

PABLO CESAR TREJO NOREÑA

**ESTIMATIVA DA EFICIÊNCIA DO ENSAIO SPT
ATRAVÉS DA EXECUÇÃO DA PROVA DE CARGA
ESTÁTICA SOBRE O AMOSTRADOR**

(Versão Corrigida)

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 Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Edmundo Rogério Esquivel

São Carlos - SP

2011

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

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

T787e Trejo Noreña, Pablo Cesar.
Estimativa da eficiência do ensaio SPT através da execução da prova de carga estática sobre o amostrador / Pablo Cesar Trejo Noreña ; orientador Edmundo Rogério Esquivel. São Carlos, 2011.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

1. Ensaio de penetração. 2. Ensaio SPT. 3. Eficiência. 4. Prova de carga estática. 5. Resistência estática. 6. Resistência dinâmica. 7. Princípio de Hamilton. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **PABLO CÉSAR TREJO NOREÑA**

Título da dissertação: **Estimativa da eficiência do ensaio SPT através da execução da prova de carga estática sobre o amostrador.**

Data da defesa: 29/07/2011:

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Edmundo Rogério Esquivel (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **George de Paula Bernardes**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP/campus de Guaratinguetá)

APROVADO

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

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Prof. Titular **Osni José Pejon**

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

Dedico este trabalho aos meus pais: Pablo, que desde o céu me cuida, protege e ajuda para ter forças para continuar avançando em minha profissão, minha mãe Alejandrina pelos esforços empreendidos para proporcionar-me uma educação digna. Aos meus irmãos Paúl e Sheyla, que sempre acreditaram no meu potencial, a todos que contribuíram para minha formação.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, por ter me concedido saúde, discernimento, perseverança e a oportunidade de me desenvolver moral e intelectualmente durante todo o curso de mestrado.

Sou grato ao CNPq pela bolsa de estudos e financiamento (Processo 479001/2009-8), a FAPESP (Processo 2008/08268-4), por financiar parte de minha pesquisa e ao prof. Dr. Heraldo Giacheti da UNESP-BAURU por emprestar material essencial para a conclusão deste trabalho.

Aos amigos do mestrado: Albano, Gian Franco, Jaqui, Jenny, Liliana, Luis Miguel, Mariana, Nestor, Osvaldo, Paola, Thiago, Tiago, Vinicius, Vivian, pela convivência durante o mestrado e aos amigos que ajudaram durante os ensaios, revisão e sugestões da dissertação: Benedito (EESC), Gustavo (UNESP-BAURU), Oscar (EESC), Romeu (SET-EESC), Sergio (UNESP-BAURU), Zé (EESC), Juliana (EESC-SGS), Mariana (EESC-SGS), Vinicius (EESC-SGS), Tiago (EESC-SGS), Luis Enrique (EESC-SEM), Henry (EESC-SEM), Gian Franco (EESC-SGS) e Vanessa Almeida (EESC-SGS).

Agradeço aos professores do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos: Tarcisio Barreto; Nelson Aoki; José Carlos Cintra; Benedito Bueno; Cristina Tsuha; Lazaro Zuquette, Orencio Vilar e Edmundo Rogério Esquivel.

Sou grato aos funcionários da pós-graduação da EESC-USP; aos funcionários do Departamento de Geotecnia e amigos que conheci durante minha estadia no Brasil.

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

RESUMO

TREJO, P. C. N. (2011). **Estimativa da eficiência do ensaio SPT através da execução da prova de carga estática sobre o amostrador**. São Carlos, 2010. Dissertação de Mestrado – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

O ensaio de simples reconhecimento com o SPT é um dos mais utilizados para investigação do subsolo nos EUA e no Brasil. Os dados obtidos com este ensaio dinâmico, tais como o índice de resistência à penetração N_{SPT} , classificação do solo e nível freático são usados por diferentes métodos para estimativa de capacidade de carga de fundações rasas e profundas. Para um mesmo solo, o índice N_{SPT} pode ser diferente se diferentes equipamentos forem usados devido ao fato de que diferentes equipamentos de SPT mostram diferentes níveis de eficiência. Em vista disso, uma alternativa para estimar a eficiência do ensaio SPT é utilizando-se o ensaio de prova de carga estática sobre o amostrador. Este ensaio foi implementado para poder avaliar a eficiência do ensaio SPT. Para este fim, foram executados 13 ensaios dinâmicos e 13 ensaios estáticos no campus experimental do Laboratório de Engenharia Civil da UNESP (Bauru). Para estimar a eficiência do ensaio SPT através do ensaio dinâmico, um sistema de aquisição analógico-digital foi utilizado para obter registros de aceleração e força na seção localizada junto ao amostrador SPT. O ensaio dinâmico foi modificado para utilizar várias energias potenciais nominais do martelo e sistemas de elevação. A determinação da eficiência do ensaio através da execução da prova de carga estática foi obtida com base no princípio de Hamilton. Adicionalmente, realizando-se a comparação entre o comportamento de carregamento dinâmico e estático, pode-se obter a resistência estática do sistema amostrador-solo. Esta resistência é calculada utilizando a base de dados obtidas no campo e a aplicação de vários métodos de estimativa como: Aoki et al.(2007), De Souza (2009) e Odebrecht (2003). Os resultados da estimativa da eficiência através do ensaio de prova de carga estática sobre o amostrador mostraram-se consistentes em relação aos valores obtidos com o ensaio dinâmico. Concluiu-se que a execução do ensaio de prova de carga estática sobre o amostrador é uma alternativa simples e econômica para obter a eficiência do SPT

Palavras-chave: Ensaio SPT; eficiência; prova de carga estática; resistência dinâmica; resistência estática; princípio de Hamilton.

ABSTRACT

TREJO, P. C. N. (2011). **Estimation of the efficiency in SPT test through static load tests to the sampler.** Sao Carlos, 2011. MSc. Dissertation – Department of Geotechnical Engineering, School of Engineering of Sao Carlos, University of Sao Paulo.

The Standard Penetration Test, SPT, is one of the most used one for subsoil information in the USA and Brazil. The data obtained in this dynamic test, such as the penetration resistance index, NSPT, the soil classification and phreatic level are used by different methods to estimate the shallow and deep foundations load capacity. For the same soil, the index NSPT can be different if different equipments are used, because different SPT equipments show different efficiency levels. Having this in mind, an alternative to estimate the essay efficiency of the SPT test is using the static load test (SLT) to the sampler. This test was implemented in order to evaluate the efficiency of SPT. To do so, 13 dynamic tests and 13 static tests were performed in the experimental campus of the State University of São Paulo at Bauru (Unesp-Bauru-Brazil). To estimate the efficiency of the SPT test through the dynamic test, a data acquisition system was used to register accelerations and forces at the located section close to the sampler SPT. The dynamic test was modified so that it would be possible to use many nominal potential energy of the hammer and elevation systems. The estimation of the efficiency made through the SLT tests was based on Hamilton's principle. Furthermore, by comparing the dynamic and static behavior, we can get the soil-sampler interface static resistance. This resistance is calculated by using the field data through various estimation methods such as Aoki's (2007), De Souza's (2009) and Odebrecht's (2003). The estimates of the efficiency obtained through SLT test were found to be consistent with those obtained through the SPT modified tests. We conclude that SLT is a simple and non-expensive alternative to obtain the efficiency of SPT equipment.

Keywords: SPT test; efficiency; static load test; static resistance; dynamic resistance Hamilton's principle.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Representação esquemática da propagação de uma onda de tensão em uma haste de sondagem (modificado ODEBRECHT, 2003) (a) Perfil de velocidade da onda; (b) Diagrama de forças na haste.....	7
Figura 2.2. a) Relação carga deslocamento b) modelo reológico idealizado por Smith (1960) (modificado LOBO, 2009)	19
Figura 2.3 – O mecanismo de interação solo – amostrador a) Mecanismos de reação; b) Relação carga – deslocamento; c) modelo reológico idealizado (modificado LOBO, 2009).....	25
Figura 2.4-Sistema de reação aplicada por estacas (modificado REESE, 1984)	28
Figura 2.5-Resistências produzidas pela Interação da estaca metálica de ponta aberta e o solo (modificado SOO et al., 1980)	30
Figura 2.6-Evolução de energia potencial, cinética e trabalho durante o evento <i>golpe do martelo</i> (NEVES, 2004).	33
Figura 2.7-Curvas de Carga e Descarga no amostrador SPT (Modificado AOKI <i>et al.</i> , 2007).	36
Figura 2.8-Ensaio de uma prova de carga dinâmica sobre amostrador padrão (modificado de AOKI, 2000).....	38
Figura 2.9-Ensaio de uma prova de carga estática sobre amostrador padrão (modificado AOKI et al., 2007).....	40
Figura 2.10-Curvas de Carga e Descarga no amostrador SPT (Modificado AOKI et al., 2007).	41
Figura 2.11-Comparação entre provas de carga dinâmica e estática executadas sobre o amostrador <i>SPT</i> para areias e siltes arenosos (modificado NEVES, 2004).....	42
Figura 2.12-Forças que atuam a) em um Amostrador do SPT e b) em um CPT padrão de 10 cm ² durante a penetração quase- estática (modificado SCHMERTMANN, 1979)	46
Figura 2.13-Adaptação da Curva proposta por SCHMERTMANN de acordo com a NBR 6484 (2001) (Modificado DE SOUZA, 2009)	48
Figura 2.14-Exemplo da extrapolação para cálculo de F_p (modificado SCHERTMANN, 1979 (b) ; DE SOUZA, 2009)	49
Figura 2.15-Energia quase-estática necessária à penetração para uma eficiência η igual a 0,54 (modificado de SCHERTMANN, 1979 (b))	50
Figura 2.16-Estágios de cravação do amostrador no solo (ODEBRECHT, 2003).....	53

Figura 2.17-Modelo de Smith da curva resistência na ponta–deslocamento (modificado AOKI, 1997)	58
Figura 2.18-Curva resistência total – deslocamento dinâmico no impacto (modificado AOKI, 1997)	59
Figura 2.19-Curva resistência total – deslocamento estático.....	61
Figura 3.1-Haste tratada termicamente (LUKIANCHUKI, 2010).....	64
Figura 3.2-Variação das propriedades mecânicas em função da temperatura de revenimento (ODEBRECHT, 2003).....	65
Figura 3.3- Esquema da ponte de Wheatstone (ODEBRECHT, 2003).....	66
Figura 3.4- Esquema das ligações dos extensômetros (ODEBRECHT, 2003)	66
Figura 3.5- Detalhe da construção da célula de carga (LUKIANCHUKI, 2010)	66
Figura 3.6-Calibração estática da célula de carga.....	67
Figura 3.7-Curva de Calibração da célula de carga.....	68
Figura 3.8-Acelerômetros modelo 350M77.....	69
Figura 3.9-Dimensões dos acelerômetros modelo 350M77 (mm).....	69
Figura 3.10-Suportes dos acelerômetros modelo 350M77 (mm)	70
Figura 3.11-Sistema de aquisição de dados HBM (LUKIANCHUKI, 2010).....	70
Figura 3.12-Ensaio SPT5_C2 utilizando massa do martelo 65 kg.	71
Figura 3.13-Equipamento PAGANI	72
Figura 3.14-Célula de Carga utilizada para a prova de carga estática.....	72
Figura 3.15-Calibração da Célula de Carga.....	73
Figura 3.16-Macaco hidráulico marca ENERPAC usado no ensaio estático.	74
Figura 3.17-Transdutores de deslocamento de marca KYOWA.....	74
Figura 3.18-Ensaio de Prova de carga estática sobre amostrador utilizando o equipamento PAGANI como sistema de reação.	75
Figura 3.19-Registro de acelerações do ensaio SPT1-C1.....	78
Figura 3.20-Registro de acelerações em relação ao tempo, ensaio SPT4-C2-g9.	78
Figura 3.21-Registro de aceleração em relação ao tempo, ensaio SPT4-C2-g9.....	79
Figura 3.22-Registro de velocidade em relação ao tempo, ensaio SPT4-C2-g9.....	80
Figura 3.23-Registro de deslocamento em relação ao tempo, ensaio SPT4-C2-g9.....	80
Figura 3.24-Registro de velocidade e força em relação ao tempo, ensaio SPT4-C2-g9.....	81
Figura 3.25-Registro de energia em relação ao tempo, ensaio SPT4-C2-g9.....	81
Figura 4.1-Perfil do solo do Campo experimental do Laboratório de UNESP-BAURU (Modificado AVESANI, 2010).....	88

Figura 4.2-Sinais de aceleração e de força correspondentes ao golpe 15 do ensaio dinâmico <i>SPT3-C1</i>	90
Figura 4.3-Registro completo do golpe 15 do ensaio dinâmico <i>SPT3-C1</i>	91
Figura 4.4- Sinais de aceleração e de força correspondentes ao golpe 14 do ensaio dinâmico <i>SPT3-C2</i>	92
Figura 4.5-Registro completo do golpe 14 do ensaio dinâmico <i>SPT3-C2</i>	93
Figura 4.6- Sinais de aceleração e de força correspondentes ao golpe 22 do ensaio dinâmico <i>SPT3-C3</i>	94
Figura 4.7-Registro completo do golpe 22 do ensaio dinâmico <i>SPT3-C3</i>	95
Figura 4.8- Sinais de aceleração e de força correspondentes ao golpe 10 do ensaio dinâmico <i>SPT4-C1</i>	96
Figura 4.9-Registro completo do golpe 10 do ensaio dinâmico <i>SPT4-C1</i>	97
Figura 4.10- Sinais de aceleração e de força correspondentes ao golpe 09 do ensaio dinâmico <i>SPT4-C2</i>	98
Figura 4.11-Registro completo do golpe 09 do ensaio dinâmico <i>SPT4-C2</i>	99
Figura 4.12- Sinais de aceleração e de força correspondentes ao golpe 13 do ensaio dinâmico <i>SPT4-C3</i>	100
Figura 4.13-Registro completo do golpe 13 do ensaio dinâmico <i>SPT4-C3</i>	101
Figura 4.14- Sinais de aceleração e de força correspondentes ao golpe 08 do ensaio dinâmico <i>SPT5-C1</i>	102
Figura 4.15-Registro completo do golpe 08 do ensaio dinâmico <i>SPT5-C1</i>	103
Figura 4.16- Sinais de aceleração e de força correspondentes ao golpe 10 do ensaio dinâmico <i>SPT5-C2</i>	104
Figura 4.17-Registro completo do golpe 10 do ensaio dinâmico <i>SPT5-C2</i>	105
Figura 4.18- Sinais de aceleração e de força correspondentes ao golpe 16 do ensaio dinâmico <i>SPT5-C3</i>	106
Figura 4.19-Registro completo do golpe 16 do ensaio dinâmico <i>SPT5-C3</i>	107
Figura 4.20- Sinais de aceleração e de força correspondentes ao golpe 09 do ensaio dinâmico <i>SPT6-C2</i>	108
Figura 4.21-Registro completo do golpe 09 do ensaio dinâmico <i>SPT6-C2</i>	109
Figura 4.22- Sinais de aceleração e de força correspondentes ao golpe 09 do ensaio dinâmico <i>SPT7-C1</i>	110
Figura 4.23-Registro completo do golpe 09 do ensaio dinâmico <i>SPT7-C1</i>	111

Figura 4.24- Sinais de aceleração e de força correspondentes ao golpe 07 do ensaio dinâmico <i>SPT7-C2</i>	112
Figura 4.25-Registro completo do golpe 07 do ensaio dinâmico <i>SPT7-C2</i>	113
Figura 4.26- Sinais de aceleração e de força correspondentes ao golpe 07 do ensaio dinâmico <i>SPT7-C3</i>	114
Figura 4.27-Registro completo do golpe 07 do ensaio dinâmico <i>SPT7-C3</i>	115
Figura 4.28-Curva carga–deslocamento das provas de carga estática executadas sobre o amostrador SPT à profundidade 4,50 m.	117
Figura 4.29-Curva carga–deslocamento das provas de carga estática executadas sobre o amostrador SPT à profundidade 6,47 m.	118
Figura 4.30-Curva carga–deslocamento das provas de carga estática executadas sobre o amostrador <i>SPT</i> à profundidade 8,46 m.....	119
Figura 4.31. Recuperação da amostra total a) Ensaio PCE3-C2 b) Ensaio PCE 6_ C3	120
Figura 5.1-Relação entre as eficiências calculadas pelo ensaio estático e dinâmico.....	123
Figura 5.2-Relação entre as eficiências calculadas pelo ensaio estático e dinâmico utilizando método NEVES (2004).	125
Figura 5.3-Relação entre a resistência estimada por Schmertmann (1979) e De Souza (2009) e a resistência estática obtida da prova de carga estática.....	129
Figura 5.4-Relação entre a resistência estimada por Odebrecht (2003) e a resistência estática obtida da prova de carga estática.	131
Figura 5.5-Relação entre a resistência estimada por Aoki et al. . (2007) e a resistência estática obtida da prova de carga estática.	133
Figura 5.6-Relação entre a resistência estimada e a resistência estática obtida da prova de carga estática.	135
Figura 5.7-Comparação entre a resistência estimada por Schmertmann (1979) e De Souza (2009) e a resistência estática estimada por Aoki et al. (2007).....	137
Figura 5.8 Comparação entre a resistência estimada por Odebrecht (2003), o método desta pesquisa e a resistência estática obtida da prova de carga estática.	139
Figura B- 1-Curva Carga-Deslocamento resultado da prova de carga estática PCE_4_C2 ..	153
Figura B- 2-Trabalho calculado através da prova de carga estática PCE_4_C2 para a penetração obtida no último golpe dinâmico do martelo SPT.....	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1. Eficiência média em relação ao tipo e à forma de liberação do martelo adotada de alguns países (DECOURT, 1989)	15
Tabela 2-2. Fatores de Incremento de carga (HERMANSSON e GRÄVARE, 1978)	56
Tabela 4-1-Ensaio da Campanha Bauru.....	89
Tabela 4-2-Resultados do ensaio dinâmico <i>SPT3-C1-g15</i>	90
Tabela 4-3-Resultados do ensaio dinâmico <i>SPT3-C2-g14</i>	92
Tabela 4-4-Resultados do ensaio dinâmico <i>SPT3-C3-g22</i>	94
Tabela 4-5-Resultados do ensaio dinâmico <i>SPT4-C1-g10</i>	96
Tabela 4-6-Resultados do ensaio dinâmico <i>SPT4-C2-g9</i>	98
Tabela 4-7-Resultados do ensaio dinâmico <i>SPT4-C3-g13</i>	100
Tabela 4-8-Resultados do ensaio dinâmico <i>SPT5-C1-g8</i>	102
Tabela 4-9-Resultados do ensaio dinâmico <i>SPT5-C2-g10</i>	104
Tabela 4-10-Resultados do ensaio dinâmico <i>SPT5-C3-g16</i>	106
Tabela 4-11-Resultados do ensaio dinâmico <i>SPT6-C2-g9</i>	108
Tabela 4-12-Resultados do ensaio dinâmico <i>SPT7-C1-g9</i>	110
Tabela 4-13-Resultados do ensaio dinâmico <i>SPT7-C2-g7</i>	112
Tabela 4-14-Resultados do ensaio dinâmico <i>SPT7-C3-g7</i>	114
Tabela 4-15-Resultados do ensaio de prova de carga estática a 4,50m de profundidade.....	116
Tabela 4-16-Resultados do ensaio de prova de carga estática a 6,47m de profundidade.....	117
Tabela 4-17-Resultados do ensaio de prova de carga estática a 8,46m de profundidade.....	118
Tabela 4-18- Resultados do ensaio de prova de carga em relação ao valor de N_{SPT}	120
Tabela 5-1-Resultados da energia corrigida nos ensaios dinâmicos.	121
Tabela 5-2-Valores de eficiência obtidos pelo ensaio dinâmico e ensaio estático.....	122
Tabela 5-3-Valores de eficiência obtidos pelo ensaio dinâmico e ensaio estático segundo Método de NEVES (2004).	124
Tabela 5-4-Comparação entre o método proposto por NEVES (2004) e nesta pesquisa.....	126
Tabela 5-5-Razão de atrito e porcentagem de ponta e atrito da resistência total à penetração.	127
Tabela 5-6-Comparação entre a resistência mobilizada na prova de carga e os valores de resistência estática calculada por Schmertmann (1979) e Souza (2009).....	128
Tabela 5-7-Valores de η_3 e dados obtidos em campo massa do martelo, massa e comprimento da haste e penetração permanente.	130

Tabela 5-8-Comparação entre a resistência mobilizada na prova de carga e os valores de resistência estática calculada por Odebrecht (2003).....	131
Tabela 5-9-Valores de Eficiência do ensaio SPT η^* e energia potencial nominal U	132
Tabela 5-10-Comparação entre a resistência mobilizada na prova de carga e os valores de resistência estática calculada por Aoki et. al. (2007).....	132
Tabela 5-11-Valores de resistência estimada e resistência estática na prova de carga estática.	134
Tabela 5-12 - Valores de resistência estática, dinâmica e velocidade no amostrador.	136
Tabela A. 1- Porcentagens de ponta e atrito da resistência mobilizada ao longo do amostrador para diferentes valores de razão de atrito.....	149

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SIMBOLOS

Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing Materials
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
NBR	Norma Brasileira
PDA	Pile dynamics Analyser
SPT	Standard Penetration Test.
SLT	Static Load Test.
USP	Universidade de São Paulo

Letras Latinas

a	aceleração
a_h	área da seção transversal
A	área da seção transversal da haste
A_a	seção transversal do anel
A_s	superfície lateral externa do amostrador
A_t	área na ponta do cone
b	coeficiente do intercepto no eixo dos recalques
c	velocidade de propagação da onda
C_1, C_2	constantes
D_e	diâmetro externo do amostrador
E	módulo de elasticidade do material da haste
E_i	energia avaliada no ponto instrumentado
E_m	energia disponível imediatamente antes do impacto

E'	energia calculada a partir do produto da força quase-estática e a penetração do amostrador no solo para 300mm
E^*	máxima quantidade possível de energia dinâmica de impacto do <i>SPT</i>
E''	máxima energia transmitida ao amostrador
EFD	energia total de deformação das forças estáticas no modelo ideal da curva estática – deslocamento para materiais que apresentam comportamento elástico–perfeitamente plástico
F	força
F_d	força dinâmica de penetração do amostrador no solo
F_e	resistência por atrito externo
F_{est}	força estática do sistema amostrador-solo
F_h	força de massa decorrente do peso do conjunto de hastes localizada acima da célula de carga
F_i	resistência por atrito interno
F_m	força estática requerida adicional média sobre um intervalo de penetração
F_p	força das partículas em função do tempo registrado
g	aceleração da gravidade
G_0	modulo cisalhante a pequenas deformações
h_q	altura de queda do martelo
h_p	altura de queda do martelo a 305 mm
i	valor que pode referir-se anel (a), núcleo (n) ou atrito lateral (s)
ID	diâmetro interno do amostrador
J	amortecimento de Smith
Ja	constante de amortecimento para reação do anel

J_n	constante de amortecimento para reação do núcleo
J_s	constante de amortecimento para reação do atrito lateral
J_w	fator de amortecimento Gibson/GRL
K'	valor de rigidez da mola no deslocamento estático
K_a	constante de rigidez da reação do anel
K_n	constante de rigidez da reação do núcleo
K_s	constante de rigidez da reação do atrito lateral
L	comprimento total das hastes
ML	prova de carga mantida
M_m	massa do martelo
M_h	massa de haste
N	fator de potência no método de Coyle
N_{SPT}	índice de resistência à penetração
N_{60}	valor de número de golpes normalizado para uma energia de 60% da energia potencial nominal de queda livre
OD	diâmetro externo do amostrador
p	perímetro da seção transversal
q	pressão unitária na ponta do amostrador
q_c	resistência final de ponta do cone estático
Q	máximo deslocamento do solo (<i>quake</i>)
Q_a	deslocamento elástico máximo da massa de solo para reação do anel
Q_n	deslocamento elástico máximo da massa de solo para reação do núcleo
Q_s	deslocamento elástico máximo da massa de solo para reação do atrito lateral

<i>Quick ML</i>	ensaio de carga mantida rápida
w	deslocamento de uma partícula devido à passagem da onda
r	coeficiente que define a forma da curva
r_m	distância radial na qual as tensões cisalhantes tornam-se nulas
R	resistência mobilizada do solo
R_a	parcela de resistência dependente da aceleração
R_{anel}	resistência no anel entre solo e a estaca
R_d	parcela de resistência dinâmica dependente da velocidade
R_f	razão de atrito do ensaio de cone
R_L	resistência lateral da estaca
R_p	resistência na ponta da estaca
R_{plug}	resistência devido ao embuchamento do solo
R_{ra}	força de reação do anel
R_{rn}	força de reação do núcleo
R_{rs}	força de reação de atrito lateral do amostrador
R_s	parcela de resistência estática dependente do deslocamento
R_t	resistência total oferecida pelo sistema de cravação do amostrador no solo no evento dinâmico
R_u	resistência estática última do solo
$R_{u,a}$	reação estática do anel
$R_{u,s}$	reação estática cisalhante
$R_{u,n}$	reação estática núcleo
R_v	reação viscosa do solo
R_w	resistência que inclui o 10% do valor para a correção de R_s

<i>Slow ML</i>	prova de carga mantida lenta
t	tempo de aplicação do golpe do martelo
T	energia cinética total do sistema
V	energia potencial no sistema
t_0	tempo inicial onde o sistema está em repouso
t_1	tempo onde apresenta uma energia potencial nominal U
t_2	tempo final em que toda a energia é transferida ao sistema
(t_2-t_1)	intervalo de tempo entre t_1 e t_2
(t_3-t_2)	intervalo de tempo entre t_2 e t_3
(t_4-t_3)	intervalo de tempo entre t_3 e t_4
(t_5-t_4)	intervalo de tempo entre t_4 e t_5
(t_6-t_5)	intervalo de tempo entre t_5 e t_6
T_A	máxima energia cinética que atinge o topo do amostrador
T_2	energia cinética do sistema no instante t_2
T	energia cinética total do sistema dinâmico
T_A'	energia cinética no ensaio SPT
T_c	energia cinética complementar do ensaio de carregamento dinâmico
u_a	deslocamento elástico do mecanismo de reação do anel
u_n	deslocamento elástico da reação do núcleo
u_s	deslocamento elástico da reação do atrito lateral
U	energia potencial nominal
U'	energia potencial corrigida do ensaio SPT
v	velocidade da partícula animada durante a passagem da onda
v_m	velocidade máxima alcançada de queda livre do martelo
v_x	velocidade máxima que ocorre quando R_t

V_A	energia potencial de deformação no sistema amostrador-solo para o carregamento dinâmico
$V_{A,s}$	energia potencial de deformação no sistema amostrador-solo para o carregamento estático
V_c	energia complementar da curva idealizada de resistência estática – deslocamento dinâmico
$V_{e,s}$	energia potencial de deformação elástica do solo para o carregamento estático
V_e	energia de deformação elástica do sistema no carregamento dinâmico
V_{eh}	energia potencial elástico da haste do sistema no carregamento dinâmico
V_{es}	energia potencial elástica do solo
V_2	energia de deformação elástica no instante t_2
W_a	trabalho das forças não conservativas (amortecimento e radiação)
W_d	trabalho efetuado por outras forças não conservativas (perdas diversas)
W_q	trabalho realizado por forças não conservativas gerado pelos encaixes das hastes
W_{nc}	trabalho efetuado pelas forças não conservativas
W_p	trabalho gerado pelas forças resistentes não conservativas mobilizadas ao longo do amostrador durante a sua penetração no solo
$W_{p,s}$	trabalho das forças não conservativas devido à penetração do amostrador no solo
W_2	trabalho das forças não conservativas no instante t_2
W'	peso das hastes mais o peso do amostrador

X_1, X_2	valores que são obtidos a partir dos valores de número de golpes para penetração do amostrador no solo para cada 150 <i>mm</i>
z	distância por onde está passando a onda de tensão
Z	impedância da haste

Letras Griegas

α	constante utilizada para estimar a máxima energia transmitida ao amostrador
$\Delta\rho$	incremento de comprimento de penetração do amostrador no solo
$\Delta EPG^{sistema}$	energia potencial gravitacional do sistema
ΔEPG_m	energia potencial gravitacional do martelo
ΔEPG_h	energia potencial da haste
Δm	massa de solo dentro do amostrador
ΔN	incremento da quantidade de golpes do <i>SPT</i> sobre o intervalo de penetração $\Delta\rho$.
Δt	intervalo de tempo
Δw	deslocamento de uma partícula devido à passagem da onda
Δz	distância por onde esta passando a onda de tensão
β	razão entre a parcela dinâmica e a estática necessária à penetração do amostrador em solos argilosos
$\beta_0, \beta I$	constantes da equação dos mínimos quadrados
δ	variação ocorrida entre os instantes t_1 e t_2
ε_i	erro do método dos mínimos quadrados
ξ	fator de profundidade adotado como 0,5

f	atrito unitário médio externo e interno no amostrador
η	eficiência no ensaio SPT
η^*	nova definição da eficiência (Aoki e Cintra, 2000)
η'	eficiência do ensaio <i>SPT</i> através da prova de carga dinâmica
η_s'	eficiência do ensaio <i>SPT</i> através da prova carga estática sobre o amostrador
η_1	coeficiente da eficiência do martelo
η_2	coeficiente da eficiência da haste
η_3	coeficiente da eficiência do sistema
ρ	deslocamento total do carregamento dinâmico
ρ_e	penetração elástica do amostrador no solo para o carregamento dinâmico
ρ_s	deslocamento total do carregamento estático
$\rho_{e,s}$	penetração elástico do amostrador no solo para o carregamento estático
$\rho_{p,s}$	penetração permanente do amostrador no solo para o carregamento estático
ρ_p	penetração permanente do amostrador no solo para o carregamento dinâmico
ρ_{max}	máxima penetração do amostrador no solo para o carregamento dinâmico
ρ_h	massa específica da haste
ρ_{ponta}	deslocamento da ponta da estaca
σ_u	tensão de ruptura do solo
τ	atrito lateral unitário

ν	coeficiente de Poisson do solo
ν	fator de incremento de carga
τ_u	tensão cisalhante de ruptura do solo
σ_n	tensão efetiva mobilizada
$\{\}$	fator que somente determina o signo da velocidade

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. GENERALIDADES	1
1.2. OBJETIVO.....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. ANALOGIA ENTRE O ENSAIO SPT E A PROVA DE CARGA DINÂMICA EM ESTACA	5
2.2. EQUAÇÃO DE PROPAGAÇÃO DA ONDA NA HASTE	6
2.3. ENERGIA NO ENSAIO SPT.....	9
2.3.1. <i>Energia e eficiência no ensaio SPT</i>	9
2.3.2. <i>Fatores intervenientes na energia dinâmica no ensaio SPT</i>	13
2.3.2.1. Tipo do martelo.....	13
2.3.2.2. Altura de queda.....	16
2.3.2.3. Circulação da água.....	16
2.3.2.4. Tipo e comprimento de haste.....	16
2.3.2.5. Defeitos do amostrador.....	17
2.3.2.6. Erros de contagem do N_{SPT} e de medições.....	17
2.3.2.7. Comprimento, tipo e idade da corda	18
2.3.2.8. Efeito do tipo do solo.....	18
2.3.3. <i>Interação amostrador-solo no evento dinâmico</i>	19
2.4. PROVA DE CARGA ESTÁTICA NO SPT	27
2.4.1. <i>Prova de Carga estática em compressão</i>	28
2.4.2. <i>Interação do amostrador-solo no evento estático</i>	30
2.5. PRINCÍPIO DE HAMILTON APLICADO À PROVA DE CARGA DINÂMICA E ESTÁTICA NO AMOSTRADOR SPT.....	32
2.5.1. <i>Princípio de Hamilton aplicado ao ensaio SPT</i>	32
2.5.2. <i>Princípio de Hamilton aplicado à prova de Carga estática no amostrador SPT</i>	39
2.5.3. <i>Comparação da prova de carga estática com a prova de carga dinâmica no amostrador SPT</i>	41
2.6. RESISTÊNCIA ESTÁTICA DESENVOLVIDA DURANTE A PENETRAÇÃO DO AMOSTRADOR	42
2.6.1. <i>Contribuição de Aoki et al. . (2007)</i>	43
2.6.2. <i>Contribuição de Schmertmann (1979) e De Souza (2009)</i>	45
2.6.3. <i>Contribuição de Odebrecht et al. . (2003)</i>	52
2.6.4. <i>Contribuição Smith (1960) e Aoki (1997)</i>	57
3. MATERIAS E MÉTODOS.....	63
3.1. MATERIAIS	63
3.1.1. <i>Ensaio Dinâmico</i>	63
3.1.1.1. Haste usada para a instrumentação	63
3.1.1.2. Célula de Carga.....	65
3.1.1.3. Acelerômetros utilizados na haste instrumentada	68
3.1.1.4. Sistema de aquisição de Dados	70
3.1.1.5. Equipamento de Sondagem.....	71
3.1.2. <i>Ensaio Estático</i>	72
3.1.2.1. Célula de carga	72
3.1.2.2. Macaco Hidráulico.....	73
3.1.2.3. Transdutores de deslocamento	74
3.1.2.4. Sistema de Aquisição.....	75
3.1.2.5. Sistema de reação.....	75
3.2. MÉTODOS	75
3.2.1. <i>Ensaio Dinâmico</i>	75
3.2.2. <i>Ensaio Estático</i>	82
3.2.3. <i>Proposta para o cálculo da Eficiência do ensaio SPT através da execução da prova de carga estática sobre o amostrador</i>	83
3.2.3.1. Ensaio Dinâmico.....	84
3.2.3.2. Ensaio Estático.....	84
3.2.4. <i>Proposta para o cálculo da Resistência estática mobilizada na ruptura R_s do sistema amostrador-solo</i>	85

4. ENSAIOS E RESULTADOS	87
4.1. CAMPO EXPERIMENTAL	87
4.1.1. <i>Campo Experimental de Bauru</i>	87
4.2. ENSAIOS.....	88
4.2.1. <i>Resultados do ensaio Dinâmico</i>	89
4.2.2. <i>Resultados de ensaio estático</i>	116
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	121
5.1. ANÁLISE DE CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DO ENSAIO SPT	121
5.2. ANÁLISE DE CÁLCULO DA RESISTÊNCIA ESTÁTICA NA PONTA DO AMOSTRADOR SPT.	127
5.2.1. <i>Contribuição de Schmertmann (1979) e Souza (2009)</i>	127
5.2.2. <i>Contribuição de Odebrecht et. al.(2003)</i>	129
5.2.3. <i>Contribuição de Aoki et. al. (2007)</i>	132
5.2.4. <i>Cálculo da resistência total na ponta do amostrador</i>	133
6. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	141
6.1. CONCLUSÕES	141
6.2. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	142
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	145
APÊNDICE A – TABELA DE PORCENTAGENS DE PONTA E ATRITO DA RESISTÊNCIA MOBILIZADA AO LONGO DO AMOSTRADOR PARA DIFERENTES VALORES DE RAZÃO DE ATRITO	149
APÊNDICE B – PROCEDIMENTO DE CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DO SPT ATRAVÉS DA PROVA DE CARGA ESTÁTICA SOBRE O AMOSTRADOR	153
APÊNDICE C – PROCEDIMENTO DE CÁLCULO DA RESISTÊNCIA ESTÁTICA NA PONTA DO AMOSTRADOR SPT	157
APÊNDICE D – PROJETO DA GEOMETRIA DA HASTE INSTRUMENTADA.....	163
APÊNDICE E – PROJETO DE ADAPTADORES DE EQUIPAMENTO PAGANI.....	165
APÊNDICE F – MAPA DE LOCALIZAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DOS ENSAIOS	167

1. INTRODUÇÃO

1.1. Generalidades

O Ensaio de Simples Reconhecimento de Solos *com SPT* é um dos ensaios mais amplamente utilizados para a caracterização *in situ* dos solos. O *índice de resistência à penetração*, N_{SPT} , é um dos resultados mais importantes do ensaio SPT; aplicado em projeto de fundações e na análise do fenômeno de liquefação de solos. O valor do índice de N_{SPT} depende principalmente (i) das propriedades do solo, (ii) das características do amostrador padrão, (iii) da energia entregue ao sistema “cabeça de bater-hastes-amostrador”, e (iv) dos equipamentos e procedimentos do ensaio.

No ensaio SPT a energia entregue ao martelo de impacto é transmitida ao sistema “cabeça de bater - hastes - amostrador”. Por fatores intrínsecos ao ensaio e aos equipamentos utilizados existe uma perda de energia na entrega expressada pela η eficiência no ensaio SPT. A eficiência do ensaio SPT é definida como a relação entre a energia cinética correspondente à primeira onda de compressão, medida no topo das hastes, e a energia potencial nominal de 474 J para o ensaio SPT americano e 478 J para o ensaio brasileiro (Schmertmann e Palacios, 1979). O conceito de eficiência do ensaio SPT foi redefinido, com base no princípio de Hamilton, por Aoki e Cintra (2000). Eles consideraram a eficiência do SPT como a relação entre a máxima energia transferida ao sistema “amostrador-solo”, medida logo acima do amostrador e a energia potencial nominal. Em seguida, Neves (2004) desenvolveu uma metodologia para o cálculo da eficiência do ensaio SPT a partir da proposta apresentada por

Aoki e Cintra (2000). Por outro lado, Odebrecht (2003) sugere que a eficiência, η , seja calculada como a relação entre a máxima energia transferida ao sistema “amostrador-solo” e a soma das energias potenciais do martelo e da haste. Uma diferença entre esses métodos é o uso do nível de referência no sistema. Um nível de referência móvel e interno é usado por Neves (2004) e um nível de referência fixo e externo é usado por Odebrecht (2003) para o cálculo de energia no sistema.

Como citado nos parágrafos anteriores, o índice de resistência, N_{SPT} , e a eficiência do ensaio SPT, η , são dependentes dos equipamentos utilizados, i.e., para um mesmo solo e diferentes equipamentos, os resultados dos parâmetros N_{SPT} e η serão diferentes (ASTMD1586). Isso gera um problema de comparação dos resultados. Para solucionar esse problema, Seed (1985) propôs um critério de padronização dos resultados (N_{SPT} e η) baseado no nível de energia a 60% da energia potencial nominal. Dessa maneira, observa-se a importância na determinação tanto do índice N_{SPT} quanto da eficiência η para cada equipamento utilizado.

A mensuração da eficiência para cada equipamento é desejável para a obtenção de uma adequada correlação com o índice N_{SPT} . Isso porque este índice é de importância no projeto de fundações rasas e profundas.

1.2. Objetivo

O objetivo do presente trabalho é a avaliação da eficiência, η , para o ensaio *SPT* através da execução da prova de carga estática sobre o amostrador, comparando a prova de carga dinâmica e estática com base no princípio de Hamilton utilizando várias energias potenciais nominais do martelo e sistemas de elevação.

Calcular a resistência estática desenvolvida durante a penetração do amostrador no solo utilizando métodos de estimativa desta resistência, como o método de Aoki et al. (2007), Odebrecht (2003), Schmertmann (1979) e De Souza (2009).

1.3. Organização do trabalho

Esta dissertação está organizada de acordo com os pontos a seguir:

- O capítulo 2 apresenta uma revisão dos conceitos de energia e eficiência no ensaio SPT, prova de carga estática no ensaio SPT e métodos para avaliar a resistência estática no sistema amostrador-solo;
- O capítulo 3 descreve os materiais utilizados, bem como os métodos empregados na realização do programa experimental;
- O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos no programa experimental;
- O capítulo 5 apresenta as discussões dos resultados com base nos objetivos propostos;
- O capítulo 6 sumariza as conclusões e sugestões para trabalhos futuros e,
- O capítulo 7 apresenta as referências bibliográficas citadas ao longo da pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Analogia entre o ensaio SPT e a prova de carga dinâmica em estaca

O ensaio de simples reconhecimento de solos (*SPT*) é realizado através da cravação de um amostrador padrão sob a ação de um martelo de 65 kg que cai de uma altura de 750 mm. Este ensaio permite a obtenção do índice de resistência à penetração, N_{SPT} , a coleta de amostras para a classificação do solo e medida do nível d'água. O índice da resistência à penetração (N_{SPT}) é definido como sendo o número de golpes necessários para a penetração dos últimos 300 mm do amostrador no solo. No ensaio *SPT* registra-se o número de golpes para cada um dos 150 mm de penetração (NBR-6484, 2001).

O ensaio *SPT* é um dos ensaios mais amplamente utilizados no mundo para a investigação do subsolo. Este ensaio dinâmico pode ser considerado como a cravação de uma mini-estaca tubular (ponta aberta), apresentando uma semelhança com o ensaio de prova de carga dinâmica realizado em estacas. Então, um carregamento dinâmico é o impacto do martelo num sistema estaca-solo. O carregamento dinâmico é definido quando a força aplicada (P) é variável com o tempo (AOKI, 1997).

Existem dois tipos de ensaio de carregamento dinâmico: o ensaio de carregamento dinâmico com energia constante e ensaio de carregamento dinâmico com energia crescente (AOKI, 1997).

No ensaio dinâmico com energia constante aplica-se uma serie de impactos de igual energia. Isto significa que a altura de queda e massa do martelo são constantes. Geralmente

são considerados 10 golpes do martelo, no sistema estaca-solo, caindo de uma determinada altura. O ensaio de carregamento dinâmico com energia crescente é um ensaio cíclico, análogo à prova de carga cíclica crescente, onde cada ciclo de carregamento corresponde a um impacto de energia que aumenta em cada ciclo. Os incrementos de energia correspondem a incrementos de altura de queda do martelo de 100 ou 200 mm. Consequentemente, as alturas de queda crescentes são múltiplos inteiros destes números (AOKI, 1997). O ensaio *SPT* apresenta semelhança com o ensaio de carregamento dinâmico de energia constante, pois neste ensaio, a massa e a altura de queda do martelo sempre são constantes.

Atualmente o procedimento de ensaio de carregamento dinâmico em estacas é monitorado com o auxílio de um sistema denominado *PDA*. Este sistema registra a aceleração e as deformações em uma determinada seção ao longo do tempo de duração do evento (ASTMD4945, 2000). No ensaio dinâmico *SPT* também é utilizado um sistema de aquisição que registra a aceleração e a força ao longo do tempo na seção instrumentada para avaliar a energia no sistema (ASTMD4633, 2010).

2.2. Equação de propagação da onda na haste

A aplicação do problema de propagação de ondas de tensão em estacas e hastes foi estudada por diversos autores (SMITH, 1960; BELICANTA, 1985; ODEBRECHT, 2003). Uma representação da propagação da onda de tensão é mostrada na Figura 2.1.

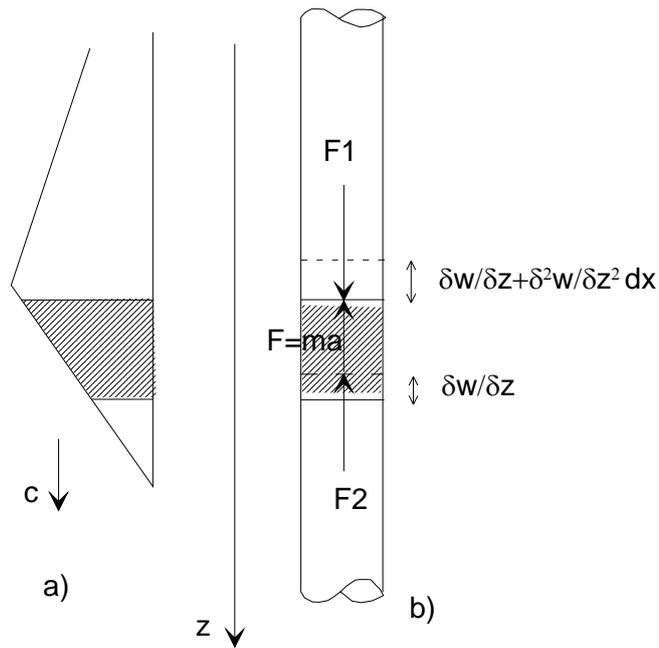


Figura 2.1. Representação esquemática da propagação de uma onda de tensão em uma haste de sondagem (modificado ODEBRECHT, 2003) (a) Perfil de velocidade da onda; (b) Diagrama de forças na haste.

A propagação longitudinal de tensão no interior de uma haste, desprezando o atrito lateral ao longo da haste é representada pela seguinte equação:

$$c^2 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (2.1)$$

onde: c = velocidade de propagação da onda;

w = deslocamento de uma partícula devido à passagem da onda;

z = posição longitudinal da haste por onde está passando a onda;

t = instante considerado.

Poulos e Davis (1980) e Aoki e Alonso (1991) sugerem que, para uma haste ou estaca, a resistência do solo (R) deveria ser considerada na análise da equação de onda. Consequentemente, a equação 2.1 seria reescrita como:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \pm R \quad (2.2)$$

onde: R representa a resistência mobilizada do solo.

Uma expressão para a resistência do solo (R) foi proposta por Aoki (2008) em função das propriedades geométricas e físicas da haste e do solo.

$$R = \frac{\tau p}{\rho_h A} \quad (2.3)$$

Substituindo a equação 2.3 na equação 2.2 se obtém uma expressão para a propagação da onda aplicada ao ensaio SPT para pequenos deslocamentos (AOKI, 2008):

$$c^2 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \frac{\tau p}{\rho_h A} = 0 \quad (2.4)$$

onde: p = perímetro da seção transversal da haste;

A = área da seção transversal da haste;

ρ_h = massa específica da haste;

τ = atrito lateral unitário;

t = instante considerado.

Assume-se i) a seção da haste permanece plana durante a passagem da onda; ii) a tensão é distribuída uniformemente sobre toda a seção transversal; iii) o comprimento da onda longitudinal é maior que o diâmetro da haste; iv) os movimentos transversais das partículas são desprezíveis; v) as perdas de energia na propagação da onda longitudinal de tensão nas hastes são desprezíveis; vi) a onda longitudinal de compressão se propaga nas hastes com velocidade c constante que depende das características do material que constitui as hastes; vii) as hastes são constituídas por material elástico linear e; viii) o atrito lateral unitário desprezível.

A solução da equação 2.4 para a velocidade da onda (c) e a impedância da haste (z) pode ser representada respectivamente por (ODEBRECHT, 2003):

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho_h}} \quad (2.5)$$

$$Z = \frac{EA}{c} \quad (2.6)$$

onde: E = módulo de elasticidade do material da haste (para o aço é de 210,0 GPa);

A = área da seção transversal da haste;

c = velocidade de propagação da onda (5120 m/s para o aço);

Z = impedância da haste.

ρ_h = massa específica da haste.

O fator de proporcionalidade Z é a relação entre F e v . Este fator é denominado impedância da haste. A proporcionalidade entre a força e a velocidade ocorre dentro do intervalo de tempo igual a $2L/c$, sendo que L é o comprimento total das hastes e c a velocidade de propagação da onda na haste.

2.3. Energia no ensaio SPT

2.3.1. Energia e eficiência no ensaio SPT

A energia no ensaio SPT é entregue pelo martelo (energia potencial nominal U) que é dependente da sua massa M_m e altura de queda h_q ($U = M_m g h_q$). Na queda livre do martelo, a energia potencial é convertida em energia cinética. Esta é transferida do martelo para o sistema “cabeça de bater–hastes–amostrador” (BELICANTA, 1985). No ensaio *SPT* a energia potencial U não é totalmente transformada em energia cinética devido às perdas, por exemplo, atrito entre roldana e a corda (ODEBRECHT, 2003). Deste modo surge o conceito de eficiência no ensaio SPT que é definida como a relação entre a energia cinética entregue ao sistema “cabeça de bater–hastes–amostrador” e a energia potencial nominal U do martelo (Schmertmann e Palacios, 1979), isto é:

$$\eta = \frac{\text{Energia cinética entregue ao sistema}}{\text{Energia potencial do martelo}} \cdot 100\% \quad (2.7)$$

Decourt (1989) definiu a eficiência teórica do ensaio SPT como a relação entre a energia teórica disponível durante o impacto do martelo (E_m) e a energia potencial nominal (U),

$$\eta_{\text{teórica}} = \frac{E_m}{U} \quad (2.8)$$

$$E_m = \frac{M_m v_m^2}{2} \quad (2.9)$$

onde: M_m é a massa do martelo e v_m é a velocidade teórica máxima alcançada pelo martelo.

Esta velocidade é dada por (HOWIE et al., 2003),

$$v_m = \sqrt{2gh_q} \quad (2.10)$$

onde: g é a aceleração da gravidade e h_q a altura de queda do martelo.

