

MARLON QUEIROZ FERREIRA

**ADAPTAÇÃO DO ENSAIO SPT PARA DETERMINAÇÃO
DE PARÂMETROS ADICIONAIS PARA O
DIMENSIONAMENTO DE FUNDAÇÕES**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dra. Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha

Versão corrigida

Original se encontra disponível na Unidade que aloja o Programa

SÃO CARLOS – SP

2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

F383a Ferreira, Marlon Queiroz
 Adaptação do ensaio SPT para determinação de
 parâmetros adicionais para o dimensionamento de
 fundações / Marlon Queiroz Ferreira; orientadora
 Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha. São Carlos,
 2015.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
 e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de
 Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
 2015.

 1. Ensaio SPT. 2. Resistência de ponta. 3. Prova de
 carga no amostrador. 4. Fundações. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **MARLON QUEIROZ FERREIRA.**

Título da dissertação: "Adaptação do ensaio SPT para determinação de parâmetros adicionais para o dimensionamento de fundações".

Data da defesa: 22/02/2016

Comissão Julgadora:

Resultado:

Profa. Dra. **Cristina de Hollanda Cavalcante Tsuha**
(Orientadora)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Nelson Aoki**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Profa. Dra. **Anna Sílvia Palcheco Peixoto**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP Bauru)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Prof. Dr. **Edmundo Rogério Esquivel**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

À minha família pelo apoio e incentivo direcionado a mim. A Deus pela motivação e proteção em todas as minhas viagens... Sou eternamente grato por tudo, pois sem eles nada disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família que me deu total apoio até a conclusão desta tese. Ao meu pai Jarbas, que me incentivou e esteve ao meu lado desde quando iniciei minha carreira na área de engenharia civil. Obrigado por seu forte exemplo e por me conduzir todos os dias o valor de uma boa educação. À minha querida mãe Eucarice pela preocupação e amor, e por ser um dos grandes pilares em minha vida. Ao meu irmão Glauco que durante todos meus dias de vida mostrou solidariedade e amor incondicional. A todos referenciados acima, desejo minha eterna gratidão e direciono todo o meu amor.

A madrinha Jussara, ao meu tio Odair e aos meus primos Gustavo e Cinthia, que me acolheram inúmeras vezes em Ribeirão Preto, e me deram a oportunidade e imenso prazer de viver cada minuto ao lado desta minha segunda família.

Agradeço a empresa Geometa Engenharia de Fundações que forneceu local e equipamento para realização dos ensaios de campo e garantiram o desenvolvimento desta pesquisa. A Engenheira Daiane e ao Engenheiro Fernando que sempre disponibilizaram datas e perfeito funcionamento do equipamento de sondagem. Ao Engenheiro Célio por me substituir na empresa em alguns momentos que estive ausente. Ao Engenheiro José Ribeiro pela contribuição inestimável do meu crescimento profissional. Em especial, agradeço ao Eng. Gildásio que foi o incentivador principal para meu ingresso no mestrado e durante dois anos demonstrou total entusiasmo de ser meu professor particular de fundações.

A todos professores, funcionários e colegas do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos, que me receberam muito bem e foram decisivos para minha formação. Em especial a minha orientadora Professora Dra. Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha que acreditou no meu potencial e me concedeu a oportunidade de trabalhar ao seu lado e adentrar no meio geotécnico. Sem dúvida deve proporcionar uma felicidade incontestável a todos que a conhecem devido as suas inúmeras qualidades e a pessoa que é.

Por fim agradeço a Deus, que sem dúvida é o principal motivo que permitiu minha chegada até aqui, e sei que ELE recompensará todos os sacrifícios, trabalhos e cuidados que aqueles citados acima tiveram por mim e retribuirá todo o bem que me fizeram no corpo e na alma, pois eu por mim não sou capaz de pagar-lhes tudo isto.

RESUMO

FERREIRA, M.Q. (2015). *Adaptação do ensaio SPT para determinação de parâmetros adicionais para o dimensionamento de fundações*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

A presente pesquisa foi desenvolvida com o intuito de agregar alguns procedimentos ao Ensaio SPT, para se obter um maior número de parâmetros para o dimensionamento de fundações, visto que este ensaio é o tipo de investigação de subsolo mais utilizado no Brasil para este fim. Os procedimentos adicionados foram: medida de eficiência do equipamento e ensaio de arrancamento do amostrador em cada camada distinta de solo atravessado. Foram realizados nove ensaios de arrancamento do amostrador, em três furos de sondagem, nas profundidades de dois, cinco e dez metros (três camadas de solos distintas). Em um quarto furo foram realizadas duas provas de carga à compressão no amostrador (nas profundidades de dois e cinco metros) para determinação da eficiência do equipamento. Por meio destes ensaios foi possível obter: a resistência de ponta do ensaio SPT, a resistência por atrito lateral na face externa do amostrador, e a razão de atrito do ensaio SPT, que pode ser usada para a classificação de solo de modo similar ao utilizado para o ensaio de cone. Além destes resultados, neste trabalho foi também analisada a relação entre a resistência por atrito interna e externa no amostrador durante o ensaio, conhecida por a . Esta relação mostrou-se maior para a camada de solo com grande porcentagem de pedregulho e menor para a camada que apresentava maior porcentagem de argila. Foi observado também que o valor de a cresce linearmente com a razão entre o valor de N_{SPT} e a tensão vertical efetiva na profundidade do ensaio. Os resultados deste trabalho também mostraram que o valor da razão entre a resistência de ponta do ensaio SPT (q_{SPT}) e o valor de N_{SPT} é único para o mesmo tipo de solo. Além disso, os valores encontrados nesta pesquisa da razão q_{SPT}/N_{SPT} são próximos aos valores da razão entre a resistência de ponta do ensaio de cone e o N_{SPT} encontrados na literatura.

Palavras-chave: ensaio SPT; resistência de ponta; prova de carga no amostrador; eficiência; fundações

ABSTRACT

FERREIRA, M.Q. (2015). *Adaptation of the SPT test for the determination of additional parameters for the design of foundations*. Dissertation (Master) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

This research was developed in order to add some procedures to the SPT test, to obtain new parameters for the design of foundations, since this test is the most used in Brazil for this purpose. The additional measurements are: the energy delivered to the rod during a hammer impact, and the sampler's shaft resistance known from static uplift. For this investigation, nine uplift tests were conducted on the SPT sampler, in three boreholes, at three different depths (two, five and ten meters) to the determination of the SPT side friction resistance. Additionally, two compressive static load tests were carried out on the sampler in a fourth borehole to the determination of the efficiency of the SPT equipment. The results showed that the SPT test could provide measurements of end bearing and side friction resistances. Also, a SPT normalized friction ratio was determined for the classification of soil in a similar way used based on CPT data. In addition, the ratio between the internal and the external skin friction in the sampler during the test, known as “*a*” was analyzed. The values of this ratio were higher for the soil with higher percentage of gravel, and smaller for the soil with higher percentage of fines. Additionally, the “*a*” value increases linearly with the ratio between the N_{SPT} value and the effective vertical stress at the tested depth. The results of the ratio between the SPT end bearing resistance and the N_{SPT} found in this research are of similar magnitude to the ratios between CPT end bearing resistance and the N_{SPT} found in the literature.

Keywords: SPT test; tip resistance; load test on SPT sampler; efficiency; foundations

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Amostrador do tipo Raymond bipartido (Belincanta et al, 2010).....	22
Figura 2- Desenho esquemático do procedimento de obtenção do N_{SPT}	23
Figura 3- Amostrador padrão	24
Figura 4- Energia potencial do sistema considerando o acréscimo da energia potencial do martelo e das hastes (Odebrecht, 2003).....	26
Figura 5- Relação entre o comprimento da haste e a eficiência (Schmertmann e Palácios, 1979)	27
Figura 6- Relação entre o comprimento da haste e a eficiência η (Aoki e Cintra, 2000)	28
Figura 7- Esquema de propagação de ondas de tensão no SPT (Lukiantchuki, 2012)	30
Figura 8- Evolução de energia potencial, energia cinética e trabalho durante o evento golpe do martelo (Neves, 2004)	32
Figura 9- Trabalho calculado através de uma prova de carga estática para a penetração obtido no último golpe dinâmico do martelo SPT (Neves, 2004)	35
Figura 10- Equilíbrio das forças atuantes no amostrador durante o golpe no ensaio SPT (modificado de Cintra et al. (2013)).....	37
Figura 11- Equilíbrio das forças atuantes na ponta aberta do amostrador (Cintra et al. (2013)).	40
Figura 12- Equilíbrio de forças no amostrador do ensaio SPT considerado nesta pesquisa.....	44
Figura 13- Local de realização dos ensaios	45
Figura 14- Resultados da sondagem SP-01	47
Figura 15- Resultados da sondagem SP-02.	48
Figura 16- Medida de recuperação de solo amostrado.....	49
Figura 17- Locação dos furos	50
Figura 18- Equipamento de sondagem a ser utilizado na realização dos ensaios: (a) vista geral e (b) detalhe do martelo.....	51
Figura 19- Equipamentos para ensaios de arrancamento: (a) desenho esquemático e (b) montagem do ensaio.....	52
Figura 20- Calibração da célula de carga	53
Figura 21- Equipamento para monitoramento do carregamento: (a) segmento de tubo semelhante ao das hastes e (b) célula de carga	53
Figura 22- Sistema de prova de carga com relógio magnético + medidor LVDT+ equipamento com célula de carga + sistema de aquisição de dados	55
Figura 23- Prova de carga estática na haste do amostrador.....	55
Figura 24- Curva carga x deslocamento dos ensaios realizados no amostrador a 2m de profundidade.	56

Figura 25- Curva carga x deslocamento dos ensaios realizados no amostrador a 5m de profundidade.	56
Figura 26- Curva carga x deslocamento dos ensaios realizados no amostrador a 10m de profundidade.	56
Figura 27- Curva carga x recalque da prova de carga a compressão a 2,0 m de profundidade ...	58
Figura 28- Curva carga x recalque da prova de carga a compressão a 5,0 m de profundidade ...	58
Figura 29- Curva Granulométrica para amostra obtida a 2,0 m de profundidade.....	63
Figura 30- Curva Granulométrica para amostra obtida a 5,0 m de profundidade.....	63
Figura 31- Curva Granulométrica para amostra obtida a 10,0 m de profundidade.....	64
Figura 32- Curvas Granulométricas obtidas das amostras a 2, 5 e 10m de profundidade.....	64
Figura 33- Resultados de q_{spt} x N_{SPT} para as profundidades de 2,0m, 5,0m e 10m....	66
Figura 34- Comparação entre as componentes de resistência à penetração do ensaio SPT e CPT (modificado por Schmertmann (1979))	68
Figura 35- Valores da razão q_c / N_{SPT} x D50 (Robertson et. al. 1983).	69
Figura 36- Valores da razão q_{spt} / N_{SPT} x D50 e q_{spt} / N_{SPT} x D20 obtidos nesta pesquisa para os solos a 2,5 e 10 m de profundidade.....	69
Figura 37- Resultados de q_{spt} x R_f plotados no ábaco de classificação de solo por Robertson et al. (1986)	71
Figura 38- Valores de “ α ” x valores de N_{SPT}	73
Figura 39- α x N_{SPT} / σ_v para todas as profundidades	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Resultados de comprimento da recuperação.....	46
Tabela 2- Resultados dos ensaios de arrancamento do amostrador	57
Tabela 3- Resultados das provas de carga a compressão no Furo 4	58
Tabela 4- Deslocamento correspondente a um golpe do ensaio SPT	59
Tabela 5- Encurtamento elástico da haste nos ensaios relativos a um golpe de martelo.....	59
Tabela 6- Energia do sistema corrigida.....	60
Tabela 7- Eficiência do equipamento de sondagem empregado.....	61
Tabela 8- Resultados dos ensaios de granulometria	62
Tabela 9- Resultados de R_u e q_{SPT} , f_{s-spt} , e razão de atrito.....	65
Tabela 10- Resultados da razão q_{SPT}/N_{SPT}	67
Tabela 11- Valores de q_c/N_{SPT} proposto por Schmertmann (1970 apud Danziger 1982).....	68
Tabela 12- Resultados de razão de atrito.....	70
Tabela 13- Classificação pelo ensaio de granulometria e através do ábaco de Robertson et al.(1986)	71
Tabela 14- Valores de “ α ”	73
Tabela 15- Valores de N_{SPT}/σ_v para todas as profundidades	74

LISTA DE SÍMBOLOS

A : Área

c : Velocidade de propagação de impulsos de tensão por Lukiantchuki (2012)

D_p : Diâmetro externo do anel na ponta do amostrador

D_{int} : Diâmetro interno

D_{ext} : Diâmetro externo

D_p : Diâmetro da ponta do amostrador

E : Módulo de Elasticidade

$E_{amostrador}$: Energia mobilizada para efetivamente cravar o amostrador no solo

E_h : Energia transferida ao topo da composição de hastes

$EP_{sistema}$: Energia potencial imposta durante o evento

f_{s-spt} : Atrito lateral do ensaio SPT

g : Aceleração da gravidade

h_q : Altura de queda padrão do martelo

l : Comprimento da composição de hastes por Lukiantchuki (2012)

L : Comprimento externo do anel

L_{int} : Comprimento de recuperação do solo embuchado no amostrador

L_h : Comprimento total de haste utilizado não considerando o amostrador

L_p : Comprimento da ponta do amostrador

L_{ext} : Comprimento correspondente ao total penetrado para obter o N_{SPT}

M_h : Massa das hastes

M_m : Massa do martelo

N_{SPT} : Número de golpes do Ensaio SPT

Q_u : Carga de ruptura

q_c : Resistência de ponta do cone

q_{SPT} : Resistência de ponta do ensaio SPT

R : Produto de resistência

R_b : Resistência de ponta do amostrador

R_f : Razão de atrito

r_L : Atrito na lateral em unidades de tensão

r_{li} : Atrito na lateral interna em unidades de tensão

r_p : Resistência de ponta em unidades de tensão

R_s : Resistência do sistema amostrador-solo dependente do movimento relativo entre as partes no golpe do ensaio SPT, ou força elástica

R_{se} : Resistência externa por atrito lateral do amostrador

$R_{s,s}$: Resistência do sistema amostrador-solo para uma nega s

R_u : Resistência do solo à penetração estática do amostrador

R_1 : Força de atrito na parede vertical externa do amostrador

R_2 : Força de atrito na parede vertical interna do amostrador

R_3 : Força de reação vertical na seção anelar da ponta do amostrador

R_4 : Componente vertical da força de atrito ao longo da superfície biselada troncocônica do amostrador

S : Deslocamento permanente

s_m : Deslocamento resultante do último golpe do ensaio SPT

S_L : Área externa do anel cortante

T : Energia cinética

T_A : Energia transferida ao sistema amostrador-solo

U : Energia potencial teórica do sistema ou energia nominal do SPT

V : Energia potencial

V_e : Energia potencial elástica

V_{eh} : Energia potencial elástica armazenada no conjunto de hastes

V_{es} : Energia potencial elástica armazenada no solo que envolve o amostrador

W : Trabalho por Neves (2004)

W : Peso das hastes + amostrador + cabeça de bater

W_h : Peso da haste + cabeça de bater

W_{nc} : Trabalho efetuado por forças não-conservativas

W_p : Trabalho gerado pelas forças resistentes não conservativas mobilizadas ao longo do amostrador durante sua penetração

$W_{p,s}$: Trabalho gerado pelas forças resistentes não conservativas mobilizadas ao longo do amostrador durante sua penetração em um ensaio estático

W_q : Trabalho gerado durante o evento *golpe do martelo* antes da cravação do amostrador padrão no solo

α : Razão entre o atrito na lateral interna e externa do amostrador padrão

δ : Variação em um intervalo de tempo

η : Eficiência do Ensaio SPT

η^* : Eficiência do Ensaio SPT definida por Aoki e Cintra (2000) através da máxima energia transferida ao sistema amostrador-solo

η_s : Eficiência do Ensaio SPT definida por Aoki e Cintra (2000) através do trabalho realizado para penetrar o amostrador no solo

η_1 : Eficiência do martelo (ODEBRECHT, 2003)

η_2 : Eficiência da composição de hastes (ODEBRECHT, 2003)

η_3 : Eficiência do sistema (ODEBRECHT, 2003)

ρ : Penetração permanente do amostrador devido a aplicação de um golpe

ρ_e : Encurtamento elástico

s : Nega de um ensaio dinâmico

LISTA DE SIGLAS

ABEF: Associação Brasileira de Engenharia de Fundações e Geotecnia

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

CPT: Cone Penetration Test (Ensaio de cone)

LVDT: Linear Variable Differential Transformer (medidor de deslocamento)

NBR: Norma Brasileira

SPT: Standart Penetration Test (Ensaio de simples reconhecimentos de solo)

USP: Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	19
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
1.1 PROSPECÇÃO GEOTÉCNICA DO SUBSOLO	21
1.1.1 Ensaio SPT.....	21
1.2 ENERGIA NO SPT	24
1.2.1 Conceito de eficiência no ensaio SPT.....	26
1.2.2 Mecanismos de transferência de energia no ensaio SPT	28
1.2.3 Princípio da Conservação de energia de Hamilton	30
1.2.4 Determinação da eficiência do ensaio SPT mediante prova de carga estática sobre o amostrador padrão.....	34
1.3 Proposição de Aoki (2012).....	36
2 MATERIAIS E MÉTODOS	43
2.1 Procedimento para a determinação da resistência de ponta e por atrito lateral do ensaio SPT.....	43
2.2 Área Experimental	45
2.3 Equipamento de Sondagem.....	51
2.4 Ensaio de arrancamento do amostrador	52
2.5 Prova de carga à compressão no amostrador para determinação da eficiência do sistema de ensaio	54
3 RESULTADOS	56
3.1 Resultados dos ensaios de arrancamento no conjunto haste + amostrador	56
3.2 Resultado dos ensaios de compressão para determinação da eficiência	57
3.3 Resultados dos ensaios de caracterização granulométrica dos solos nas profundidades ensaiadas (2, 5 e 10m).....	62
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	65
4.1 Comparação da resistência de ponta do ensaio SPT, q_{spt} , com valores de N_{spt}	66

4.2	Comparação das resistências de ponta do ensaio de cone q_c e do ensaio SPT q_{spt}	67
4.2.1	<i>Razão de atrito do Ensaio SPT (f_{s-spt}/q_{spt})</i>	70
4.3	Análise da relação entre atrito interno e externo no amostrador “ α ” proposta em Aoki (2012)	72
4.3.1	<i>Valores de α</i>	72
4.3.2	<i>Análise da relação entre α x N_{SPT}</i>	73
4.3.3	<i>Análise da relação entre α x N_{SPT}/σ_v</i>	74
5	CONCLUSÃO.....	75
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

INTRODUÇÃO

Devido à complexidade de determinar teoricamente a capacidade de carga de fundações por estacas e sapatas, correlações empíricas que estabelecem relações entre os resultados do ensaio SPT com o comportamento do elemento de fundação são comumente utilizadas na prática brasileira.

