

Luis Fernando de Seixas Neves

**METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO DA
EFICIÊNCIA DO ENSAIO SPT ATRAVÉS DE
PROVA DE CARGA ESTÁTICA SOBRE O
AMOSTRADOR PADRÃO**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço...13.../08.../04...

Ass.:.....

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Geotecnia

DEDALUS - Acervo - EESC



Orientador: Prof. Dr. Nelson Aoki



São Carlos
2004

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **LUIS FERNANDO DE SEIXAS NEVES**

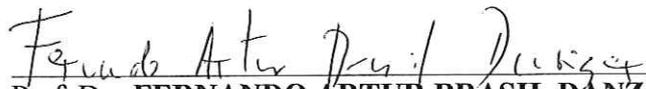
Dissertação defendida e julgada em 23-03-2004 perante a Comissão Julgadora:



Prof. Dr. **NELSON AOKI (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) Aprovado.

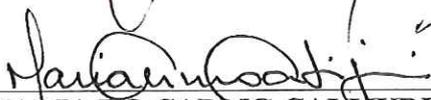


Prof. Tit. **JOSÉ HENRIQUE ALBIÉRO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) Aprovado



Prof. Dr. **FERNANDO ARTUR BRASIL DÂNZIGER**
(Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ) APROVADO

Prof. Assoc. **LAZARO VALENTIN ZUQUETTE**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia



Profa. Assoc. **MARIA DO CARMO CALJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

Dedico este trabalho a todos aqueles que contribuíram para a minha formação moral e intelectual: À minha família, que nunca deixou de acreditar no meu potencial; à minha namorada Andrea Mariotto, pelo apoio e compreensão durante os últimos 8 anos e ao prof. Nelson Aoki, meu mestre e amigo, pela paciência e dedicação prestadas a mim.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, meu pai e Jesus, meu mestre, pela oportunidade de me elevar moral e intelectualmente na incessante busca pela evolução espiritual.

Agradeço a Gilmar Wilian Barreto pelo apoio prestado durante todas as etapas da elaboração deste trabalho.

Sou grato a CAPES e ao prof. Dr. Nelson Aoki por financiarem parte de minhas pesquisas e ao prof. Dr. Fernando Danziger da COPPE-UFRJ por emprestar material essencial para a conclusão deste trabalho.

Agradeço aos professores José Carlos Cintra; Heraldo Giacheti; Antonio Belincanta e Orencio Vilar. Aos colegas Giuliano De Mio; Luiz Russo Neto; Marcio Costanzi e Erinaldo Cavalcante.

Sou grato aos funcionários da graduação e da pós-graduação da EESC-USP; aos funcionários do Departamento de Geotecnia; aos meus colegas da USP e aos meus amigos de república.

À Universidade de São Paulo por colocar à minha disposição sua estrutura.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	I
LISTA DE TABELAS.....	X
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES	XII
RESUMO.....	XV
ABSTRACT.....	XVI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivo da dissertação	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Sondagem de Simples Reconhecimento com SPT	4
2.1.1 Breve história sobre o ensaio SPT	4
2.1.2 O ensaio SPT no Brasil	6
2.1.3 Metodologia do ensaio	7
2.2 Transferência da energia dinâmica no ensaio SPT.....	10
2.2.1 Fatores intervenientes na energia dinâmica do ensaio SPT	14
2.2.2 Resistência do sistema amostrador-solo.....	17
2.3 Prova de Carga Estática	19
2.3.1 Breve histórico.....	19
2.3.2 Metodologia de ensaio	20
2.3.3 Resistência do sistema amostrador-solo.....	24
2.4 Princípio de Hamilton.....	27
2.4.1 Aplicação do Princípio de Hamilton ao golpe do martelo do SPT.....	27
2.4.2 Transferência da energia em um ensaio dinâmico.....	32
2.4.3 Transferência da energia em um ensaio estático	33

3. PROPOSTA PARA MEDIR A EFICIÊNCIA DO ENSAIO SPT ATRAVÉS DE PROVA DE CARGA ESTÁTICA	36
3.1 Ruptura do sistema amostrador-solo	36
3.2 Cálculo da eficiência do ensaio SPT através da execução de prova de carga estática sobre o amostrador padrão	37
4. ENSAIOS.....	41
4.1 Ensaio dinâmico	43
4.1.1 Material utilizado	43
4.1.2 Metodologia de ensaio	49
4.1.3 Resultados	53
4.1.4 Análise de um golpe do ensaio SPT	63
4.2 Ensaio estático.....	65
4.2.1 Material utilizado.....	65
4.2.2 Metodologia de ensaio	69
4.2.3 Resultados	74
4.2.4 Análise de uma prova de carga.....	80
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	81
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	85
6.1 Conclusões	85
6.2 Sugestões para futuras pesquisas.....	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

LISTA DE FIGURAS



Figura 2.1 – Esquema do ensaio SPT (BELINCANTA, 1998) .. 8



Figura 2.2 – Equipamento de sondagem montado sobre caminhão..... 10

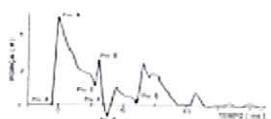


Figura 2.3 – Registro de força em função do tempo (modificado de BELINCANTA *et al.*, 1994)..... 12

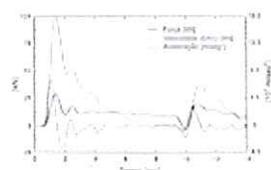


Figura 2.4 – Registro típico de força, velocidade e aceleração no amostrador (modificado de ABOU-MATAR *et al.*, 1996) 14

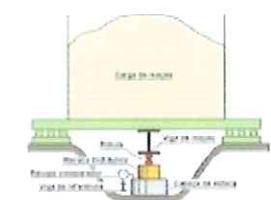


Figura 2.5 – Sistema de reação por cargueira 21

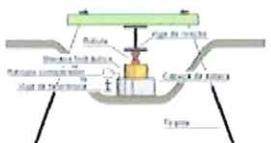


Figura 2.6 – Sistema de reação por tirantes 21

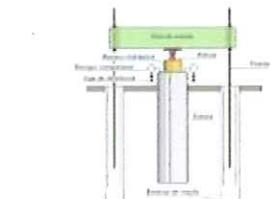


Figura 2.7 – Sistema de reação por estacas..... 22

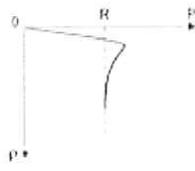


Figura 2.8 – Exemplo de curva carga-recalque com ruptura nítida..... 23

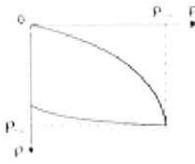


Figura 2.9 – Exemplo de curva carga-recalque sem ruptura nítida..... 24

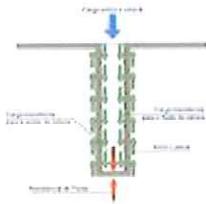


Figura 2.10 – Esquema de esforços de uma estaca submetida a carregamento estático 25

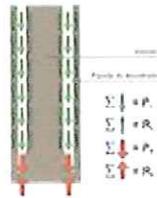


Figura 2.11 – Equilíbrio estático do sistema amostrador-solo.. 26

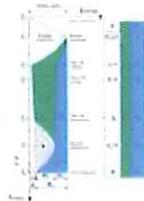


Figura 2.12 – Evolução de energia potencial, cinética e trabalho durante o evento *golpe do martelo* (Modificado de AOKI & CINTRA, 2000²)..... 28

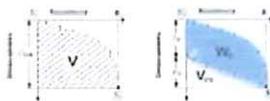


Figura 2.13 – Resultado típico de uma prova carga dinâmica em estaca (modificado de AOKI (2000))..... 32

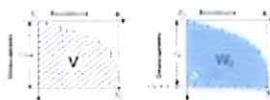


Figura 2.14 – Resultado típico de um ensaio dinâmico realizada sobre o amostrador SPT para areias e siltes arenosos (modificado de AOKI (2000))..... 33

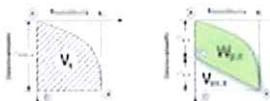


Figura 2.15 – Resultado típico de uma prova de carga estática sobre estaca (modificado de AOKI (2000)) 34

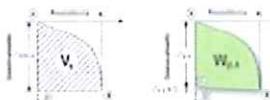


Figura 2.16 – Resultado típico de uma prova de carga estática realizada sobre o amostrador SPT para areias e siltes arenosos (modificado de AOKI (2000))..... 34

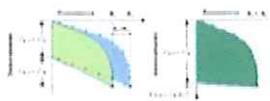


Figura 3.1 - Comparação entre provas de carga dinâmica e estática 38

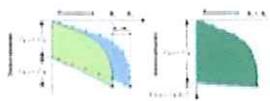


Figura 3.2 – Comparação entre provas de carga dinâmica e estática executadas sobre o amostrador SPT para areias e siltes arenosos..... 38

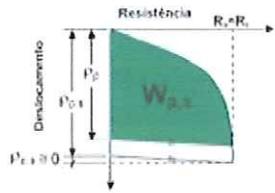


Figura 3.3 – Trabalho calculado através de uma prova de carga estática para a penetração obtida no último golpe dinâmico do martelo SPT 39



Figura 4.1 – Haste AW instrumentada..... 44



Figura 4.2 – Acelerômetros (modificado de CAVALCANTE, 2002)..... 45



Figura 4.3 – Aquisitor de dados – SPT Analyzer..... 46



Figura 4.4 – Equipamento de sondagem sobre caminhão..... 47

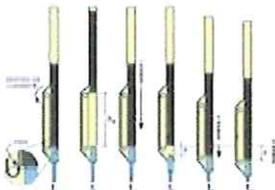


Figura 4.5 – Esquema de funcionamento do martelo automático 47

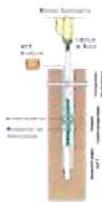


Figura 4.6 – Esquema de montagem da aquisição de dados do ensaio dinâmico SPT 48



Figura 4.7 – Haste e sensores protegidos por papel bolha e fita adesiva 48



Figura 4.8 – Conjunto de hastes AW..... 50



Figura 4.9 – Encaixe das hastes *AW* (*Niple* com rosca *AW*) 50



Figura 4.10 – Amostrador padrão com rosca *AW*..... 50



Figura 4.11 – Execução do pré-furo 51



Figura 4.12 – Colocação da haste instrumentada dentro do furo de sondagem 51



Figura 4.13 – Execução da sondagem SPT 52



Figura 4.14 – Amostragem..... 52



Figura 4.15 – Relatório de sondagem SPT para a campanha *Porto Ferreira*..... 53

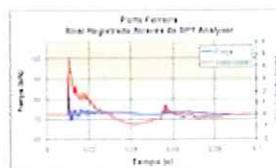


Figura 4.16 – Sinais de força e velocidade do golpe do ensaio dinâmico *Porto Ferreira – 1* 54



Figura 4.17 – Relatório de sondagem SPT para a campanha *Araras – 1* 55

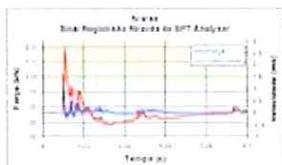


Figura 4.18 – Sinais de força e velocidade do golpe do ensaio dinâmico *Araras – 1* 56



Figura 4.19 – Relatório de sondagem SPT para a campanha *Araras – 3* 57

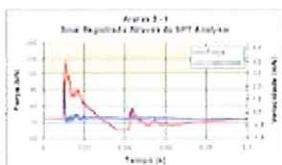


Figura 4.20 – Sinais de força e velocidade do golpe do ensaio dinâmico *Araras 3 – 1* 58

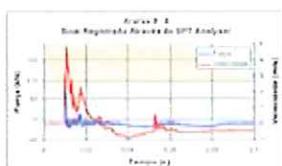


Figura 4.21 – Sinais de força e velocidade do golpe do ensaio dinâmico *Araras 3 – 2* 58

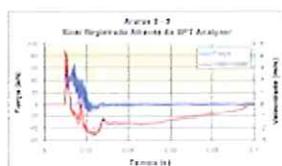


Figura 4.22 – Sinais de força e velocidade do golpe do ensaio dinâmico *Araras 3 – 3* 59



Figura 4.23 – Relatório de sondagem SPT para a campanha *Araras – 4* 60

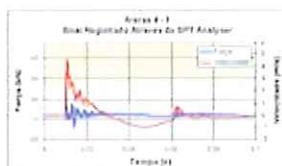


Figura 4.24 – Sinais de força e velocidade do golpe do ensaio dinâmico *Araras 4 – 1* 61

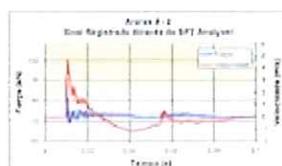


Figura 4.25 – Sinais de força e velocidade do golpe do ensaio dinâmico *Araras 4 – 2* 61

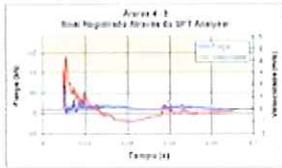


Figura 4.26 – Sinais de força e velocidade do golpe do ensaio dinâmico *Araras 4 – 3* 62

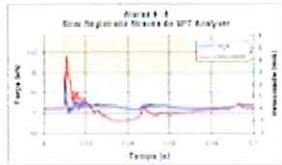


Figura 4.27 – Sinais de força e velocidade do golpe do ensaio dinâmico *Araras 4 – 4* 62

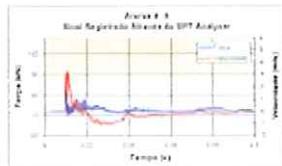


Figura 4.28 – Sinais de força e velocidade do golpe do ensaio dinâmico *Araras 4 – 5* 63

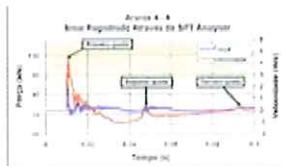


Figura 4.29 – Sinal típico registrado através do *SPT Analyzer* 64



Figura 4.30 – Célula de carga utilizada nos ensaios estáticos.. 66



Figura 4.31 – Célula de carga sendo calibrada..... 66

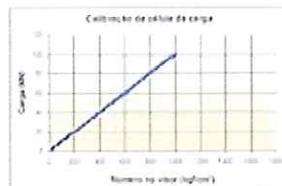


Figura 4.32 – Curva de calibração da célula de carga 67



Figura 4.33 – Macaco hidráulico utilizado no ensaio..... 67



Figura 4.34 – Bomba de óleo manual 68



Figura 4.35 – Rótula utilizada no ensaio 68



Figura 4.36 – Relógios instalados com bases magnéticas e apoiados sobre placas de acrílico 69

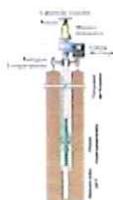


Figura 4.37 – Esquema de montagem da prova de carga estática sobre o amostrador SPT 70



Figura 4.38 – Aplicação de carga inicial para firmar o conjunto entre as hastes e a reação..... 72



Figura 4.39 – Conjunto pronto para iniciar o ensaio 72



Figura 4.40 – Ensaio sendo executado..... 73



Figura 4.41 – Leitura dos relógios comparadores 73



Figura 4.42 – Carga sendo mantida constante durante um estágio de carregamento 74



Figura 4.43 – Descarga do sistema sendo executada..... 74

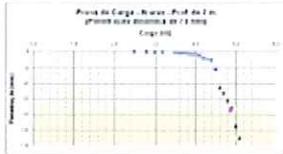


Figura 4.44 – Curva carga-recalque da prova de carga estática Porto Ferreira – 1 75

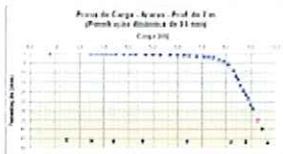


Figura 4.45 – Curva carga-recalque da prova de carga estática Araras 1 75

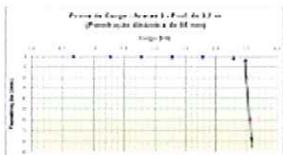


Figura 4.46 – Curva carga-recalque da prova de carga estática Araras 3 – 1..... 76

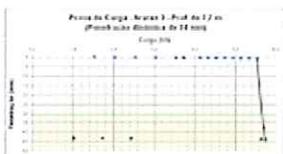


Figura 4.47 – Curva carga-recalque da prova de carga estática Araras 3 – 2..... 76

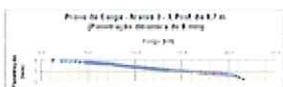


Figura 4.48 – Curva carga-recalque da prova de carga estática Araras 3 – 3..... 77

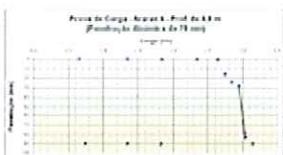


Figura 4.49 – Curva carga-recalque da prova de carga estática Araras 4 – 1..... 77

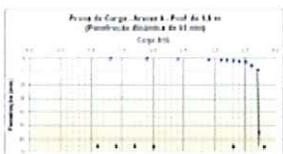


Figura 4.50 – Curva carga-recalque da prova de carga estática Araras 4 – 2..... 78

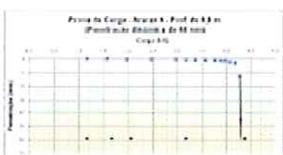


Figura 4.51 – Curva carga-recalque da prova de carga estática Araras 4 – 3..... 78

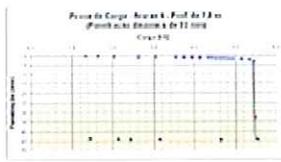


Figura 4.52 – Curva carga-recalque da prova de carga estática *Araras 4 – 4*..... 79

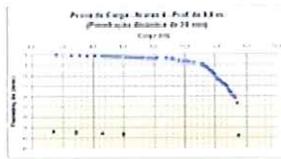


Figura 4.53 – Curva carga-recalque da prova de carga estática *Araras 4 – 5*..... 79

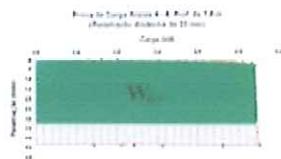


Figura 4.54 – Prova de carga típica realizada sobre o amostrador SPT..... 80



Figura 5.1 – Prova de carga estática onde a penetração dinâmica não atingiu a ruptura esperada. 82



Figura 5.2 – Relação linear entre as duas eficiências (dinâmica e estática)..... 83

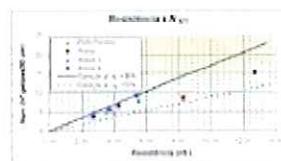


Figura 5.3 – Aplicação da equação (3.13) para uma faixa de eficiência entre 36% e 70% 83

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação dos solos (NBR 7250, 1982; NBR 6484, 2001).....	9
Tabela 2.2 – Fatores de correção referentes à eficiência de energia incidente (DÉCOURT, 1989).....	15
Tabela 2.3 – Principais diferenças entre as provas de carga estáticas do tipo lenta e rápida.....	23
Tabela 4.1 – Campanhas dos ensaios e seus números	41
Tabela 4.2 – Constantes de calibração da haste instrumentada.....	44
Tabela 4.3 – Constantes de calibração dos acelerômetros	44
Tabela 4.4 – Constantes de calibração dos medidores de deformação	45
Tabela 4.5 – Resultados do ensaio dinâmico <i>Porto Ferreira – 1</i>	54
Tabela 4.6 – Resultados do ensaio dinâmico <i>Araras – 1</i>	56
Tabela 4.7 – Resultados do ensaio dinâmico <i>Araras 3 – 1</i>	58
Tabela 4.8 – Resultados do ensaio dinâmico <i>Araras 3 – 2</i>	58
Tabela 4.9 – Resultados do ensaio dinâmico <i>Araras 3 – 3</i>	59
Tabela 4.10 – Resultados do ensaio dinâmico <i>Araras 4 – 1</i>	61
Tabela 4.11 – Resultados do ensaio dinâmico <i>Araras 4 – 2</i>	61
Tabela 4.12 – Resultados do ensaio dinâmico <i>Araras 4 – 3</i>	62
Tabela 4.13 – Resultados do ensaio dinâmico <i>Araras 4 – 4</i>	62
Tabela 4.14 – Resultados do ensaio dinâmico <i>Araras 4 – 5</i>	63
Tabela 4.15 – Resultados da prova de carga estática <i>Porto Ferreira – 1</i>	75
Tabela 4.16 – Resultados da prova de carga estática <i>Araras 1</i>	75

Tabela 4.17 – Resultados da prova de carga estática <i>Araras 3 – 1</i>	76
Tabela 4.18 – Resultados da prova de carga estática <i>Araras 3 – 2</i>	76
Tabela 4.19 – Resultados da prova de carga estática <i>Araras 3 – 3</i>	77
Tabela 4.20 – Resultados da prova de carga estática <i>Araras 4 – 1</i>	77
Tabela 4.21 – Resultados da prova de carga estática <i>Araras 4 – 2</i>	78
Tabela 4.22 – Resultados da prova de carga estática <i>Araras 4 – 3</i>	78
Tabela 4.23 – Resultados da prova de carga estática <i>Araras 4 – 4</i>	79
Tabela 4.24 – Resultados da prova de carga estática <i>Araras 4 – 5</i>	79
Tabela 5.1 – Resultado final dos ensaios	81

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

- a - Coeficiente que define a forma da curva no método de VAN DER VEEN (1953).
- a_h - Área transversal da haste instrumentada.
- c_h - Velocidade de propagação das ondas de tensão no conjunto de hastes.
- DIET* - *Dynamic Increasing Energy Test* (AOKI, 2000)
- e_1 - Fator de eficiência definido por DÉCOURT (1989) ($\frac{E_m}{U}$).
- E - Módulo de elasticidade da haste instrumentada.
- E_i - Energia do ensaio SPT calculada no ponto instrumentado.
- E_m - Energia cinética do sistema no instante anterior ao toque do martelo na cabeça de bater.
- F - Força nas partículas obtida através de medidores de deformação na haste instrumentada.
- g - Aceleração da gravidade, que vale $9,81 \text{ m/s}^2$. Em alguns cálculos, foi adotado o valor 10 m/s^2 .
- h_q - Altura de queda padrão do martelo.
- h_{q2} - Distância total percorrida pelo martelo durante o evento *golpe do martelo*.
- l_h - Comprimento do conjunto de hastes mais o amostrador.
- J_s - Coeficiente de amortecimento dinâmico de Smith.
- m_m - Massa do martelo padrão que vale 65 kg .
- N_{SPT} - Índice de resistência à penetração.
- P - Carga aplicada sobre uma estaca.

- PDI - *Pile Dynamic Corporation*
- P_L - Parcela de P que age sobre o fuste da estaca.
- P_P - Parcela de P que age sobre a ponta da estaca.
- P_m - Peso do martelo padrão que vale 650 N .
- R - Ruptura de uma prova de carga estática generalizada
- R_a - Resistência do sistema amostrador-solo dependente da aceleração no golpe do ensaio SPT, ou força inercial.
- R_d - Resistência do sistema amostrador-solo dependente da velocidade no golpe do ensaio SPT, ou força de amortecimento.
- R_s - Resistência do sistema amostrador-solo dependente do movimento relativo entre as partes no golpe do ensaio SPT, ou força elástica.
- R_t - Resistência total do sistema no golpe do ensaio SPT
- s - Nega de um ensaio dinâmico.
- SPT - Ensaio de Simple Reconhecimento de Solos (*Standard Penetration Test*).
- T - Energia cinética.
- T_A - Máxima energia cinética transmitida para o sistema amostrador-solo.
- U - Energia potencial normalizada do SPT que vale 487,5 J .
- U_2 - Energia total imposta no sistema durante o evento *golpe do martelo*.
- V - Energia potencial.
- V_s - Energia potencial em um ensaio estático.
- V_e - Energia potencial elástica.
- $V_{e,s}$ - Energia potencial elástica em um ensaio estático.
- V_{eh} - Energia potencial elástica armazenada no conjunto de hastes.
- V_{es} - Energia potencial elástica armazenada no solo que envolve o amostrador.
- W - Trabalho.
- 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.
- ρ - Recalque de uma prova de carga estática generalizada.
- ρ_e - Encurtamento devido a parcela elástica do sistema.
- $\rho_{e,s}$ - Encurtamento devido a parcela elástica do sistema em um ensaio estático.
- ρ_{max} - Máxima penetração do amostrador ($\rho_p + \rho_e$).
- $\rho_{max,s}$ - Máxima penetração de um ensaio estático sobre o amostrador ($\rho_{p,s} + \rho_{e,s}$).
- ρ_p - Penetração permanente do amostrador.
- $\rho_{p,s}$ - Penetração permanente de um ensaio estático sobre o amostrador.
- v - Velocidade das partículas obtida através de acelerômetros na haste instrumentada.
- η^* - Eficiência calculada através da energia cinética que chega no topo do amostrador (T_A).
- η_s - Eficiência calculada através do trabalho efetuado em de uma prova de carga estática sobre o amostrador padrão.

RESUMO

NEVES, L. F. S. (2004). *Metodologia para a determinação da eficiência do ensaio SPT através de prova de carga estática sobre o amostrador padrão*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

O *Ensaio de Simples Reconhecimento de Solos (SPT)* é a ferramenta de investigação de solos mais utilizada no mundo. Devido ao grande número de parâmetros que influenciam os seus resultados, a medida de sua eficiência passa a ser indispensável à transposição de experiências entre as práticas desenvolvidas em diferentes locais. Infelizmente, a medida da eficiência através da instrumentação do impacto do martelo é economicamente inviável para a maioria das empresas de sondagem no Brasil. Este trabalho apresenta uma metodologia para a determinação da eficiência do SPT baseada no Princípio de Hamilton e na realização de prova de carga estática sobre o amostrador, que pode ser uma alternativa para sanar esta situação.

Palavras-chave: Ensaio SPT; eficiência; prova de carga estática; energia; Princípio de Hamilton

ABSTRACT

NEVES, L. F. S. (2004). *Methodology to determinate the SPT efficiency through static load test over the sampler. Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.*

The Standard Penetration Test (SPT) is the most used soil investigation tool in the world. Due to the great number of variables that influences its results, the measurement of the efficiency becomes imperative to the transposition of experiences between developed practices in different places. Unfortunately, the measurement of the efficiency through the instrumentation of the hammer impact is economically inpracticable to most of the soil investigation firms in Brazil. This work presents a methodology to determinate the SPT efficiency based on the Hamilton's Principle and on the execution of static load test over the sampler, what seems to be a good alternative to end this situation.

Key-words: SPT Test; efficiency; static load test; energy; Hamilton's Principle

1. INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

O *Ensaio de Simples Reconhecimento de Solos (SPT)* é a ferramenta de investigação de solos mais utilizada no Brasil e no mundo. Devido à sua simplicidade e robustez, este ensaio tem-se mostrado suficientemente eficiente, tornando-se de uso corrente na obtenção dos parâmetros necessários no desenvolvimento de projeto de fundações (BELINCANTA, 1998). Vários métodos de estimativa de capacidade de carga de fundações profundas e rasas utilizam apenas parâmetros obtidos no ensaio SPT, tais como o *índice de resistência à penetração* (N_{SPT}) e a classificação do solo obtido através de seu amostrador padrão.

No Brasil, o ensaio SPT é normalizado pela NBR 6848 (2001) e nos Estados Unidos, pela ASTM D – 1586-84 (1992). A pesquisa para a implantação da norma europeia EC7 de fundações mostra a importância deste ensaio na Europa (COCK & LEGRAND, 1997).

Como ocorre em todos os ensaios de uso corrente, as empresas vão incorporando mudanças no procedimento de cada ensaio que, com o passar do tempo, constituem-se em variantes do respectivo método proposto pela norma então vigente (BELINCANTA, 1998). Além destas mudanças, vários outros fatores podem influenciar o resultado de uma sondagem, como por exemplo: Condições de uso dos equipamentos de sondagem; erro na contagem de golpes; atrito excessivo entre as peças do equipamento de sondagem; etc. Estes fatores influenciam diretamente a *eficiência* do ensaio SPT.

