivamente, a área lateral da estaca e da seção transversal de sua ponta, tem-se a equação (15):

$$P_r = r_l A_l + r_p A_p \quad (15)$$

A capacidade de carga pode ser avaliada através de processos diretos e indiretos. Nos processos diretos os valores de r_l e r_p são determinados através de correlações empíricas e/ou semi-empíricas com algum tipo de ensaio “*in situ*”.

Nos processos dito indiretos, as principais características de resistência ao cisalhamento e de rigidez dos solos são avaliadas através de ensaios “*in situ*” e/ou de laboratório e a capacidade de carga é determinada através da utilização de formulação teórica ou experimental.

Os métodos mais utilizados para se estimar o atrito unitário médio (f_s) são os que se baseiam no índice de penetração N do SPT, porém, segundo Guimarães (2002), a medida do torque no ensaio SPT-T faz deslumbrar a possibilidade de obtenção de valores de f_s mais próximos da adesão, na ruptura de estacas.

Considerando uma variação linear da tensão de cisalhamento, desde zero no centro da base do amostrador até um máximo na superfície lateral cilíndrica, passando pelo trecho tronco cônico da sapata cortante, e, desprezando a diferença entre o atrito interno do solo na boca do amostrador e o atrito entre o solo e a parede lateral do amostrador no restante da superfície, Ranzini (1988) deduziu a seguinte equação (16):

$$f_s = \frac{T}{40,5366 \cdot h - 17,406} \quad (16)$$

Onde:

f_s = tensão de atrito lateral (kgf/cm²);

T = torque máximo (cm.kgf)

h = penetração do amostrador (cm).

O ensaio sugerido teria aplicação em solos de resistência à penetração inferior a cerca de 20.

A Equação (16) foi corrigida em 1994 por Ranzini, considerando que a tensão de atrito lateral fosse constante, tanto na face lateral do amostrador como na abertura inferior, resultante da condição de equilíbrio entre o momento aplicado, por meio do torquímetro, e o momento resistente do atrito lateral, tomando-se como parâmetro a profundidade (h) de cravação, equação (17):

$$f_s = \frac{T}{2p R^2 h - \frac{1}{3} h^3 (R - r) (2R + r) - r^3} \quad (17)$$

Sendo:

h = altura total de cravação do amostrador

$R = 2,54$ cm (raio externo do amostrador)

$r = 1,905$ cm (raio mínimo da boca do amostrador)

$h_0 = 1,90$ cm (altura do chanfro tronco – cônico)

Portanto:

$$f_s = \frac{T}{(40,5366 h - 3,1711)} \quad (18)$$

Sendo:

f_s em kgf/cm²,

T em cm.kgf e h em cm

Camapum de Carvalho *et al.* (1998), *apud* Mascarenha (2003) utilizando a equação de Ranzini, os resultados de carga de ruptura oriundos de provas de carga realizados no Distrito Federal e as capacidades de carga de ponta calculados a partir dos métodos Aoki-Velloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978), determinaram, considerando os resultados dos ensaios SPT-T, o coeficiente αT (ajuste da adesão no cálculo da parcela de carga por atrito lateral). Com base nos resultados os autores propõem, para o dimensionamento de estacas utilizando os resultados dos ensaios SPT-T e SPT, que a parcela de ponta seja determinada a partir do SPT (utilizando os coeficientes propostos por Rodrigues *et al.*,1998) e a parcela de atrito lateral a partir do SPT-T. Para tal devem ser utilizados os coeficientes apresentados na tabela 12.

Tabela 12 - Coeficientes para Cálculo da Parcela Lateral (Camapum de Carvalho *et al.* (1998))

Estacas	Aoki-Velloso		Décourt-Quaresma	
	Bico grosso	Norma	Bico grosso	Norma
Strauss	1,1	0,85	1	1,1
Pré-moldada	0,5	0,85	0,65	0,9
Escavada mecanicamente	0,75	1,3	0,95	1,35
Escavada manualmente	0,5	0,9	0,70	0,95

Fonte: MASCARENHA, 2003.