Inicialmente, antes de qualquer interpretação dos dados do ensaio SPT, é importante saber que existem variações no processo executivo e no equipamento que interferem nos resultados do ensaio. Portanto, para que os resultados de resistência a penetração deste ensaio (N_{SPT}) sejam adequadamente interpretados e utilizados, é necessário que se conheça a eficiência do equipamento de sondagem, pois o valor de N_{SPT} é dependente da energia que chega no amostrador no momento do golpe. A energia transmitida ao sistema amostrador-solo é um dos principais fatores que influenciam o valor do índice de resistência à penetração N_{SPT} .

Inúmeros trabalhos publicados já trataram sobre a eficiência do ensaio SPT, destacando-se Schmertmann & Palacios (1979), Kovacs & Salamone (1982), Belincanta (1985, 1998) e Cavalcante (2002). Para determinação da eficiência do ensaio SPT, Neves (2004) propôs executar uma prova de carga estática no amostrador realizada logo após o ensaio. Conhecer a eficiência do sistema de ensaio é fundamental na interpretação do ensaio SPT para posterior aplicação nos métodos de previsão de capacidade de carga de fundações, e também em outras aplicações em obras geotécnicas.

Aoki (2012), fundamentado no princípio da conservação de energia de Hamilton, obteve a relação entre a resistência lateral e de ponta do ensaio SPT a partir do equilíbrio de forças no amostrador, com o intuito de melhorar a previsão de capacidade de carga de fundações por estacas. Para obter esta relação, foi utilizada a medida do comprimento de recuperação de solo no amostrador padrão após a determinação do índice N_{SPT} juntamente com eficiência do equipamento.

Com base no cenário mencionado acima, e com o intuito de melhorar o dimensionamento de fundações, o presente trabalho apresenta algumas adaptações no ensaio SPT, para a determinação de parâmetros como resistência de ponta e razão de atrito deste ensaio, com base na medida de eficiência do equipamento e no equilíbrio de forças no amostrador.

A ideia principal desta pesquisa foi verificar se a partir do ensaio SPT seria possível obter valores de resistência de ponta de modo equivalente ao ensaio de cone para o dimensionamento de fundações, e também valores de razão de atrito para a classificação do solo quanto ao seu comportamento. Para este fim, foi verificado um novo procedimento para o ensaio SPT, onde foram acrescentados ao ensaio padrão:

1. Provas de carga à compressão para a determinação da eficiência do equipamento de ensaio (que pode ser substituída por outro procedimento para medir a eficiência);
2. Provas de carga à tração (ensaios de arrancamento), após a medida do índice N_{SPT} , para medir a resistência por atrito lateral externo no amostrador.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 PROSPECÇÃO GEOTÉCNICA DO SUBSOLO

Na medida em que o solo é o meio que suporta as cargas provenientes da estrutura, sua identificação e a caracterização de seu comportamento são essenciais para solução de qualquer problema.

A determinação das propriedades do subsolo de instalação das fundações de uma estrutura pode ser feita por meio de ensaios de laboratório ou por ensaios de campo. No entanto, na prática das construções, os ensaios de campo são mais empregados, ficando a investigação laboratorial restrita a uma minoria de casos especiais.

Dentre os principais processos de investigação do subsolo para fins de projeto de fundações, se destacam os ensaios CPT e o SPT. O presente trabalho irá abordar apenas o segundo ensaio, que é o método de prospecção geotécnica mais utilizado no Brasil.

1.1.1 *Ensaio SPT*

A relação de equipamentos utilizados no ensaio SPT pode ser encontrada em diversos manuais e trabalhos, assim como em sua norma vigente NBR 6484 (2001). Uma lista detalhada pode ser encontrada no Manual de Execução de Fundações e Geotecnia da Associação Brasileira de Empresas de Engenharia de Fundações e Geotecnia (ABEF).

Fernando Schnaid (2000) afirma que “*O ensaio de SPT constitui a investigação mais utilizada na prática corrente da Geotecnia, especialmente em fundações, e a tendência observada deve ser mantida no futuro próximo, devido à simplicidade, economia e experiência acumulada*”.

A grande vantagem deste tipo de ensaio sobre os outros que se destinam ao mesmo fim é a de reunir em uma só operação a coleta de amostras, profundidade do lençol freático e a medição da resistência do solo através do índice de resistência a penetração N_{SPT} . Aliada a esta grande vantagem, este método de sondagem é de baixo custo e não demanda mão de obra altamente especializada.

O ensaio SPT (normalizado pela NBR 6484 – Execução de sondagem de simples reconhecimento dos solos) é realizado a cada metro de profundidade e consiste na cravação de um amostrador de dimensões normalizadas, chamado originalmente de Raymond-Terzaghi (Figura 1), por meio de golpes de um peso de 65 kgf caindo em queda livre de uma altura igual a 75 cm de altura.

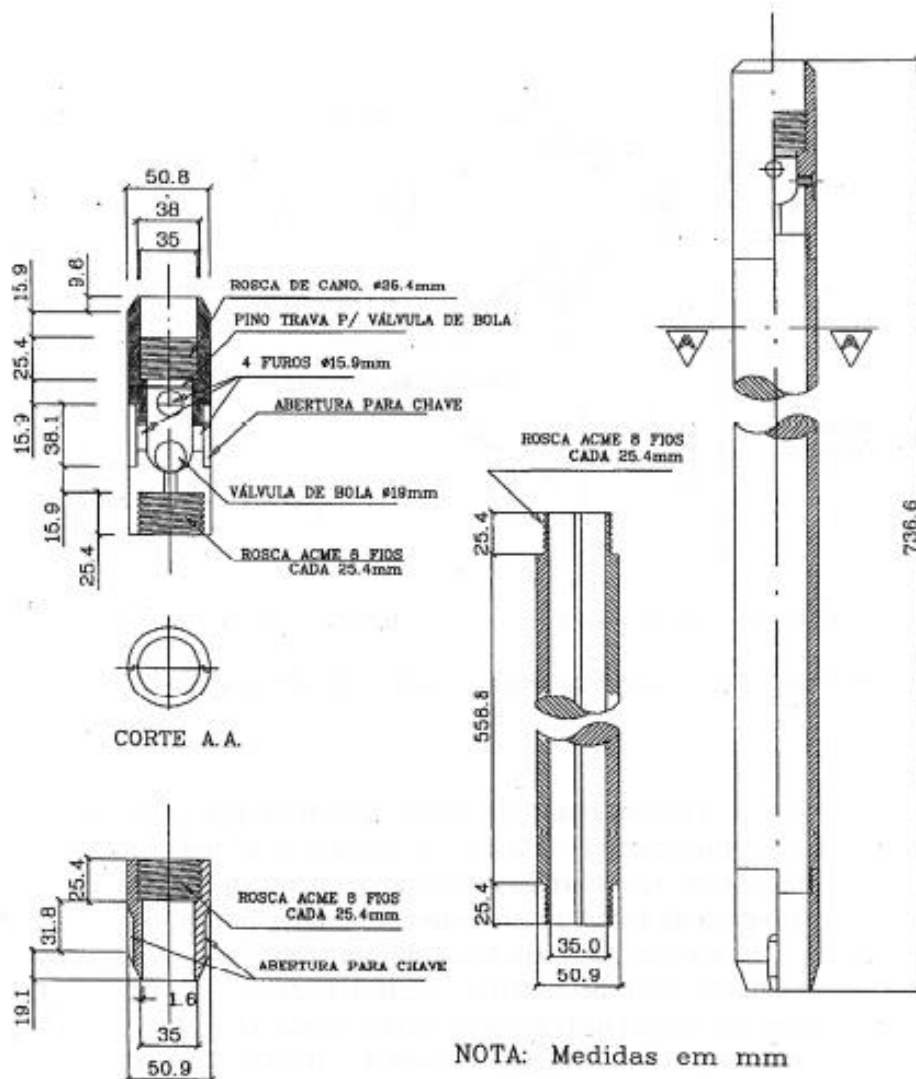


Figura 1- Amostrador do tipo Raymond bipartido (Belincanta et al, 2010).

No ensaio SPT é obtido o índice de resistência à penetração N_{spt} , definido como o número de golpes necessários para fazer com que o amostrador penetre 30 cm no solo, após uma cravação inicial de 15 cm. Este procedimento é esquematizado na Figura 2.

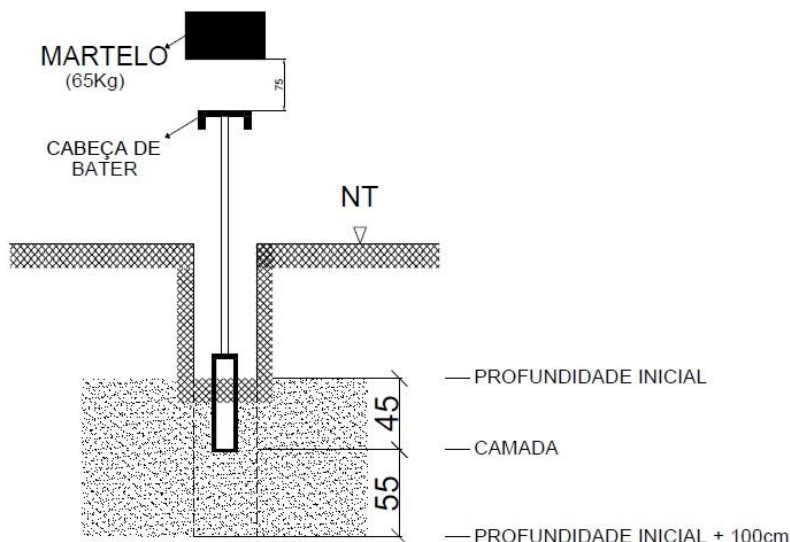


Figura 2 - Desenho esquemático do procedimento de obtenção do N_{spt} .

O número de golpes necessários à penetração dos primeiros 15 cm não é considerado para o cálculo do N_{spt} . Após a obtenção do N_{spt} , é utilizado um trado helicoidal para a escavação de um metro, onde será repetido o ensaio. O avanço com trado é feito até atingir o nível de água ou caso ocorra um aumento da resistência do solo. Daí em diante, a perfuração continua com o uso de trépano e circulação de água, processo denominado de “lavagem”. O trépano é uma ferramenta da largura do furo e com terminação em bisel cortante, utilizado para desagregar o material que se encontra no fundo do furo, e dotada de duas saídas laterais para a água. Caso o lençol freático seja encontrado, deverá ser anotada a profundidade do nível d’água e a sua posição final após decorrer, no mínimo, 12 horas do fim da sondagem.

Após o término de cada ensaio SPT, o amostrador é retirado do furo e a amostra deformada é coletada para posterior identificação tátil-visual da Norma ABNT NBR 6484 (2001) – identificação e classificação de amostras obtidas em sondagem de simples reconhecimento dos solos, e uma parte delas que se encontra em melhor estado deverá ser guardada em um frasco que mantenha a umidade da mesma, e posteriormente enviada ao laboratório para confirmação do resultado de campo e se necessário algum ensaio de classificação.

A paralização do ensaio é definida pela Norma ABNT NBR 6484 (2001). A Figura 3 apresenta um modelo do amostrador padrão utilizado no ensaio SPT.



Figura 3 - Amostrador padrão.

1.2 ENERGIA NO SPT

Segundo Belicanta & Ferraz (2000), no instante do impacto do martelo durante o ensaio SPT, a energia cinética é transferida para o conjunto de hastes por meio da propagação de uma onda de tensão, sendo que, a configuração do martelo, das hastes, da cabeça de bater e dos materiais que constituem os equipamentos influenciam na magnitude e na duração desses impulsos.

A energia disponibilizada ao sistema quando o martelo é levantado encontra-se na forma de energia potencial, sendo assim, de acordo com a NBR 6484 (2001) pode-se representar a energia nominal do SPT pela equação abaixo:

$$U = M_m \times g \times h_q = 65 \times 9,81 \times 0,75 \cong 478,2 J \quad (1)$$

Onde:

M_m – massa do martelo (kg);

g – aceleração da gravidade (m/s²);

h_q – altura de queda padrão do martelo (m).

Considerando tal evento, foi proposto por Odebrecht (2003) uma correção da energia potencial, tal qual, considera um aumento de energia em consequência à penetração do amostrador no solo. Segundo o autor a energia potencial imposta durante o evento, quando se considera um referencial fixo e externo, pode ser representada por:

$$EP_{sistema} = M_m \times g \times (h_q + \rho) + M_h \times g \times \rho \quad (2)$$

Sendo:

ρ – penetração permanente do amostrador devido à aplicação de um golpe

M_h – massa das hastes

O processo de cravação do amostrador no solo é demonstrado em três etapas conforme a Figura 4. A primeira ($t_1=0$) representa o momento que antecede a liberação do martelo, já a segunda etapa ($t_2=t$) indica o instante antes do martelo atingir a cabeça de bater, e a última etapa ($t_3=\infty$) corresponde ao instante após à cravação do amostrador no solo, ou seja, quando a energia potencial gravitacional do martelo e das hastes já foi consumida na cravação do amostrador, devolvidas elasticamente e amortecidas dinamicamente no interior do martelo e das hastes.

A variação da energia potencial gravitacional do martelo e das hastes é similar ao valor da energia potencial gravitacional teórica do martelo, em situações de solos resistentes ($N_{SPT} \geq 15$) associados a comprimentos de composição de hastes maiores que 20 metros, sendo assim, é tolerável assumir valores iguais para essas condições (ODEBRECHT, 2003). Para solos de menor resistência, onde a penetração do amostrador do solo é maior, esta diferença de valores é mais intensa.

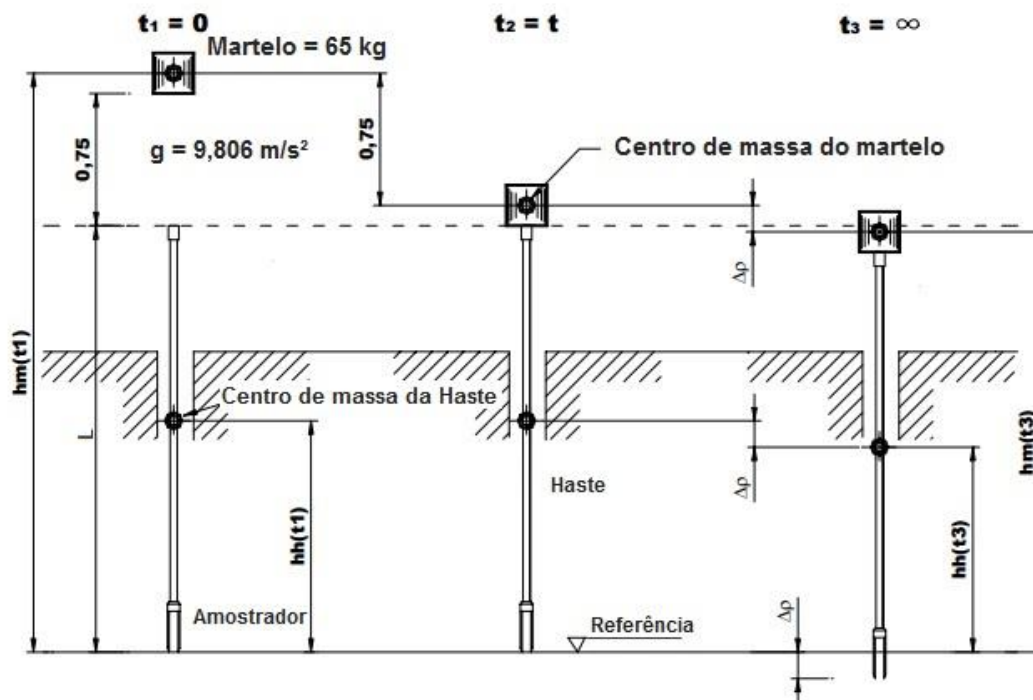


Figura 4 - Energia potencial do sistema considerando o acréscimo da energia potencial do martelo e das hastes (Odebrecht, 2003).

1.2.1 Conceito de eficiência no ensaio SPT

De acordo com Lukiantchuki (2012) a relação entre a quantidade de energia transferida ao topo da composição de hastes (E_h), no instante do primeiro impacto do martelo, e a energia potencial nominal do ensaio SPT (478,2 J), define a eficiência do ensaio SPT (η) que é representada pela seguinte equação:

$$\eta = E_h / 478.2 \times 100 (\%) \quad (3)$$

A Figura 5, apresenta uma relação por Schmertmann e Palácios (1979), entre o comprimento da haste e a eficiência através de alguns ensaios, na qual os autores atestaram que hastes com comprimentos curtos fazem a eficiência η tender a zero e quando o comprimento da haste excede 15 m a eficiência tende a um valor máximo. No entanto, esta suposição parece contradizer o bom senso em que hastes mais longas apresentam perdas maiores do que hastes mais curtas .

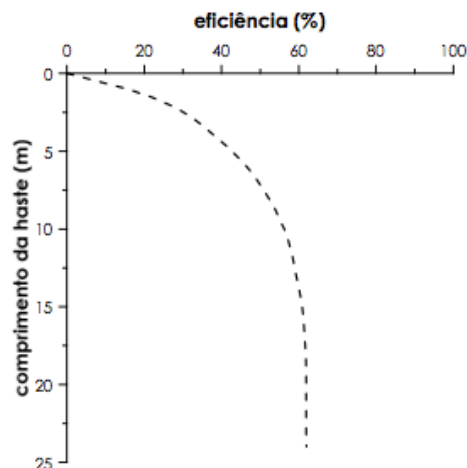


Figura 5 - Relação entre o comprimento da haste e a eficiência (Schmertmann e Palácios, 1979).

Uma nova proposta, por Aoki e Cintra (2000), definiu a eficiência no ensaio SPT η^* como sendo a relação entre a máxima energia transferida ao sistema amostrador-solo (T_A), e a energia potencial normalizada do SPT. Para isto, a instrumentação deve estar localizada próxima do topo do amostrador, resultando assim, no valor da energia que realmente chega ao amostrador.

$$\eta^* = T_A / 478,2 \times 100 (\%) \quad (4)$$

Aoki e Cintra (2000) também determinaram uma relação entre o comprimento da haste e a eficiência na qual é apresentada pela Figura 5. Além disso, caracterizaram que a variável independente mais importante, se tratando da eficiência, é a rigidez/resistência do solo sob a ponta do amostrador.

A eficiência do ensaio SPT, de acordo com Odebrecht (2003), pode ser discriminada pelas seguintes eficiências: do martelo (η_1), da composição de hastes (η_2) e do sistema (η_3). Estas eficiências quantificam as perdas de energia que surgem durante a cravação do amostrador no solo, permitindo assim, calcular a energia mobilizada para efetivamente cravar o amostrador no solo.

$$E_{\text{amostrador}} = \eta_3 [\eta_1 (0.75 + \rho) \times M_m \times g \times \eta_2 (M_h \times g \times \rho)] \quad (5)$$

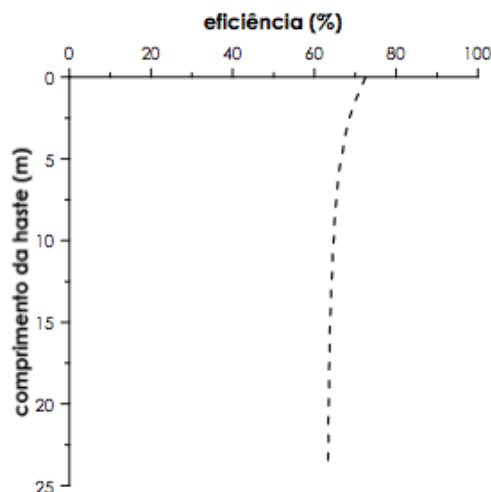


Figura 6 - Relação entre o comprimento da haste e a eficiência η (Aoki e Cintra, 2000).