A *eficiência* de um ensaio SPT nada mais é que um parâmetro que retrata o quanto da energia potencial (U) imposta no sistema através do levantamento do martelo é efetivamente utilizada na cravação do amostrador padrão no solo. Como dito

anteriormente, devido ao grande número de parâmetros que influenciam o resultado de um ensaio, a medida de sua *eficiência* passa a ser indispensável à transposição de experiências entre as práticas desenvolvidas em diferentes locais (SEED *et al.*, 1985; SKEMPTON, 1986). Trabalhos publicados em diversos países mostram que esta eficiência não só varia de país para país, mas que ela é tão diversificada quanto a própria prática do ensaio SPT. É fácil compreender a importância da eficiência no ensaio SPT entendendo que a mesma camada de solo pode apresentar valores de N_{SPT} diferentes para diferentes eficiências. Isso porque o índice de resistência à penetração N_{SPT} depende da energia transmitida ao sistema amostrador-solo.

Existem muitos trabalhos publicados sobre o assunto, destacando-se os trabalhos de PALACIOS (1977), SCHMERTMANN (1976, 1978), SCHMERTMANN & PALACIOS (1979) que desenvolveram toda a metodologia da aplicação da equação da onda para o estudo da dinâmica do SPT, e KOVACS (1979), KOVACS *et al.* (1982). Mas devem-se destacar ainda os trabalhos de BELINCANTA (1985, 1998). pelo pioneirismo na medida de energia no ensaio SPT no Brasil (CAVALCANTE, 2002). Infelizmente, a medida da eficiência através da instrumentação do impacto do martelo é economicamente inviável para a maioria das empresas de sondagem do Brasil, tornando-se uma realidade apenas em pesquisas desenvolvidas por universidades.

A prática mais utilizada na obtenção da eficiência do ensaio SPT é a instrumentação do conjunto de hastes com acelerômetros e medidores de deformação. Assim como em uma prova de carga dinâmica, estes aparelhos fornecem leituras da velocidade do conjunto e leituras de força resultantes da passagem da onda de impacto do martelo. Com o conjunto destes valores obtidos em um curto espaço de tempo, é possível calcular a quantidade de energia cinética que foi transferida para a haste instrumentada. Quando a instrumentação é feita na haste imediatamente acima do amostrador no ensaio SPT, a energia calculada é aproximadamente a energia cinética que chega no sistema amostrador-solo (T_A).

Na comunidade científica, a eficiência do ensaio SPT apresenta-se pela seguinte equação:

$$\eta^* = \frac{T_A}{U} \cdot 100 \quad (1.1)$$

onde η^* é a eficiência medida no topo do amostrador, T_A é a máxima energia cinética transmitida para o sistema amostrador-solo e U é a energia potencial normalizada do SPT que vale 478,3 J.

Baseados no *Princípio de Hamilton*, AOKI & CINTRA (2000) propõe calcular a eficiência do SPT a partir do *trabalho* realizado na penetração do amostrador e não a partir da energia cinética que atinge o mesmo.

1.2 Objetivo da dissertação

A finalidade desta dissertação é estabelecer uma metodologia para a determinação da eficiência do ensaio SPT baseada no *Princípio de Hamilton* e na realização de prova de carga estática sobre o amostrador padrão, que pode ser uma alternativa para sanar a dificuldade de se obter a eficiência do ensaio pela metodologia atual, de custo elevado; com isso, tornar a prática da medida da eficiência uma realidade para todas as empresas que executam o Ensaio de Simples Reconhecimento de Solos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sondagem de Simples Reconhecimento com SPT

2.1.1 Breve história sobre o ensaio SPT

O amostrador do ensaio foi introduzido por volta de 1902 pelo engenheiro americano CHARLES R. GOW (FLETCHER, 1965 *apud* CAVALCANTE, 2002). Apesar da sua utilização ainda não ser normalizada, sua simplicidade e eficácia fez com que este ensaio se espalhasse por todo os Estados Unidos e Europa. A literatura mostra uma infinidade de metodologias e padronizações que foram sendo criadas por onde o SPT era utilizado, no intuito de se estabelecer uma metodologia única para o ensaio. Não é o objetivo do presente autor relatar as diversas metodologias de ensaio adotadas desde a criação do ensaio em 1902. Caso o leitor esteja interessado em um relato histórico mais completo sobre o ensaio SPT, o autor sugere os trabalhos de BELINCANTA (1998) e CAVALCANTE (2002).

Sendo uma grande contribuição para uma utilização mais sistemática e racional do ensaio SPT, TERZAGHI & PECK (1948) traz as primeiras correlações entre o índice de resistência à penetração (N_{SPT}) e propriedades importantes do solo, como consistência, compacidade e resistência. A partir deste estudo e de propostas de outros autores, criou-se a tabela de classificação dos solos da NBR 7250 (1982) Tabela 2.1) que posteriormente foi incorporada à norma NBR 6484 (2001).

Este ensaio foi introduzido no Brasil a partir de 1939, graças à criação da “Seção de Estruturas e Fundações” do IPT (VARGAS, 1989 *apud* CAVALCANTE, 2002).

Em 1963, é criada a norma ASTM D – 1586-63 que define com clareza o que é o índice de resistência à penetração (N_{SPT}) e determina que se faça o registro do número de golpes para a cravação de cada um dos três intervalos de 152 mm, sendo o índice o

número de golpes necessários para a cravação de segundo e terceiro intervalos de 152 mm (BELINCANTA, 1998).

Muita discussão é criada no meio científico quanto ao assentamento inicial de 152 mm antes de se obter o índice N_{SPT} . PALACIOS (1977) justifica este assentamento devido aos motivos apresentados a seguir.

- a) Perturbação do solo provocada pelo processo de perfuração
- b) Material solto na base do furo oriundo da perfuração que pode não representar o tipo de solo e nem a resistência natural à penetração.
- c) Alívio de tensões da primeira porção do maciço provocado pela retirada da coluna de material na escavação. Esta zona de alívio se estende por poucos centímetros, quando da utilização de processos adequados de perfuração.

Após o *ESOPT I* (Primeira conferência europeia sobre ensaios penetrométricos) em 1974, um grupo europeu decidiu iniciar uma normalização ampla de quatro importantes ensaios penetrométricos.

- CPT (Cone Penetration Test)
- DP (Dynamic Probe)
- SPT (Standard Penetration Test)
- WST (Weight Sounding Test)

Após o *ESOPT II* em 1982 e o *ISOPT I* (Primeira conferência internacional sobre ensaios penetrométricos) em 1988, foram apresentadas propostas de referência de cada um dos quatro ensaios citados anteriormente.

Finalmente, em um congresso internacional que ocorreu no Rio de Janeiro no ano de 1989, foi aprovada a “*Reference Test Procedure*” para os ensaios CPT, DP, SPT e WST.

2.1.2 O ensaio SPT no Brasil

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

Até meados dos anos 70, muitos amostradores e procedimentos foram utilizados para se tentar chegar à opção que melhor se adaptasse à realidade da prática brasileira. Em 1970 a Geotécnica e o IPT se uniformizam na utilização de um único amostrador do tipo Raymond de 51 *mm* de diâmetro externo. Em 1971 a Associação Paulista de Geologia de Engenharia lançou a publicação “Diretrizes para a execução de sondagens – 1ª tentativa”. Era o início da normalização do ensaio SPT no país.

Em 1974 a Associação Brasileira de Mecânica dos Solos lança a proposta de norma “Método de Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos”, amplamente discutida nos anos a seguir.

Em 1975, AOKI & VELLOSO (1975) apresenta um método aproximado para a estimativa de capacidade de carga de estacas, tomando como base correlações entre índices de resistência à penetração N_{SPT} e a resistência de ponta e atrito lateral local do ensaio CPT.

Finalmente, em 1977 a proposta da norma da ABMS foi enviada à Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, para discussão e aprovação, se tornando oficialmente, em 1979, a primeira normalização nacional do ensaio SPT. A MB 1211 (1979), com a denominação de “Execução de Sondagem de Simples Reconhecimento dos Solos”, foi posteriormente denominada NBR 6484 (1980). Em 2001, foi incorporada a esta norma a NBR 7250 (1982) intitulada “Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos”, criando-

se a NBR 6484 (2001), “Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio”, que é, atualmente, a norma vigente no país.

A norma NBR 6484 (2001) traz inovações como, por exemplo, especificações relativas à aparelhagem que não existiam nas edições anteriores, processos de avanço de perfuração, métodos para a observação do nível do lençol freático e observações sobre a apresentação formal dos resultados. Permite fazer classificações das camadas de solos em função dos valores de N_{SPT} e prevê a utilização de dois tipos de martelo: o cilíndrico vazado e o prismático dotado de pino-guia.

2.1.3 Metodologia do ensaio

O *Ensaio de Simples Reconhecimento de Solos (SPT)*, normalizado no Brasil pela NBR 6484 (2001), constitui-se na obtenção de um índice de resistência conjugada com a coleta de amostras do solo em uma sondagem de simples reconhecimento através da cravação de um amostrador padrão sob a ação da queda de um martelo de 65 kg a uma altura de 75 cm. O valor do índice de resistência à penetração (N_{SPT}) corresponde ao número de golpes para 30 cm de penetração do amostrador no solo, após uma cravação inicial de 15 cm.

A norma brasileira padroniza a utilização de tripé para a execução de ensaios SPT, com hastes de diâmetro nominal de 25 mm com massa teórica de 3,23 kg/m, cabeça de bater de 90 mm de altura, amostrador de diâmetro externo de 50,8 mm e interno de 34,9 mm, martelo maciço ou vazado.

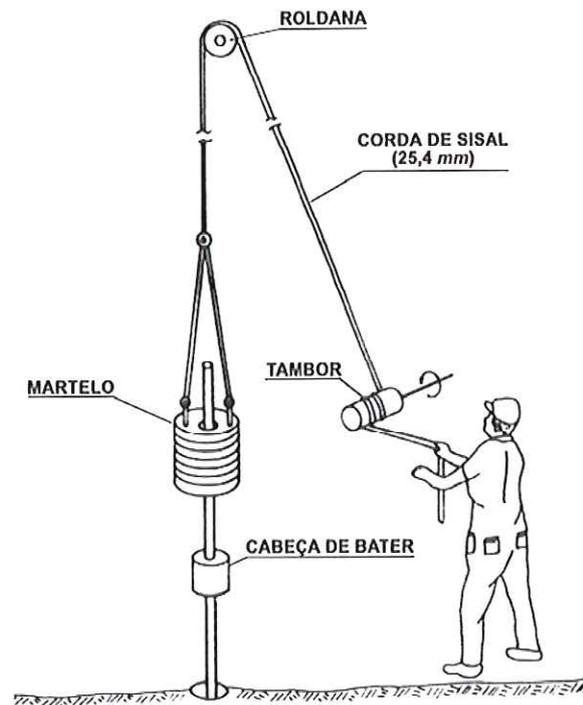


Figura 2.1 – Esquema do ensaio SPT (BELINCANTA, 1998)

A sondagem se inicia com emprego do trado concha até a profundidade de 1 *m* quando, então, é instalado o amostrador no fundo do furo. Para as operações subseqüentes de perfuração, intercaladas às operações de amostragem, a norma trata da possível utilização de tubos de revestimento e circulação de água. Para cada metro perfurado, o amostrador é cravado 45 *cm* no solo em 3 intervalos de 15 *cm*. Com os últimos dois intervalos se obtém o índice de resistência à penetração (N_{SPT}) para aquela profundidade.

Durante a operação de perfuração, devem ser anotadas as profundidades das transições de camadas detectadas por exame táctil-visual e da mudança de coloração dos materiais trazidos à boca do furo pelo trado helicoidal ou pela água de lavagem (NBR 6484, 2001). As camadas de solo devem ser classificadas quando ao tipo de solo (ex: areia pouco argilosa), consistência ou compactidade (ex: de pouco compacta a compacta, Tabela 2.1), cor (ex: marrom com manchas cinzas), origem (ex: solo residual) e presença de materiais diversos na amostra (ex: presença de pedregulhos).

Tabela 2.1 – Classificação dos solos (NBR 7250, 1982; NBR 6484, 2001)

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

A NBR 6484 (2001) trata também dos cuidados que devem ser tomados na amostragem do material obtido nas diferentes profundidades onde se obteve o índice de resistência à penetração.

O ensaio se encerra quando um dos critérios abaixo for alcançado (NBR 6484, 2001):

- a) Quando, em 3 *m* sucessivos, se obtiver 30 golpes para penetração dos 15 *cm* iniciais do amostrador padrão.
- b) Quando, em 4 *m* sucessivos, se obtiver 50 golpes para penetração dos 30 *cm* iniciais do amostrador padrão.
- c) Quando, em 5 *m* sucessivos, se obtiver 50 golpes para penetração dos 45 *cm* do amostrador padrão.

A norma brasileira estabelece quais são os dados que devem estar contidos no relatório de sondagem e no relatório final, assim como alguns cuidados na apresentação dos resultados.

No presente trabalho não foi utilizado o tripé como o aparelho de sondagem, e sim um martelo automático do tipo CME montado sobre um caminhão Ford F-4000 (Figura 2.2). Os motivos para esta escolha serão abordados mais adiante.



Figura 2.2 – Equipamento de sondagem montado sobre caminhão

2.2 Transferência da energia dinâmica no ensaio SPT

A energia imposta no início do evento *golpe do martelo* aparece em forma de energia potencial no momento do levantamento do peso de $637,7\text{ N}$ sobre uma altura de 75 cm da cabeça de bater. Portanto, a energia potencial inicial do sistema, ou *Energia Nominal do SPT* (U) vale:

$$U = P_m \cdot h_q = 637,7 \cdot 0,75 = 478,3\text{ J} \quad (2.1)$$

onde U é a energia nominal do SPT em J , P_m o peso do martelo padrão em N e h_q é a altura de queda padrão do martelo em m .

A *Energia Nominal do SPT* (U) não é toda a energia imposta no evento *golpe do martelo*. Isso porque existe um movimento descendente do sistema amostrador-hastes-cabeça-de-bater durante a cravação. Uma vez que ao final deste evento o martelo fica em repouso sobre a cabeça de bater, a distância que este percorre durante o evento passa a ser:

$$h_{q2} = h_q + \rho_p \quad (2.2)$$

onde h_{q2} é a distância total percorrida pelo martelo durante o evento e ρ_p a penetração permanente do amostrador no solo. Portanto, tem-se também:

$$U_2 = P_m \cdot h_{q2} \quad (2.3)$$

onde U_2 é a energia total imposta no sistema durante o evento *golpe do martelo*, desconsiderando perdas devido a interferências no ensaio SPT que serão expostas mais adiante.

Caso não houvesse nenhuma perda da *Energia Nominal do SPT (U)* durante a queda do martelo, toda ela se transformaria em energia cinética. A velocidade do martelo no momento do seu impacto com a cabeça de bater seria:

$$v_m = \sqrt{2gh_m} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,75} = 3,84 \text{ m/s} \quad (2.4)$$

Ex: $\frac{1}{2} m \cdot g \cdot h$

onde v_m é a velocidade do martelo no momento do primeiro impacto com a cabeça de bater em m/s e g é a aceleração da gravidade em m/s^2 . Devido às perdas de energia que ocorrem durante a queda do martelo, DÉCOURT (1989) definiu um fator de eficiência (e_1) que é a relação entre a energia cinética do sistema no instante anterior ao toque do martelo na cabeça de bater com a energia nominal do SPT.

$$e_1 = \frac{E_m}{U} \quad (2.5)$$

onde e_1 é o fator de eficiência definido por DÉCOURT (1989) e E_m energia cinética do sistema no instante anterior ao primeiro toque do martelo na cabeça de bater. E_m é facilmente calculado quando se conhece o valor de v_m :

$$E_m = \frac{m_m \cdot v_m^2}{2} \quad (2.6)$$

onde m_m é a massa do martelo.

Desde meados da década de 70 são feitas medições da velocidade do martelo SPT através de diversas metodologias. Dentre estes trabalhos, destacam-se KOVACS

(1979), KOVACS & SALOMONE (1982), MATSUMOTO *et al.* (1992), ABOUMATAR & GOBLE (1997), dentre outros.

No momento do impacto do martelo na cabeça de bater, uma onda de tensão se propaga no sentido descendente da composição das hastes, composta de impulsos de tensão sucessivos e decrescentes na intensidade, até aproximadamente o tempo de $2 \cdot l_h / c_h$, onde l_h é o comprimento do conjunto de hastes mais o amostrador e c_h é a velocidade de propagação destes impulsos através do conjunto de hastes (BELINCANTA, 1998). No momento do impacto, o conjunto hastes-amostrador-cabeça-de-bater desce, desprendendo-se do martelo. Este fenômeno implica em mais alguns golpes sucessivos do martelo, mas de menor intensidade. Após o intervalo de $2 \cdot l_h / c_h$, ocorre o início da chegada dos impulsos refletidos junto ao amostrador. Se durante este curto intervalo de tempo o martelo estiver em contato com a cabeça de bater, acontece o fenômeno denominado “ricochete”, que muitas vezes pode ser observado em campo, principalmente quando de golpes executados em camadas com N_{SPT} 's elevados. Como se pode observar na Figura 2.3, um golpe do ensaio SPT envolve vários fenômenos físicos que acontecem ao mesmo tempo.

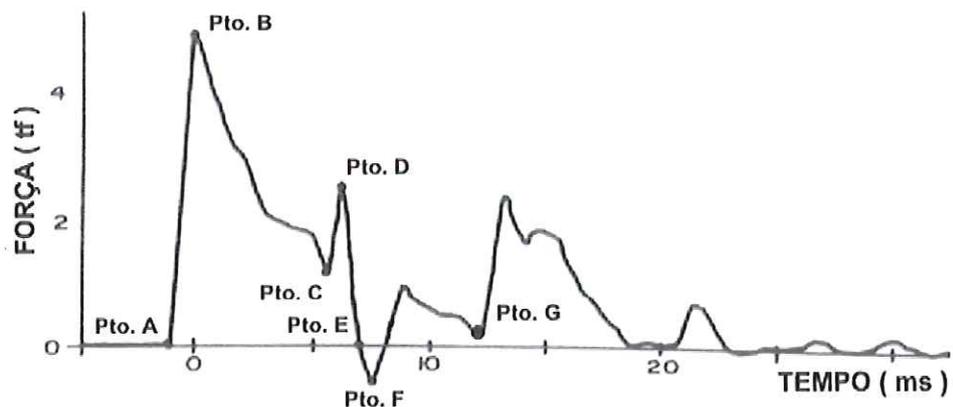


Figura 2.3 – Registro de força em função do tempo (modificado de BELINCANTA *et al.*, 1994)

A primeira onda de compressão atinge os sensores no ponto A alcançando o seu valor máximo no ponto B. A intensidade da força registrada pelos *medidores de deformação* diminui até chegar no ponto C onde começa a ser registrada a onda de reflexão oriunda do amostrador. A partir do tempo correspondente ao ponto C, ondas de compressão descendentes a ascendentes se cruzam, fazendo com que a força exercida

no ponto instrumentado volte a crescer. No ponto F pode-se observar que, durante o evento *golpe do martelo*, existe também tração no conjunto, mesmo que por um curto espaço de tempo. O ponto G , como defendido por CAVALCANTE (2002), representa um segundo golpe do martelo devido à descida do conjunto hastes-amostrador-cabeça-de-bater. Outros pequenos golpes acontecem até que o conjunto entre em repouso novamente.

A energia no ensaio SPT pode ser calculada através de 3 diferentes metodologias, representadas a seguir pelas equações:

$$E_t = \frac{c_h}{a_h \cdot E} \int_0^t F^2 dt \quad (2.7)$$

$$E_t = \frac{a_h \cdot E}{c_h} \int_0^t v^2 dt \quad (2.8)$$

$$E_t = \int_0^t Fv dt \quad (2.9)$$

onde E_t é a energia do ensaio SPT calculada no ponto instrumentado, t é o tempo considerado para cada metodologia, a_h e E são a área da seção transversal e o módulo de elasticidade da haste instrumentada respectivamente e F e v representam a força e velocidade das partículas em função do tempo registrados pelos *medidores de deformação* e *acelerômetros*, respectivamente.

A primeira metodologia, baseada na equação (2.7), necessita apenas dos valores de força registrados pelos medidores de deformação. Este é um dos motivos porque esta metodologia foi muito utilizada nas primeiras tentativas do cálculo de energia do SPT uma vez que a medida da aceleração era algo difícil de se alcançar. Esta metodologia só vale quando não há reflexões da onda de tensão.

A segunda metodologia, baseada na equação (2.8), conduz a resultados verdadeiros uma vez que os acelerômetros estejam bem instalados e calibrados. Mesmo com a tecnologia atual, a medida de aceleração ainda traz dúvidas quanto a acurácia dos acelerômetros existentes.

A terceira metodologia, baseada na equação (2.9), se apresenta como uma metodologia que traz resultados verdadeiros. Sua grande vantagem sobre as metodologias anteriores é que a integração pode ser feita no intervalo de tempo que se inicia no golpe do martelo até o repouso do sistema (Figura 2.4). Como defendido por CAVALCANTE (2002), esta energia é a que melhor representa a energia do ensaio SPT.

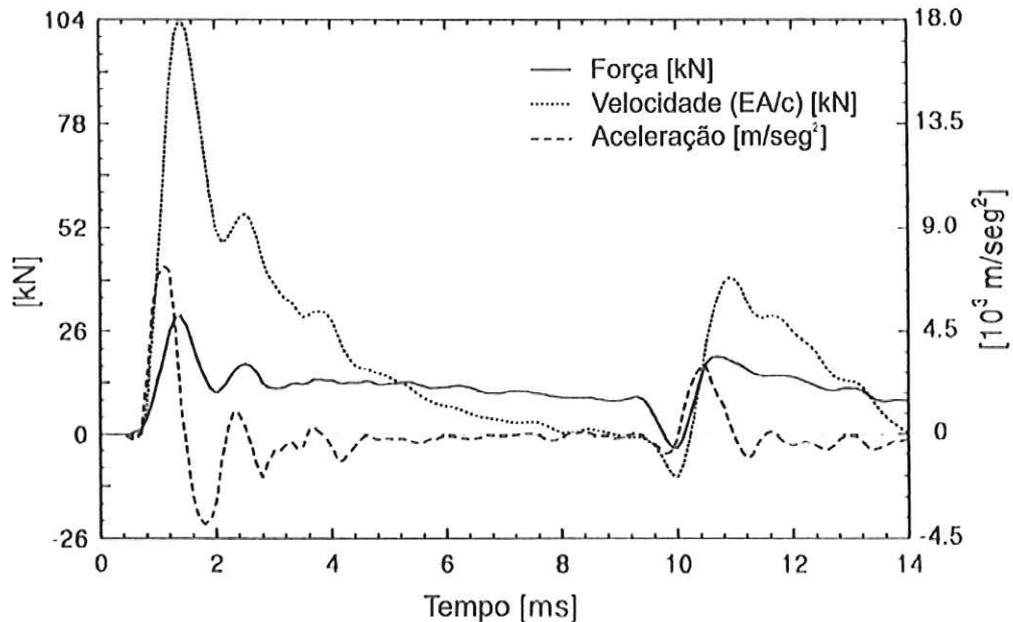


Figura 2.4 – Registro típico de força, velocidade e aceleração no amostrador (modificado de ABOUMATAR *et al.*, 1996)

Ensaio instrumentados foram efetuados para confrontar o cálculo da eficiência através do método apresentado nesta dissertação. Para o cálculo da máxima energia cinética transmitida para o sistema amostrador-solo (T_A), foi utilizada a terceira metodologia de cálculo da energia do SPT, ou seja, a equação (2.9).

2.2.1 Fatores intervenientes na energia dinâmica do ensaio SPT

Os fatores intervenientes no SPT são de mesma natureza daqueles que afetam qualquer outro tipo de ensaio de campo ou de laboratório, ou seja: humanos, de equipamento e de procedimento (BELINCANTA *et al.*, 1994). Podemos adicionar a

esta lista as condições do solo no qual o amostrador está penetrando (HVORSLEV, 1949, BELINCANTA *et al.*, 1994; BELINCANTA *et al.*, 1998).

Estes fatores influenciam diretamente a eficiência calculada do ensaio SPT. Mas qual seria a eficiência ideal? É costume achar que os ensaios com eficiência alta, ou seja, que se aproximam de 100%, são os melhores ensaios. Na verdade, tanto os ensaios pouco e muito eficientes podem trazer problemas no cálculo de uma fundação.

Ensaio pouco eficiente apresenta em seu relatório de sondagem valores de N_{SPT} acima dos reais. Isto porque a quantidade de energia que chega no amostrador é muito pequena, por isso, são necessários mais golpes para que o amostrador penetre os últimos 30 cm de solo. Portanto, eficiência baixa conduz a fundações menos seguras.

Ensaio muito eficiente leva a valores de N_{SPT} mais baixos pois a quantidade de energia que chega no amostrador é grande e são necessários poucos golpes para que este penetre 30 cm no solo. Portanto, eficiência alta conduz a fundações excessivamente seguras, ou seja, dispendiosas.

Então qual seria a eficiência ideal? A eficiência ideal é aquela que é igual à média da eficiência da prática local, no qual os métodos de cálculo de fundações foram baseados. De acordo com DÉCOURT (1989), a eficiência média brasileira está em torno de 72% e, de acordo com CAVALCANTE (2002), em torno de 82%, para martelos do tipo “Pinweight”. A tabela abaixo (Tabela 2.2) mostra a eficiência média adotada de alguns países.

Tabela 2.2 – Fatores de correção referentes à eficiência de energia incidente (DÉCOURT, 1989)

País	Martelo		Eficiência (%)
	Tipo	Forma de soltar	
Argentina	Donut	Cathead	45
Brasil	Pin Weight	Manual	72
China	Donut	Free-fall	60
Colômbia	Donut	Cathead	50
Japão	Donut	Cathead	50
Paraguai	Pin Weight	Manual	71
Inglaterra	Donut	Free-fall	60
	Donut	Cathead	50
EUA	Donut	Cathead	45
	Safety	Cathead	60
	Safety	Free-fall	85
Venezuela	Donut	Cathead	43

A seguir estão relacionadas as principais causas de alterações excessivas no valor da eficiência do ensaio SPT. Não é o objetivo do autor entrar em detalhes sobre cada um destes itens. Para isso, recomenda-se a leitura do trabalho de BELINCANTA (1998).

Altura de queda – A altura de queda no ensaio SPT não é exatamente 75 cm, principalmente quando utilizado martelo manual. A altura de queda influencia diretamente a quantidade de energia potencial inicial (U) que é inserida no sistema.

Circulação de água – A utilização da circulação de água acima do nível do lençol freático não é recomendado pela NBR 6484 (2001) pois pode destruir a estrutura natural do solo, alterando assim a sua resistência.

Tipo de martelo – Como mostrado na Tabela 2.2, o tipo do martelo e os procedimentos da sua utilização influenciam fortemente a eficiência do ensaio. Esta é uma das principais dificuldades encontradas na transposição de experiência entre diferentes países.

Tipo, idade e diâmetro da corda – Isto porque diferentes cordas provocam diferentes perdas por atrito na roldana superior do aparelho de sondagem. Os tipos mais comuns de corda utilizadas no SPT são as de *Nylon* e de sisal.