Dessa forma, o dimensionamento de estacas poderá ser efetuado segundo a Equação (19):

$$P_r = P_p + (U \times L \times f_s \times \alpha_T) \quad (19)$$

Onde:

P_p = parcela de ponta calculada segundo Aoki-Velloso (1975) ou Décourt-Quaresma (1978) considerando-se os coeficientes propostos por Rodrigues et al. (1998);

U = perímetro da seção transversal da estaca;

L = comprimento da estaca;

f_s = adesão média ao longo do comprimento da estaca;

α_T = coeficientes para cálculo da parcela lateral.

Segundo Guimarães (2002) o coeficiente α_T apresenta bons resultados para a parcela lateral, sendo que no caso de estacas escavadas deve-se desprezar a parcela de ponta (MASCARENHA, 2003).

Ranzini (2000) *apud* Peixoto (2001) considerou mais lógica a utilização do atrito lateral medido pelo torque residual, expressão que reproduz uma condição similar ao deslizamento do fuste contra o solo, Equação (20):

$$f_l = \frac{\sum \Delta \lambda_i \cdot f_i}{\sum \Delta \lambda_i} \quad (20)$$

em que:

$\Delta \lambda_i$ é o comprimento do trecho elementar de ordem "i" do fuste;

f_i é a tensão de atrito lateral residual medida pelo torquímetro na altura do trecho elementar de ordem "i" do fuste.

A carga de ponta é considerada uma propriedade extensiva, em relação ao diâmetro da ponta da estaca. Numa prova-de-carga em estaca escavada de grande diâmetro, dificilmente se atingem deslocamentos suficientes para desenvolver a superfície de ruptura que, teoricamente, atingiria oito diâmetros para cima da base e três diâmetros para baixo, no interior do maciço.

Ranzini (2000) adotou, como critério, que a carga transmitida pela ponta seria calculada pelos valores de tensão do torque atuantes numa zona abrangendo uma altura de apenas um metro para cima e um metro para baixo da base, considerando, neste caso, os valores de torque máximo.

O autor supôs também, que o torque máximo correspondente à ponta da estaca teria uma predominância em relação àqueles medidos um metro acima e um metro abaixo, e adotou um peso 2 a esse valor, Equação (21):

$$f_p = (f_{i-1} + 2 * f_i + f_{i+1}) / 4 \quad (21)$$

em que:

f_i é tensão máxima obtida do torquímetro na cota da base

f_{i-1} é tensão máxima obtida do torquímetro um metro acima da cota da base

f_{i+1} é tensão máxima obtida do torquímetro um metro abaixo da cota da base

Ranzini (2000) *apud* Peixoto (2001) sugeriu que este cálculo possa ser estendido para estacas de pequeno diâmetro, porque a superfície de ruptura é menor, devendo ficar contida dentro do intervalo de um metro acima e um metro abaixo da base da estaca.

Carvalho *et al* (1999) *apud* Peixoto (2001) comparam os valores da adesão-atrito solo amostrador, f_T , o atrito lateral local, f_c , obtido do CPT (equipamento mecânico), e observaram que existe uma grande variabilidade dos resultados, corroborando Kulhawy (2000).

Por outro lado, quando esses mesmos autores compararam f_T e f_c com os atritos laterais de estacas obtidos através de provas-de-carga instrumentadas, concluíram que a adesão, obtida através da medida do torque no SPT, conduz a resultados mais próximos à tensão de atrito lateral média dessas estacas. Os dados analisados foram obtidos dos Campos Experimentais da Escola de Engenharia de São Carlos (USP), da Faculdade de Engenharia Civil de Ilha Solteira (Unesp), Faculdade de Engenharia Civil de Bauru (Unesp) e Faculdade de Engenharia Agrícola (Unicamp). Os resultados dessas análises estão apresentados na Tabela 13 (PEIXOTO, 2001).