1.2.2 *Mecanismos de transferência de energia no ensaio SPT*

O mecanismo de transferência de energia no ensaio SPT foi detalhado por Belincanta e Ferraz (2000). Durante o impacto do martelo na cabeça de bater, uma onda de tensão é propagada no sentido descendente da composição de hastes, composta de impulsos de tensão sucessivos e decrescentes na intensidade, em um intervalo de tempo aproximado de $2l/c$, sendo l o comprimento da composição de hastes e c a velocidade de propagação destes impulsos de tensão.

Até o tempo de $2l/c$, enquanto o martelo e as hastes permanecem em contato, ocorre o início de chegada dos impulsos de tração refletidos junto ao amostrador. Em seguida, o martelo e a cabeça de bater se separam ocasionando uma paralisação da transferência de energia, esta que se mantém até o momento que o martelo atinge uma força resultante maior do que aquela proveniente dos impulsos de tração, resultando em um novo contato entre o martelo e a cabeça de bater e conseqüentemente um novo impacto que transfere a energia remanescente no martelo.

Segundo Lukiantchuki et al. (2011), solos com baixa resistência apresentam intervalo de tempo maiores, entre o primeiro e segundo impacto, quando comparado com solos mais resistentes. Em ensaios SPT realizados em solos de baixa resistência com composições de hastes curtas, notou-se que a cravação do amostrador no solo tem contribuição relevante da energia transferida pelos impactos subsequentes.

Lukiantchuki (2012) apresenta um esquema do mecanismo de transferência de energia e detalha os seus respectivos fenômenos:

- A princípio, a energia no sistema se mantém em forma de energia potencial. Neste momento o martelo se mantém imóvel a uma altura (hq), ou seja, não iniciou o movimento de queda livre;
- Após a liberação do martelo a energia potencial se transforma em energia cinética. Esta última será transferida ao conjunto de hastes, após o impacto do martelo na cabeça de bater, na forma de impulsos de compressão em sentido descendente da composição de hastes até o instante $2l/c$;
- Os impulsos de compressão chegam ao amostrador no instante l/c e parte de sua energia é transformada em trabalho para cravação do amostrador no solo, a outra parte da energia é refletida na forma de impulsos de tração em direção ao topo da composição de hastes;
- Os impulsos de tração que chegam ao topo da composição de hastes irão voltar no sentido descendente como impulsos de compressão até atingirem novamente o amostrador, no instante $3l/c$, podendo continuar a sua cravação no solo dependendo da magnitude dos impulsos de tensão e da resistência do solo.

O fim da primeira onda de compressão incidente se dá no momento em que o martelo não toca mais a cabeça de bater. Neste momento o topo da composição de hastes é atingido pelos impulsos refletidos do amostrador. Quando acontece o impacto subjacente do martelo na cabeça de bater, novos impulsos de compressão serão gerados e propagados pelo conjunto de hastes, transferindo assim a energia remanescente do martelo. Os impulsos ascendentes que se encontram refletidos no sistema amostrador e hastes se juntam as ondas de tensão geradas com o novo impacto, se propagando até se dissiparem totalmente em perdas ou se acabarem em consequência do trabalho de penetração do amostrador no solo. O evento do golpe do martelo se dá por encerrado no momento em que o solo apresenta uma resistência considerável para que os impulsos de tensão não continuem a penetração do amostrador. Todo este mecanismo de transferência de energia é apresentado na Figura 7.

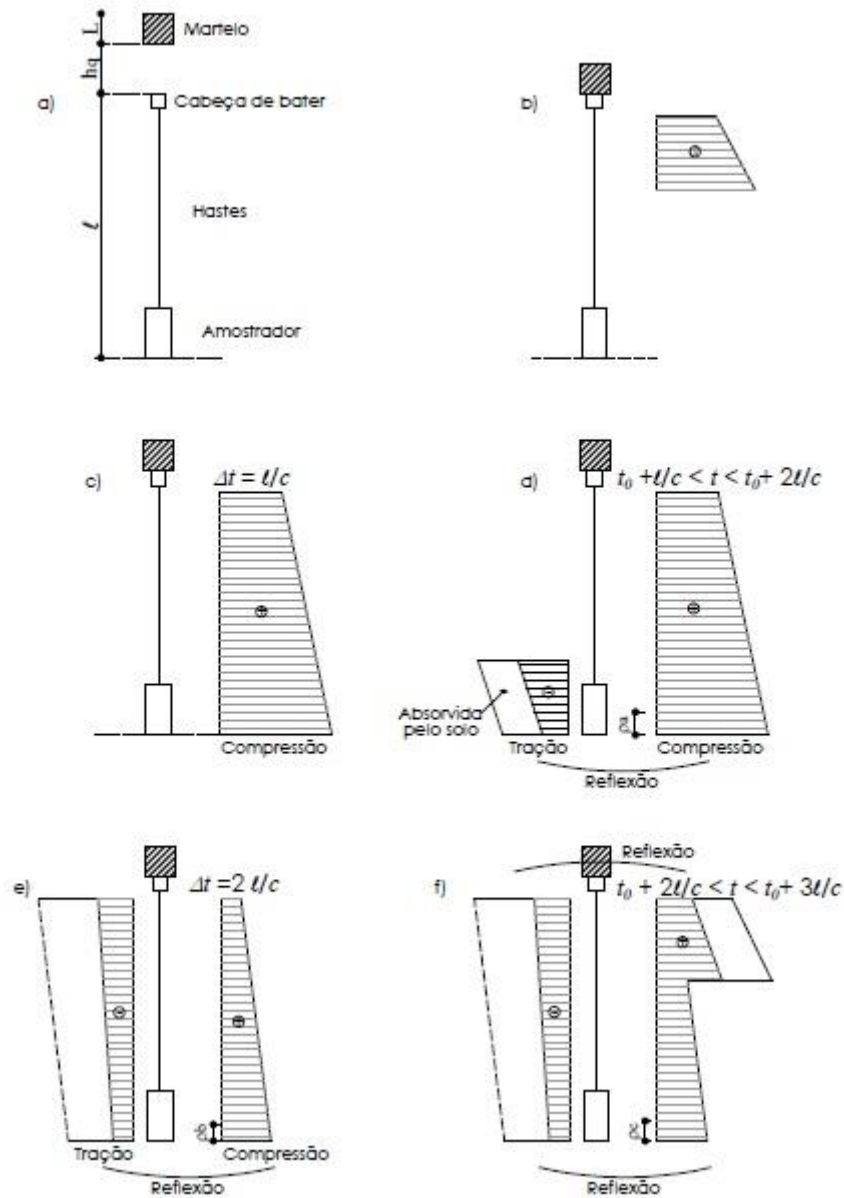


Figura 7 - Esquema de propagação de ondas de tensão no SPT (Lukiantchuki, 2012).

1.2.3 Princípio da Conservação de energia de Hamilton

O princípio de Hamilton é mostrado em Cintra et. al (2013) para avaliação da conservação de energia entre dois instantes no ensaio SPT, sendo sua expressão variacional dada por:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(T-V) dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta(W_{nc}) dt = 0 \quad (6)$$

Temos que: δ é a variação ocorrida no intervalo de tempo ($t_2 - t_1$); T é a energia cinética no sistema; V corresponde a energia potencial; W_{nc} é o trabalho realizado por forças não conservativas (incluindo amortecimento).

A energia cinética pode ser compreendida como a energia do sistema quando este se encontra em movimento e a energia potencial pode ser interpretada como a energia do sistema que só depende da localização ou características das massas que atuam no sistema.

Entende-se por forças conservativas as forças que não dissipam energia do sistema no decorrer do evento, e por forças não conservativas, aquelas que durante o evento dissipam energia do sistema com conversão em calor, amortecimento e energia sonora. A Figura 8 representa um esquema da aplicação do princípio Hamilton, no ensaio SPT, exibindo as parcelas de energia e suas transformações durante o percurso da onda de impacto na haste até alcançar o amostrador. Para uma análise correta das transformações de energia no ensaio SPT é necessário acrescentar a parcela da energia potencial resultante da penetração do amostrador no solo.

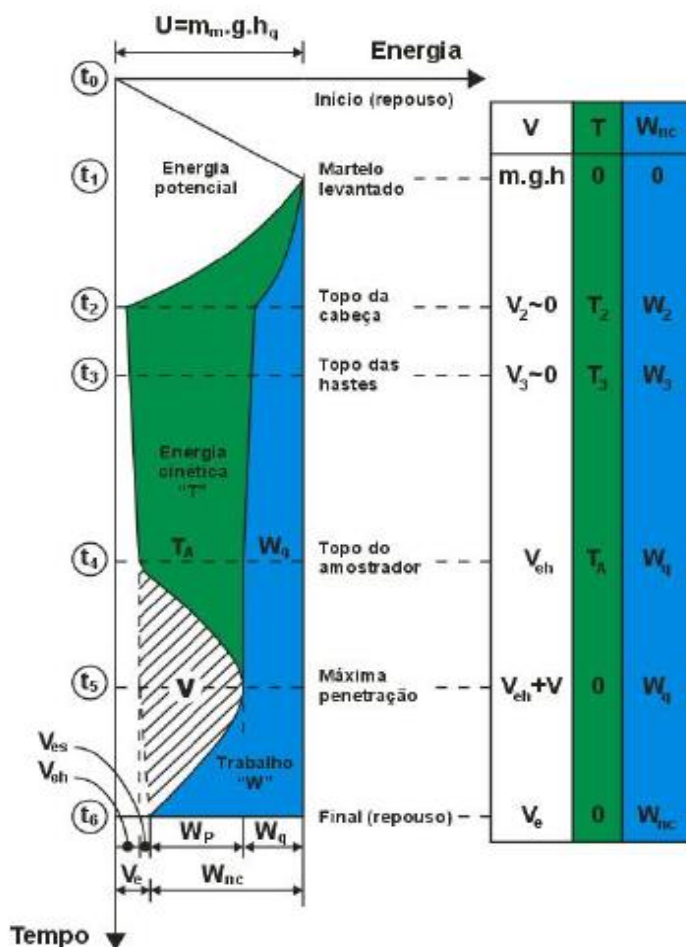


Figura 8 – Evolução de energia potencial, energia cinética e trabalho durante o evento golpe do martelo (Neves, 2004).

De acordo com Neves (2004):

1. No instante t_0 , o sistema encontra-se em repouso e sua energia potencial nominal é o resultado do produto do peso do martelo vezes a sua altura de queda;
2. No instante t_1 , a energia nominal do SPT (U) equivale a 478,3 J, momento este em que o martelo é suspenso a uma altura de 750 mm;
3. No instante t_2 , o martelo é liberado e em queda livre atinge a cabeça de bater. No intervalo de tempo ($t_2 - t_1$) a energia potencial inicial U se transforma em energia cinética T_2 , energia de deformação elástica (V_2), proveniente das deformações da corda utilizada no ensaio com utilização do tripé, e trabalho realizado por forças não conservativas (W_2). Esse trabalho é gerado por vários fatores, tais como o atrito no sistema corda-rolmana, guia mal centralizada e utilização de coxins de madeira;

4. No intervalo de tempo (t_3-t_2) a onda percorre a cabeça-de-bater até atingir o topo das hastes. Neste momento as variações de trabalho, energia potencial e energia cinética podem ser desconsideradas;
5. No intervalo de tempo (t_4-t_3), momento em que a onda percorre o conjunto de hastes, a energia cinética (T_3) é reduzida para T_A . Todo o resto da energia é transformado em energia potencial V_{eh} e em trabalho realizado por forças não conservativas no sistema, se modificando posteriormente no trabalho gerado durante o evento golpe do martelo antes da cravação do amostrador padrão no solo (W_q), isso tudo devido ao tipo de haste, a flambagem que pode ocorrer em todo o conjunto e as deformações entre os encaixes das hastes. Cintra e Aoki (2000) recomendam a utilização da energia cinética T_A no instante t_4 , máxima energia que atinge o amostrador, para o cálculo da eficiência do ensaio SPT (η^*). Nota-se que quanto maior o comprimento das hastes, menor é o valor de T_A ;
6. No intervalo de tempo (t_5-t_4) o amostrador penetra no solo, sendo o instante t_5 o momento ocorre a máxima penetração e gera a transformação da energia cinética (T_A) em energia potencial de deformação (V);
7. Durante o intervalo (t_6-t_5) uma pequena parcela da energia potencial de deformação (V_A) se transforma em energia potencial elástica (V_{es}), por causa da deformação elástica do solo e do amostrador, e em trabalho realizado pelas forças resistentes não conservativas (W_p) devido a penetração do amostrador no solo.
8. O final do evento, representado pelo instante t_6 , é o momento em que toda a energia potencial elástica (V_e) acumulada no conjunto de hastes (V_{eh}) e no solo que envolve o amostrador (V_{es}) é liberada. Deste modo, o sistema entra em repouso e o trabalho das forças não conservativas (W_{nc}) é composto pela parcela W_q e W_p , que representam o trabalho final, gerado pelas forças não conservativas, mobilizadas ao longo do amostrador durante sua penetração no solo.

A partir das informações anteriores é possível escrever as seguintes equações:

$$V_e = V_{es} + V_{eh} \quad (7)$$

$$U = V_e + W_{nc} \quad (8)$$

$$T_A = V = V_{es} + W_p \quad (9)$$

Através da utilização do Princípio de Hamilton no ensaio SPT, tem-se que entre o instante inicial t_I e o instante final t_6 , a energia potencial no sistema é transformada em energia potencial elástica e em trabalho das forças não conservativas. Sendo assim, Aoki e Cinta (2000) propõem a determinação da eficiência do ensaio SPT por meio do trabalho realizado para a penetração do amostrador no solo.

$$\eta_s = W_p/U \times 100 \quad (10)$$

No qual η_s representa a eficiência calculada através do trabalho realizado para penetrar o amostrador no solo.

1.2.4 *Determinação da eficiência do ensaio SPT mediante prova de carga estática sobre o amostrador padrão*

De acordo com os experimentos de Neves (2004), verificou-se que para o caso de areias e siltes arenosos, a eficiência do ensaio SPT pode ser calculada através de $W_{p,s}$ (trabalho gerado pelas forças resistentes não conservativas mobilizadas ao longo do amostrador durante sua penetração em um ensaio estático).

$$W_{p,s} = \frac{n_s \cdot U}{100} (\%) \quad (11)$$

Para tanto, $W_{p,s}$ corresponde ao trabalho inferido na prova de carga estática, n_s é a eficiência calculada através deste trabalho e U é a energia potencial normalizada do SPT que vale 478,3 J. O autor admite que para conhecer $W_{p,s}$, basta realizar uma prova de carga estática sobre o sistema, logo após a medição exata da penetração de um golpe do martelo do SPT, até atingir a penetração similar obtida no golpe dinâmico. A área sob a curva do ensaio estático, relativa a um deslocamento igual à penetração do último golpe do martelo, equivale ao valor de $W_{p,s}$ (Figura 9).

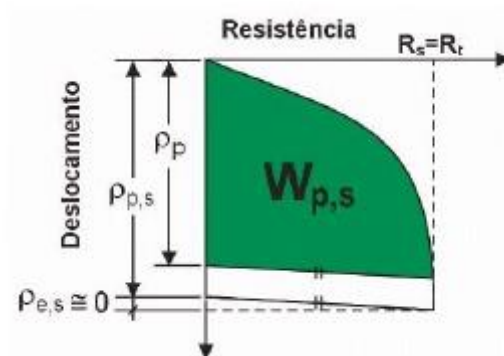


Figura 9 - Trabalho calculado através de uma prova de carga estática para a penetração obtido no último golpe dinâmico do martelo SPT (Neves, 2004).

Como mostrado em Neves (2004), sabendo-se que trabalho (W) corresponde ao produto da resistência (R) pelo deslocamento permanente (s), pode-se considerar que:

$$R = W/s \quad (12)$$

Considerando-se que o deslocamento relativo a um golpe $s = 30\text{cm}/N_{spt}$:

$$R_s \approx \frac{W_{p,s} \cdot [N_{spt}]}{30} \quad (13)$$

Por conseguinte, a equação abaixo pode chegar a um valor aproximado da resistência estática mobilizada R_s do sistema amostrador-solo:

$$R_{s,s} \approx \frac{\eta_s \cdot U \cdot [N_{spt}]}{30} \quad (14)$$

Em que $R_{s,s}(N)$ simboliza aproximadamente à resistência estática mobilizada no sistema amostrador-solo para uma nega s , a eficiência do sistema é representada por η_s (%) e a energia potencial normalizada do SPT corresponde a $U (J)$.

1.3 Proposição de Aoki (2012)

Aoki (2012) sugeriu um novo procedimento para o cálculo de capacidade de carga de estacas, baseado em novos parâmetros retirados de um ensaio SPT. Para este método é considerada a eficiência do sistema de ensaio e o equilíbrio de forças no amostrador durante o ensaio. Este autor mostra que para a realização deste equilíbrio de forças é necessário conhecer a medida do comprimento de solo recuperado dentro do amostrador ao final do ensaio (L_{int})

Como mostrado pela Equação 15, em razão da natureza não conservativa das forças atuantes (Aoki et al., 2007), a reação R_u que o solo apresenta à penetração do amostrador vale:

$$R_u = (\eta \times 467 \times N_{SPT}) / 0,3 \text{ m} \quad (15)$$

Onde, η corresponde à eficiência do impacto sob o amostrador, que depende das condições do sistema de aplicação do impacto, do comprimento das hastes e do valor N_{SPT} .

Fundamentado no Princípio de Hamilton, e com o objetivo de interpretar a resistência de ponta r_p e de atrito lateral r_l do ensaio SPT, Cintra et al. (2013) apresentam uma interpretação do equilíbrio de forças no amostrador durante o impacto do martelo de peso 65 kg caindo de uma altura 0,75 m, como mostra a Figura 10.