Kovacs (1979) e Kovacs et al. (1981) tentaram estimar experimentalmente a velocidade v_m fazendo o uso de um scanner de luz. Esses autores observaram que a velocidade experimental era menor que a velocidade teórica proposta por Howie et al.(2003). Consequentemente, a energia real do martelo antes do impacto é sempre menor que a energia teórica E_m . Além disso, encontraram uma relação linear entre N_{SPT} e a energia do martelo no impacto e propuseram a padronização da energia.

Sy e Campanella (1991a) propuseram um método experimental para avaliar a energia do ensaio *SPT*. A análise foi baseada no princípio de trabalho, isto é, o trabalho de deslocamento gerado por uma força durante um intervalo de tempo. Esse trabalho é equivalente à energia transferida pelo martelo ao sistema (E_i).

$$E_i = \int_{t_1}^{t_2} F(t) \cdot v(t) dt \quad (2.11)$$

onde: E_i = energia entregue nas hastes em função do tempo;

t_1 = instante do tempo inicial do registro (t_1 é igual a zero);

t_2 = instante do tempo final em que toda a energia é transferida ao sistema;

$F(t)$ = força normal para um ponto da haste em função do tempo;

$v(t)$ = velocidade da partícula para um ponto da haste em função do tempo.

A energia E_i é a energia avaliada numa haste uniforme em função do tempo e pode ser calculada se o histórico da força e da velocidade for conhecido no ponto da haste em que a instrumentação está localizada. Schmertmann e Palacios (1979) adotaram um referencial interno ao sistema localizado na cabeça de bater para descrever o fenômeno produzido pelo impacto. Deste fenômeno obtêm-se como resultado deformações elásticas e pequenas penetrações do amostrador no solo. Para este caso, o referencial é adequado. Com estes novos conceitos de cálculo de energia definiu-se a eficiência do ensaio SPT como a relação entre a energia entregue às hastes (E_i) e a energia potencial nominal (U) (ASTMD4633, 2010),

$$\eta = \frac{E_i}{U} \quad (2.12)$$

Os registros do histórico das medidas de força e velocidade são necessários para poder avaliar a energia entregue ao sistema SPT. A velocidade inicial pico e a força inicial pico devem encontrar-se dentro do intervalo de tempo igual a $2L/c$, sendo que L é o comprimento total das hastes e c a velocidade de propagação da onda na haste. Para este intervalo a força e velocidade são proporcionais (SY e CAMPANELLA, 1991a).

Mas, para grandes deslocamentos observados durante a penetração do amostrador no solo, deve-se utilizar um referencial fixo externo do sistema. Com esta consideração, os

golpes subsequentes ao pico são válidos para a cravação do amostrador durante todo o evento e para o cálculo da energia transferida à haste (ODEBRECHT, 2003). Considerando o referencial externo proposto por Odebrecht (2003), a energia potencial gravitacional do sistema ($\Delta EPG^{sistema}$) é igual à soma da energia potencial gravitacional do martelo (ΔEPG_m) mais a energia potencial da haste (ΔEPG_h).

$$\Delta EPG^{sistema} = \Delta EPG_m + \Delta EPG_h \quad (2.13)$$

As energias potenciais gravitacionais do martelo e da haste são calculadas pelas seguintes equações:

$$\Delta EPG_m = U + M_m \cdot g \cdot \rho_p \quad (2.14)$$

$$\Delta EPG_h = M_h \cdot g \cdot \rho_p \quad (2.15)$$

onde: U = energia potencial nominal do martelo;

g = aceleração da gravidade;

ρ_p = penetração permanente do amostrador devido à aplicação de um golpe;

M_m = massa do martelo;

M_h = massa de haste.

Com este novo conceito a eficiência referente ao martelo ($\eta_{Martelo}$) é calculada como a relação entre a energia E_i , instrumentada num ponto posicionado perto da cabeça-de-bater do *SPT*, e a energia potencial gravitacional do martelo (ΔEPG_m).

$$\eta_{Martelo} = \frac{E_i}{\Delta EPG_m} \quad (2.16)$$

A eficiência é inversamente proporcional ao comprimento do conjunto de hastes, (AOKI e CINTRA, 2000). Esses autores propuseram que a eficiência fosse definida com instrumentação posicionada junto ao amostrador.

2.3.2. Fatores intervenientes na energia dinâmica no ensaio

SPT

Neste item são citados os fatores que interferem na energia dinâmica transferida ao sistema cabeça-de-bater–hastes–amostrador–solo. Durante a realização deste ensaio ocorrem influências humanas, de equipamento ou de procedimento.

Durante a transferência de energia ao sistema, a energia nominal do martelo pode ser alterada pela altura de queda do martelo, tempo de uso da corda, número de voltas da corda ao redor do tambor, velocidade do tambor, velocidade usada para soltar a corda, inclinação das hastes e pelo tipo de martelo utilizado (KOVACS, 1979; KOVACS et al., 1981).

Os fatores que interferem no ensaio SPT estão descritos a seguir:

2.3.2.1. Tipo do martelo

A partir dos anos 80, os martelos automáticos passaram a ser os mais utilizados nos ensaios *SPT* por alcançar maior velocidade e por razões de segurança. No caso de ensaios manuais, os mais utilizados são do tipo *Donut* e *Safety* (DRUMRIGHT et al., 1996).

Nos Estados Unidos são usados dois tipos de martelos: *safety hammer* e *donut hammer*. A energia média do martelo *safety* em relação à energia nominal é de 60%, enquanto a do martelo *donut hammer* é de 45%. Ainda segundo Seed et al. (1985), em outras regiões do mundo, os diferentes tipos de martelo transferem à haste uma energia média que equivale a 60% da energia teórica.

Dois tipos de martelos são usados no Brasil: martelo maciço e martelo vazado. De acordo com a norma *Solo - Sondagens de Simples reconhecimento com SPT- Método de*

Ensaio (NBR-6484, 2001), uma haste guia, que deve ser retilínea e perpendicular à superfície do martelo que receberá o impacto, é anexada a estes martelos.

A norma *Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils* (ASTMD1586, 2008) recomenda alguns sistemas de queda do martelo, como, por exemplo, *Trip* automático, semi-automático, corda e *cathead* e tipos de martelo, como, por exemplo, *safety*, *donut* e automático, que são os mais usados. Um dos requisitos é que o peso do martelo seja de 623 N e que o contato entre este e a cabeça-de-bater seja direto, ou seja, contato metal-metal. A vantagem em usar um martelo automático no ensaio é que os erros que o operador pode cometer ao manusear o equipamento são minimizados.

Comparações de ensaios *SPT* entre martelos automáticos e *safety* foram realizadas por Drumright et al. . (1996). Eles concluíram que variações de N_{SPT} podem ocorrer devido ao tipo de equipamento utilizado. Estas comparações são baseadas em uma proposta feita por Kovacs (1994), onde a média do valor de número de golpes do martelo automatizado é igual a 75% da média do número de golpes do martelo *Safety*.

A seção 9.1.1.1 da Norma ASTM D 1586-08 explica que variações do índice N_{SPT} em 100% ou mais, foram observadas quando se utilizaram equipamentos diferentes de ensaio *SPT* para furos adjacentes no mesmo tipo do solo. Com base na experiência de campo, indicam que quando é utilizado o mesmo equipamento, os valores de índice N_{SPT} , no mesmo tipo de solo, podem apresentar um coeficiente de variação próxima ao valor de 10%.

As variações no valor do índice N_{SPT} podem ser frequentemente causadas por uma variação da energia transferida pelo martelo. Esta variação pode ser causada pelo uso de equipamentos diferentes que podem contribuir significativamente a diferenças nos valores de índice N_{SPT} obtidos por diferentes equipamentos. Para poder comparar os valores de índices N_{SPT} obtidos com equipamentos diferentes, é necessário que esse valor seja normalizado para

um nível de referência correspondente a 60% da energia potencial nominal utilizando a seguinte equação:

$$N_{60} = N_{SPT} \frac{\eta}{E_{60}} \quad (2.17)$$

onde: N_{60} = valor de número de golpes normalizado para uma energia de 60% da energia potencial nominal de queda livre;

η = eficiência do ensaio SPT;

E_{60} = Energia de 60% da energia potencial nominal de queda livre.

Esta porcentagem de energia representa a energia média para diferentes sistemas de *SPT* (SEED *et al.*, 1985; SKEMPTON, 1987).

Existem vários tipos de martelos com características diversas que podem causar diferentes perdas de energia do sistema. Essas perdas podem ser refletidas na eficiência do ensaio como mostrado na Tabela 2-1:

Tabela 2-1. Eficiência média em relação ao tipo e à forma de liberação do martelo adotada de alguns países (DECOURT, 1989)

País	Martelo		Eficiência (%)
	Tipo	Forma de liberação	
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

2.3.2.2. Altura de queda

A marca de nível na haste guia estabelecida para a altura de queda do martelo permite o controle da altura de queda. Cada sistema alcança um valor diferente de altura de queda. No sistema *cathead*, por exemplo, a altura ultrapassa a marca de nível, enquanto no sistema manual não alcança essa marca.

A energia cinética do martelo é diretamente proporcional à altura de queda no instante do impacto. Conseqüentemente, uma variação dessa altura afeta a energia de entrada no sistema cabeça-de-bater, hastes, amostrador e solo (BELICANTA, 1998).

No caso de martelos automáticos, a frequência de golpes pode alterar a altura de queda do martelo (KOVACS, 1979). Quando essa alteração ocorre, a cravação do amostrador também sofre variação. Conseqüentemente, os valores de N_{SPT} não são confiáveis.

Ainda que a Norma NBR 6484 (2001) seja respeitada, um mau posicionamento da guia do martelo ocasionará atritos no sistema, por conseguinte, haverá perdas de energia no sistema.

2.3.2.3. Circulação da água

A Norma NBR 6484 (2001) não recomenda o uso de água para perfuração neste ensaio, pois esta pode destruir a estrutura natural do solo e isto falseia os resultados.

2.3.2.4. Tipo e comprimento de haste

As dúvidas mais frequentes em relação às hastes são sobre a rigidez e o comprimento. O comprimento exerce influência no peso do sistema e na flambagem. O aumento de peso do conjunto das hastes provoca uma maior força de cravação no solo. O fenômeno de flambagem do comprimento livre das hastes gera uma deflexão lateral, provocando atrito entre as hastes e o solo, reduzindo a energia transmitida ao amostrador (CAVALCANTE, 2002).

Diversos pesquisadores questionaram se o índice de resistência à penetração N_{SPT} é dependente do tipo da haste. Godoy (1971) analisou ensaios com o *SPT* utilizando hastes de

uma polegada (32 N/m) de tipo *A* (57 N/m) e de tipo *B* (83 N/m) e concluiu que não há diferenças nos resultados dos índices de resistência à penetração.

Segundo Schmertmann e Palacios (1979), a eficiência da energia transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente cresce de acordo com o comprimento das hastes. Esta afirmação não parece estar de acordo com o bom senso, pois de acordo com o princípio da conservação da energia, os valores de eficiência devem ser maiores para hastes mais curtas, quando a energia é avaliada junto ao topo do amostrador. A eficiência é decrescente até aproximadamente 5 m de comprimento, mantendo-se aproximadamente constante para comprimentos de hastes maiores (AOKI e CINTRA, 2000).

2.3.2.5. Defeitos do amostrador

O amostrador padrão apresenta diâmetro de 50,8 mm e 34,9 mm, externo e interno, respectivamente. É composto por uma cabeça, que apresenta dois orifícios laterais para a saída de água ou ar, pelo corpo, que pode ser ou não bipartido longitudinalmente, e, por último, pela sapata cortante (NBR-6484, 2001).

Segundo Teixeira (1977), a resistência à penetração independe das dimensões transversais do amostrador. Porém, o mau uso do amostrador causa defeitos em seus componentes, o que falseia o número de golpes do ensaio.

2.3.2.6. Erros de contagem do N_{SPT} e de medições

Estes erros dependem da qualidade da mão-de-obra utilizada para o registro das medidas de comprimentos de hastes, das medidas da penetração do amostrador no solo e das anotações feitas no boletim de campo. Além disso, erros nas medições da penetração do amostrador podem mostrar valores não verdadeiros do número de golpes (TEIXEIRA, 1977; BELICANTA, 1985; CAVALCANTE, 2002).

2.3.2.7. Comprimento, tipo e idade da corda

O comprimento da corda, que suspende o martelo, depende do número de voltas que esta deve dar no tambor. Caso esse comprimento ultrapasse a medida necessária, a energia cinética disponível transmitida ao sistema ficará abaixo do valor esperado.

Os tipos de corda mais utilizados são de fibra sintética (nylon) e de sisal. É importante conhecer o tempo de uso da corda, já que uma corda muito usada apresenta maior amortecimento do martelo do que uma corda nova, refletindo negativamente nos resultados dos ensaios (CAVALCANTE, 2002).

2.3.2.8. Efeito do tipo do solo

A natureza do próprio solo influi no índice de resistência à penetração deste. O *SPT* pode provocar liquefação em areias muito finas e submersas, enquanto que a presença de pedregulhos grossos esparsos aumenta o índice de resistência e conduz a valores errôneos. Como consequência, a interpretação da compactidade ou da consistência da camada investigada também não será correta (TEIXEIRA, 1977).

Bosscher e Showers (1986) utilizaram um programa da equação de onda modificado pelo Texas Transportation Institute (*TTI*), que calcula a energia transmitida através do sistema *SPT*. Esse programa foi desenvolvido para diferentes tipos de solo, variando parâmetros do solo. O resultado, com base na modelagem numérica, mostra que o tipo de solo afeta a medida da energia no *SPT*. Além disso, mostra que solos rígidos apresentam uma maior energia, comparada com solos moles, para a mesma intensidade do golpe do martelo.

O número de golpes no ensaio *SPT* depende principalmente da compactidade relativa do solo, do grau de compactação e do diâmetro do grão da areia (MELZER, 1971). O efeito do tamanho do grão sobre o índice N_{SPT} é pouco entendido. No entanto, estudos numéricos confirmam a existência de um efeito do tamanho dos grãos na transferência de energia, pois

quanto menor o diâmetro do grão, menor será a energia de penetração avaliada do amostrador no solo (DANIEL, 2007).

2.3.3. Interação amostrador-solo no evento dinâmico

A interação amostrador-solo no evento dinâmico foi baseado nos princípios da interação estaca-solo dados por Smith (1960). Para Smith (1960), a resistência total do solo (R_t) é dada pela soma da resistência estática (R_s) mais a resistência viscosa (R_v). Ele modelou o carregamento dinâmico (F_d) aplicado a uma estaca penetrando no solo como um sistema elasto-visco-plástico (Ver Figura 2.2 (b)). A Figura 2.2 (a) representa a solução do modelo citado: as etapas de carregamento e descarregamento são dadas pela curva $OABCDEF$ para atrito lateral; para carregamento apenas por compressão, o comportamento para a reação na base é dado pela curva $OABCF$.

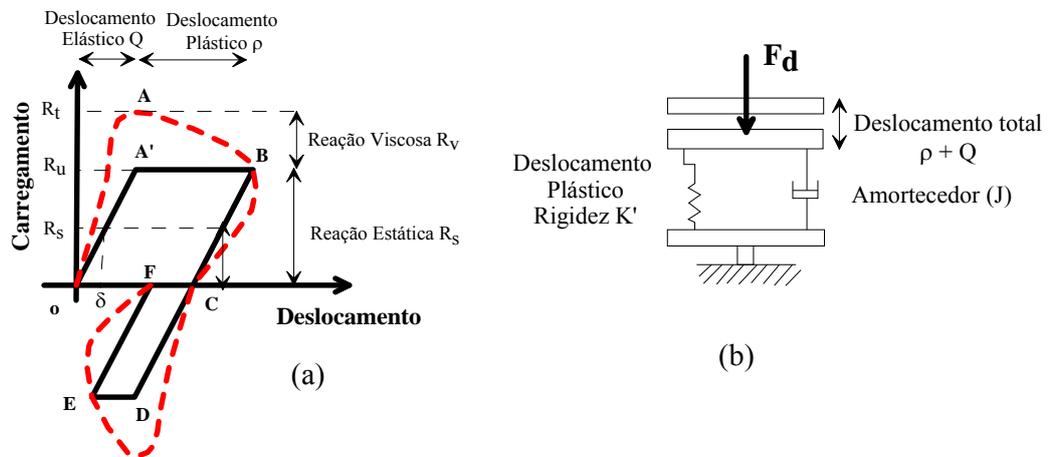


Figura 2.2. a) Relação carga deslocamento b) modelo reológico idealizado por Smith (1960) (modificado LOBO, 2009)

Para o modelo, a constante de rigidez K' é a taxa de variação do carregamento por unidade de deslocamento das zonas elásticas (trechos OA' , BC , CD e EF da Figura 2.2 (a)).

$$K' = \frac{R_u}{Q} = \frac{R_s}{\delta} \quad (2.18)$$

Onde: Q = máximo deslocamento elástico do solo (*quake*);

R_u = resistência estática última do solo;

R_s = resistência estática na zona elástica última do solo.

δ = deslocamento do solo para uma resistência estática R_s .

A reação viscosa do solo R_v é proporcional à reação estática do solo R_s . Uma rápida cravação da estaca causa movimento do solo em torno da base. Como consequência, a reação do solo é proporcional à taxa de mobilização de resistência.

$$R_v = R_s \cdot J \cdot v \quad (2.19)$$

onde J é a constante de amortecimento de Smith e v a velocidade da estaca. Então, a resistência total do solo para a cravação da estaca R_t é dada pela soma da resistência estática (R_s) mais a resistência viscosa (R_v):

$$R_t = R_s(1 + J \cdot v) = (\rho_{ponta} - \rho_p)K(1 + J \cdot v) \quad (2.20)$$

onde ρ_{ponta} é o deslocamento da ponta da estaca, ρ_p o deslocamento permanente e K o coeficiente da mola do solo.

Os parâmetros originais de amortecimento de Smith variam com a velocidade da estaca (a velocidade aumenta quando o amortecimento diminui). Coyle e Gibson (1970) propuseram uma relação não linear entre as resistências viscosas e a velocidade do carregamento (Ver equação 2.21).

$$R_t = R_s(1 + J_T \cdot v^N) \quad (2.21)$$

onde: J_T = fator de amortecimento de Coyle;

N = fator de potência;

v = velocidade;

R_t = resistência total do solo para a cravação da estaca;

R_s = resistência estática do solo.

O modelo simples de Smith foi modificado em acordo com os trabalhos de Gibson e Coyle (1968), Coyle e Gibson (1970), Litkouhi e Poskitt (1980) e Heerema (1979). O parâmetro $N = 1,0$ foi assumido por Smith, mas diferentes valores de N são apresentados por diferentes autores como: $N = 0,18$ para argilas e $N = 0,2$ para areias (COYLE e GIBSON, 1970). O valor de N é igual a $0,2$ para areias e argilas segundo Heerema (1979). Coyle et al. (1972) determinaram para vários solos, com base em provas em estacas modelos, para um intervalo de velocidades de $0,3$ a $1,8$ m/s, que o valor da aproximação de Smith é aceitável para a resistência na base ($N=1$) e só precisa modificar os parâmetros de amortecimento lateral. Esses parâmetros são N igual a $0,35$ e J igual $1,98$ s/m^{-N}.

Goble e Abou-Matar (1992), baseados no modelo de Smith (1960), propuseram um método para a interação amostrador-solo. Esses pesquisadores modelaram a resistência total na ponta $R(t)$ como a soma de três parcelas: resistência dinâmica dependente da velocidade ou força de amortecimento (R_d), resistência estática ou dependente do deslocamento (R_s) e resistência dependente da aceleração, ou força inercial (R_a),

$$R_t(t) = R_a(t) + R_d(t) + R_s(t) \quad (2.22)$$

$$R_a(t) = \Delta m a(t) \quad (2.23)$$

$$R_d = J v^N(t) \quad (2.24)$$

onde: Δm = massa de solo dentro do amostrador;

a = aceleração;

v = velocidade;

J = constante de amortecimento;

N = fator de potência.

Nesse método supõe-se que as seções das hastes são uniformes com nenhuma resistência lateral. Só um exemplo foi obtido de medidas realizadas em Denver utilizando o martelo Pilcon. O solo dessa área é uma areia argilosa, onde os valores correspondentes a m , J , R_u , Q e N são 0,09 kg, 0,43 kg-s/m, 0,47kg, 0,61 mm e 1.0, respectivamente. Existe uma carência de base de dados para verificar esse método (GOBLE e ABOUMATAR, 1992).

Abou-matar *et al.* (1996) utilizaram as equações propostas por Goble e Abou-Matar (1992) para realizar estudos de campo de prova de carga estática sobre o amostrador e ensaio *SPT*. Eles afirmaram que os parâmetros dinâmicos e estáticos de resistência estática e *quake* são adequados para representar o fenômeno. O único problema é que a base de dados é atualmente limitada, por isso comparações de ensaios estáticos e dinâmicos no *SPT* devem ser feitas.

Rausche *et al.* (1992) investigaram vários modelos de amortecimento, compararam resultados e modificaram a equação 2.21 proposta por Coyle e Gibson (1970) como é mostrado:

$$R_t = R_s + R_w J_w v_x^N \left\{ \frac{v}{v_x} \right\} \quad (2.25)$$

sendo $\{\}$ o operador que fornece o sinal da velocidade, R_w a resistência que inclui o 10% da correção de R_s , J_w o fator de amortecimento Gibson/GRL, v velocidade, v_x velocidade máxima que ocorre quando R_t é calculado e N o fator de potência.

$$R_t = R_s + R_w J_w v_x^{0,2} \quad (2.26)$$

Das comparações para N igual a 0,2 e 0,18 não há diferenças significativas. Consequentemente, N igual a 0,2 é uma aproximação suficiente. Como conclusão, esse

método proporciona uma conversão das constantes de amortecimento de Smith a Gibson/GRL com $N=0,2$ e inclui o 10% de correção para R_w para converter a R_s .

Os modelos de interação amostrador-solo utilizados no ensaio *SPT* não são baseados em parâmetros de mecânica de solos e análise de elementos finitos. Por essa razão um modelo racional foi proposto por Lobo (2009).

O mecanismo de interação amostrador-solo, que é modelado através da resistência dinâmica do solo pela contribuição de três componentes: a força de reação do anel (R_{ra}), do núcleo (R_{rn}) e do atrito lateral do amostrador (R_{rs}) (Ver equação 2.27). Esse mecanismo altera o modelo de Smith em dois aspectos: os parâmetros de entrada do modelo foram estimados a partir de expressões teóricas, atribuindo um caráter físico e, a contribuição das parcelas de reação normal e cisalhante na interface amostrador-solo (LOBO, 2009).

$$R_d = R_{r,a}(t) + R_{r,n}(t) + R_{r,s}(t) \quad (2.27)$$

Esse mecanismo de reação do solo representa um comportamento elasto-visco-plástico em condições de carregamento e descarregamento. Então, a força dinâmica da reação mobilizada (R_d),

$$R_d = K_a u_a (1 + J_a v) + K_n u_n (1 + J_n v) + K_s u_s (1 + J_s v) \quad (2.28)$$

onde: v = velocidade de penetração do amostrador;

u_a = deslocamento elástico do mecanismo de reação do anel;

u_n = deslocamento elástico do mecanismo de reação do núcleo;

u_s = deslocamento elástico do mecanismo de reação do atrito lateral;

K_a = constante de rigidez do mecanismo de reação do anel;

K_n = constante de rigidez do mecanismo de reação do núcleo;

K_s = constante de rigidez do mecanismo de reação do atrito lateral;

J_a = constante de amortecimento para reação do anel;

J_n = constante de amortecimento para reação do núcleo;

J_s = constante de amortecimento para reação do atrito lateral.

Os valores de amortecimento de Smith (J) são estimados para $J_a = 0,45 \text{ s/m}$ para reação do anel e $J_n = J_s = 0,15 \text{ s/m}$ para reação em núcleo e cisalhante (ODEBRECHT, 2003 e LOBO, 2009).

A equação 2.28 pode ser representada em função do deslocamento elástico máximo da massa de solo (Q_a , Q_n e Q_s). Este acontece quando o deslocamento do amostrador ultrapassa o limite elástico (*quake*) do solo.

$$R_d = K_a Q_a (1 + J_a v) + K_n Q_n (1 + J_n v) + K_s Q_s (1 + J_s v) \quad (2.29)$$

A resistência dinâmica do solo também pode ser representada como as componentes da resistência estática ($R_{u,i}$) e resistência do amortecimento ($R_{v,i}$). Então, a equação 2.29 seria reescrita como a equação 2.30:

$$R_d = (R_{u,a}(t) + R_{v,a}(t)) + (R_{u,n}(t) + R_{v,n}(t)) + (R_{u,s}(t) + R_{v,s}(t)) \quad (2.30)$$

As parcelas de resistência do amortecimento ($R_{v,i}$) na equação 2.31 são apresentadas na relação proposta por Smith (1960). Ele afirma que a relação entre a velocidade e coeficiente de amortecimento é linear. Essa relação foi avaliada a partir de ensaios de laboratório.

Essa parcela de resistência do amortecimento, $R_{v,i}$, pode ser obtida através da equação 2.31:

$$R_{v,i}(t) = J_i \cdot v \cdot R_{u,i} \quad (2.31)$$

onde: J_i = coeficiente de amortecimento dinâmico proposto por Smith;

v = velocidade;

$R_{u,i}$ = resistência estática do anel, núcleo ou atrito lateral;

i = valor que indica se é anel (a), núcleo (n) ou atrito lateral (s).

As forças de reação e quake do sistema amostrador-solo são calculados com base nos parâmetros do solo. Uma representação das forças de reação do amostrador-solo é mostrada na Figura 2.3.

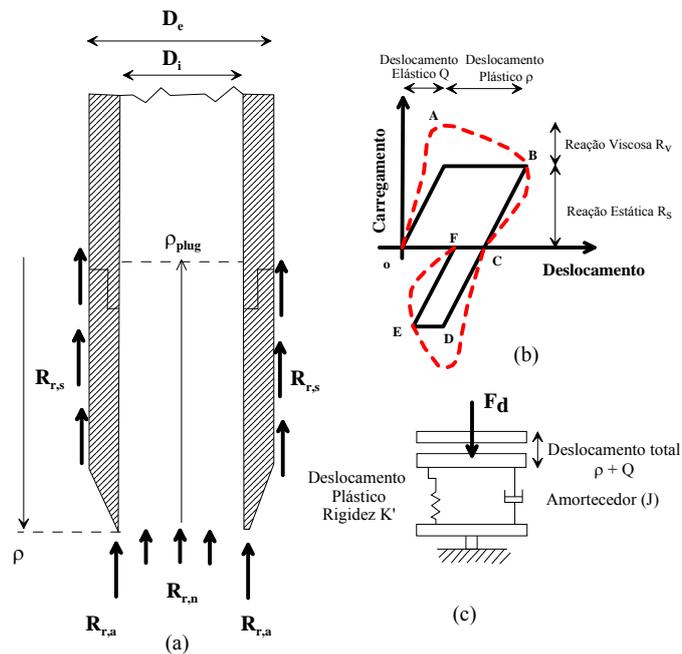


Figura 2.3 – O mecanismo de interação solo – amostrador a) Mecanismos de reação; b) Relação carga – deslocamento; c) modelo reológico idealizado (modificado LOBO, 2009)

Utilizando as equações 2.30 e 2.31 a resistência dinâmica é apresentada como a equação 2.32:

$$R_d = R_{u,a}(1 + J_a v) + R_{u,n}(1 + J_n v) + R_{u,s}(1 + J_s v) \quad (2.32)$$

onde v é a velocidade de penetração do amostrador e as constantes J_a , J_n e J_s quantificam a reação viscosa do solo devido à natureza do carregamento.

Como consequência das velocidades pequenas, os valores de resistência de amortecimento $R_{v,i}(t)$ são desprezíveis, ou seja:

$$R_{v,a}(t) = R_{v,n}(t) = R_{v,s}(t) \approx 0 \quad (2.33)$$

Substituindo a equação 2.33 na equação 2.30 conclui-se que a resistência oferecida modificada pelo sistema durante a cravação do amostrador é:

$$R_d = R_{u,a}(t) + R_{u,n}(t) + R_{u,s}(t) \quad (2.34)$$

A equação 2.34 mostra que a resistência dinâmica é igual à soma de parcelas de resistência estática do anel, núcleo e atrito lateral.

Portanto, a resistência dinâmica, R_d , é igual à resistência estática R_s :

$$R_d \approx R_s \quad (2.35)$$

A resistência do sistema amostrador-solo é independente dos esforços dinâmicos ou estáticos aplicados, a única parcela que sofre uma interação com o solo é a parcela de resistência estática (NEVES, 2004).

Além disso, as parcelas da resistência estática do anel, núcleo e atrito lateral podem ser estimadas, como é apresentado a seguir:

a) *Mecanismo estático de reação do anel*

$$R_{u,a} = A_a \cdot \sigma_u \quad (2.36)$$

$$Q_a = \frac{R_{u,a}(1-\mu)}{2 \cdot G_0 \cdot D_e} \xi \quad (2.37)$$

onde: A_a = seção transversal do anel;

σ_u = tensão de ruptura do solo;

D_e = diâmetro externo do amostrador;

μ = coeficiente de Poisson do solo;

ξ = fator de profundidade adotado como 0,5;

G_0 = módulo cisalhante a pequenas deformações (RANDOLPH e WROTH, 1978).

b) *Mecanismo estático de reação cisalhante*

$$R_{u,s} = A_s \cdot \tau_u \quad (2.38)$$

$$Q_s = \frac{\tau_u \cdot D_e}{(G_0)} \ln \left(\frac{r_m}{D_e} \right) \quad (2.39)$$

onde: τ_u = tensão cisalhante de ruptura do solo;

A_s = superfície lateral externa do amostrador estimada a partir da penetração do amostrador acumulada;

r_m = distância radial na qual as tensões cisalhantes tornam-se nulas (RANDOLPH e WROTH, 1978).

c) *Mecanismo estático de reação de núcleo*

$$R_{u,n} = A_n \cdot \sigma_n \quad (2.40)$$

$$Q_n = \frac{R_{u,n} (1 - \mu)}{2 \cdot G_0 \cdot D_e} \lambda \quad (2.41)$$

onde: A_n = seção transversal do núcleo do amostrador;

σ_n = tensão efetiva mobilizada;

λ = fator de profundidade adotado como 0,5 (LOBO, 2009).

2.4. Prova de Carga Estática no SPT

Alguns pesquisadores realizaram provas de carga estática sobre o amostrador *SPT* como Rausche *et al.* (1995), Abou-matar *et al.* (1996), Lutenegger e Kelley (1998) e Neves (2004). Atualmente não existe uma norma que faça referência ao ensaio de prova de carga estática executado sobre o amostrador *SPT*. Por esse motivo, utiliza-se a norma *Estacas* –

Prova de carga estática (NBR 12131), que faz recomendações para o ensaio de carga mantida rápida (*Quick ML*) para fundações profundas.

A base de dados existente para ensaios de prova de carga sobre o amostrador *SPT* é ainda pequena. Por essa razão, o ensaio de prova de carga estática sobre o amostrador *SPT* é assumido ser semelhante à prova de carga estática numa estaca.

A maneira mais precisa para se determinar a capacidade de carga de uma estaca, é construir um protótipo em escala real e carregar a estrutura lentamente até a ruptura (Figura 2.4). Esse método é conhecido como prova de carga estática convencional. Entretanto, a prova de carga estática é cara e consome muito tempo. O objetivo da prova de carga estática é obter a curva de carga–deslocamento. Essa curva é usada para determinar a capacidade de carga última (CODUTO, 2001).

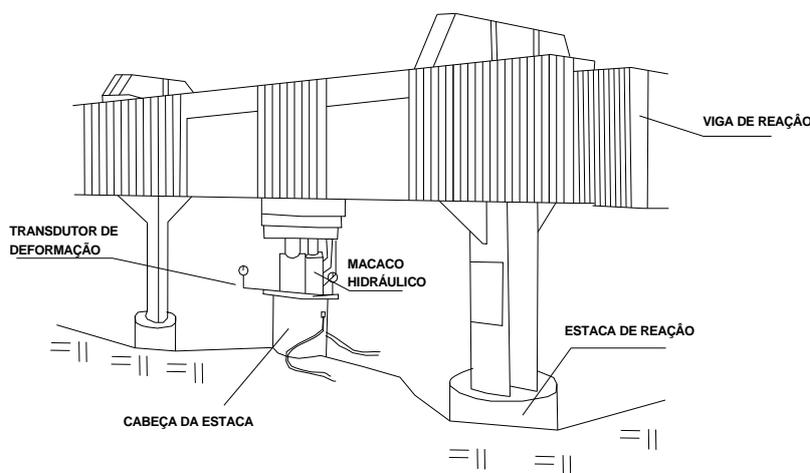


Figura 2.4-Sistema de reação aplicada por estacas (modificado REESE, 1984)

2.4.1. Prova de Carga estática em compressão

Provas de carga estática realizadas no ensaio *SPT* podem determinar a resistência de atrito lateral do amostrador ou a resistência na ponta a partir dos ensaios de prova de carga estática de tração e compressão, respectivamente (RAUSCHE *et al.*, 1995).

Lutenegger e Kelley (1998) realizaram, em areia fina e média, ensaios SPT que foram complementados pela medida de torque (SPT-T). Além disso, realizaram ensaios de compressão e de tração. No ensaio de compressão foi aplicada uma força quase-estática para o avanço da penetração do amostrador, sendo a força de compressão medida a cada 76 mm de penetração do amostrador no solo. O ensaio de tração foi executado após o ensaio SPT-T ou de compressão. Esse ensaio consiste em medir a máxima força de tração requerida para remover o amostrador. Esses pesquisadores concluíram que os ensaios de tração e compressão proporcionam informações sobre o atrito lateral.

A resistência do solo pode ser uma combinação da resistência de atrito lateral e da ponta do amostrador. A conclusão é que, se a resistência de atrito lateral é determinada a partir de um ensaio *SPT-T* ou ensaio de prova de carga estática de compressão, então a resistência na ponta pode ser calculada a partir da resistência total. Os ensaios foram executados da mesma maneira que Rausche *et al.* (1995). Esses ensaios foram realizados substituindo o amostrador padrão por uma ponta de diferentes dimensões (ABOU-MATAR *et al.*, 1996).

Neves (2004) realizou ensaios de prova de carga estática sobre o amostrador *SPT* para obter a curva carga-recalque. Esses ensaios foram realizados após o ensaio *SPT* e 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 300 mm do amostrador. Ele concluiu que pode obter-se a eficiência do ensaio SPT através da prova de carga estática sobre o amostrador.

A metodologia utilizada para o ensaio de prova de carga estática sobre o amostrador (RAUSCHE *et al.*, 1995; ABOU-MATAR *et al.*, 1996; LUTENEGGER e KELLEY, 1998; NEVES, 2004) é semelhante ao ensaio de prova de carga estática numa estaca. Por essa razão e pela falta de normatização que se utiliza o ensaio de prova de carga estática em compressão

para estacas como, por exemplo: a norma ASTM D1143, D1143M-07 e NBR12131, que apresentam os procedimentos de ensaios de prova de carga detalhadamente, assim como informações sobre equipamentos necessários (dispositivos de carga e medida) e apresentação de resultados.

2.4.2. Interação do amostrador-solo no evento estático

O amostrador do *SPT* apresenta uma similaridade às estacas cravadas de ponta aberta. Em ambos os casos ocorre o fenômeno de embuchamento. Se o solo embuchar no interior do amostrador, a resistência mobilizada pelo solo deve ser calculada através do atrito interno, do atrito externo e da resistência de ponta desenvolvida ao longo da seção transversal (Figura 2.5).

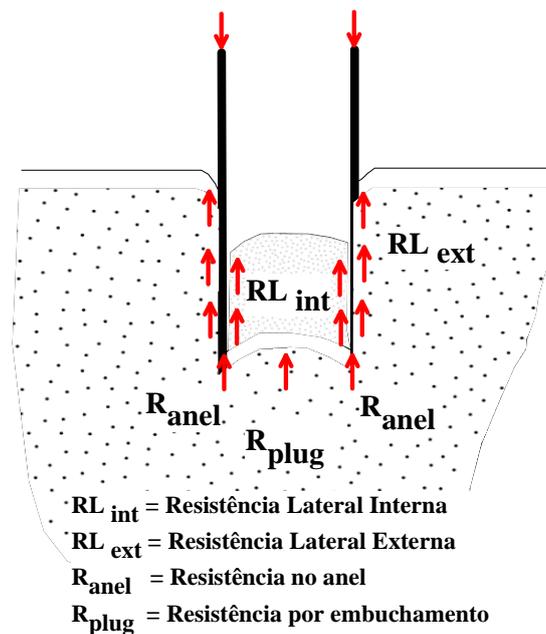


Figura 2.5-Resistências produzidas pela Interação da estaca metálica de ponta aberta e o solo (modificado SOO et al., 1980)

A resistência estática total da estaca é dada pela equação 2.42:

$$R_s = R_L + R_P \quad (2.42)$$

onde R_s é a resistência estática da estaca-solo, R_L e R_P a resistência lateral e na ponta, respectivamente.

O comportamento de estacas de ponta aberta é um tanto mais complexo. Numa estaca cravada de ponta aberta, forma-se um embuchamento dentro da estaca durante a cravação. O comprimento desse embuchamento pode ser igual ou menor que a profundidade de cravação da estaca. Podem ocorrer três casos: modo que não apresenta embuchamento, embuchado parcial e embuchado total (PAIKOWSKI *et al.*, 1989).

A resistência de ponta dependerá do embuchamento, da resistência mobilizada na seção anular da estaca e da resistência devido ao embuchamento do solo. Assim, a resistência de ponta é dada por:

$$R_p = R_{plug} + R_{anel} \quad (2.43)$$

onde: R_p = resistência na base da estaca;

R_{plug} = resistência devido ao embuchamento do solo;

R_{anel} = resistência no anel entre solo e a estaca (LEE *et al.*, 2003).

Então, a resistência estática (R_s) é dada pela seguinte equação:

$$R_s = R_{anel} + R_{plug} + R_L \quad (2.44)$$

No cálculo da resistência estática de estacas, a condição embuchada ocorre com frequência em solos com pequena resistência de ponta, como em argilas e siltes. A condição de não embuchamento é mais provável em areias compactas (DE RUITER e BERINGEN, 1979).

Devido à semelhança entre a cravação do amostrador do *SPT* no solo e a cravação da estaca metálica de ponta aberta, a equação 2.44 pode ser utilizada para avaliar a resistência estática no amostrador- solo.

2.5. Princípio de Hamilton aplicado à prova de carga dinâmica e estática no amostrador SPT.

2.5.1. Princípio de Hamilton aplicado ao ensaio SPT

A aplicação do princípio da conservação de energia de Hamilton à análise da cravação de estacas e ao ensaio *SPT* foi proposta por Aoki (1997) e Aoki e Cintra (2000). O princípio de Hamilton é representado pela equação 2.45:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(T - V) dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta(W_{nc}) dt = 0 \quad (2.45)$$

onde: δ = uma variação ocorrida entre os instantes t_1 e t_2 ;

T = energia cinética total do sistema;

V = energia potencial no sistema;

W_{nc} = trabalho efetuado pelas forças não conservativas (incluindo amortecimento).

Esse princípio pode ser aplicado no caso de carregamento estático e dinâmico. Para o carregamento estático, a energia cinética total do sistema é igual a zero (CLOUGH e PENZIEN, 1995). No caso de prova de carga dinâmica, a energia potencial nominal do ensaio *SPT* é constituída de três parcelas de energia: potencial (V), cinética (T) e trabalho das forças não conservativas (W_{nc}). A Figura 2.6 mostra essas parcelas conforme a onda de impacto avança na haste até atingir o amostrador, onde: (NEVES, 2004).

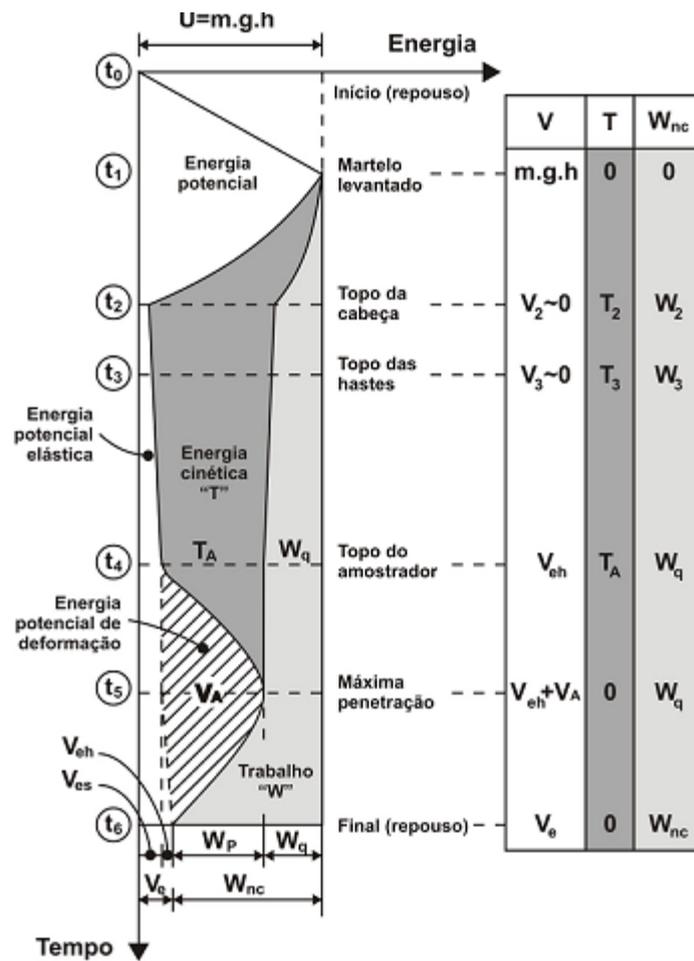


Figura 2.6-Evolução de energia potencial, cinética e trabalho durante o evento *golpe do martelo* (NEVES, 2004).

1. No instante t_0 , o sistema está em repouso e apresenta uma energia potencial nominal U que é igual ao produto do peso do martelo vezes a altura de queda.
2. No instante t_1 , o martelo é levantado a uma altura de 750 mm e apresenta uma energia potencial nominal U equivalente a $478,3\text{ J}$.
3. No instante t_2 , após a liberação, o martelo atinge o topo da cabeça de bater. Durante o intervalo de tempo (t_2-t_1) , a energia potencial nominal U se transforma em energia cinética T_2 , energia de deformação elástica (V_2) e trabalho das forças não conservativas W_2 . A energia V_2 deve-se às deformações da corda utilizada no ensaio, podendo ser considerada desprezível. O trabalho

das forças não conservativas W_2 é gerado por muitos fatores, tais como: atrito em roldanas e guias, inércia do próprio sistema e coxins de madeira.

4. Durante o intervalo de tempo (t_3-t_2) a onda percorre a cabeça-de-bater até atingir o topo das hastes. Como o comprimento é curto, as variações das energias são muito pequenas.
5. Durante o intervalo (t_4-t_3) a energia cinética T_3 é reduzida para T_A . O restante da energia é transformado em energia potencial V_{eh} e em trabalho realizado por forças não conservativas, que se convertem em W_q . Alguns fatores que causam essa transformação de energia são: i) comprimento de conjunto de hastes, ii) tipo de haste, iii) deformações permanentes nas luvas das hastes e, iv) flambagem das hastes.

Quanto maior o comprimento das hastes, menor é o valor de T_A . A

energia T_A é a máxima energia cinética que atinge o topo do amostrador.

6. Durante o intervalo (t_5-t_4) acontece a penetração do amostrador no solo. No instante t_5 ocorre a máxima penetração do amostrador e a energia cinética T_A se transforma totalmente em energia potencial de deformação (V_A). Consequentemente, no instante t_5 , a energia potencial total é igual à soma da energia potencial acumulada e a energia potencial de deformação ($V_{eh} + V_A$). A energia cinética é igual a zero, pois toda energia cinética se transformou em energia potencial de deformação e trabalho de forças não conservativas (W_q) (NEVES, 2004).
7. No intervalo (t_6-t_5) , uma pequena parte de energia potencial de deformação (V_A) se transforma em energia potencial elástica (V_{es}) e a diferença se transforma em trabalho de forças não conservativas (W_p).

8. No instante t_6 , que corresponde ao final do evento, toda energia potencial elástica (V_e) acumulada no conjunto de hastes (V_{eh}) e no solo que envolve o amostrador (V_{es}) é restituída e o sistema entra em repouso. (Ver equação 2.46). Para este mesmo instante, o trabalho das forças não conservativas (W_{nc}) é constituído pela parcela W_q e pela parcela W_p , que correspondem ao trabalho final gerado pelas forças resistentes não conservativas mobilizadas ao longo do amostrador durante a sua penetração no solo. Logo, ao finalizar a transformação da energia entre o instante inicial (t_1) e o instante final (t_6), a energia nominal é igual à soma da energia potencial de deformação e o trabalho das forças não conservativas. (Ver equação 2.47)

$$V_e = V_{eh} + V_{es} \quad (2.46)$$

$$U = V_e + W_{nc} \quad (2.47)$$

Uma transferência de energia importante é a análise no instante t_5 quando o amostrador alcança a sua maior penetração no solo e a energia potencial ($V_{eh} + V_A$) é numericamente a área $OADO$, mostrada na Figura 2.7. Essa figura mostra a curva de carga e descarga correspondente à penetração do amostrador no solo. O trecho OA corresponde à trajetória de carregamento no ensaio dinâmico e o trecho AC corresponde à trajetória de descarregamento. O valor de R_t é a máxima força resistente dinâmica, ρ_e e ρ_p representam as componentes elásticas e permanentes da máxima penetração (ρ_{max}), respectivamente (AOKI *et al.*, 2007).

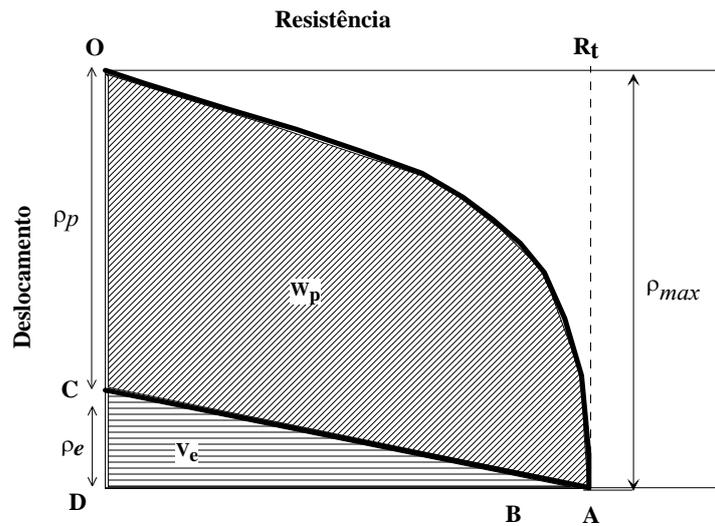


Figura 2.7-Curvas de Carga e Descarga no amostrador SPT (Modificado AOKI *et al.*, 2007).

A Figura 2.6 mostra que na etapa de transformação a energia potencial V_A não depende da energia potencial acumulada nas hastes (V_{eh}) e do trabalho das forças não conservativas geradas nas conexões das hastes (W_q). Então, no instante t_5 , quando a penetração do amostrador alcança seu máximo valor, tem-se:

$$V_A = T_A \quad (2.48)$$

Aplicando-se o princípio de Hamilton ao intervalo (t_6-t_5) , essa equação pode ser escrita como:

$$0 + V_e - V_A + W_p = 0 \quad (2.49)$$

Assim, ao final do impacto (instante t_6), quando a penetração permanente do amostrador é igual a ρ_p , tem-se:

$$V_A = V_e + W_p \quad (2.50)$$

A equação 2.50 mostra que a energia potencial de deformação V_A é igual à soma da energia potencial de deformação V_e mais o trabalho realizado pelas forças não conservativas gerado durante a penetração do amostrador no solo W_p no intervalo (t_6-t_5) .

Combinando as equações 2.48 e 2.50, pode-se escrever:

$$T_A = V_A = V_e + W_p \quad (2.51)$$

A energia cinética T_A , que é a máxima energia aplicada no topo do sistema amostrador-solo (AOKI e CINTRA, 2000), é calculada através da equação 2.52:

$$T_A = \int_0^{\infty} F(l,t) \cdot v(l,t) dt \quad (2.52)$$

onde $F(l,t)$ e $v(l,t)$ são a força e velocidade, respectivamente, medidas no topo do amostrador.