Amostrador com imperfeições – Amostradores tendem a se deformar com o tempo, devido à abrasão com pedregulhos, pedras e matacões. Para sanar este problema, este deve ser “reformado” ou até trocado.

Comprimento, tipo e estado de conservação das hastes – Hastes mal encaixadas tendem a sofrer grandes perdas de energia durante o ensaio. Quanto à perda de energia devida ao comprimento do conjunto de hastes, muitos trabalhos foram publicados, destacando-se os de SCHMERTMANN & PALACIOS (1979). Hoje se sabe que o comprimento do conjunto de hastes tem menos influência na eficiência do ensaio do que, por exemplo, o tipo e o estado de conservação das mesmas. Esta afirmação é válida para energias calculadas durante todo o *evento golpe do martelo*, e não apenas para a primeira onda de compressão.

Uso ou supressão do coxim de madeira – O coxim influencia diretamente as condições de contato entre o martelo e a cabeça de bater, evitando-se o choque de aço com aço, o que provocaria vibrações no sistema e, portanto, perda de energia.

Excentricidade do martelo em relação às hastes – A excentricidade provoca, principalmente, atrito entre a guia e o conjunto de hastes (para martelos com pino-guia) ou atrito entre o martelo e a guia (para martelos vazados).

Erro de contagem e medidas – Como na maioria dos ensaios a contagem do número de golpes e dos comprimentos penetrados são feitos pelo operador, a possibilidade de erros na contagem e nas medidas é grande.

Alívio de tensões do solo devido à perfuração – Quando otrado é retirado para a posterior descida do amostrador, pode haver um alívio de tensões no solo tanto horizontalmente quando sob a base do furo.

Condições do solo – Solos mais rijos ou compactos tendem a absorver mais energia potencial de deformação no conjunto de hastes do que solos mais moles ou fofos. Outras características do solo podem influenciar a transferência de energia para o sistema amostrador-solo, como por exemplo, capacidade de ter sua estrutura natural destruída pelo impacto do martelo, sucção, etc.

Através destes fatores é possível entender a importância de uma normalização séria do ensaio SPT para que essas diferenças possam ser minimizadas.

2.2.2 Resistência do sistema amostrador-solo

Seja um ponto de massa m do solo que está em volta do amostrador SPT sujeito a uma solicitação *dinâmica*, em um instante t qualquer. A equação de equilíbrio das forças atuantes pode ser dada pela seguinte equação (ABOU-MATAR *et al.*, 1996):

$$R_t(t) = R_s(t) + R_a(t) + R_d(t) \quad (2.10)$$

onde $R_t(t)$ é a resistência total oferecida, apresentada pelo sistema durante a cravação do amostrador, $R_s(t)$ é a resistência dependente do movimento relativo entre as partes, ou *força elástica*, $R_a(t)$ é a resistência dependente da aceleração, ou *força inercial* e $R_d(t)$ é a resistência dependente da velocidade, ou *força de amortecimento dinâmico*. Portanto, todas as parcelas da resistência total são função do deslocamento da partícula $u(t)$ ou de suas derivadas no tempo, $v(t) = \dot{u}(t)$ e $a(t) = \ddot{u}(t)$.

De acordo com a segunda lei de Newton, a *força resistente inercial* é o produto da massa e da aceleração, ou seja:

$$R_a(t) = m \cdot \ddot{u}(t) \quad (2.11)$$

Se for levado em conta que a massa de solo envolvida no sistema, isto é, dentro e ao redor do amostrador, é muito pequena perto das forças que atuam no sistema devido à onda de compressão do golpe, pode-se dizer que a parcela $R_a(t)$ da resistência total é desprezível, ou seja:

$$R_a(t) \approx 0 \quad (2.12)$$

O valor da força resistente de amortecimento dinâmico é obtido através da equação:

$$R_d(t) = J_s \cdot \dot{u}(t) \cdot R_s(t) \quad (2.13)$$

onde J_s é o *coeficiente de amortecimento dinâmico de Smith*. O valor de J_s pode variar de 0,16 a 0,66 *s/m* para areias siltosas não coesivas e coesivas respectivamente (ABOU-MATAR *et al.*, 1996). Isso quer dizer que a força de amortecimento depende da velocidade das partículas da haste instrumentada. Ensaios efetuados para o presente trabalho em areias e areias siltosas mostraram que as velocidades registradas através dos acelerômetros eram muito pequenas (1,0 a 2,0 *m/s* em média) para que os valores de $R_d(t)$ fossem significantes, ou seja:

$$R_d(t) \approx 0 \quad (2.14)$$

Substituindo a equação (2.12) e a equação (2.14) na equação (2.10) conclui-se que, para a resistência total oferecida, modificada pelo sistema durante a cravação do amostrador tem-se:

$$R_t \cong R_s \quad (2.15)$$

Considerando que o amostrador é muito mais rígido que o solo a sua volta, pode-se dizer que o solo atinge a sua ruptura bem antes do amostrador se plastificar. No caso de estacas cravadas (fazendo uma analogia com o amostrador SPT) onde o solo comanda o comportamento do sistema, a parcela dependente do deslocamento R_s é a parcela dominante (AOKI & CINTRA, 1997). A equação (2.15) confirma a suposição de AOKI & CINTRA (1997).

2.3 Prova de Carga Estática

2.3.1 Breve histórico

Qualquer pessoa, seja ela engenheiro ou leiga, associa imediatamente a palavra “ruptura” com “ruína”. Essa ruptura/ruína é sempre entendida como sendo um dano irreversível (DÉCOURT, 1989).

A grande maioria das fundações é projetada para suportar cargas estáticas. Define-se como *carga estática* a carga que é aplicada em estágios pequenos (infinitesimais), sendo cada estágio aplicado em um tempo muito grande (infinito) (AOKI & CINTRA, 2000²). Estas cargas podem provir tanto da superestrutura que está apoiada sobre a fundação como também do meio ambiente que atua sobre a superestrutura. Assim sendo, o comportamento de um elemento de fundação sob uma prova de carga estática reproduz com mais fidelidade o comportamento real da aplicação das cargas da superestrutura do que sob uma prova de carga dinâmica.

No Brasil, a norma que rege a padronização das provas de carga estáticas é a *NBR 12131: Estacas - Prova de carga estática*. Não é o objetivo do autor detalhar todo o procedimento de execução de uma prova de carga estática e, sim, apenas apresentar o ensaio ao leitor uma vez que sua compreensão facilitará o entendimento da metodologia proposta neste trabalho. Para maiores detalhes, recomenda-se a leitura da norma vigente.

A prova de carga estática é realizada geralmente após a execução de todo o estaqueamento, porém também pode ser realizada antes ou durante a execução do mesmo.

Devido ao seu custo elevado, a prática brasileira mostra que a execução deste ensaio é viável apenas em obras de grande porte, onde os seus resultados podem ser definitivos na estimativa de geometria das peças estruturais de fundação. Caso se deseje estimar os resultados de uma prova de carga estática hipotética, existem alguns métodos que apresentam resultados satisfatórios. Um desses métodos é o apresentado por ALONSO (1982), que estima a curva carga-recalque de estacas a partir dos resultados de sondagens de simples reconhecimento de solos (SPT), baseado no método de VAN DER VEEN (1953).

2.3.2 Metodologia de ensaio

A prova de carga estática consiste, basicamente, em aplicar esforços estáticos crescentes à estaca e registrar os deslocamentos correspondentes. Os esforços aplicados podem ser axiais de tração ou compressão, ou transversais (NBR 12131, 1991). O sistema de reação pode ser dos seguintes tipos:

Cargueira – Consiste em um caixão preenchido com algum material (areia, chapas de aço, blocos de concreto) que garanta o peso para a reação (Figura 2.5).

Tirantes – A reação é obtida por meio de tirantes executados próximos à estaca a ser ensaiada. Utiliza-se uma viga metálica para transferir a carga da estaca para os tirantes (Figura 2.6).

Estacas de reação – Este sistema é semelhante ao anterior, porém, em vez de tirantes, utilizam-se estacas armadas (Figura 2.7).

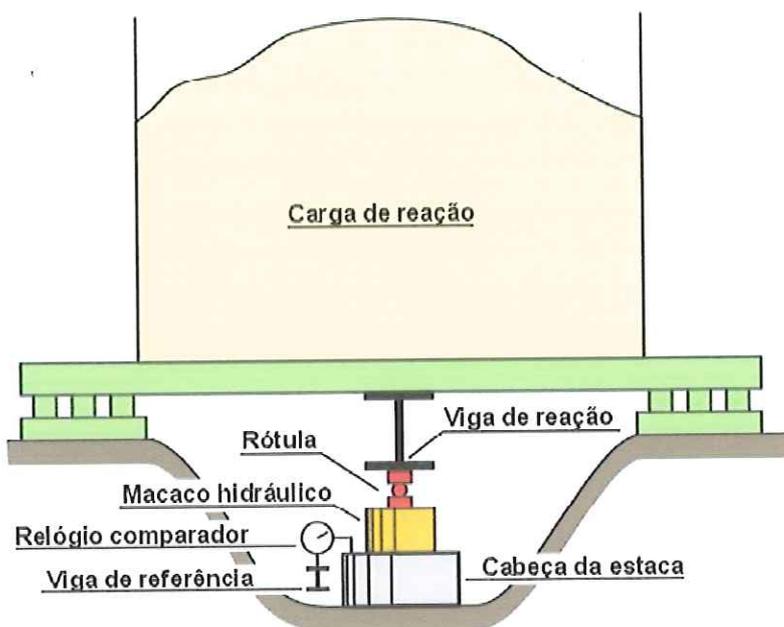


Figura 2.5 – Sistema de reação por cargueira

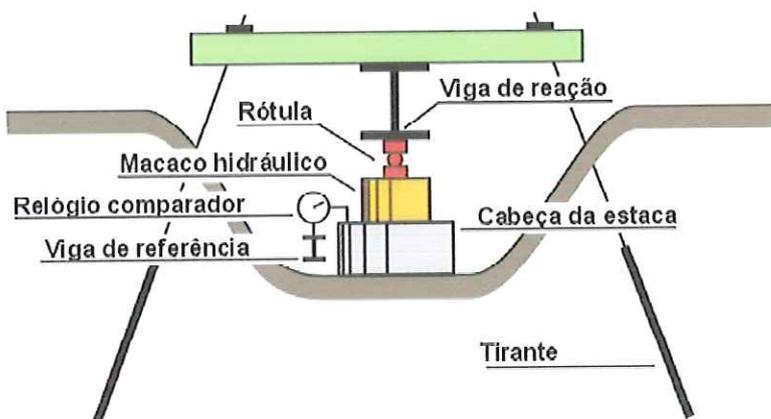


Figura 2.6 – Sistema de reação por tirantes

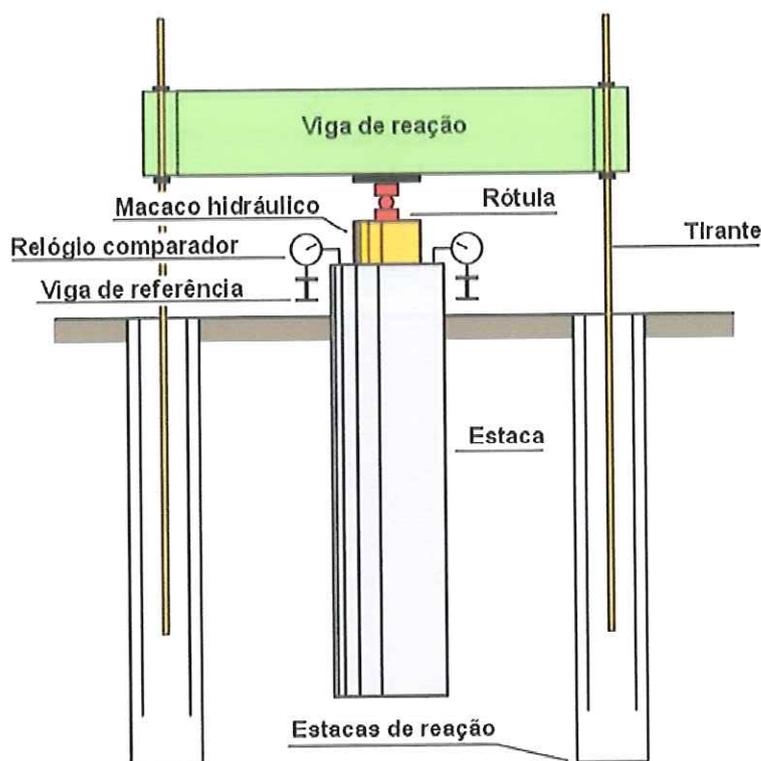


Figura 2.7 – Sistema de reação por estacas

Estes são os sistemas de reação mais utilizados nas provas de carga estáticas sobre estacas e tubulões. Outros sistemas de reação podem ser utilizados, como se verá mais adiante neste trabalho, desde que garantam que o movimento do cilindro do macaco hidráulico se converta no deslocamento da peça ensaiada (deslocamento descendente no caso de ensaios de compressão e deslocamento ascendente no caso de ensaios de tração).

Como já mencionado, para a aplicação da carga em estágios, utiliza-se um macaco hidráulico. Os tipos de macacos hidráulicos existentes variam na quantidade de carga que suportam e no curso máximo do cilindro.

Para se medir a carga que está sendo aplicada na peça ensaiada, utiliza-se um manômetro instalado na saída da bomba ou por uma célula de carga. Para cada prova de carga, deve-se estabelecer uma célula de carga e um macaco adequados à grandeza de cargas que se pretende atingir.

As leituras de recalque em cada estágio são realizadas empregando-se extensômetros convenientemente instalados. As medidas devem ser obtidas em relação

a uma referência independente do conjunto ensaiado¹ (vigas de referência, Figura 2.5 a Figura 2.7). A média aritmética de suas leituras representa o recalque da peça.

O ensaio pode ser dos tipos *lento* ou *rápido*². As principais diferenças entre estes métodos de ensaio constam da Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Principais diferenças entre as provas de carga estáticas do tipo lenta e rápida

	Ensaio Lento	Ensaio Rápido
Incrementos de carga	Máximo de 20% da carga admissível prevista	Máximo de 10% da carga admissível prevista
Tempo mínimo de cada estágio	30 min	5 min
Critério de final de estágio	Estabilização do sistema	Tempo
Duração aproximada do ensaio	1 dia	1 hora

Os resultados são apresentados através de uma curva carga x deslocamento. A *ruptura física* acontece quando um aumento finito de carga ΔP corresponde a um aumento infinito de deformação (DE BEER, 1988 *apud* DÉCOURT, 1989). Neste caso, o sistema apresentou uma ruptura nítida (Figura 2.8). A ruptura do sistema pode ser nítida (Figura 2.8) ou não. Na maioria dos casos, a prova de carga não caracteriza uma ruptura nítida (Figura 2.9) (AOKI & CINTRA, 2000²).

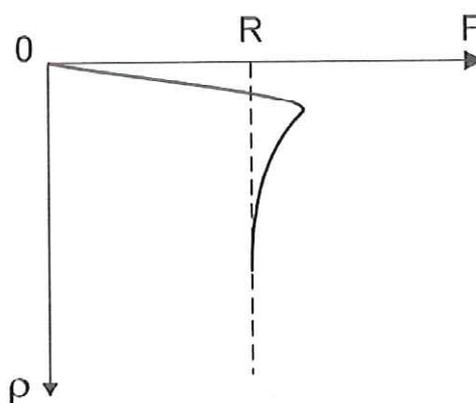


Figura 2.8 – Exemplo de curva carga-recalque com ruptura nítida

¹ No caso dos ensaios executados neste trabalho, devido a falta de espaço, utilizou-se placas de acrílico apoiadas sobre o solo.

² Para os ensaios executados neste trabalho, criou-se uma metodologia própria para as provas de carga estáticas sobre o amostrador SPT.

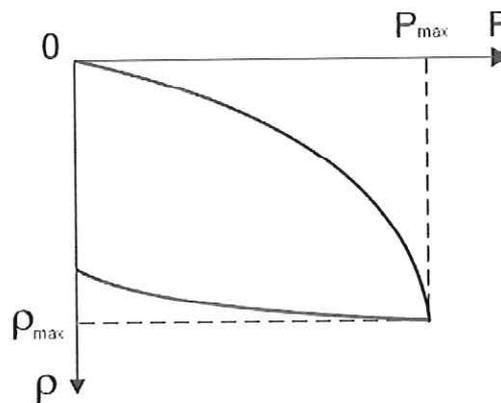


Figura 2.9 – Exemplo de curva carga-recalque sem ruptura nítida

Existem muitos critérios que estabelecem a carga de ruptura de estacas em curvas carga-recalque sem ruptura nítida. Um dos critérios mais utilizados no Brasil é o critério de VAN DER VEEN (1953), representado pela seguinte equação:

$$P = R (1 - e^{-a\rho}) \quad (2.16)$$

onde a é o coeficiente que define a forma da curva.

A vantagem deste critério é que além de definir a ruptura, ele permite extrapolar a curva carga-recalque através.

2.3.3 Resistência do sistema amostrador-solo

Ao se estudar o amostrador SPT submetido a esforços estáticos em equilíbrio com o maciço de solos que o cerca, é possível se fazer uma analogia com o equilíbrio estático de um sistema estaca-macço de solos. Diferentemente da interação entre o solo e uma estaca submetida a um esforço dinâmico, o equilíbrio de esforços de uma estaca submetida a um carregamento estático é extremamente simples (Figura 2.10)

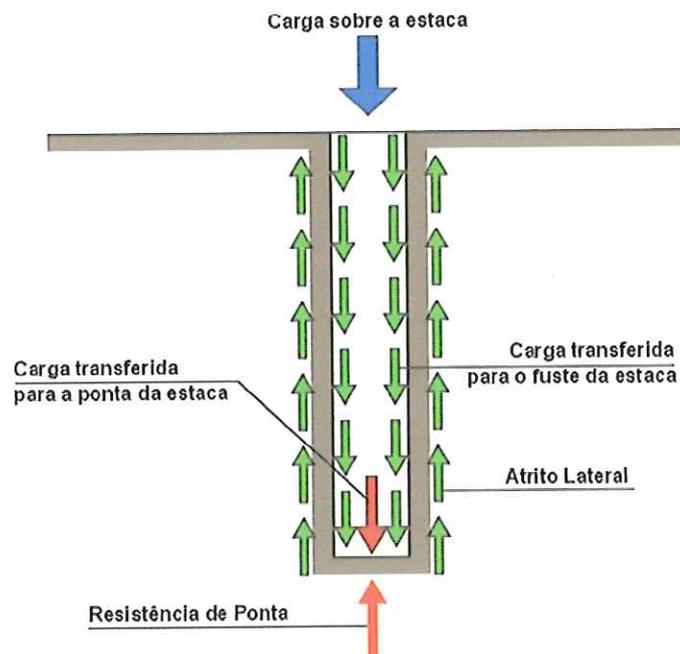


Figura 2.10 – Esquema de esforços de uma estaca submetida a carregamento estático

A carga aplicada sobre a estaca se divide em duas parcelas. A primeira age sobre a lateral da estaca (fuste) e a segunda é transferida para o solo através da ponta.

$$P = P_P + P_L \quad (2.17)$$

onde P é a carga aplicada sobre a estaca, P_L é a parcela de P transferida ao longo do fuste da estaca e P_P é a parcela de P transferida para a ponta da estaca.

Analogamente, no solo aparecem esforços de reação que contribuem no equilíbrio para que o sistema permaneça em repouso. No caso de uma fundação, esses esforços são a resistência que o maciço apresenta ao deslocamento do elemento estrutural de fundação. Ao longo do fuste da estaca o solo aplica um esforço de reação R_L na estaca e na ponta um esforço de reação R_P . Para que o sistema permaneça em repouso, a somatória destes esforços deve ser igual ao valor da carga P . Portanto:

$$R_P + R_L = P \quad (2.18)$$

$$R_P + R_L = P_P + P_L \quad (2.19)$$

A literatura mostra que a resistência de ponta R_p em uma estaca só é mobilizada depois que a parcela R_L geralmente atinge o seu valor máximo.

Voltando ao amostrador SPT, tem-se então a seguinte configuração:

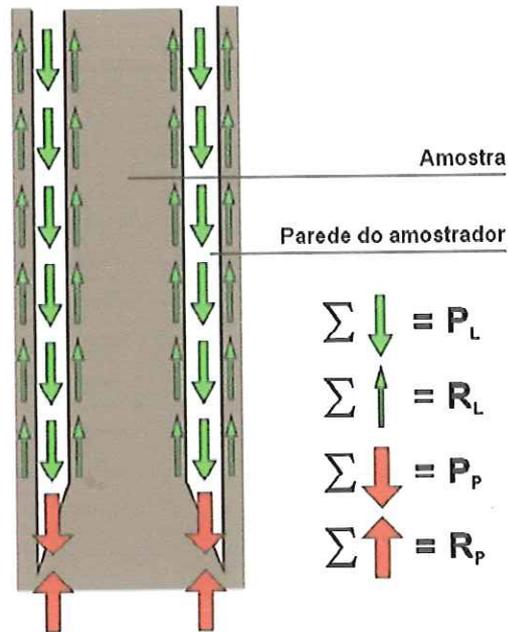


Figura 2.11 – Equilíbrio estático do sistema amostrador-solo

Sendo R_s a resistência dependente do movimento relativo entre as partes e sendo esta a única parcela da resistência total R_t apresentada pelo solo no caso da aplicação de esforços estáticos sobre o amostrador, retorna-se à conclusão apresentada pela equação (2.15) no caso de aplicação de carga dinâmica na cabeça de bater. Ou seja:

$$R_s = R_p + R_L \quad (2.20)$$

$$R_t \cong R_s \quad (2.21)$$

Isso quer dizer que, independentemente do tipo dos esforços aplicados sobre a cabeça de bater (esforços dinâmicos ou estáticos), a única parcela reagente do maciço que envolve o amostrador é a parcela de resistência R_s .

2.4 Princípio de Hamilton

2.4.1 Aplicação do Princípio de Hamilton ao golpe do martelo do SPT

A expressão variacional do Princípio de Hamilton é mostrada pela equação

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(T - V) dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta(W_{nc}) dt = 0 \quad (2.22)$$

onde T é a energia cinética total do sistema, V é a energia potencial do sistema, W_{nc} é o trabalho efetuado por forças não-conservativas e δ é variação em um intervalo qualquer de tempo ($t_2 - t_1$) (CLOUGH & PENZIEN, 1975). Esta expressão aplica-se a qualquer evento físico e mostra que a energia se conserva e se transforma de um tipo de energia para outro no intervalo de tempo considerado do evento.

A evolução da transformação de *Energia Nominal do SPT* (U) em energia potencial de deformação (V), energia cinética (V) e trabalho (W), ao longo do evento *golpe do martelo*, encontra-se ilustrada na Figura 2.12.

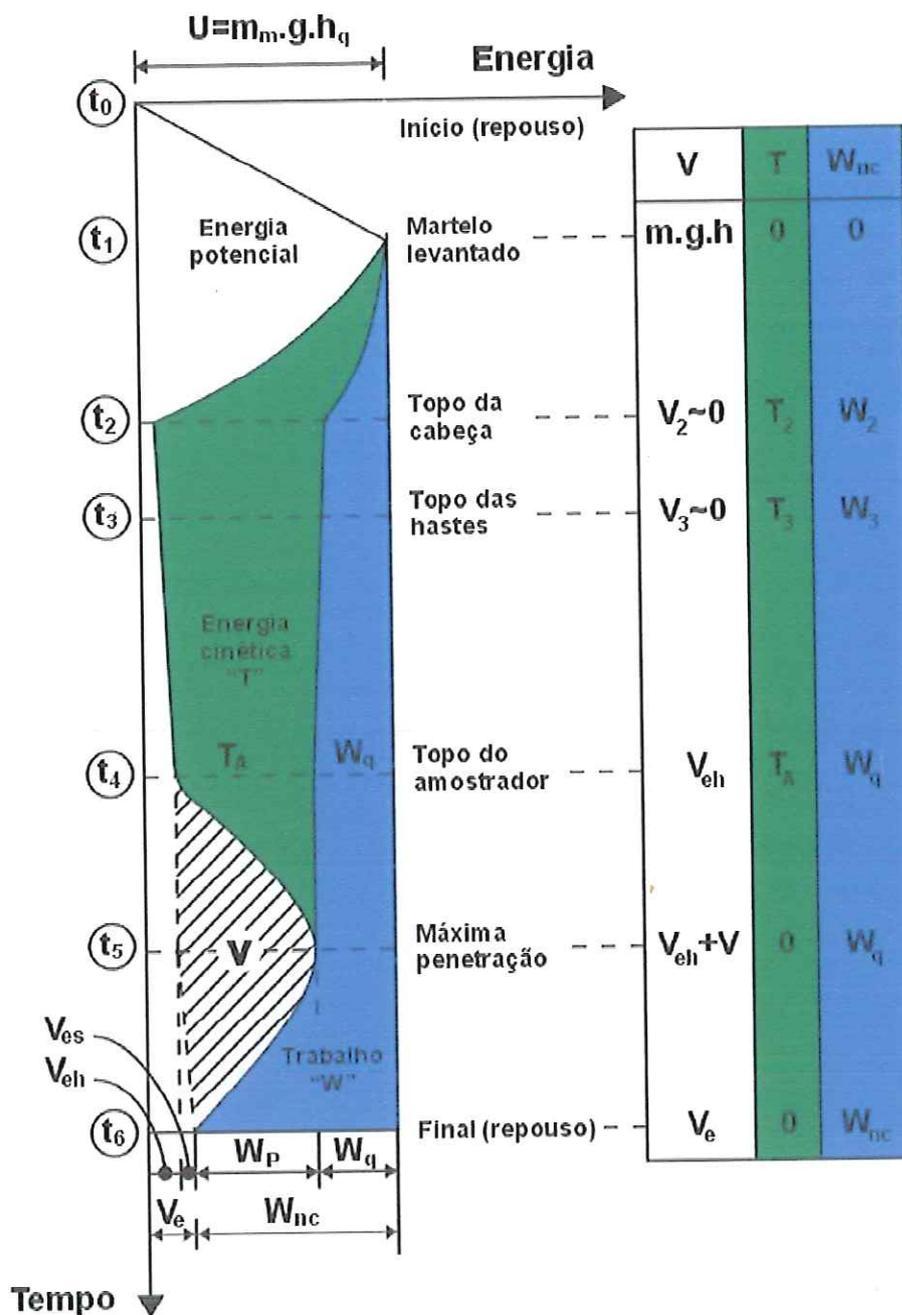


Figura 2.12 – Evolução de energia potencial, cinética e trabalho durante o evento *golpe do martelo* (Modificado de AOKI & CINTRA, 2000²).

O evento golpe do martelo no ensaio SPT se inicia no instante t_0 quando o martelo de massa $m_m = 65 \text{ kg}$ começa a ser levantado até a altura $h_q = 75 \text{ cm}$ do topo da cabeça de bater e termina quando o sistema entra novamente em repouso no instante t_6 .

No instante t_1 , a energia que será aplicada ao sistema apresenta-se sob a forma de energia potencial, ou Energia Nominal do SPT (U) que vale $478,3 \text{ J}$ (2.1).

O efeito de qualquer variação na altura de queda do martelo se faz sentir diretamente na penetração do golpe. Utilizado o sistema de manuseio do martelo com corda e tambor em rotação (sistema cathead) o resultado é uma altura de queda maior que a padronizada. No entanto, se o martelo for acionado manualmente, a altura de queda do martelo é maior que a padronizada no início da jornada e inferior ao final da mesma (BELINCANTA, 1998).