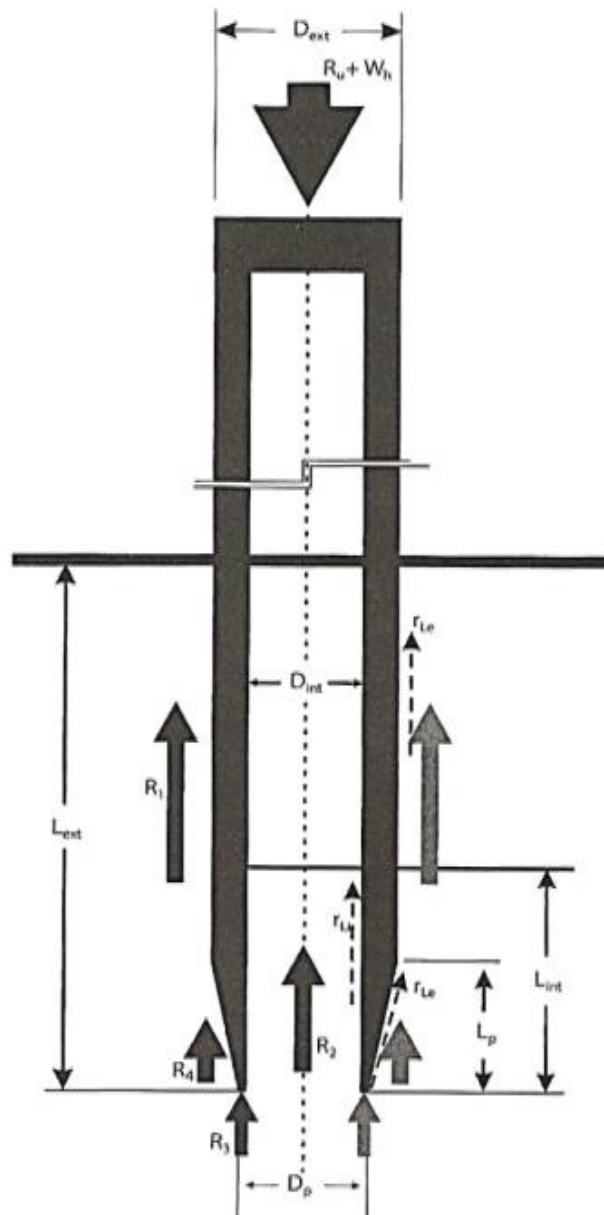


Figura 10- Equilíbrio das forças atuantes no amostrador durante o golpe no ensaio SPT (modificado de Cintra et al., (2013)).

Para o amostrador padrão no Brasil, temos as seguintes medidas (indicadas na Figura 12) padronizadas:

$$D_{ext} = 5,08 \text{ cm};$$

$$D_{int} = 3,49 \text{ cm};$$

$$D_p = 3,81 \text{ cm};$$

$$L_p = 2,00 \text{ cm};$$

$$L_{ext} = 45,00 \text{ cm};$$

Na Figura 10, é indicado o parâmetro L_{int} que representa o comprimento da recuperação do solo no amostrador ao final do ensaio. Como mostrado na Figura 11, o L_{ext} é correspondente ao total penetrado pelo amostrador para obter o valor de N_{SPT} (aproximadamente 45cm).

As tensões cisalhantes resistentes atuantes na interface solo-amostrador são:

r_L = resistência por atrito na parede externa e no chanfro do amostrador

r_{Li} = resistência por atrito na parede interna do amostrador

As forças resultantes no golpe são:

R_1 – força de atrito na parede vertical externa do amostrador;

R_2 – força de atrito na parede vertical interna do amostrador;

R_3 – força de reação vertical na seção anelar da ponta do amostrador;

R_4 – componente vertical da força de atrito ao longo da superfície biselada troncocônica do amostrador;

De acordo com Cintra et al. (2013), o equilíbrio estático das forças atuantes no amostrador permite escrever:

$$R_u + W_h = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (16)$$

Em que:

W_h - peso das hastes e cabeça de bater

$$R_u = \eta \times 6 \times 75 \times \left[\frac{\left(\frac{30}{N_{spt}} + 75 \right)}{75} \right] \times \frac{N_{spt}}{30} \text{ (kgf)} \quad (17)$$

As expressões das forças resistentes são:

$$R_1 = \pi \times D_{ext} \times (L_{ext} - L_p) \times r_L \quad (18)$$

Na parede vertical interna do amostrador se desenvolve uma força correspondente a:

$$R_2 = \pi \times D_{int} \times r_{Li} \times L_{int} \quad (19)$$

Considerando o atrito externo “a” vezes menor que o atrito interno, temos:

$$a = \frac{r_{Li}}{r_L} \quad (20)$$

Pode-se escrever:

$$R_2 = \pi \times D_{int} \times a \times r_L \times L_{int} \quad (21)$$

O equilíbrio das forças atuantes na ponta do amostrador é interpretado pela Figura 11, sendo possível admitir que a força R_2 (atrito interno na parede do amostrador) é equivalente à resistência da ponta aberta do amostrador SPT, ou seja:

$$R_2 = \pi \times \frac{D_{int}^2}{4} \times r_p \quad (22)$$

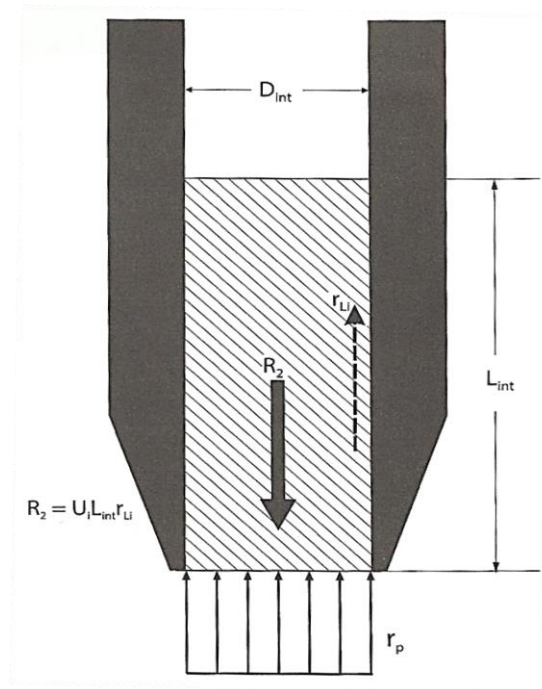


Figura 11 - Equilíbrio das forças atuantes na ponta aberta do amostrador (Cintra et al. (2013)).

Similarmente ao ensaio de cone CPT denomina-se razão de atrito R_f ao número que relaciona o atrito lateral unitário (externo) e a resistência de ponta unitária do amostrador do ensaio de simples reconhecimento N_{SPT} :

$$R_f = \frac{r_L}{r_p} = \frac{r_{Li}}{a \times r_p} \quad (23)$$

Logo, a razão de atrito pode ser determinada pela equação:

$$R_f = \frac{D_{int}}{4 \times a \times L_{int}} \quad (24)$$

As seguintes expressões podem ser utilizadas para determinação do restante das forças:

$$R_3 = \frac{\pi}{4} \times (D_p^2 - D_{int}^2) \times (r_L/R_f) \quad (25)$$

$$R_4 = \left(S_L \times \frac{L_p}{L} \right) \times r_L \quad (26)$$

Em que:

$$L = \{L_p^2 + [(D_{ext} - D_p)/2]^2\}^{0,5} \quad (27)$$

$$S_L = \pi \times L \frac{(D_{ext} - D_p)}{2} \quad (28)$$

Pelas considerações referenciadas, pode-se admitir que o atrito lateral entre o amostrador do ensaio SPT e o solo adjacente seja determinado pela expressão abaixo:

$$r_L = \frac{R_u + W_h}{\pi \times D_{ext}(L_{ext} - L_p) + \pi \times D_{int} \times a \times L_{int} + \frac{\pi}{4} \times \frac{(D_p^2 - D_{int}^2)}{R_f} + S_L \times \frac{L_p}{L}} \quad (29)$$

Portanto, a resistência de ponta é deduzida pela seguinte equação:

$$r_p = \frac{r_L}{R_f} \quad (30)$$

Segundo Aoki (2012), conhecendo-se o valor da eficiência η , o valor N_{SPT} , o valor do comprimento de recuperação de solo no amostrador, e adotando-se um valor para a , é possível obter valores de resistência de ponta e de atrito lateral pelo ensaio SPT, utilizados em dimensionamento de resistência das estacas.

A eficiência η do ensaio não é considerada no método Aoki e Velloso (1975). Portanto, a determinação da medida do comprimento de recuperação da amostra juntamente com a eficiência possibilitam que o ensaio SPT proporcione valores de razão de atrito similares aos fornecidos pelo ensaio de cone, podendo assim, ser aplicado em métodos semi-empíricos como o de Aoki-Velloso (1975).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta os materiais e métodos que foram utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa, que é baseada em experimentos de campo e laboratório (caracterização da granulometria do solo amostrado).

2.1 Procedimento para a determinação da resistência de ponta e por atrito lateral do ensaio SPT

A nova proposta de SPT descrita e avaliada neste trabalho, baseada na proposta de Aoki (2012), é dividida em seis etapas:

1. Determinação da eficiência η (taxa de energia fornecida) do equipamento de ensaio SPT. Neste trabalho a eficiência foi estimada pelo procedimento apresentado em Neves (2004), por meio de provas de carga à compressão no amostrador.

2. Estimativa da resistência à penetração estática R_u mobilizada no amostrador durante um golpe (ilustrada na Figura 12) utilizando-se os resultados de eficiência do sistema (η) e a Equação 17.

3. Determinação da resistência externa por atrito lateral do amostrador R_{se} a partir do ensaio de arrancamento estático realizado no amostrador logo após o ensaio dinâmico (descontar o peso das hastes + amostrador da carga de ruptura à tração obtida no ensaio).

4. Determinação da resistência de ponta do amostrador R_b calculada pela diferença entre a resistência estática R_u (adicionado ao peso W da haste + cabeça de bater + amostrador, conforme descrito na Figura 12) e a resistência por atrito lateral obtida pelo ensaio de arrancamento R_{se} .

5. Determinação da resistência de ponta (em tensão) do ensaio SPT, denominada nesta pesquisa por “ q_{spt} ”, dividindo-se R_b pela área da ponta, como descrito na Figura 12. Por simplificação, neste trabalho assume-se que o valor q_{spt} é uma combinação das tensões que atuam na área do anel e na área do solo recuperado no amostrador. No entanto, como a área de anel na base amostrador é insignificante (espessura do anel de 1,6 mm) em comparação com a área do solo ($D_i = 34,9$ mm na Figura 12), a fração mais significativa de q_{spt} é equivalente ao atrito na parede interna do amostrador τ_i (Figura 12b).

6. Determinação da razão de atrito do ensaio SPT (relação entre o atrito lateral f_{s-spt} e o q_{spt} descritos na Figura 12) para a classificação do solo.

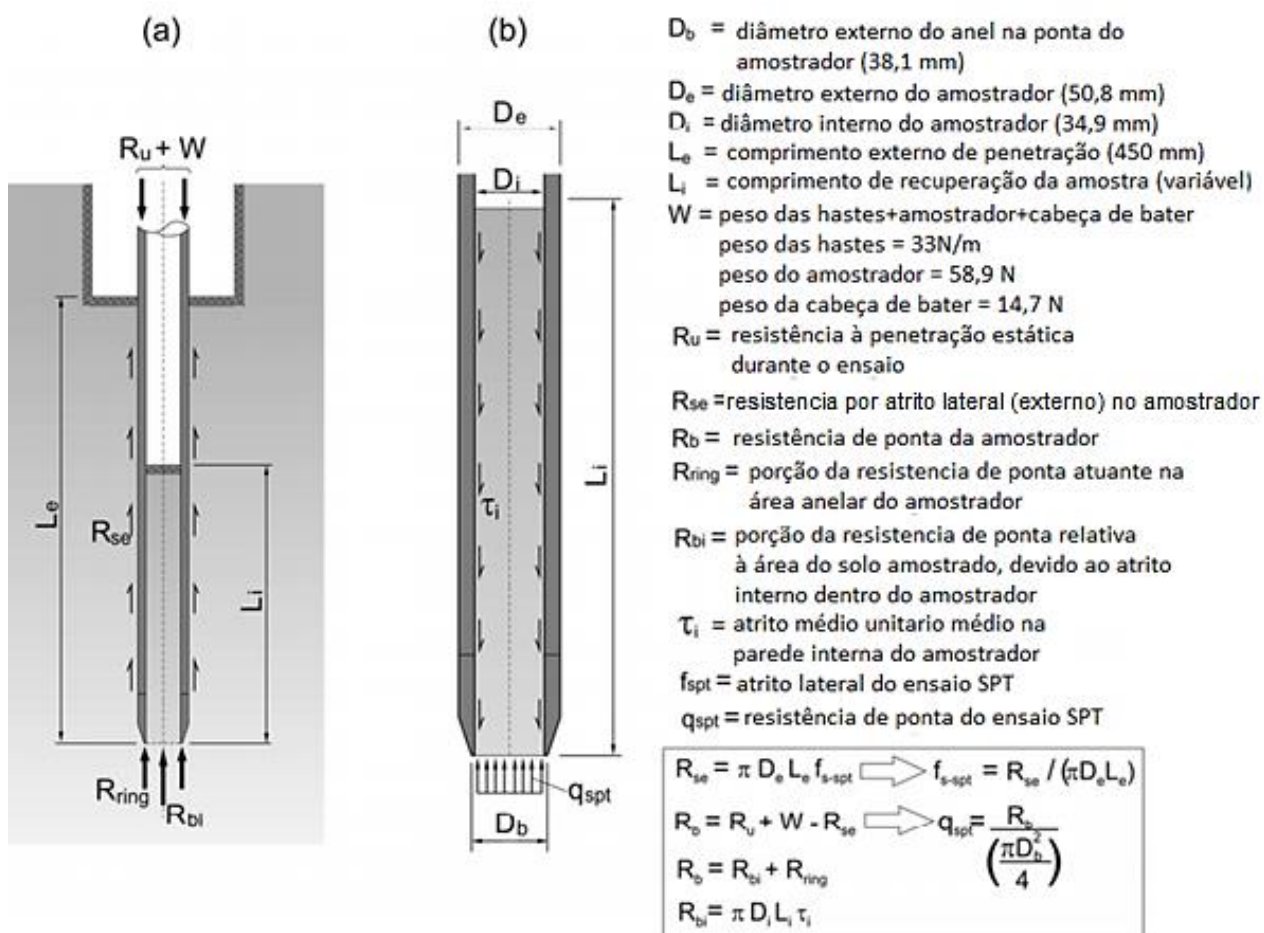


Figura 12 – Equilíbrio de forças no amostrador do ensaio SPT considerado nesta pesquisa.

Para a determinação da resistência de ponta q_{spt} e o atrito lateral f_{spt} foram realizados nove ensaios de arrancamento (provas de carga à tração) em três furos de sondagem distintos (furos 1, 2 e 3), e em três profundidades distintas. O objetivo era realizar os ensaios três camadas distintas, portanto, para identificar estas camadas, antes de iniciar a pesquisa foram realizados dois furos prévios de sondagem com ensaio SPT (SP-01 e SP-02).

Nos três furos de ensaio, para avaliarmos o parâmetro “ a ” descrito em Aoki (2012) e em Cintra et al. (2013), também foram feitas medidas do comprimento das amostras de solo no amostrador (recuperação) nas três profundidades ensaiadas.

Um quarto furo de sondagem (furo 4) foi realizado a fim de obter-se a eficiência do equipamento mecanizado utilizado nesta pesquisa, foram executadas duas provas de cargas estáticas a compressão no topo da haste do amostrador. A seguir são detalhados os equipamentos utilizados e os ensaios.

2.2 Área Experimental

Os ensaios foram realizados no pátio da Geometa Eng. de Fundações e Indústria Ltda., que fica localizado na Av. Bernardo Seibel 171, em Uberaba-MG. A Figura 13 indica a localização mencionada.



Figura 13 - Local de realização dos ensaios.

A escolha do local para a realização dos ensaios deste trabalho foi devido à profundidade do perfil de solo, viabilidade financeira e ao apoio da empresa para a realização dos ensaios. Para conhecer o subsolo da área experimental, foram realizadas duas sondagens de simples reconhecimento com medida N_{SPT} , a fim de obter o provável perfil de solo. A Figura 14 e a Figura 15 apresentam os resultados obtidos.

A partir dos dados apresentados nas Figuras 14 e 15, é possível observar que a classificação tátil-visual do subsolo resultou em variações de camadas com argila arenosa e argila siltosa até a profundidade impenetrável. O nível freático foi encontrado em torno de 7,20 m de profundidade, os valores de N_{SPT} variaram basicamente entre 5 a 20 golpes/30cm e o impenetrável foi encontrado a 16,30 m. Juntamente com a sondagem SP-01, foi realizado o monitoramento do comprimento das amostras recuperadas. Os resultados preliminares são apresentados na Tabela 1:

Tabela 1- Resultados de comprimento da recuperação.

Profundidade (m)	N_{SPT} (golpes/cm)	Comprimento da amostra de solo (m)
1	6/30	0,22
2	6/31	0,34
3	8/30	0,21
4	7/30	0,25
5	8/30	0,33
6	8/30	0,30
7	7/32	0,29
8	14/30	0,20
9	8/30	0,29
10	19/30	0,26
11	15/30	0,32
12	10/30	0,60
13	13/30	0,48
14	14/30	0,33
15	19/30	0,25
16	60/16	0,38

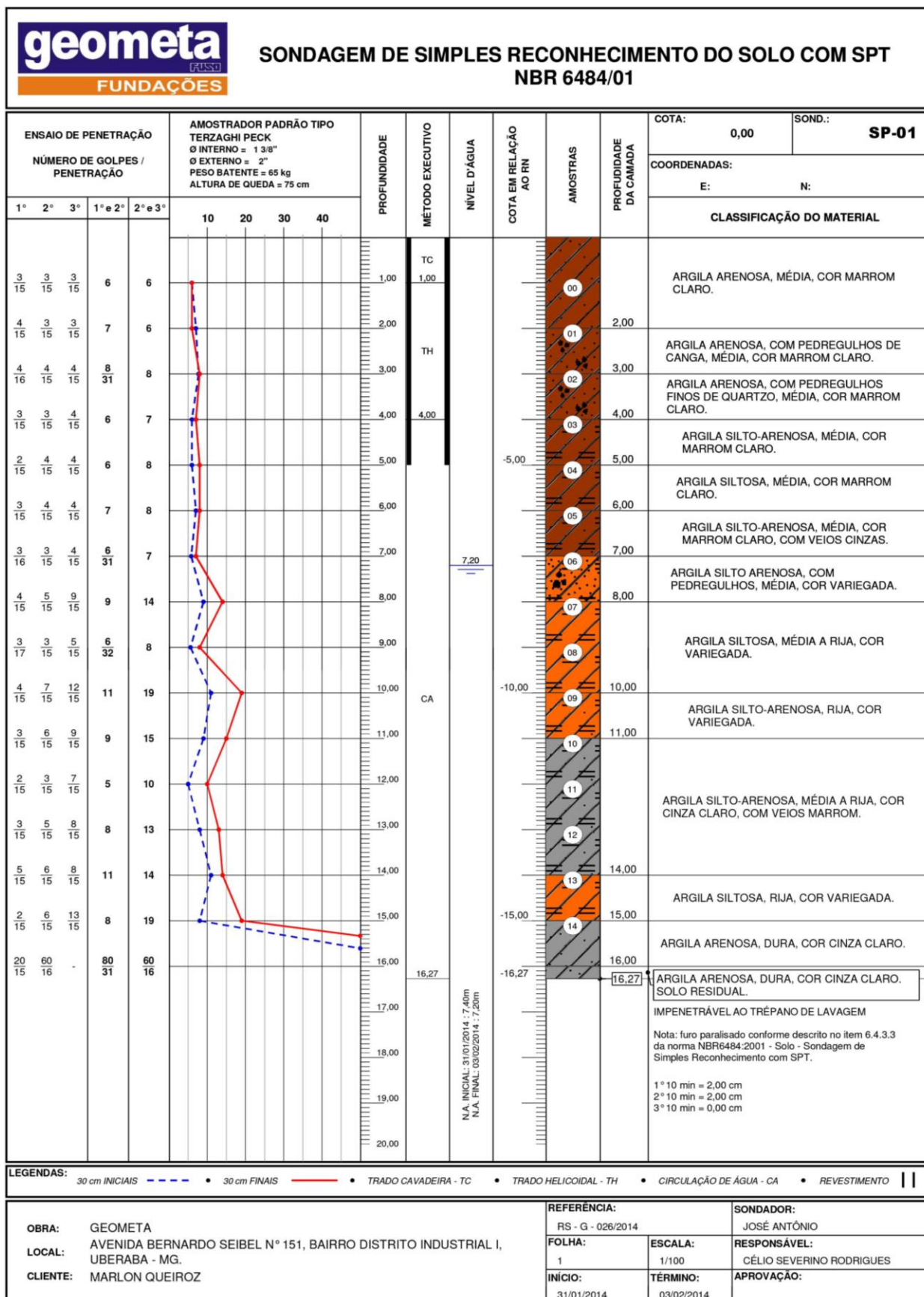


Figura 14 - Resultados da sondagem SP-01.