A energia cinética T_A é utilizada na definição de uma nova eficiência, η^* , que é obtida pela relação entre a máxima energia transferida ao sistema amostrador-solo (T_A) e a energia nominal do SPT (U) (AOKI e CINTRA, 2000).

$$\eta^* = \frac{T_A}{U} \times 100\% \quad (2.53)$$

A parcela de energia elástica do solo, V_{es} , é desprezível para o caso de areias e siltes arenosos. Igualmente, o valor de energia potencial acumulada do conjunto de hastes, V_{eh} , também é desprezível quando se utiliza hastes curtas. Por conseguinte, o valor da energia potencial elástica V_e é desprezível (Figura 2.6) (AOKI e CINTRA, 2000):

$$V_e = V_{eh} + V_{es} = 0 \quad (2.54)$$

A curva carga-deslocamento num ensaio dinâmico de carga constante não é conhecida. Entretanto, essa curva pode ser obtida com o ensaio dinâmico com carga crescente (DIET) (AOKI, 1997). Nessa figura tem-se:

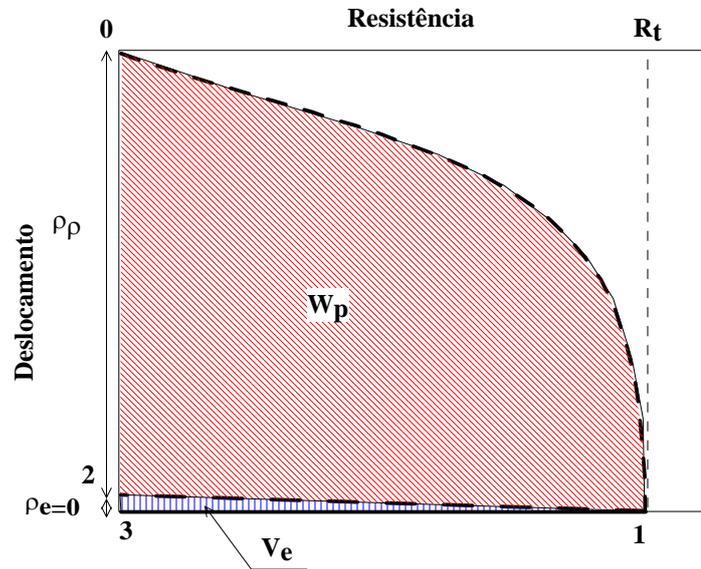


Figura 2.8-Ensaio de uma prova de carga dinâmico sobre amostrador padrão (modificado de AOKI, 2000)

onde: ρ = deslocamento total do carregamento dinâmico;

ρ_e = deslocamento elástico do carregamento dinâmico;

ρ_p = deslocamento permanente do carregamento dinâmico;

V_A = energia potencial de deformação armazenada no sistema;

V_e = energia de deformação elástica;

W_p = trabalho de penetração do mostrador no solo;

Mas, como o valor de V_e é praticamente desprezível, então, a energia potencial nominal U é praticamente igual ao trabalho das forças não conservativas W_{nc} .

$$U = V_e + W_{nc} = 0 + W_{nc} = W_{nc} \quad (2.55)$$

A energia potencial de deformação (V_A) também é praticamente igual ao trabalho das forças não conservativas gerado durante a penetração do amostrador no solo (W_p). Assim, tem-se:

$$V_A = V_e + W_p = 0 + W_p = W_p \quad (2.56)$$

Combinando as equações 2.48 e 2.56, obtém-se que a energia cinética T_A é:

$$T_A = V_A = W_p \quad (2.57)$$

Substituindo a equação 2.57 na equação 2.53 obtém-se a eficiência do ensaio *SPT* em função do trabalho das forças não conservativas gerado durante a penetração do amostrador no solo (W_p) e a energia potencial nominal (U). Assim, a eficiência do ensaio *SPT* é calculada pela seguinte expressão.

$$n^* = \frac{W_p}{U} \times 100\% \quad (2.58)$$

2.5.2. Princípio de Hamilton aplicado à prova de Carga estática no amostrador SPT

Em uma prova de carga estática executada sobre o amostrador do *SPT* obtém-se o deslocamento total (ρ_s) que é igual à soma das parcelas do deslocamento elasticamente recuperável ($\rho_{e,s}$) e do deslocamento permanente ($\rho_{p,s}$), respectivamente (NEVES, 2004).

$$\rho_s = \rho_{e,s} + \rho_{p,s} \quad (2.59)$$

Após a fase do descarregamento, a energia potencial de deformação ($V_{A,s}$) é transformada em energia recuperada ($V_{e,s}$) mais o trabalho das forças não conservativas ($W_{p,s}$). Quando o deslocamento é máximo, a força resistente estática também é máxima (R_s).

Para materiais perfeitamente elásticos a trajetória de carregamento é OA e o caminho de descarregamento é AO . O trabalho de forças não conservativas, W_{nc} , é igual a zero e a energia de deformação $V_{A,s}$ é igual a $V_{e,s}$ (AOKI et al., 2007) (Figura 2.9).

$$V_{A,s} = V_{e,s} + W_{p,s} = V_{e,s} + 0 = V_{e,s} \quad (2.60)$$

$$\rho_s = \rho_{e,s} \quad (2.61)$$

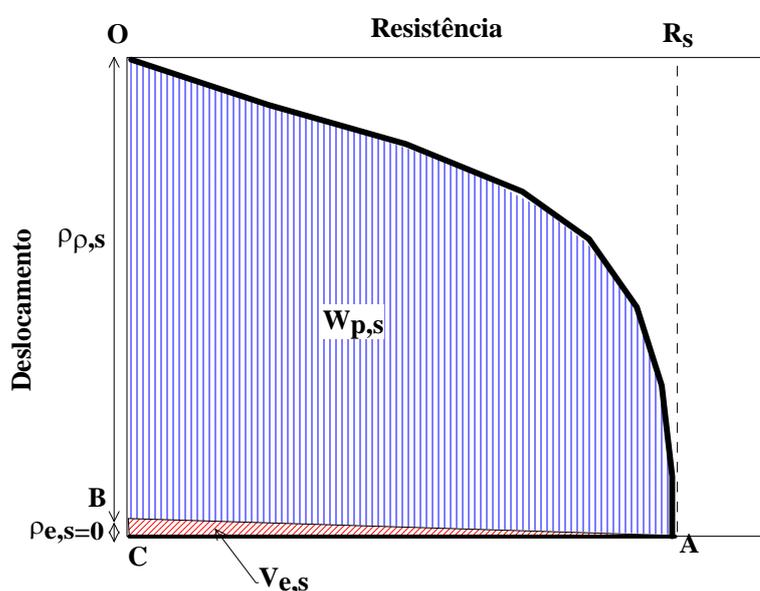


Figura 2.9-Ensaio de uma prova de carga estática sobre amostrador padrão (modificado AOKI et al., 2007)

No caso de materiais perfeitamente rígidos-plásticos, a trajetória de descarregamento seria uma linha horizontal AC . Portanto, a energia de deformação ($V_{A,s}$) é transformada completamente em trabalho das forças não conservativas. Como resultado, o deslocamento elasticamente recuperável é igual a zero (AOKI, 2000). No caso das areias e siltes o valor de $V_{e,s}$ é muito baixo, praticamente desprezível (Figura 2.9).

$$V_{A,s} = V_{e,s} + W_{p,s} = 0 + W_{p,s} = W_{p,s} \quad (2.62)$$

$$\rho_s = \rho_{e,s} + \rho_{p,s} = 0 + \rho_{p,s} = \rho_{p,s} \quad (2.63)$$

2.5.3. Comparação da prova de carga estática com a prova de carga dinâmica no amostrador SPT

Para o caso de areias e siltes arenosos, a energia potencial elástica (V_e) é praticamente desprezível (NEVES, 2004).

A Figura 2.10 mostra as curvas de carga e descarga correspondentes à penetração do amostrador no solo. Os trechos OA e OB correspondem às trajetórias de carregamento nos ensaios dinâmico e estático, respectivamente. Os trechos AC e BC correspondem às trajetórias de descarregamento nos ensaios dinâmico e estático, respectivamente. Para areias e siltes esses trechos de descarregamento são praticamente horizontais. Nesta figura os valores de R_s e R_t representam a máxima força resistente estática e dinâmica, respectivamente. Os valores de ρ_e e ρ_p representam as componentes elásticas e permanentes da máxima penetração (ρ_{max}), respectivamente (AOKI et al., 2007).

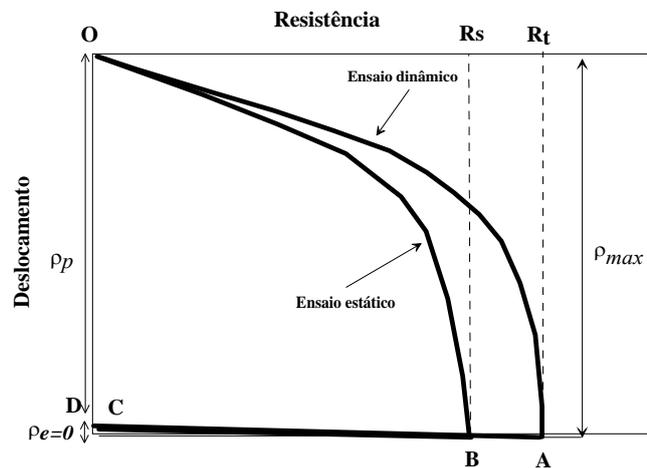


Figura 2.10-Curvas de Carga e Descarga no amostrador SPT (Modificado AOKI et al., 2007).

A resistência dinâmica total (R_t) ou simplesmente resistência dinâmica mobilizada é calculada como a soma das parcelas de resistência dinâmica na ponta e resistência dinâmica lateral, na interface amostrador-solo. Uma prova de carga dinâmica apresenta uma forma

análoga ao carregamento estático. Ensaios experimentais mostraram que no instante em que acontece o máximo deslocamento (ρ_{max}), o valor de resistência estática (R_s) é praticamente igual à resistência total dinâmica (R_t).

$$R_t \cong R_s \quad (2.64)$$

Assim, o trabalho das forças não conservativas (W_p) nos ensaios dinâmicos é praticamente igual ao trabalho das forças não conservativas ($W_{p,s}$) nos ensaios estáticos, executados sobre o amostrador logo após sua cravação dinâmica:

$$W_{p(dinâmico)} \cong W_{p,s(estático)} \quad (2.65)$$

Mesmo que W_p e $W_{p,s}$ tenham valores similares, a forma da curva carga–recalque do ensaio dinâmico ainda é desconhecida (Ver Figura 2.11).

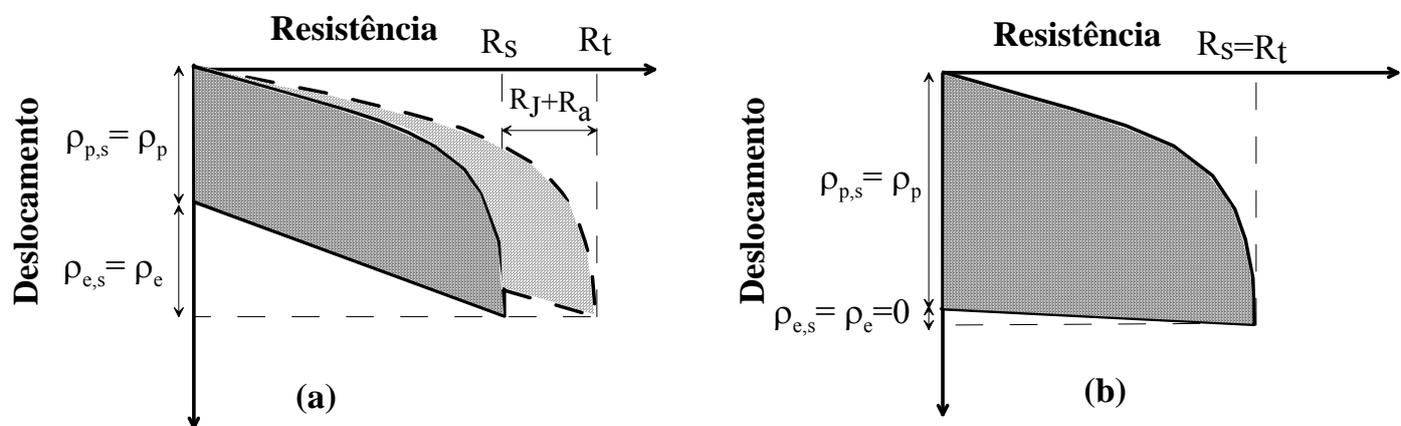


Figura 2.11-Comparação entre provas de carga dinâmica e estática executadas sobre o amostrador *SPT* para areias e siltes arenosos (modificado NEVES, 2004).

2.6. Resistência Estática desenvolvida durante a penetração do amostrador

Existem vários métodos para o cálculo da resistência estática desenvolvida durante a penetração do amostrador. Neste item são descritas as contribuições de Aoki *et al.* (2007), Schmertmann (1979) e Souza (2009), Odebrecht (2003) e Smith (1960) e Aoki (1997). Essas

contribuições estimam a resistência estática no sistema amostrador-solo com base nos dados obtidos de campo e que serão analisados e comparados nas análises de resultados.

2.6.1. Contribuição de Aoki *et al.* (2007)

A resistência estática à penetração do amostrador do *SPT* pode ser obtida a partir da prova de carga realizada sobre o sistema constituído pelas hastes, amostrador e solo (AOKI *et al.*, 2007).

Aoki *et al.* (2007) consideram que a resistência total oferecida pelo sistema de cravação do amostrador no solo no evento dinâmico, R_t , é igual à resistência estática, R_s .

$$R_t(t) \cong R_s(t) \quad (2.64 \text{ bis})$$

Então, o valor da resistência estática, R_s , é igual ao produto do trabalho das forças não conservativas gerado durante a penetração do amostrador no solo (W_p) e a penetração permanente do amostrador no solo, ρ_p .

$$R_t = R_s = \frac{W_p}{\rho_p} \quad (2.66)$$

Além disso, a máxima energia transferida ao topo do sistema amostrador-solo é o valor da energia T_A . Essa energia tem o mesmo valor da energia potencial de deformação (V_A) e o mesmo valor do trabalho das forças não conservativas gerado durante a penetração do amostrador no solo no evento dinâmico, W_p .

$$T_A = V_A = W_p \quad (2.57 \text{ bis})$$

Os valores do trabalho das forças não conservativas no evento dinâmico e estático são iguais em ensaios realizados em areia e siltes arenosos.

$$W_{p(\text{dinâmico})} \cong W_{p,s(\text{estático})} \quad (2.65 \text{ bis})$$

Então, substituindo a equação 2.65 na equação 2.57 obtêm-se a equação 2.67:

$$T_A = V_A = W_{p,s} \quad (2.67)$$

Utilizando a equação 2.66 e 2.67 tem-se que a força de resistência estática pode ser avaliada como a equação 2.68:

$$R_s = \frac{W_{p,s}}{\rho_\rho} = \frac{V_A}{\rho_\rho} = \frac{T_A}{\rho_\rho} \quad (2.68)$$

A penetração devida a um golpe do martelo pode ser relacionada com o valor do índice N_{SPT} :

$$\rho_\rho = \frac{0.3}{N_{SPT}} \quad (2.69)$$

Combinando as equações 2.68 e 2.69, a resistência estática correspondente a um golpe pode ser avaliada pela seguinte equação:

$$R_s = T_A \cdot \frac{N_{SPT}}{0.3} \quad (2.70)$$

Utilizando as equações 2.53 e 2.70, a resistência estática é dada pela equação 2.71.

$$\eta^* = \frac{T_A}{U} \times 100\% \quad (2.53 \text{ bis})$$

$$R_s = \frac{\eta^* \cdot 0.478 \cdot N_{SPT}}{0.30} (kN) \quad (2.71)$$

2.6.2. Contribuição de Schmertmann (1979) e De Souza (2009)

Schmertmann (1979) compara a resistência atuante durante a penetração lenta do amostrador do *SPT* no solo com a resistência à penetração obtida com o ensaio de cone *CPT* (Figura 2.12).

A força adicional, F , requerida para a penetração carga estática do amostrador *SPT* somada com o peso das hastes mais o peso do amostrador, W' , é igual à soma da resistência na ponta, mais a soma das resistências por atrito externo, F_e , e interno, F_i , e forças de adesão.

$$F + W' = F_p + (F_e + F_i) \quad (2.72)$$

$$F = q \cdot A_t + f \cdot \pi \cdot \rho \cdot (ID + OD) - W' \quad (2.73)$$

onde: A_t = área na ponta do cone;

f = atrito unitário médio externo e interno no amostrador;

ID = diâmetro interno do amostrador;

OD = diâmetro externo do amostrador;

ρ = comprimento de penetração do amostrador no solo.

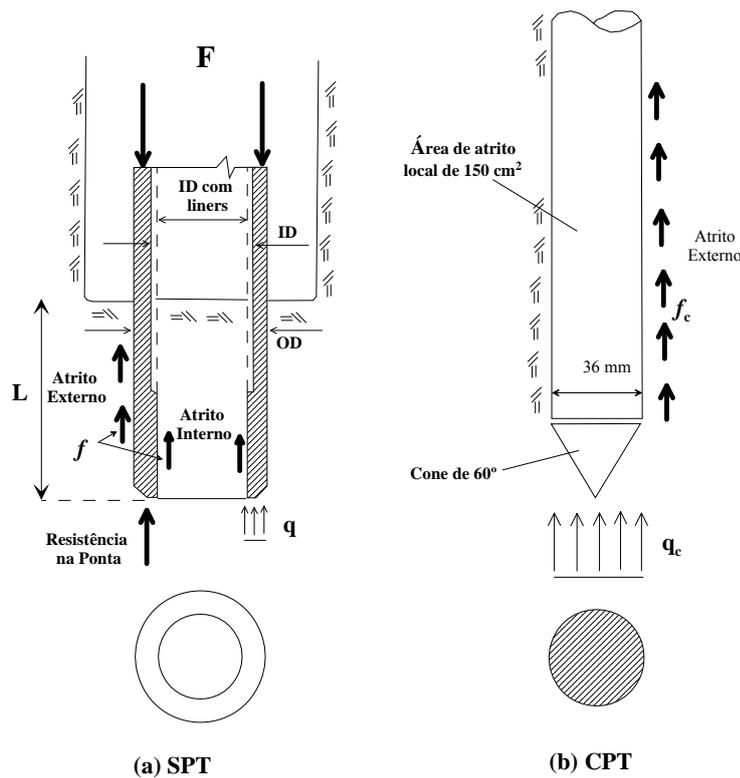


Figura 2.12-Forças que atuam a) em um Amostrador do SPT e b) em um CPT padrão de 10 cm² durante a penetração quase-estática (modificado SCHMERTMANN, 1979)

Considera-se que tensão q seja igual a uma constante, C_1 , vezes a resistência final de ponta do ensaio de cone, q_c , ou seja, $q=C_1q_c$. Considera-se ainda que o atrito unitário, f , é igual a uma constante, C_2 , vezes o atrito lateral no ensaio de cone f_c , ou seja, $f=C_2f_c$.

$$F + W' = C_1 \cdot q_c \cdot A_T + (ID + OD) \cdot \pi \cdot \rho \cdot C_2 \cdot f_c \quad (2.74)$$

sendo $R_f = f_c/q_c$ a razão de atrito do ensaio de cone, a equação 2.74 pode ser escrita como:

$$F + W' = [C_1 \cdot A_T + (ID + OD) \cdot \pi \cdot \rho \cdot C_2 \cdot R_f] q_c \quad (2.75)$$

Schmertmann (1979) propõe valores para C_1 e C_2 iguais a 1,0 e 0,7, respectivamente, para cones mecânicos. Sugere também que os valores C_1 e C_2 sejam iguais a 1,0 para dados obtidos com cone elétrico.

A energia requerida em adição à energia potencial de W' para uma penetração estática do amostrador *SPT* é igual ao incremento de comprimento de penetração do amostrador no solo, $\Delta\rho$, multiplicada pela força estática requerida adicional média sobre esse intervalo de penetração, F_m . Isso porque a equação 2.75 mostra que F aumenta linearmente com ρ . Esta força média é igual ao valor de F quando ρ tem um valor médio ρ_m sobre $\Delta\rho$. Então, designando por ΔN o incremento da quantidade de golpes do *SPT* no intervalo de penetração $\Delta\rho$, considerando-se que ΔN depende linearmente da adição de energia requerida para a penetração quase-estática sobre o mesmo intervalo, obtêm-se a equação 2.76.

$$\Delta N \approx F_m \cdot \Delta\rho \quad (2.76)$$

De acordo com a norma ASTM D-1586, deveria obter-se informação sobre os incrementos de penetração a cada 150 mm de penetração do amostrador no solo. Mas, para este caso o valor médio de penetração ρ_m é igual a 750 mm, 225 mm e 375 mm, para cada 150 mm de penetração do amostrador no solo. Depois, assume-se que q_c permanece constante para todos os três incrementos de penetração ($\Delta\rho$), iguais a 150 mm.

Para todos os casos, as equações 2.77, 2.78 e 2.79 expressam a razão para cada 150mm. O valor ΔN em comparação ao valor final de ΔN de 300 mm a 450 mm.

As razões entre cada ΔN , relativo para cada um dos três intervalos de penetração, em relação ao ΔN do intervalo final são:

$$X_1 = \frac{\Delta N_{15_{iniciais}}}{\Delta N_{15_{finais}}} = \frac{[10,7C_1 + 2,052C_2R_f(\%)]q_c - W'}{[10,7C_1 + 10,26C_2R_f(\%)]q_c - W'} \quad (2.77)$$

$$X_2 = \frac{\Delta N_{15_{intermediario}}}{\Delta N_{15_{finais}}} = \frac{[10,7C_1 + 6,156C_2R_f(\%)]q_c - W'}{[10,7C_1 + 10,26C_2R_f(\%)]q_c - W'} \quad (2.78)$$

$$X_3 = \frac{\Delta N_{15_{final}}}{\Delta N_{15_{fnais}}} = 1.0 \quad (2.79)$$

Previsões dos valores X_1 e X_2 , para valores de R_f variando de 1% a 8%, contemplam as premissas que C_1 e C_2 são iguais à unidade e W' é igual a zero. A partir dos valores de X_i são obtidos os valores da força F correspondentes ao N_{SPT} . Além disso, realiza-se a mesma análise para encontrar as parcelas de ponta e atrito como foi realizado por Schmertmann (1979). Mas, Souza (2009) desenvolveu esses valores para o amostrador brasileiro segundo a NBR 6484 (2001), como é mostrada no apêndice A na tabela A-1 e estes são representados na Figura 2.13:

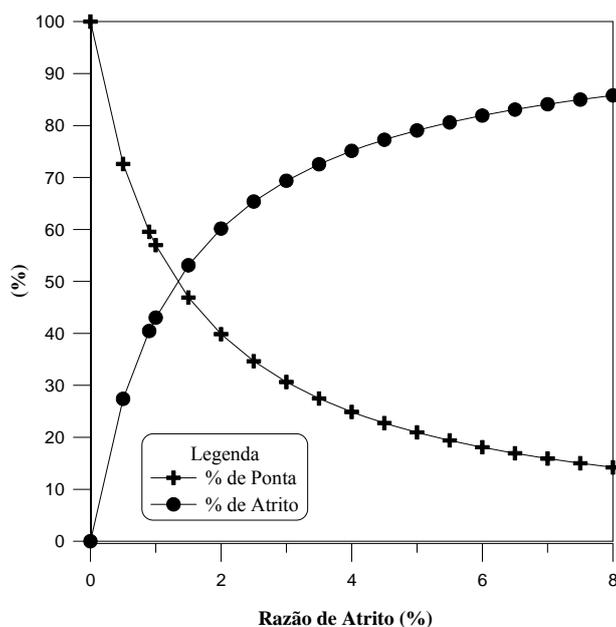


Figura 2.13-Adaptação da Curva proposta por SCHMERTMANN de acordo com a NBR 6484 (2001) (Modificado DE SOUZA, 2009)

A Figura 2.14 mostra um incremento linear de F em relação a incrementos de ρ . Fazendo um ajuste linear com os dados obtidos em campo (SCHMERTMANN, 1979) consegue-se uma extrapolação de F para ρ igual a zero. Isso acontece quando se adiciona um valor de W' que deveria ser igual à resistência de ponta do amostrador F_p .

O mesmo autor também apresenta alguns dados de força e penetração ($q-s$). A penetração ($q-s$) é a penetração do amostrador *SPT* sobre o intervalo de penetração de 0 a 450 *mm*. Schmertmann (1979) mostra exemplos utilizando penetração ($q-s$) com medidas da força requerida para a penetração.

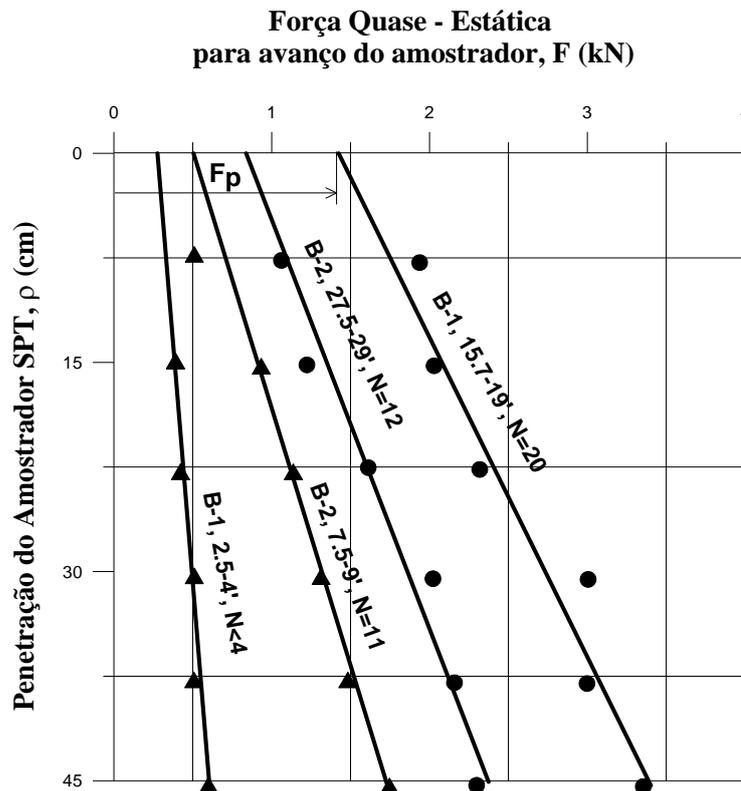


Figura 2.14-Exemplo da extrapolação para cálculo de F_p (modificado SCHERTMANN, 1979 (b) ; DE SOUZA, 2009)

Na Figura 2.14, a área sobre a profundidade $\Delta\rho$ de 150 *mm* a 450 *mm* representa a energia $q-s$ adicionada ao valor de W' (300 *mm*) requerida para a penetração do amostrador ($E' =$ energia 300 *mm*).

Uma comparação dos valores de N_{SPT} e valores de E' interpolados é mostrada na Figura 2.15. Esses dados demonstram uma aproximação proporcional linear entre N_{SPT} e E' para ambos os casos com *liner* ou sem *liner*. Para os dois casos produzem resultados similares e a dispersão dos dados não é excessiva quando se considera uma variação natural do solo no local e a necessidade para interpolar para E' . Esses dados suportam o conceito expressado na

equação 2.76 que descreve que o valor de N_{SPT} varia proporcionalmente com a energia adicional requerida.

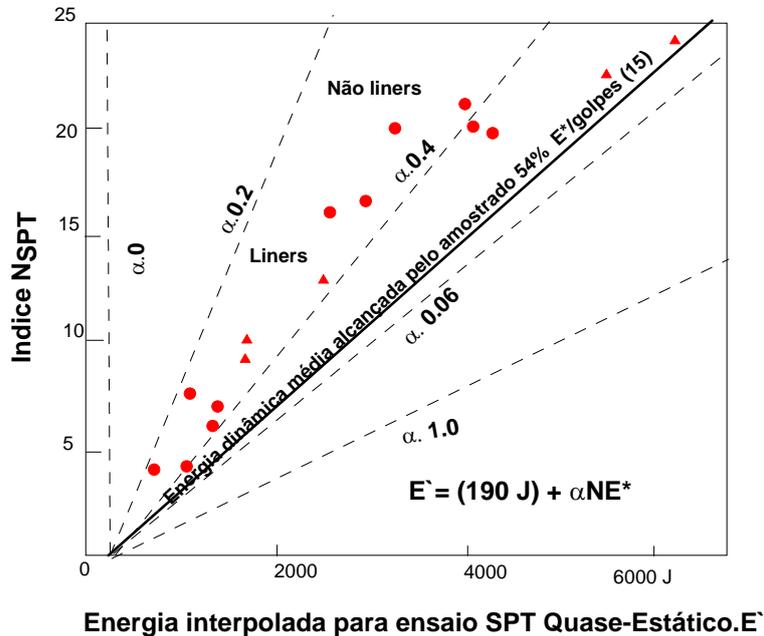


Figura 2.15-Energia quase-estática necessária à penetração para uma eficiência η igual a 0,54 (modificado de SCHERTMANN, 1979 (b))

A energia potencial entregue ao amostrador pelo peso do conjunto de hastes (W' para o valor de 300 mm) não faz parte da energia adicional resultante do uso do martelo. De acordo com a equação 2.76 Schmertmann (1979), que não inclui a energia potencial do martelo na definição de E' .

A energia E^* é à máxima quantidade possível de energia dinâmica de impacto do *SPT* e é igual ao produto do peso do martelo e a altura de queda (padrão americano é de 474 J). A máxima energia que o martelo do *SPT* pode fornecer durante a amostragem em N_{SPT} golpes é igual a $(N_{SPT}E^* + M_m \cdot g \cdot h_p)$. O valor de $M_m \cdot g \cdot h_p$ sobre o padrão americano é de 190 J que resulta do peso do martelo, $M_m \cdot g$, caindo de uma altura, h_p , de 305 mm durante a penetração.

As linhas apresentadas na Figura 2.15 incluem uma constante, α , que é usada para estimar a máxima energia transmitida ao amostrador. Esse valor médio para areias é de 0,42 e

0,33 para solos argilosos. A máxima energia transmitida ao amostrador, E'' , é calculada por αNE^* .

$$E'' = E_{amostrador} = \alpha NE^* \quad (2.80)$$

$$E' = E'' + M_m g h_p \quad (2.81)$$

Realizou-se a calibração dinâmica do equipamento e mediu-se a eficiência, η , que é a porcentagem da energia E^* que alcançava o amostrador, resultando um valor de 54% do E^* .

A energia requerida à penetração do amostrador *SPT* normalmente excede àquela necessária à penetração estática *CPT* causada pelas perdas ao deslocamento elástico do solo, aos efeitos viscosos. Por ser mais relevante o efeito viscoso nos solos argilosos, pode ser considerado com a razão β entre a parcela dinâmica e a estática necessária à penetração do amostrador em solos argilosos, que deve exceder àquela requerida aos solos arenosos (SOUZA, 2009). O valor de β é calculado através da equação 2.82:

$$\beta = \frac{\eta}{\alpha} \quad (2.82)$$

Para uma eficiência η de 54%, o valor médio β é de 1,64 para solos argilosos e 1,29 em solos arenosos.

O valor de N_{SPT} pode ser escrito também como:

$$N_{SPT} = \frac{E'' \beta}{\eta E^*} \quad (2.83)$$

Um valor de β deveria ser constante para um mesmo solo e η também para um mesmo equipamento e equipe de sondagem. Para β , E'' , E^* constantes, o valor de N_{SPT} varia inversamente com a eficiência η .

Então é possível estimar a força estática média necessária para penetrar o amostrador *SPT* utilizando a equação 2.84:

$$E' = F \cdot \Delta\rho \quad (2.84)$$

Utilizando as equações 2.80, 2.81 e 2.84, estima-se a resistência estática média necessária à penetração do amostrador *SPT*.

$$F = \frac{\alpha N_{SPT} E^* + M_m g h_p}{\Delta\rho} \quad (2.85)$$

A análise de Schmertmann (1979) considera que o amostrador não é embuchado. Para avaliar a resistência estática nos ensaios realizados no Brasil, o amostrador deve ser utilizado nos casos onde se produz embuchamento. Além de determinar a força de resistência estática, permite uma previsão da resistência estática, q_c , atrito local, f , e razão de atrito do cone, R_f (SOUZA, 2009).

2.6.3. Contribuição de Odebrecht *et al.* (2003)

Odebrecht (2003) contribuiu com uma nova metodologia para a interpretação do ensaio *SPT*, com base nos conceitos de energia, a partir da qual é possível estimar a força dinâmica F_d de penetração do amostrador no solo.

A energia produzida pelo impacto do martelo é uma função da altura de queda, h_q , (altura de queda teórica de 750 mm) acrescida pela penetração permanente, ρ_p . Como consequência, a energia efetivamente empregada na cravação do amostrador no solo é função de quatro fatores: altura de queda, h_q , massa do martelo, M_m , tipo do solo que determina a magnitude do ρ_p , e a geometria das hastes, que determina a massa do conjunto das hastes, M_h .

A máxima energia potencial gravitacional do sistema é estimada mediante o princípio de conservação de energia com uma referência externa fixa fora do sistema (Figura 2.16).

Essa energia é dada por:

$$\Delta EPG^{sistema} = (h_q + \rho_p)M_m g + \rho_p M_h g \quad (2.86)$$

Ordenando a equação 2.86 obtêm-se a equação 2.87:

$$\Delta EPG^{sistema} = (M_m \cdot g \cdot h_q) + \rho_p \cdot g \cdot (M_m + M_h) \quad (2.87)$$

A máxima energia potencial gravitacional do sistema é igual à soma da energia potencial nominal (U) mais a energia potencial gravitacional do martelo e a energia potencial gravitacional da haste:

$$\Delta EPG^{sistema} = U + \rho_p \cdot g \cdot (M_m + M_h) \quad (2.88)$$

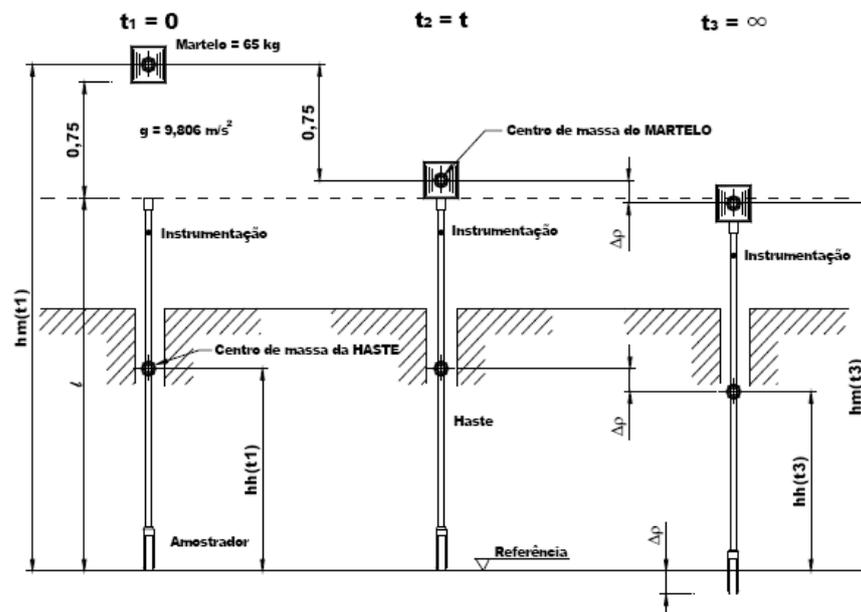


Figura 2.16-Estágios de cravação do amostrador no solo (ODEBRECHT, 2003)

A equação 2.86 é uma condição ideal na qual não se incluem as perdas de energia ao processo de cravação do amostrador no solo. Essas perdas, que têm influência no valor do N_{SPT} se expressam através da eficiência do equipamento. Odebrecht (2003) incorporou essas perdas de energia utilizando coeficientes de eficiência do martelo η_1 , da haste η_2 e do sistema η_3 .

A equação 2.86 é redefinida como a energia potencial gravitacional do sistema no amostrador como a equação 2.89:

$$E_{amostrador} = \eta_3 \left[\eta_1 (h_q + \rho_p) M_m g + \eta_2 \rho_p M_h g \right] \quad (2.89)$$

O valor de η_1 é 0,764; η_2 é igual a 1,0 e η_3 é expresso em função do comprimento das hastes (l):

$$\eta_3 = 1 - 0,0042l \quad (2.90)$$

Quando a instrumentação é posicionada junto ao amostrador, a energia é dependente da força de massa decorrente do peso do conjunto de hastes localizada acima da célula de carga (F_h) e é calculada mediante a seguinte equação (ODEBRECHT, 2003):

$$F_h = M_h \cdot g \quad (2.91)$$

onde M_h é a massa do conjunto de hastes posicionado acima da célula de carga, g é a aceleração da gravidade e ρ_p é a penetração permanente.

Então, a energia estimada E_i com base nos registros da instrumentação apresentada na equação 2.11 é corrigida devido à posição da instrumentação no sistema cabeça de bater–conjunto-de-hastes–amostrador. No caso que a instrumentação está localizada junto ao amostrador, a equação 2.11 é escrita como:

$$E_i = \int_{t_1}^{t_2} Fv \, dt \quad (2.11 \text{ bis})$$

$$E_i = \int_{t_1}^{t_2} Fv \, dt + F_h \cdot \rho_p \quad (2.92)$$

A energia corrigida E_i devido à energia potencial da haste até alcançar uma penetração permanente ρ_p é conhecida como a energia cinética T_A' e pode ser calculada com a equação 2.93:

$$T_A' = E_i = \int_{t_1}^{t_2} Fv \, dt + F_h \cdot \rho_p \quad (2.93)$$

O trabalho efetivamente entregue ao solo pode ser determinado utilizando-se o princípio de Hamilton (equação 2.45).

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(T - V) \, dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta(W_{nc}) \, dt = 0 \quad (2.45 \text{ bis})$$

onde T a energia cinética total do sistema, V a energia potencial no sistema, W_{nc} o trabalho efetuado pelas forças não conservativas (incluindo amortecimento) e δ a variação ocorrida durante o intervalo de tempo indicado (t_1 - t_2).

O instante t_1 é quando o martelo inicia a queda livre e o tempo t_2 o final do processo de cravação do amostrador, onde já foram dissipadas as energias cinéticas e elásticas.

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(V) \, dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta(W_p + W_d) \, dt = 0 \quad (2.94)$$

onde W_p é o trabalho efetuado pelas forças não conservativas na ponta do amostrador (sobre o solo) e W_d é o trabalho efetuado por outras forças não conservativas (perdas diversas).

Conseqüentemente, a variação da energia potencial do sistema martelo-haste é igual à variação do trabalho efetuado por todas as forças não conservativas (ODEBRECHT, 2003):

$$E_{amostrador} = W_p + W_d \quad (2.95)$$

Na equação 2.89, as perdas já estão consideradas, com a introdução dos coeficientes de eficiência. Conseqüentemente, a energia no amostrador ($E_{amostrador}$) calcula-se pela equação 2.96:

$$E_{amostrador} = W_p = F_d \rho_p \quad (2.96)$$

O solo reage de forma distinta quando a penetração do amostrador é efetuada de forma dinâmica ou quando é efetuada de forma quase estática. A transformação de força dinâmica, F_d , a força estática, F_{est} , é efetuada a partir do fator de incremento de carga (ν) (equação 2.97)

$$F_{est} = F_d(1/\nu) \quad (2.97)$$

Os valores de ν são sugeridos por Hermansson e Graväre (1978) e são mostrados na Tabela 2-2.

:

Tabela 2-2. Fatores de Incremento de carga (HERMANSSON e GRÄVARE, 1978)

Tipo de Solo	ν	$1/\nu$
Areias	1,00 - 1,15	1,00 - 0,95
Areia Siltosa	1,15 - 1,25	0,95 - 0,87
Silte Arenoso	1,20 - 1,45	0,87 - 0,77
Argila Siltosa	1,40 - 1,70	0,77 - 0,60
Argila	1,70 - 2,10	0,60 - 0,48

No caso de solos arenosos, o valor de ν é igual a 1,0. Por conseqüência, o valor de F_d é igual à F_{est} .

$$F_{est} = F_d = \frac{\eta_3 \left[\eta_1 (h_q + \rho_p) M_m g + \eta_2 \rho_p M_h g \right]}{\rho_p} \quad (2.98)$$

A força dinâmica possibilita a estimativa direta da resistência ao cisalhamento do solo. No caso de solos arenosos, a força dinâmica permite a determinação do ângulo de atrito interno das areias. Nesta análise não se utiliza o valor de N_{SPT} , somente se utilizam os valores de deslocamento registrados no ensaio (ODEBRECHT, 2003; LOBO, 2009).

2.6.4. Contribuição Smith (1960) e Aoki (1997)

Para calcular a resistência estática pela contribuição de SMITH (1960) deve-se considerar a teoria de equação de onda aplicada às estacas e às hastes.

O impacto de um martelo sobre um sistema cabeça-de-bater-hastes-amostrador-solo é um tipo de carregamento dinâmico que pode ser tratado como carga transiente ou carga instantânea, conduzindo a uma modelagem do evento.

A carga é transiente quando a função carregamento é aplicada em certo intervalo de tempo de duração finita Δt . A carga é instantânea quando Δt é igual à zero. O carregamento dinâmico acontece quando as forças atuantes variam ao longo do tempo (AOKI, 1997).

No modelo de Smith, a capacidade de carga estática oferecida pelo solo, no caso da ponta, é representada pelo valor de R_s (Figura 2.17). A curva *OHBC* mostra a relação entre a resistência total (estática mais dinâmica) mobilizada e o deslocamento ρ_{max} da seção da estaca. A resistência estática é mobilizada devido às deformações elásticas do solo sob a ponta da estaca.

As componentes elásticas e permanentes da máxima penetração ρ_{max} , são ρ_e e ρ_p , respectivamente.

A curva $OABC$ representa a curva ideal onde todos os materiais do sistema estaca-macioso de solos apresentam comportamento reológico elástico-perfeitamente-plástico sob ação de carga estática.

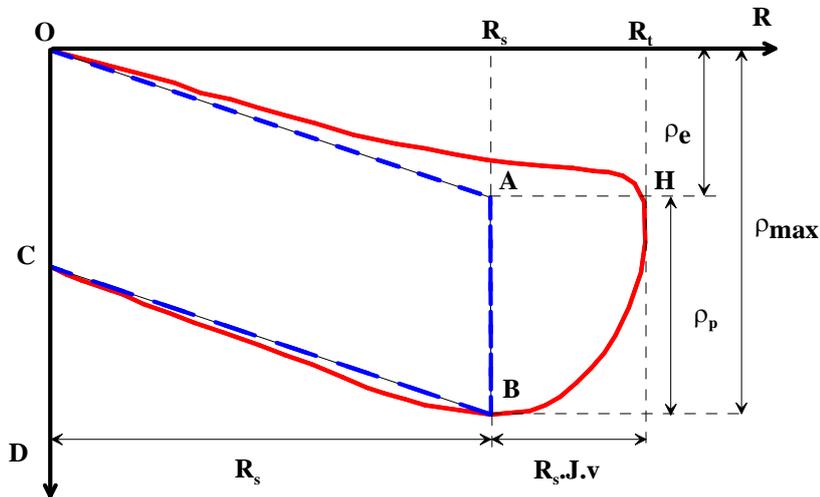


Figura 2.17-Modelo de Smith da curva resistência na ponta-deslocamento (modificado AOKI, 1997)

O deslocamento máximo da seção do topo da estaca ρ_{max} é igual a:

$$\rho_{max} = \rho_p + \rho_e \quad (2.99)$$

O princípio de Hamilton pode ser aplicado ao caso do sistema estaca-solo e ao sistema amostrador-solo, submetido à ação de um impacto de energia cinética total T que mobiliza a resistência R_t e provoca a máxima penetração ρ_{max} .

Na Figura 2.18 é mostrada a curva $OHBC$ de resistência mobilizada-deslocamento, na seção dos sensores. Nessa curva, a área $OHBD$ mede a energia cinética total do sistema T . A curva idealizada $OABC$ representa a resistência estática e a área $OABCO$ o trabalho realizado pela resistência estática (R). A área triangular $CBDC$ representa a parcela de energia de deformação elástica (V_e) do sistema.

O princípio de Hamilton pode ser escrito da seguinte maneira:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(T - V) dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta(W_{nc}) dt = 0 \quad (2.45bis)$$

ou

$$\left[(T - V_e) - (W_q + W_a) \right] = 0 \quad (2.100)$$

onde: T = energia cinética total do sistema;

V_e = energia potencial de deformação elástica;

W_q = trabalho das forças estáticas não conservativas;

W_a = trabalho das forças não conservativas (amortecimento e radiação).

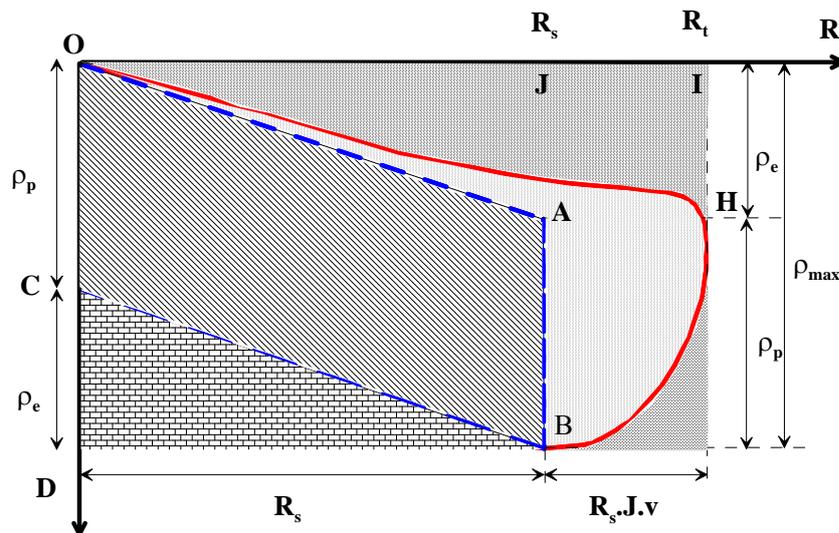


Figura 2.18-Curva resistência total – deslocamento dinâmico no impacto (modificado AOKI, 1997)

Consequentemente, a energia potencial de deformação elástica liberada pela força estática R_s é:

$$V_e = (R \cdot \rho_e / 2) \quad (2.101)$$

O trabalho das forças estáticas não conservativas é dado por:

$$W_q = (R \cdot \rho_p) \quad (2.102)$$

O valor da energia cinética T pode ser medido pela equação 2.11, sendo ρ_e a parcela elástica da penetração e ρ_p a parcela permanente da penetração.

O trabalho W_a realizado pelas forças dinâmicas não conservativas de amortecimento material e de radiação durante o impacto é dado por:

$$W_a = (T - W_q - V_e) \quad (2.103)$$

Para o método *CASE* a energia dinâmica tradicional de cravação é apresentada pela equação (BROMS e CHOO, 1988):

$$EFD = R_s \cdot \rho_e / 2 + R_s \cdot \rho_p = R_s (\rho_{\max} + \rho_p) / 2 \quad (2.104)$$

O valor EFD é igual à área $OABDO$ e representa a energia total de deformação das forças estáticas no modelo ideal da curva estática–deslocamento para materiais que apresentam comportamento elástico–perfeitamente-plástico (Figura 2.18).

Então a resistência estática R_s é dada por:

$$R_s = \frac{2 \cdot EFD}{(\rho_e + 2 \cdot \rho_p)} \quad (2.105)$$

Esse método pode ser aplicado ao ensaio SPT pela semelhança com o sistema estaca-solo. O valor de ρ_e é desprezível, como aconteceu nos ensaios de prova de carga estática do amostrador realizados por Neves (2004) para materiais como areia e siltes arenosos. Consequentemente, a resistência R_s pode ser calculada como:

$$R_s = \frac{EFD}{\rho_p} \quad (2.106)$$

onde EFD é a energia total de deformação das forças estáticas e ρ_p é a penetração permanente (Figura 2.19).