Tabela 13 - Relação entre os valores médios de f_T (SPT-T), f_c (CPT) com q_s (prova de carga instrumentada)

Campos Experimentais	Estacas	f_T/q_s	f_c/q_s
EESC - USP	Escavada ($\varphi= 0,35$ m e $L= 9,1$ m)	1,35	2,29
	Escavada ($\varphi= 0,40$ m e $L= 9,1$ m)	2,26	5,61
	Escavada ($\varphi= 0,50$ m e $L= 9,1$ m)	1,31	3,26
FEARGI - Unicamp	Pré-moldada ($\varphi= 0,18$ m e $L= 12,5$ m)	1,24	4,21
	Pré-moldada ($\varphi= 0,17*0,17$ m e $L= 12,5$ m)	1,49	8,08
Unesp - Ilha Solteira	Apiloadada ($\varphi= 0,25$ m e $L= 3,5$ m)	0,34	1,07
Unesp - Bauru	Apiloadada ($\varphi= 0,25$ m e $L= 6,5$ m)	0,58	1,47
	Apiloadada ($\varphi= 0,25$ m e $L= 9,5$ m)	0,65	1,67

Fonte: PEIXOTO, 2001.

6 ENSAIO S-SPT

Os ensaios sísmicos visam à determinação da movimentação do terreno gerada por uma fonte sísmica conhecida de localização também conhecida. A movimentação do terreno no tempo é caracterizada através de um sismograma. Para se processar e analisar tal movimentação são necessários os seguintes instrumentos: fonte sísmica para geração de pulso; transdutor apropriado para detecção do sinal; sismógrafo que permita a detecção e registro das ondas sísmicas. Kearey, 2009.

A determinação do perfil de velocidade de onda cisalhante (V_s) e conseqüentemente o módulo de cisalhamento máximo (G_0) é muito importante na prática geotécnica. Há alguns métodos sísmicos para se determinar o perfil de velocidade cisalhante, entre eles os ensaios em furos de sondagem são os mais utilizados (*cross-hole*, *down-hole*, e *up-hole*). Na prática, a utilização do método *up-hole* original é pouco comum, em função da dificuldade de gerar a componente da onda cisalhante (V_s). Uma forma modificada do método *up-hole* foi desenvolvida para se obter o perfil de V_s de forma eficiente. Este método é mostrado na Figura (9), sendo denominado de método S-SPT (Bang e Kim, 2007). Este novo método utiliza a energia do impacto do martelo do SPT como fonte, sendo interessante uma vez que o ensaio SPT é uma técnica de ensaio muito utilizada em investigações geotécnicas.

Durante a penetração do amostrador no solo, através da queda do martelo do SPT, uma quantidade significativa de ondas de compressão e ondas de cisalhamento causadas pela ponta e lado do amostrador (Figura 9), é gerada no solo. Este método (S-SPT) pode ser realizado sem custo adicional, sem necessidade de terceirizar o trabalho, muito econômico e fácil execução. Bang e Kim, 2007 (PEDRINI, 2012).

Figura 9 - Esquema do método S-SPT



Fonte: PEDRINI, 2012

Para o desenvolvimento do método S-SPT, é de suma importância a compreensão dos tipos de ondas geradas pelo martelo do SPT. À medida que o amostrador penetra no solo, ele gera ondas de cisalhamento (S), gerando um movimento vertical das partículas, denominado de onda tipo SV, além de ondas de compressão (P). A componente P da onda é detectada principalmente em uma direção radial a superfície do solo, quando a fonte de SPT está localizada a uma pequena profundidade, enquanto é detectada principalmente no sentido vertical em profundidades maiores. A componente de onda S é detectada principalmente no sentido vertical na superfície do solo quando a fonte está localizada em profundidades rasas e detectada na direção radial, quando localizada em profundidades maiores. Salienta-se que a direção principal de cada movimento de onda irá variar dependendo da localização da fonte e receptor.

Pedrini (2012) adaptou a metodologia e os equipamentos para realização do ensaio S-SPT conforme proposto por Bang e Kim (2007). Ensaios foram realizados no campo experimental da UNESP de Bauru, sendo seus resultados comparados a ensaios de referência da técnica *down-hole* (SCPT e *down-hole*), para validar sua técnica.

Os equipamentos desenvolvidos por Pedrini (2012) são constituídos pelo sistema de aquisição de dados, da *National Instruments*, modelo NI - USB-6353, e um *software* para tratamento e análise dos sinais. O sistema de aquisição apresenta as seguintes especificações:

- Entradas analógicas:

Canais: 32 em *single - ended channel* e 16 em *differential channel*;

Resolução: 16 bits;

Taxa de aquisição: 1.25 MS/s;

- Saídas analógicas:

Canais: 4;

Resolução: 16 bits;

- Taxa de atualização: 2.86 MS/s;
- *Trigger*: Analógica, Digital (ROCHA, 2013).