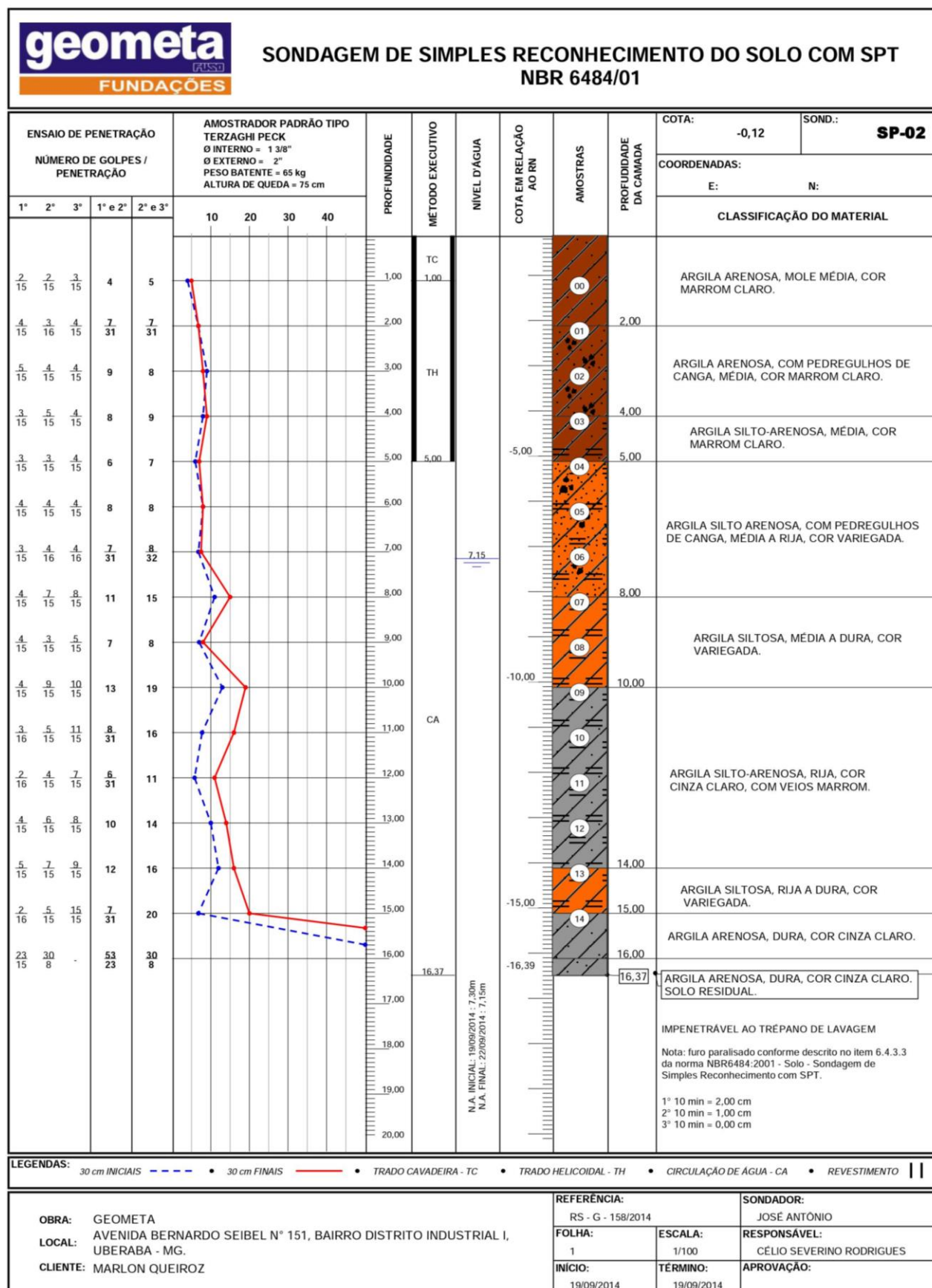


Figura 15 - Resultados da sondagem SP-02.

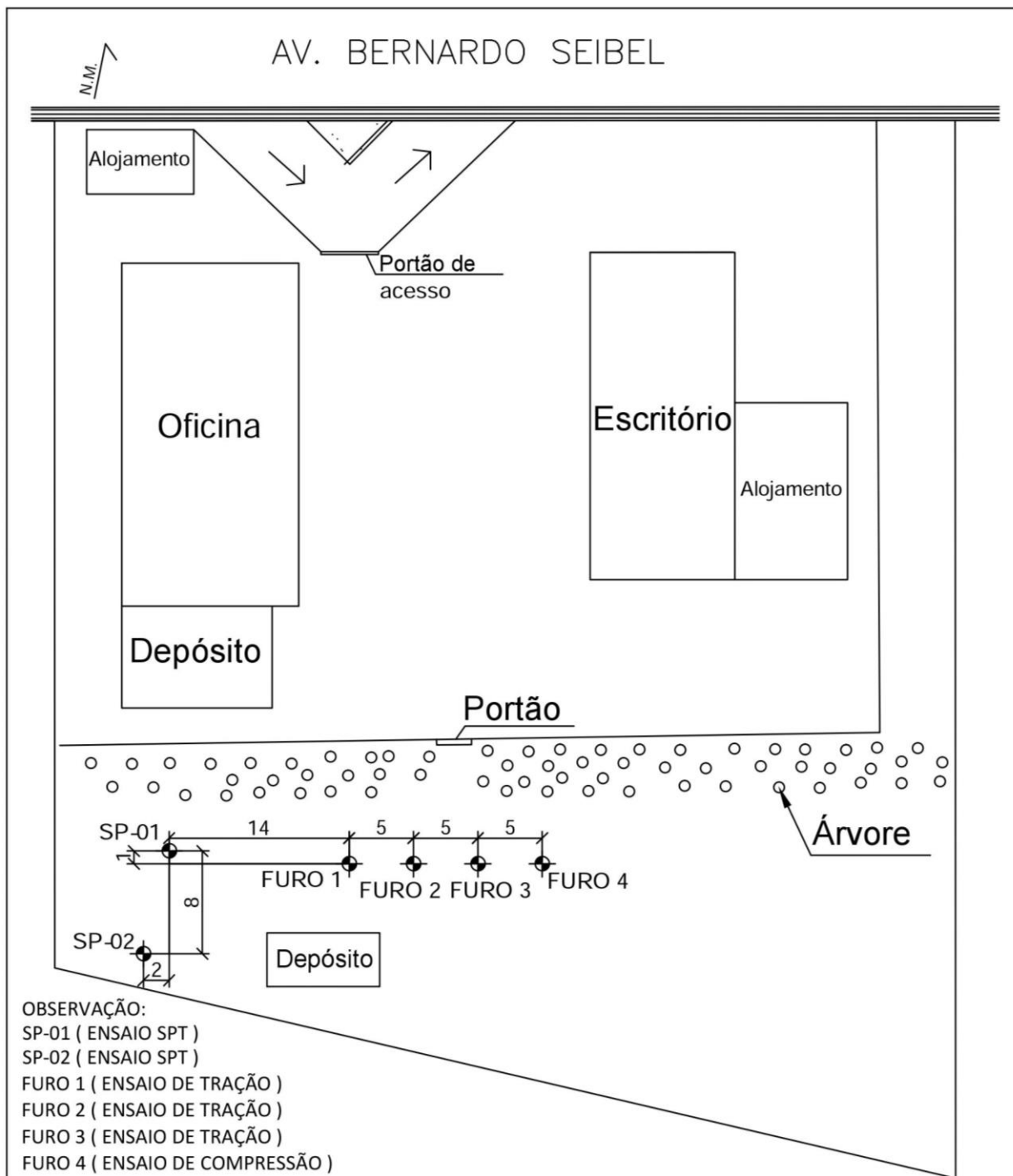
A Figura 16 apresenta uma medida da recuperação do solo amostrado:



Figura 16 - Medida de recuperação de solo amostrado.

Como citado anteriormente, foram realizados quatro furos em pontos com aproximadamente cinco metros de distância entre eles. Em três destes furos (Furos 1, 2 e 3) foram realizados, ensaios de arrancamento do amostrador conduzidos em três profundidades distintas: 2, 5 e 10 metros respectivamente. Portanto, ao todo foram realizados nove ensaios de tração no amostrador.

Um quarto furo (Furo 4) foi necessário para realização de duas provas de carga estática a compressão no conjunto haste + amostrador SPT, nas profundidades de 2 e 5 metros, com objetivo de conhecer a eficiência do equipamento pelo procedimento sugerido em Neves (2004). A Figura 17 apresenta a locação em planta dos quatro furos realizados para os ensaios e também a locação das duas sondagens SPT executadas para prévia verificação do tipo de solo estudado.



OBSERVAÇÃO:

SP-01 (ENSAIO SPT)

SP-02 (ENSAIO SPT)

FURO 1 (ENSAIO DE TRAÇÃO)

FURO 2 (ENSAIO DE TRAÇÃO)

FURO 3 (ENSAIO DE TRAÇÃO)

FURO 4 (ENSAIO DE COMPRESSÃO)



ENGENHARIA - FUNDAÇÕES - SONDAJENS

www.geometa.com.br

Rua José Rodrigues Queiroz Filho, 711

Santa Mônica - CEP 38408 - 252 - Uberlândia - MG

Telefax : (34) 3236 - 2481

Avenida Bernardo Seibel, 151

Dist. Industrial I - CEP 38056 - 610 - Uberaba - MG

Telefax : (34) 3313 - 9400

Geometa Engenharia de Fundações e Sondagens Ltda

ESCALA:

S/E

DATA:

11/06/2015

DESENHO:

DAIANE

LOCAL:

UBERABA - MG

RELATÓRIO N.

CLIENTE:

MARLON QUEIROZ FERREIRA

TÍTULO:

LOCAÇÃO DOS FUIOS DAS SONDAGENS SPT E FUIOS PARA ENSAIOS DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO

Figura 17 – Locação dos furos.

2.3 Equipamento de Sondagem

Os furos de sondagem realizados neste trabalho foram executados utilizando-se os equipamentos recomendados pela norma NBR 6484 (2001), com exceção do martelo e da cabeça de bater. Esta norma especifica tanto os equipamentos como os procedimentos a serem seguidos para a execução da sondagem de simples reconhecimento com medida do SPT.

O equipamento de sondagem utilizado constitui-se de um conjunto torre + guincho + motor + bomba que reúne todos os equipamentos utilizados nas sondagens SPT em um único módulo. A Figura 18 (a) mostra uma fotografia do equipamento. O martelo utilizado é do tipo vazado com coxim de madeira e gatilho rápido de acionamento automático para a queda livre, que cai da altura constante de 0,75 m (Figura 18 (b)).



Figura 18 - Equipamento de sondagem a ser utilizado na realização dos ensaios: (a) vista geral e (b) detalhe do martelo.

As especificações dos equipamentos utilizados neste trabalho são: conjunto de hastes com diâmetro externo de 33,34 mm, diâmetro interno de 23,94 mm e massa teórica de 3,60 kg/m; cabeça de bater com 53 mm de altura e diâmetro de 54 mm; amostrador tipo Raymond bipartido, com comprimento de 610 mm, diâmetro externo de 50,8 mm e interno de 34,9 mm; martelo vazado de 65 kg, com coxim de madeira e queda por acionamento via sistema de gatilho.

2.4 Ensaio de arrancamento do amostrador

Para realização dos ensaios de arrancamento do amostrador foi projetado e construído um sistema de reação, cujo esquema é apresentado na Figura 19:

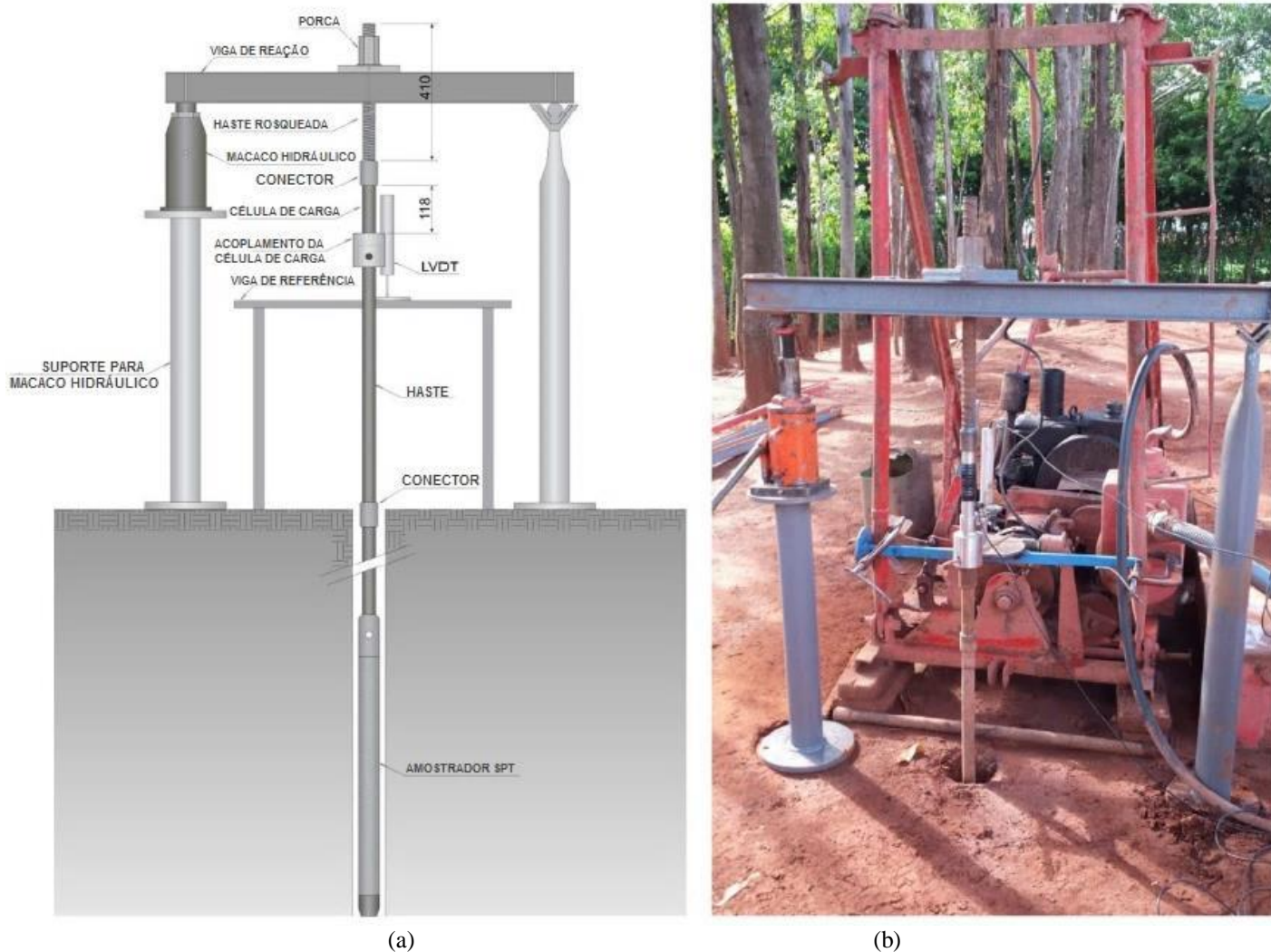


Figura 19 – Equipamentos para ensaios de arrancamento: (a) desenho esquemático e (b) montagem do ensaio.

Cada ensaio de arrancamento foi realizado imediatamente após o ensaio SPT, para simular a mesma condição não drenada do ensaio SPT. Nos ensaios de arrancamento, a carga de tração foi aplicada manualmente por meio de um macaco hidráulico posicionado abaixo da viga de reação, pois não se dispunha de macaco vazado, que seria naturalmente indicado para este tipo de ensaio. O tempo para a realização de cada ensaio variou entre 1,2 e 2 minutos. A velocidade de carregamento variou entre 18 a 35 mm/s.

Durante o ensaio, os valores de carga de tração aplicada na haste foram obtidos por uma célula de carga com capacidade de 250 N e precisão de 5 N, confeccionada a partir de um segmento de tubo igual ao das hastes da sondagem e extensômetros elétricos de resistência arranjados em ponte de Wheatstone. Antes de sua utilização, a célula de carga foi devidamente calibrada em uma prensa do departamento de Geotecnia da USP – São Carlos, conforme apresentado nas Figuras 20 e 21.



Figura 20 - Calibração da célula de carga.

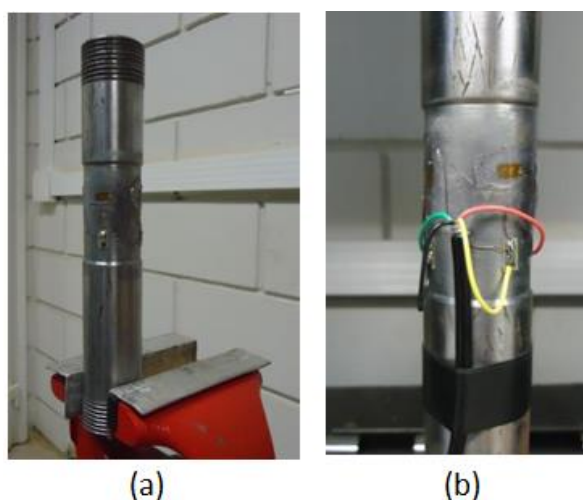


Figura 21 - Equipamento para monitoramento do carregamento: (a) Segmento de tubo semelhante ao das hastes e (b) célula de carga.

2.5 Prova de carga à compressão no amostrador para determinação da eficiência do sistema de ensaio

Como comentado anteriormente, a medida da eficiência do equipamento do ensaio SPT é essencial para a interpretação dos resultados deste ensaio, e pode ser obtida por meio de prova de carga estática no sistema haste-amostrador como descrito em Neves (2004).