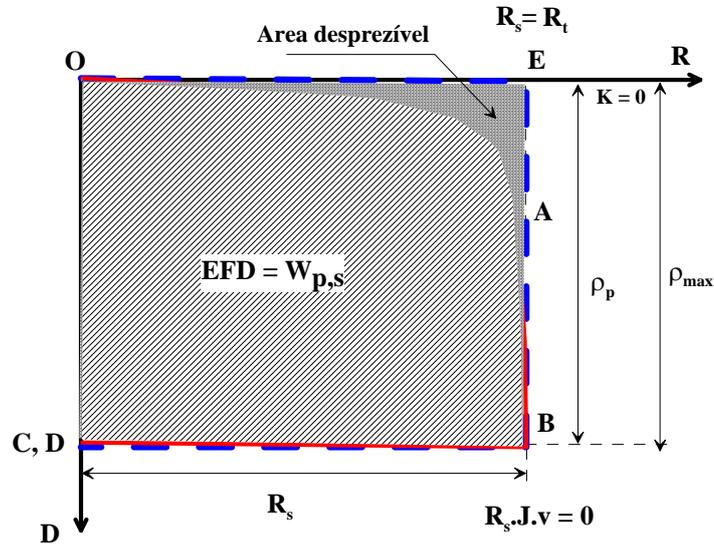


Figura 2.19-Curva resistência total – deslocamento estático.

Portanto, o valor de EFD é igual à soma da energia potencial elástica de deformação V_e e o trabalho desenvolvido pela força estática de penetração da haste no solo W_q .

$$EFD = W_q + V_e \quad (2.107)$$

Além disso, a curva resistência total-deslocamento dinâmico para um impacto de energia cinética T é análoga à curva carga–recalque da prova de carga estática (Figura 2.18). Pode calcular-se a área $OIHO$ que complementa a área $OHBDO$ que mede a energia cinética total T . Por analogia com o conceito de energia complementar V_c do ensaio de carregamento estático, essa área passa a denominar-se energia cinética complementar T_c do ensaio de carregamento dinâmico.

$$T_c \cong (R_t \cdot \rho_e / 2) \quad (2.108)$$

Isso acontece quando o valor de coeficiente de amortecimento J é igual à zero. A energia complementar V_c da curva idealizada de resistência estática–deslocamento–dinâmico é igual à área $OJAO$ cujo valor calcula-se a partir da equação 2.109:

$$V_c = V_e = (R \cdot \rho_e / 2) \quad (2.109)$$

O valor da energia potencial de deformação V_e e a energia complementar V_c são dependentes do valor do deslocamento elástico ρ_e . Neste caso, ρ_e é igual a zero, por conseguinte V_e e V_c são desprezíveis.

$$EFD = W_q \quad (2.110)$$

Consequentemente, da Figura 2.19 a energia EFD é igual à área $OABDO$ que também é igual ao trabalho desenvolvido pelas forças estáticas de penetração do amostrador no solo W_q . A curva idealizada $OJBDO$ representa o trabalho realizado pela resistência estática.

Portanto, da Figura 2.19 pode-se calcular a resistência estática mobilizada na ruptura como:

$$R_s = \frac{W_{p,s}}{\rho_p} \quad (2.111)$$

3. MATERIAS E MÉTODOS

3.1. Materiais

3.1.1. Ensaio Dinâmico

3.1.1.1. Haste usada para a instrumentação

Uma haste foi constituída para poder colocar as instrumentações da célula de carga e montagem dos acelerômetros. A característica da haste instrumentada deve apresentar a mesma impedância mecânica das hastes do ensaio SPT para evitar a reflexão indesejada de ondas. Essa haste foi utilizada para a instalação dos acelerômetros e da célula de carga. Para sua fixação nas hastes de sondagem, foram projetadas duas luvas (Figura 3.1). Esse segmento de haste apresenta a mesma geometria e mesmo material de haste instrumentado projetado por Odecrecht (2003). A característica do aço utilizado para a confecção do segmento de haste deve suportar a tensão gerada na haste devido à aplicação do golpe do martelo, mantendo suas propriedades iniciais mesmo após o uso intenso. O material usado para essa haste foi um aço martensítico de nome comercial VC 150 que possui na sua composição 0,35% de carbono e 13% de cromo. Esse material é fornecido com limite de resistência à tração de 640 MPa e limite de escoamento de 345 MPa. Esse aço é padronizado pela ABNT NBR 5601 Tipo 420 SAE 51420 ou ASTM A 276-81^a tipo 420.



Figura 3.1-Haste tratada termicamente (LUKJANTCHUKI, 2010)

Após o processo de usinagem, a haste recebeu um tratamento térmico para melhorar suas características de resistência. Esse tratamento térmico foi realizado em duas etapas: têmpera e revenimento. O processo de têmpera tem como resultado o aumento da dureza e consequentemente o aumento da fragilidade. A fragilidade do material temperado é reduzida através do processo de revenimento. Esse processo aquece a peça de aço temperada até uma determinada temperatura resfriando-a em seguida. A temperatura de revenimento pode ser determinada através de tabelas específicas para cada tipo de aço. Para este caso, a temperatura de revenimento é de 560°C , obtendo-se uma resistência de aproximadamente 1084 MPa e uma dureza de 350 Brinnell. A Figura 3.2 indica a variação das propriedades mecânicas do aço em função da temperatura de revenimento.

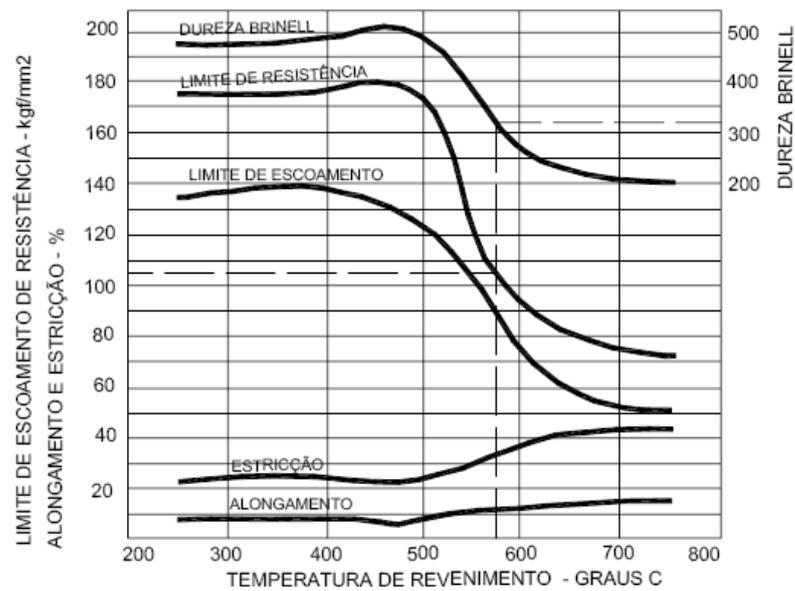


Figura 3.2-Variação das propriedades mecânicas em função da temperatura de revenimento (ODEBRECHT, 2003)

Nesta pesquisa utilizou-se uma haste tratada termicamente com 350 mm de comprimento devido à impossibilidade de se fabricar hastes com comprimento maior. Detalhes da geometria da haste são apresentados no Apêndice D.

Célula de Carga

A célula de carga, montada numa seção da haste instrumentada, é constituída de extensômetros num circuito ponte completa. Os extensômetros usados foram os fabricados pela empresa Excel Engenharia de Sensores do tipo PA-06-125TG-350-LEN. Esses extensômetros são do tipo duplo (longitudinal e transversal) e foram montados diametralmente opostos na haste para minimizar efeito de flexão. A configuração dos extensômetros, em circuito elétrico do tipo ponte completa (Figura 3.3, Figura 3.4 e Figura 3.5), foi a mesma utilizada por Odebrecht (2003).

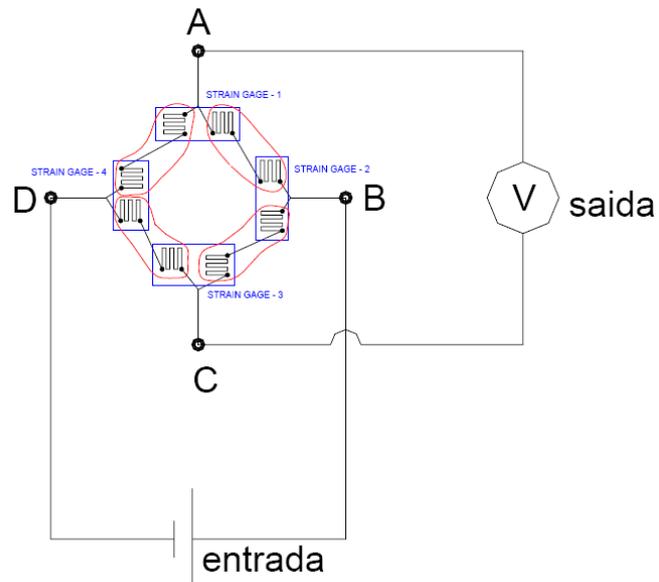


Figura 3.3- Esquema da ponte de Wheatstone (ODEBRECHT, 2003).

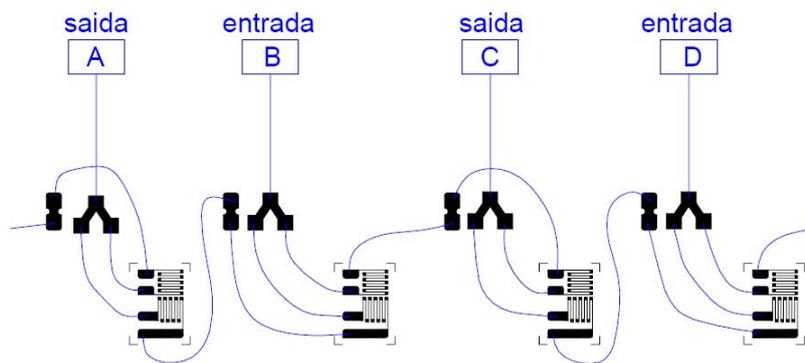


Figura 3.4- Esquema das ligações dos extensômetros (ODEBRECHT, 2003)

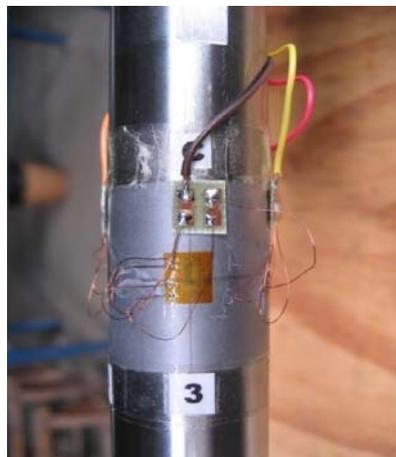


Figura 3.5- Detalhe da construção da célula de carga (LUKJANTCHUKI, 2010)

A célula de carga foi calibrada estaticamente utilizando-se uma prensa servo controlada modelo *MTS 815 Rock Mechanics System* (Figura 3.6) disponível no Laboratório de Mecânica das Rochas da Escola de Engenharia de São Carlos.



Figura 3.6-Calibração estática da célula de carga.

O ensaio de calibração foi conduzido aplicando-se incrementos de carga de 10 kN até a carga máxima de 250 kN e incrementos de descarga de 20 kN até zerar a carga máxima. A aplicação dos incrementos de carga/descarga foi controlada através do próprio sistema de controle da prensa. Além disso, utilizou-se o sistema de aquisição de dados da marca *HBM*.

O ensaio de calibração foi repetido três vezes, verificando-se a elevada repetibilidade dos valores obtidos. Adotou-se como equação de calibração (Figura 3.7) padrão, aquela obtida através dos valores das três leituras efetuadas.

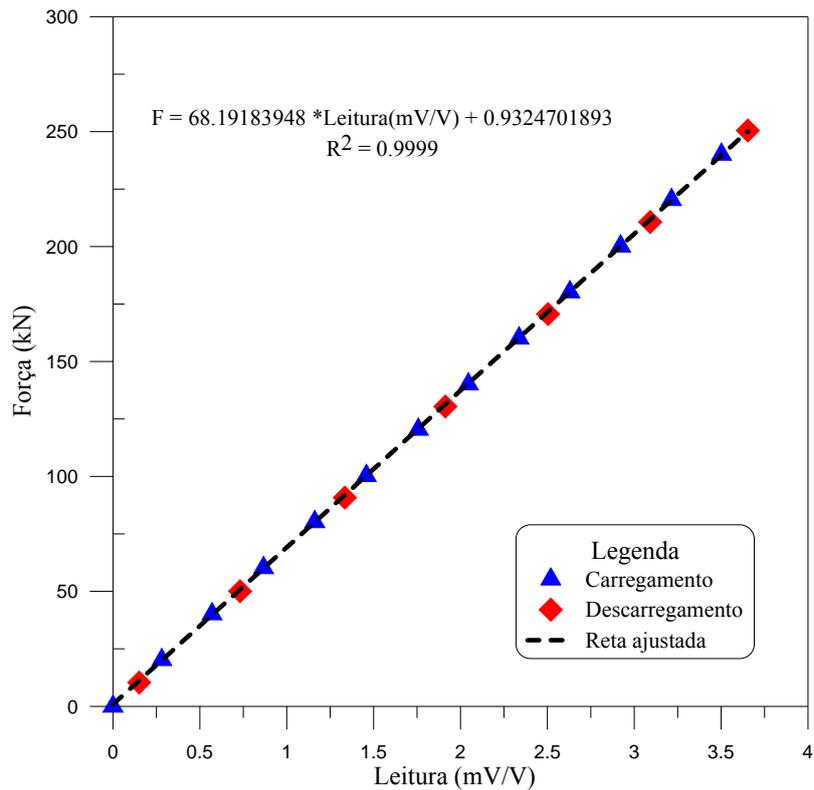


Figura 3.7-Curva de Calibração da célula de carga.

3.1.1.2. Acelerômetros utilizados na haste instrumentada

A escolha dos dispositivos foi feita de acordo com a Norma ASTM D 4633 (2010), que especifica um mínimo de dois acelerômetros montados diametralmente opostos e afastados 100 mm da seção do transdutor de força. Os acelerômetros devem ser alinhados com o eixo da haste, sendo parafusados, colados ou soldados à haste, com suportes para a montagem pequenos e rígidos (sólidos e de forma cúbica). Os acelerômetros devem ser lineares e ter uma capacidade mínima de 10.000 g e com uma resposta de frequência em um mínimo de 4.5 kHz.

Seguindo essas recomendações, foram utilizados acelerômetros piezoelétricos da marca *PCB PIEZOTRONICS*, modelo *350M77* com uma capacidade de 20.000 g com uma frequência de 1 a 15.000 Hz (Figura 3.8). A geometria do acelerômetro é mostrada na Figura 3.9.



Figura 3.8-Acelerômetros modelo 350M77.

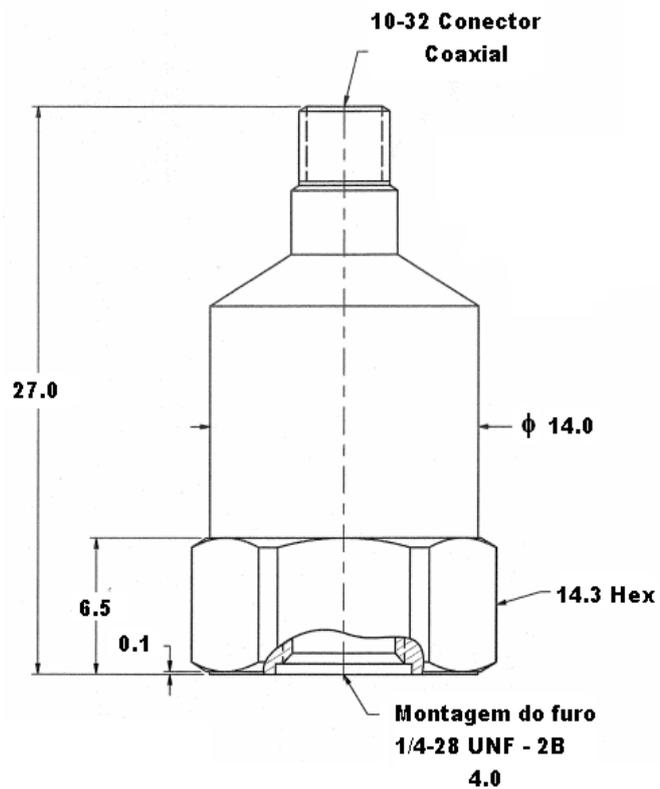


Figura 3.9-Dimensões dos acelerômetros modelo 350M77 (mm)

A fixação dos acelerômetros ao segmento de haste foi feita através de suportes parafusados ao mesmo.

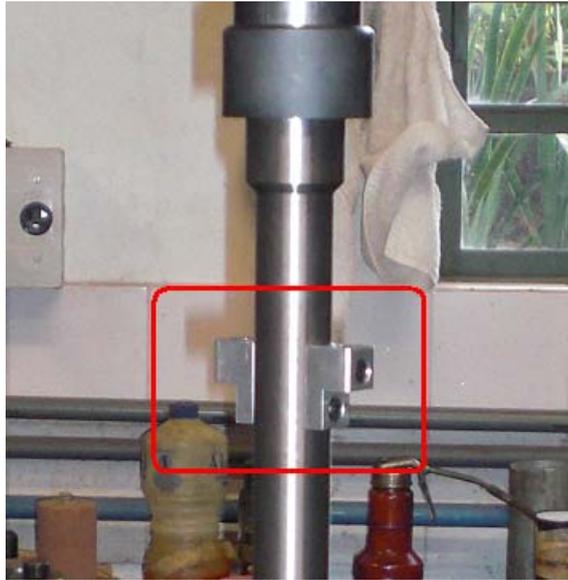


Figura 3.10-Suportes dos acelerômetros modelo 350M77 (mm)

3.1.1.3. Sistema de aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados adotado é da marca HBM, modelo MX410 (Figura 3.11). Esse sistema é portátil, possui quatro canais, é indicado para analisar eventos dinâmicos, possibilitando a leitura de dados com taxa de amostragem de até 96 kHz por canal. Esse sistema trabalha com uma tensão de excitação de 2.5 V ou 5.0 V. O sistema utiliza o software *catmanEasy* versão 3.0 que permite o processamento e o registro gráfico dos dados. Além disso, permite o tratamento dos sinais após do processamento dos dados.



Figura 3.11-Sistema de aquisição de dados HBM (LUKIANCHUKI, 2010).

3.1.1.4. Equipamento de Sondagem

Um grupo de ensaios dinâmicos (*SPT3*, *SPT4* e *SPT5*) foi realizado usando o equipamento de SPT recomendado pela norma NBR 6484 (2001) que especifica a utilização de 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. A cravação do amostrador foi desenvolvida pela ação da queda de um martelo de 65 kg a uma altura de 750 mm (Figura 3.12).

Para outro grupo de ensaios dinâmicos (*SPT6* e *SPT7*) foi usado o penetrômetro automático super pesado *DPSH PAGANI*. Esse equipamento, que possui um sistema de disparo automático do martelo, foi adaptado para fazer ensaio de SPT (os desenhos dos adaptadores são mostrados no Apêndice E). O modelo de equipamento é *TG 63-150*, possuindo um martelo de massa igual a 63,5 kg que cai de uma altura de 750 mm. A Figura 3.13 mostra o equipamento *PAGANI TG 63-150*.

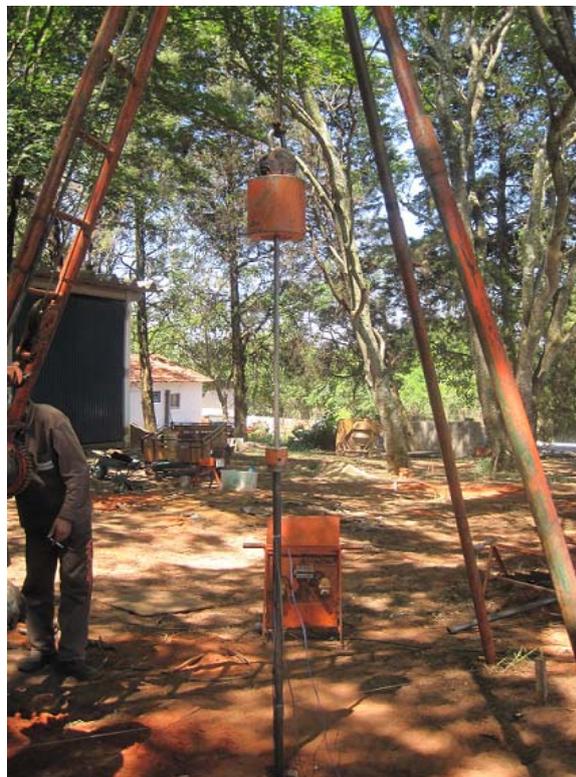


Figura 3.12-Ensaio SPT5_C2 utilizando massa do martelo 65 kg.



Figura 3.13-Equipamento PAGANI

3.1.2. Ensaio Estático

3.1.2.1. Célula de carga

As cargas foram medidas por um sensor com precisão de $0,1 \text{ kN}$ e capacidade máxima de 100 kN . A célula de carga foi devidamente calibrada na prensa servo-controlada modelo *MTS 815 Rock Mechanics System*.



Figura 3.14-Célula de Carga utilizada para a prova de carga estática.

O ensaio de calibração da célula de carga foi conduzido aplicando-se incrementos de carga de 5 kN até a carga máxima de 60 kN e incrementos de descarga de 10 kN até zerar a carga máxima. O ensaio de calibração foi repetido três vezes verificando-se a elevada repetibilidade dos valores obtidos. Adotou-se como equação de calibração padrão aquela obtida através dos valores das três leituras efetuadas (Figura 3.15).

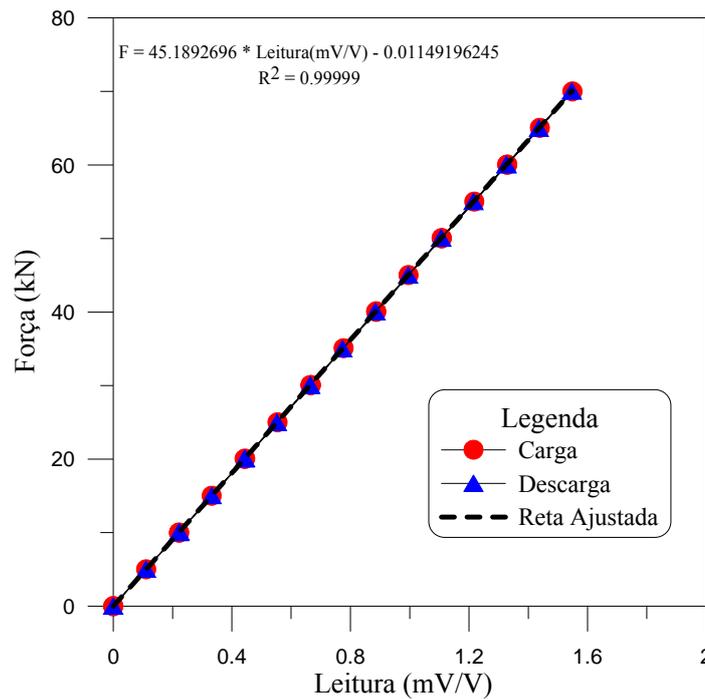


Figura 3.15-Calibração da Célula de Carga.

3.1.2.2. Macaco Hidráulico

O carregamento foi efetuado com o auxílio de um macaco hidráulico, acionado por uma bomba hidráulica manual da marca ENERPAC. A Figura 3.16 mostra a localização do macaco hidráulico e a célula de carga para poder realizar o ensaio estático.



Figura 3.16-Macaco hidráulico marca ENERPAC usado no ensaio estático.

3.1.2.3. Transdutores de deslocamento

Os transdutores de deslocamento são da marca *KYOWA* e possuem uma capacidade de 100 *mm* e excitados com uma de voltagem de 5 *DC*.



Figura 3.17-Transdutores de deslocamento de marca *KYOWA*.

3.1.2.4. Sistema de Aquisição

O sistema de aquisição de dados é o mesmo descrito no item 3.1.1.3.

3.1.2.5. Sistema de reação

O sistema de reação utilizado foi o penetrômetro automático dinâmico super pesado *DPSH PAGANI* que possui um sistema de ancoragem. O equipamento conta com hastes helicoidais de 750 mm de diâmetro para a ancoragem. A máxima força de penetração é de 150 kN e a máxima força de extração é de 160 kN.



Figura 3.18-Ensaio de Prova de carga estática sobre amostrador utilizando o equipamento PAGANI como sistema de reação.

3.2. Métodos

3.2.1. Ensaio Dinâmico

Os ensaios *SPT* foram executados baseando-se na norma brasileira *NBR 6484*. Foram realizadas algumas modificações em relação à massa dos martelos com a finalidade de avaliar a eficiência do ensaio *SPT*. Para os ensaios *SPT3* utilizou-se o martelo recomendado pela norma brasileira (martelo de 65 kg). Os ensaios *SPT4* até *SPT5* foram realizados aumentando

a massa do martelo em 66 *kg* e 67 *kg*, respectivamente. Os ensaios *SPT6* e *SPT7* foram realizados usando o equipamento *PAGANI* que possui um martelo de massa de 63,5 *kg*. Estas modificações tem o objetivo de analisar como varia a energia transmitida no topo do amostrador.

Foi seguido o seguinte procedimento:

- Foram realizadas calibrações e testes de prova para os equipamentos eletrônicos utilizados no ensaio dinâmico, como por exemplo: acelerômetros, célula de carga, extensômetros, aquisitor de dados.
- Já no campo, o furo de sondagem no qual foi realizado o ensaio foi feito de modo a não perturbar significativamente o terreno que se pretendia estudar. Não foi escavado com circulação de água.
- O furo teve um diâmetro tal, que os suportes dos acelerômetros não tocaram as paredes do mesmo. O diâmetro de furo utilizado nos ensaios foi de 100 *mm*.
- Antes de introduzir o amostrador no furo foi feita a limpeza do mesmo e a verificação do correto estado e localização da célula de carga (junto ao amostrador).
- Foi realizada a verificação da massa do martelo, dos suportes de acelerômetros devidamente montados e colados ao segmento de haste, da célula de carga devidamente protegida contra a água (protegida com borracha de silicone) e da instalação de uma referência para medir a penetração permanente do amostrador.
- Uma vez verificados os passos anteriores, o sistema de aquisição foi novamente testado para que se pudesse verificar se não havia contato entre a célula de carga ou suporte dos acelerômetros e as paredes do furo.

- Durante a etapa de ensaio, sempre se verificaram os registros de aceleração e força que eram obtidos por causa do impacto do martelo. Esses registros, que podem ser vistos em tempo real, foram armazenados no computador. O ensaio terminou quando se obteve o valor de N_{SPT} do ensaio, bem como registros de aceleração e força e a penetração permanente do amostrador (ρ_p) para cada golpe do impacto sobre o sistema.

Para o controle da penetração permanente do amostrador (ρ_p) realizou-se uma referência de nível que foi estabelecida a 0,30 m do nível de piso, a ferramenta utilizada para realizar o nivelamento foi o barbante. A marcação da haste do SPT foi feita com giz e com ajuda do barbante. Para realizar a medição da penetração utilizou-se uma trena extensível.

O amostrador só foi extraído após o ensaio de prova de carga estática sobre o amostrador. No momento de extração do amostrador do furo este foi retirado de forma cuidadosa de modo de evitar danos na haste instrumentada. Depois, repetiu-se o ensaio para o seguinte metro de profundidade, até alcançar a profundidade requerida de investigação.

Qualidade dos sinais e Cálculo da energia

A verificação da qualidade do sinal é uma parte essencial do processo de análises dos dados dos ensaios dinâmicos. Uma maneira de avaliar a qualidade dos sinais é analisando-se a curva do registro de acelerações em relação ao tempo. Quando as duas curvas de aceleração coincidem, a qualidade dos sinais é boa.

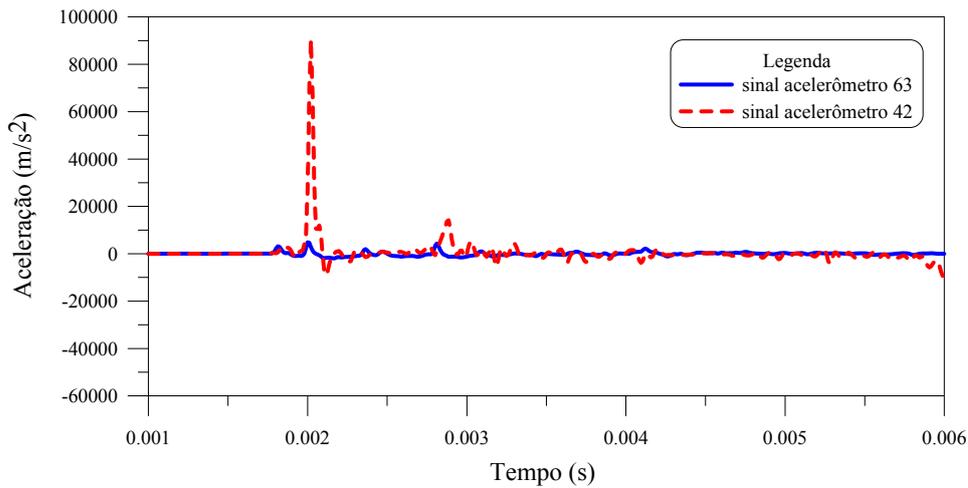


Figura 3.19-Registro de acelerações do ensaio SPT1-C1.

Nesta pesquisa não foram considerados os resultados dos ensaios *SPT1* e *SPT2*, pois os sinais de aceleração não eram coincidentes (Figura 3.19). Isto pode ser devido a um mau ajuste dos suportes dos acelerômetros à haste, falta de colagem entre suporte e haste instrumentada. Pode ser criado um contato entre as paredes do furo e haste instrumentada. Um sinal típico de boa qualidade é apresentado na Figura 3.20. Os sinais são praticamente coincidentes.

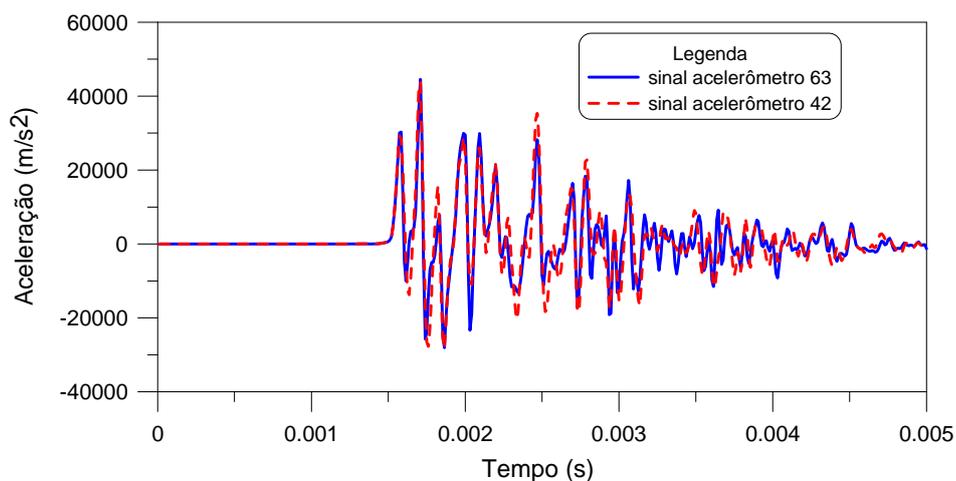


Figura 3.20-Registro de acelerações em relação ao tempo, ensaio SPT4-C2-g9.

Cálculo de Energia

Após da verificação dos sinais da aceleração, calculou-se a energia através do método força-velocidade (Fv). Considerou-se como exemplo o registro de aceleração e força do ensaio *SPT4-C2-g9*. Então se utilizou o registro de aceleração média, mostrado na Figura 3.21:

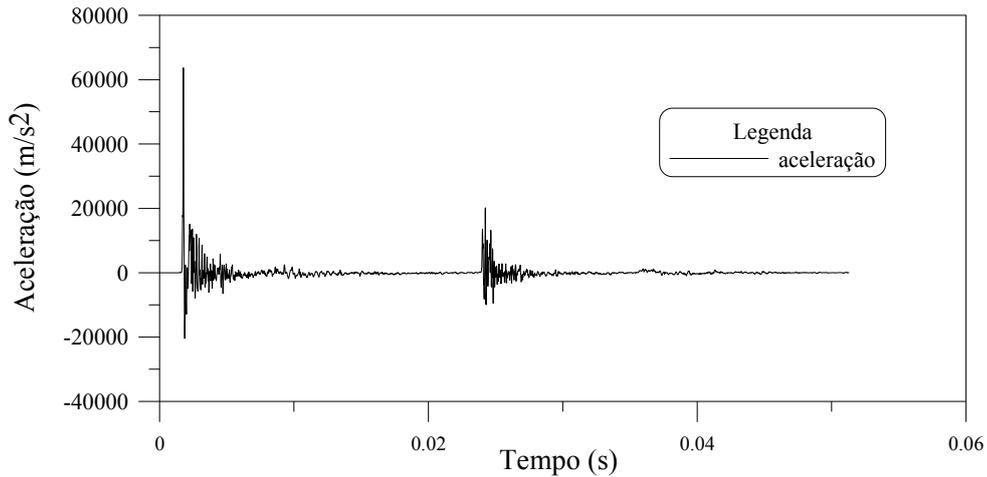


Figura 3.21-Registro de aceleração em relação ao tempo, ensaio SPT4-C2-g9.

Os sinais de aceleração são integrados em relação ao tempo para calcular a velocidade $v(t)$. Essa integração numérica é feita utilizando-se a regra dos trapézios (Equação 3.1):

$$v_{(i)} = \sum_{i=1}^n (a_{(i-1)} + a_{(i)}) \cdot \frac{(t_i - t_{i-1})}{2} \quad (3.1)$$

Onde $v_{(i)}$ e $a_{(i)}$ são a velocidade e a aceleração, respectivamente, no instante t_i (Figura 3.22). Como condição inicial, a velocidade é igual à zero no instante inicial.

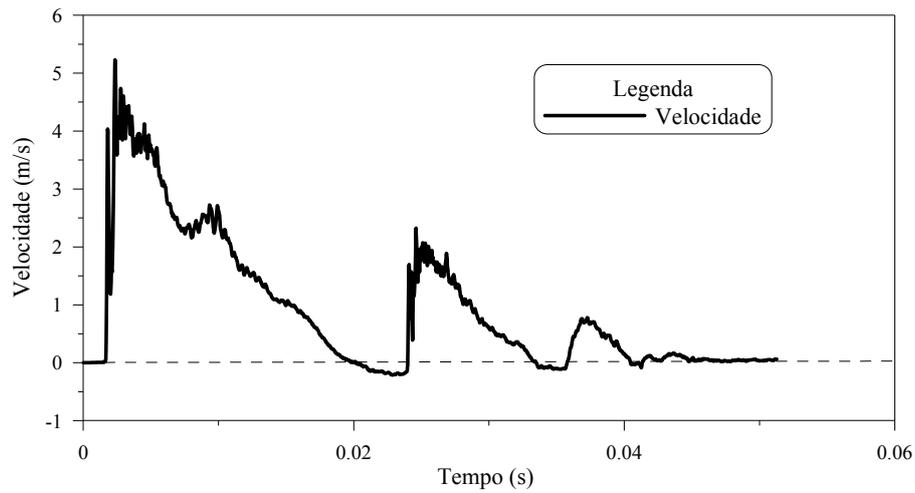


Figura 3.22-Registro de velocidade em relação ao tempo, ensaio *SPT4-C2-g9*.

Além disso, com a velocidade conhecida, foi possível calcular o deslocamento em relação ao tempo a partir da integração, como é mostrado na seguinte Equação 3.2:

$$D_{(i)} = \sum_{i=1}^n (v_{(i-1)} + v_{(i)}) \cdot \frac{(t_i - t_{i-1})}{2} \quad (3.2)$$

onde $D_{(i)}$ e $v_{(i)}$ são o deslocamento e a velocidade, respectivamente, no instante t_i

(Figura 3.23). Como condição inicial, o deslocamento é igual à zero no instante inicial.

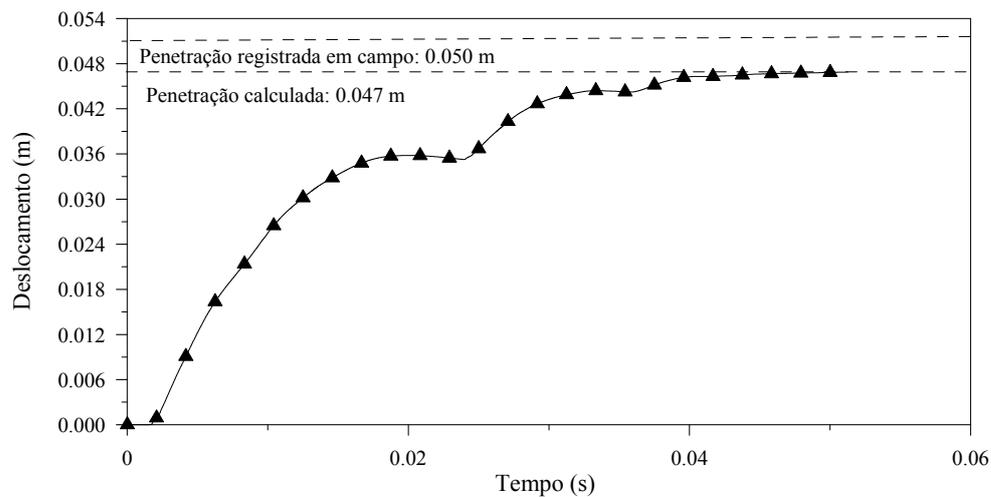


Figura 3.23-Registro de deslocamento em relação ao tempo, ensaio *SPT4-C2-g9*.

Uma vez calculada a velocidade e o registro de força em relação ao tempo (Figura 3.24) foi possível calcular a energia a partir da integração pelo método de trapézios (Equação 3.3).

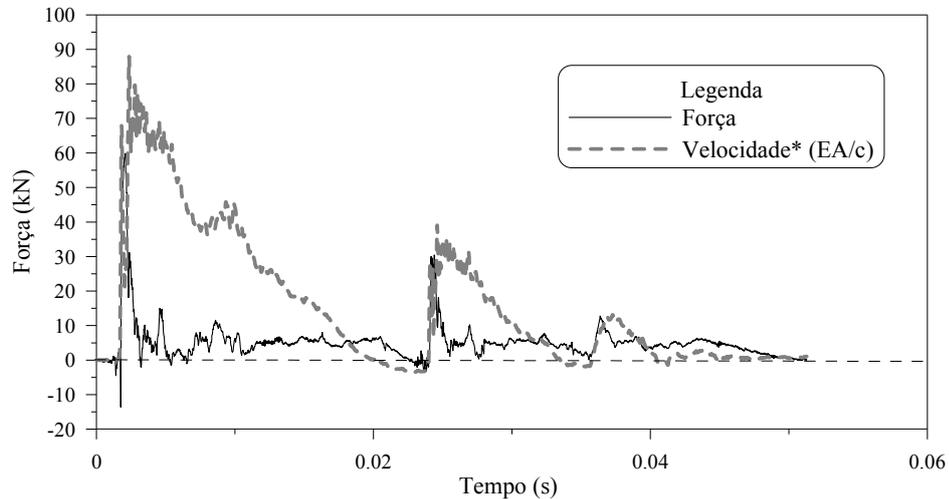


Figura 3.24-Registro de velocidade e força em relação ao tempo, ensaio *SPT4-C2-g9*.

$$E_i = \sum_{i=1}^n (F_{(i-1)}V_{(i-1)} + F_{(i)}V_{(i)}) \cdot \frac{(t_i - t_{i-1})}{2} \quad (3.3)$$

onde $E_{(i)}$ e $F_{(i)}$ são a energia e a força, respectivamente, no instante t_i (Figura 3.24). Como condição inicial, a energia é igual à zero no instante inicial.

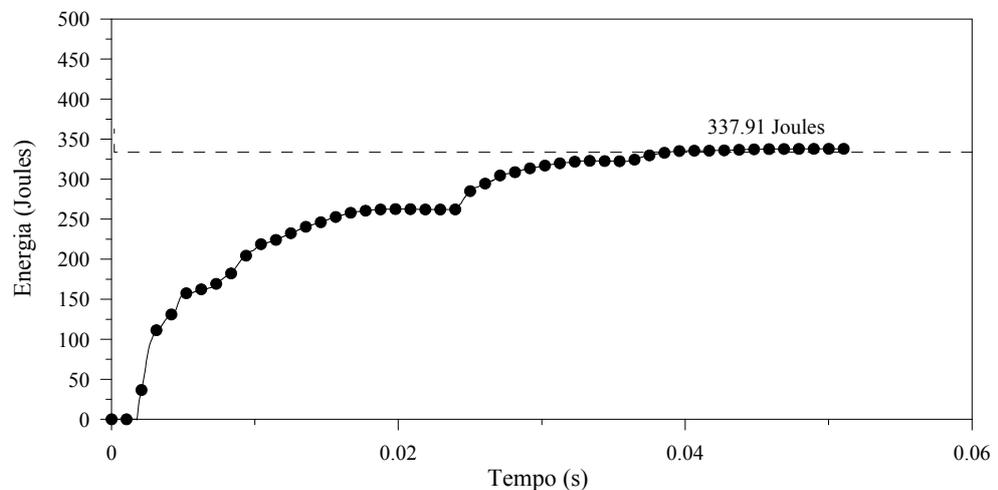


Figura 3.25-Registro de energia em relação ao tempo, ensaio *SPT4-C2-g9*.

A energia calculada E_i em relação ao tempo é mostrada na Figura 3.25. Essa energia é igual à energia cinética T_A apresentada na equação 2.52.

$$T_A = \int_0^{\infty} F(l, t) \cdot v(l, t) dt \quad (2.55 \text{ bis})$$

3.2.2. Ensaio Estático

Para iniciar a prova de carga estática sobre amostrador padrão *SPT*, estima-se a resistência mobilizada aproximada R_s .

A resistência é baseada para uma eficiência média de 82 % para diferentes configurações de tripés de sondagem. Os valores de N_{SPT} são transformados em resistência estática (CAVALCANTE, 2002; NEVES, 2004). Como se conhece o valor de N_{SPT} pode-se estimar a resistência estática com a equação 3.4.

$$R_s = 1332,5 N_{SPT} (N) \quad (3.4)$$

O seguinte procedimento foi realizado:

- O sistema de aquisição de dados gravou todos componentes significantes dos sinais de instrumentação da prova de carga. Este sistema usou uma taxa de frequência de 0,05 Hz para armazenar os dados da prova de carga.
- Foram feitas calibrações e testes de prova para os equipamentos eletrônicos que seriam usados no ensaio estático, como por exemplo: célula de carga, extensômetros, sistema de aquisição de dados.
- Uma vez realizado o ensaio *SPT* para certa profundidade e obtendo-se o valor do N_{SPT} , foi possível estimar-se a resistência mobilizada inicial R_s baseada na equação 3.4.

- Após o ensaio dinâmico, com o amostrador ainda cravado no solo, realizou-se o ensaio de prova de carga estática sobre o amostrador. A aplicação da carga foi feita pelo sistema hidráulico (macaco e bomba hidráulica). Então, durante a etapa de carregamento, a carga foi aumentada em incrementos de 5% em relação à carga de mobilizada inicial de ruptura R_s calculada pela equação 3.4. Essa carga foi mantida durante um intervalo de 5 minutos.
- Durante o ensaio, sempre foram observados os registros de força e deslocamentos obtidos durante a prova de carga estática. Esses registros foram armazenados no computador. A etapa de carregamento terminou quando se alcançou o valor estimado de ruptura.
- Um dado importante para o cálculo da energia de deformação é a magnitude de penetração permanente do amostrador no solo na execução do ensaio de prova de carga estática. Essa penetração foi medida ao final do ensaio estático e foi igual ou maior à magnitude da penetração dinâmica permanente correspondente ao último impacto do martelo, quando o N_{SPT} é obtido.
- Na etapa de descarregamento, a carga sofreu decrementos de 10% em relação à carga mobilizada de ruptura R_s durante um intervalo de 5 minutos até chegar à carga igual a zero.
- Após concluída a prova de carga estática sobre o amostrador, o mesmo foi extraído.

3.2.3. Proposta para o cálculo da Eficiência do ensaio SPT através da execução da prova de carga estática sobre o amostrador

A seguir, mostra-se uma proposta para o cálculo da eficiência do ensaio SPT através da execução da prova de carga estática sobre o amostrador. Esta proposta inclui algumas

alterações na energia potencial nominal (U) e a energia cinética (T_A) na proposta realizada por Neves (2004).

3.2.3.1. Ensaio Dinâmico

Para o ensaio dinâmico em vez de utilizar a energia potencial nominal (U) para o cálculo da eficiência, será utilizada a energia potencial gravitacional do sistema considerado por Odebrecht (2003). Essa energia será chamada de energia potencial corrigida (U') (Equação 2.88).

$$\Delta EPG^{sistema} = U + \rho_p \cdot g \cdot (M_m + M_h) \quad (2.88 \text{ bis})$$

$$U' = U + \rho_p \cdot g \cdot (M_m + M_h) \quad (3.5)$$

Para o cálculo da eficiência do ensaio SPT é utilizada a energia T_A' . Essa energia é calculada com a equação 2.93:

$$T_A' = E_i = \int_0^{\infty} Fv \, dt + M_h \cdot g \cdot \rho_p \quad (2.93 \text{ bis})$$

Consequentemente, calcula-se a eficiência do ensaio *SPT* através da prova de carga dinâmica (η') como é mostrada na equação 3.6.

$$\eta' = \frac{T_A'}{U'} \cdot 100\% \quad (3.6)$$

3.2.3.2. Ensaio Estático

Para o ensaio estático, considera-se a análise de interação amostrador-solo com base no método de Lobo (2009). A resistência dinâmica (R_d) é igual à resistência estática (R_s) (Ver equação 2.35).

Então, pode-se calcular esta eficiência como a relação de $W_{p,s(estático)}$ e a energia potencial nominal corrigida U' . O valor da eficiência η_s' pode ser avaliado como:

$$\eta_s' = \frac{W_{p,s(\text{estático})}}{U'} \cdot 100\% \quad (3.7)$$

onde $W_{p,s(\text{estático})}$ é o trabalho realizado pelas forças não conservativas de penetração do amostrador no solo e U' é a energia potencial nominal corrigida.

3.2.4. Proposta para o cálculo da Resistência estática mobilizada na ruptura R_s do sistema amostrador- solo

Propõe-se que a resistência estática na ruptura do sistema amostrador-solo possa ser calculada utilizando a equação 2.111.

$$R_s = \frac{W_{p,s}}{(\rho_p)} \quad (2.111 \text{ bis})$$

4. ENSAIOS E RESULTADOS

Para verificar a proposta anteriormente mencionada no item 3.2.3, uma série de ensaios de penetração foi realizada no Campus Experimental do Laboratório da Unesp-Bauru, São Paulo, Brasil. Esse campo experimental é constituído por uma camada de areia fina a média pouco argilosa, não saturada. As leituras dos valores dos índices N_{SPT} foram complementadas com determinação de leituras de energia cinética. Imediatamente após a determinação do índice N_{SPT} , foi realizada a prova de carga estática sobre o amostrador, aplicando um incremento de carga estática inicial.

4.1. Campo Experimental

4.1.1. Campo Experimental de Bauru

Os ensaios foram desenvolvidos no Campo Experimental do Laboratório de Engenharia Civil da Unesp - Bauru (SP).

O campus da Unesp em Bauru faz parte do Grupo Bauru, com predominância da Formação Marília e da Formação Adamantina. A Formação Marília é constituída por arenitos de granulação fina a grossa, compreendendo bancos maciços com tênues estratificações cruzadas de médio porte, incluindo lentes e intercalações de siltitos, argilitos e arenitos muito finos com estratificação plano-paralela e cimentação carbonática nos interfluvios. A Formação Adamantina é constituída por depósitos fluviais com predominância de arenitos finos e muito finos podendo, localmente, apresentar cimentação e nódulos carbonáticos e lentes de siltitos arenosos e argilitos em bancos maciços com estratificação cruzada de pequeno e médio porte nos vales e porções mais baixas do terreno (IPT, 1989). Nesse local,

Avesani (2010) realizou um ensaio de *SPT* e ensaios *CPT*, com cone mecânico e elétrico, permitindo um conhecimento detalhado do subsolo. O perfil estratigráfico do local é apresentado na Figura 4.1 (AVESANI, 2010).