No instante t_2 , o martelo atinge o topo da cabeça de bater. Durante o intervalo de tempo $(t_2 - t_1)$, a energia potencial (U) se transforma em energia cinética (T_2), energia de deformação elástica (V_2) e trabalho (W_2). A energia de deformação elástica (V_2) que aparece no sistema no instante t_2 se deve às deformações reversíveis da corda utilizada no ensaio, para o caso da utilização do tripé. O trabalho gerado pela queda do martelo vem de muitos fatores, como explica BELINCANTA (1998), dentre eles:

- Atrito na guia mal centralizada;
- Atrito no sistema corda-rolana ou cabo de aço-rolana;
- Inércia do sistema, principalmente na utilização de tambor em rotação;
- Resistência aerodinâmica à queda do martelo;
- Utilização de coxins de madeira.

Durante o intervalo de tempo $(t_3 - t_2)$, a onda percorre a cabeça de bater. As variações de trabalho, energia cinética e potencial são muito pequenas.

No intervalo de tempo $(t_4 - t_3)$, a onda percorre o conjunto de hastes. Neste intervalo a energia cinética (T_3) é reduzida para T_A e o trabalho gerado no sistema aumenta para W_q , devido a deformações permanentes nos encaixes entre as hastes. A variação de energia de deformação deve-se à deformação elástica do conjunto de hastes. Normalmente, a diferença entre W_2 e W_q é muito pequena, por isso, W_q pode ser considerado numericamente igual a W_2 . Em t_4 , a energia cinética é a energia T_A da equação (2.22), utilizada para se medir a eficiência do sistema. A Figura 2.12 indica que quanto maior o conjunto de hastes, menor será o valor de T_A (CAVALCANTE, 2002).

Alguns fatores que influenciam a transformação de energia cinética (T_3) em trabalho (W_4) e em energia potencial (V_4) no intervalo de tempo $(t_4 - t_3)$ são mostrados a seguir.

- Comprimento do conjunto de hastes;
- Tipo de haste utilizada;
- Diâmetro do furo de sondagem;
- Utilização ou não de espaçadores;
- Luvas ou encaixe entre hastes.

A taxa de transformação da energia cinética em energia de deformação depende do tipo de haste utilizada. O diâmetro do furo de sondagem e a utilização de espaçadores irão influenciar no modo da flambagem que pode ocorrer no conjunto de hastes, uma vez que este fenômeno corresponde a uma elevada taxa de transformação da energia cinética em energia potencial. Já se as luvas entre as hastes não estiverem bem rosqueadas, aumentarão a taxa de transformação da energia cinética em trabalho no intervalo de tempo $(t_4 - t_3)$.

A energia cinética que chega no amostrador (T_A) no instante t_4 é comumente utilizada na literatura para a obtenção da eficiência do ensaio, através da seguinte equação:

$$\eta^* = \frac{T_A}{U} \quad (2.23)$$

onde η^* é a eficiência calculada no topo do amostrador, T_A é a máxima energia cinética transmitida para o sistema amostrador-solo e U é a energia potencial normalizada do SPT que vale 478,3 J.

Durante o intervalo de tempo $(t_5 - t_4)$ ocorre a penetração do amostrador no solo. A energia cinética (T_A) se transforma em energia potencial de deformação (V). Esta transformação de energia será estudada detalhadamente mais adiante. Percebe-se pela Figura 2.12 que o valor da energia cinética (T_A) no momento t_4 é igual ao valor da energia potencial de deformação (V) no momento t_5 , devido ao tamanho reduzido do amostrador em relação ao conjunto total das hastes e a sua maior rigidez.

No intervalo de tempo $(t_6 - t_5)$, uma pequena parte da energia potencial de deformação (V) se transforma em energia potencial elástica (V_{es}) devido à deformação

elástica do solo e do amostrador e a diferença se transforma em trabalho (W_p) realizado pelas forças resistentes não conservativas geradas durante a penetração do amostrador no solo.

No instante t_6 , 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 e o sistema entra em repouso, configurando assim, o final do evento, onde W_{nc} é o trabalho efetuado por forças não conservativas e W_p é a parcela do trabalho final gerado pelas forças resistentes não conservativas mobilizadas ao longo do amostrador durante a penetração.

$$V_e = V_{es} + V_{eh} \quad (2.24)$$

$$U = V_e + W_{nc} \quad (2.25)$$

$$T_A = V = V_{es} + W_p \quad (2.26)$$

O valor de T_A pode ser medido com a instrumentação da seção logo acima do topo do amostrador.

Na verdade, as transformações de energia do intervalo de tempo ($t_5 - t_4$) e a geração de trabalho do intervalo de tempo ($t_6 - t_5$) acontecem simultaneamente. Quanto mais plástico for o comportamento do solo, mais trabalho é gerado na cravação do amostrador. Quanto mais elástico for o comportamento do solo, maior é a transformação da energia potencial de deformação (V) em energia potencial elástica (V_{es}). A Figura 2.12 mostra estes eventos separadamente para a melhor compreensão do fenômeno.

Em resumo, no intervalo total do evento ($t_6 - t_1$), a energia potencial de posição foi transformada em trabalho efetuado por forças não conservativas e em energia elástica. Considerando que esta situação corresponde aos extremos do evento, AOKI & CINTRA (2000) propõem que a eficiência do ensaio SPT seja determinada por:

$$\eta_s = \frac{W_p}{U} \cdot 100 \quad (2.27)$$

onde η_s é a eficiência calculada através do trabalho gerado na cravação do amostrador SPT.

2.4.2 Transferência da energia em um ensaio dinâmico

A Figura 2.13 mostra o resultado típico de uma prova de carga dinâmica executada sobre uma estaca, onde R_t é o valor máximo da função $R_t(t)$.

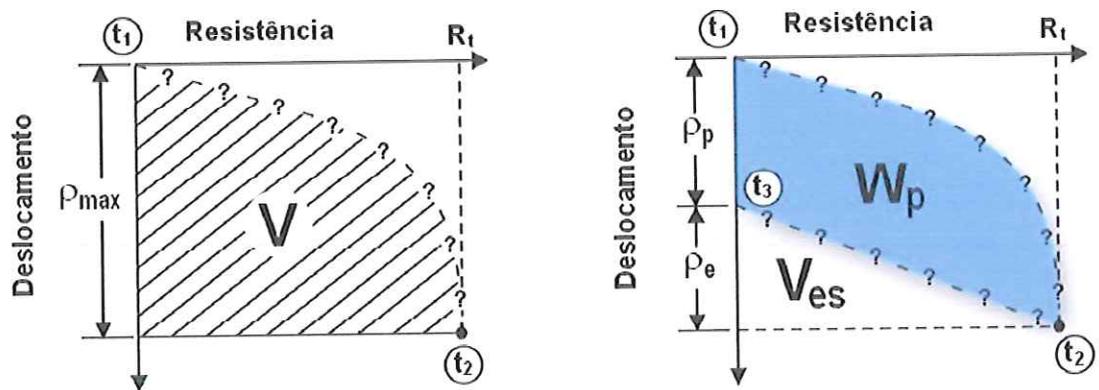


Figura 2.13 – Resultado típico de uma prova carga dinâmica em estaca (modificado de AOKI (2000))

No intervalo de tempo $(t_2 - t_1)$ da prova de carga dinâmica a energia cinética (T) se transforma em energia potencial de deformação (V). A menos que se faça uma prova de carga dinâmica de energia crescente (*DIET*), não é possível determinar o formato da curva carga-recalque, pois a prova de carga dinâmica de energia constante mostra apenas o ponto da curva que corresponde à resistência total R_t mobilizada para o deslocamento ρ_{max} . No intervalo de tempo $(t_3 - t_2)$ da Figura 2.13, parte da energia potencial de deformação (V) se transforma em energia potencial elástica (V_{es}) e a diferença se transforma em trabalho (W_p).

Analogamente, no caso do ensaio dinâmico realizada sobre o amostrador padrão SPT para areias e siltes arenosos, o valor de V_{es} é desprezível, como mostra a Figura 2.14.

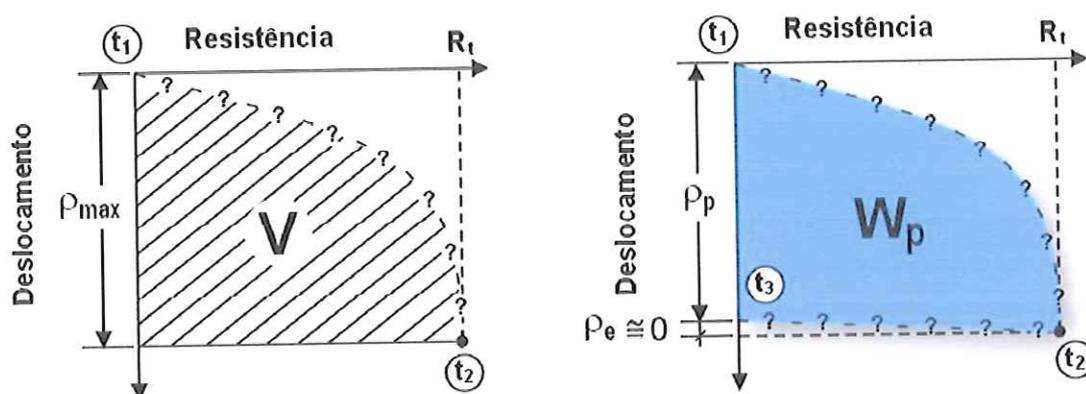


Figura 2.14 – Resultado típico de um ensaio dinâmico realizada sobre o amostrador SPT para areias e siltes arenosos (modificado de AOKI (2000))

Deste fato, resulta que para areias e siltes arenosos, objeto deste artigo,

$$\rho_{\max} \cong \rho_p = s \quad (2.28)$$

onde ρ_{\max} é a máxima penetração do amostrador no ensaio dinâmico, ρ_p é a penetração permanente do amostrador no ensaio dinâmico e s a nega do ensaio dinâmico e

$$W_p \cong V \quad (2.29)$$

onde W_p é o trabalho gerado pelas forças resistentes não conservativas mobilizadas ao longo do amostrador durante sua penetração no ensaio dinâmico e V é a energia potencial de deformação para o ensaio dinâmico.

2.4.3 Transferência da energia em um ensaio estático

Em uma prova de carga estática sobre estaca, os dados obtidos são plotados em uma curva deslocamento x resistência, como mostra na Figura 2.15.

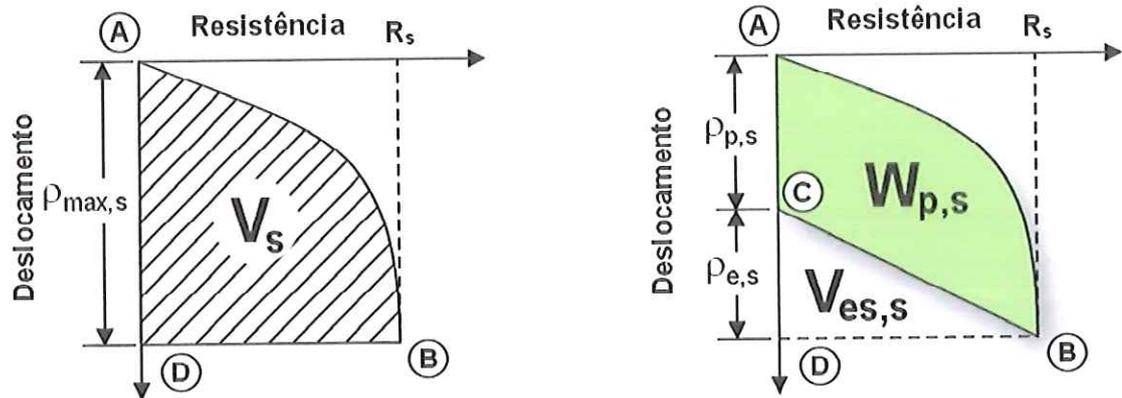


Figura 2.15 – Resultado típico de uma prova de carga estática sobre estaca (modificado de AOKI (2000))

Estágios crescentes de carga são aplicados sobre a estaca até se atingir a resistência estática mobilizada R_s (ponto B). A energia potencial de deformação (V_s) está representada pela área $ABDA$.

Aplicando o *Princípio de Hamilton* à prova de carga estática, ao se realizar a descarga do sistema, V_s se transforma em trabalho ($W_{p,s}$) representado pela área $ABCA$ e energia de deformação elástica ($V_{e,s}$) representada pela área $CBDC$. Analogamente, em uma prova de carga estática realizada sobre o amostrador SPT em areias e siltes arenosos, o valor de $V_{e,s}$ é desprezível, como mostra a Figura 2.16.

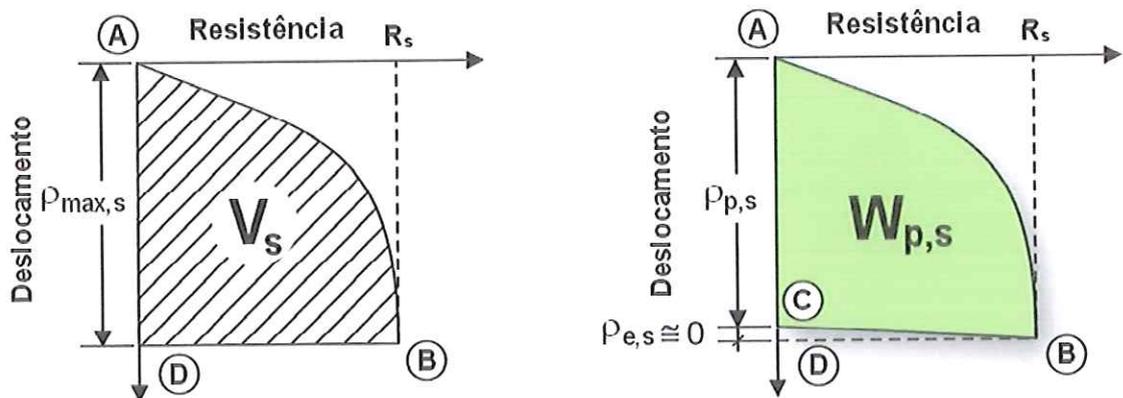


Figura 2.16 – Resultado típico de uma prova de carga estática realizada sobre o amostrador SPT para areias e siltes arenosos (modificado de AOKI (2000))

Deste fato, resulta que para areias e siltes arenosos, objeto deste trabalho,

$$\rho_{max,s} \cong \rho_{p,s} \quad (2.30)$$

onde $\rho_{max,s}$ é a máxima penetração do amostrador no ensaio estático e $\rho_{p,s}$ é a penetração permanente do amostrador no ensaio estático e

$$W_{p,s} \cong V_s \quad (2.31)$$

onde $W_{p,s}$ é o trabalho gerado pelas forças resistentes não conservativas mobilizadas ao longo do amostrador durante sua penetração no ensaio estático e V_s é a energia potencial de deformação para o ensaio estático.

3. PROPOSTA PARA MEDIR A EFICIÊNCIA DO ENSAIO SPT ATRAVÉS DE PROVA DE CARGA ESTÁTICA

3.1 Ruptura do sistema amostrador-solo

Considerando que o conjunto cabeça-de-bater-hastes-amostrador seja um modelo de estaca cravada, sem atrito lateral no trecho das hastes e em parte do amostrador, sujeita a um impacto do martelo padrão caindo da altura padrão, a penetração permanente do amostrador no solo representa a nega (s) para este golpe.

Uma vez que a penetração de 30 *cm* é permanente e foi causada pela aplicação de $[N_{SPT}]$ golpes, pode-se inferir que a penetração permanente média para um golpe será a nega

$$S = \frac{30}{[N_{SPT}]} \quad (3.1)$$

em *cm*. De acordo com TERZAGHI (1942), pode-se caracterizar a ruptura de uma estaca quando o deslocamento da base do elemento é $\geq 10\%$ da dimensão da ponta da estaca. Para a estaca miniatura com diâmetro do amostrador de 5,08 *cm*, a ruptura é caracterizada por um deslocamento

$$S \geq 0,508 \text{ cm} \quad (3.2)$$

A este valor, corresponde um índice N_{SPT} .

$$\frac{30}{[N_{SPT}]} \geq 0,508 \quad (3.3)$$

$$N_{SPT} \leq 59,1 \text{ golpes}/30 \text{ cm} \quad (3.4)$$

Isso mostra que a ruptura do sistema amostrador-solo só fica caracterizada quando $N_{SPT} \leq 59,1$ golpes/30 cm.

Como o nome mesmo diz, o “Índice” de Resistência a Penetração é um índice que dá uma idéia da resistência apresentada durante a penetração de 30 cm do amostrador no solo, após uma penetração inicial de 15 cm. Por se tratar de um índice e não de uma medida física da força resistente oferecida pelo solo durante esta penetração, os métodos de cálculo de fundações que utilizam este parâmetro não são métodos puramente teóricos.

3.2 Cálculo da eficiência do ensaio SPT através da execução de prova de carga estática sobre o amostrador padrão

Um valor de resistência oferecida pelo solo no ensaio SPT deveria ser o objetivo maior a ser atingido quando se mede o índice N_{SPT} . Para se obter esta resistência deve-se realizar uma prova de carga estática sobre o amostrador. Apesar da simplicidade desta constatação, apenas HVORSLEV (1949) executou prova de carga estática de deslocamento controlado sobre o amostrador SPT e ABOU-MATAR *et al* (1996) executou uma prova de carga estática sobre uma mini-estaca de ponta fechada colocada no local do amostrador após sua remoção.

A estática do ensaio SPT também foi discutida por SCHMERTMANN (1979), mas este autor não executou uma prova de carga estática sobre o amostrador preferindo comparar o N_{SPT} com medidas de resistência de ponta obtidas em ensaios de cone CPT.

Considerando o fato de se tratar de um evento onde o solo comanda a resistência, pode-se dizer que, para ensaios SPT realizados em areias e siltes arenosos, na ruptura do sistema amostrador-solo o valor da resistência para um ensaio estático é praticamente igual ao da resistência para um ensaio dinâmico, ou seja:

$$R_t \cong R_s \quad (3.5)$$

Esta proposição é válida para ensaio SPT no qual $N_{SPT} \leq 59,1$ golpes/30 cm, pois, sendo o amostrador um corpo praticamente rígido, a parcela elástica da energia potencial de deformação (V_{es}) é praticamente desprezível (Figura 2.12).

Nos ensaios realizados para este trabalho, verifica-se experimentalmente que os valores de trabalho dos ensaios dinâmicos (W_p) praticamente coincidem com os valores de trabalho das provas de carga estáticas ($W_{p,s}$) executadas sobre o amostrador logo após sua cravação dinâmica.

$$W_{p(dinâmico)} \cong W_{p,s(estático)} \quad (3.6)$$

A Figura 3.1 e a Figura 3.2 mostram que, mesmo que W_p e $W_{p,s}$ tenham valores parecidos, o formato da curva carga-recalque da prova de carga dinâmica ainda é desconhecido, de acordo com a Figura 2.14.

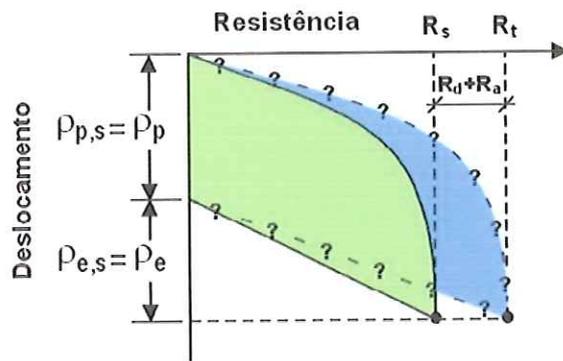


Figura 3.1 - Comparação entre provas de carga dinâmica e estática

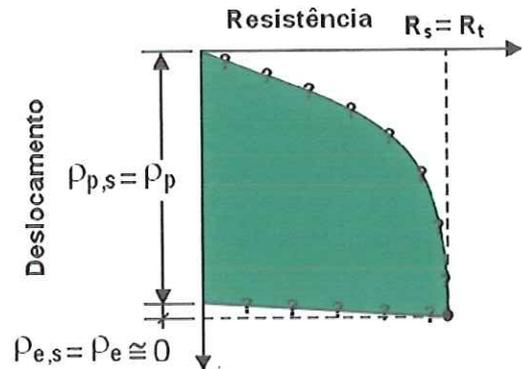


Figura 3.2 - Comparação entre provas de carga dinâmica e estática executadas sobre o amostrador SPT para areias e siltes arenosos

Como o valor V_{es} é muito pequeno, substituindo a equação (3.6) na equação (2.16) tem-se que, para areias e siltes arenosos, o módulo de T_A obtido em um golpe do ensaio SPT, que é um ensaio dinâmico, é praticamente igual ao módulo de $W_{p,s}$ obtido através da curva da prova de carga estática executada sobre o amostrador SPT.

$$W_p = T_A \cong W_{p,s} \quad (3.7)$$

Esta relação é válida para o mesmo deslocamento ρ_{\max} do amostrador, obtido no golpe dinâmico e no ensaio estático. Portanto, substituindo as equações (2.27) e (3.5), para o caso de areias e siltes arenosos, a eficiência do ensaio SPT também 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).

$$\eta_s = \frac{W_{p,s}}{U} \cdot 100 \text{ (\%)} \quad (3.8)$$

$$W_{p,s} = \frac{\eta_s \cdot U}{100} \text{ (\%)} \quad (3.9)$$

Onde $W_{p,s}$ é o trabalho inferido na prova de carga estática, η_s é a eficiência calculada através deste trabalho e U é a energia potencial normalizada do SPT que vale 478,3 J. Para se obter o valor de $W_{p,s}$, basta que, após a medida exata da penetração de um golpe do martelo do SPT, uma prova de carga estática seja executada sobre o sistema até se atingir a mesma penetração obtida no golpe dinâmico. $W_{p,s}$ correspondente à área sob a curva da prova de carga estática até um deslocamento igual à penetração do último golpe do martelo (Figura 3.3).

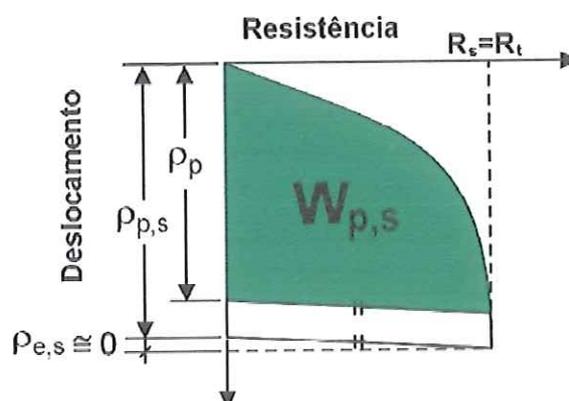


Figura 3.3 – Trabalho calculado através de uma prova de carga estática para a penetração obtida no último golpe dinâmico do martelo SPT

Considerando que

$$W_{trabalho} = R_{resistência} \times S_{deslocamento\ permanente} \quad (3.10)$$

$$R = \frac{W}{S} \quad (3.11)$$

Através da equação (3.1), na prova de carga sobre o amostrador SPT

$$R_s \cong \frac{W_{p,s} \cdot [N_{spt}]}{30} \quad (3.12)$$

Portanto, um valor aproximado da resistência mobilizada na ruptura R_s do sistema amostrador-solo pode ser obtido através da seguinte equação:

$$R_s \cong \frac{\eta_s \cdot U \cdot [N_{SPT}]}{30} \quad (3.13)$$

Onde R_s (N) é aproximadamente igual à resistência estática mobilizada no sistema amostrador-solo para uma carga S , η_s (%) é a eficiência do sistema e U (J) a energia potencial normalizada do SPT. Este valor estimado de R_s aproxima-se tanto mais do valor real da resistência mobilizada do sistema quanto mais nítida for a ruptura do sistema amostrador-solo, ou seja, quanto mais vertical for o trecho final da curva carga-recalque.

4. ENSAIOS

Acelerômetros e medidores de deformação foram instalados em uma haste AW que era colocada logo acima do amostrador padrão. O ensaio SPT foi executado até a profundidade desejada, sempre fazendo a leitura dos sinais dos sensores através de um aquisitor de dados. O aquisitor de dados utilizou estes sinais para calcular os valores da energia cinética T_A para cada golpe do martelo. Com este valor, através da equação (2.23), foi possível calcular a eficiência η^* do ensaio para o último golpe antes da realização da prova de carga estática sobre o amostrador padrão.

Mediu-se então qual foi a penetração do amostrador para este último golpe. Montados o macaco hidráulico, os relógios comparadores e a célula de carga, a prova de carga estática foi executada sobre o conjunto cabeça-de-bater-hastes-amostrador. Com a curva obtida na prova de carga estática, o trabalho $W_{p,s}$ foi obtido calculando-se a área sob a curva, para a mesma penetração do último golpe dinâmico do SPT. Com este valor, através da equação (3.8), foi possível se calcular a eficiência.

As eficiências obtidas através do *SPT Analyzer* e da prova de carga estática foram então comparadas.

Os ensaios deste trabalho foram divididos em 5 campanhas de sondagem, cada uma com seus respectivos ensaios realizados.

Tabela 4.1 – Campanhas dos ensaios e seus números

	Campanha	Data	Nº de furos de sondagem	Nº de golpes registrados	Nº de provas de carga estáticas realizadas
1	Porto Ferreira	05/12/2002	4	28	1
2	Araras 1	13/12/2002	6	165	1
3	Araras 2	07/02/2003	5	32	0
4	Araras 3	15/02/2003	1	20	3
5	Araras 4	22/02/2003	1	42	5
	TOTAL		17	287	10

Nas três primeiras campanhas, aproveitaram-se sondagens de obras que estavam sendo executadas para serem feitos os ensaios.

Os furos de sondagem da primeira campanha (Porto Ferreira) fazem parte da obra de uma cerâmica que estava sendo instalada na cidade de Porto Ferreira-SP, terreno predominantemente de areia fina pouco argilosa, de fofa a medianamente compacta, até uma profundidade de mais ou menos 10 *m*. Depois entrando em uma camada de areia siltosa de medianamente compacta a compacta até o final do furo de sondagem. O nível da água não foi encontrado.

Na campanha “Araras 2”, foram feitos 6 furos de sondagem para a instalação de um ginásio poliesportivo para um clube da cidade de Araras-SP. Terreno predominantemente de areia pouco argilosa, de fofa a pouco compacta, até 7 *m*. Depois, entrando em uma camada de areia siltosa, de pouco compacta a compacta de mais ou menos 6 *m* de espessura. A partir daí, uma camada de silte argiloso duro que se estende até o final do furo de sondagem. O nível do lençol freático se apresenta na interface das duas primeiras camadas.

A terceira campanha (Araras 2) faz parte da instalação de uma loja de departamentos no centro na cidade de Araras. Cinco furos de sondagem foram feitos para a obra mas não foi possível executar nenhum ensaio estático sobre o amostrador SPT pois, antes de se atingir a resistência desejada para ser executada a primeira prova de carga estática, as sondagens encontravam o nível do lençol freático. Para não comprometer a integridade da aparelhagem, nenhum ensaio foi executado abaixo do nível da água. Terreno predominantemente de areia fina pouco argilosa, de fofa a pouco compacta, até 8 *m* de profundidade. Depois, já abaixo do nível do lençol freático, uma camada de areia fina siltosa, de pouco compacta a compacta que se estende até a cota - 14,0 *m* da boca do furo. A partir daí, uma camada de silte pouco argiloso duro até o final do furo de sondagem.