Do mesmo modo, conhecendo-se a eficiência e o valor do deslocamento do amostrador para um golpe, por meio da Equação 17 é possível estimar a resistência total R_u mobilizada na penetração do amostrador no solo.

Portanto, para a determinação da eficiência do equipamento, foram realizados dois ensaios de prova de carga estática no sistema hastes + cilindro vazado do amostrador, logo após a medida do valor N_{SPT} , nas profundidades pré-determinadas de dois e cinco metros no furo 4 (Figura 17).

Todos os ensaios foram realizados com estágios de carregamentos mantidos constante. A leitura era realizada a cada minuto até o momento em que duas consecutivas acusassem diferenças inferiores a 0,5 mm. Quando este parâmetro fosse atingido, um novo incremento de carga era então colocado. O descarregamento era efetuado em quatro estágios de igual magnitude.

A eficiência do sistema no topo do amostrador foi obtida por meio do trabalho realizado pelas forças não conservativas nas provas de carga estática, então determinado com base na curva carga-recalque do ensaio.

Para aplicação da carga aplicada no ensaio foi utilizado o mesmo macaco hidráulico acionado manualmente empregado no ensaio de tração, e como reação foi usado um caminhão munck com 14.800kg (vazio) disponibilizado pela empresa Geometa. Para as leituras de carga e deslocamento das provas de carga, foi utilizado um sistema de aquisição de dados.

O sistema de leitura do deslocamento é composto por medidores de deslocamento do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) e relógio comparador, fixados em uma haste de referência, ligados a um sistema de aquisição de dados para leitura da instrumentação (no caso do LVDT). Para as leituras das cargas aplicadas, foi empregada uma célula de carga (a mesma dos ensaios de tração).

Os equipamentos e a execução do ensaio de compressão são apresentados nas Figuras 22 e 23.



Figura 22 - Sistema de prova de carga com relógio magnético + medidor LVDT + equipamento com célula de carga + sistema de aquisição de dados.



Figura 23 - Prova de carga estática na haste do amostrador.

3 RESULTADOS

3.1 Resultados dos ensaios de arrancamento no conjunto haste + amostrador

Para cada uma das profundidades ensaiadas, são apresentadas as Figuras 24, 25 e 26 as curvas carga x deslocamento dos ensaios de arrancamento no amostrador, realizados imediatamente após um ensaio SPT padrão.

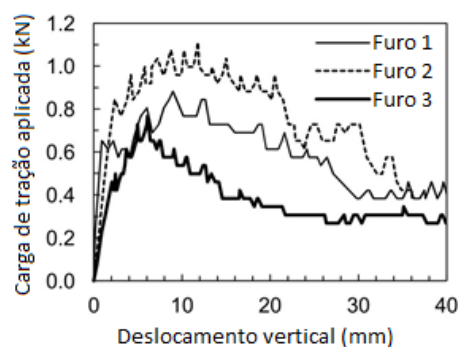


Figura 24- Curva carga x deslocamento dos ensaios realizados no amostrador a 2m de profundidade.

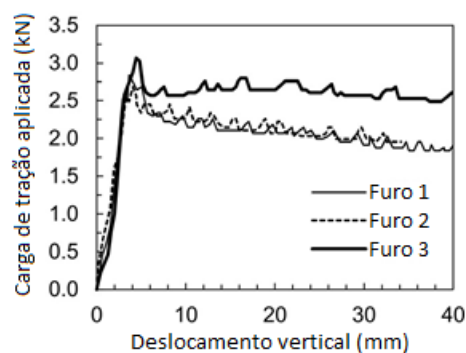


Figura 25- Curva carga x deslocamento dos ensaios realizados no amostrador a 5m de profundidade.

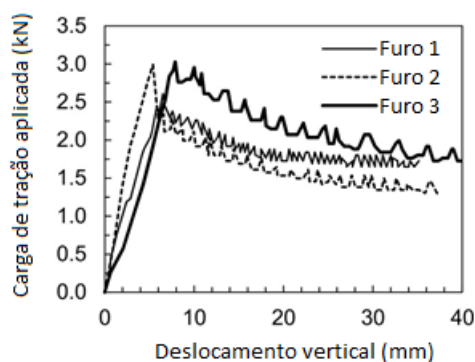


Figura 26- Curva carga x deslocamento dos ensaios realizados no amostrador a 10m de profundidade.

A Tabela 2 apresenta-se os resultados de carga de ruptura Q_u obtidos nos ensaios de arrancamento, juntamente com os valores de N_{spt} , do comprimento de recuperação da amostra L_i obtidos para cada ensaio, da resistência por atrito lateral externo no amostrador R_{se} (onde, R_{se} equivale a Q_u subtraindo-se o peso de hastes e amostrador), e de f_{s-spt} (que é igual a R_{se} dividida pela área externa de contato solo-amostrador)

Nesta pesquisa, para estimar o valor da resistência por atrito lateral externo no amostrador durante o golpe de ensaio R_{se} (ver Figura 12a), assume-se por simplificação que a resistência por atrito lateral obtida à tração pelo ensaio de arrancamento é a mesma mobilizada no golpe do ensaio SPT (à compressão).

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de arrancamento do amostrador.

Profundidade (m)	Furo	L_i (m)	N_{spt} (golpes/30cm)	Carga de ruptura Q_u (kN)	Resistencia por atrito lateral externo R_{se} (kN)	f_{s-spt} (kPa)
2.0	1	0.25	6	0.88	0.72	10.0
	2	0.36	10	1.11	0.95	13.2
	3	0.38	17	0.77	0.61	8.5
5.0	1	0.25	7	2.84	2.58	35.9
	2	0.21	7	2.68	2.42	33.7
	3	0.21	7	3.07	2.81	39.1
10.0	1	0.21	14	2.61	2.18	30.4
	2	0.21	15	2.99	2.56	35.7
	3	0.21	22	3.03	2.60	36.3

3.2 Resultado dos ensaios de compressão para determinação da eficiência

Como comentado anteriormente, foi realizado um quarto furo de sondagem (Furo 4) para a realização de provas de carga a compressão em duas profundidades distintas (2 e 5 m), para a determinação da eficiência do equipamento no ensaio (de acordo com Neves 2004).

A Tabela 3 apresenta para as profundidades de 2,0 e 5,0 m do Furo 4: o valor de N_{SPT} da camada, a medida do comprimento de recuperação do solo no amostrador, e a carga máxima aplicada no ensaio. As Figuras 27 e 28 apresentam as curvas carga x recalque das provas de carga à compressão realizadas a 2 m e a 5 m de profundidade.

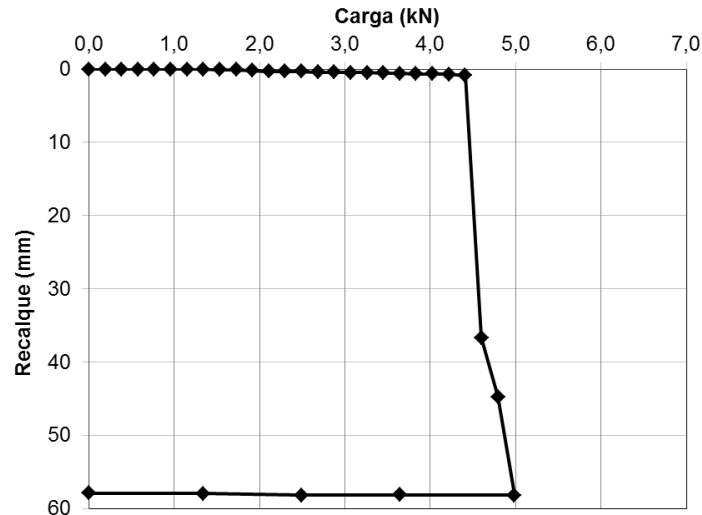


Figura 27 - Curva carga x recalque da prova de carga a compressão a 2,0 m de profundidade.

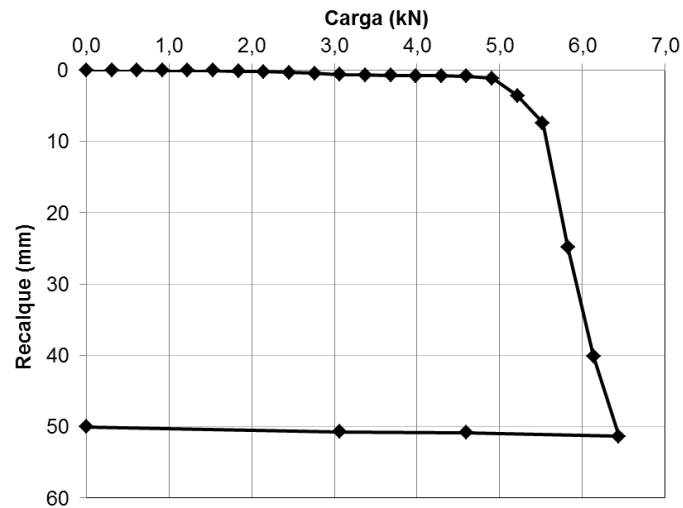


Figura 28 – Curva carga x recalque da prova de carga a compressão a 5,0 m de profundidade.

Tabela 3 – Resultados das provas de carga a compressão no Furo 4.

Profundidade (m)	N_{SPT} (golpes/cm)	L_i (cm)	Carga Max. (kgf)
2,0	6/30	26	508,0
5,0	8/31	27	656,5

Para a determinação da eficiência, calcula-se a área sob a curva do gráfico obtido pela prova de carga estática, correspondente ao deslocamento resultante de um único golpe do ensaio (s_m):

$$s_m = 300/N_{SPT} \quad (31)$$

A Tabela 4 apresenta os valores do deslocamento para um golpe de martelo nas duas profundidades ensaiadas (2m e 5m).

Tabela 4 - Deslocamento correspondente a um golpe do ensaio SPT.

Profundidade (m)	N_{SPT} (golpes/cm)	s_m (mm)
2,0	6/30	50,0
5,0	8/31	38,7

Para um valor mais preciso da eficiência é importante descontar na curva carga x deslocamento a parcela do encurtamento elástico da haste (ρ_e) e considerar a eficiência por meio do trabalho realizado para penetração do amostrador do solo. Para tanto, temos a seguinte equação de ρ_e :

$$\rho_e = \frac{P.L_h}{A.E} \quad (32)$$

Na Equação 32, P é a carga determinada no ensaio à compressão resultante da aplicação de um único golpe para a obtenção do índice N_{SPT} , L_h representa o comprimento total de haste, A corresponde à área da seção transversal da haste e E equivale ao módulo de elasticidade do material da haste.

A Tabela 5 a seguir apresenta todos os valores utilizados, e também o resultado do encurtamento elástico encontrado para cada profundidade:

Tabela 5 - Encurtamento elástico da haste nos ensaios relativos a um golpe de martelo.

Profundidade (m)	P (kN)	L_h (m)	A (m ²)	E (kPa)	ρ_e (mm)
2,0	4,9	3,0	0,0003644	205000000	0,1
5,0	6,4	6,0	0,0003644	205000000	0,5

Aoki e Cintra (2000) propõem a determinação da eficiência do ensaio SPT por meio do trabalho W_p realizado para a penetração do amostrador no solo:

$$\eta_s = W_p/EP_{sistema} \times 100 \quad (33)$$

Porém, neste trabalho foi feita a correção da energia potencial no sistema proposta por Odebrecht et al. (2005), considerando-se na altura de queda do martelo a parcela de penetração do amostrador referente a um golpe do martelo para determinação de N_{SPT} .

Odebrecht et al. (2005) assume que a transferência de energia não necessariamente aumenta com o acréscimo do comprimento das hastes. A influência do comprimento da haste pode ser embasada nos seguintes fatores: quanto maior o comprimento utilizado, maior será a perda de energia observada durante propagação da onda ao longo destes segmentos; no entanto para baixa resistência de solos os valores do ganho em energia a partir do peso da haste às vezes pode ser maior do que as perdas de energia resultante reais de propagação da onda. Usando-se comprimentos curtos, estes dois efeitos são pequenos e conseqüentemente se anulam. Como resultado, os autores não usam o comprimento da haste para cálculo de energia, mas enfatizam a importância de contabilizar a penetração permanente do amostrador para interpretação desta energia ($EP_{sistema*}$) em ensaios SPT.

$$EP_{sistema*} = \eta (H + \Delta\rho) \times M_h \times g \quad (34)$$

A Tabela 6 mostra os valores empregados assim como os resultados encontrados de $EP_{sistema}$ para as profundidades de 2,0 e 5,0 m.

Tabela 6 - Energia do sistema corrigida.

Profundidade (m)	N_{SPT} (golpes/cm)	H (cm)	$\Delta\rho$ (cm)	M_h (kg)	g (m/s ²)	$EP_{sistema*}$ (J)
2,0	6/30	75,0	5,0	65,0	9,8	510,1
5,0	8/31	75,0	3,8	65,0	9,8	502,4

Descontando-se o valor do encurtamento elástico ρ_e da composição de hastes, o trabalho W_p foi obtido considerando a área sob a curva do gráfico obtido pela prova de carga estática correspondente ao deslocamento resultante de um golpe. Corrigindo-se a energia potencial do sistema, temos para a eficiência:

$$\eta_s = W_p/EP_{sistema*} \times 100 \quad (35)$$

A Tabela 7 apresenta os resultados finais de trabalho e energia potencial do sistema, empregados para a determinação da eficiência, assim como seu respectivo valor:

Tabela 7 - Eficiência do equipamento de sondagem empregado.

Profundidade (m)	W_p (J)	$EP_{sistema*}$ (J)	η_s (%)
2,0	225,2	510,1	44,1
5,0	223,2	502,4	44,4

Nota-se que a eficiência do martelo automatizado utilizado na atual pesquisa foi praticamente a mesma nas duas profundidades testadas, fato que faz validar este procedimento de obter eficiência por prova de carga. O valor obtido ficou abaixo do intervalo típico encontrado na prática brasileira entre 50% e 75%.

Os valores de eficiência encontrados no presente estudo assemelham-se aos valores determinados também para o martelo automático usado em Neves (2004), que variaram de 40% a 47%. Este autor realizou provas de carga estática para determinação de eficiência no mesmo tipo de solo desta pesquisa, areia siltosa. Além disso, Kovacs et al. (1983) também apresentaram diversos resultados onde os valores da eficiência de sondagens a percussão com martelo vazado apontaram uma média de 45%.

3.3 Resultados dos ensaios de caracterização granulométrica dos solos nas profundidades ensaiadas (2, 5 e 10m)

No Furo 4, foram retiradas amostras para a caracterização granulométrica do solo em laboratório nas profundidades de 2, 5 e 10m,

Esta caracterização foi necessária visto que um dos objetivos do trabalho foi comparar a caracterização obtida pela razão de atrito no ensaio SPT com o tipo de solo caracterizado em laboratório.

Nas Figuras 29, 30 e 31 são apresentados os resultados da análise granulométrica feita pela empresa ARC Engenharia e Tecnologia, para as três profundidades em que foram realizados ensaios de arrancamento do amostrador nesta pesquisa (2, 5 e 10m).

Os resultados das curvas granulométricas são resumidos na Tabela 8 abaixo:

Tabela 8 – Resultados dos ensaios de granulometria.

Profundida de (m)	Porcentagem de material (%)						Classificação do material	D ₅₀ (mm)
	Argila	Silte	Areia fina	Areia média	Areia grossa	Pedregulho		
2,0	4,9	13,4	19,8	12,8	7,3	41,9	Pedregulho arenoso	0,450
5,0	23,2	27,4	39,4	9,2	0,2	0,5	Areia Silto-argilosa	0,058
10,0	10,6	38,1	46,2	5,0	0,0	0,0	Areia Siltosa	0,063

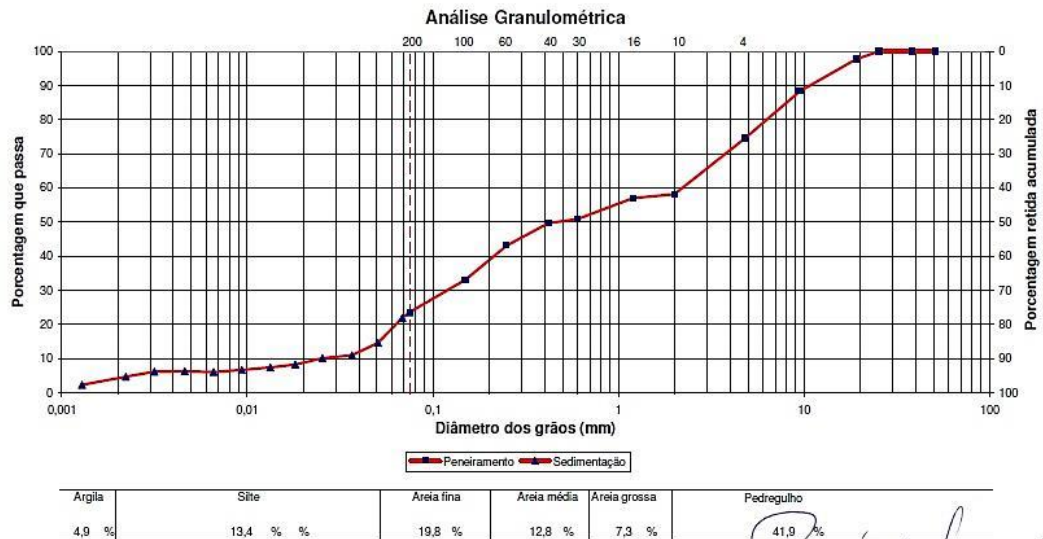


ARC ENGENHARIA E
TECNOLOGIA LTDA
DIVISÃO ENG. DA QUALIDADE

Cliente: MARLON QUEIROZ
Obra: ESTUDO PARA MESTRADO EM GEOTECNIA
Material: Pedregulho arenoso

Amostra nº.: ST 01 Prof. 2.0
Data da coleta: 21/5/2015
Data do ensaio: 10/8/2015

Cert.: 189/15



Eng. Paulo Afonso A. Dorça
CREA 104253 / MG

Uberlândia - MG - Rua Ignez Favato 220, Distrito Industrial - CEP 38402-340 - Telefone: (34) 3232-9066 - Telefax: (34) 3232-6212 - website: www.arcengenharia.eng.br
Uberaba - MG - Av. Apolônio Sales, 520 - Bairro São Benedito - CEP 38020-430 - Telefax: (34) 3336-6442 - Belo Horizonte-MG

Figura 29 - Curva Granulométrica para amostra obtida a 2,0 m de profundidade.