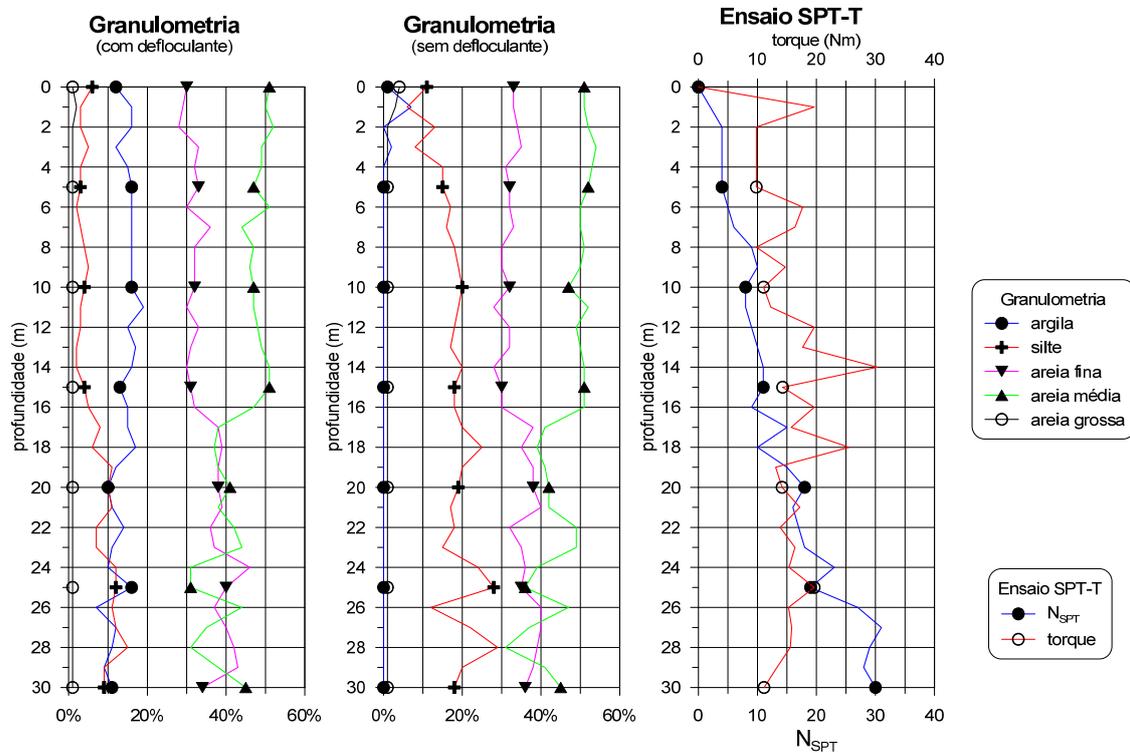


Figura 4.1-Perfil do solo do Campo experimental do Laboratório de UNESP-BAURU (Modificado AVESANI, 2010)

Na Figura 4.1 observa-se que até a profundidade de 16 m, o solo é constituído pelo material de areia média pouca argilosa e que para profundidade entre 16 m a 30 m o solo é constituído por areia fina a média pouco argilosa.

4.2. Ensaios

A Tabela 4-1 mostra a quantidade de ensaios realizados e o equipamento utilizado. O mapa de localização e a distribuição dos furos do ensaio são mostrados no Apêndice F.

Tabela 4-1-Ensaio da Campanha Bauru

			Campanha Bauru			
Prova	Furo	Profundidade (m)	Tipo de Martelo	Peso de Martelo (kg)	Número de golpes registrados	Número de Prova de Carga
SPT3_C1	1	4	Com pino guia	64.88	15	1
SPT3_C2		6	Com pino guia	64.88	14	1
SPT3_C3		8	Com pino guia	64.88	22	1
SPT4_C1	1	4	Com pino guia	65.88	10	1
SPT4_C2		6	Com pino guia	65.88	9	1
SPT4_C3		8	Com pino guia	65.88	13	1
SPT5_C1	1	4	Com pino guia	66.8	8	1
SPT5_C2		6	Com pino guia	66.8	10	1
SPT5_C3		8	Com pino guia	66.8	16	1
SPT6_C2	1	6	Automático	63.5	9	1
SPT7_C1	1	4	Automático	63.5	9	1
SPT7_C2		6	Automático	63.5	7	1
SPT7_C3		8	Automático	63.5	7	1
Total					149	13

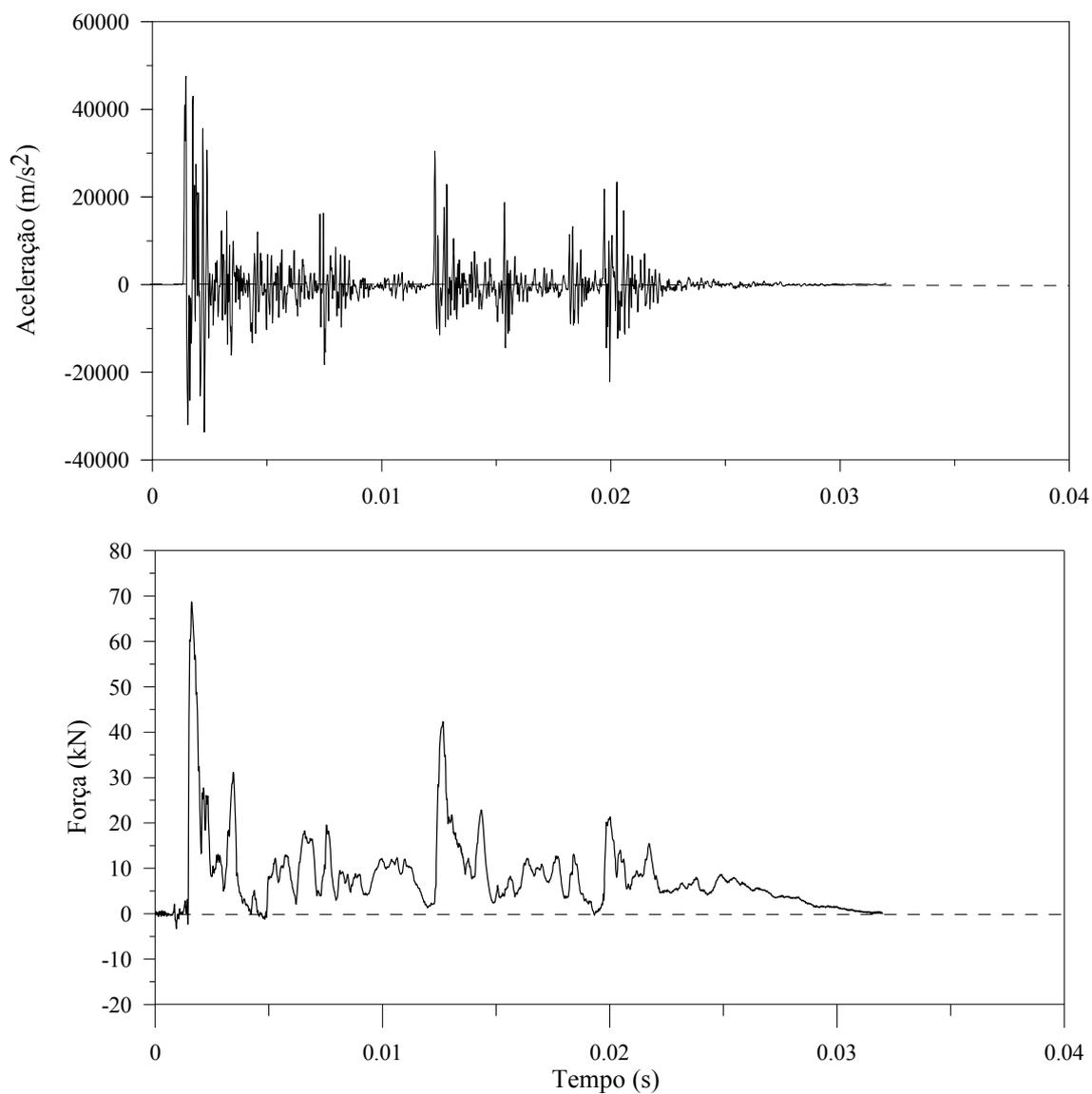
Nota: Para designar os ensaios de prova de carga dinâmica (PCD) apresenta-se a seguinte nomenclatura *SPT2-C3-g14* que significa o furo número 2 (*SPT2*), à profundidade de 8 m (*C3*) e o último golpe de impacto para cravar o amostrador no solo, número de golpe 14 (*g14*). No caso desta pesquisa foram realizadas ensaios para três profundidades: em 4m (*C1*), 6m (*C2*) e 8m (*C3*).

4.2.1. Resultados do ensaio Dinâmico

Neste item são apresentados os índices N_{SPT} para as profundidades de 4, 6 e 8 m; são apresentados também os sinais de aceleração e força para os golpes executados antes de cada um dos ensaios estáticos.

Tabela 4-2-Resultados do ensaio dinâmico *SPT3-C1-g15*

Prova Dinâmica (PCD)	Prof. (m)	N (golpes/cm)	ρ_p (mm)	Tipo de Martelo	Massa de Martelo (kg)	Comprimento de hastes (m)
SPT3_C1	4.48	11/33	50	Com pino guia	64.88	6.30

Figura 4.2-Sinais de aceleração e de força correspondentes ao golpe 15 do ensaio dinâmico *SPT3-C1*.

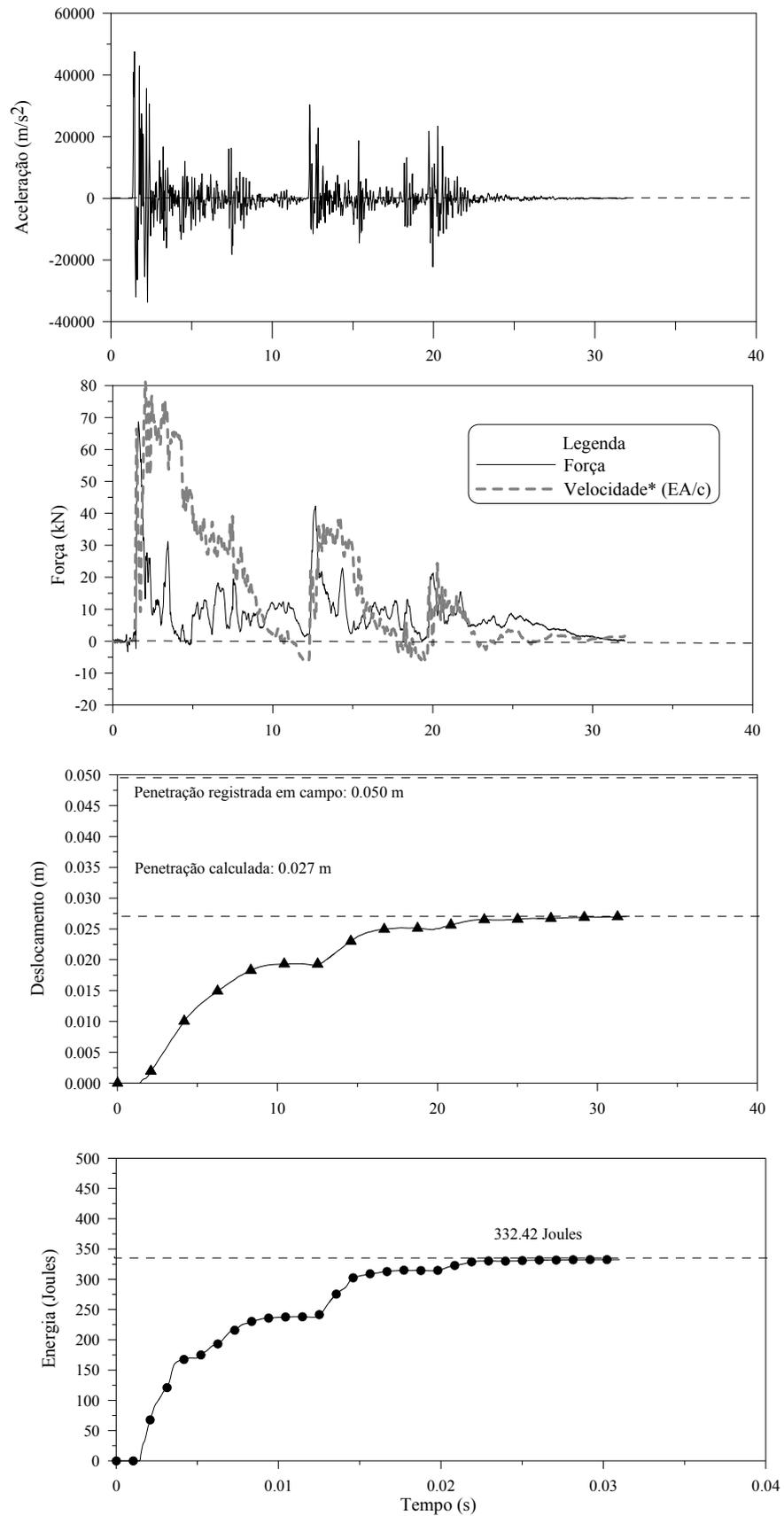
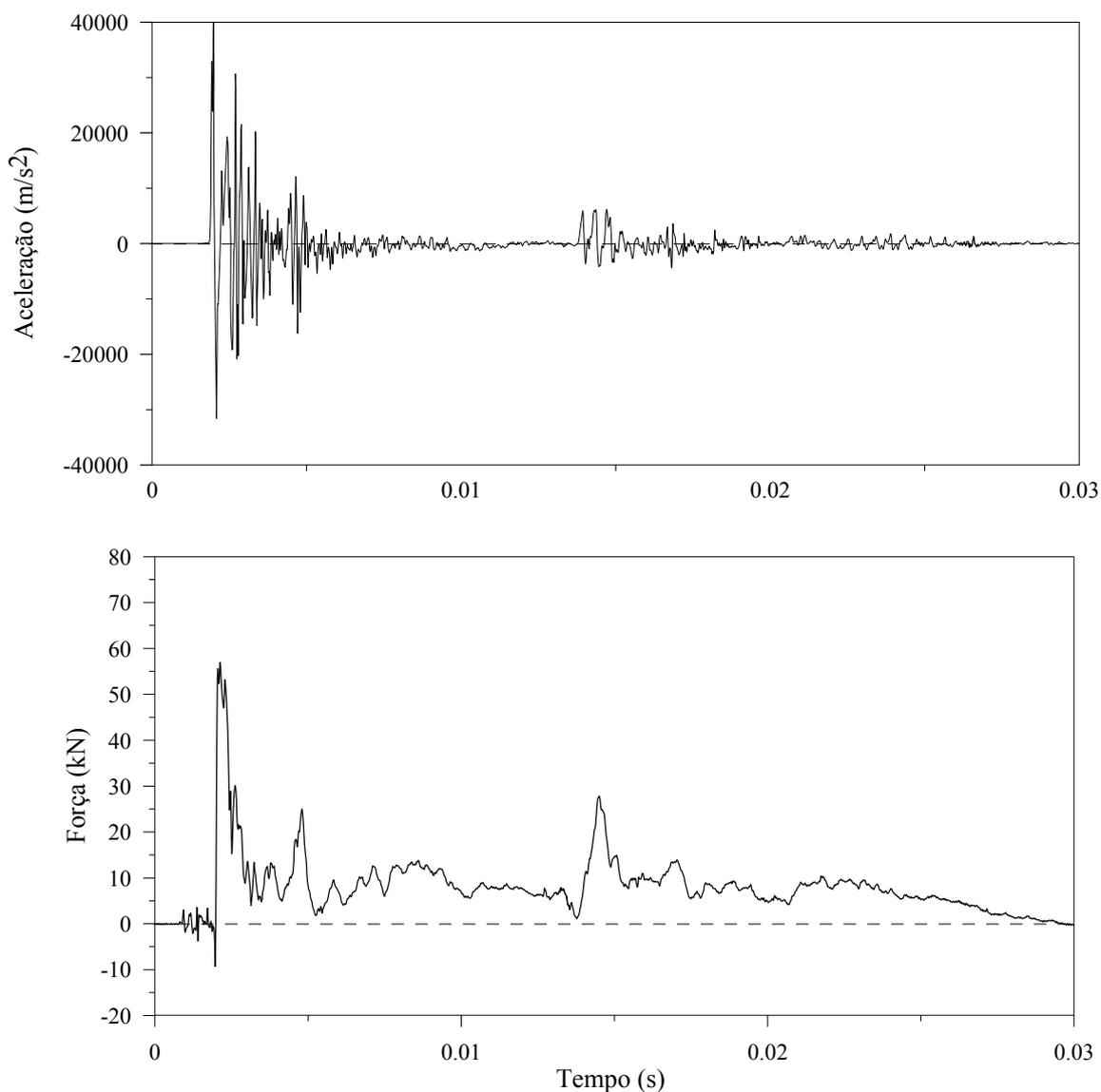


Figura 4.3-Registro completo do golpe 15 do ensaio dinâmico *SPT3-C1*.

Tabela 4-3-Resultados do ensaio dinâmico *SPT3-C2-g14*

Prova Dinâmica (PCD)	Prof. (m)	N (golpes/cm)	ρ_p (mm)	Tipo de Martelo	Massa de Martelo (kg)	Comprimento de hastes (m)
SPT3_C2	6.46	10/29	33	Com pino guia	64.88	8.30

Figura 4.4- Sinais de aceleração e de força correspondentes ao golpe 14 do ensaio dinâmico *SPT3-C2*.

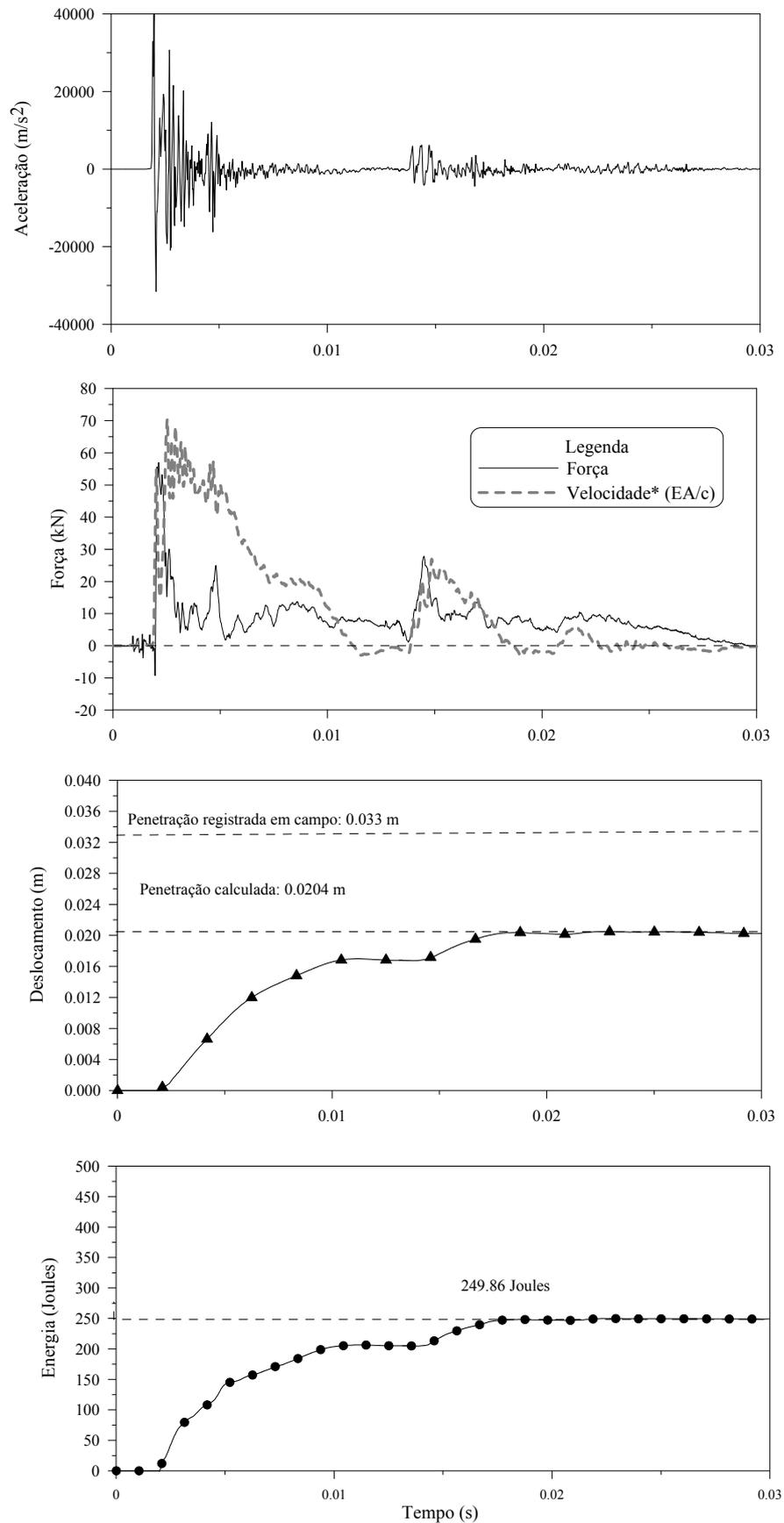
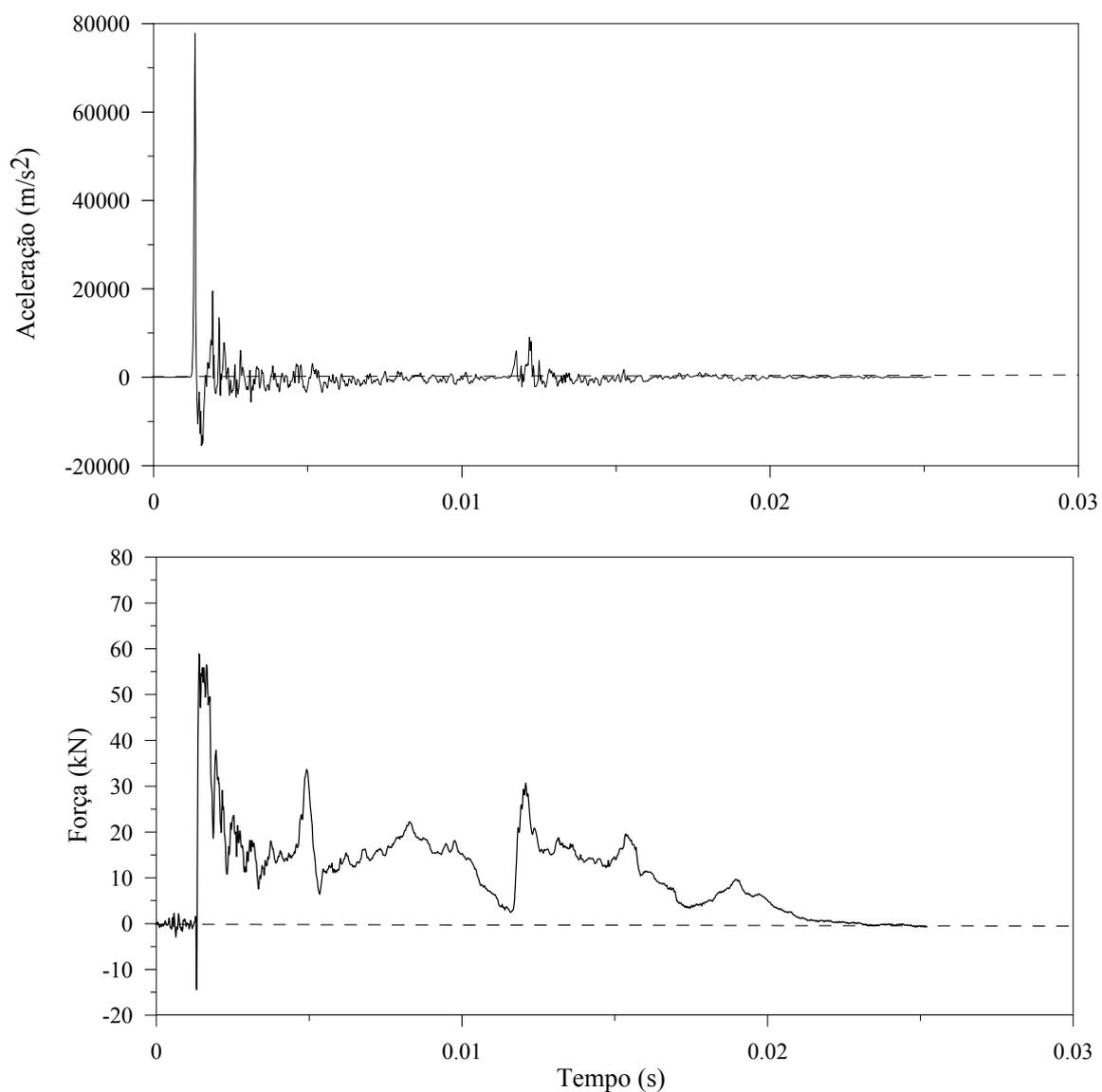


Figura 4.5-Registro completo do golpe 14 do ensaio dinâmico *SPT3-C2*.

Tabela 4-4-Resultados do ensaio dinâmico *SPT3-C3-g22*

Prova Dinâmica (PCD)	Prof. (m)	N (golpes/cm)	ρ_p (mm)	Tipo de Martelo	Massa de Martelo (kg)	Comprimento de hastes (m)
SPT3_C3	8.46	18/32	17	Com pino guia	64.88	9.30

Figura 4.6- Sinais de aceleração e de força correspondentes ao golpe 22 do ensaio dinâmico *SPT3-C3*.

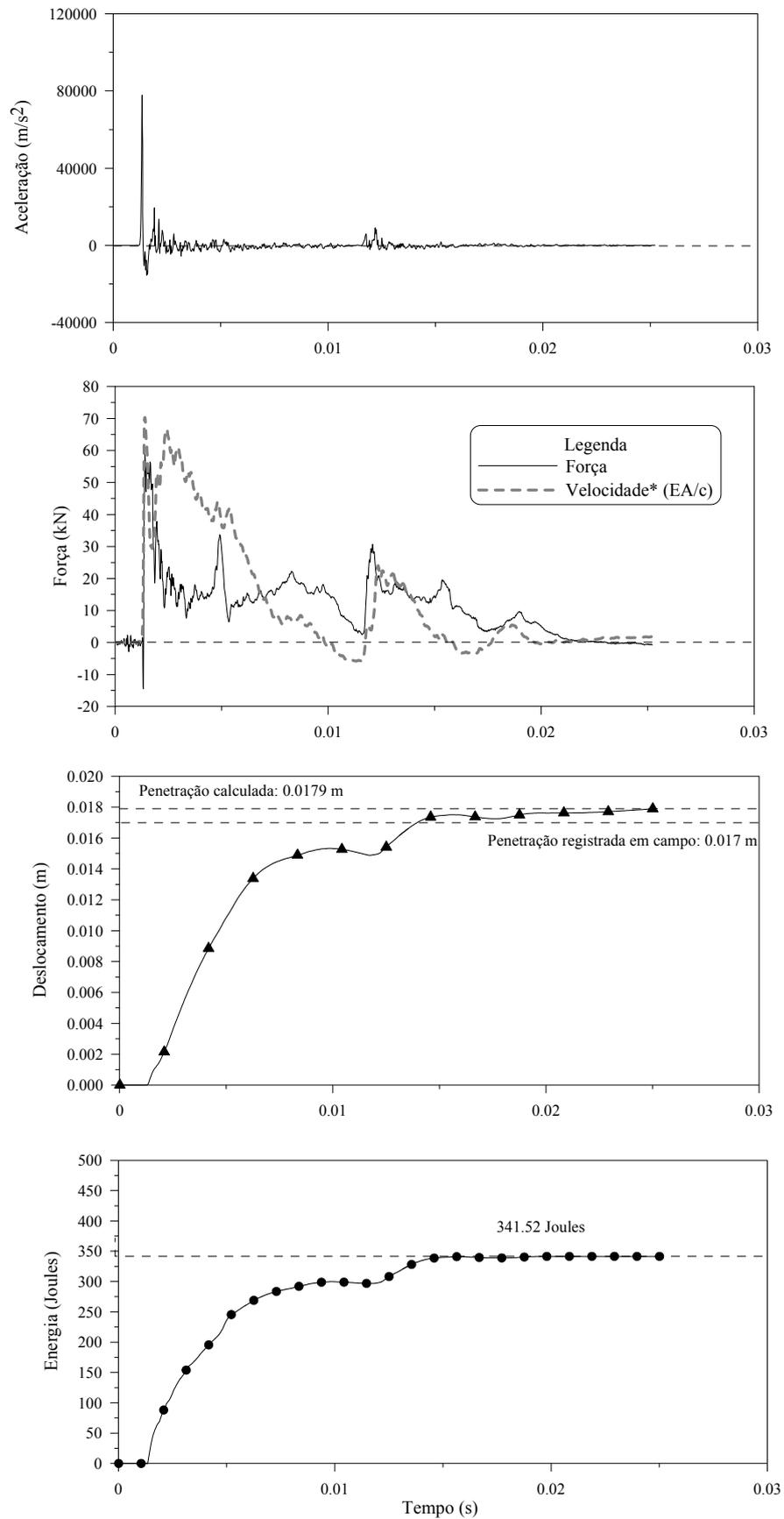
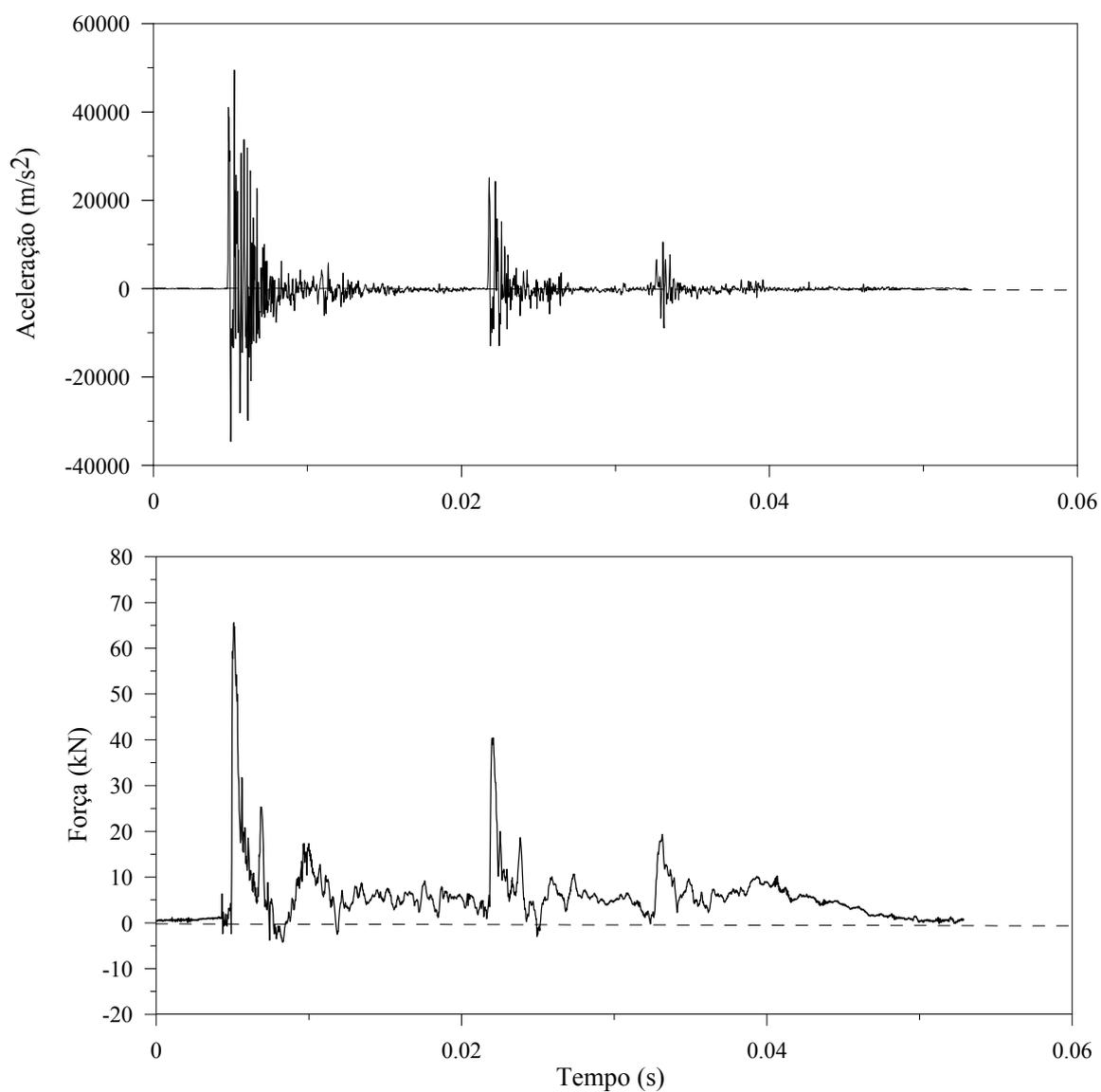


Figura 4.7-Registro completo do golpe 22 do ensaio dinâmico *SPT3-C3*.

Tabela 4-5-Resultados do ensaio dinâmico *SPT4-C1-g10*

Prova Dinâmica (PCD)	Prof. (m)	N (golpes/cm)	ρ_p (mm)	Tipo de Martelo	Massa de Martelo (kg)	Comprimento de hastes (m)
SPT4_C1	4.48	8/34	51	Com pino guia	65.88	6.30

Figura 4.8- Sinais de aceleração e de força correspondentes ao golpe 10 do ensaio dinâmico *SPT4-C1*.

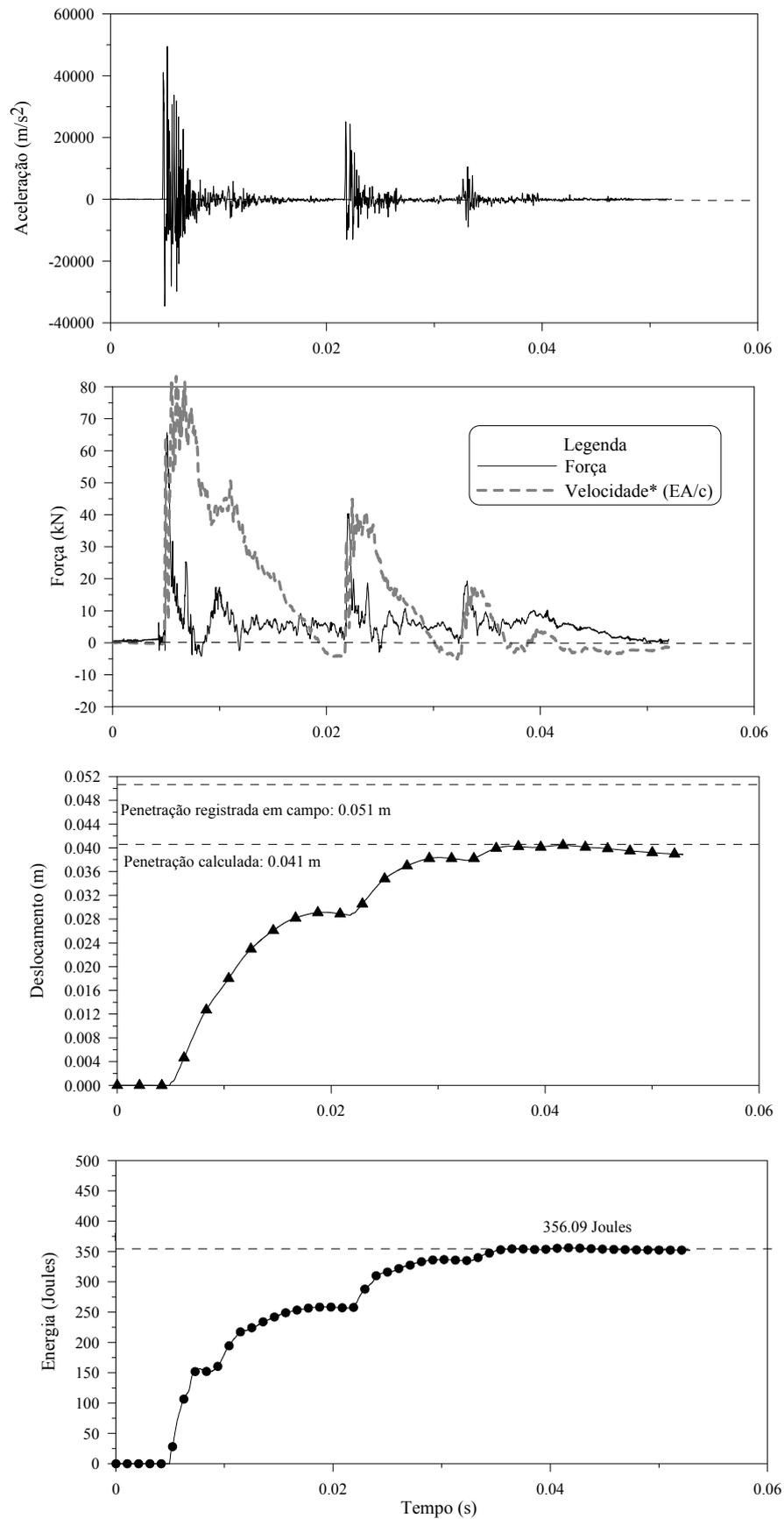


Figura 4.9-Registro completo do golpe 10 do ensaio dinâmico *SPT4-C1*.

Tabela 4-6-Resultados do ensaio dinâmico *SPT4-C2-g9*

Prova Dinâmica (PCD)	Prof. (m)	N (golpes/cm)	ρ_p (mm)	Tipo de Martelo	Massa de Martelo (kg)	Comprimento de hastes (m)
SPT4_C2	6.45	6/29	50	Com pino guia	65.88	8.30

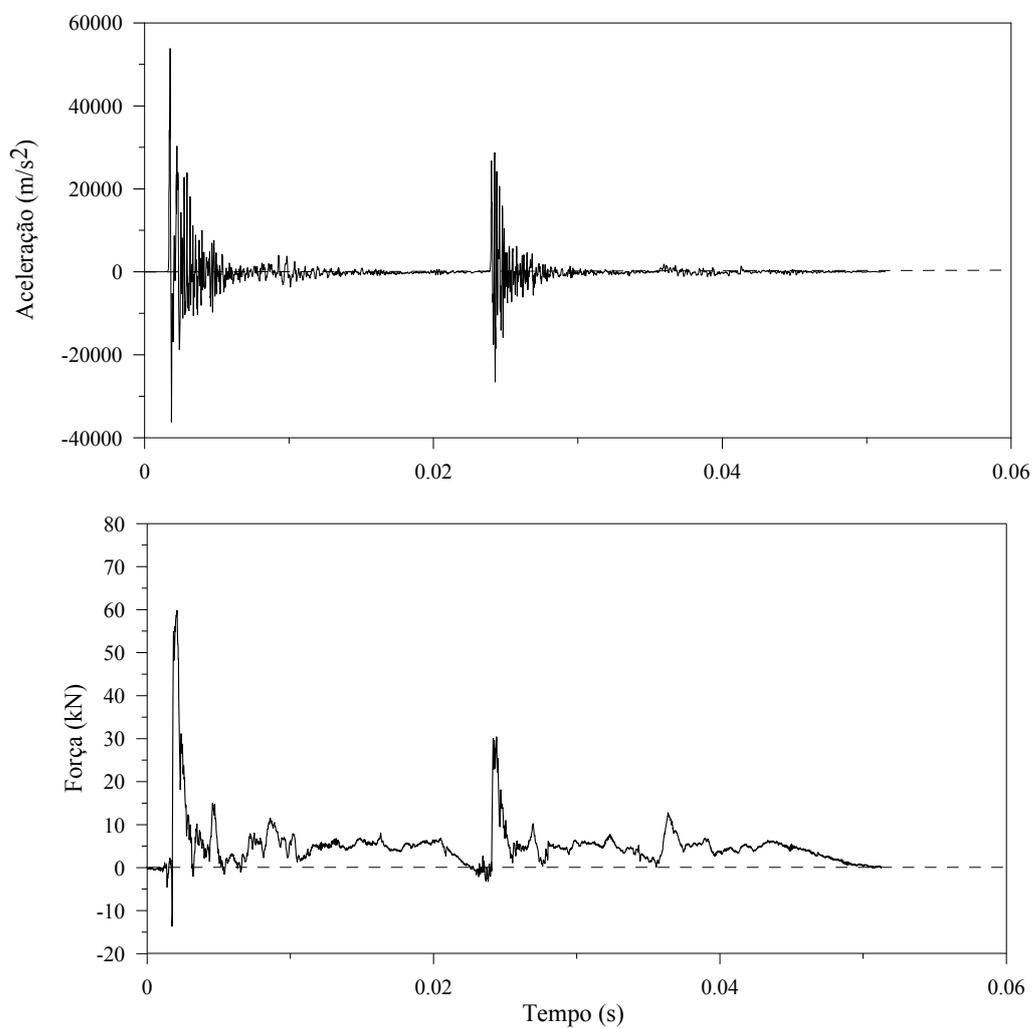


Figura 4.10- Sinais de aceleração e de força correspondentes ao golpe 09 do ensaio dinâmico *SPT4-C2*.

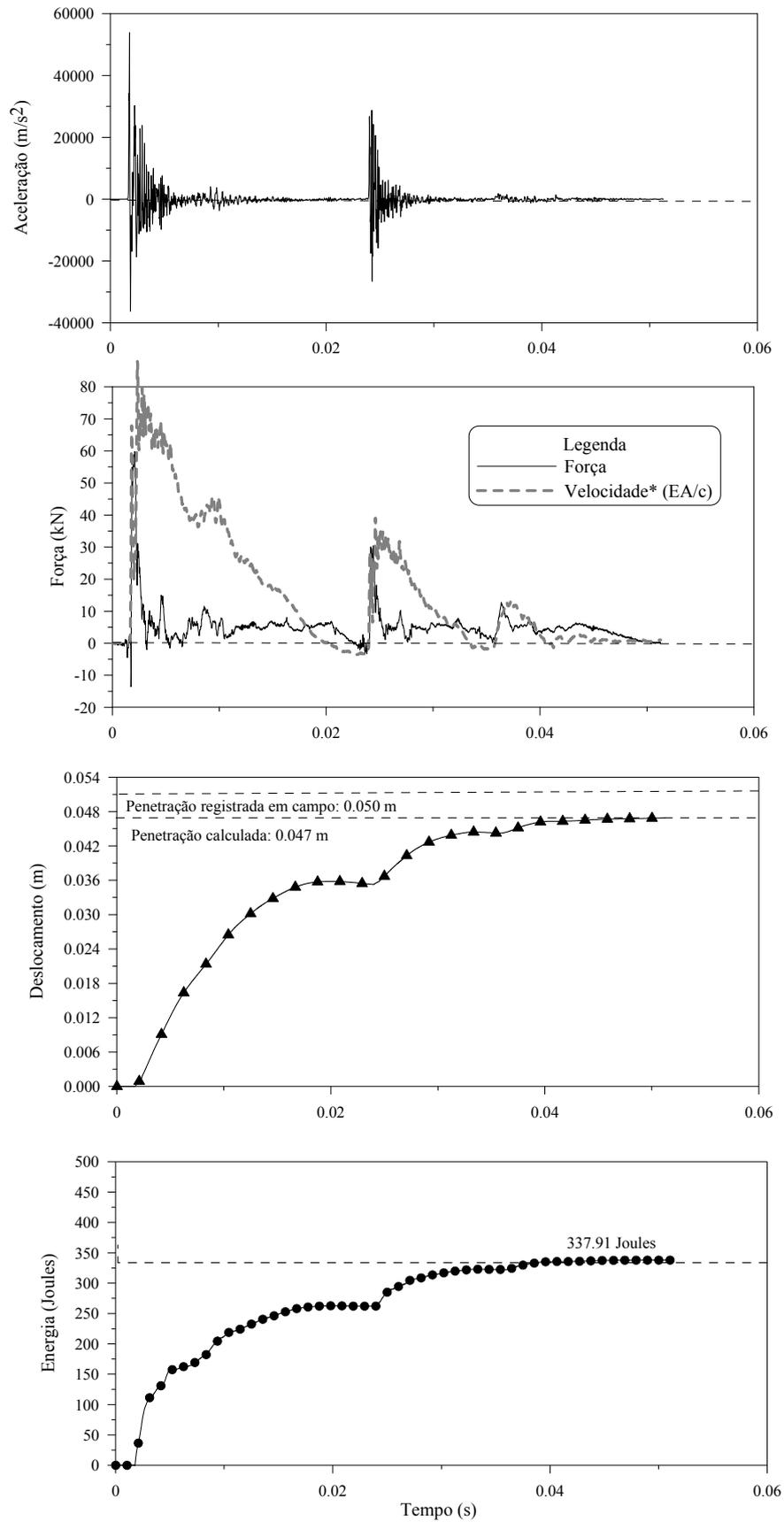
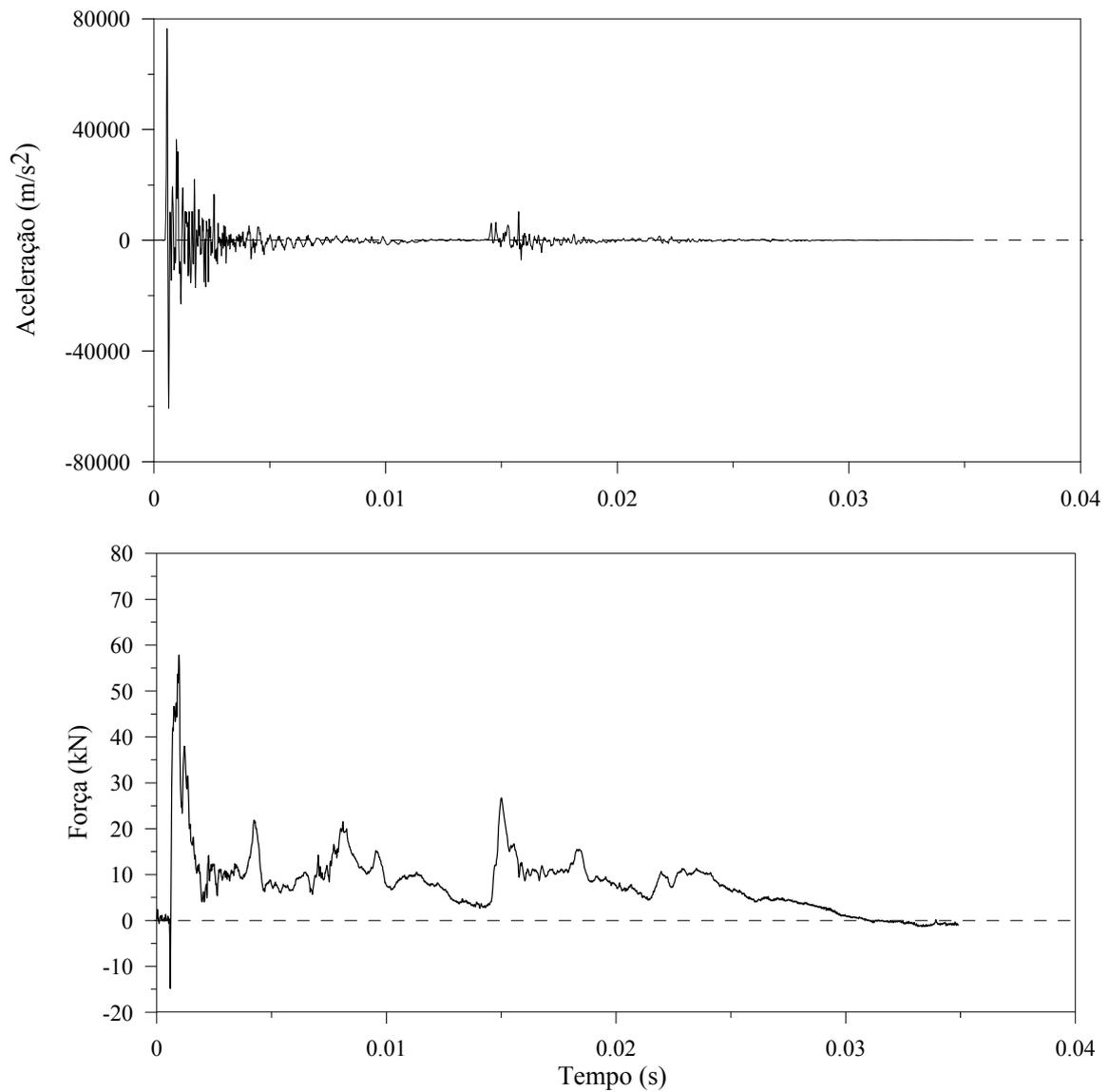


Figura 4.11-Registro completo do golpe 09 do ensaio dinâmico *SPT4-C2*.

Tabela 4-7-Resultados do ensaio dinâmico *SPT4-C3-g13*

Prova Dinâmica (PCD)	Prof. (m)	N (golpes/cm)	ρ_p (mm)	Tipo de Martelo	Massa de Martelo (kg)	Comprimento de hastes (m)
SPT4_C3	8.45	11/30	17	Com pino guia	65.88	9.30

Figura 4.12- Sinais de aceleração e de força correspondentes ao golpe 13 do ensaio dinâmico *SPT4-C3*.