Da quarta e da quinta campanhas (Araras 3 e Araras 4) fazem parte furos de sondagem feitos especialmente para este trabalho, não se estendendo até o nível do lençol freático. Ensaio executados em um bairro afastado do centro da cidade de Araras, de terreno predominantemente de areia siltosa, de fofa a pouco compacta, até a profundidade de 8 *m*. Depois se inicia uma camada de silte arenoso de pouco compacto a compacto que se estende até o final dos furos de sondagem.

Todos os furos de sondagem SPT foram executados pela mesma empresa de geotecnia, com sede na cidade de Araras, obedecendo à risca a norma brasileira vigente.

4.1 Ensaio dinâmico

Para a obtenção da energia cinética T_A que chegava no amostrador padrão, foram instalados acelerômetros e medidores de deformação na haste imediatamente acima do amostrador. A aquisição dos dados destes instrumentos foi feita através de um *SPT Analyzer* que mostra em seu visor de cristal líquido, em tempo real, o valor de T_A para cada golpe do martelo.

4.1.1 Material utilizado

- *Haste Instrumentada*: Haste *AW*, de 60 cm de comprimento, instrumentada pela *PDI (Pile Dynamic Corporation)* nos Estados Unidos com dois medidores de deformação e dois acelerômetros (Figura 4.1). O sistema de hastes *AW* foi escolhido, pois este é o sistema utilizado pelo equipamento automático de sondagem. É importante frisar que não importa o tipo de haste utilizada no ensaio, desde que este meça a energia cinética T_A com certa acurácia. Constantes foram aferidas (Tabela 4.2) pela *PDI (Pile Dynamic Corporation)* para que a haste pudesse ser utilizada pelo aquisitor de dados.

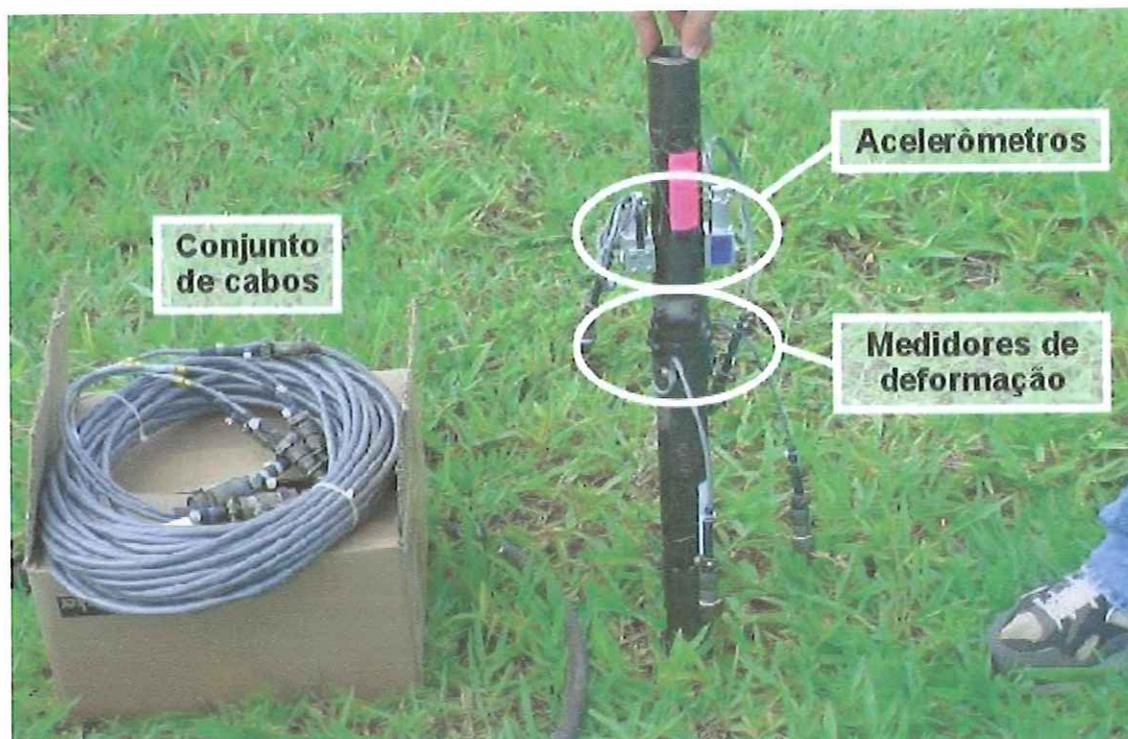


Figura 4.1 – Haste AW instrumentada

Tabela 4.2 – Constantes de calibração da haste instrumentada

Haste <i>AW</i> Instrumentada		
Índice	Sistema inglês	Sistema internacional
EA	35604,25 kips	158,44 MN
E	30000 ksi	207000 MPa
A	1,19 in ²	7,70 cm ²

- *Acelerômetros*: Dois acelerômetros piezelétricos colocados na haste em posições diretamente opostas (Figura 4.1 e Figura 4.2). Protegidos por uma cobertura de alumínio, suportam acelerações de até 5000g. Todos os acelerômetros foram calibrados pela *PDI* e receberam constantes de calibração (Tabela 4.3) que devem ser inseridas no aquisitor de dados antes do início dos ensaios.

Tabela 4.3 – Constantes de calibração dos acelerômetros

Acelerômetros	
Número de série	K (g/V)
52202	1048
52204	1053
52205	1054
52207	1048

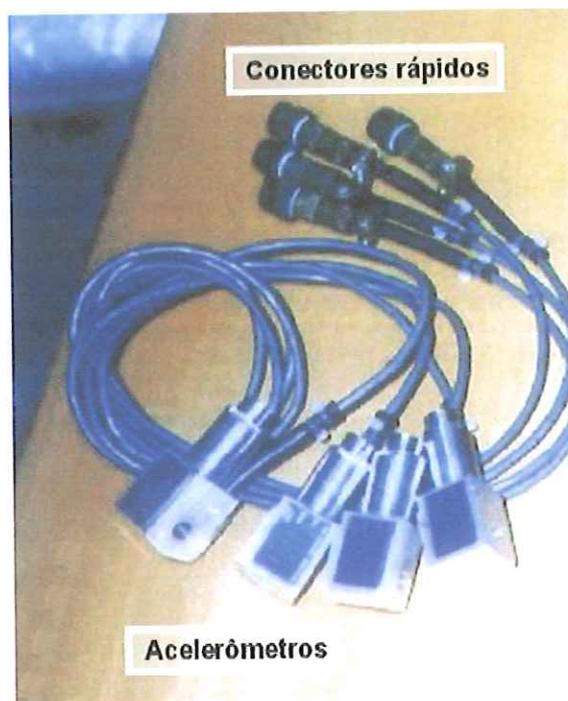


Figura 4.2 – Acelerômetros (modificado de CAVALCANTE, 2002)

- *Medidores de Deformação*: Dois medidores de deformação também colocados em lados opostos da haste (Figura 4.1). Assim como os acelerômetros, os medidores de deformação foram calibrados pela PDI e receberam constantes de calibração (Tabela 4.4)

Tabela 4.4 – Constantes de calibração dos medidores de deformação

Medidores de deformação	
Medidor	Fator de calibração
Nº 1	224,55 $\mu\epsilon/V$
Nº 2	221,18 $\mu\epsilon/V$

- *Aquisitor de Dados*: SPT Analyzer adquirido junto à PDI pela Fundação José Bonifácio (FUJB) ligada a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) (Figura 4.3). Este mesmo aparelho foi utilizado por CAVALCANTE (2002) para o estudo da energia em ensaios SPT com tripés. Seu visor de cristal líquido apresenta, em tempo real, os gráficos de velocidade x tempo, força x tempo e o valor da energia cinética T_A na seção instrumentada.

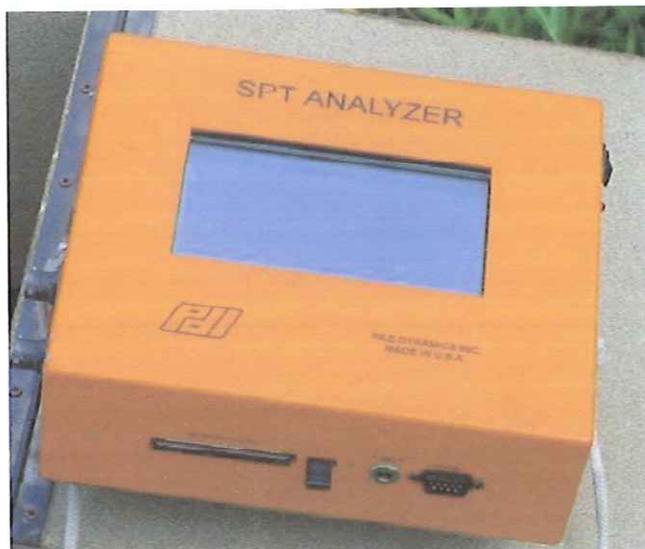


Figura 4.3 – Aquisitor de dados – SPT Analyzer

O aquisitor de dados é alimentado por uma bateria de 12V, que pode ser recarregada em tomada de 110-220V.

Memória: Cartão *PCMCIA* de 40 MB com capacidade de armazenar até 1024 registros. Com o software *PDA-W (Pile Driving Analyzer)* foi possível se retirar os dados registrados no cartão e passá-los para uma planilha de dados para serem tratados.

Equipamento de Sondagem: Caminhão de sondagem de simples reconhecimento (Figura 4.4). As dimensões das hastes e do amostrador com que o equipamento trabalha são do sistema *AW*, mesmo sistema da haste instrumentada. Um caminhão de sondagem foi utilizado no lugar do tripé para que seu peso próprio servisse de reação para a prova de carga estática. O sistema é equipado com um martelo automático que permite uma repetição de golpes rápida e altura de queda precisa, como mostrado na Figura 4.5. O equipamento de sondagem também é equipado com contador automático de golpes, o que evita erros grosseiros quanto à determinação dos valores de N_{SPT} .





Figura 4.4 – Equipamento de sondagem sobre caminhão

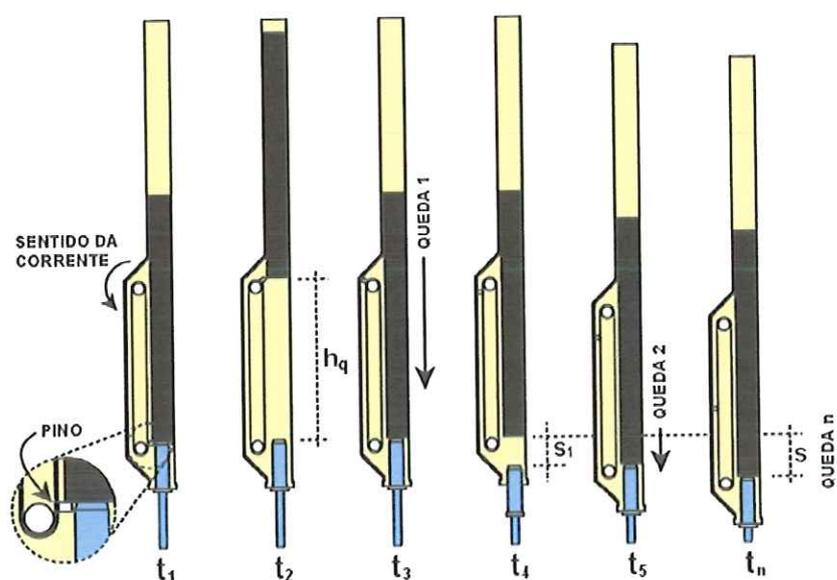


Figura 4.5 – Esquema de funcionamento do martelo automático

A Figura 4.6 mostra um esquema de montagem do aquisitor no ensaio SPT. Observe que a haste instrumentada se localiza logo acima do amostrador SPT. Assim, é possível medir a energia cinética (T_A) que chega no amostrador, que é a energia que provoca a penetração do amostrador padrão no solo.

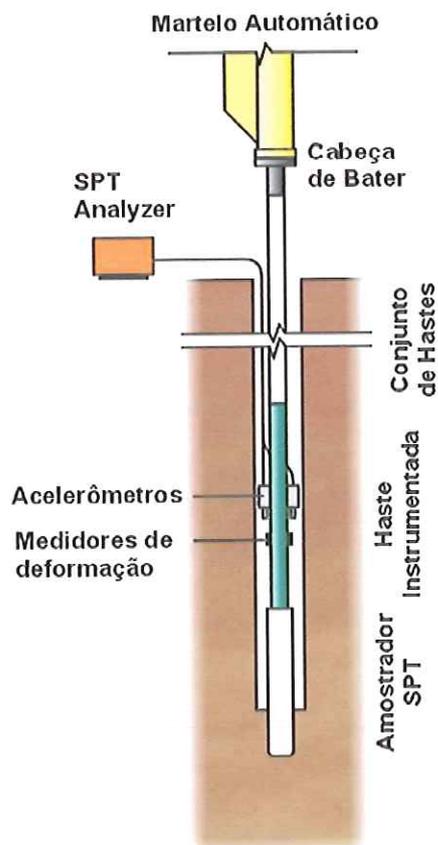


Figura 4.6 – Esquema de montagem da aquisição de dados do ensaio dinâmico SPT

Para que não houvesse nenhum dano na haste instrumentada, nos acelerômetros, nos medidores de deformação e nos conectores rápidos, estes eram protegidos por papel bolha enrolado em fita adesiva (Figura 4.7).



Figura 4.7 – Haste e sensores protegidos por papel bolha e fita adesiva

4.1.2 Metodologia de ensaio

Os ensaios SPT foram executados de acordo com a norma brasileira *NBR 6484: Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT* – que é a norma vigente que padroniza a execução deste ensaio no Brasil. Nenhuma aquisição eletrônica de dados foi feita abaixo do nível do lençol freático, evitando-se assim quaisquer danos aos aparelhos instalados na haste instrumentada.

A cada coleta de amostras o conjunto de hastes era cuidadosamente retirado para que os conectores rápidos e os acelerômetros não sofressem danos ao rasparem na parede do pré-furo.

Cuidados adicionais eram tomados como:

- Proteção do *SPT Analyzer* em caso de sol muito forte ou tempo úmido;
- Limpeza de todos os cabos e conectores rápidos após cada dia de ensaios;
- Acomodação apropriada dos acelerômetros em caixas forradas com papel bolha;
- Teste dos acelerômetros antes de cada ensaio (procedimento demonstrado por técnico representante da *PDI* no Rio de Janeiro);
- Verificação das constantes dos acelerômetros e dos medidores de deformação com seus respectivos números de série.

Cuidados referentes ao ensaio SPT também eram tomados pela empresa que executou os ensaios, tais como:

- Verticalidade (prumo) da torre do caminhão de sondagem a cada segmento de 1 *m* do ensaio;
- Integridade das roscas *AW* dos segmentos de haste (Figura 4.8 e Figura 4.9);
- Integridade do amostrador padrão (Figura 4.10);
- Caracterização táctil-visual das amostras tanto no campo como posteriormente em laboratório por técnicos especializados;

As Figuras 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14 mostram fotos da execução do ensaio.



Figura 4.8 – Conjunto de hastes *AW*



Figura 4.9 – Encaixe das hastes *AW* (Niple com rosca *AW*)



Figura 4.10 – Amostrador padrão com rosca *AW*



Figura 4.11 – Execução do pré-furo



Figura 4.12 – Colocação da haste instrumentada dentro do furo de sondagem



Figura 4.13 – Execução da sondagem SPT



Figura 4.14 – Amostragem

4.1.3 Resultados

Serão apresentados neste item os resultados dos furos de sondagem SPT de cada uma das campanhas, como também os sinais de velocidade e força dos golpes executados imediatamente antes de cada um dos ensaios estáticos.

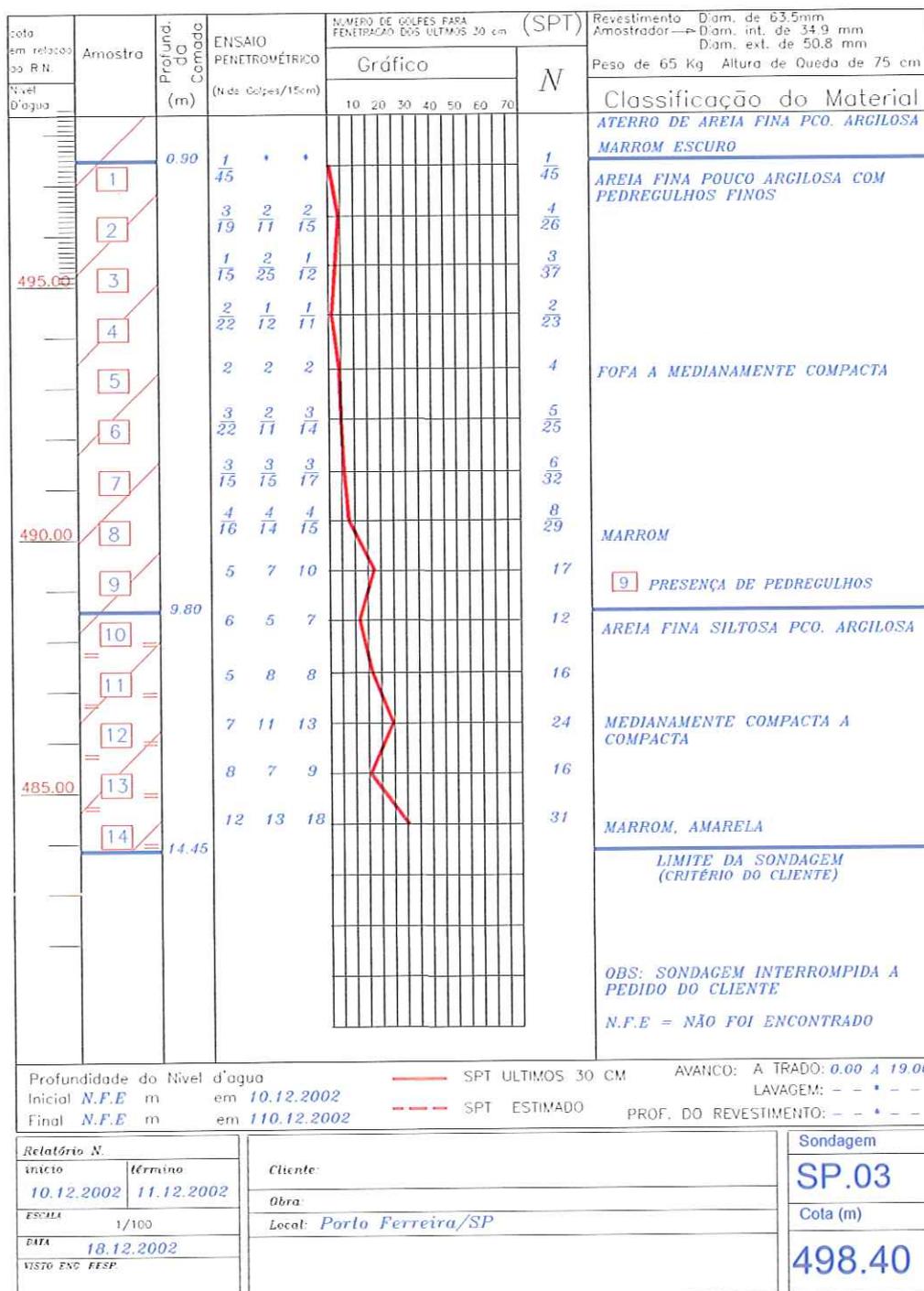
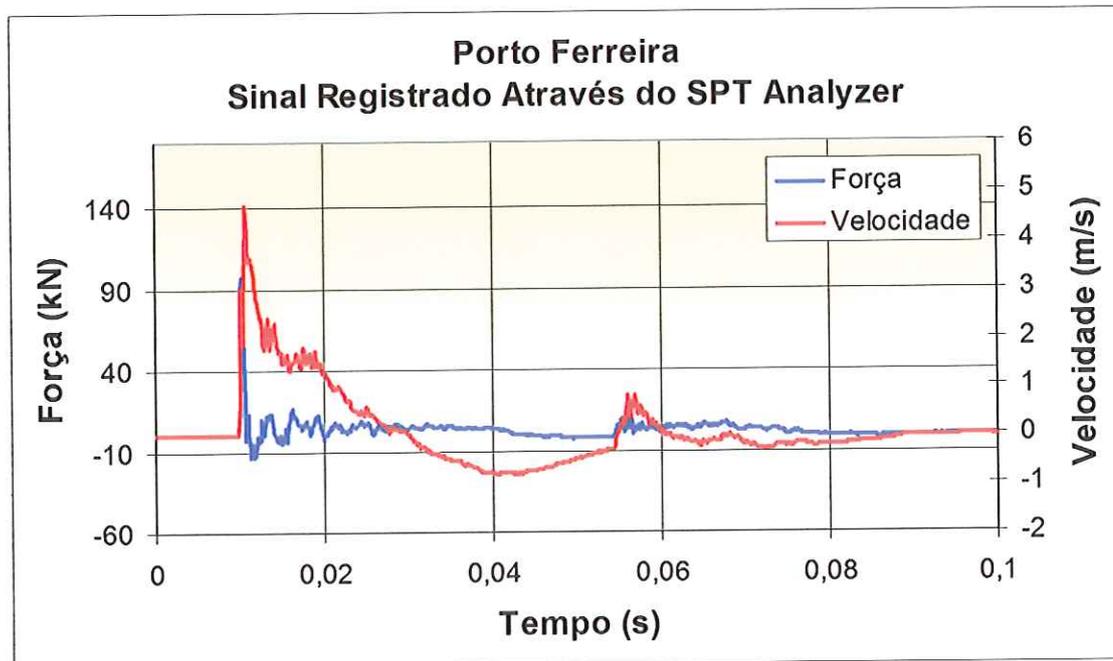


Figura 4.15 – Relatório de sondagem SPT para a campanha Porto Ferreira

Tabela 4.5 – Resultados do ensaio dinâmico *Porto Ferreira – I*

Campanha	Prof.	N_{SPT}	ρ_p	Energia Cin. T_A	Eficiência η^*
Porto Ferreira	5,0 m	4,0	75 mm	365,63 J	72 %

Figura 4.16 – Sinais de força e velocidade do golpe do ensaio dinâmico *Porto Ferreira – I*

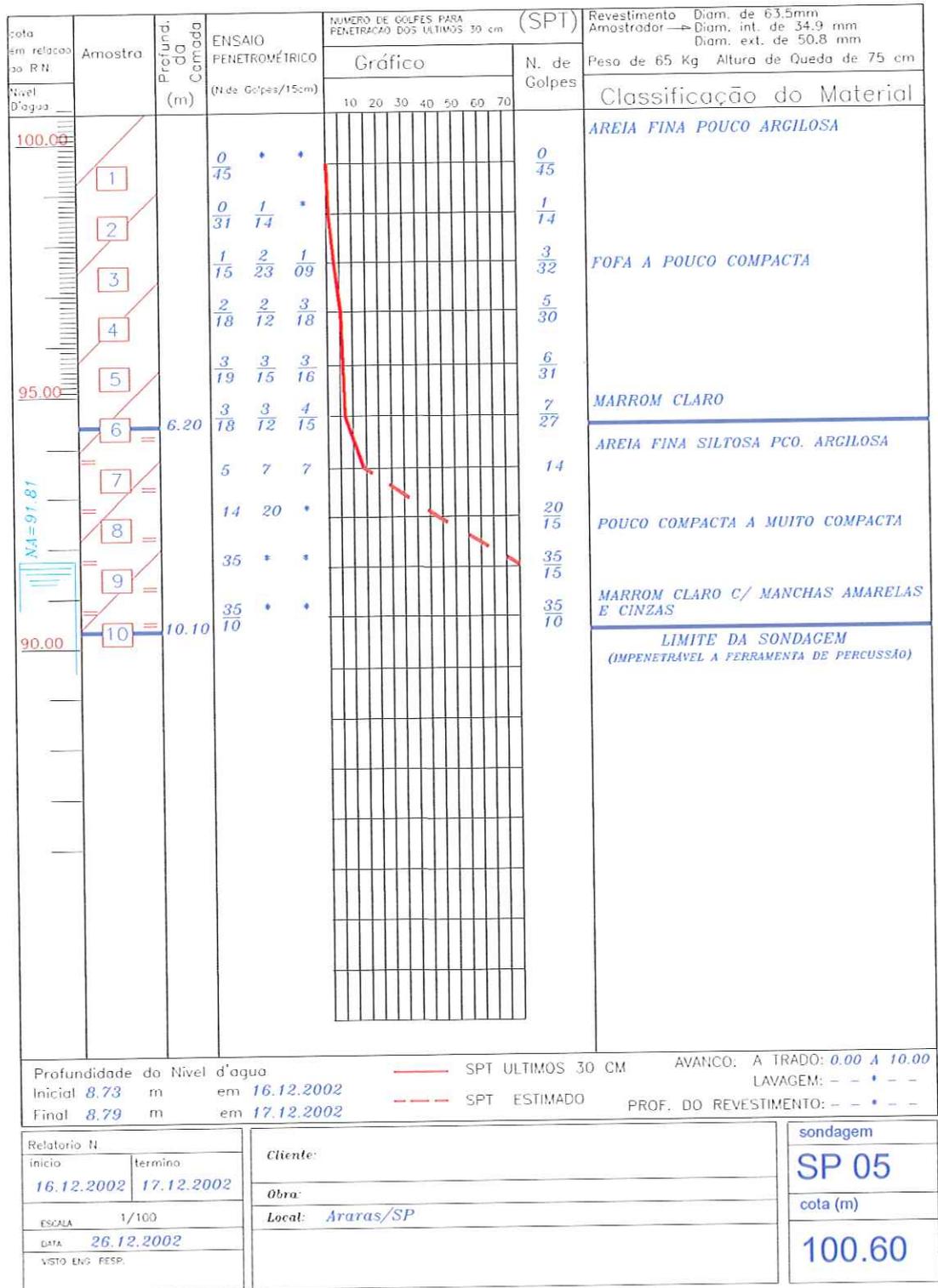


Figura 4.17 – Relatório de sondagem SPT para a campanha Araras – I

Tabela 4.6 – Resultados do ensaio dinâmico *Araras – I*

Campanha	Prof.	N_{SPT}	ρ_D	Energia Cin. T_A	Eficiência η^*
Araras 1	7,0 m	8,6	35 mm	263,25 J	54 %