O *trigger* é o dispositivo que indica o início de registro do sinal sísmico, podendo ser de contato (fechamento de circuito entre polo negativo e positivo) ou analógico, com o auxílio de um acelerômetro, por exemplo.

Nas pesquisas realizadas por Bang & Kim (2007) *apud* Pedrini (2012), não foi especificado qual o *trigger* utilizado, contudo subentende-se que houve a utilização de um *trigger* analógico como na pesquisa de Ohta *et al* (1978) e a fonte utilizada também foi o próprio martelo do SPT.

Os equipamentos empregado em campo, além daquele tradicional do SPT, consta de:

- Três a seis caixas compostas por dois Geofones (vertical e horizontal);
- Martelo de mão, usado como fonte dos sinais sísmicos;
- Computador;
- Sistema de aquisição;
- Barra de aço com 1,30 m para aterramento do sistema;
- Cabos diversos para *trigger* e aterramento;

O computador e caixa com sistema de aquisição de dados devem ser dispostos adequadamente perto do local do ensaio. No sistema de aquisição, devem ser conectados os cabos USB (conexão com o computador), as caixas com os geofones, cabo de aterramento e energia elétrica e *trigger*. A barra de aço de 1,30 m deve ser cravada no solo com o martelo de mão e, em seguida, é ligado a ela o cabo do aterramento conforme ilustra a (Figura 10).

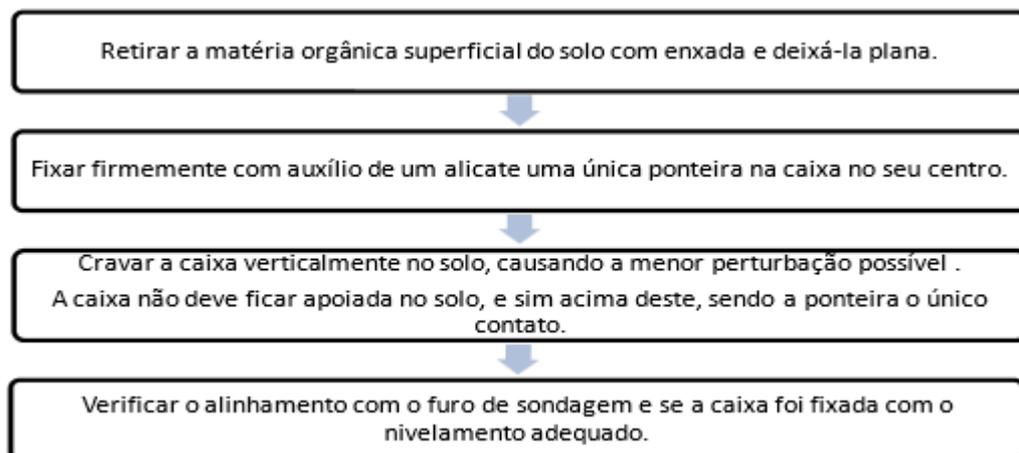
Figura 10 - Barra de aço cravada no solo servindo de aterramento



Fonte: PEDRINI, 2012

A instalação das caixas no solo requer uma série de cuidados, para garantir uma melhor recepção e registros dos sinais sísmicos gerados. Após diversos testes em campo, constatou-se uma melhor solução, que é ilustrada no fluxograma (Figura 11).