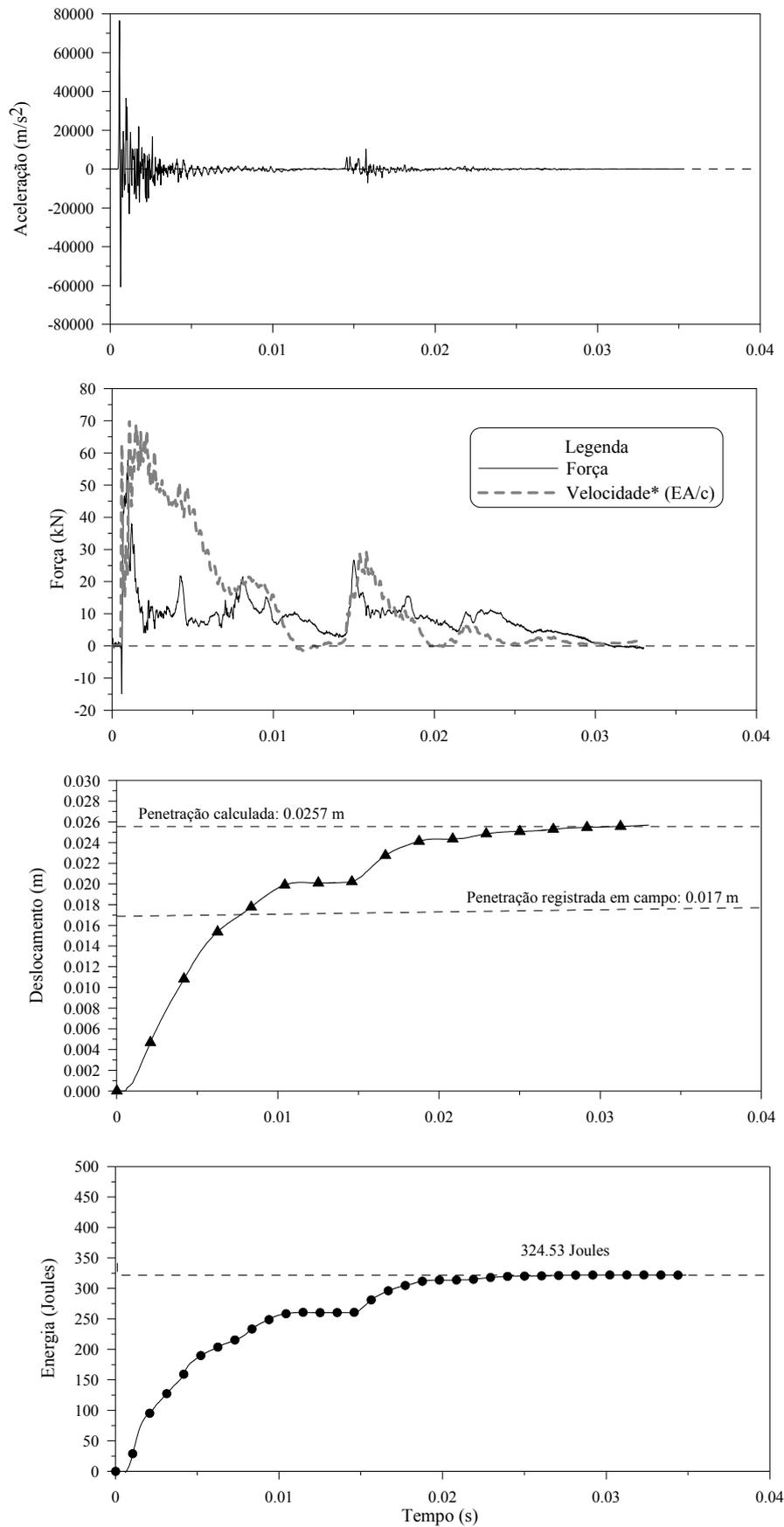


Figura 4.13-Registro completo do golpe 13 do ensaio dinâmico *SPT4-C3*.

Tabela 4-8-Resultados do ensaio dinâmico *SPT5-C1-g8*

Prova Dinâmica (PCD)	Prof. (m)	N (golpes/cm)	ρ_p (mm)	Tipo de Martelo	Massa de Martelo (kg)	Comprimento de hastes (m)
SPT5_C1	4.48	6/35	70	Com pino guia	66.8	6.30

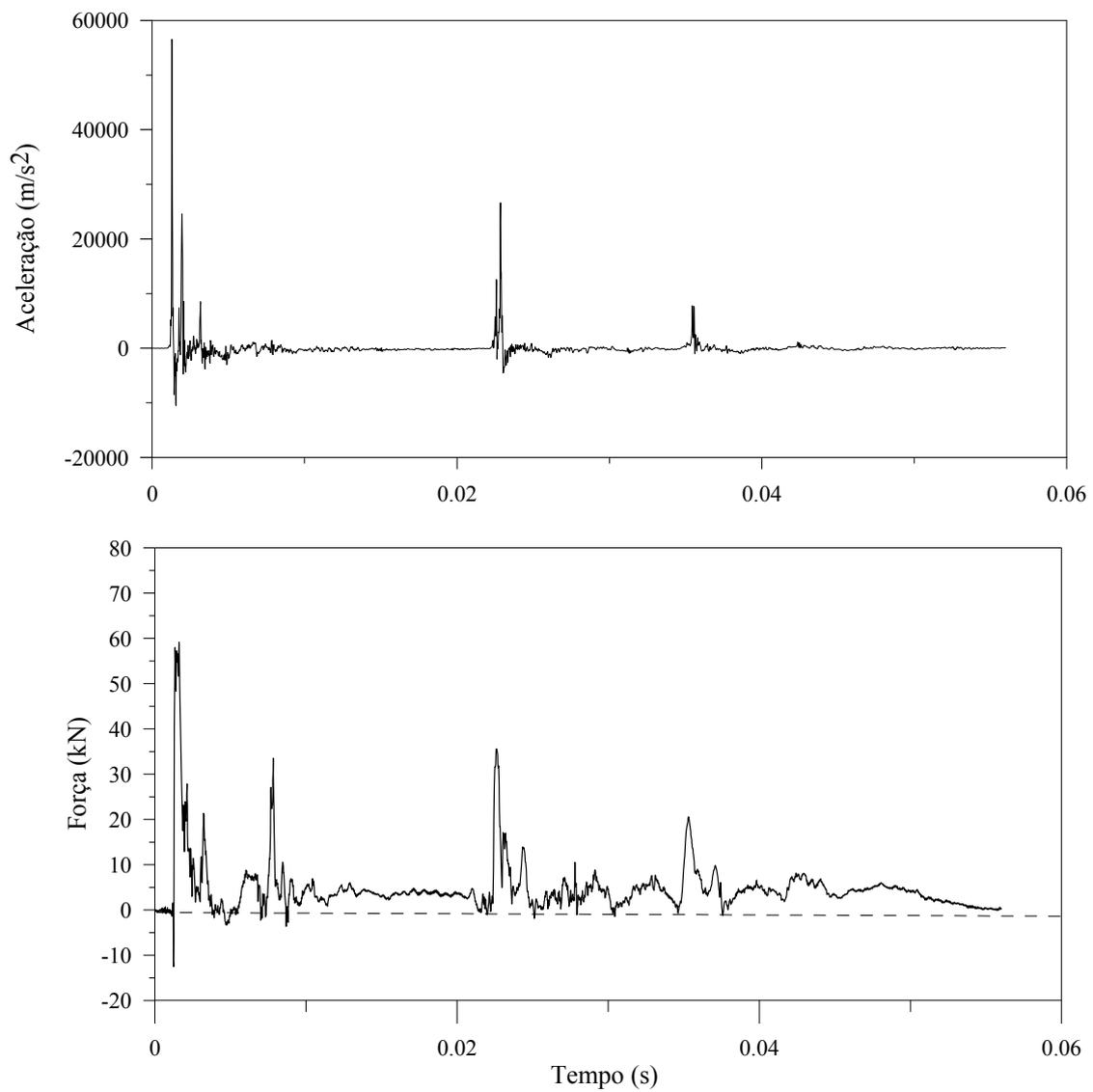


Figura 4.14- Sinais de aceleração e de força correspondentes ao golpe 08 do ensaio dinâmico *SPT5-C1*.

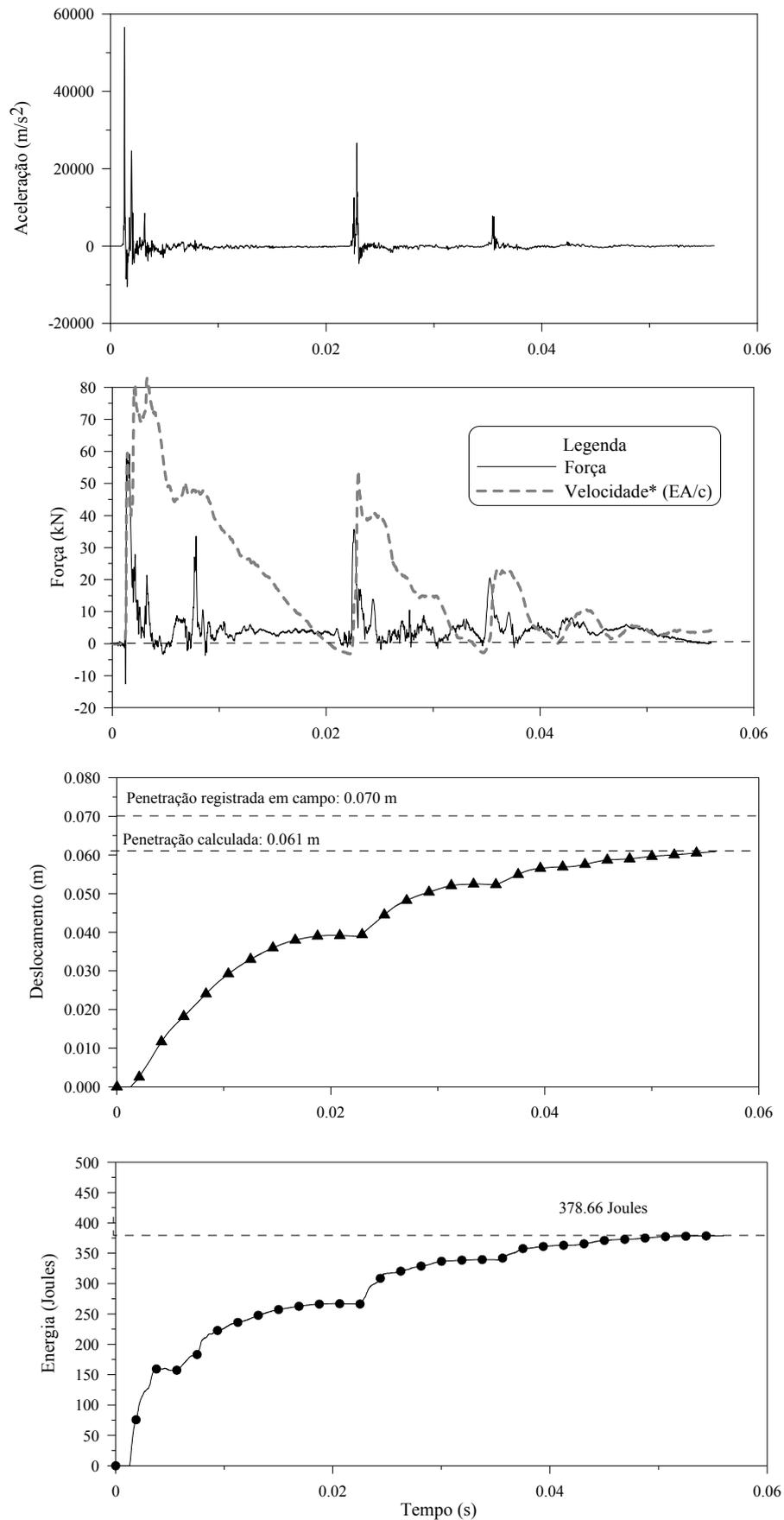
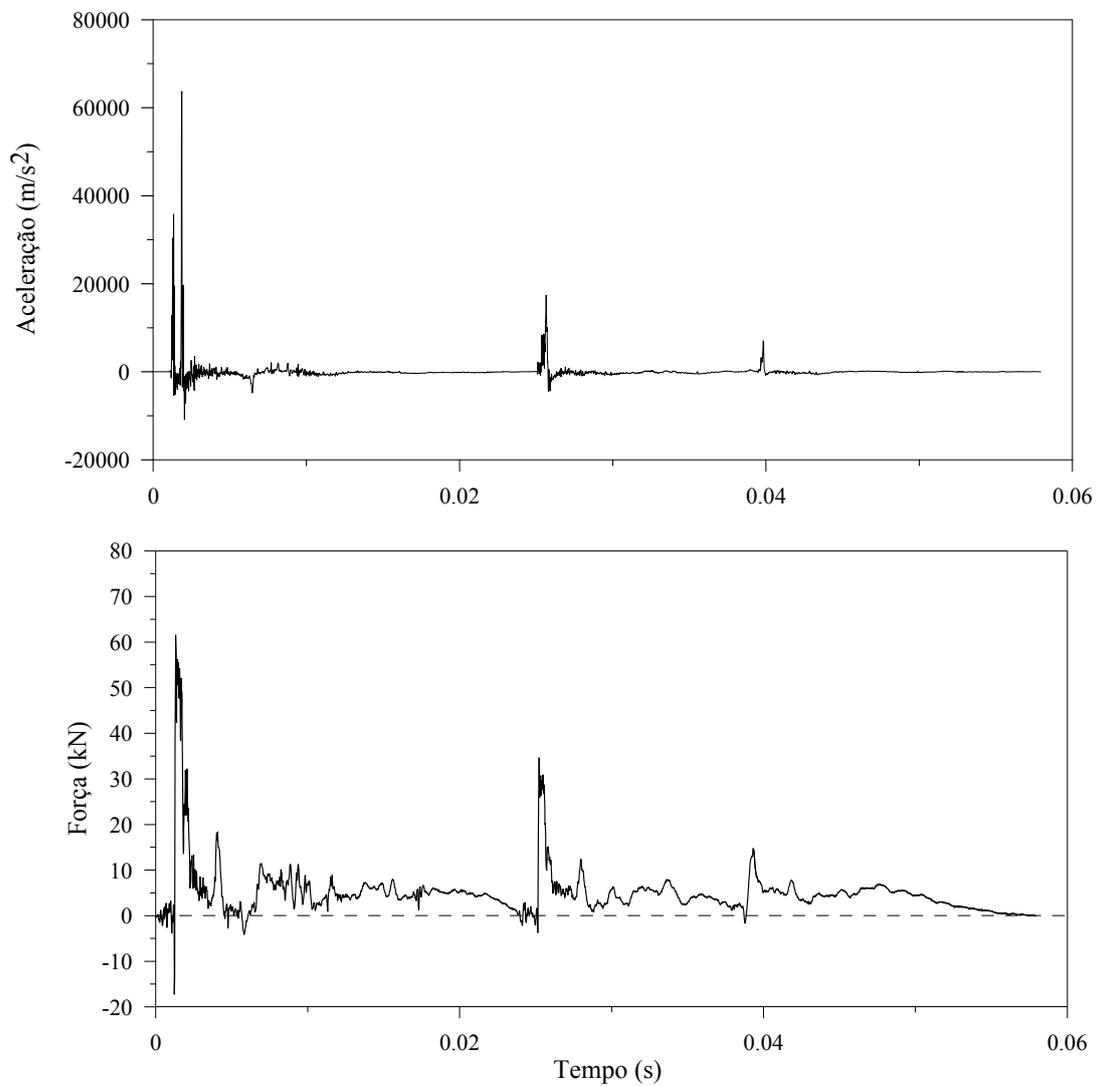


Figura 4.15-Registro completo do golpe 08 do ensaio dinâmico *SPT5-C1*.

Tabela 4-9-Resultados do ensaio dinâmico *SPT5-C2-g10*

Prova Dinâmica (PCD)	Prof. (m)	N (golpes/cm)	ρ_p (mm)	Tipo de Martelo	Massa de Martelo (kg)	Comprimento de hastes (m)
SPT5_C2	6.47	7/30	59	Com pino guia	66.8	8.30

Figura 4.16- Sinais de aceleração e de força correspondentes ao golpe 10 do ensaio dinâmico *SPT5-C2*.

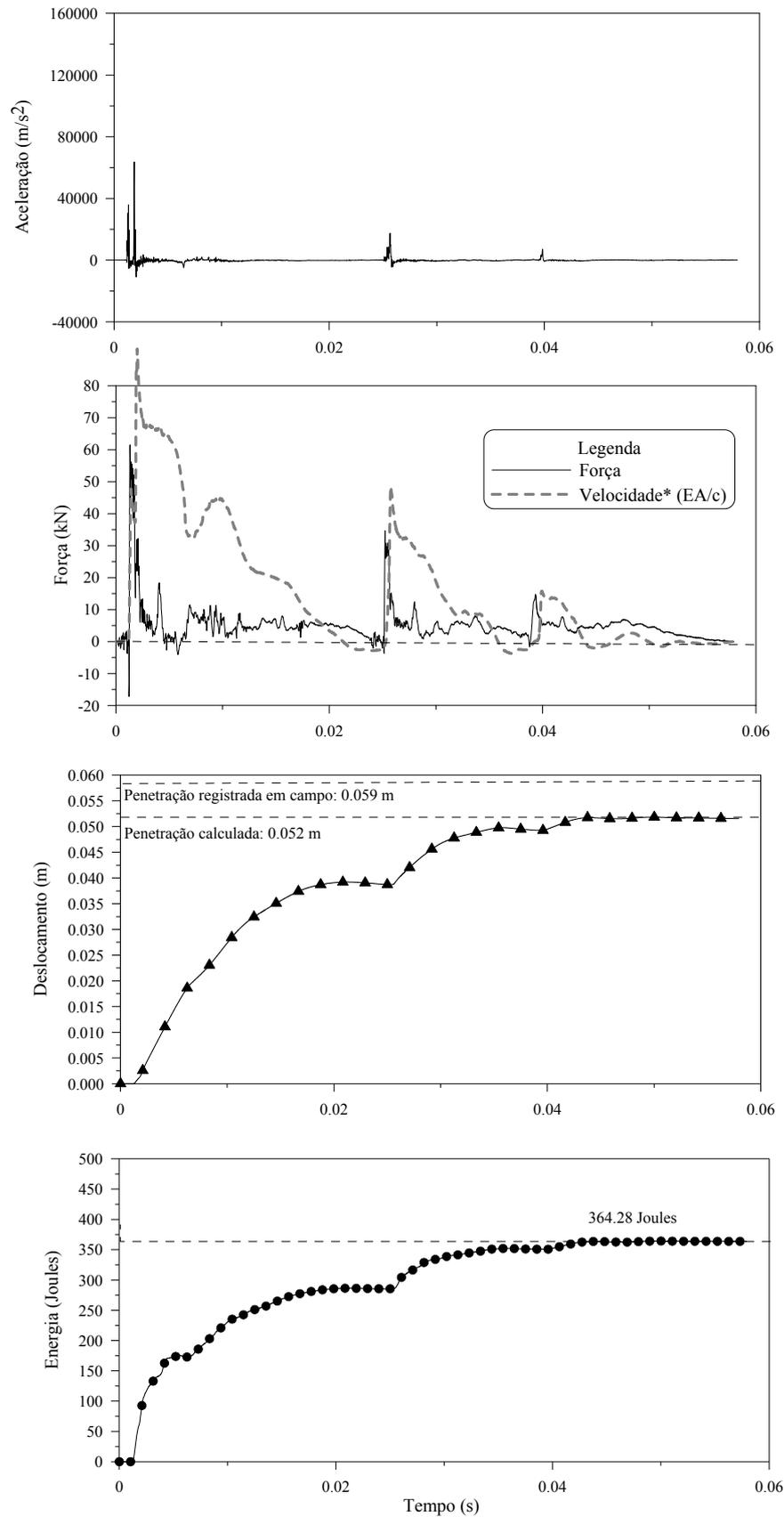


Figura 4.17-Registro completo do golpe 10 do ensaio dinâmico *SPT5-C2*.

Tabela 4-10-Resultados do ensaio dinâmico *SPT5-C3-g16*

Prova Dinâmica (PCD)	Prof. (m)	N (golpes/cm)	ρ_p (mm)	Tipo de Martelo	Massa de Martelo (kg)	Comprimento de hastes (m)
SPT5_C3	8.45	13/31	32	Com pino guia	66.8	9.30

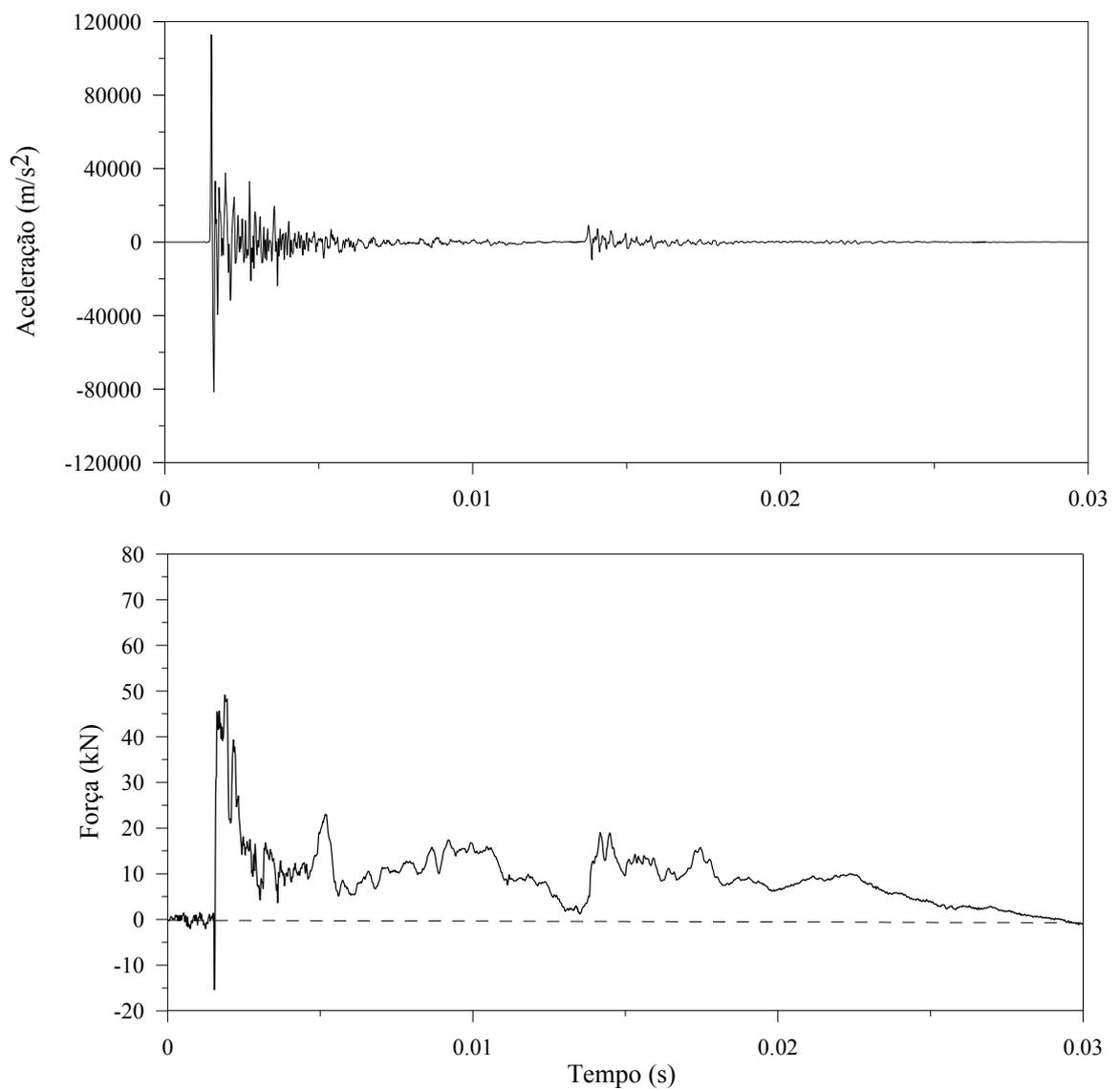


Figura 4.18- Sinais de aceleração e de força correspondentes ao golpe 16 do ensaio dinâmico *SPT5-C3*.

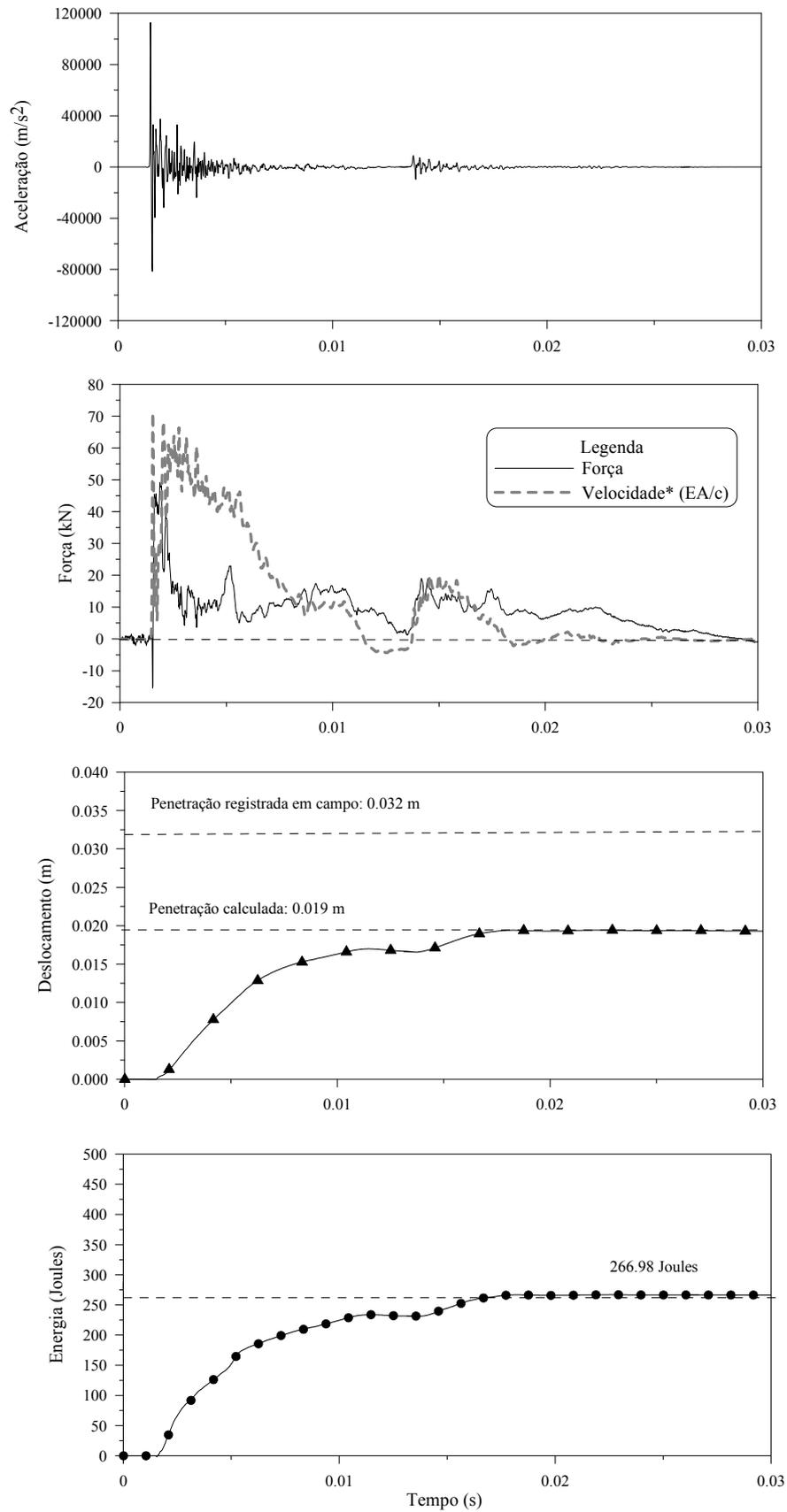
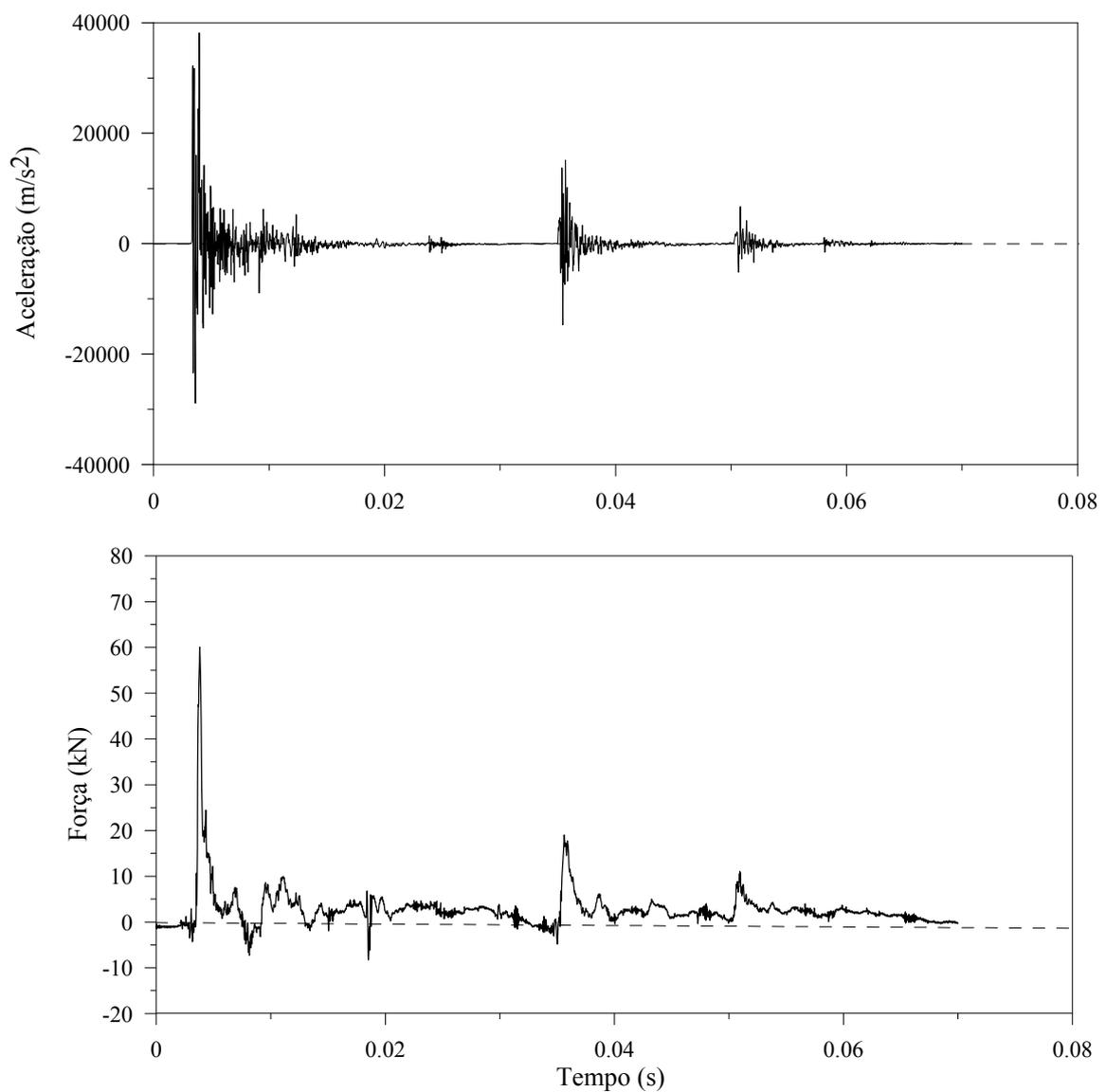


Figura 4.19-Registro completo do golpe 16 do ensaio dinâmico *SPT5-C3*.

Tabela 4-11-Resultados do ensaio dinâmico *SPT6-C2-g9*

Prova Dinâmica (PCD)	Prof. (m)	N (golpes/cm)	ρ_p (mm)	Tipo de Martelo	Massa de Martelo (kg)	Comprimento de hastes (m)
SPT6_C2	6.49	6/34	72	Automático	63.5	6.80

Figura 4.20- Sinais de aceleração e de força correspondentes ao golpe 09 do ensaio dinâmico *SPT6-C2*.

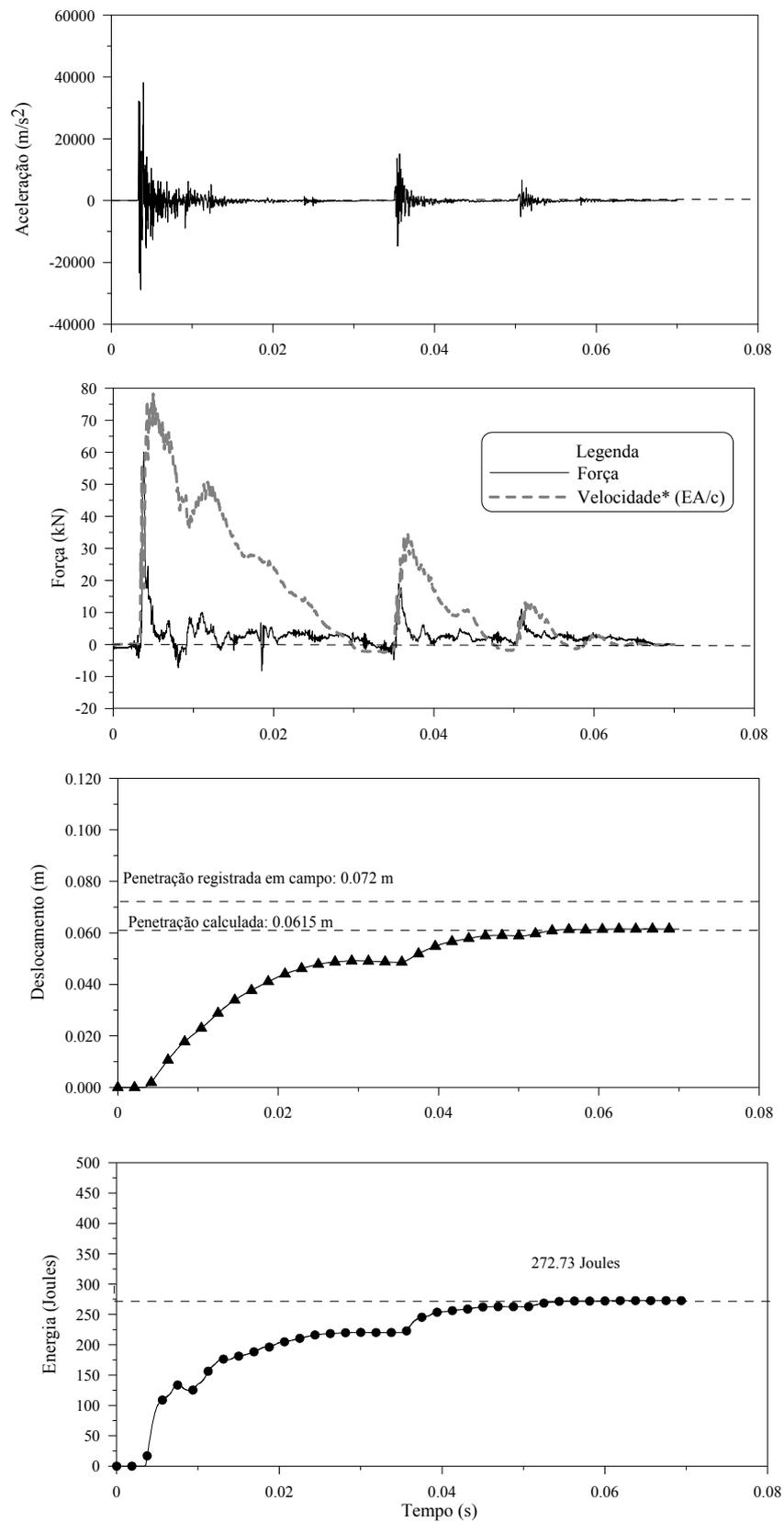
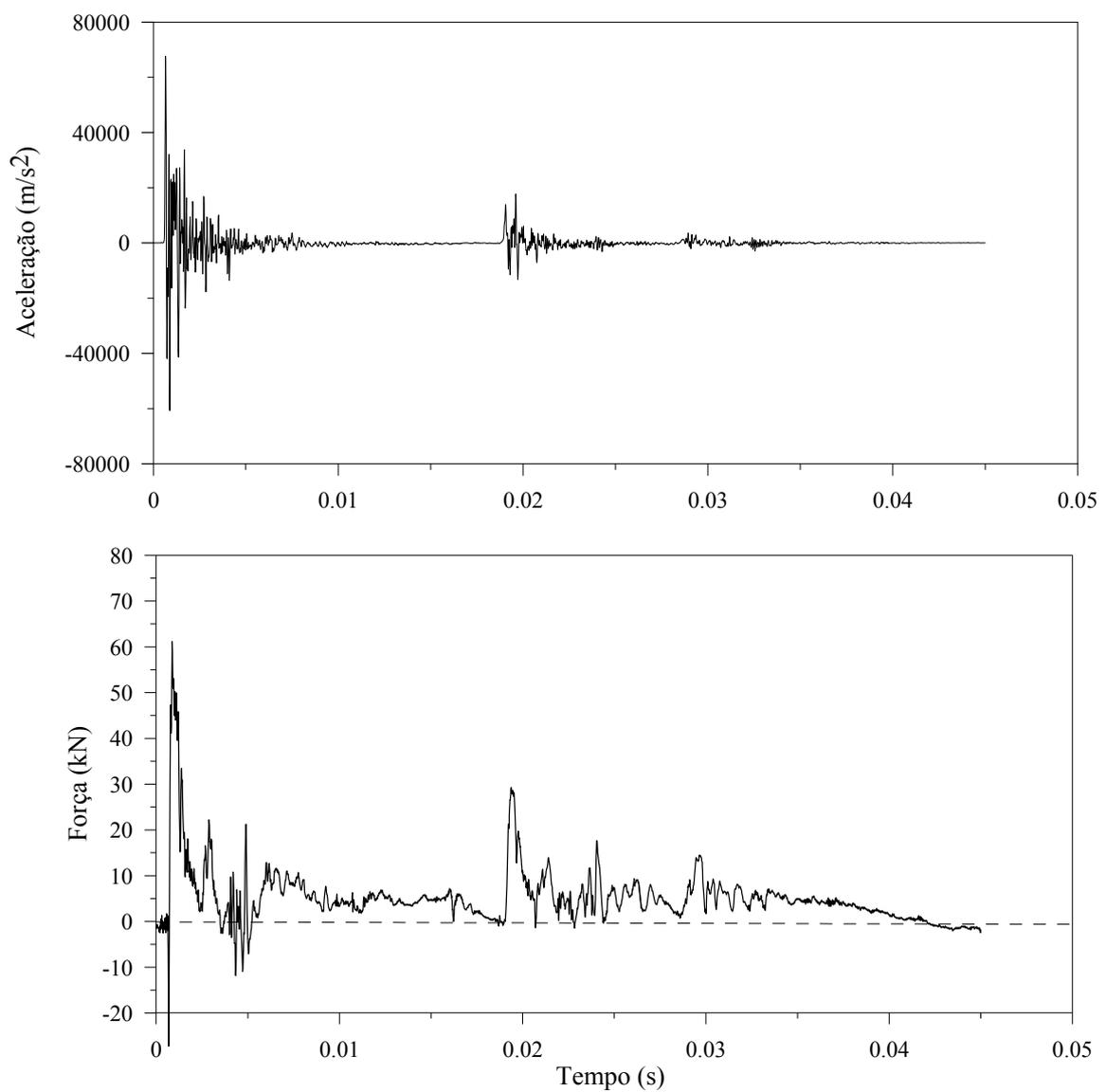


Figura 4.21-Registro completo do golpe 09 do ensaio dinâmico *SPT6-C2*.

Tabela 4-12-Resultados do ensaio dinâmico *SPT7-C1-g9*

Prova Dinâmica (PCD)	Prof. (m)	N (golpes/cm)	ρ_b (mm)	Tipo de Martelo	Massa de Martelo (kg)	Comprimento de hastes (m)
SPT7_C1	4.55	6/31	40	Automático	63.5	5.30

Figura 4.22- Sinais de aceleração e de força correspondentes ao golpe 09 do ensaio dinâmico *SPT7-C1*.

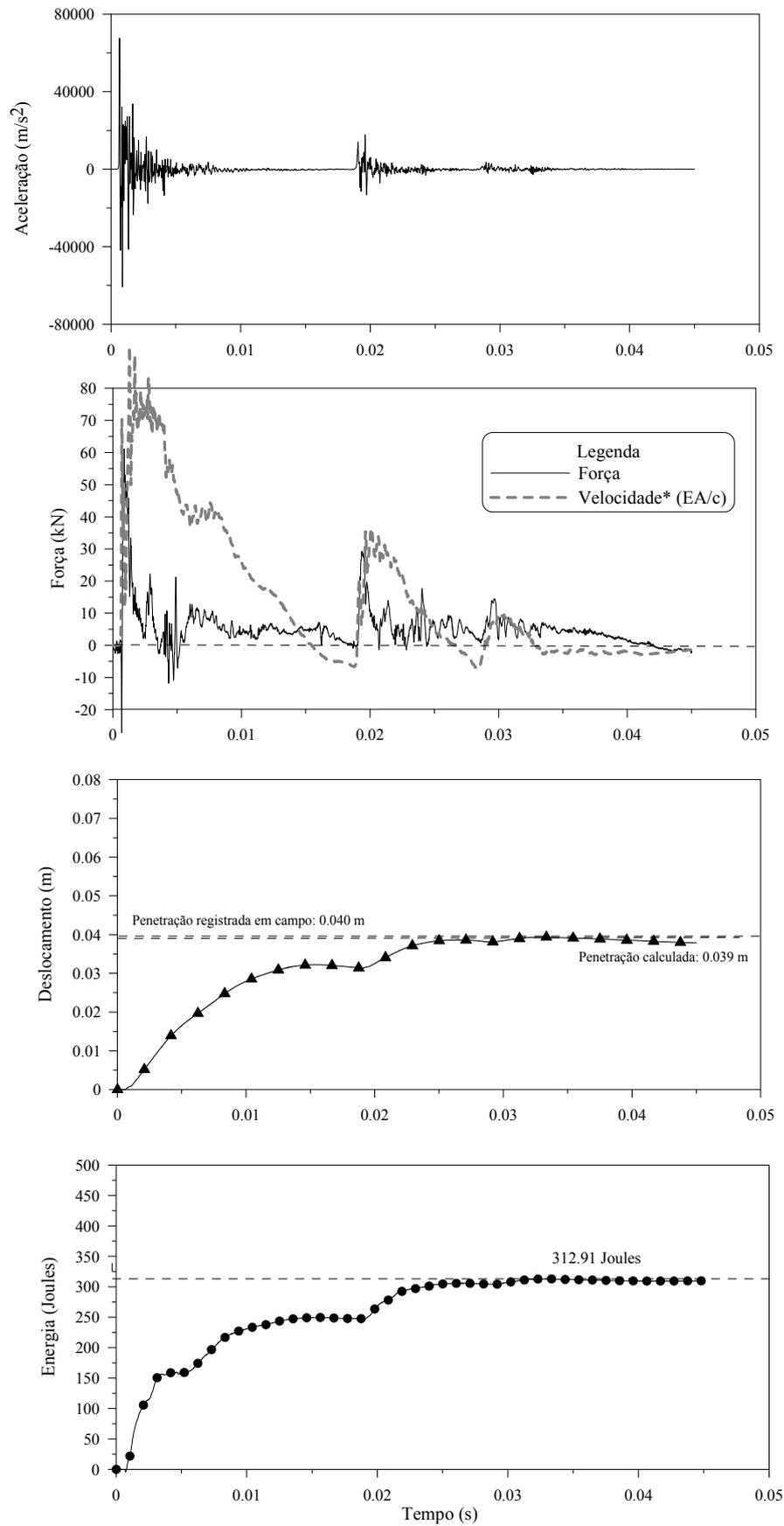


Figura 4.23-Registro completo do golpe 09 do ensaio dinâmico *SPT7-C1*.

Tabela 4-13-Resultados do ensaio dinâmico *SPT7-C2-g7*

Prova Dinâmica (PCD)	Prof. (m)	N (golpes/cm)	ρ_p (mm)	Tipo de Martelo	Massa de Martelo (kg)	Comprimento de hastes (m)
SPT7_C2	6.49	5/33	75	Automático	63.5	6.80

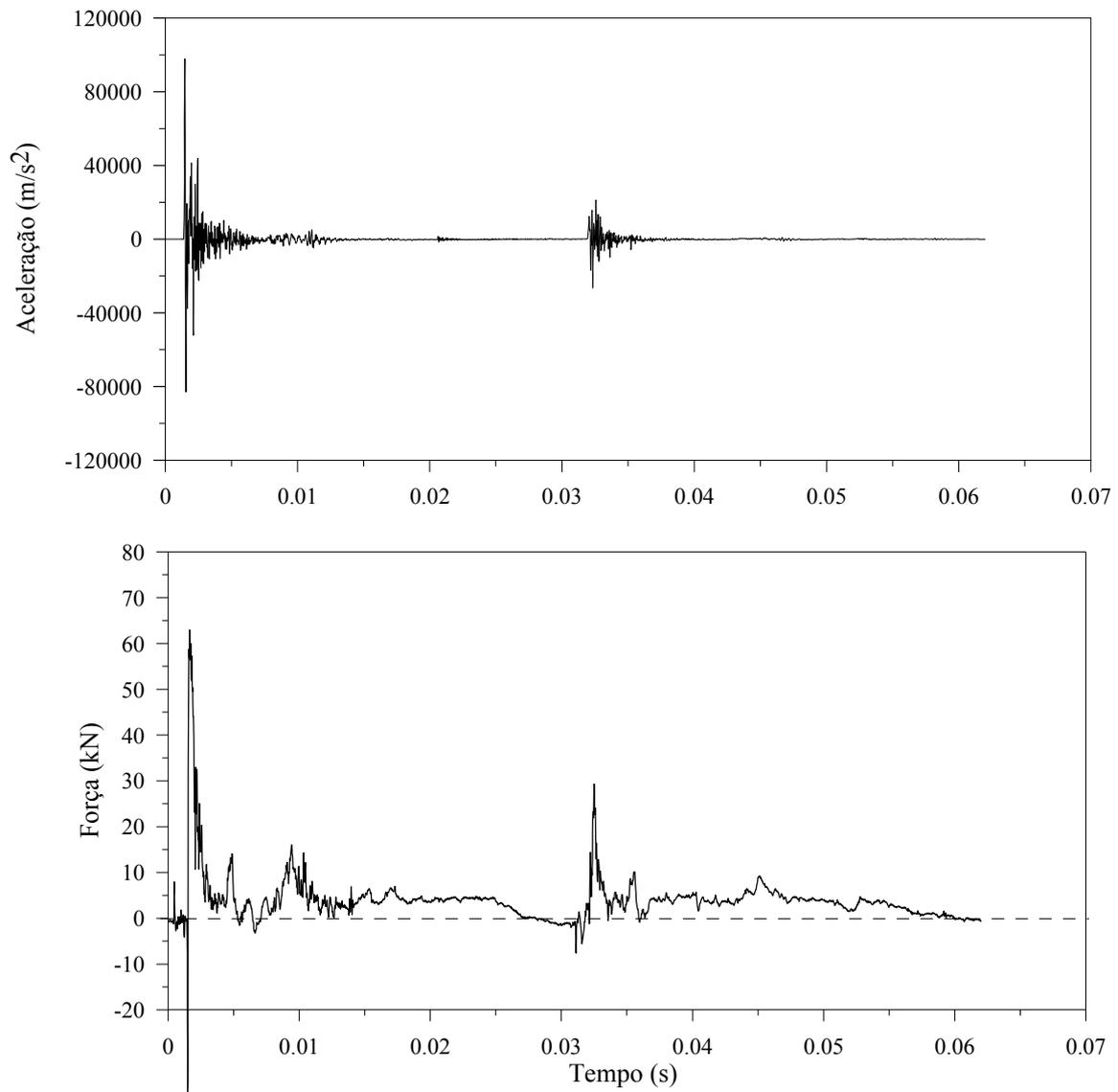


Figura 4.24- Sinais de aceleração e de força correspondentes ao golpe 07 do ensaio dinâmico *SPT7-C2*.