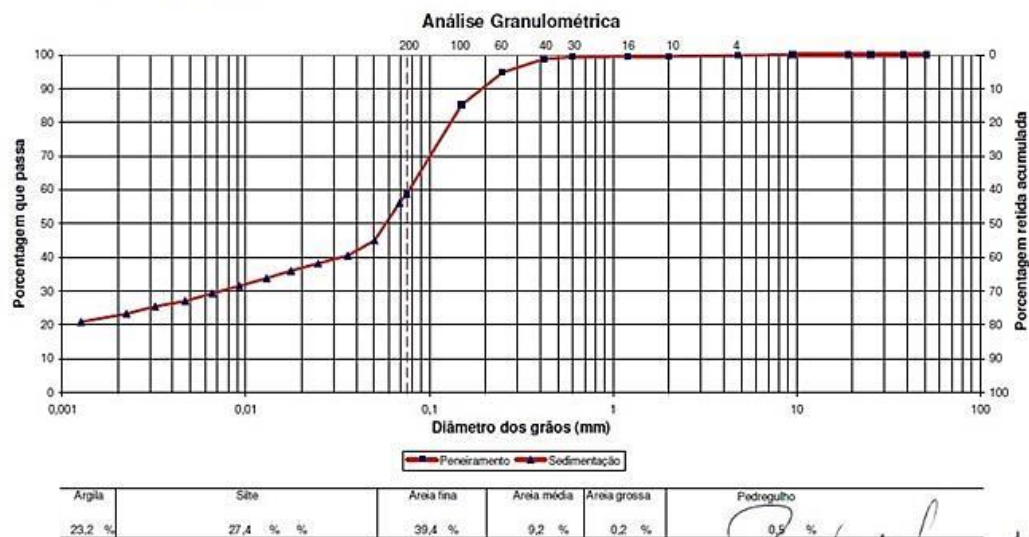


ARC ENGENHARIA E
TECNOLOGIA LTDA
DIVISÃO ENG. DA QUALIDADE

Cliente: MARLON QUEIROZ
Obra: ESTUDO PARA MESTRADO EM GEOTECNIA
Material: areia silto-argilosa

Amostra nº.: ST 01 Prof. 5.0
Data da coleta: 21/5/2015
Data do ensaio: 10/8/2015

Cert.: 192/15



Eng. Paulo Afonso A. Dorça
CREA 104253 / MG

Uberlândia - MG - Rua Ignez Favato 220, Distrito Industrial - CEP 38402-340 - Telefone: (34) 3232-9066 - Telefax: (34) 3232-6212 - website: www.arcengenharia.eng.br
Uberaba - MG - Av. Apolônio Sales, 520 - Bairro São Benedito - CEP 38020-430 - Telefax: (34) 3336-6442 - Belo Horizonte-MG

Figura 30 - Curva Granulométrica para amostra obtida a 5,0 m de profundidade.



ARC ENGENHARIA E
TECNOLOGIA LTDA
DIVISÃO ENG. DA QUALIDADE

Ciente: MARLON QUEIROZ

Obra: ESTUDO PARA MESTRADO EM GEOTECNIA

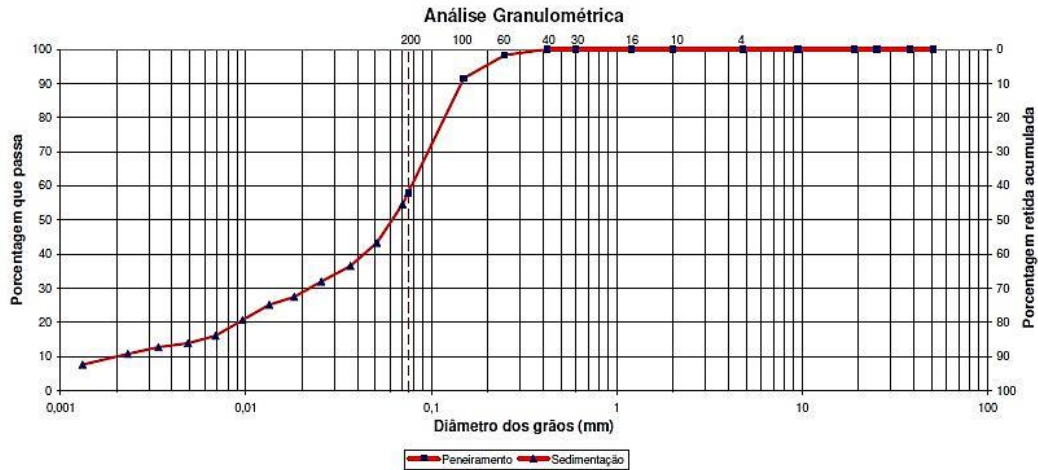
Material: areia siltosa

Amostra nº.: 3T 01 Prof 10,0

Data da coleta: 21/5/2015

Data do ensaio: 10/8/2015

Cert.: 191/15



Argila	Silt	Areia fina	Areia média	Areia grossa	Pedregulho
10,6 %	38,1 %	46,2 %	5,0 %	0,0 %	0,0 %

Eng. Paulo Afonso A. Dorça
CREA 104253 / MG

Uberlândia – MG – Rua Ignez Favato 220, Distrito Industrial - CEP 38402-340 – Telefone: (34) 3232-9066 – Telefax: (34) 3232-6212 - website: www.arcengenharia.eng.br
Uberaba – MG – Av. Apolônio Sales, 520 – Bairro São Benedito – CEP 38020-430 – Telefax: (34) 3336-6442 – Belo Horizonte-MG

Figura 31 - Curva Granulométrica para amostra obtida a 10,0 m de profundidade.

A Figura 32 apresenta uma comparação entre as três curvas obtidas nos ensaios.

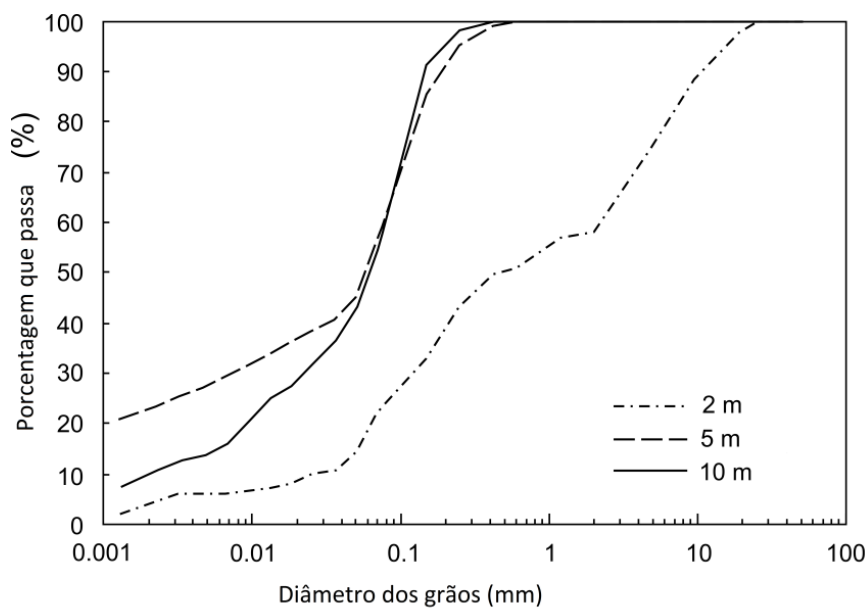


Figura 32 - Curvas Granulométricas obtidas das amostras a 2, 5 e 10m de profundidade.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para todas as profundidades os valores de R_u utilizados foram aqueles obtidos através da fórmula proposta por Aoki et al. (2007), conforme Equação 36. Os dados utilizados foram os respectivos resultados de N_{SPT} , os valores de $EP_{sistema}$ determinados para cada profundidade conforme apresentado no capítulo anterior e uma eficiência de 44%.

$$R_u = (44 \times EP_{sistema} \times N_{SPT}) / 0,3m \quad (36)$$

Como descrito na Figura 12, uma vez que R_b é calculado ($R_b = R_u + W - R_{se}$), pode-se então determinar a resistência de ponta q_{spt} do amostrador padrão no ensaio SPT dividindo R_b pela área total na ponta do amostrador:

$$q_{spt} = \frac{R_b}{(\pi/4) \times Db^2} \quad (37)$$

A Tabela 9 mostra os valores de encontrados de R_u , q_{spt} , f_{s-spt} e razão de atrito nas profundidades ensaiadas:

Tabela 9 – Resultados de R_u e q_{spt} , f_{s-spt} , e razão de atrito.

Prof. (m)	Furo	L_i (m)	N_{spt} (golpes /0.3m)	R_{se} (kN)	f_{s-spt} (kPa)	R_u (kN)	W (kN)	q_{spt} (MPa)	Razão de atrito f_{s-spt}/q_{spt} (%)
2.0	1	0.25	6	0.72	10.0	4.49	0.17	3.5	0.29
	2	0.36	10	0.95	13.2	7.30	0.17	5.7	0.23
	3	0.38	17	0.61	8.5	12.21	0.17	10.3	0.08
5.0	1	0.25	7	2.58	35.9	5.19	0.27	2.5	1.42
	2	0.21	7	2.42	33.7	5.19	0.27	2.7	1.26
	3	0.21	7	2.81	39.1	5.19	0,27	2.3	1.68
10.0	1	0.21	14	2.18	30.4	10.10	0.44	7.3	0.42
	2	0.21	15	2.56	35.7	10.80	0.44	7.6	0.47
	3	0.21	22	2.60	36.3	15.71	0.44	11.9	0.31

4.1 Comparação da resistência de ponta do ensaio SPT, q_{spt} , com valores de N_{spt}

A Figura 33 compara os valores de q_{spt} obtidos com os respectivos valores de N_{SPT} , para os solos encontrados a 2,0, 5,0 e 10,0 m de profundidade.

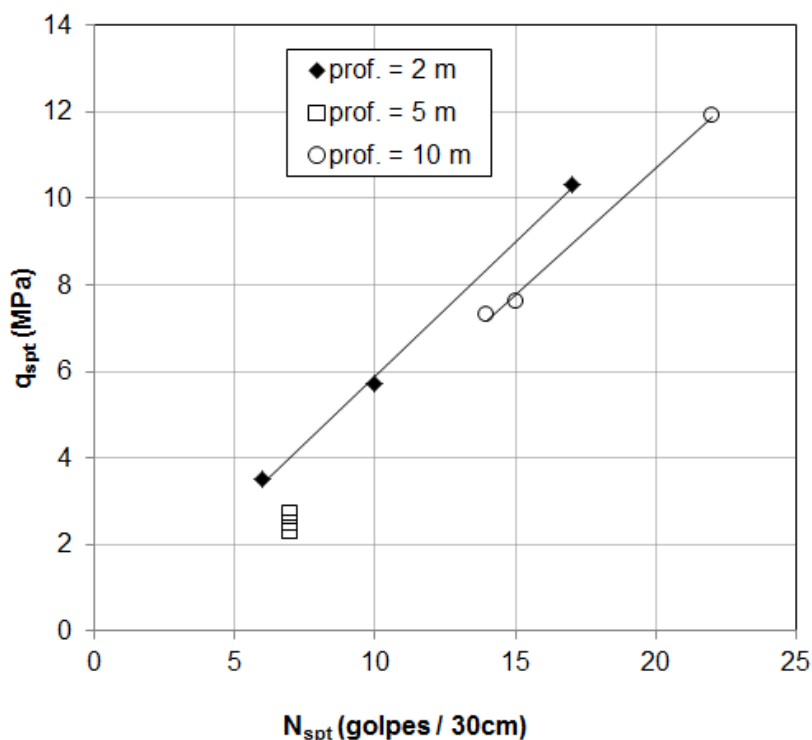


Figura 33 – Resultados de $q_{spt} \times N_{spt}$ para as profundidades de 2,0m, 5,0m e 10m.

A relação entre q_{spt} e os respectivos valores de N_{spt} mostrada na Figura 33 para cada tipo de solo mostra-se linear. Apenas na profundidade de 5 m, em que o N_{spt} medido foi igual nos 3 furos de ensaio, os valores de q_{spt} foram praticamente os mesmos. Esta figura retrata para as três camadas de solo avaliadas que quanto maior o valor de N_{spt} , maior será o valor de q_{spt} .

Além disso, a Figura 33 mostra que a razão entre q_{spt} e N_{spt} é única para o mesmo tipo de solo desde que o valor da eficiência no ensaio seja o mesmo. Portanto, os resultados acima mostram que a relação entre a resistência de ponta do ensaio SPT e o valor de N_{SPT} varia com o tipo de solo, do mesmo modo que a relação entre a resistência de ponta do ensaio de cone (q_c) e o N_{spt} , como mostra a Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados da razão q_{spt}/N_{spt} .

Profundidade (m)	Solo	Furo	N_{spt} (golpes/0.3m)	q_{spt} (MPa)	q_{spt}/N_{spt} MPa/(golpes/0.3m)
2.0	Pedregulho arenoso	1	6	3.5	0.58
		2	10	5.7	0.57
		3	17	10.3	0.61
5.0	Areia silto-argilosa	1	7	2.5	0.36
		2	7	2.7	0.38
		3	7	2.3	0.33
10.0	Areia siltosa	1	14	7.3	0.52
		2	15	7.6	0.51
		3	22	11.9	0.54

4.2 Comparação das resistências de ponta do ensaio de cone q_c e do ensaio SPT q_{spt}

Um dos objetivos deste trabalho foi verificar a possibilidade de equivalência entre resistência de ponta do ensaio SPT (q_{spt}) e o valor de q_c do ensaio de cone, visto que uma correlação direta entre q_c e q_{spt} parece ser mais adequada do que as típicas correlações entre q_c e N_{SPT} usadas normalmente para a transformação de dados de ensaio SPT em dados de ensaio de cone.

Nesta pesquisa são comparadas as correlações obtidas experimentalmente entre q_{SPT} e o valor de N_{SPT} com a relação de resultados apresentados em outras pesquisas entre de q_c do ensaio de cone o valor de N_{SPT} . Na literatura diversos autores apresentam correlações entre q_c e N_{SPT} . Danziger (1982) apresenta alguns resultados na Tabela 11. No entanto, cabe ressaltar que os valores destas relações propostas na literatura são variados, já que a foram obtidas por meio de ensaios SPT realizados com diferentes eficiências. Esta relação seria única para o mesmo tipo de solo e mesma eficiência para a obtenção de N_{SPT} .

Comparando-se os resultados da razão q_c/N_{SPT} (Tabela 11) com os resultados de q_{spt}/N_{SPT} (Tabela 10) nota-se que para o mesmo tipo de solo as razões são da mesma ordem de grandeza. Isto mostra que as resistências de ponta dos dois ensaios são similares apesar da geometria da ponta do amostrador do ensaio SPT e do cone serem diferentes (Figura 34). No mais, tanto a razão q_c/N_{SPT} quanto a razão q_{spt}/N_{SPT} aumenta o tamanho do grão do solo.

Tabela 11 - Valores de q_c/N_{SPT} proposto por Schmertmann (1970 apud Danziger 1982).

Tipo de solo	q_c/N_{SPT} Mpa/(nºgolpes/30cm)
Siltos, siltes arenosos e misturas pouco coesivas de siltes e areia	0,20
Areias puras, finas e médias, e areias pouca siltosas	0,35
Areias grossas e pouco pedregulhosas	0,50
Areias pedregulhosas e pedregulhos	0,60

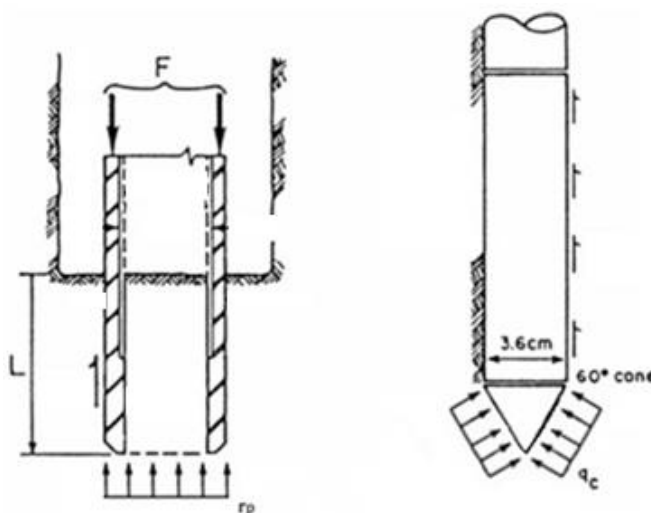


Figura 34 – Comparação entre as componentes de resistência à penetração do ensaio SPT e CPT (modificado de Schmertmann (1979)).

Nota-se que os valores encontrados de q_{SPT}/N_{SPT} variam com o tamanho do grão, como para os valores sugeridos de q_c/N_{SPT} por Schmertmann (1970). O solo a 5m de profundidade que apresentou uma parcela maior de argila em relação às outras profundidades proporcionou menor valor de q_{SPT}/N_{SPT} .

Robertson et al. (1983) apresenta valores da relação entre q_c/N_{SPT} obtida por vários autores (Figura 35), e mostra que esta relação aumenta com o tamanho médio do grão (D_{50}). No presente trabalho também encontramos a mesma tendência, como mostra a Figura 36.

Na Figura 36b apresenta-se um comparação de q_{SPT}/N_{SPT} com o D_{20} , já que na literatura algumas pesquisas (Baez et al. 2000 e Jefferies and Davies 1983) citam que a relação q_c/N_{SPT} decresce com o aumento da porcentagem de finos. Portanto, do mesmo modo a relação q_{spt}/N_{SPT} também decresce com a porcentagem de finos.

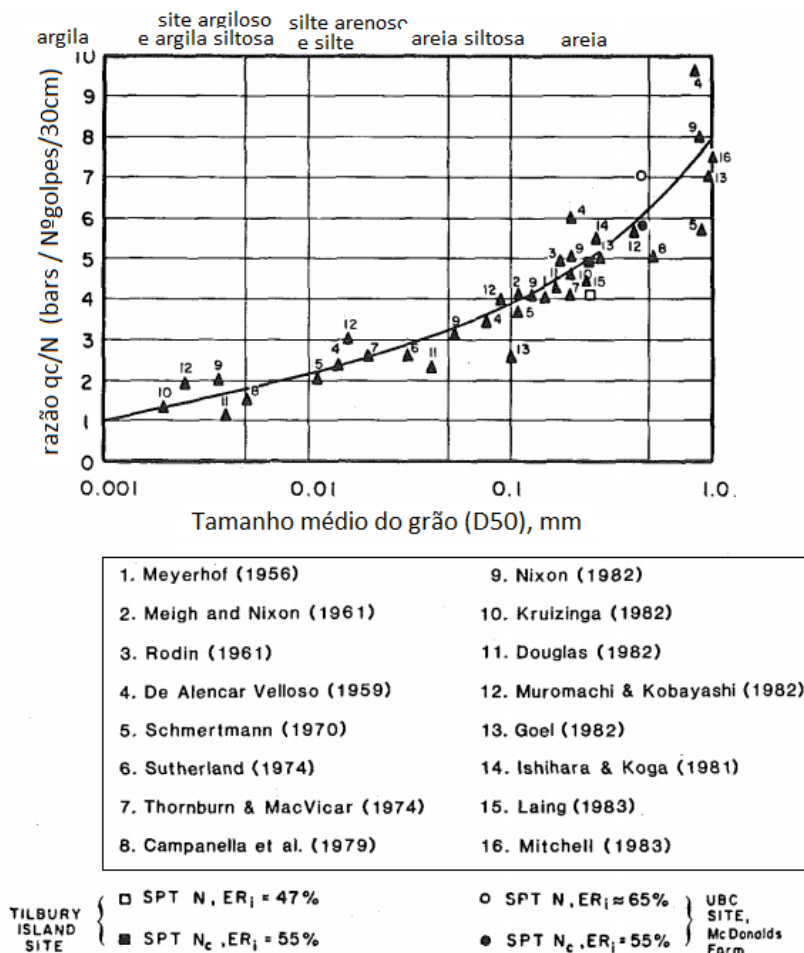


Figura 35 – Valores da razão q_c/N_{SPT} x D_{50} (Robertson et. al. 1983).