Figura 11 - Fluxograma das caixas com geofones

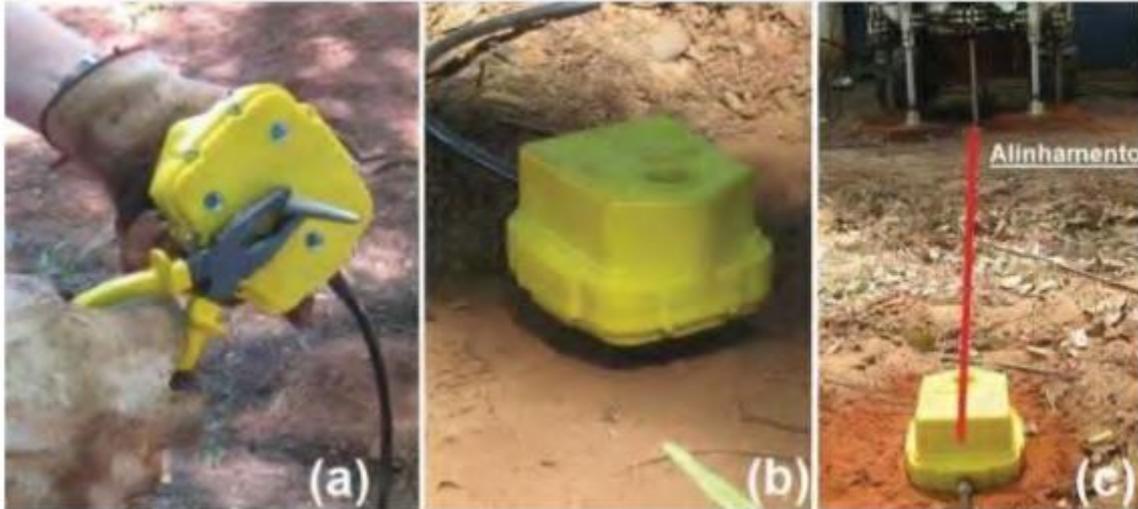


Fonte: PEDRINI, 2012.

Devido à grande importância do procedimento de instalação, visando garantir a qualidade dos registros sísmicos, o procedimento é ilustrado também pela (Figura 12) Em (a) evidencia-se que a ponteira de fixação deve estar fortemente rosqueada junto à caixa que contem os geofones; em (b), é demonstrado que a caixa deve ser cravada quase que completamente no solo, porém com o contato dando-se unicamente pela ponteira de fixação,

além de estar devidamente nivelada; e em (c) é observado o alinhamento a ser mantido da caixa para o furo de sondagem.

Figura 12 - Fixação das caixas no solo



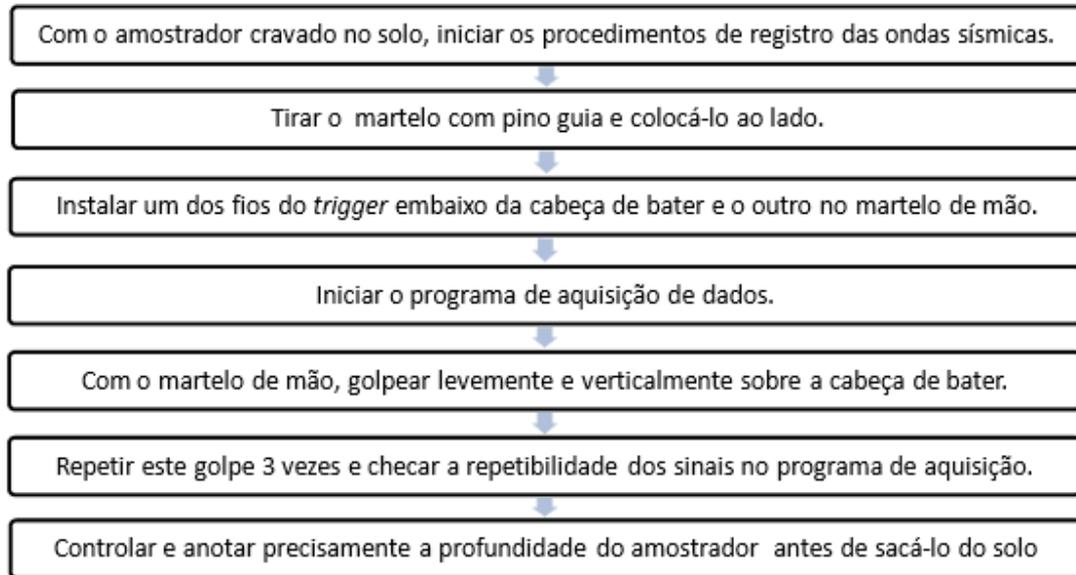
Fonte: PEDRINI, 2012.