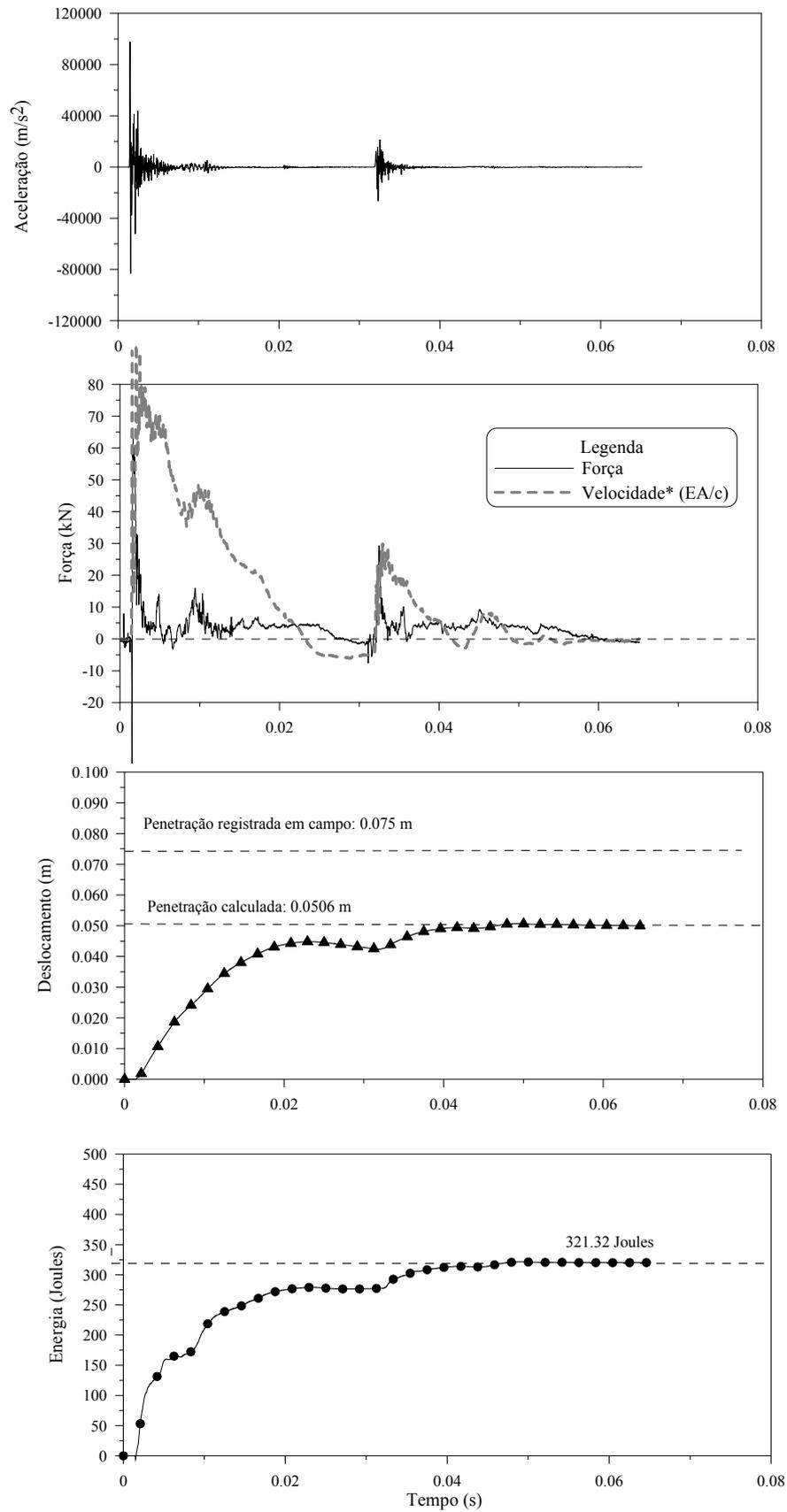
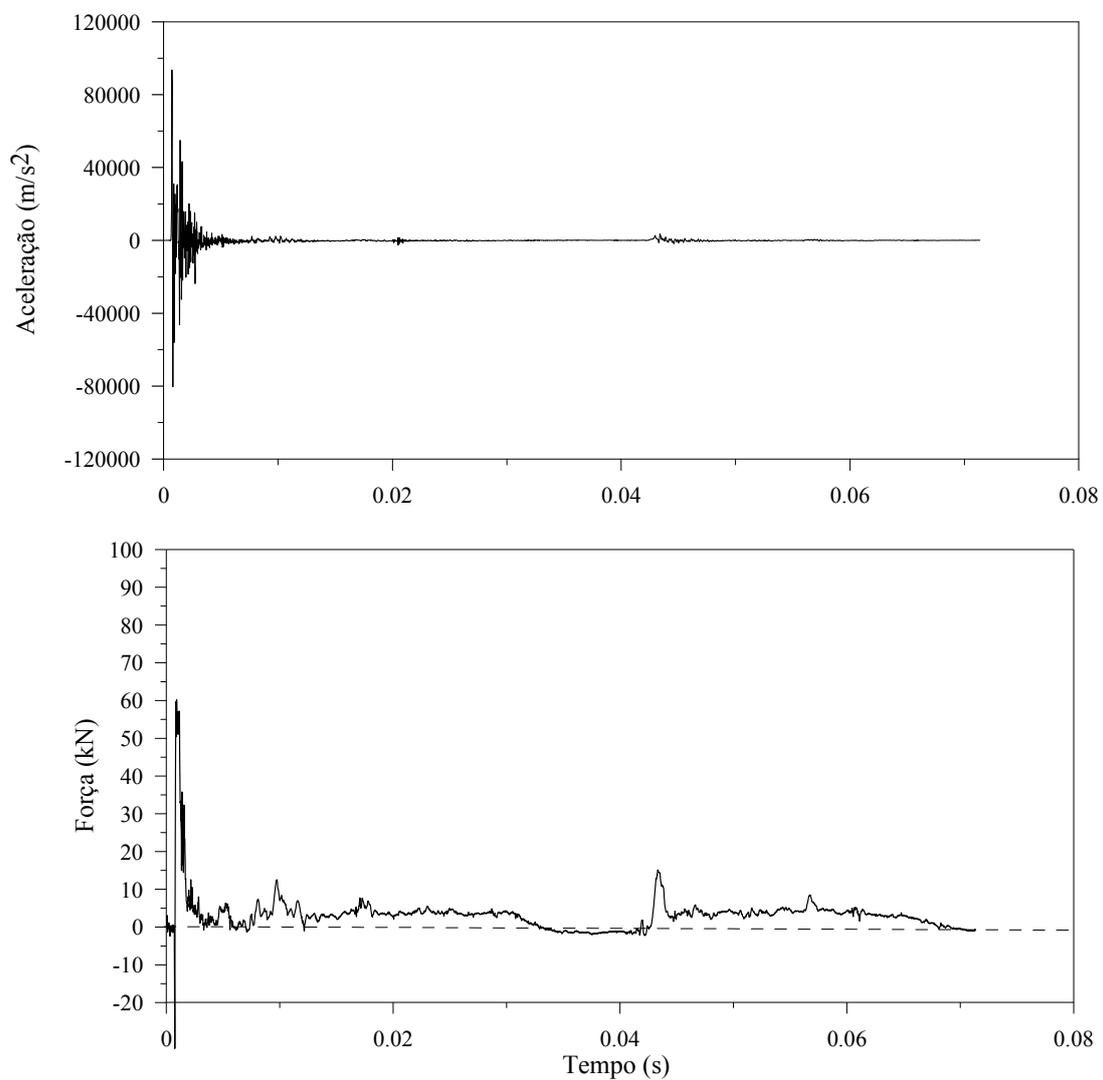


Figura 4.25-Registro completo do golpe 07 do ensaio dinâmico SPT7-C2.

Tabela 4-14-Resultados do ensaio dinâmico *SPT7-C3-g7*

Prova Dinâmica (PCD)	Prof. (m)	N (golpes/cm)	ρ_p (mm)	Tipo de Martelo	Massa de Martelo (kg)	Comprimento de hastes (m)
SPT7_C3	8.46	5/34	72	Automático	63.5	9.30

Figura 4.26- Sinais de aceleração e de força correspondentes ao golpe 07 do ensaio dinâmico *SPT7-C3*.

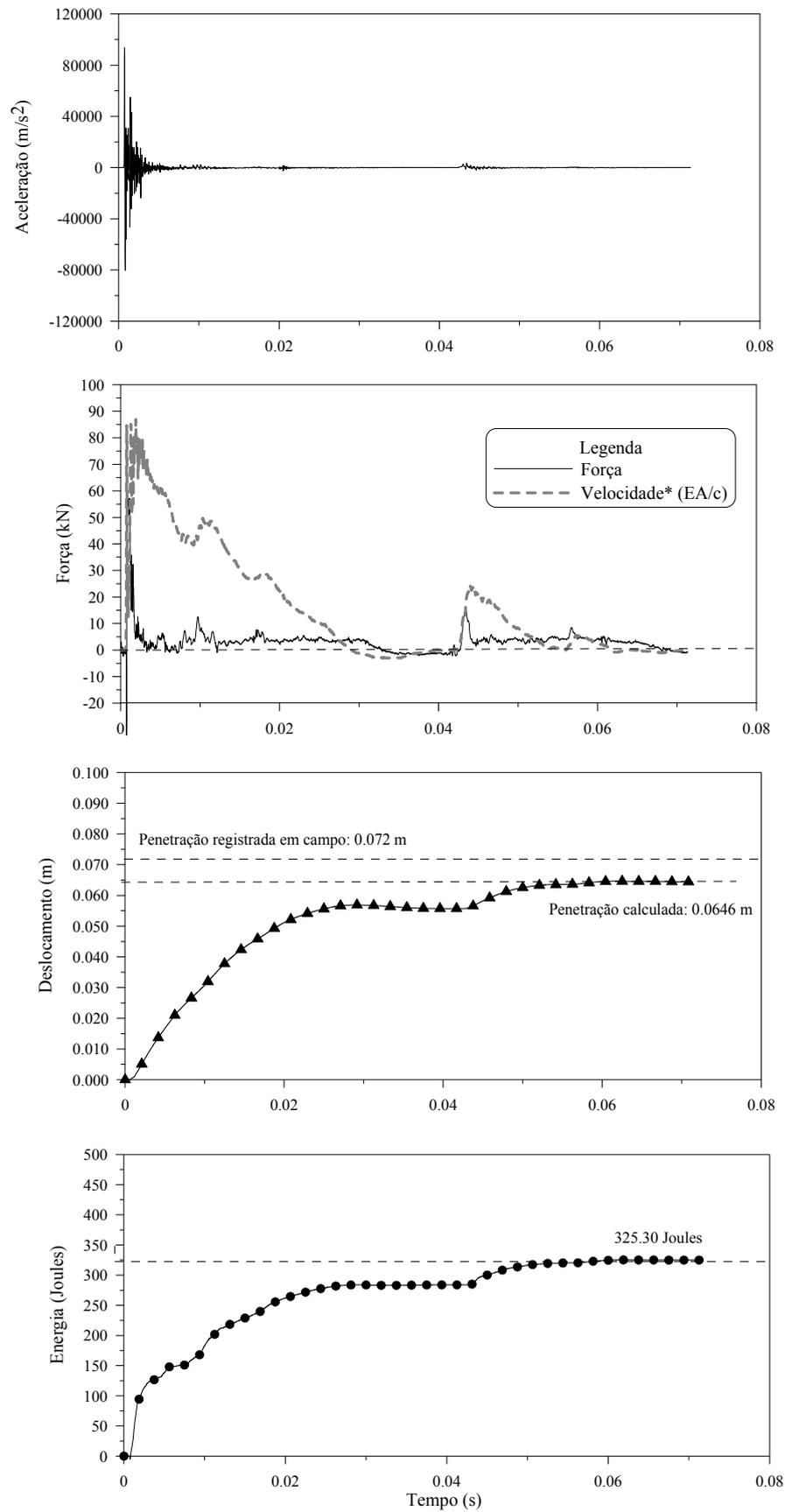


Figura 4.27-Registro completo do golpe 07 do ensaio dinâmico *SPT7-C3*.

Posteriormente, com os registros da velocidade e força pode-se calcular o valor da energia cinética que chega ao amostrador (T_A'), que é a energia responsável pela cravação do amostrador no solo. O método de cálculo foi mostrado no item 3.2.3.1.

4.2.2. Resultados de ensaio estático

Para 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. Como resultado deste ensaio, é obtida uma curva carga-deslocamento. O método de cálculo da área sob esta curva para o mesmo deslocamento obtido no golpe dinâmico do *SPT* é mostrado no apêndice B.

Os resultados das provas de carga estática são mostrados na Tabela 4-15 a Tabela 4-17 e nas Figura 4.28 a Figura 4.30. Além de mostrar os valores de máxima carga, mostram-se os resultados de prova de carga estática como a máxima carga e máximo deslocamento correspondentes ao ensaio dinâmico respectivo.

Tabela 4-15-Resultados do ensaio de prova de carga estática a 4,50 m de profundidade.

Ensaio estático			Ensaio dinâmico	
Prova de Carga Estática (PCE)	Máxima Carga (kN)	Máximo Deslocamento (mm)	p_p (mm)	Carga (kN)
PCE-3-C1	8.46	83.37	50	8.20
PCE-4-C1	7.33	55.01	51	7.30
PCE-5-C1	6.84	72.89	70	6.90
PCE-7-C1	11.39	54.04	40	11.70

Nota: Para designar os ensaios de prova de carga estática (PCE) apresenta-se a seguinte nomenclatura PCE-3-C1 que significa o furo número 3 (PCE-3), à profundidade de 4 m (C1). No caso desta pesquisa realizou-se ensaios estáticos para três profundidades em média: em 4,50 m (C1), 6,47 m (C2) e 8,46 m (C3).

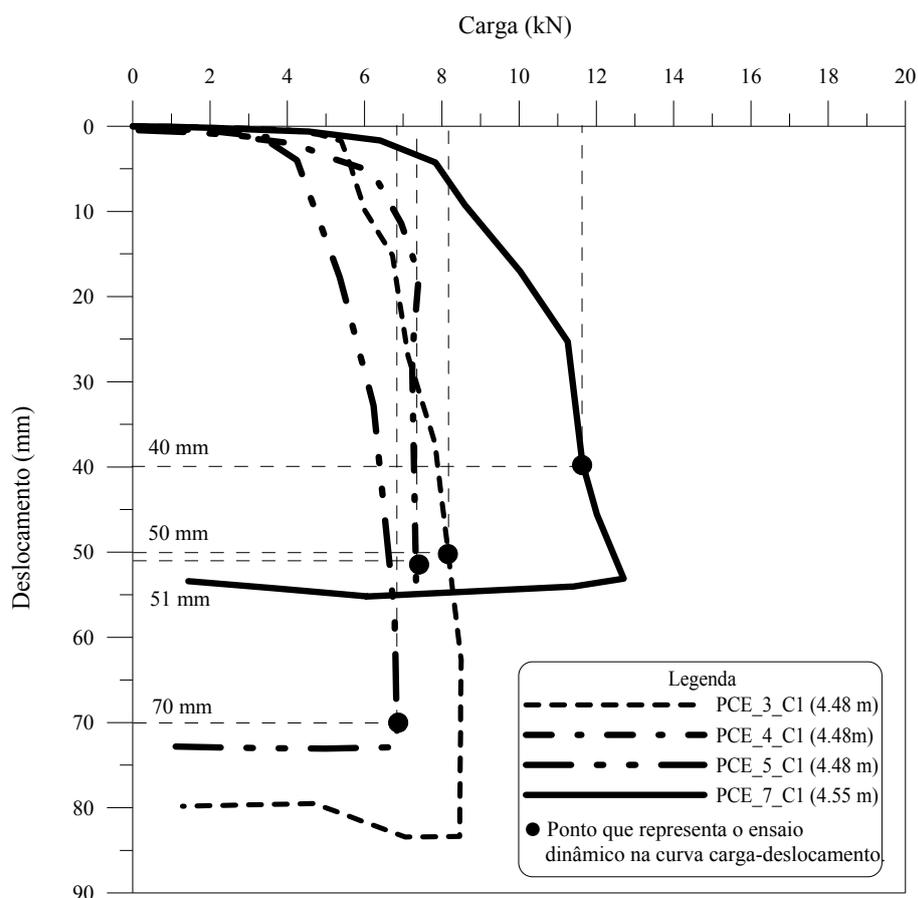


Figura 4.28-Curva carga–deslocamento das provas de carga estática executadas sobre o amostrador SPT à profundidade 4,50 m.

Tabela 4-16-Resultados do ensaio de prova de carga estática a 6,47m de profundidade.

Ensaio estático			Ensaio dinâmico	
Prova de Carga Estática (PCE)	Máxima Carga (kN)	Máximo Deslocamento (mm)	ρ_p (mm)	Carga (kN)
PCE-3-C2	8.34	42.89	33	8.30
PCE-4-C2	8.24	57.75	50	8.00
PCE-5-C2	4.98	61.36	59	5.00
PCE-6-C2	5.11	74.29	72	5.10
PCE-7-C2	5.72	81.27	75	5.65

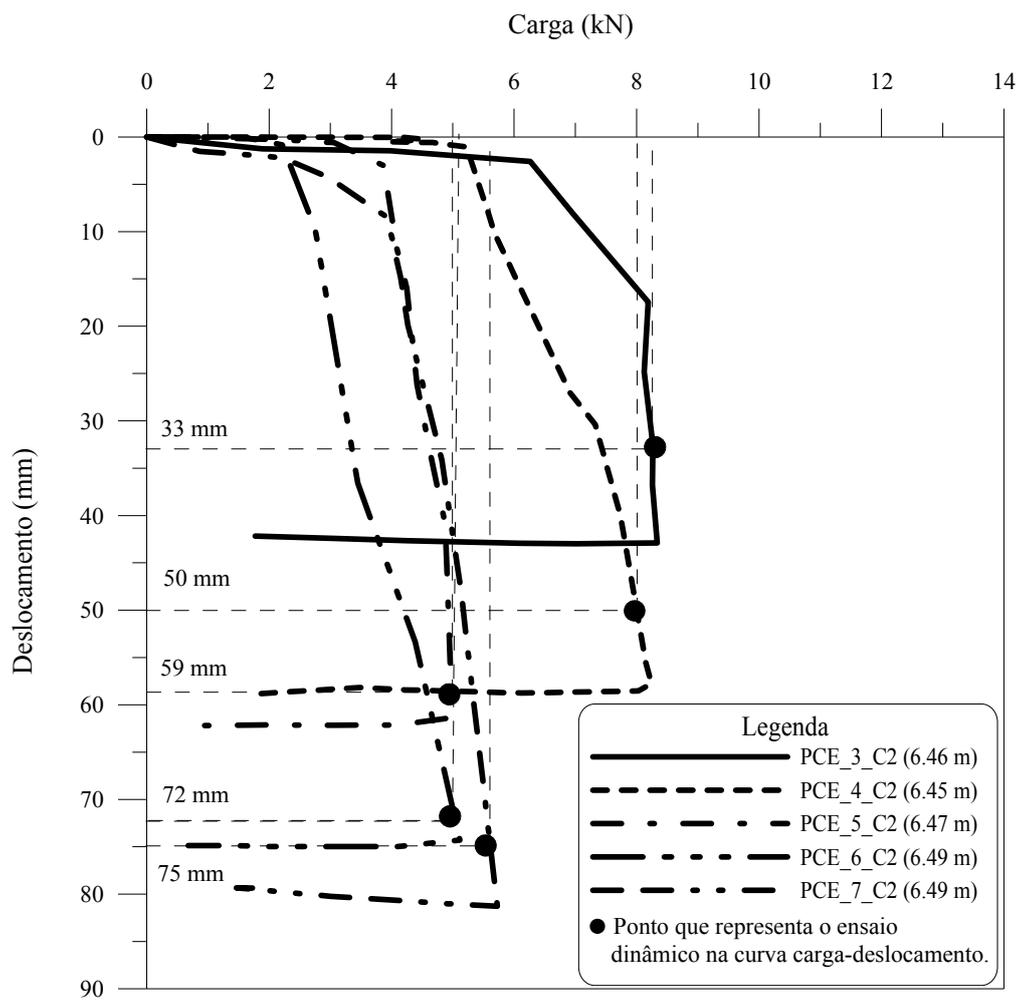


Figura 4.29-Curva carga–deslocamento das provas de carga estática executadas sobre o amostrador SPT à profundidade 6,47 m.

Tabela 4-17-Resultados do ensaio de prova de carga estática a 8,46m de profundidade.

Ensaio estático			Ensaio dinâmico	
Prova de Carga Estática (PCE)	Máxima Carga (kN)	Máximo Deslocamento (mm)	ρ_p (mm)	Carga (kN)
PCE-3-C3	28.83	47.24	17	24.50
PCE-4-C3	23.02	43.73	17	20.50
PCE-5-C3	12.15	41.67	32	11.90
PCE-7-C3	8.25	81.97	72	7.60

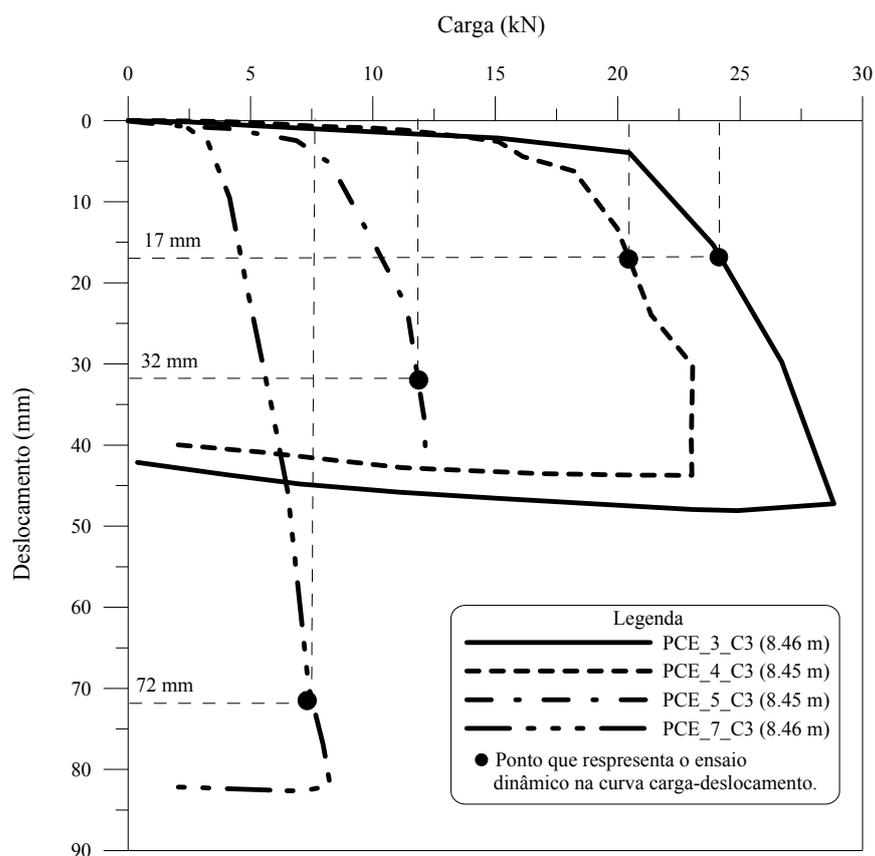


Figura 4.30-Curva carga–deslocamento das provas de carga estática executadas sobre o amostrador *SPT* à profundidade 8,46 m.

As provas de carga estáticas mostradas nas Figura 4.28 a Figura 4.30 foram realizadas com a instrumentação no topo. Para o registro de carga só foram consideradas as leituras da célula de carga (localizada junto ao macaco hidráulico) e o registro de deslocamento foi realizado na superfície do solo.

Além disso, estes resultados das provas de carga estática de modo geral mostram uma relação direta com o valor de índice de resistência à penetração N_{SPT} para profundidades de 6 e 8 m. Isto é, a maior carga apresenta maior valor de N_{SPT} . (Ver Tabela 4-18)

Tabela 4-18- Resultados do ensaio de prova de carga em relação ao valor de N_{SPT} .

Prova	Profundidade (m)	Máxima Carga (kN)	N_{SPT} (golpes/30 cm)
PCE-3-C1	4	8.46	10.00
PCE-4-C1	4	7.33	7.05
PCE-5-C1	4	6.84	5.14
PCE-7-C1	4	11.39	5.80
PCE-3-C2	6	8.34	10.34
PCE-4-C2	6	8.24	6.20
PCE-5-C2	6	4.98	7.00
PCE-6-C2	6	5.11	5.29
PCE-7-C2	6	5.72	4.55
PCE-3-C3	8	28.83	16.87
PCE-4-C3	8	23.02	11.00
PCE-5-C3	8	12.15	12.58
PCE-7-C3	8	8.25	4.41

A Figura 4.31 mostra a recuperação total da amostra para os ensaios de PCE3-C2 e PCE6-C3 de prova de carga estática. Esta recuperação aconteceu para todos os ensaios de carga estática. Isso significa que as resistências atuantes sobre o amostrador são a resistência no anel do amostrador, de embuchamento e por atrito lateral. Existe resistência por embuchamento no amostrador nos ensaios de prova de carga estática (embuchamento total).



(a)



(b)

Figura 4.31. Recuperação da amostra total a) Ensaio PCE3-C2 b) Ensaio PCE 6_C3

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os ensaios foram executados em profundidades acima do nível de água, em camadas de solos não-saturados do Campus do Laboratório de Engenharia Civil UNESP no Bauru. Os resultados do cálculo da energia cinética T_A' medida para o último golpe do martelo são mostrados na Tabela 5-1. O método de cálculo é mostrado no Apêndice B que apresenta o procedimento de avaliação da energia.

Tabela 5-1-Resultados da energia corrigida nos ensaios dinâmicos.

Prova Dinâmica (PCD)	$E_i=T_A$ (J)	Comprimento L (m)	ρ_p (m)	T_A' (J)
SPT3_C1	332,42	6,30	0,05	342,40
SPT3_C2	249,86	8,30	0,033	258,54
SPT3_C3	341,52	9,30	0,017	346,53
SPT4_C1	356,09	6,30	0,051	366,27
SPT4_C2	337,91	8,30	0,05	351,06
SPT4_C3	324,53	9,30	0,017	329,54
SPT5_C1	378,66	6,30	0,07	392,63
SPT5_C2	364,28	8,30	0,059	379,80
SPT5_C3	266,98	9,30	0,032	276,41
SPT6_C2	272,73	6,80	0,072	288,24
SPT7_C1	312,91	5,30	0,04	319,63
SPT7_C2	321,32	6,80	0,075	337,48
SPT7_C3	325,3	9,30	0,072	346,52

5.1. Análise de cálculo da Eficiência do ensaio SPT

A análise de resultados da eficiência do ensaio *SPT* através da execução da prova de carga estática é mostrada na Tabela 5-2. Nesta tabela são apresentados os valores de eficiência obtidos através de ensaios dinâmicos e ensaios estáticos. Esta tabela mostra para cada ensaio

os valores de energia corrigida T_A' , a energia potencial nominal corrigida U' , o trabalho das forças não conservativas de penetração do amostrador no solo $W_{p,s}$. Também são mostradas as eficiências do ensaio *SPT* (η'), obtidas através dos ensaios dinâmicos, bem como as eficiências obtidas através da prova de carga estática (η_s').

Tabela 5-2-Valores de eficiência obtidos pelo ensaio dinâmico e ensaio estático.

Prova de Carga Dinâmica (PCD)	T_A' (J)	U' (J)	$W_{p,s}$ (J)	η' (%)	η_s' (%)
SPT3_C1	342,40	519,16	348,05	65,95	67,04
SPT3_C2	258,54	507,04	242,51	50,99	47,83
SPT3_C3	346,53	493,18	341,79	70,26	69,30
SPT4_C1	366,27	527,85	349,97	69,39	66,30
SPT4_C2	351,06	530,18	337,03	66,22	63,57
SPT4_C3	329,54	500,71	349,41	65,81	69,78
SPT5_C1	392,63	551,33	410,94	71,22	74,54
SPT5_C2	379,80	545,66	263,50	69,60	48,29
SPT5_C3	276,41	521,88	310,20	52,96	59,44
SPT6_C2	288,24	527,57	259,30	54,64	49,15
SPT7_C1	319,63	498,84	395,64	64,07	79,31
SPT7_C2	337,48	530,08	354,93	63,67	66,96
SPT7_C3	346,52	533,27	408,91	64,98	76,68
Média				63,83	64,48
Desvio Padrão				6,73	10,56

A Figura 5.1 mostra os valores de eficiência do ensaio *SPT* determinados a partir de ensaios dinâmicos e estáticos, utilizando diferentes massas de martelo e sistemas de acionamento do martelo manual (*SPT3*, *SPT4* e *SPT5*) e automático (*SPT6* e *SPT7*). A média da eficiência a partir do ensaio dinâmico (η') é de 63,83% e desvio padrão é de 6,73%. E a média da eficiência a partir do ensaio estático (η_s') é de 64,48% cujo desvio padrão é de 10,56%.

Segundo Belicanta (1998), para haste de comprimento de 14 m, a eficiência média é de 73% e para hastes mais longas a eficiência média é de 81,9%. Para hastes com comprimentos variando entre 2 a 14 m e valores de N_{SPT} variando de 2 a 64, a eficiência média é de 82,3% (CAVALCANTE, 2002).

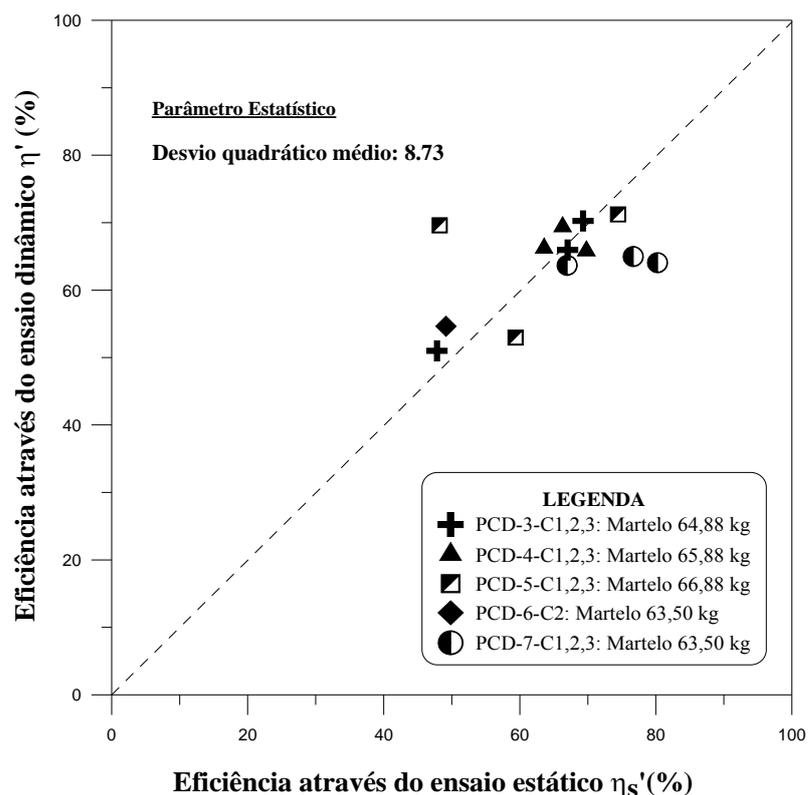


Figura 5.1-Relação entre as eficiências calculadas pelo ensaio estático e dinâmico.

O efeito da utilização de equipamento automático para se obter a eficiência do ensaio SPT é mostrada na Figura 5.1. Observa-se que a eficiência para o martelo automático (63,5 kg) alcança valores de eficiência semelhantes aos obtidos por martelos de massa maiores. A eficiência média do ensaio SPT realizado com equipamento automático é de 63%.

No caso de não se considerar nenhuma correção para a energia cinética (T_A) e a energia potencial nominal (U), a eficiência do ensaio SPT pode ser avaliada utilizando o procedimento proposto por Neves (2004). A Tabela 5-3 mostra esses valores de eficiência obtidos pelo ensaio dinâmico e ensaio estático. Esta tabela mostra para cada ensaio os valores de energia T_A (Coluna 2), a energia potencial nominal corrigida U' (coluna 3), o trabalho da força não conservativa de penetração do amostrador no solo $W_{p,s}$ (coluna 4), a eficiência do ensaio SPT (η^*) é avaliada utilizando as colunas 2 e 3 (coluna 5) e a eficiência do ensaio SPT (η_s) avaliada a partir $W_{p,s}$ e a energia potencial nominal U (coluna 6).

Tabela 5-3-Valores de eficiência obtidos pelo ensaio dinâmico e ensaio estático segundo Método de NEVES (2004).

Prova de Carga Dinâmica (PCD)	T_A (J)	U (J)	$W_{p,s}$ (J)	η^* (%)	η_s (%)
SPT3_C1	332,42	477,35	348,05	69,64	72,91
SPT3_C2	249,86	477,35	242,51	52,34	50,80
SPT3_C3	341,52	477,35	341,79	71,54	71,60
SPT4_C1	356,09	484,71	349,97	73,46	72,20
SPT4_C2	337,91	484,71	337,03	69,71	69,53
SPT4_C3	324,53	484,71	349,41	66,95	72,09
SPT5_C1	378,66	491,48	410,94	77,04	83,61
SPT5_C2	364,28	491,48	263,50	74,12	53,61
SPT5_C3	266,98	491,48	310,20	54,32	63,11
SPT6_C2	272,73	467,20	259,30	58,38	55,50
SPT7_C1	312,91	467,20	395,64	66,98	84,68
SPT7_C2	321,32	467,20	354,93	68,78	75,97
SPT7_C3	325,30	467,20	408,91	69,63	87,52
Média				67,15	70,24
Desvio Padrão				7,57	11,75

A Figura 5.2 mostra uma relação linear entre a eficiência do ensaio *SPT* calculada a partir do ensaio dinâmico e ensaio estático, segundo o procedimento proposto por Neves (2004). A média da eficiência determinada de ensaios dinâmicos (η^*) é de 67,15% e desvio padrão é de 7,57%. A média da eficiência obtida a partir de ensaios estáticos (η_s) é de 70,24% cujo desvio padrão é de 11,75%.

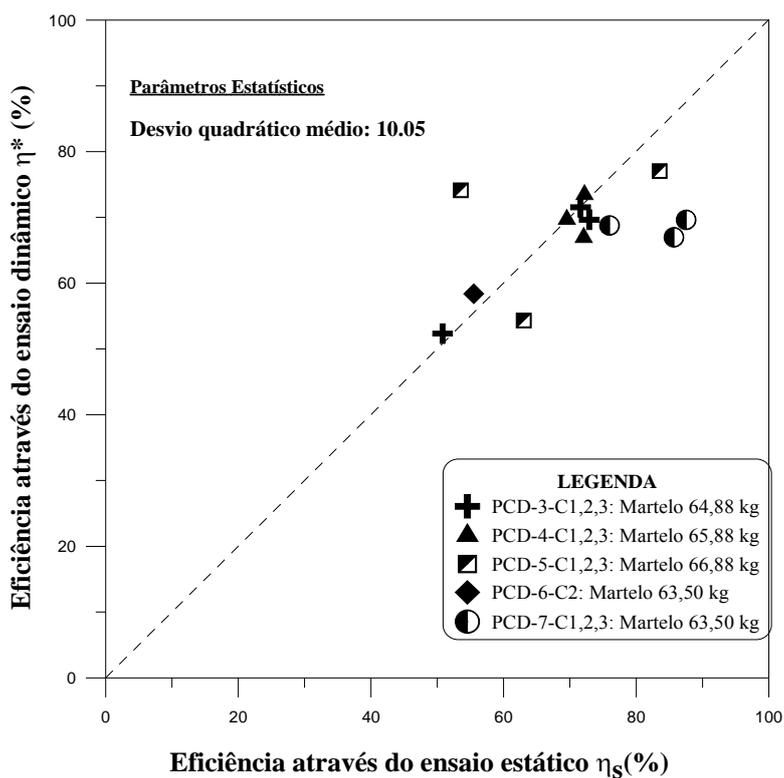


Figura 5.2-Relação entre as eficiências calculadas pelo ensaio estático e dinâmico utilizando método NEVES (2004).

Comparando as Figuras Figura 5.1 e Figura 5.2, ambas com a mesma base de dados e avaliadas com cada método. No caso do método mostrado nesta pesquisa o desvio quadrático médio é igual a 8,73 e a soma dos quadrados dos erros igual a 991,86. Quando utiliza-se o método de Neves (2004), observa-se que a soma de quadrado dos erros é igual a 1312,03 e o desvio quadrático médio é igual 10,05. Em função dos resultados estatísticos, o procedimento que apresenta um menor desvio quadrático médio, apresenta um melhor ajuste á curva de inclinação de 45°. Conseqüentemente, a energia nominal corrigida U' e a energia cinética corrigida T_A' devem ser consideradas para o cálculo da eficiência do ensaio *SPT*. Esta consideração é também recomendada para o caso de hastes curtas.

Nas Figuras Figura 5.1 e Figura 5.2 observam-se pontos fora da linha de inclinação de 45°. Isto pode dever-se ao parâmetro da sucção do solo. A relação que existe entre a sucção

do solo e o efeito dinâmico é inversamente proporcional. Portanto, maior teor de umidade do solo, maior efeito dinâmico.

Na Tabela 5-4 são apresentadas comparações entre o método de Neves (2004) e o método aplicado nesta pesquisa. Uma das comparações mais importantes é o processamento de registros de acelerações e forças para avaliar a energia cinética que é entregue ao sistema amostrador-solo. Deste valor de energia depende o cálculo da eficiência do ensaio SPT para um evento dinâmico.

Tabela 5-4-Comparação entre o método proposto por NEVES (2004) e nesta pesquisa.

	NEVES (2004)	PESQUISA
1	Na análise estática da interação amostrador-solo considera uma estaca de ponta fechada que não reflete o comportamento do amostrador.	Para a análise estática da interação amostrador-solo considera-se uma estaca metálica de ponta aberta.
2	Para análise dinâmica da interação amostrador-solo só considera resistência na ponta do amostrador e considera desprezível a resistência por atrito.	Na análise dinâmica utiliza-se o método proposto por LOBO (2009) que inclui na análise a resistência por atrito e ponta, e parâmetros do solo.
3	Uso de equipamento PDI-GRL para obter registros de aceleração e velocidade	Utilização do próprio sistema de aquisição e Instrumentação
4	Não realiza o tratamento de sinais de velocidade e força (equipamento PDI proporciona o resultado)	Realiza tratamento de sinais de velocidade e força e cálculo de energia TA pelo método FV.
5	O equipamento utilizado é normatizado pela ASTM D 1586.	O equipamento utilizado é normatizado pela NBR 6484 (2001) e algumas modificações com o peso do martelo, sistema manual e automático.
6	Durante o cálculo de eficiência não considera a energia de potencial do martelo devido à penetração permanente.	Consideram-se para o cálculo de eficiência as correções por energia potencial gravitacional do martelo e haste devido à penetração permanente.
7	A eficiência obtida por este método apresenta valores baixos para equipamentos automáticos utilizados.	A eficiência obtida nesta pesquisa é maior comparada com Neves. Estes valores apresentaram uma eficiência media semelhante à eficiência da pratica brasileira.

5.2. Análise de cálculo da resistência estática na ponta do amostrador SPT.

5.2.1. Contribuição de Schmertmann (1979) e Souza (2009)

A Tabela 5-5 mostra os valores da eficiência do ensaio *SPT* calculada da Tabela 5-2, os valores da coluna 3 a 5 correspondem ao número de golpes para cada 150 mm de penetração do amostrador no solo e são obtidos do ensaio *SPT*. Nas colunas 6 e 7 são calculados X_1 e X_2 a partir dos valores de N (equações 2.77 e 2.78) e as colunas 8,9 e 10 são calculadas na tabela A-1 a partir dos valores de X_1 e X_2 .

Tabela 5-5-Razão de atrito e porcentagem de ponta e atrito da resistência total à penetração.

Prova Carga Dinâmica (PCD)	Eficiência η (%)	Golpes/cm			Porcentagens				
		N_{0-15}	N_{15-30}	N_{30-45}	X_1	X_2	R_f (%)	Ponta (%)	Atrito (%)
SPT3_C1	67.04	4/15	5/15	6/18	0.80	1.00	0.38	78.92	21.08
SPT3_C2	47.83	4/15	5/14	5/15	0.60	1.07	1.50	46.90	53.10
SPT3_C3	69.30	4/16	8/16	10/16	0.50	0.80	1.60	45.49	54.51
SPT4_C1	66.30	2/14	4/17	4/17	0.61	0.63	1.25	51.94	48.06
SPT4_C2	63.57	3/16	3/15	3/14	0.88	0.93	0.23	87.35	12.65
SPT4_C3	69.79	2/15	5/15	6/15	0.33	0.83	5.50	19.41	80.59
SPT5_C1	74.44	2/10	3/16	3/19	1.27	1.19	0.48	73.65	26.35
SPT5_C2	48.23	3/17	4/16	3/14	0.82	1.17	0.46	74.71	25.29
SPT5_C3	59.37	3/14	7/16	6/15	0.71	1.09	0.90	59.55	40.45
SPT6_C2	49.15	3/14	3/18	3/16	1.14	0.89	0.13	92.62	7.38
SPT7_C1	80.25	2/17	4/16	3/15	0.59	1.25	1.38	49.42	50.58
SPT7_C2	66.96	2/15	3/22	2/11	0.74	0.75	1.50	46.90	53.10
SPT7_C3	76.68	2/16	3/18	2/16	1.00	1.33	0.00	100.00	0.00

A Tabela 5.6 compara os resultados da resistência mobilizada na prova de carga estática e os valores calculados por Schmertmann (1979) e Souza (2009). Os valores das provas de carga estáticas apresentam valores maiores que aqueles obtidos com o método de Schmertmann (1979) e Souza (2009). Isto é justificado por Aoki *et al.* (2007) pelo fato da prova de carga estática ser precedida pelo ensaio de carregamento dinâmico, que provoca uma

penetração adicional significativa do amostrador no solo, alterando as condições iniciais do ensaio estático.

Tabela 5-6-Comparação entre a resistência mobilizada na prova de carga e os valores de resistência estática calculada por Schmertmann (1979) e Souza (2009).

Prova Carga Dinâmica (PCD)	Resistencia Estática Mobilizada (kN)	
	Schmertmann (1979) e De Souza (2009)	Prova de Carga Estática
SPT3_C1	8.92	8.2
SPT3_C2	6.75	8.3
SPT3_C3	15.07	24.5
SPT4_C1	6.51	7.3
SPT4_C2	5.59	8
SPT4_C3	10.27	20.5
SPT5_C1	5.53	6.9
SPT5_C2	4.96	5
SPT5_C3	10.16	11.9
SPT6_C2	3.77	5.1
SPT7_C1	6.25	11.7
SPT7_C2	4.31	5.65
SPT7_C3	4.72	7.6

A Figura 5.3 ilustra graficamente os resultados de Schmertmann e a prova de carga estática. Analisando este método em relação à curva de inclinação de 45° obtêm-se a soma dos quadrados dos erros igual a 249,37 e um desvio quadrático médio de 4,38.

Além de determinar a força de resistência estática à penetração, a interpretação de Schmertmann (1979) permite uma previsão da resistência estática, q_c atrito local f_s e a razão de atrito do cone R_f . Souza (2009) considera que os valores de índice de resistência à penetração N_{SPT} podem ser convertidos em força resistente à penetração do amostrador na profundidade do ensaio.

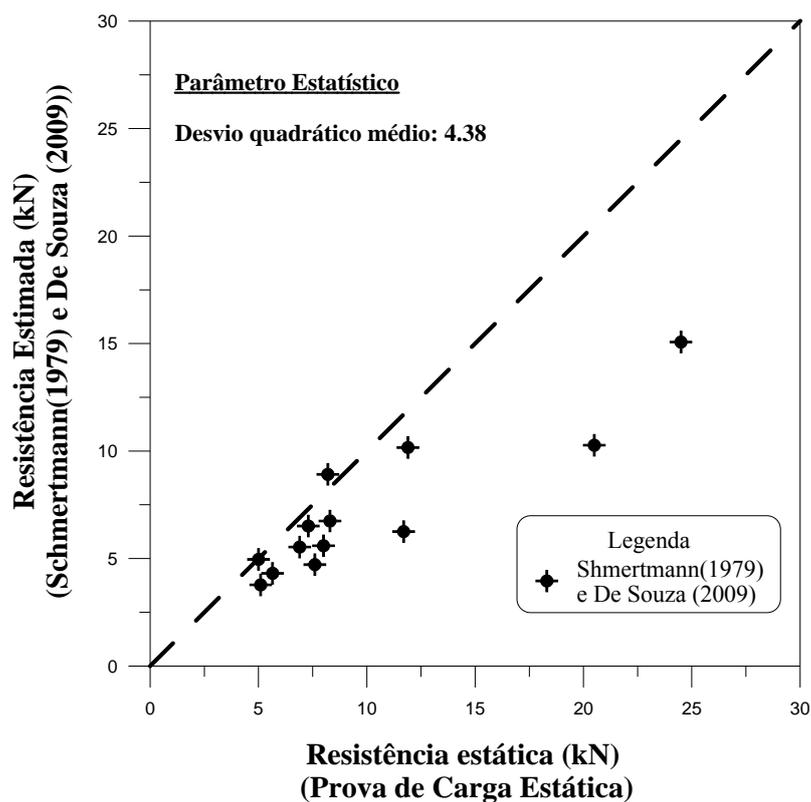


Figura 5.3-Relação entre a resistência estimada por Schmertmann (1979) e De Souza (2009) e a resistência estática obtida da prova de carga estática.

5.2.2. Contribuição de Odebrecht et. al.(2003)

A Tabela 5-7 mostra os valores de η_3 e dados obtidos em campo massa do martelo, massa e comprimento da haste e penetração permanente. A coluna 2 da Tabela 5-7 mostra as massas do martelo utilizadas para cada ensaio, a massa da haste é apresentada na coluna 3, a coluna 4 mostra os valores de penetração permanente do amostrador no solo, o comprimento da haste foi medido em campo é mostrado na coluna 5 e a última coluna da Tabela 5-7 mostra os valores do coeficiente de eficiência do sistema η_3 .

Tabela 5-7-Valores de η_3 e dados obtidos em campo massa do martelo, massa e comprimento da haste e penetração permanente.

Prova Carga Dinâmica (PCD)	M_m (kg)	M_h (kg)	Penetração $\Delta\rho$ (m)	Comprimento da Haste (l) (m)	η_3
SPT3_C1	64.88	20.35	0.05	6.3006	0.9735
SPT3_C2	64.88	26.81	0.033	8.3006	0.9651
SPT3_C3	64.88	30.04	0.017	9.3006	0.9609
SPT4_C1	65.88	20.35	0.051	6.3006	0.9735
SPT4_C2	65.88	26.81	0.05	8.3006	0.9651
SPT4_C3	65.88	30.04	0.017	9.3006	0.9609
SPT5_C1	66.80	20.35	0.07	6.3006	0.9735
SPT5_C2	66.80	26.81	0.059	8.3006	0.9651
SPT5_C3	66.80	30.04	0.032	9.3006	0.9609
SPT6_C2	63.50	21.97	0.072	6.8006	0.9714
SPT7_C1	63.50	17.12	0.04	5.3006	0.9777
SPT7_C2	63.50	21.97	0.075	6.8006	0.9714
SPT7_C3	63.50	30.04	0.072	9.3006	0.9609

A Tabela 5-8 compara os resultados da resistência mobilizada na prova de carga estática e os valores calculados por Odebrecht (2003). Observa-se que estes valores encontram-se perto, o que indica uma aproximação dos métodos sem a necessidade do valor de N_{SPT} . Esta aproximação é representada na Figura 5.4. Esta figura mostra a relação entre a resistência estática estimada por Odebrecht (2003) e a resistência estática obtida do ensaio de prova de carga estática. Os valores de resistência dependem da massa do martelo, massa da haste, altura de queda do martelo, penetração permanente do amostrador e comprimento do conjunto de haste. Uma observação é que para o cálculo da resistência não é necessário se conhecer o valor do índice de resistência à penetração N_{SPT} .

Na Figura 5.4 pode observar-se a relação entre a resistência estimada por Odebrecht (2003) e a resistência estática obtida da prova de carga estática. Os resultados são analisados em relação à curva de inclinação de 45° e obtêm-se a soma dos quadrados dos erros igual a 35,90 e um desvio quadrático médio de 1,66.

Tabela 5-8-Comparação entre a resistência mobilizada na prova de carga e os valores de resistência estática calculada por Odebrecht (2003).