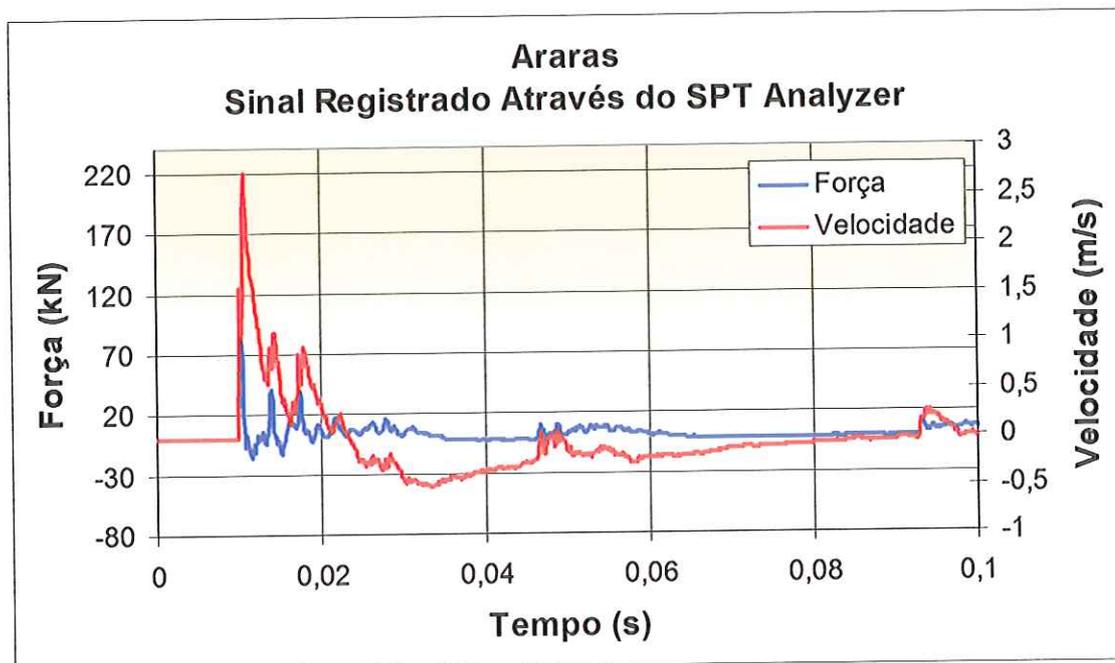
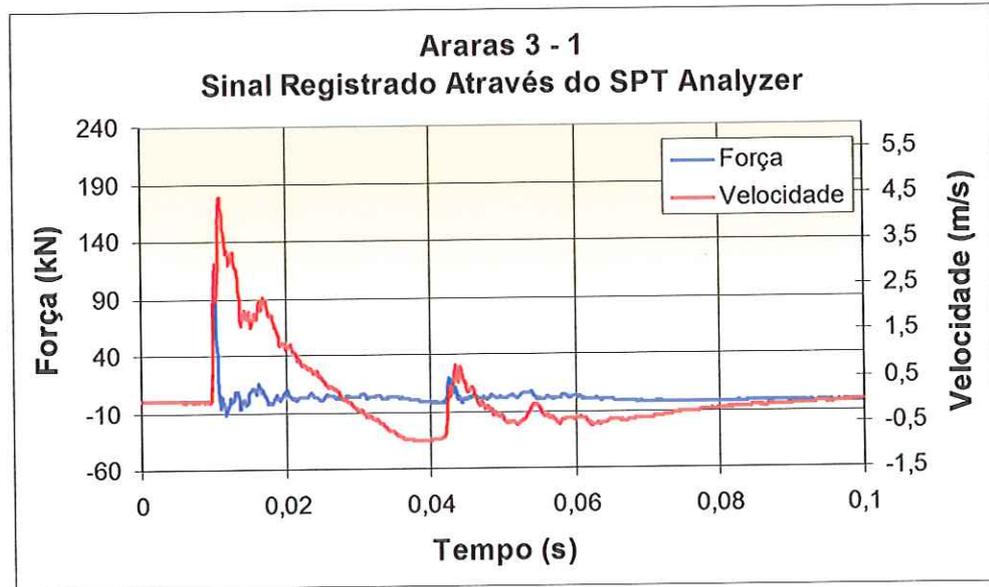
Figura 4.18 – Sinais de força e velocidade do golpe do ensaio dinâmico *Araras – I*

Tabela 4.7 – Resultados do ensaio dinâmico *Araras 3 - 1*

Campanha	Prof.	N_{SPT}	ρ_p	Energia Cin. T_A	Eficiência η^*
Araras 3	3,7 m	5,0	60 mm	214,50 J	44 %

Figura 4.20 – Sinais de força e velocidade do golpe do ensaio dinâmico *Araras 3 - 1*Tabela 4.8 – Resultados do ensaio dinâmico *Araras 3 - 2*

Campanha	Prof.	N_{SPT}	ρ_p	Energia Cin. T_A	Eficiência η^*
Araras 3	7,7 m	7,9	38 mm	312,01 J	64 %

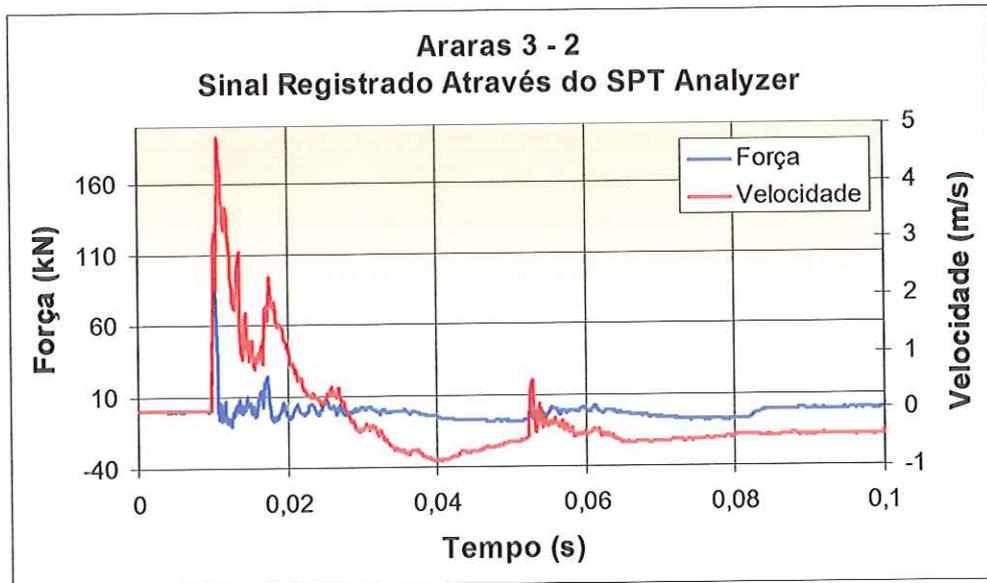
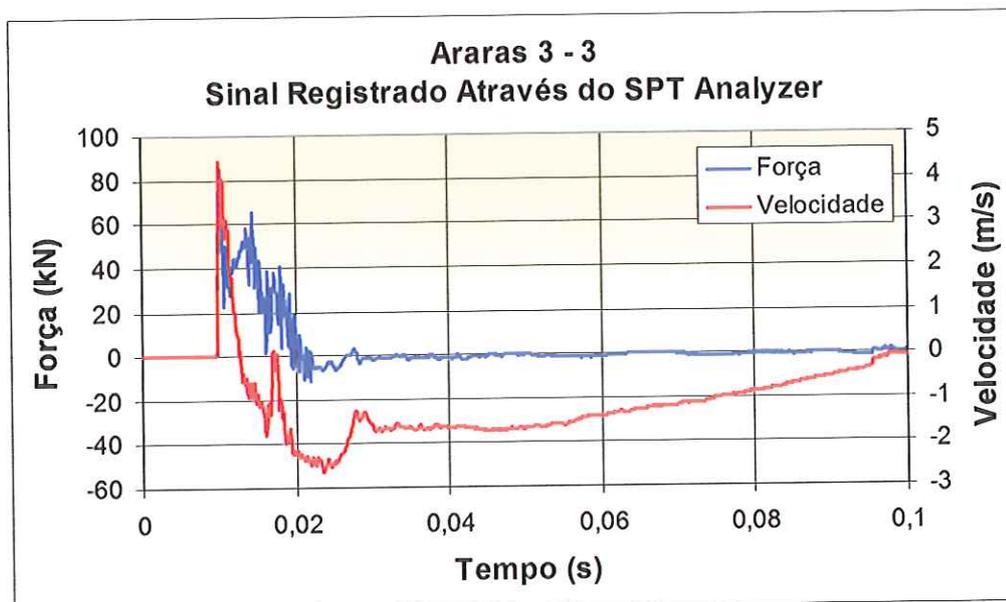
Figura 4.21 – Sinais de força e velocidade do golpe do ensaio dinâmico *Araras 3 - 2*

Tabela 4.9 – Resultados do ensaio dinâmico *Araras 3 - 3*

Campanha	Prof.	N_{SPT}	ρ_p	Energia Cin. T_A	Eficiência η^*
Araras 3	8,7 m	50,0	6 mm	204,75 J	42 %

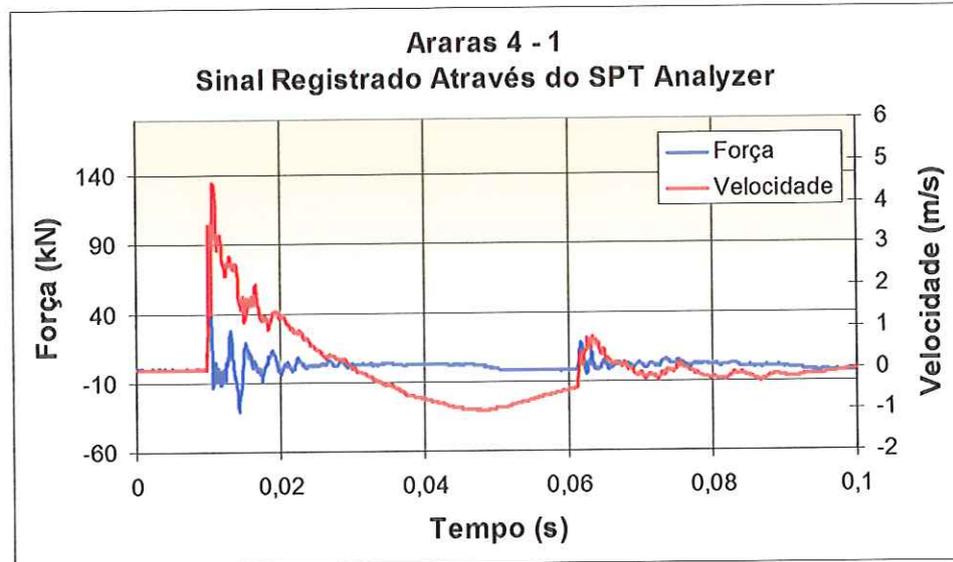
Figura 4.22 – Sinais de força e velocidade do golpe do ensaio dinâmico *Araras 3 - 3*

cota em relação ao R.N. Nível D'água	Amostra	Profund. Corada (m)	ENSAIO PENETROMÉTRICO (N. de Golpes/15cm)		NÚMERO DE GOLPES PARA FENETRAÇÃO DOS ÚLTIMOS 30 cm (SPT)		N. de Golpes	Revestimento Amostrador — Diam. de 63,5mm Diam. int. de 34,9 mm Diam. ext. de 50,8 mm Peso de 65 Kg Altura de Queda de 75 cm	Classificação do Material
			Gráfico	Gráfico	Gráfico	Gráfico			
			$\frac{2}{21}$	$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{19}$				AREIA FINA SILTOSA
	1		$\frac{2}{21}$	$\frac{2}{36}$				$\frac{2}{39}$	
	2		2	$\frac{2}{33}$				$\frac{2}{33}$	
	3		$\frac{2}{21}$	$\frac{2}{20}$	$\frac{2}{18}$			$\frac{4}{38}$	FOFA A POUCO COMPACTA
95.00	4		$\frac{2}{21}$	$\frac{2}{17}$	2			$\frac{4}{32}$	
	5		3	$\frac{3}{16}$	$\frac{3}{16}$			$\frac{6}{32}$	
	6		3	$\frac{3}{14}$	$\frac{3}{14}$			$\frac{6}{28}$	VERMELHA
	7	7.60	$\frac{3}{16}$	$\frac{4}{18}$	$\frac{3}{11}$			$\frac{7}{29}$	SILTE ARENOSO POUCO COMPACTO A COMPACTO
	8	9.00	5	7	12			19	CINZA
90.00									LIMITE DA SONDAGEM (IMPENETRÁVEL A FERRAMENTA DE PERCUSSÃO)
85.00									
Profundidade do Nível d'água			SPT ÚLTIMOS 30 CM			AVANÇO: A TRADO: -- * --			
Inicial N.F.E. m em 15.02.2003			SPT ESTIMADO			LAVAGEM: -- * --			
Final N.F.E. m em 15.02.2003			PROF. DO REVESTIMENTO: -- * --						
Relatório N.		Cliente:		sondagem					
início	15.02.2003	termo	15.02.2003	Obra:		SP 01			
ESCALA	1/100	Local: Araras/SP				cota (m)			
DATA	20.02.2003					100.00			
VISTO ENQ. RESP.									

Figura 4.23 – Relatório de sondagem SPT para a campanha Araras – 4

Tabela 4.10 – Resultados do ensaio dinâmico *Araras 4 - 1*

Campanha	Prof.	N_{SPT}	ρ_p	Energia Cin. T_A	Eficiência η^*
Araras 4	4,8 m	3,8	79 mm	136,50 J	28 %

Figura 4.24 – Sinais de força e velocidade do golpe do ensaio dinâmico *Araras 4 - 1*Tabela 4.11 – Resultados do ensaio dinâmico *Araras 4 - 2*

Campanha	Prof.	N_{SPT}	ρ_p	Energia Cin. T_A	Eficiência η^*
Araras 4	5,8 m	5,5	55 mm	180,38 J	37 %

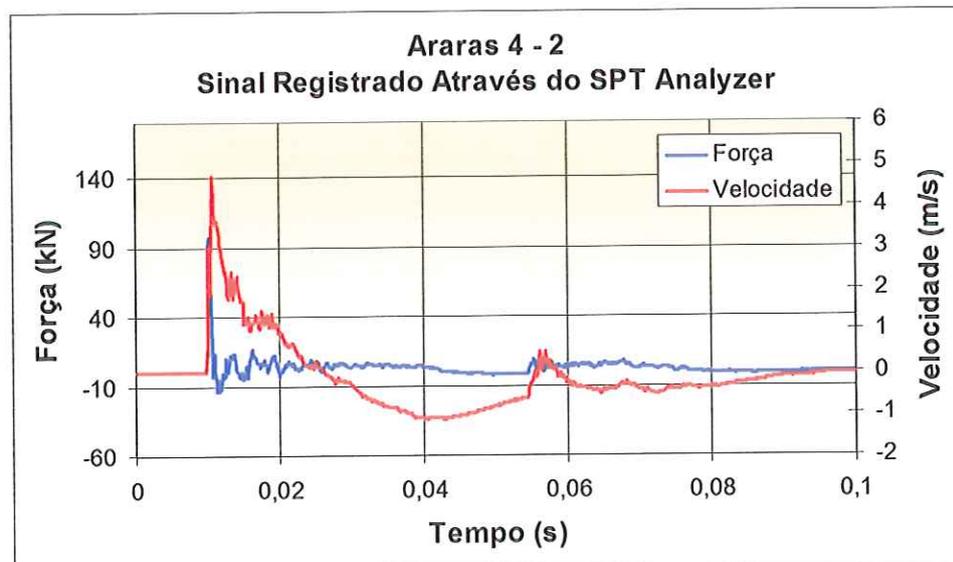
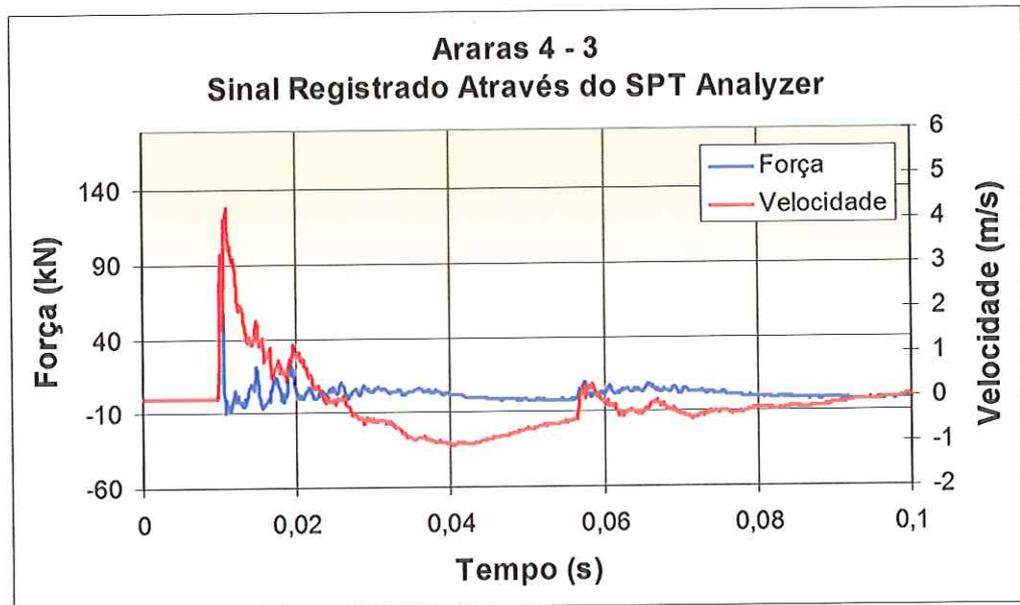
Figura 4.25 – Sinais de força e velocidade do golpe do ensaio dinâmico *Araras 4 - 2*

Tabela 4.12 – Resultados do ensaio dinâmico *Araras 4 - 3*

Campanha	Prof.	N_{SPT}	ρ_p	Energia Cin. T_A	Eficiência η^*
Araras 4	6,8 m	6,5	46 mm	146,25 J	30 %

Figura 4.26 – Sinais de força e velocidade do golpe do ensaio dinâmico *Araras 4 - 3*Tabela 4.13 – Resultados do ensaio dinâmico *Araras 4 - 4*

Campanha	Prof.	N_{SPT}	ρ_p	Energia Cin. T_A	Eficiência η^*
Araras 4	7,8 m	9,1	33 mm	165,75 J	34 %

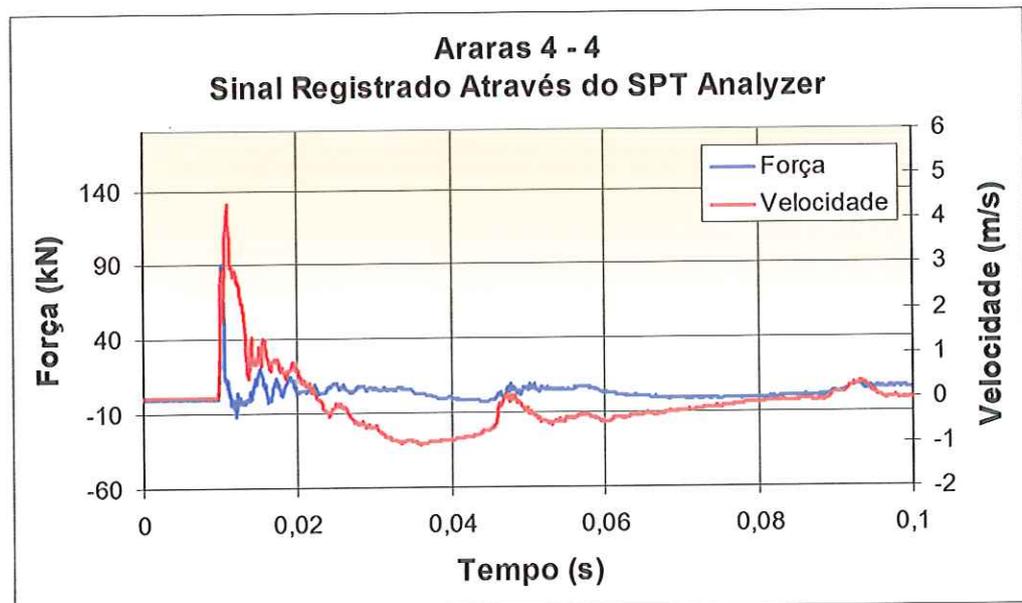
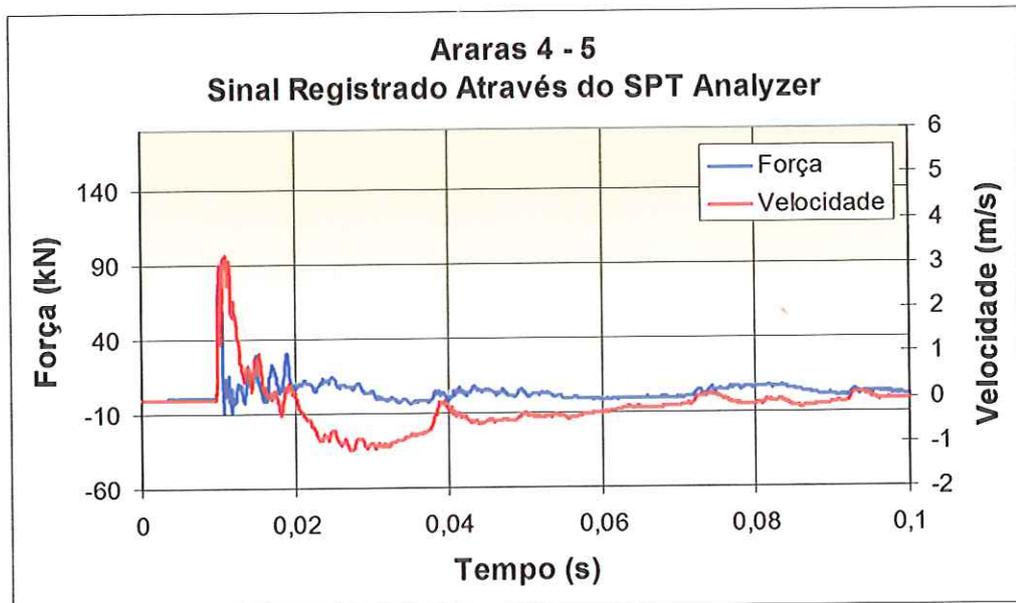
Figura 4.27 – Sinais de força e velocidade do golpe do ensaio dinâmico *Araras 4 - 4*

Tabela 4.14 – Resultados do ensaio dinâmico *Araras 4 – 5*

Campanha	Prof.	N_{SPT}	ρ_p	Energia Cin. T_A	Eficiência η^*
Araras 4	8,8 m	15,0	20 mm	136,50 J	28 %

Figura 4.28 – Sinais de força e velocidade do golpe do ensaio dinâmico *Araras 4 – 5*

4.1.4 Análise de um golpe do ensaio SPT

A Figura 4.29 apresenta um sinal típico obtido através do *SPT Analyzer*, no caso, o sinal do último golpe do martelo automático antes de se efetuar a prova de carga estática “*Araras 4 – 4*”.

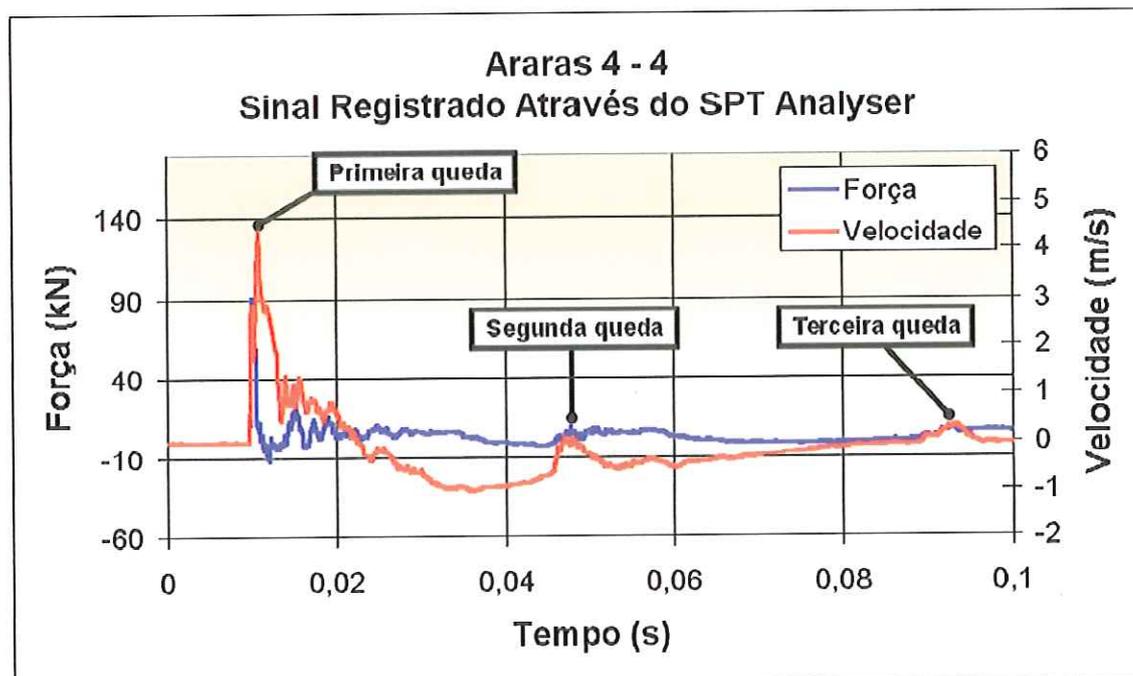


Figura 4.29 – Sinal típico registrado através do *SPT Analyser*

O *SPT Analyser* registra valores de força e aceleração a uma frequência de 10.000 Hz.

A linha azul representa a média dos sinais de força obtida através dos medidores de deformação da haste instrumentada. A linha vermelha representa a média dos sinais de velocidade registrada pelos acelerômetros. Com estes sinais, através da equação (2.23), o *SPT Analyser* calcula o valor da energia cinética que chega no amostrador (T_A), que é a energia responsável pela cravação do amostrador padrão no solo.

A Figura 4.29 mostra que existem dois picos distintos no sinal. O primeiro representa a queda do martelo da altura padrão de 75 cm sobre a cabeça de bater. O segundo pico mostra que, após o conjunto cabeça-de-bater-hastes-amostrador penetrar no solo, o martelo cai novamente sobre a cabeça de bater de uma altura menor que a altura padrão. A Figura 4.5 representa bem este fenômeno.

Os valores de força e de velocidade no primeiro pico são de 90 kN e 4,7 m/s respectivamente. Já no segundo pico, os valores de força e velocidade estão em torno de 10 kN e 0,2 m/s.

Ao final do intervalo de 0,1 s, o sinal de velocidade estabiliza em zero, configurando assim o repouso do sistema e o final do evento.

Não é o objetivo deste trabalho entrar em maiores detalhes sobre a *teoria da equação da onda* e apresentar discussões minuciosas sobre o comportamento dos sinais de força e aceleração registrados pelo aquisitor. O valor da energia cinética T_A apresentado no visor de cristal líquido do *SPT Analyzer* é um dado mais do que suficiente para que a proposta do autor seja apresentada. Para maiores informações sobre a *teoria da equação da onda* em ensaios SPT, o autor recomenda os trabalhos de BELINCANTA (1985) e CAVALCANTE (2002), dentre outros.

4.2 Ensaio estático

Para a obtenção da eficiência do último golpe do ensaio SPT através de um ensaio estático, executou-se uma prova de carga estática sobre o conjunto cabeça-de-bater-hastes-amostrador e, obtida a curva carga-recalque, calculou-se a área sob esta curva para o mesmo deslocamento obtido no golpe dinâmico do SPT. Com a área representando o trabalho gerado pelas forças resistentes não conservativas mobilizadas ao longo do amostrador durante sua penetração ($W_{p,s}$), através da equação (2.27) obteve-se esta eficiência (η_s).

4.2.1 Material utilizado

- *Célula de Carga*: Célula de carga com visor de cristal líquido, com sensibilidade de 0,1 kN e capacidade máxima de 100 kN (Figura 4.30). Fabricada pela empresa italiana *Pagani Geotechnical*, é a mesma célula de carga utilizada no ensaio do *Cone de Begemann*. Sua vantagem é que ela já vem adaptada para o encaixe das hastes do cone de *Begemann*. Confeccionando uma simples peça adaptadora, ela pôde ser utilizada com as hastes *AW*.