O espaçamento das caixas no solo variaram de 1,5 a 1,5 m até de 3 em 3 m. Após a correta instalação dos equipamentos, o ensaio SPT foi iniciado segundo o procedimento padrão que consta na norma NBR 6484 (ABNT, 2001), escavando-se o primeiro metro e, em seguida, faz-se a cravação do amostrador padrão em 45 cm, contando-se o número de golpes a intervalos de 15 cm. Até este momento, não há nenhuma diferença no procedimento do ensaio sem a técnica sísmica *up-hole*. Quando o amostrador estiver completamente cravado no solo, iniciam-se os procedimentos para o registro das ondas sísmicas, conforme o fluxograma ilustrado na Figura 13.

Devem-se utilizar os procedimentos ilustrados na (Figura 13) para todas as profundidades em que o SPT é executado e anotar cuidadosamente a profundidade do amostrador padrão para posterior cálculo das velocidades. O rigor no registro das profundidades é fundamental para garantir os valores de velocidades de propagação de ondas no solo.

A aquisição é feita utilizando-se um programa desenvolvido empregando a plataforma *LabView* 8.5 para essa finalidade específica. Para a análise dos sinais e cálculo de velocidades também é utilizado outro programa desenvolvido devido à complexibilidade que envolve a análise dos registros sísmicos do ensaio S-SPT. A plataforma escolhida para o programa foi o *Matlab* (PEDRINI, 2012).

Figura 13 - Fluxograma dos procedimentos de execução do ensaio *up-hole* como o SPT



Fonte: PEDRINI, 2012.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa consistiu na análise de inovações com técnicas híbridas no ensaio de sondagem SPT. Por ser um método que apresenta erros significativos nos resultados, por não ter uma padronização no modo de execução, equipamentos e por depender muito do operador, essas inovações permitem uma melhor confiabilidade nos resultados do ensaio, proporcionando novos parâmetros de análise com aparelhagem e programas computacionais que possibilitam uma melhor interpretação do perfil geotécnico.

A medida do torque no ensaio SPT apresenta vantagens sobre o valor N do SPT, pois o primeiro é uma medida estática, enquanto o segundo é dinâmica. Outra vantagem é que, embora durante a realização do SPT, a estrutura do solo seja quebrada dentro do amostrador, o torque mede o atrito lateral numa região em que, apesar de parcialmente perturbada, ainda preserva a estrutura original. O SPT-T pode ser utilizado para o cálculo da parcela de aderência e/ou atrito lateral de estacas com obtenção de valores de atrito unitário médio mais próximos da adesão, na ruptura de estacas através de equações semi-empíricas.

A técnica sísmica associada no ensaio SPT auxilia na elaboração de fundações dinâmicas devido o conhecimento do módulo de cisalhamento máximo (G_0), obtido através do perfil de velocidade de onda cisalhante (V_s) gerado por sistema de aquisição de dados e transmitidos por programas computacionais para tratamento e análise dos sinais.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Pavimentação *et.al.*, **Curso de sondagem à percussão de simples reconhecimento.** 2002, 78 p. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAavyIAB/curso-sondagem-a-percussao#NBR6484-2011>>. Acesso em: 9 de maio 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6484: **Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos.** Rio de Janeiro, 2001, 17 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7250: **Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos.** Rio de Janeiro, 1982, 3 p.

ABREU, Paulo Sérgio Barbosa. **Execução de Estacas em Solos Lateríticos.** Brasília – DF, 2013, 139 p. Disponível em: <http://www.geotecnia.unb.br/downloads/dissertacoes/235-2013.pdf>. Acesso em: 25 de setembro de 2015.

AUGUSTI, Rafael. **Sondagem a percussão com medidas de SPT e torque, sua metodologia de campo e aplicações em obras de engenharia.** Itatiba - SP, 2004, 53 p. Disponível em: <<http://lyceumononline.usf.edu.br/salavirtual/documentos/585.pdf>>. Acesso em 2 de outubro de 2015

BELINCANTA, Antonio; FERRAZ, Roberto Lopes. **Contribuição da Universidade Estadual de Maringá no entendimento da sondagem de simples reconhecimento com SPT.** Maringá – PR, 2000, 10 p. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/view/3105>>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2015.