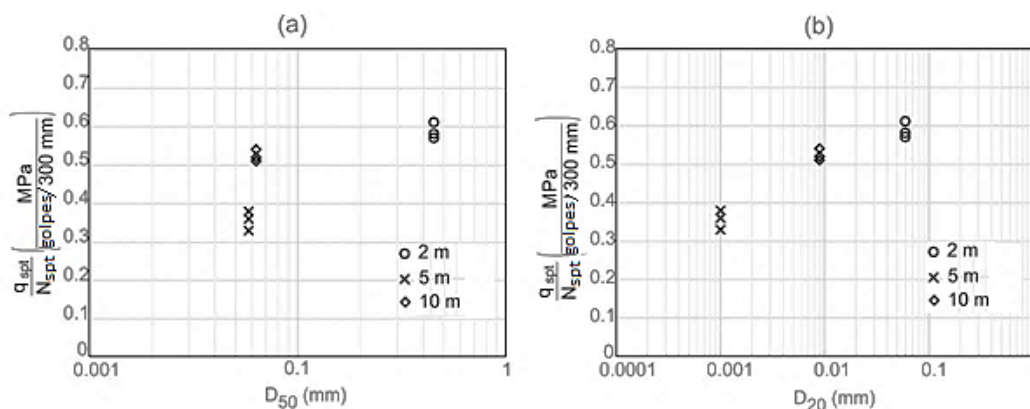


Figura 36 – Valores da razão q_{spt}/N_{SPT} x D_{50} e q_{spt}/N_{SPT} x D_{20} obtidos nesta pesquisa para os solos a 2.5 e 10 m de profundidade.

4.2.1 Razão de atrito do Ensaio SPT (f_{s-spt} / q_{spt})

No ensaio de cone CPT (Lunne et al.,1997), a razão entre o atrito lateral externo com a resistência de ponta do solo é denominado como razão de atrito R_f , e é utilizado para a classificação do solo.

Do mesmo modo, nesta pesquisa foi estimada a razão de atrito obtida em ensaio SPT, já que foram medidos valores de f_{s-spt} (pelos ensaios de arrancamento) e estimados valores de q_{spt} , como mostra a Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados de razão de atrito.

Prof. (m)	Furo	f_{s-spt} (kPa)	q_{spt} (MPa)	Razão de atrito f_{s-spt}/q_{spt} (%)
2.0	1	10.0	3.5	0.29
	2	13.2	5.7	0.23
	3	8.5	10.3	0.08
5.0	1	35.9	2.5	1.42
	2	33.7	2.7	1.26
	3	39.1	2.3	1.68
10.0	1	30.4	7.3	0.42
	2	35.7	7.6	0.47
	3	36.3	11.9	0.31

Sabendo-se que os valores de q_{SPT} e q_c correspondem a resistência de ponta dos ensaios SPT e CPT respectivamente, os valores de razão de atrito da Tabela 12 foram interpretados empregando-se o ábaco de classificação de Robertson et al. (1986), como mostra a Figura 37.

Os resultados obtidos pelo ábaco da Figura 37 e os obtidos experimentalmente pelo ensaio de granulometria, são comparados na Tabela 13 para cada profundidade:

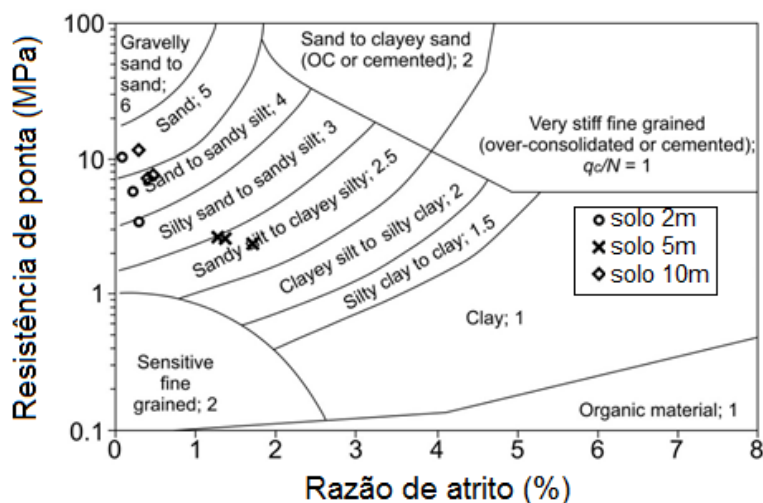


Figura 37 – Resultados de $q_{SPT} \times R_f$ plotados no ábaco de classificação de solo por Robertson et al. (1986).

Tabela 13– Classificação pelo ensaio de granulometria e através do ábaco de Robertson et al.(1986)

Profundidade (m)	Classificação pelo ensaio de granulometria	Classificação do material pelo ábaco de Robertson et al (1986)
2,0	Pedregulho arenoso	Areia, silte arenoso, areia siltosa
5,0	Areia silto-argilosa	Silte arenoso e Silte argiloso
10,0	Areia siltosa	Areia e Silte arenoso

Nota-se que os resultados plotados no ábaco de Robertson et al. (1986) são similares àqueles obtidos pelos ensaios de granulometria. Sendo assim, pode-se concluir que, uma vez determinando a razão de atrito R_f e resistência de ponta q_{SPT} do ensaio SPT é possível avaliar o tipo de solo pelo ábaco de q_c e R_f do ensaio de cone sugerido por Robertson et al. (1986).

Vale ressaltar a importância desta classificação, visto que a classificação táctil visual feita para as sondagens SP-01 e SP-02 desta pesquisa não coincide com a análise granulométrica feita em laboratório. Já a classificação pela razão de atrito obtida pelo ensaio SPT está mais próxima dos ensaios de laboratório.

4.3 Análise da relação entre atrito interno e externo no amostrador “a” proposta em Aoki (2012)

Aoki (2012) apresenta a relação “a” que é definida como a razão entre a resistência de atrito lateral interna r_{Li} e a resistência de atrito lateral externa r_{Le} no amostrador padrão.

4.3.1 Valores de a

Nesta pesquisa, os valores de r_{Le} são iguais aos valores de f_{s-spt} . O valor de r_{Li} é igual ao valor de τ_i mostrado no equilíbrio de forças na Figura 12b, e, como mostra esta figura, pode ser calculado por:

$$r_{Li} = \frac{q_{spt} D_i}{4L_i} \quad (38)$$

A razão “a” entre o atrito interno e atrito externo, conforme apresentado abaixo, pode ser determinada por:

$$a = \frac{r_{Li}}{r_{Le}} \quad (39)$$

Os valores de a são mostrados na Tabela 14. Nota-se que estes valores foram menores para o solo com maior porcentagem de argila (a 5 m de profundidade).

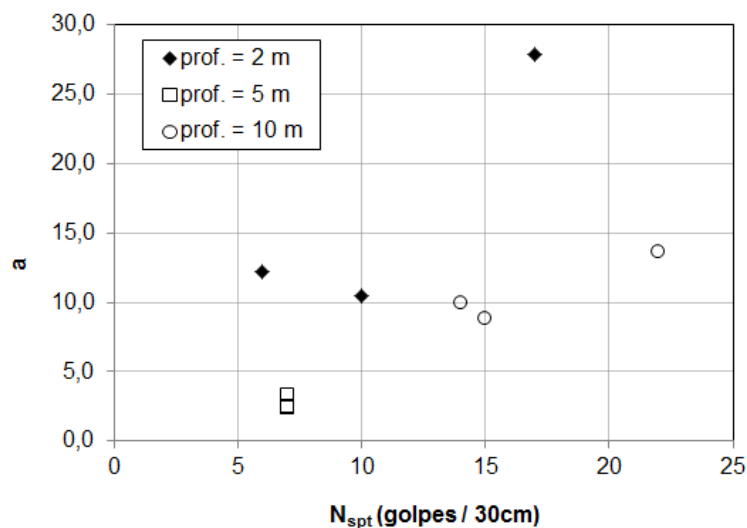
Como r_{Li} é equivalente à resistência de ponta do amostrador, e a 2 metros o solo predominante é o pedregulho, a resistência de ponta foi elevada, aumentando consideravelmente o valor de a .

Tabela 14 - Valores de “a”.

Prof. (m)	Furo	L_i (m)	f_{s-spt} (kPa)	r_{Li} (kPa)	a (r_{Li}/f_{s-spt})
2.0	1	0.25	10.0	122	12,2
	2	0.36	13.2	138	10,5
	3	0.38	8.5	236	27,8
5.0	1	0.25	35.9	87	2,4
	2	0.21	33.7	112	3,3
	3	0.21	39.1	96	2,4
10.0	1	0.21	30.4	303	10,0
	2	0.21	35.7	316	8,8
	3	0.21	36.3	494	13,6

4.3.2 Análise da relação entre a x N_{SPT}

Como mostra a Figura 38 o valor de “a” parece tender a crescer com o valor de N_{spt} . No entanto, pelos resultados desta figura não ficou clara uma relação entre estes dois parâmetros.

Figura 38 – Valores de “a” x valores de N_{SPT} .

4.3.3 Análise da relação entre a x N_{SPT}/σ_v

Sabendo que o valor de a depende do atrito solo-parede do amostrador, uma comparação foi feita desconsiderando-se o efeito do confinamento do solo para índice N_{SPT} . Para tanto, foram estimados valores de tensão efetiva vertical nas profundidades de ensaio, apresentados na Tabela 15. A partir dos resultados encontrados, elaborou-se o seguinte gráfico de a x N_{SPT}/σ_v mostrado na Figura 39, no qual para os solos estudados é mostrada uma relação linear crescente entre a razão “ a ” e o valor de N_{SPT} dividido pela tensão efetiva vertical na profundidade do ensaio.

Tabela 15 – Valores de N_{SPT}/σ_v para todas as profundidades.

Profundidade (m)	Furo	$N_{SPT}/30$	σ_v	N_{SPT}/σ_v
2,0	1	6	34,0	0,17
	2	10	34,0	0,29
	3	17	34,0	0,50
5,0	1	7	85,0	0,08
	2	7	85,0	0,08
	3	7	85,0	0,08
10,0	1	14	140,0	0,10
	2	15	140,0	0,11
	3	22	140,0	0,16

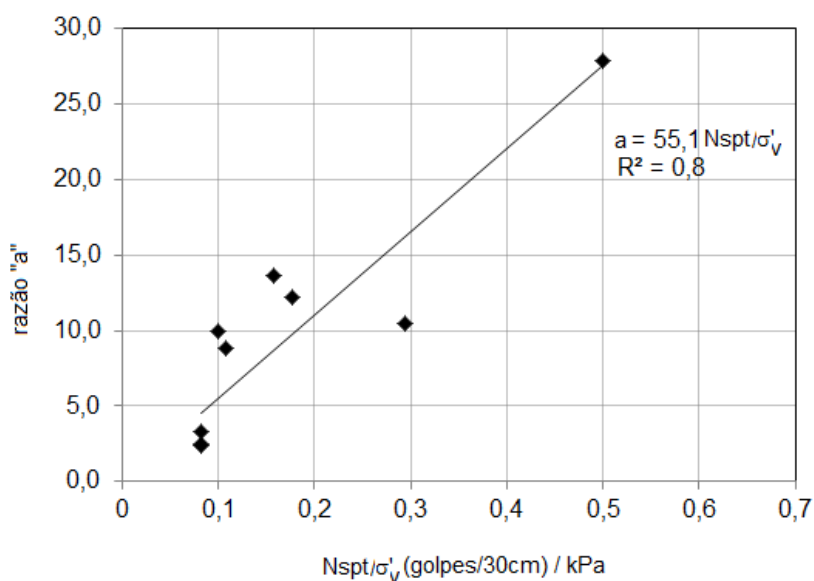


Figura 39 - a x N_{SPT}/σ_v para todas as profundidades.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi investigada a possibilidade de melhorar o ensaio SPT, adicionando-se alguns procedimentos simples e de fácil execução, com o objetivo de obter parâmetros adicionais ao valor de N_{SPT} para o dimensionamento de fundações. Os novos parâmetros obtidos pelo ensaio SPT foram: (i) resistência de ponta do ensaio SPT, que é equivalente ao parâmetro q_c do ensaio de cone, (ii) resistência por atrito lateral do ensaio SPT, e (iii) razão de atrito, que é um parâmetro usado para a classificação do solo quanto ao seu comportamento.

As principais conclusões deste estudo são as seguintes:

- 1) O ensaio SPT complementado com ensaios de arrancamento no amostrador, e com medida da eficiência do equipamento (obtida por instrumentação apropriada ou por prova de carga a compressão) pode fornecer resultados de resistência de ponta e razão de atrito do ensaio SPT similarmente ao ensaio de cone.
- 2) Para um mesmo solo, sob as mesmas condições e mesma eficiência de equipamento, existe uma relação única entre resistência de ponta do ensaio SPT com o valor de N_{spt} .
- 3) O valor da razão entre a resistência de ponta (q_{spt}) do ensaio SPT e o valor N_{spt} aumenta com o tamanho do grão, como igualmente ocorre para a relação entre q_c do ensaio de cone e N_{spt} . Estes resultados indicam que uma correlação direta entre os valores de resistência de ponta do ensaio SPT e do ensaio de cone parece ser mais adequada do que as correlações comumente utilizadas entre a resistência de ponta do ensaio do cone e o valor de N_{SPT} .
- 4) Usando-se a razão de atrito do ensaio SPT foi possível classificar o tipo de solo de acordo com o ábaco sugerido por Robertson et al. (1986). Esta classificação coincidiu com os ensaios granulométricos.

5) A razão “ a ”, que é a razão entre a resistência de atrito lateral interna r_{Li} com a resistência de atrito lateral externa r_{Le} no amostrador padrão, foi investigada nesta pesquisa. Para os tipos de solo investigados (pedregulho arenoso, areia silto-argilosa e areia siltosa), os resultados mostraram que existe uma relação linear crescente entre a razão “ a ” e o valor de N_{SPT} dividido pela tensão efetiva vertical na profundidade de ensaio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – NBR 6484; Execução de sondagens de simples reconhecimento dos solos. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

AOKI, N., CINTRA, J. C. A. The application of energy conservation Hamilton's principle to the determination of energy efficiency in SPT tests. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE APPLICATION OF STRESS WAVE THEORY TO PILES, São Paulo, v. 1, P457-460, 2000.

AOKI, N.; ESQUIVEL, E. R.; NEVES, L. F. S.; CINTRA, J. C. A. The impact efficiency obtained from static load test performed on the SPT sampler. Soil and Foundation, v. 47, n. 6, p. 1045-1052, Dec. 2007.

AOKI, N. Princípio de Hamilton aplicado ao ensaio SPT. Palestra proferida no Seminário de Fundações com Solicitações Dinâmicas, Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2012.

AOKI, N.; VELLOSO, D. A. An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. In.: PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 5., Buenos Aires, 1975. Anais. Buenos Aires: ISSMFE, V.1, p. 367-376, 1975.

BAEZ, J.I.; MARIN, G. R.; YOUNG, T. L. Comparison of SPT-CPT liquefaction evaluations and CPT interpretations, in Innovations and applications in geotechnical site characterization. Geo-Denver 2000, ASCE, GSP No. 97, 2000.

BELINCANTA, A. Energia dinâmica no SPT: resultados de uma investigação teórico-experimental. 217 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1985.

BELINCANTA, A. Avaliação de fatores intervenientes no índice de resistência à penetração do SPT. 141 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

BELINCANTA, A; FERRAZ, R. L. Fundamentos e métodos de medidas de energia dinâmica no SPT. Acta Scientiarum, UEM. Maringá (PR), v. 22, n. 5. p. 1574-1482, 2000.

BELINCANTA, A; PEIXOTO, A. S. P; MIGUEL, M. G. Sondagem de simples reconhecimento com SPT e torque. Editora da Universidade Estadual de Maringá (Eduem), Coleção Fundamentum, n. 63, 64p, 2010.

CAVALCANTE, E. H. Investigação teórico-experimental sobre SPT. 410p. v.1. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil)- Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 2002.

CINTRA. J. C. A; AOKI N; TSUHA C. H. C.; GIACHETI H.L. Fundações ensaios estáticos e dinâmicos. São Paulo: Oficina de textos, 2013.

DANZIGER, B. R. Estudo de correlações entre os ensaios de penetração estática e dinâmica e suas aplicações ao projeto de fundações profundas. Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1982.

JEFFERIES, M. G.; DAVIES, M. P. Use of CPTU to estimate equivalent SPT N60. Geotech.Testing, 1993.

KOVACS, W. D.; SALAMONE, L. A. "SPT Hammer Energy Measurement", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division – ASCE – vol.108, nGT4, pp. 599-620, 1982.

KOVACS, W. D.; SALAMONE, L. A.; YOKEL, F. Y. "Comparison of energy measurements in the Standard Penetration Test using the cathode and rope method", Final Report prepared for the U.S. Nuclear Regulatory Commission. 1983.

LUKIANCHUKI, J. A. Interpretação de resultados do ensaio SPT com base em instrumentação dinâmica. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

LUKIANCHUKI, J. A; ESQUIVEL, E. R; BERNARDES, G. P. Interpretation of force and acceleration signals during hammer impact in SPT test. In: Proc., 14th PAN-AMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING, Toronto/Canada, 2011.

LUNNE, T.; ROBERTSON, P. K.; POWELL, J. J. M. Cone penetration testing in geotechnical practice. Blackie Academic & Professional, 312 p, 1997.

Manual de execução de fundações e geotecnia: práticas recomendadas / ABEF – Associação Brasileira de Empresas de Engenharia de Fundações e Geotecnia – São Paulo: Pini, 2012.

NEVES, S. L. F. Metodologia para a determinação da eficiência no ensaio SPT através de prova de carga estática sobre o amostrador padrão. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP. 111 pp, 2004.

ODEBRECHT, E. Medidas de energia no ensaio SPT. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS. 250 p, 2003.

ODEBRECHT, E.; ROCHA, M. M.; SCHNAID, F.; BERNARDES, G. P. Energy efficiency for standard penetration test. ASCE. Vol. 131:10. 2005.

ROBERTSON, P. K. Soil classification using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal. 1990.

ROBERTSON, P. K., CAMPANELLA, R. G., GILLESPIE, D., AND GREIG, J. Use of piezometer cone data. Proc., ASCE Specialty Conf. In Situ'86: Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering, New York, 1263–1280. 1986

ROBERTSON, P. K., CAMPANELLA, R. G., and Wightman, A. SPT-CPT correlations, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 109, No. 11, pp. 1449-1459, 1983.

SCHMERTMANN, J. H. “Statics of SPT”, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division – ASCE – vol.105, nGT5, pp. 665-670, 1979.

SCHMERTMANN, J. H.; PALACIOS, A. “Energy Dynamics of SPT”, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division – ASCE – vol.105, nGT8, pp. 909-926, 1979.

SCHNAID, F. Ensaio de campo e suas aplicações à Engenharia de fundações. São Paulo: Oficina de textos, 2000.