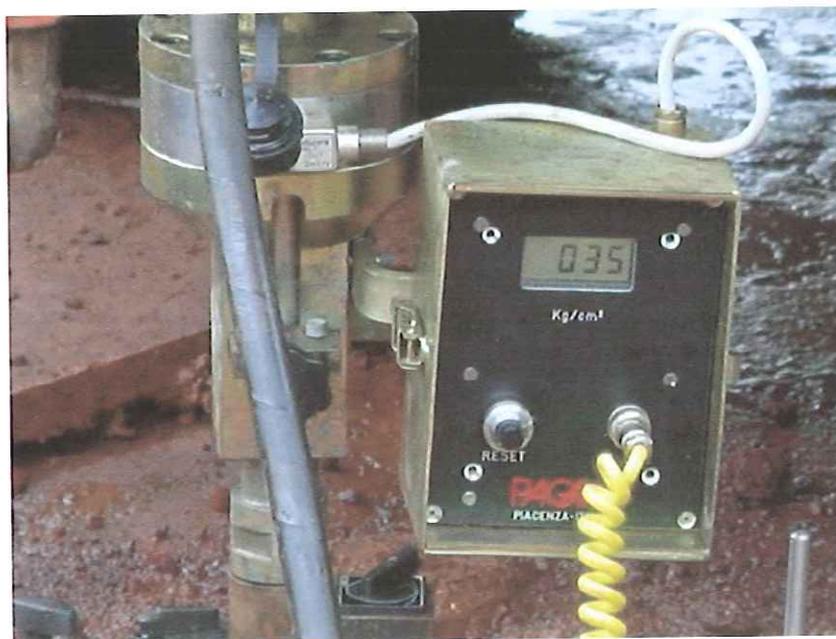


Figura 4.30 – Célula de carga utilizada nos ensaios estáticos

Antes do uso, a célula de carga foi devidamente calibrada em uma prensa do departamento de Geotecnia da USP – São Carlos (Figura 4.31 e Figura 4.32).



Figura 4.31 – Célula de carga sendo calibrada

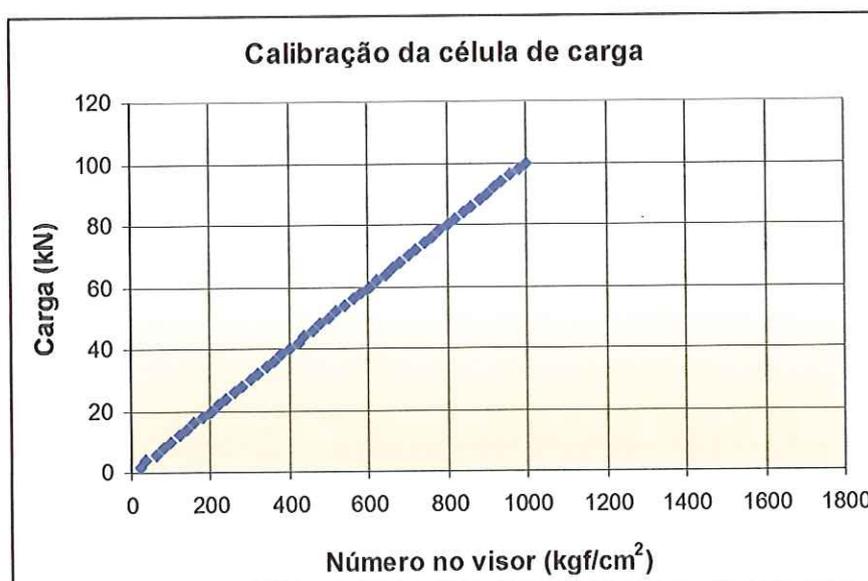


Figura 4.32 – Curva de calibração da célula de carga

- *Macaco Hidráulico*: Macaco hidráulico (Figura 4.33) para a aplicação estática da carga sobre o sistema amostrador-solo acionado por bomba manual (Figura 4.34).



Figura 4.33 – Macaco hidráulico utilizado no ensaio



Figura 4.34 – Bomba de óleo manual

- *Rótula*: Esfera metálica entre dois pequenos discos metálicos que evita a excentricidade da carga aplicada sobre o conjunto cabeça-de-bater-hastes-amostrador (Figura 4.35). Além de tornar o ensaio impreciso, a não utilização da rótula é perigosa uma vez que acomodações bruscas das peças podem acontecer quando a carga aplicada atingir níveis elevados.



Figura 4.35 – Rótula utilizada no ensaio

- *Relógios Comparadores*: Dois relógios comparadores encaixados no conjunto de hastes, em posições contrárias, através de bases magnéticas especiais (Figura 4.36). A utilização de dois relógios evita que algum movimento de rotação do conjunto de hastes prejudique a leitura de deslocamento do conjunto.



Figura 4.36 – Relógios instalados com bases magnéticas e apoiados sobre placas de acrílico

- *Placas de Acrílico*: Placas de dimensão $10 \times 10 \text{ cm}$ colocadas sob as pontas dos relógios comparadores (Figura 4.36).

4.2.2 Metodologia de ensaio

Antes de se iniciar a prova de carga estática sobre o amostrador SPT, calculou-se a resistência mobilizada aproximada R_s , através da equação (3.13). Como a equação (3.7) mostra que o módulo de W_p é praticamente igual ao módulo de $W_{p,s}$, utilizou-se na equação (3.13) a eficiência η^* medida pelo *SPT Analyzer* para último golpe da penetração de 30 cm do amostrador.

$$R_s \cong \frac{\eta^* \cdot U \cdot [N_{SPT}]}{30} \quad (4.1)$$

Para se obter um resultado mais preciso de R_s , não foi utilizado o valor de N_{SPT} calculado para os últimos 30 *cm* penetrados dinamicamente pelo amostrador. Utilizou-se um valor de N_{SPT} equivalente à penetração do último golpe do martelo (ρ_p), calculado através da equação (3.1).

$$\rho_p = S \quad (4.2)$$

$$[N_{spt}] = \frac{30}{\rho_p} \quad (4.3)$$

Após a montagem do equipamento para a execução da prova de carga estática, como mostrado nas Figuras 4.37 e 4.39, uma carga inicial de mais ou menos 40 *N* foi aplicada para que o conjunto se firmasse entre as hastes e a reação (Figura 4.38). A utilização do caminhão como reação para a prova de carga estática foi uma solução econômica encontrada para a realização dos ensaios. No entanto, qualquer sistema de reação pode ser utilizado.

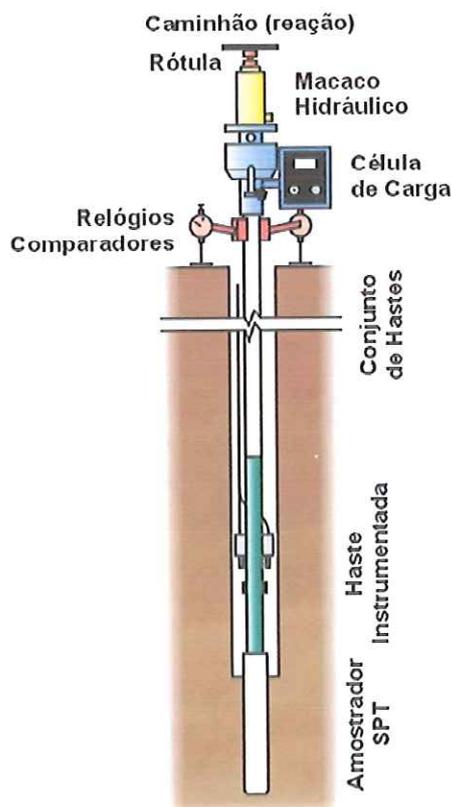


Figura 4.37 – Esquema de montagem da prova de carga estática sobre o amostrador SPT

Estágios de incremento de carga variados foram aplicados até se atingir 2/3 de R_s . A partir desta carga, todos os estágios tiveram incrementos de 100 N , que é a sensibilidade da célula de carga utilizada. Em cada estágio, leituras de deslocamento foram feitas a cada minuto, até que a diferença entre duas leituras consecutivas fosse menor que 0,5 mm , passando então para o próximo estágio. Devido às características muito peculiares da prova de carga estática executada sobre o amostrador, nenhuma norma de prova de carga estática foi seguida. Chegou-se ao valor de 0,5 mm para se considerar o estágio de carga como estabilizado através de experimentação. Valores menores tornariam a prova de carga muito lenta, enquanto valores maiores a tornariam pouco acurada.

$$(\rho_{s,n} - \rho_{s,n-1}) \leq 0,5 \text{ mm} \quad (4.4)$$

Para que o valor de $W_{p,s}$ pudesse ser calculado através da curva carga-recalque da prova de carga estática, os ensaios foram levados até, pelo menos, uma penetração estática total do amostrador igual à penetração dinâmica conseguida através do último golpe do martelo para a penetração dos 30 cm .

$$\rho_{p,s} = \sum_n^1 \rho_{s,n} \quad (4.5)$$

$$\rho_{p,s} (\text{estático}) \geq \rho_p (\text{dinâmico}) \quad (4.6)$$

Após alcançar o deslocamento mínimo desejado, foi executada a descarga do sistema para se calcular a energia potencial elástica $V_{es,s}$ (Figura 4.43). A simplicidade da bomba de óleo que alimentava o macaco hidráulico não permitia uma descarga lenta e constante do sistema, mas era acurada o suficiente para se alcançar resultados satisfatórios.

As figuras 4.40, 4.41 e 4.42 mostram fotos do ensaio estático sendo executado.



Figura 4.38 – Aplicação de carga inicial para firmar o conjunto entre as hastes e a reação



Figura 4.39 – Conjunto pronto para iniciar o ensaio



Figura 4.40 – Ensaio sendo executado



Figura 4.41 – Leitura dos relógios comparadores



Figura 4.42 – Carga sendo mantida constante durante um estágio de carregamento



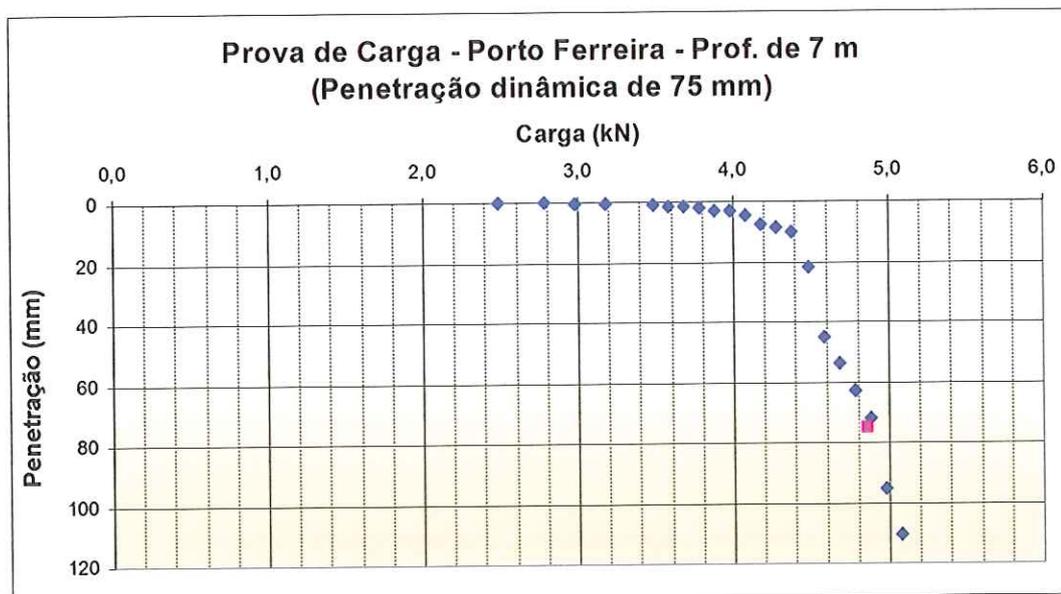
Figura 4.43 – Descarga do sistema sendo executada

4.2.3 Resultados

Abaixo serão apresentadas as curvas carga-recalque das provas de carga estáticas executadas sobre o amostrador SPT.

Tabela 4.15 – Resultados da prova de carga estática *Porto Ferreira – 1*

Campanha	N_{SPT}	ρ_p	Trabalho $W_{p,s}$	Eficiência η_s
Porto Ferreira	4,0 golpes/30 cm	75 mm	339,44 J	70 %

Figura 4.44 – Curva carga-recalque da prova de carga estática *Porto Ferreira – 1*Tabela 4.16 – Resultados da prova de carga estática *Araras 1*

Campanha	N_{SPT}	ρ_p	Trabalho $W_{p,s}$	Eficiência η_s
Araras 1	8,6 golpes/30 cm	35 mm	295,35 J	61 %

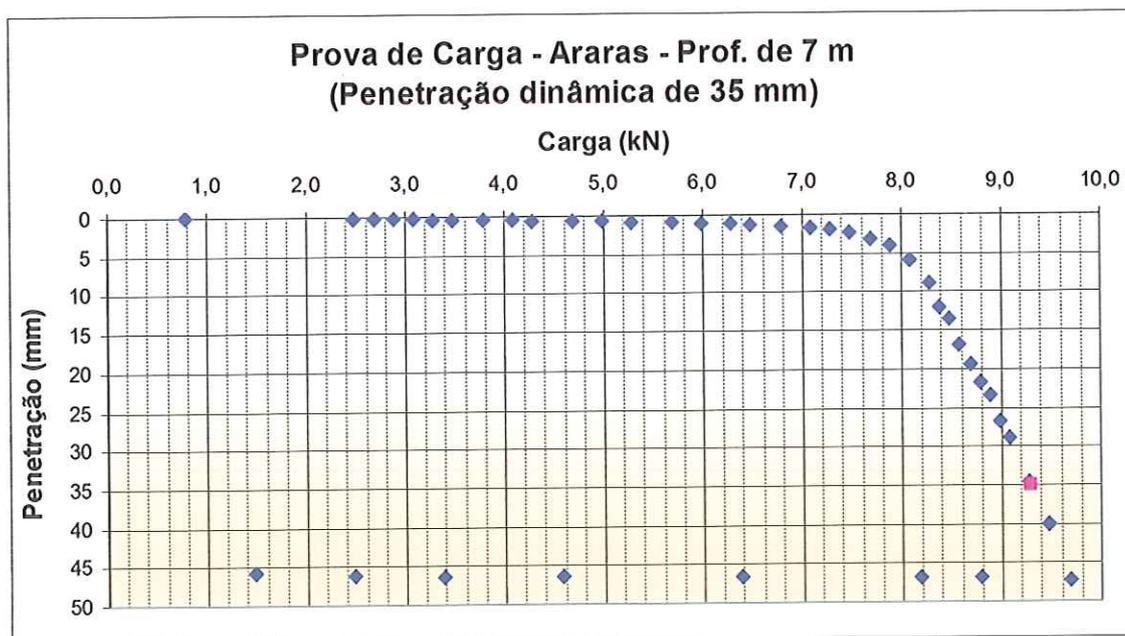
Figura 4.45 – Curva carga-recalque da prova de carga estática *Araras 1*

Tabela 4.17 – Resultados da prova de carga estática Araras 3 – 1

Campanha	N_{SPT}	ρ_p	Trabalho $W_{p,s}$	Eficiência η_s
Araras 3	5,0 golpes/30 cm	60 mm	208,72 J	43 %

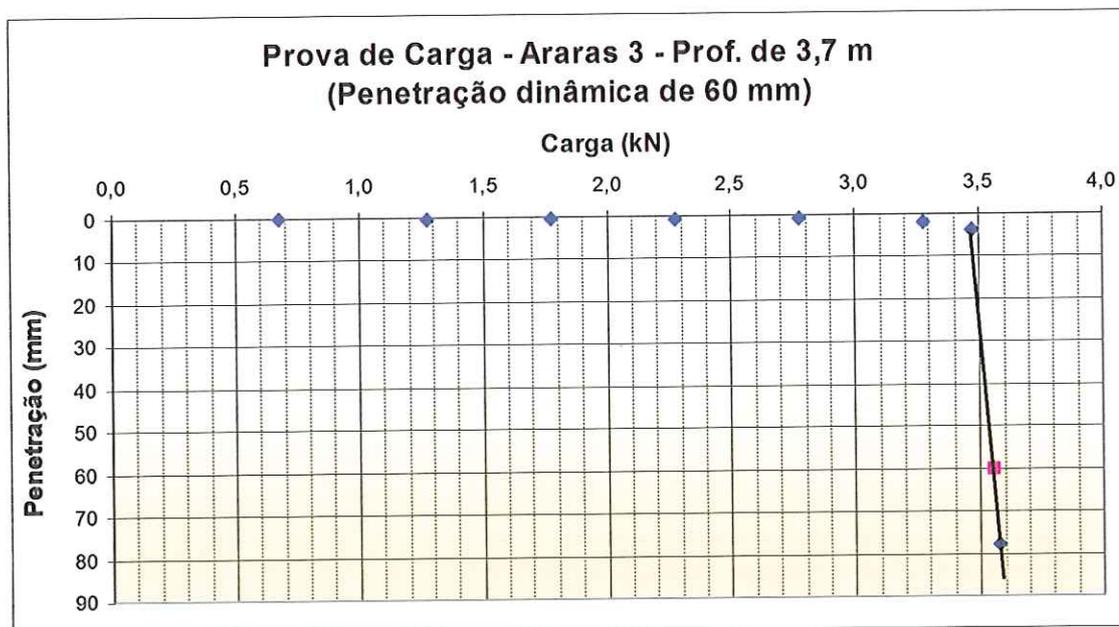


Figura 4.46 – Curva carga-recalque da prova de carga estática Araras 3 – 1

Tabela 4.18 – Resultados da prova de carga estática Araras 3 – 2

Campanha	N_{SPT}	ρ_p	Trabalho $W_{p,s}$	Eficiência η_s
Araras 3	7,9 golpes/30 cm	38 mm	211,35 J	43 %

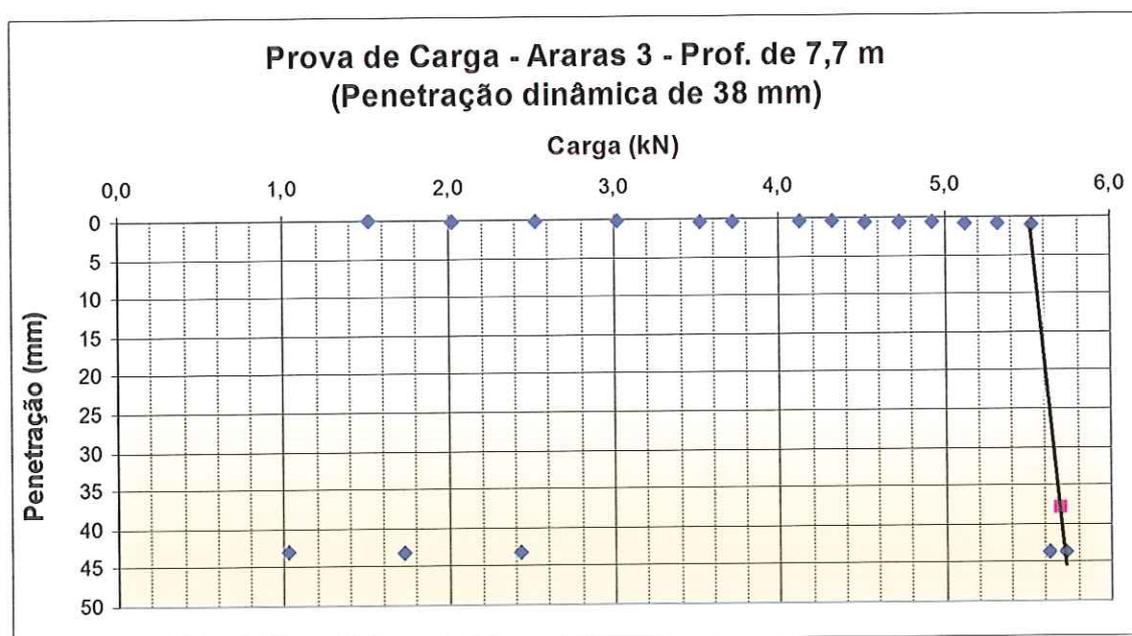
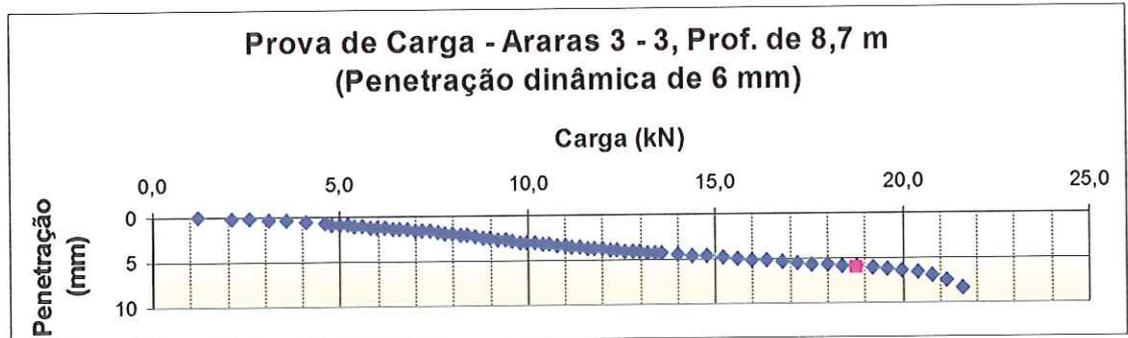


Figura 4.47 – Curva carga-recalque da prova de carga estática Araras 3 – 2

Tabela 4.19 – Resultados da prova de carga estática *Araras 3 – 3*

Campanha	N_{SPT}	ρ_p	Trabalho $W_{p,s}$	Eficiência η_s
Araras 3	50,0 golpes/30 cm	6 mm	61,77 J	13 %

Figura 4.48 – Curva carga-recalque da prova de carga estática *Araras 3 – 3*Tabela 4.20 – Resultados da prova de carga estática *Araras 4 – I*

Campanha	N_{SPT}	ρ_p	Trabalho $W_{p,s}$	Eficiência η_s
Araras 4	3,8 golpes/30 cm	79 mm	228,72 J	47 %

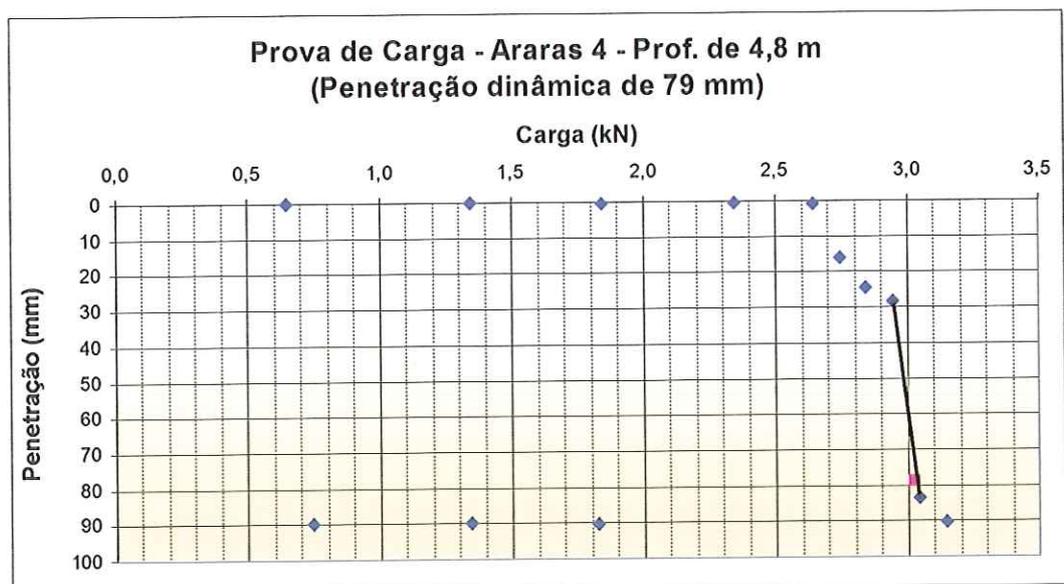
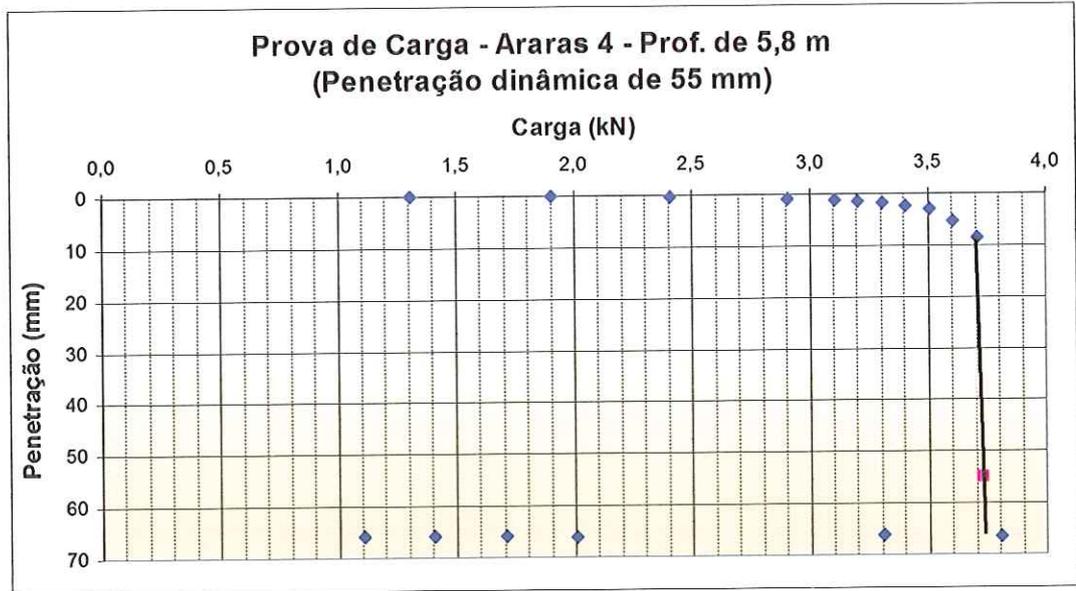
Figura 4.49 – Curva carga-recalque da prova de carga estática *Araras 4 – I*

Tabela 4.21 – Resultados da prova de carga estática *Araras 4 – 2*

Campanha	N_{SPT}	ρ_p	Trabalho $W_{p,s}$	Eficiência η_s
Araras 4	5,5 golpes/30 cm	55 mm	201,76 J	41 %

Figura 4.50 – Curva carga-recalque da prova de carga estática *Araras 4 – 2*Tabela 4.22 – Resultados da prova de carga estática *Araras 4 – 3*

Campanha	N_{SPT}	ρ_p	Trabalho $W_{p,s}$	Eficiência η_s
Araras 4	6,5 golpes/30 cm	46 mm	193,15 J	40 %