CARVALHO, Isaac Solino. **Proposta para certificação das empresas de sondagens à percussão – tipo SPT.** Cuiabá – MT, 2012, 95 p. Disponível em: <<http://200.129.241.80/ppgeea/sistema/dissertacoes/24.pdf>>. Acesso em: 14 de maio de 2015.

CAVALCANTE, Erinaldo Hilário. **Investigação Teórico-Experimental sobre o SPT.** Rio de Janeiro, 2002, 445 p. Disponível em: <www.coc.ufrj.br/index.php/.../715-erinaldo-hilario-cavalcante-doutorado/57-2002?Itemid=>>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2015.

LOBO, Bianca de Oliveira. **Mecanismos de Penetração Dinâmica em Solos Granulares.** Porto Alegre - SC, 2009, 231 p. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/24717/000745217.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2015.

LUKIANCHUKI, Juliana Azoia. **Interpretação de resultados do ensaio SPT com base em instrumentação dinâmica.** São Carlos – SP, 2012, 365 p. Disponível em: <www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/.../lukiantchuki_tese.pdf>. Acesso em: 20 de maio de 2015. 365p, 2012.

MARANGON, M. **Métodos diretos para calculo da capacidade de carga por meio do SPT.** 2009, 11 p. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/GF06-CapCargaProf-por-meio-SPT-2009.pdf>>. Acesso em: 10 de maio de 2015.

MASCARENHA, Marcia Maria dos Anjos. **Influência do recarregamento e da sucção na capacidade de carga de estacas escavadas em solos porosos colapsíveis.** Brasília – DF, 2003, 165 p. Disponível em:< <http://geotecnia.unb.br/downloads/dissertacoes/098A-2003.pdf>>. Acesso em 25 de setembro de 2015.

NEVES, Luis Fernando de Seixas. **Metodologia para a determinação da eficiência do ensaio SPT através de prova de carga estática sobre o amostrador padrão.** São Carlos, 2004, 111 p. Disponível em: <<http://www.dicionariogeotecnico.com.br/dissertacao.pdf>>. Acesso em: 20 de maio de 2015.

NETO, et.al. **Resultados do SPT com medida de torque para solos sedimentares e residuais da Grande Vitória - ES.** Vitória – ES, 2010, 6 p. Disponível em: <<http://www.cobramseg2014.com.br/anais/2010/arquivos/2010.3.pdf>>. Acesso em: 16 de outubro de 2015.

ODEBRECHT, Edgar. **Medidas de energia no ensaio SPT.** Porto Alegre – SC, 2003, 232 p. Disponível em <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/5840/000432285.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 10 de maio de 2015.

PEIXOTO, Anna Silvia Palcheco. **Estudo do ensaio SPT-T e sua aplicação na prática de engenharia de fundações.** Campinas – SP, 2001, 510 p. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000235433>>. Acesso em: 9 de maio de 2015.

PEDRINI, Rubens Antonio Amaral. **Desenvolvimento de sistema para sísmica up-hole em conjunto com o ensaio SPT.** Bauru – SP, 2012, 127 p. Disponível em: < http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/92971/pedrini_00011449.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 16 de outubro de 2015.

ROCHA, Breno Padovezi. **Emprego do Ensaio SPT sísmico na investigação de solos tropicais.** São Carlos - SP, 2013, 117 p. Disponível em: <https://www.google.com.br/?gws_rd=ssl#q=inova%C3%A7oes+no+ensaio+spt>. Acesso em: 11 de setembro de 2015.

SOUZA, Jeffson Murilo Santos. **A influência da compacidade das areias nas correlações entre os ensaios de cone e o SPT.** Rio de Janeiro, 2009, 250 p. Disponível em:< <http://www.labbas.eng.uerj.br/pgeciv/nova/files/dissertacoes/29.pdf>>. Acesso em 15 de maio de 2015.

UNIVERSIDADE, AVEIRO. **Breve introdução histórica.** Disponível em:< http://geo.web.ua.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=125:breve-introducao-historica&catid=5:spt&Itemid=11.Site da Universidade de Aveiro>. Acesso em: 14 de maio de 2015.