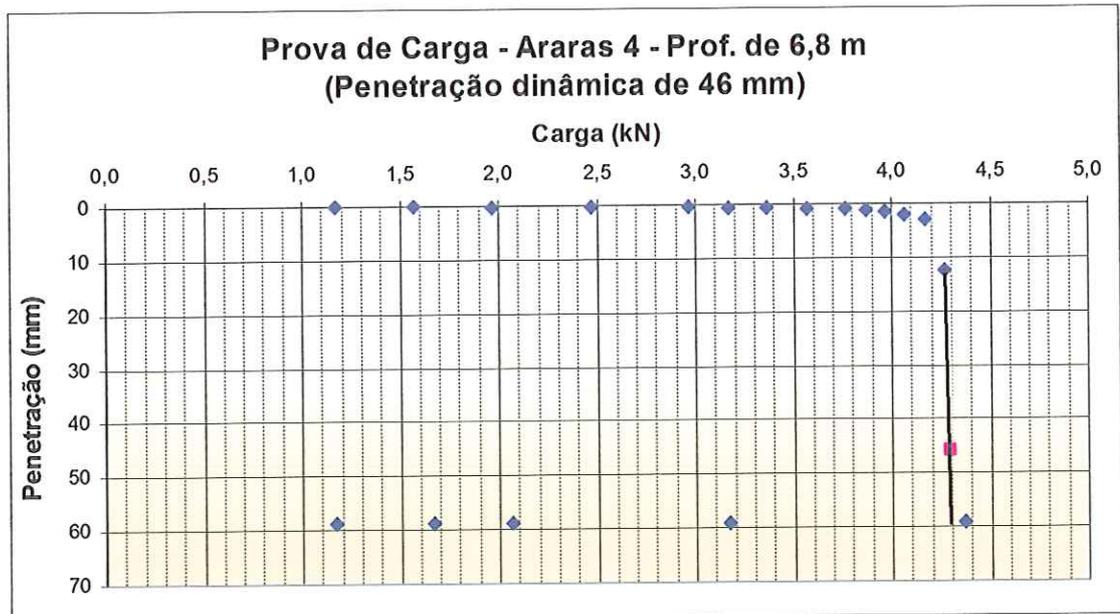
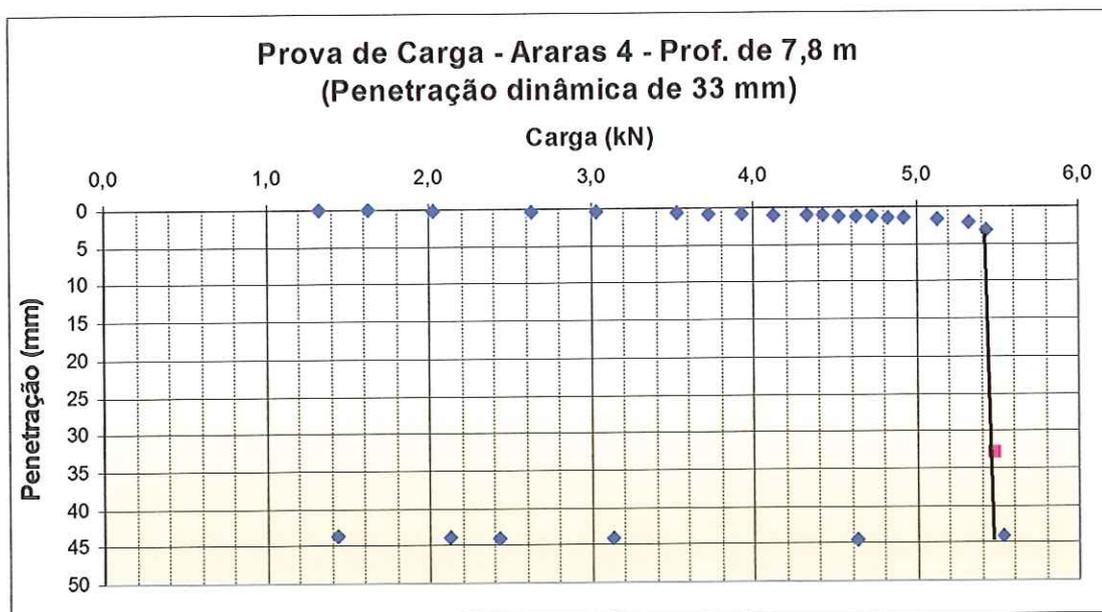
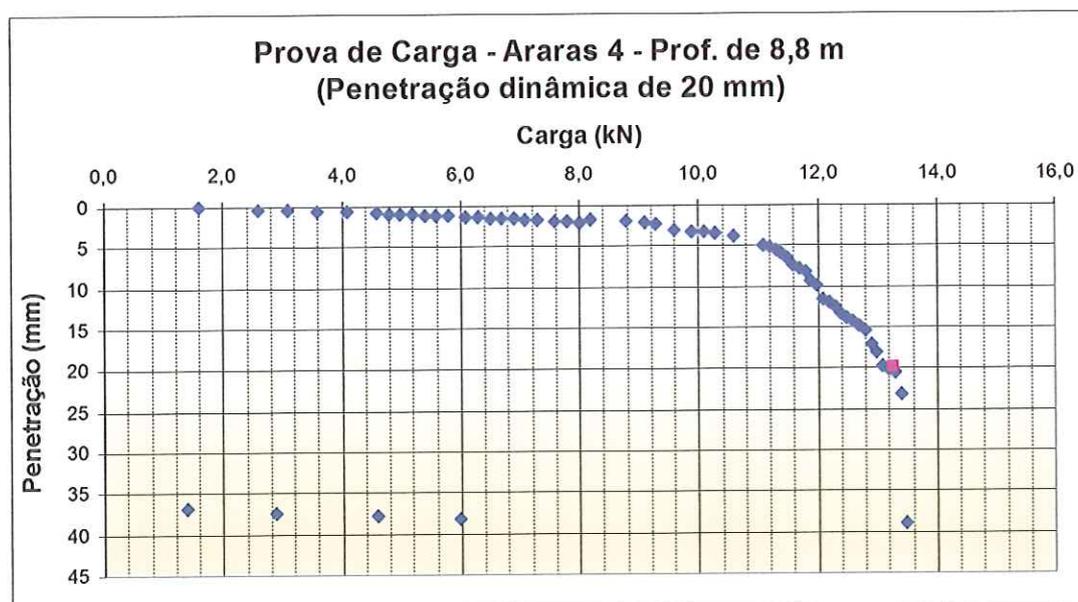
Figura 4.51 – Curva carga-recalque da prova de carga estática *Araras 4 – 3*

Tabela 4.23 – Resultados da prova de carga estática *Araras 4 – 4*

Campanha	N_{SPT}	ρ_p	Trabalho $W_{p,s}$	Eficiência η_s
Araras 4	9,1 golpes/30 cm	33 mm	176,87 J	36 %

Figura 4.52 – Curva carga-recalque da prova de carga estática *Araras 4 – 4*Tabela 4.24 – Resultados da prova de carga estática *Araras 4 – 5*

Campanha	N_{SPT}	ρ_p	Trabalho $W_{p,s}$	Eficiência η_s
Araras 4	15,0 golpes/30 cm	20 mm	225,09 J	46 %

Figura 4.53 – Curva carga-recalque da prova de carga estática *Araras 4 – 5*

4.2.4 Análise de uma prova de carga

A Figura 4.54 mostra a prova de carga estática “Araras 4 – 4”, realizada logo após o ensaio dinâmico que gerou o sinal da Figura 4.52.

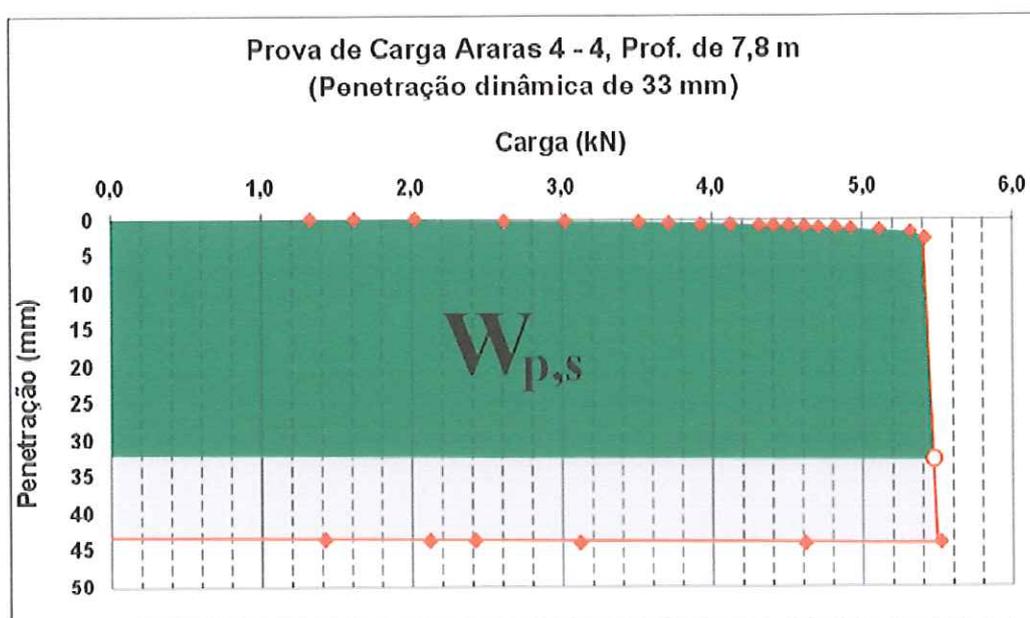


Figura 4.54 – Prova de carga típica realizada sobre o amostrador SPT

A Figura 4.54 mostra uma ruptura bem definida do sistema amostrador-solo. Praticamente todo o deslocamento do amostrador acontece quando o estágio de carregamento passa da carga 5,4 kN para a carga 5,5 kN. Para calcular o valor de $W_{p,s}$ através da curva carga-recalque, calculou-se a área sob a curva até o deslocamento dinâmico de 33 mm, representada na figura pela área em cinza.

$$W_{p,s \text{ araras } 4-4} = 176,87 \text{ N.m} \quad (4.7)$$

$$\eta_{s \text{ araras } 4-4} = \frac{W_{p,s \text{ araras } 4-4}}{U} \cdot 100 = \frac{176,87}{478,3} \cdot 100 = 36\% \quad (4.8)$$

A curva que delimita o deslocamento de 33 mm deve ter o mesmo aspecto (paralela) da curva de descarga para que o valor de $V_{es,s}$ seja levado em conta no cálculo de $W_{p,s}$, como mostrado na equação (2.26).

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Tabela 5.1 apresenta os resultados das eficiências medidas no último golpe do martelo (η^*) e as eficiências calculadas através das 10 provas de carga (η_s). As sondagens foram executadas em profundidades acima do nível de água, em camadas de solos não saturados das regiões de Porto Ferreira e Araras.

Tabela 5.1 – Resultado final dos ensaios

Prova de Carga	Tipo de Solo	último impacto		η^* PCD (%)	η_s PCE (%)
		ρ_p (mm)	N_{SPT} (nº golpes/30 cm)		
Por. Ferreira – 1	Areia pco. argilosa	75	4,0	72	70
Araras – 1	Areia pco. argilosa	35	8,6	54	61
Araras 3 – 1	Areia Siltosa	60	5,0	44	43
Araras 3 – 2	Areia Siltosa	38	7,9	64	43
Araras 3 – 3*	Silte Arenoso	6	50,0	42*	13*
Araras 4 – 1	Areia Siltosa	79	3,8	28	47
Araras 4 – 2	Areia Siltosa	55	5,5	37	41
Araras 4 – 3	Areia Siltosa	46	6,5	30	40
Araras 4 – 4	Silte Arenoso	33	9,1	34	36
Araras 4 – 5	Silte Arenoso	20	15,0	28	46
Média				43	47
Desvio Padrão				16,3	11,0

* Não atingiu a ruptura

Na curva carga-recalque do ensaio *Araras 3 – 3*, é possível perceber que, para o deslocamento de 6 mm no golpe dinâmico, a prova de carga estática ainda não havia atingido a ruptura (Figura 4.48). Isso se deve ao N_{SPT} muito alto da camada onde foi efetuado o ensaio dinâmico. Uma vez que a parcela de energia elástica do sistema passou a ser consideravelmente alta, as curvas da prova de carga dinâmica e estática não se sobrepuseram. A eficiência η^* medida através do *SPT Analyzer* é maior que a eficiência η_s calculada através da curva carga-recalque, pois a parcela de energia elástica V_{es} de η^* não é desprezível. Isso quer dizer que a ruptura do sistema não é mais comandada exclusivamente pelo solo, logo, a proposta de AOKI & CINTRA (2000) não

é mais válida. Devido a este fato, pode-se então considerar o resultado do ensaio *Araras 3 - 3* como satisfatório.

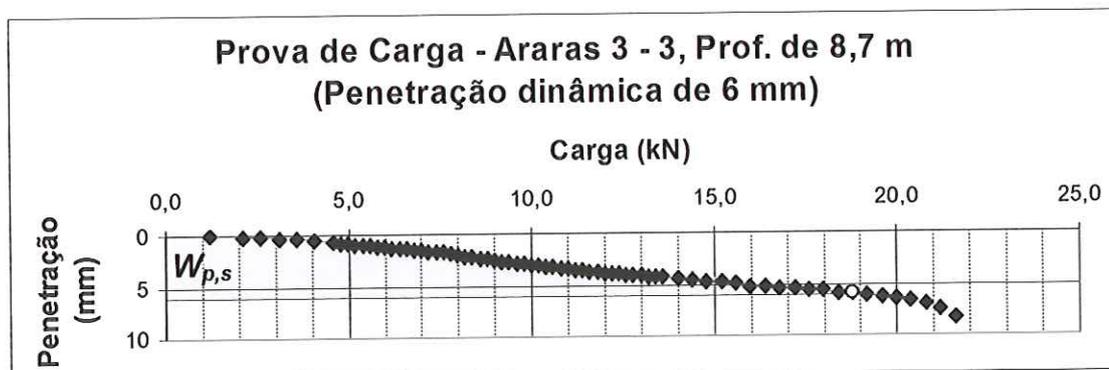


Figura 5.1 – Prova de carga estática onde a penetração dinâmica não atingiu a ruptura esperada.

No ensaio *Araras 4 - 1*, a irregularidade do final da curva carga-recalque sugere que houve algum problema com os relógios comparadores ou que algum obstáculo pontual foi encontrado no solo abaixo do amostrador. Isso pode ter afetado o formato da curva e, com isso, o cálculo da eficiência do ensaio através da prova de carga estática.

No ensaio *Araras 4 - 5*, percebe-se que a resistência do solo em questão já é bem maior que a resistência das camadas superiores, ou o solo neste ponto não tem mais uma linha de ruptura bem definida.

A Figura 5.2 mostra que uma relação linear de 1 para 1 entre as duas eficiências (dinâmica e estática) dos ensaios que atingiram a ruptura é uma aproximação muito boa.

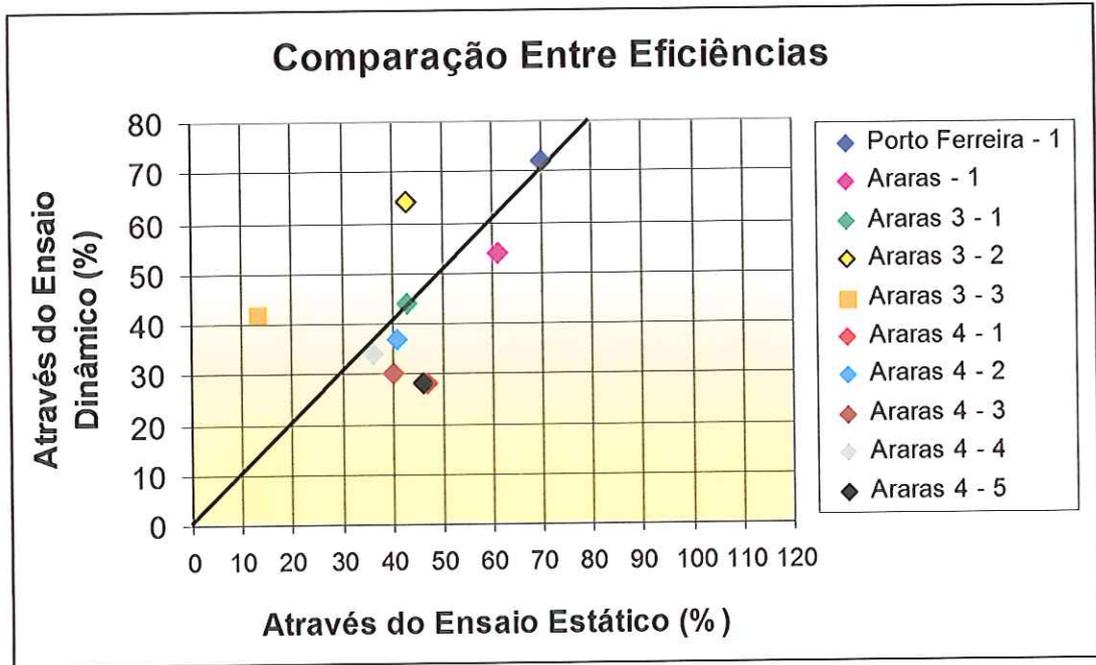


Figura 5.2 – Relação linear entre as duas eficiências (dinâmica e estática)

A Figura 5.3 apresenta a relação entre as resistências medidas nas 9 provas de carga estáticas que atingiram a ruptura e os correspondentes valores de N_{SPT} .

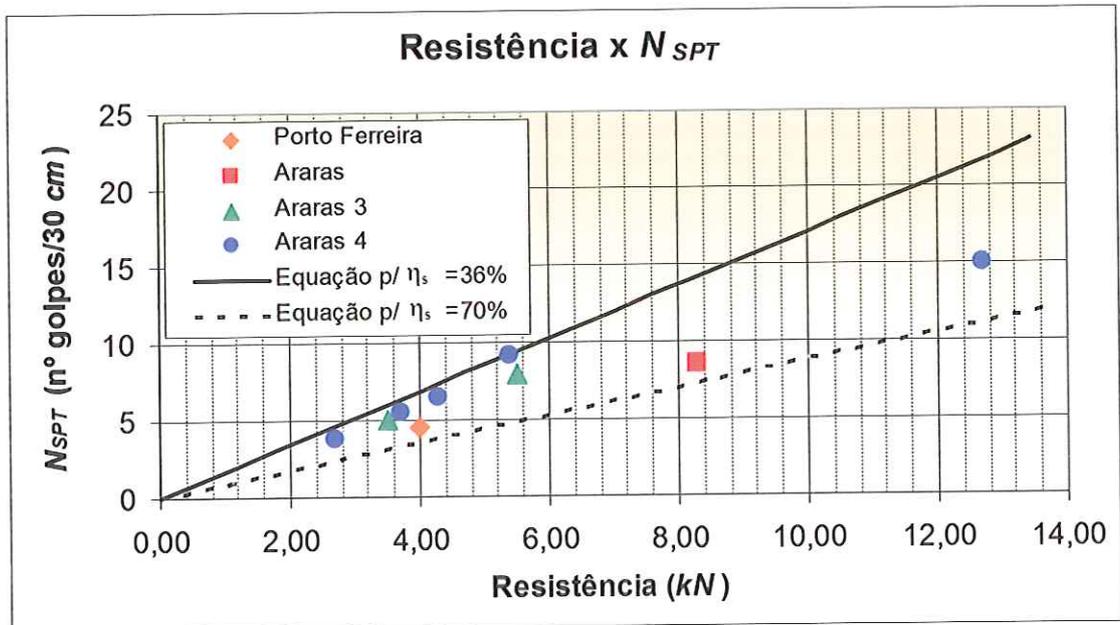


Figura 5.3 – Aplicação da equação (3.13) para uma faixa de eficiência entre 36% e 70%

Para o universo de valores entre $\eta_s = 36\%$ e $\eta_s = 70\%$, que são as eficiências calculadas mínima e máxima para os 9 ensaios deste trabalho que atingiram a ruptura

(Tabela 5.1), as linhas da Figura 5.3 representam os valores calculados com a equação (3.13). Observa-se que a faixa entre as duas linhas representa razoavelmente bem os valores calculados através da prova de carga estática, comprovando-se a viabilidade de se estabelecer o valor de resistência mobilizada estática de uma prova de carga hipotética sobre o amostrador SPT a partir do valor de N_{SPT} e da eficiência do equipamento medido estática ou dinamicamente.

Para uma eficiência média de 82% medida por CAVALVANTE (2002) para várias configurações de tripés de sondagem, pode-se concluir que os valores de N_{spt} podem ser transformados em resistência estática para solos não coesivos pela expressão

$$R_s = 1332,5 \cdot [N_{SPT}] \quad (5.1)$$

Onde R_s é expresso em Newtons.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

6.1 Conclusões

- O martelo automático utilizado para o ensaio apresentou uma eficiência média inferior à eficiência da prática brasileira anotada na literatura. O martelo automático também apresentou uma variação de eficiência significativa, mesmo para golpes muito próximos.
- A metodologia para se obter a eficiência do ensaio SPT através de uma prova de carga estática sobre o amostrador padrão se mostrou confiável para os tipos de solos ensaiados.
- Para solos com ruptura bem definida, ou seja, que entram em colapso bruscamente ao atingir a sua carga de ruptura, a equação simplificada (3.13) se mostrou muito útil na obtenção rápida da eficiência através do valor de N_{SPT} da camada ensaiada.
- A execução dos ensaios é simples e de baixo custo, ao contrário das metodologias convencionais de obtenção de eficiência. Por este motivo, o autor espera que, a partir desta data, a obtenção da eficiência nos ensaios SPT seja uma prática rotineira para todas as empresas que executam o Ensaio de Simples Reconhecimento de Solos.
- A curva de descarga da prova de carga estática comprova que a energia potencial elástica do sistema amostrador-solo é desprezível, característica dos ensaios SPT para o tipo de solo ensaiado (areias e siltes arenosos).

6.2 Sugestões para futuras pesquisas

O autor sugere que novos ensaios sejam feitos nas seguintes condições:

- Diferentes tipos de solo
- Rigidez e compactidade variada
- Solos saturados (abaixo do nível da água)
- Solos colapsíveis
- Diferentes energias (não somente a energia nominal do SPT)
- Diferentes composições do ensaio SPT (hastes, amostrador, etc...)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOU-MATAR, H. et al. (1996). Wave equation soil constants from dynamic measurements on SPT. In: FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE APPLICATION OF STRESS-WAVE THEORY TO PILES, 1996, Orlando, *Anais...* p.163-175.

ABOU-MATAR H.; GOBLE, G.G. (1997). SPT dynamic analysis and measurements, *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering – ASCE*, v.123, n.10, p.921-928.

ALONSO, U.R. (1982). Estimativa da curva carga-recalque de estacas a partir dos resultados de sondagens à percussão. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 1982, *Anais...* p.19-32.

ALONSO, U.R. (1991). *Previsão e Controle de Fundações*. São Paulo: Edgar Blücher Ltda.

AOKI, N. (1997). *Determinação da capacidade de carga última de estaca cravada em ensaio de carregamento dinâmico de energia crescente*. 111p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1997.

AOKI, N. (2000). Keynote lecture: Improving the reliability of pile bearing capacity prediction by the dynamic increasing energy test (DIET). In: VI INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE APPLICATION OF STRESS-WAVE THEORY TO PILES, 2000, São Paulo, *Anais...* p.635-649.

AOKI, N.; VELLOSO D.A. (1975). An approximated method to estimate the bearing capacity of piles. In: PAN-AMERICAN CONFERENCE ON SOIL AND FOUNDATION ENGINEERING, 1975, Buenos Aires, *Anais...* p.367-377.

AOKI, N; CINTRA, J.C.A. (1997). New interpretation of the dynamic loading curves for driven piles base don the energy approach. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RECENT DEVELOPMENTS IN SOIL AND PAVEMENT MECHANICS, 1997, Rio de Janeiro, *Anais...* p.467-472.

AOKI, N.; CINTRA, J.C.A. (2000). The application of energy conservation Hamilton's principal to the determination of energy efficiency in SPT tests. In: VI INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE APPLICATION OF THE STRESS-WAVE THEORY TO PILES, São Paulo, *Anais...* p.457-460.

AOKI, N.; CINTRA, J.C.A. (2000²). SGS 5817: Engenharia de fundações – Notas de aula – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1980). *NBR 6484*: Execução de sondagens de simples reconhecimento dos solos. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1982). *NBR 7250*: Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagem de simples reconhecimento dos solos. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1992). *NBR 12131*: Estacas – Prova de carga estática, Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2001). *NBR 6484*: Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio, Rio de Janeiro.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1992). *ASTM D-1586-84*: Penetration test and split-barrel sampling of soils, Philadelphia.

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

BELINCANTA, A. (1998). *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. et al. (1994). Método para medida de energia dinâmica no SPT. *Solos e Rochas*, São Paulo, n.17, p.93-110, Ago, 1994.

BELINCANTA, A.; CINTRA, J.C.A. (1998). Fatores Intervenientes em Variantes do Método ABNT para a execução do SPT. *Solos e Rochas*, São Paulo, n.21, p.119-133, Ago, 1998.

CAVALCANTE, E.H. (2002). *Investigação teórico-experimental sobre o SPT*. 441p. Tese (Doutorado) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2002.

COCK, F.; LEGRAND, C. (1997). Design of axially loaded piles European practice. In: THE ERTC3 SEMINAR, 1997, Bruxelas – Bélgica. *Anais...* 337p.

CLOUGH, R.W. ; PENZIEN, J. (1975). *Dynamics of structures*. New York: McGraw-Hill.

DÉCOURT, L. (1989). The standard penetration test – State of the art report. In: XII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1989, Rio de Janeiro, *Anais...* vol. 4.

FLETCHER, G.F.A (1965). Standard penetration test: Its uses and abuses. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division – ASCE*, v.91, n.SM4, p.67-75.

HVORSLEV, M. J. (1949). *Subsurface exploration and sampling of soils for civil engineering purposes*. Vicksburg, Mississippi, Committee on Sampling and Testing Soil Mechanics and Foundations Division – Waterways Experiment Station. p.121-122.

KOVACS, W.D. (1979). Velocity measurement of free-fall SPT hammer. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division – ASCE*, v.105, n.GT1, p.1-10.

KOVACS, W.D.; SALOMONE, L.A. (1982). SPT hammer energy measurements. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division – ASCE*, v.108, n.GT4, p.559-620.

MATSUMO, T. et al. (1992). Significance of two point strain measurement in SPT. *Soil and foundations, Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, v.32.

PAIKOWSKY, S. G.; CHERNAUSKAS, LES R. (1996). Soil inertia and the use of pseudo viscous damping parameters. In: FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE APPLICATION OF STRESS-WAVE THEORY TO PILES, 1996, Orlando, *Anais...* p.203-216.

PALACIOS, A. (1977). *Theory and measurements of energy transfer during standard penetration test sampling*. 390p. Tese (Ph.D.) – University of Florida, Gainesville. 1977.

PEIXOTO, A.S.P. (2001). *Estudo do ensaio SPT-T e sua aplicação na prática de engenharia de fundações*. 469p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001

SCHMERTMANN, J.H. (1976). *Interpreting the dynamics of the standard penetration test, final report*. Gainesville, Florida. Florida Department of Transportation – research division – Waldo Road. project D-636, nº 32601.

SCHMERTMANN, J.H. (1978). Use the SPT to measure dynamic soil properties? – Yes, but! *Dynamic Geotechnical Testing*, Philadelphia, ASTM STP 654, p.341-355.

SCHMERTMANN, J.H.; ASCE, F. (1979). Statics of SPT, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division – ASCE*, v.105, n.GT5, p.655-670.

SCHMERTMANN, J.H, & PALACIOS, A. (1979). Energy dynamics of SPT. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division – ASCE*, v.105, n.GT8, p.909-926.

SCHNAID, F. (2000). *Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações*, São Paulo: Oficina de Textos.

SEED, H.B. et al. (1985). Influence of SPT procedures in soil liquefaction resultance evaluation, *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering – ASCE*, v.111, n.12, p.1425-1445.

SKEMPTON A.W. (1986). Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, aging and overconsolidation, *Géotechnique*, v.36, n.3, p.425-447.

TERZAGHI, K. (1942). Discussion on pile driving formulas, *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering – ASCE*, v.68, n.2, p.311-323.

TERZAGUI, K.; PECK, R.B. (1948). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, New York: John Willey & Sons.

VAN DER VEEN, C. (1953). The bearing capacity of a pile. In: III INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1953, *Anais...* vol.2, p.84-90.

VARGAS M. (1989). Heritage Lecture: Soil Mechanics in Brazil, XII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1989, *Anais...* v.4, p.2289-2299.