Prova Carga Dinâmica (PCD)	Resistencia Estática Mobilizada (kN)	
	Odebrecht (2003)	Prova de carga Estática
SPT3_C1	7.77	8.2
SPT3_C2	11.39	8.3
SPT3_C3	21.37	24.5
SPT4_C1	7.74	7.3
SPT4_C2	7.88	8
SPT4_C3	21.69	20.5
SPT5_C1	5.90	6.9
SPT5_C2	6.88	5
SPT5_C3	12.04	11.9
SPT6_C2	5.49	5.1
SPT7_C1	9.35	11.7
SPT7_C2	5.29	5.65
SPT7_C3	5.50	7.6

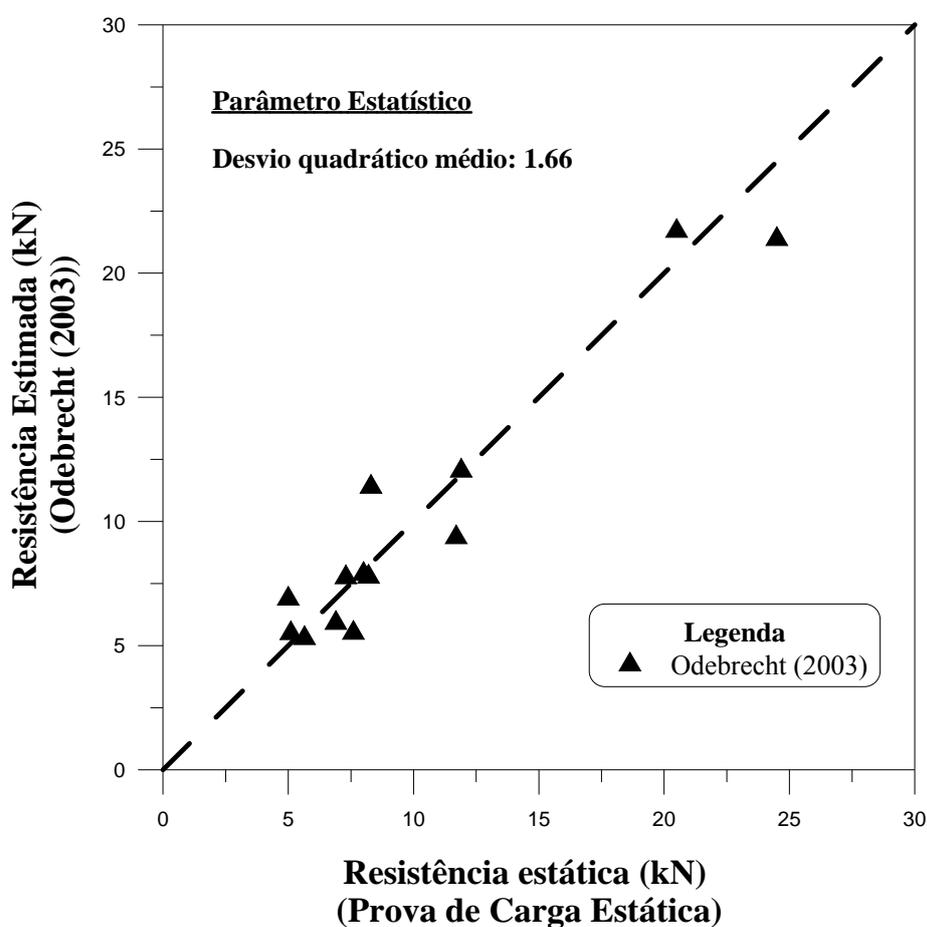


Figura 5.4-Relação entre a resistência estimada por Odebrecht (2003) e a resistência estática obtida da prova de carga estática.

5.2.3. Contribuição de Aoki et al. (2007)

A Tabela 5-9 mostra os valores de eficiência do ensaio SPT (η^*) e a Tabela 5-10 mostra uma comparação entre os valores de resistência mobilizada na prova de carga estática e os valores determinados pelo método proposto por Aoki *et al.* (2007).

Tabela 5-9-Valores de Eficiência do ensaio SPT η^* e energia potencial nominal U .

Prova Carga Dinâmica (PCD)	N_{SPT}	M_m (kg)	h_q (m)	U (J)	Energia Cinética TA (J)	Eficiência η^* (%)
SPT3_C1	10,00	64,88	0,75	477,35	332,42	69,64
SPT3_C2	10,34	64,88	0,75	477,35	249,86	52,34
SPT3_C3	16,87	64,88	0,75	477,35	341,52	71,54
SPT4_C1	7,05	65,88	0,75	484,71	356,09	73,46
SPT4_C2	6,20	65,88	0,75	484,71	337,91	69,71
SPT4_C3	11,00	65,88	0,75	484,71	324,53	66,95
SPT5_C1	5,14	66,88	0,75	491,48	378,66	77,04
SPT5_C2	7,00	66,88	0,75	491,48	364,28	74,12
SPT5_C3	12,58	66,88	0,75	491,48	266,98	54,32
SPT6_C2	5,29	63,50	0,75	467,20	272,73	58,38
SPT7_C1	5,80	63,50	0,75	467,20	312,91	66,98
SPT7_C2	4,55	63,50	0,75	467,20	321,32	68,78
SPT7_C3	4,41	63,50	0,75	467,20	325,3	69,63

Tabela 5-10-Comparação entre a resistência mobilizada na prova de carga e os valores de resistência estática calculada por Aoki et al. (2007).

Prova Carga Dinâmica (PCD)	Resistência Estática Mobilizada (kN)	
	AOKI (2004)	Prova de Carga Estática
SPT3_C1	11,08	8,20
SPT3_C2	8,61	8,30
SPT3_C3	19,20	24,50
SPT4_C1	8,37	7,30
SPT4_C2	6,98	8,00
SPT4_C3	11,90	20,50
SPT5_C1	6,49	6,90
SPT5_C2	8,50	5,00
SPT5_C3	11,20	11,90
SPT6_C2	4,81	5,10
SPT7_C1	6,05	11,70
SPT7_C2	4,87	5,65
SPT7_C3	4,78	7,60

A Figura 5.5 ilustra graficamente os resultados da Tabela 5-10. Estes resultados apresentam a soma dos quadrados dos erros igual a 166,05 e um desvio quadrático médio igual a 3,57.

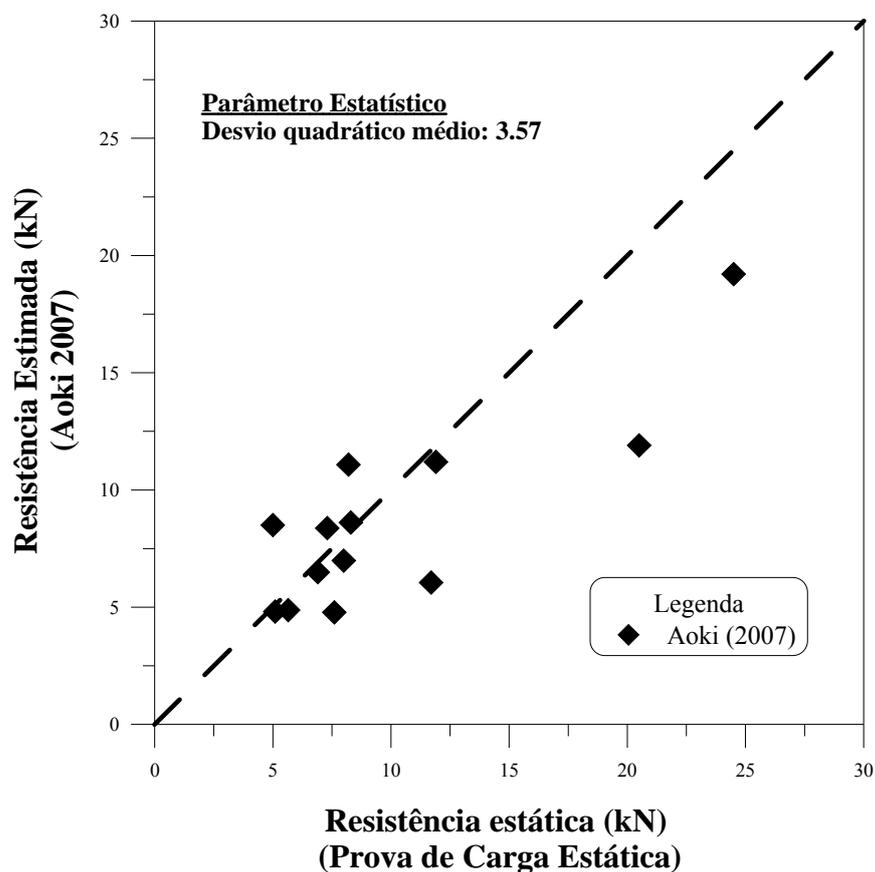


Figura 5.5-Relação entre a resistência estimada por Aoki et al. (2007) e a resistência estática obtida da prova de carga estática.

5.2.4. Cálculo da resistência total na ponta do amostrador

A resistência é estimada utilizando o valor de trabalho das forças não conservativas de penetração do amostrador no solo $W_{p,s}$. O trabalho $W_{p,s}$ é calculado como a área entre a curva de carga-deslocamento e a linha paralela da etapa de descarga. Esta linha paralela passa pelo ponto de penetração permanente medido do ensaio dinâmico. O cálculo da área é mostrado no Apêndice B para o ensaio *SPT4-C2*. Para este ensaio, o valor de $W_{p,s}$ é 337,03 Joules e uma

penetração permanente de 50 mm. Conseqüentemente, o valor da resistência é calculado com a seguinte equação.

$$R_s = \frac{W_{p,s}}{\rho_p} = \frac{337.03}{0.05} = 6.74(kN) \quad (5.1)$$

A Tabela 5-11 mostra os valores de resistência estimada obtida a partir da proposta de cálculo da resistência estática mostrada no item 3.2.4 e a resistência estática obtida da prova de carga estática no campo.

Tabela 5-11-Valores de resistência estimada e resistência estática na prova de carga estática.

Prova de Carga Dinâmica (PCD)	Trabalho Estático $W_{p,s}$ (J)	Penetração ρ_p (m)	Resistencia Estática Mobilizada (kN)	
			Pesquisa Atual	Prova de carga Estática
SPT3_C1	348.05	0.05	6.96	8.2
SPT3_C2	242.51	0.033	7.35	8.3
SPT3_C3	341.79	0.017	20.11	24.5
SPT4_C1	349.97	0.051	6.86	7.3
SPT4_C2	337.03	0.05	6.74	8
SPT4_C3	349.41	0.017	20.55	20.5
SPT5_C1	410.94	0.07	5.87	6.9
SPT5_C2	263.50	0.059	4.47	5
SPT5_C3	310.20	0.032	9.69	11.9
SPT6_C2	259.30	0.072	3.60	5.1
SPT7_C1	395.64	0.04	9.89	11.7
SPT7_C2	354.93	0.075	4.73	5.65
SPT7_C3	408.91	0.072	5.68	7.6

Esta comparação entre os valores de resistência estática é mostrada na Figura 5.6.

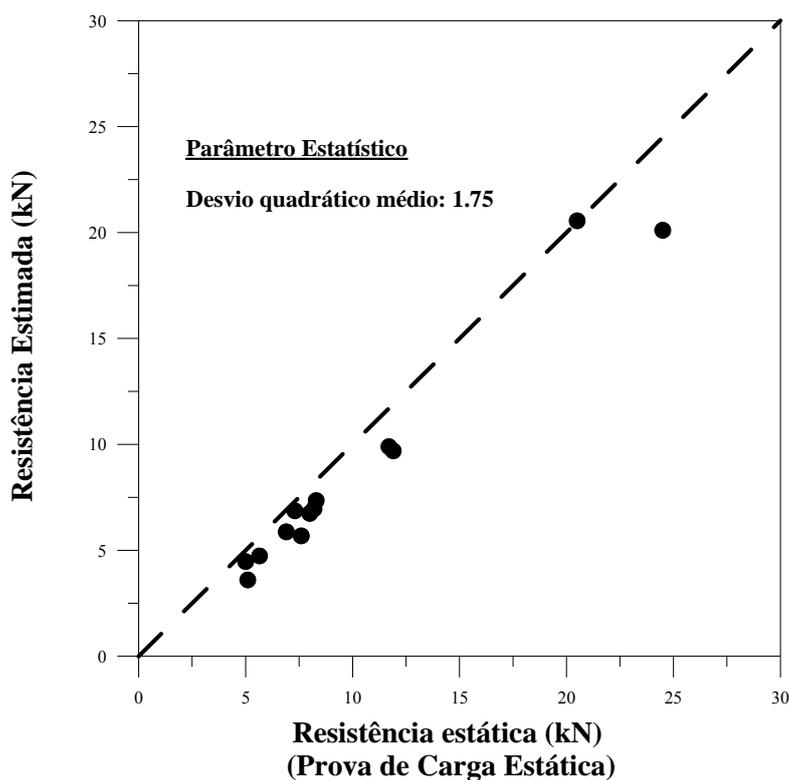


Figura 5.6-Relação entre a resistência estimada e a resistência estática obtida da prova de carga estática.

A Figura 5.6 mostra a relação entre a resistência estimada na proposta e a prova de carga estática medida em campo. A resistência estática estimada foi calculada mediante a teoria de Smith (1960) e Aoki (1997). Nestes cálculos, assume-se que o fator de amortecimento é desprezível. Portanto, nesta figura não podem ser comparados efeitos de amortecimento. Além disso, observa-se que os pontos apresentam uma boa estimativa entre a resistência estática estimada calculada teoricamente e a parcela estática medida no campo. Esta relação apresenta a soma dos quadrados dos erros igual a 39,80 e o desvio quadrático médio igual a 1,75.

Para obter informação sob o fator de amortecimento, precisa-se da resistência dinâmica, resistência estática e velocidade do amostrador. Todos estes valores foram medidos no campo e são mostrados na Tabela 5-12.

Tabela 5-12 - Valores de resistência estática, dinâmica e velocidade no amostrador.

Prova	Resistência Estática (kN)	Resistência Dinâmica (kN)	Velocidade (m/s)
PCD-PCE-3-C1	8,46	8,42	0,87
PCD-PCE-3-C2	8,34	7,94	0,68
PCD-PCE-3-C3	28,83	10,86	0,71
PCD-PCE-4-C1	7,33	5,72	0,74
PCD-PCE-4-C2	8,24	5,05	0,92
PCD-PCE-4-C3	23,02	8,52	0,78
PCD-PCE-5-C1	6,84	4,72	1,09
PCD-PCE-5-C2	4,98	4,98	0,89
PCD-PCE-5-C3	12,15	8,74	0,64
PCD-PCE-6-C2	5,11	2,66	0,88
PCD-PCE-7-C1	11,39	4,29	0,72
PCD-PCE-7-C2	5,72	3,68	0,77
PCD-PCE-7-C3	8,25	3,23	0,90

Sabe-se que a resistência dinâmica é a soma das parcelas de reação estática e viscosa. Então, o valor da resistência dinâmica deve ser maior que a resistência estática na ruptura para poder calcular o valor do coeficiente de amortecimento. No caso a Tabela 5-12 mostra que a resistência dinâmica é menor à resistência estática. Isto porque a resistência dinâmica não é medida na ruptura e é uma resistência dinâmica mobilizada. Além disso, essa resistência é apenas um ponto na curva carga dinâmica–deslocamento. Para obter maior informação, precisa-se definir a curva total carga dinâmica–deslocamento mediante o método de energia crescente. Apenas com as curvas completas podem se comparar as resistências estáticas e dinâmicas na ruptura e avaliar o fator de amortecimento. Nesta pesquisa não se realizou ensaios de energia crescente.

Analisando as contribuições propostas por Schmertmann, Odebrecht, Aoki e na presente pesquisa, obtêm-se melhor correlação nas abordagens que possuem poucos parâmetros para o cálculo da resistência estática.

Por exemplo, compararam-se as contribuições propostas por Schmertmann (1979) e Souza (2009) com o método de Aoki *et al.* (2007) porque ambas estão relacionadas com o valor de índice de resistência à penetração N_{SPT} .

A Figura 5.7 ilustra graficamente os resultados de Aoki *et al.* (2007) com os de Schmertmann (1979), estes mostram a possibilidade de converter os valores de N_{SPT} em força resistente à penetração. Apesar de ter poucos resultados disponíveis de prova de carga sobre o amostrador SPT e diferentes interpretações nos métodos de Aoki *et al.* (2007) e Schmertmann (1979) e Souza (2009), os resultados mostram-se equivalentes. A interpretação de Aoki *et al.* (2007) baseado no princípio da conservação de energia de Hamilton e a interpretação de Schmertmann (1979) foi com base na análise da estática do SPT, contemplando a premissa de não-embuchamento no ensaio (SCHMERTMANN, 2009).

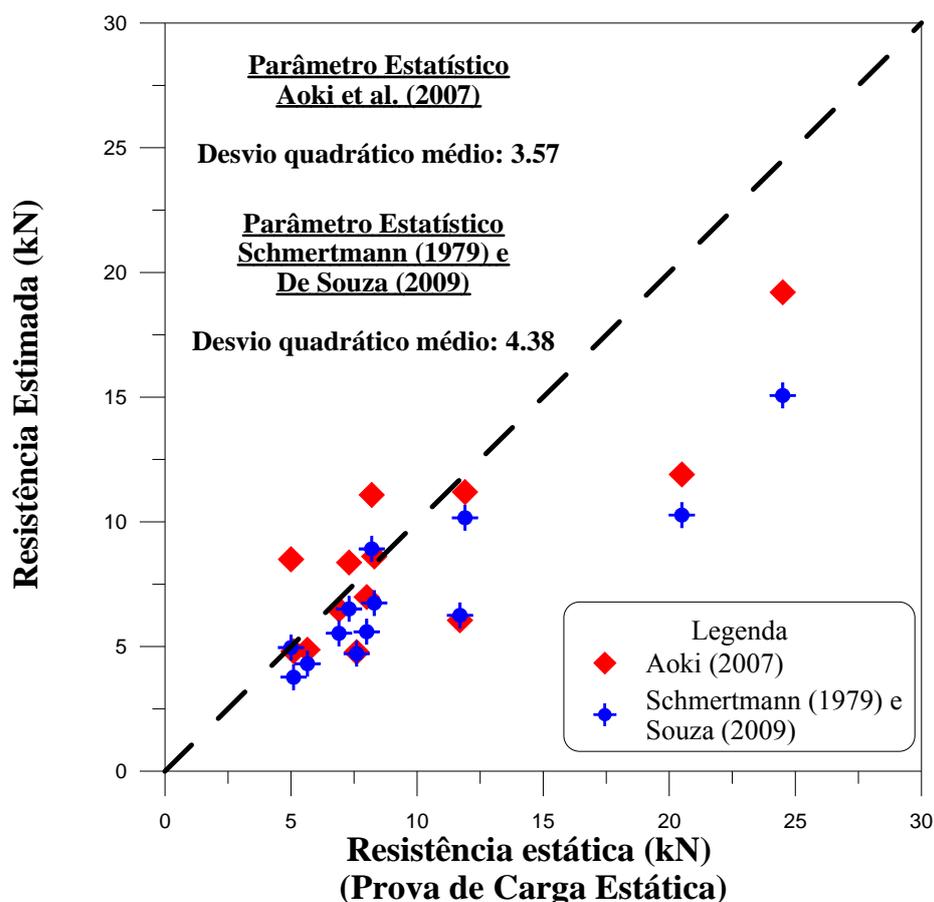


Figura 5.7-Comparação entre a resistência estimada por Schmertmann (1979) e De Souza (2009) e a resistência estática estimada por Aoki *et al.* (2007).

Para o método baseado em Schmertmann (1979) e Souza (2009) obtêm-se os valores estatísticos como a soma dos quadrados dos erros igual a 249,37 e o desvio quadrático médio de 4,38. E para o método Aoki et al. (2007) a soma dos quadrados dos erros é igual a 166,05 e o desvio quadrático médio de 3,57. Portanto, a comparação entre estes dois métodos o que melhor se ajusta à curva de inclinação de 45° é a proposta por AOKI et. al. (2007).

No caso de Odebrecht (2003) é dependente de dados como a massa de martelo, massa e comprimento da haste, penetração permanente e o valor do coeficiente de eficiência η_3 . Este coeficiente é dependente do comprimento da haste. Esses dados são obtidos diretamente do ensaio em campo sem o uso de correlações. É por este motivo que a correlação entre a resistência estimada e a resistência obtida a partir do ensaio de prova de carga estática apresenta uma melhor aproximação que as contribuições de Schmertmann (1979), Aoki et al. (2007).

O método proposto nesta pesquisa só depende da curva carga–deslocamento, a qual é resultado do ensaio de prova de carga estática e o valor de penetração permanente do amostrador no solo, medido em campo durante o ensaio SPT.

Uma comparação entre o método de Odebrecht e o método proposto nesta pesquisa é mostrada na Figura 5.8. Os valores obtidos nesta pesquisa são muito próximos aos resultados calculados pelo procedimento de Odebrecht (2003).

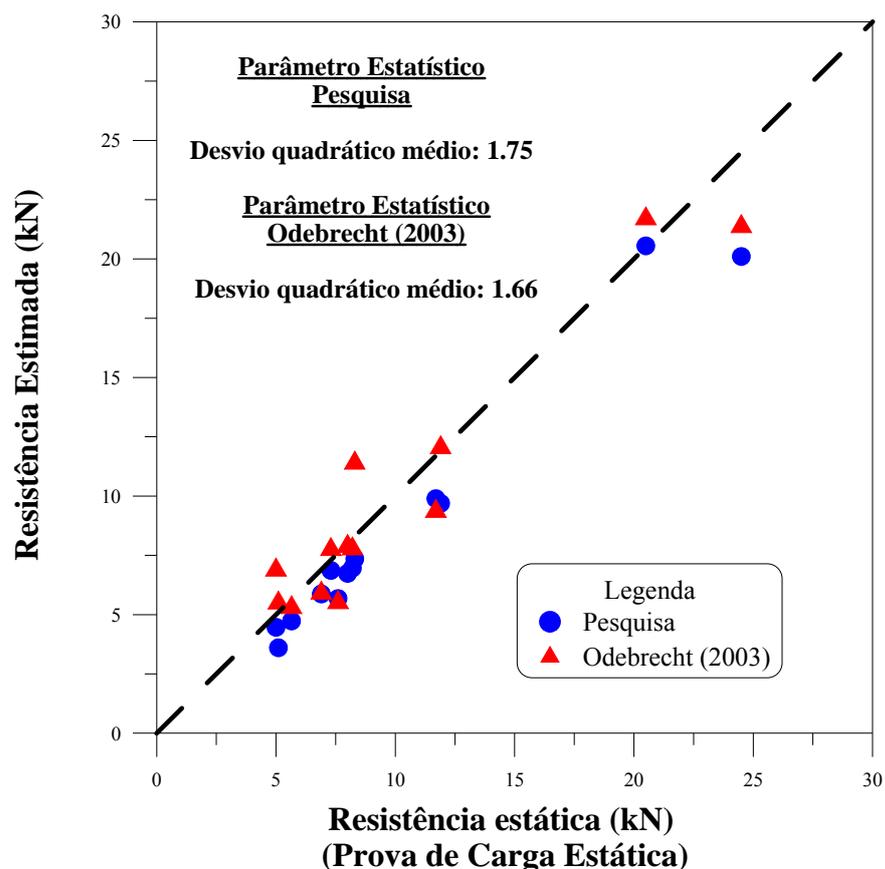


Figura 5.8 Comparação entre a resistência estimada por Odebrecht (2003), o método desta pesquisa e a resistência estática obtida da prova de carga estática.

Para o método baseado em Odebrecht (2003), obtêm-se a soma dos quadrados dos erros igual a 35,90 e um desvio quadrático médio de 1,66. E para o método apresentado nesta pesquisa, a soma dos quadrados dos erros é igual a 39,80 e um desvio quadrático médio de 1,75. A comparação entre estes dois métodos apresenta valores próximos de desvio quadrático médio. Conseqüentemente, para avaliar a eficiência do ensaio *SPT* e obter uma aproximação para o cálculo da resistência estática sobre o amostrador, é de utilidade o valor de trabalho $W_{p,s}$. Este valor é calculado a partir da curva de carga-deslocamento do ensaio de prova de carga estática no ensaio *SPT*.

6. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

6.1. Conclusões

- O sistema de aquisição utilizado nesta pesquisa apresentou bons resultados na qualidade dos sinais para obter os registros de aceleração e força do ensaio dinâmico a uma frequência de amostragem de 96 *kHz* e registros de força e deslocamento do ensaio estático para uma frequência de amostragem de 0,05 *Hz*. O sistema de aquisição levou em consideração as recomendações da norma ASTM D 4633 -10.
- Na etapa de descarga dos ensaios de prova de carga estática sobre o amostrador *SPT*, a leitura de deslocamentos é quase uma linha horizontal, fato que comprova que a energia potencial elástica do sistema amostrador-solo é desprezível.
- O método para calcular a eficiência do ensaio *SPT* nesta pesquisa apresenta correções de energia em relação ao método de NEVES (2004). Estas correções de energia são feitas na energia potencial nominal U e na energia cinética T_A . Com estas correções os valores de eficiência do ensaio *SPT* apresentam uma melhor aproximação comparada ao método de NEVES (2004).
- O método de cálculo da eficiência através da execução da prova de carga para os dois sistemas de acionamento do martelo e diferentes massas de martelo mostrou-se confiável para o solo ensaiado (areia fina com pouca argila).

- Para o cálculo da resistência estática utilizaram-se diferentes contribuições: SCHMERTMANN (1979) e SOUZA (2009), AOKI *et al.* (2007), ODEBRECHT (2003) e o proposto nesta pesquisa. Chega-se à conclusão que os valores de resistência calculados por métodos que apresentam menor quantidade de variáveis proporcionam uma semelhança razoável entre a resistência estimada e a resistência obtida pela prova de carga estática.
- Uma comparação foi realizada entre os métodos AOKI *et al.* (2007) e SCHMERTMANN (1979). Estes dois métodos apresentam uma semelhança apesar da interpretação ser diferente. Mas, ambos os métodos podem converter índices N_{SPT} para valores de força resistente estática na penetração do amostrador. O método de AOKI *et al.* (2007) apresenta uma melhor correlação que o outro método.
- Em geral, o método proposto nesta pesquisa é uma boa alternativa para o cálculo da eficiência e da resistência estática no amostrador SPT comparada com os outros métodos. Isto pode ser devido a que só depende de dois parâmetros: o trabalho de penetração do amostrador no solo, que é obtido da curva carga–deslocamento do ensaio de prova de carga estática e o valor de penetração permanente do amostrador no solo, medido em campo durante o ensaio SPT.

6.2. Sugestões para futuras pesquisas

- As condições dos ensaios devem ser modificadas para abranger diferentes tipos de solos, ensaios em solos saturados, diferentes composições de ensaios SPT (hastes, amostrador, etc.), solos mais rígidos. Essas condições seriam usadas para calcular a eficiência do ensaio e a resistência estática no sistema amostrador–solo.

- Medição da sucção durante os ensaios de prova de carga estática e dinâmica.
- Os ensaios podem ser complementados com SPT-T.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOU-MATAR, H. et al. (1996). Wave equation soil constants from dynamic measurements on SPT Fifth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, Orlando, pp. 163-175.
- AOKI, N. (1997). Determinação da capacidade de carga última de estaca cravada em ensaio de carregamento dinâmico de energia crescente, Universidade de São Paulo, São Carlos, 111 pp.
- AOKI, N. (2000). Keynote lecture: Improving the reliability of pile bearing capacity prediction by the dynamic increasing energy test (DIET), Application of stress wave theory to piles São Paulo, pp. 635-650.
- AOKI, N. (2008). Pontos de Discussões sobre o Tema Energia no SPT, COBRAMSEG, Buzios, pp. 2211-2213.
- AOKI, N.; ALONSO, U.R. (1991). Previsão e Verificação da Carga Admissível de Estacas, Workshop ABMS. 1991, São Paulo.
- AOKI, N.; CINTRA, J.C.A. (2000). The Application of energy conservation Hamilton's principle to the determination of energy efficiency in SPT tests, Application of stress wave theory to piles, pp. 457-460.
- AOKI, N. et al. (2007). The impact efficiency obtained from static load test performed on the SPT sampler. **Soils and foundations, JGS**, v.47, n.6, p.1045-1052.
- ASTMD1143 (2007). Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load, D1143/D 1143M-07, United States.
- ASTMD1586 (2008). Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils. ASTM International, United States pp. 1-10.
- ASTMD4633 (2010). Standard test method for energy measurement for dynamic penetrometers. ASTM International, United States, pp. 7.
- ASTMD4945 (2000). Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Piles. ASTM International, United States, pp. 7.
- AVESANI, F.P.B. (2010). Sísmica up-hole em conjunto com sondagem DPSH, Universidade Estadual Paulista, Monografia Título de Engenheiro Civil, Bauru, 42 pp.
- BELICANTA, A. (1985). Energia dinâmica no SPT - Resultados de uma investigação teórico-experimental, Universidade de São Paulo, São Paulo, 141 pp.
- BELICANTA, A. (1998). Avaliação de Fatores intervenientes no índice de resistência à penetração do SPT, Universidade de São Paulo, São Carlos, 141 pp.
- BOSSCHER, J.; SHOWERS, R. (1986). Effect of Soil Type on Standard Penetration Test Input Energy. **American Society of Civil Engineers ASCE**, v.113, n.4, p.385-389.
- BROMS, B.B.; CHOO, L.P. (1988). A simple pile driving formula based on Stress-Wave measurements, Third International Conference on Application of stress-Wave Theory to Piles, Ottawa, Canada, pp. 591-600.

- CANAVOS, G.C. (1988). Probabilidad y estadística Aplicaciones y métodos. 1988, Mexico, 667 pp.
- CAVALCANTE, E.H. (2002). Investigaç o te rico-experimental sobre o SPT, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 445 pp.
- CLOUGH, R.W.; PENZIEN, J. (1995). Dynamic of Structures. Computers & Structures, Inc., United States, 752 pp.
- CODUTO, D.P. (2001). Foundation Design Principles and Practices. Prentice-Hall. Inc., New Jersey, 874 pp.
- COYLE, H.M.; BARTOSKEWITZ, R.E.; KORB, K.W. (1972). Soil Resistance Parameters for Wave Equation Analysis. **Journal of Materials**, v.7, n.4, p.486-495.
- COYLE, H.M.; GIBSON, G.C. (1970). Empirical damping constants for sand and clays. **Journal of Soil Mechanics and Foundations ASCE**, v.96, n.SM3, p.949-965.
- DANIEL, C.R. (2007). Energy transfer and grain size effects during the standard penetration test (SPT) and large penetration test (LPT), University of British Columbia, Vancouver, 379 pp.
- DE RUITER, J.; BERINGEN, F.L. (1979). Pile Foundatios for large North Sea Structures. **Maritimal Geotechnical** v.3, n.3, p.267-314.
- DECOURT, L. (1989). The Standard Penetration Test - state of art XII ICSMFE. Rio de Janeiro.
- DRUMRIGHT, E.; PFINGSTEN, W.; LUKAS, G. (1996). Influence of Hammer Type on SPT Results. **American Society of Civil Engineers ASCE**, v.122, n.7, p.598-599.
- GIBSON, G.C.; COYLE, H.M. (1968). Soil damping constants related to common soil properties in sands and clays (Bearing capacity for axially loaded piles), Texas A&M University, Texas, Sept 1968.
- GOBLE, G.G.; ABOUMATAR, H. (1992). Determination of wave equation soil constants from the standard penetration, Application of stress-wave theory to piles, Balkema, Rotterdam, pp. 99-103.
- GODOY, N.S. (1971). The Standard Penetration Test, Proceeding of the IV Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Porto Rico, pp. 100-103.
- HEEREMA, E.P. (1979). Relationships between wall friction, displacement, velocity and horizontal stress in clay and in sand for driveability analysis. **Ground Engineering**, v.12, n.1, p.55-61.
- HERMANSSON; GR AVARE (1978). Static Bearing capacity of piles from dynamic measurements. **S rtyck ur V g och vatternbyggn**, v.1, p.8-9.
- HOWIE, J.A. et al. (2003). Comparison of energy measurement methods in the standard penetration test, U.S. Bureau of Reclamation Canada.
- KOVACS, W.D. (1979). Velocity measurement of free-fall SPT hammer. **Geotechnical Engineering Division, ASCE**, v.105, n.GT1, p.1-10.
- KOVACS, W.D. (1994). Effects of SPT equipment and procedures on the design of shallow foundation on sand. **American Society of Civil Engineers ASCE**, v.1, n.40, p.121-131.
- KOVACS, W.D.; SALOMONE, L.A.; YOKEL, F.Y. (1981). Energy measurement in the standard penetration test. **NBS Buiding Science Series**, v.National Bureau of Standards, Washington, DC.
- LEE, J.; SALGADO, R.; PAIK, K. (2003). Estimation of Load Capacity of Pipe Piles in Sand based on Cone Penetration Test Results. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.129, n.6, p.391-403.
- LITKOUHI, S.; POSKITT, T.J. (1980). Damping Constant for pile driveability calculations **Geotechnique**, v.30, n.1, p.77-86.

- LOBO, B.O. (2009). Mecanismos de Penetração Dinâmica em Solos Granulares, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 231 pp.
- LUKIANCHUKI, J.A. (2010). Interpretação de resultados de ensaios SPT com base em energia, Qualificação de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, 69 pp.
- LUTENEGGER, A.J.; KELLEY, S.P. (1998). Standard penetration tests with torque measurement. In: R. Mayne (Editor), *Geotechnical Site Characterization*, Rotterdam, pp. 939-945.
- MELZER, K.J. (1971). Standard Penetration Test and Relative Density, Army Engineer Waterways Experiment Station, Mississippi.
- NBR12131 (1992). Estacas-Prova de carga estática, NBR 12131, pp. 1-4.
- NBR-6484 (2001). Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio, ABNT. 2001, Brasil, pp. 17.
- NEVES, S.L.F. (2004). Metodologia para a determinação da eficiência do ensaio SPT através de prova de carga estática sobre o amostrador padrão, Universidade de São Paulo, São Carlos, 111 pp.
- ODEBRECHT, E. (2003). Medidas de energia no ensaio SPT, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 232 pp.
- PAIKOWSKI, S.G.; WHITMAN, R.V.; BALIGH, M.M. (1989). The effects of plugging on pile performance and design. **Canadian Geotechnical Journal**, v.27, p.429-440.
- POULOS, H.G.; DAVIS, E.H. (1980). *Pile Foundation Analysis and Design*, Canada, 397 pp.
- RANDOLPH, M.F.; WROTH, C.P. (1978). Analysis of deformation of vertically loaded piles. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, v.104, n.GT12, p.1465-1488.
- RAUSCHE, F.; GOBLE, G.; LIKINS, G. (1992). Investigation of dynamic soil resistance on piles using GRLWEAP, Proceedings of the 4th Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, The Netherlands, pp. 137-142.
- RAUSCHE, F. et al. (1995). Investigation of Dynamic and Static Pile Behavior from Modified Standard Penetration Tests. *Pile Dynamics PDI*, Cleveland, OH, pp. 1-30.
- REESE, L.C. (1984). Handbook on Design of Piles and Drilled Shafts under lateral Loads. In: F.H.A. US Department of Transportation (Editor). Federal Highway Administration.
- SCHMERTMANN, J.; PALACIOS, A. (1979). Energy dynamics of SPT. **American Society of Civil Engineers**, v.105, n.8, p.909-926.
- SCHMERTMANN, J.H. (1979). Statics of SPT. **Journal of the Geotechnical Engineering Division ASCE**, v.105, n.GT5, p.655-670.
- SEED, H.B. et al. (1985). Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations. **Journal of Geotechnical Engineering**, v.111, n.12, p.1425-1445.
- SKEMPTON, A.W. (1987). Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation : Skempton, A W *Geotechnique* V36, N3, Sept 1986, P425-447. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, v.24, n.1, p.A18-A18.
- SMITH, E.A.L. (1960). Pile-Driving Analysis by the Wave Equation. **Mechanics and Foundation Division - Asce**, v.86, n.SM4, p.25-61.
- SOO, C.F. et al. (1980). Plugging of Open-End Steel Pipe Piles. In: S.A.S.o.S. Engineering (Editor), Sixth Southeast Asia Conference on Soil Engineering. 1980, Taipei, pp. 315-325.
- SOUZA, J.M.S. (2009). A influência da compactação das areias nas correlações entre os ensaios de cone e o SPT, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 250 pp.

- SY, A.; CAMPANELLA, R.G. (1991a). An alternative Method of Measuring SPT Energy, Proceedings 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. 1991, St. Louis, Missouri, pp. 499-505.
- TEIXEIRA, A.H. (1977). Sondagens: Metodologia, Erros mais Comuns, Normas de Execução. In: ABMS (Editor), Anais do I Simpósio de Prospecção do subsolo, Recife, pp. 39-61.

**APÊNDICE A – TABELA DE PORCENTAGENS DE PONTA E ATRITO
DA RESISTÊNCIA MOBILIZADA AO LONGO DO
AMOSTRADOR PARA DIFERENTES VALORES DE RAZÃO DE
ATRITO**

Souza (2009) utilizou o trabalho original de Schmertmann (1979) para adaptar à Norma NBR 6484 (2001): diâmetro externo do amostrador de 50,8 *mm*, diâmetro interno do amostrador de 34,9 *mm* e área da ponta de 10,7 *cm*².

Tabela A. 1- Porcentagens de ponta e atrito da resistência mobilizada ao longo do amostrador para diferentes valores de razão de atrito

Rf (%)	C1	C2	W'	$\Delta N/\Delta N_{30\text{cm a } 45\text{ cm}}$			Porcentagem de N	
				X1	X2	X3	Ponta (%)	Atrito (%)
0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	100.00	0.00
0.05	1.00	1.00	0.00	0.96	0.98	1.00	96.36	3.64
0.10	1.00	1.00	0.00	0.93	0.97	1.00	92.98	7.02
0.20	1.00	1.00	0.00	0.87	0.94	1.00	86.88	13.12
0.30	1.00	1.00	0.00	0.82	0.91	1.00	81.54	18.46
0.40	1.00	1.00	0.00	0.78	0.89	1.00	76.81	23.19
0.50	1.00	1.00	0.00	0.74	0.87	1.00	72.60	27.40
0.60	1.00	1.00	0.00	0.71	0.86	1.00	68.83	31.17
0.70	1.00	1.00	0.00	0.68	0.84	1.00	65.43	34.57
0.80	1.00	1.00	0.00	0.66	0.83	1.00	62.35	37.65
0.90	1.00	1.00	0.00	0.63	0.82	1.00	59.55	40.45
1.00	1.00	1.00	0.00	0.61	0.81	1.00	56.98	43.02
1.10	1.00	1.00	0.00	0.59	0.80	1.00	54.63	45.37
1.20	1.00	1.00	0.00	0.58	0.79	1.00	52.47	47.53
1.30	1.00	1.00	0.00	0.56	0.78	1.00	50.47	49.53
1.40	1.00	1.00	0.00	0.54	0.77	1.00	48.62	51.38
1.50	1.00	1.00	0.00	0.53	0.77	1.00	46.90	53.10
1.60	1.00	1.00	0.00	0.52	0.76	1.00	45.29	54.71
1.70	1.00	1.00	0.00	0.51	0.75	1.00	43.80	56.20
1.80	1.00	1.00	0.00	0.50	0.75	1.00	42.40	57.60
1.90	1.00	1.00	0.00	0.49	0.74	1.00	41.08	58.92
2.00	1.00	1.00	0.00	0.48	0.74	1.00	39.84	60.16
2.10	1.00	1.00	0.00	0.47	0.73	1.00	38.68	61.32
2.20	1.00	1.00	0.00	0.46	0.73	1.00	37.58	62.42
2.30	1.00	1.00	0.00	0.45	0.73	1.00	36.55	63.45
2.40	1.00	1.00	0.00	0.45	0.72	1.00	35.57	64.43
2.50	1.00	1.00	0.00	0.44	0.72	1.00	34.64	65.36

Rf (%)	C1	C2	W'	$\Delta N/\Delta N_{30\text{cm a } 45\text{ cm}}$			Porcentagem de N	
				X1	X2	X3	Ponta (%)	Atrito (%)
2.60	1.00	1.00	0.00	0.43	0.72	1.00	33.75	66.25
2.70	1.00	1.00	0.00	0.43	0.71	1.00	32.91	67.09
2.80	1.00	1.00	0.00	0.42	0.71	1.00	32.12	67.88
2.90	1.00	1.00	0.00	0.41	0.71	1.00	31.36	68.64
3.00	1.00	1.00	0.00	0.41	0.70	1.00	30.63	69.37
3.10	1.00	1.00	0.00	0.40	0.70	1.00	29.94	70.06
3.20	1.00	1.00	0.00	0.40	0.70	1.00	29.28	70.72
3.30	1.00	1.00	0.00	0.39	0.70	1.00	28.64	71.36
3.40	1.00	1.00	0.00	0.39	0.70	1.00	28.04	71.96
3.50	1.00	1.00	0.00	0.39	0.69	1.00	27.46	72.54
3.60	1.00	1.00	0.00	0.38	0.69	1.00	26.90	73.10
3.70	1.00	1.00	0.00	0.38	0.69	1.00	26.36	73.64
3.80	1.00	1.00	0.00	0.37	0.69	1.00	25.85	74.15
3.90	1.00	1.00	0.00	0.37	0.69	1.00	25.36	74.64
4.00	1.00	1.00	0.00	0.37	0.68	1.00	24.88	75.12
4.10	1.00	1.00	0.00	0.36	0.68	1.00	24.42	75.58
4.20	1.00	1.00	0.00	0.36	0.68	1.00	23.98	76.02
4.30	1.00	1.00	0.00	0.36	0.68	1.00	23.55	76.45
4.40	1.00	1.00	0.00	0.36	0.68	1.00	23.14	76.86
4.50	1.00	1.00	0.00	0.35	0.68	1.00	22.74	77.26
4.60	1.00	1.00	0.00	0.35	0.67	1.00	22.36	77.64
4.70	1.00	1.00	0.00	0.35	0.67	1.00	21.99	78.01
4.80	1.00	1.00	0.00	0.34	0.67	1.00	21.63	78.37
4.90	1.00	1.00	0.00	0.34	0.67	1.00	21.28	78.72
5.00	1.00	1.00	0.00	0.34	0.67	1.00	20.95	79.05
5.10	1.00	1.00	0.00	0.34	0.67	1.00	20.62	79.38
5.20	1.00	1.00	0.00	0.34	0.67	1.00	20.30	79.70
5.30	1.00	1.00	0.00	0.33	0.67	1.00	20.00	80.00
5.40	1.00	1.00	0.00	0.33	0.67	1.00	19.70	80.30
5.50	1.00	1.00	0.00	0.33	0.66	1.00	19.41	80.59

Rf (%)	C1	C2	w'	$\Delta N/\Delta N_{30\text{cm a } 45\text{ cm}}$			Porcentagem de N	
				X1	X2	X3	Ponta (%)	Atrito (%)
5.60	1.00	1.00	0.00	0.33	0.66	1.00	19.13	80.87
5.70	1.00	1.00	0.00	0.33	0.66	1.00	18.86	81.14
5.80	1.00	1.00	0.00	0.32	0.66	1.00	18.59	81.41
5.90	1.00	1.00	0.00	0.32	0.66	1.00	18.34	81.66
6.00	1.00	1.00	0.00	0.32	0.66	1.00	18.09	81.91
6.10	1.00	1.00	0.00	0.32	0.66	1.00	17.84	82.16
6.20	1.00	1.00	0.00	0.32	0.66	1.00	17.61	82.39
6.30	1.00	1.00	0.00	0.32	0.66	1.00	17.37	82.63
6.40	1.00	1.00	0.00	0.31	0.66	1.00	17.15	82.85
6.50	1.00	1.00	0.00	0.31	0.66	1.00	16.93	83.07
6.60	1.00	1.00	0.00	0.31	0.66	1.00	16.72	83.28
6.70	1.00	1.00	0.00	0.31	0.65	1.00	16.51	83.49
6.80	1.00	1.00	0.00	0.31	0.65	1.00	16.31	83.69
6.90	1.00	1.00	0.00	0.31	0.65	1.00	16.11	83.89
7.00	1.00	1.00	0.00	0.31	0.65	1.00	15.91	84.09
7.10	1.00	1.00	0.00	0.30	0.65	1.00	15.72	84.28
7.20	1.00	1.00	0.00	0.30	0.65	1.00	15.54	84.46
7.30	1.00	1.00	0.00	0.30	0.65	1.00	15.36	84.64
7.40	1.00	1.00	0.00	0.30	0.65	1.00	15.18	84.82
7.50	1.00	1.00	0.00	0.30	0.65	1.00	15.01	84.99
7.60	1.00	1.00	0.00	0.30	0.65	1.00	14.84	85.16
7.70	1.00	1.00	0.00	0.30	0.65	1.00	14.68	85.32
7.80	1.00	1.00	0.00	0.30	0.65	1.00	14.52	85.48
7.90	1.00	1.00	0.00	0.29	0.65	1.00	14.36	85.64
8.00	1.00	1.00	0.00	0.29	0.65	1.00	14.21	85.79

Com base na razão de atrito, R_f da Tabela A. 1 e das porcentagens de ponta e atrito calculadas, obtêm-se a Figura 2.13.

APÊNDICE B – PROCEDIMENTO DE CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DO SPT ATRAVÉS DA PROVA DE CARGA ESTÁTICA SOBRE O AMOSTRADOR

A eficiência do ensaio *SPT* através da execução da prova de carga estática sobre o amostrador pode ser calculada a partir do trabalho $W_{p,s}$ e a energia potencial nominal corrigida U' .

Como exemplo do procedimento de cálculo, utilizou-se o ensaio PCE_4_C2. Para esse ensaio, a máxima carga estática alcançada é de 8,24 *kN* e o máximo deslocamento de 57,75 *mm* (Ver Tabela 4-16).

O valor de carga no ensaio dinâmico é igual à carga no ensaio estático, correspondente a um deslocamento igual ao deslocamento permanente (ρ_p) do ensaio dinâmico (Figura B- 1).

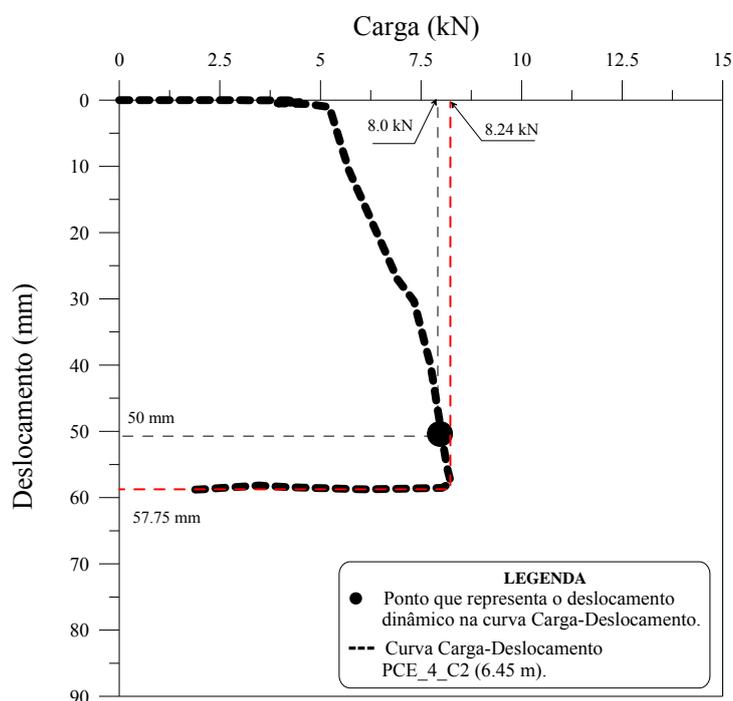


Figura B- 1-Curva Carga-Deslocamento resultado da prova de carga estática PCE_4_C2

A Figura B- 2 mostra o trabalho realizado pelas forças não conservativas durante a penetração do amostrador no solo $W_{p,s}$ num ensaio estático. A curva carga-deslocamento

apresenta uma etapa de carregamento, alcançando uma carga máxima de 8,24 kN, e em seguida uma etapa de descarregamento. Esta última etapa é representada por uma praticamente reta e horizontal. Isso ocorre porque a energia elástica de deformação V_e é praticamente desprezível para areia pouco argilosa.

O valor da carga no ensaio dinâmico é determinado, traçando-se uma reta paralela à reta de descarregamento do ensaio estático e passando pelo ponto correspondente ao deslocamento ρ_p . No caso particular apresentado, o deslocamento permanente (ρ_p) é igual a 50 mm, resultado numa carga igual a 8,0 kN.

A área compreendida entre a curva carga-deslocamento e a reta correspondente ao deslocamento permanente é igual ao trabalho realizado pelas forças não conservativas durante a penetração do amostrador no solo ($W_{p,s}$).

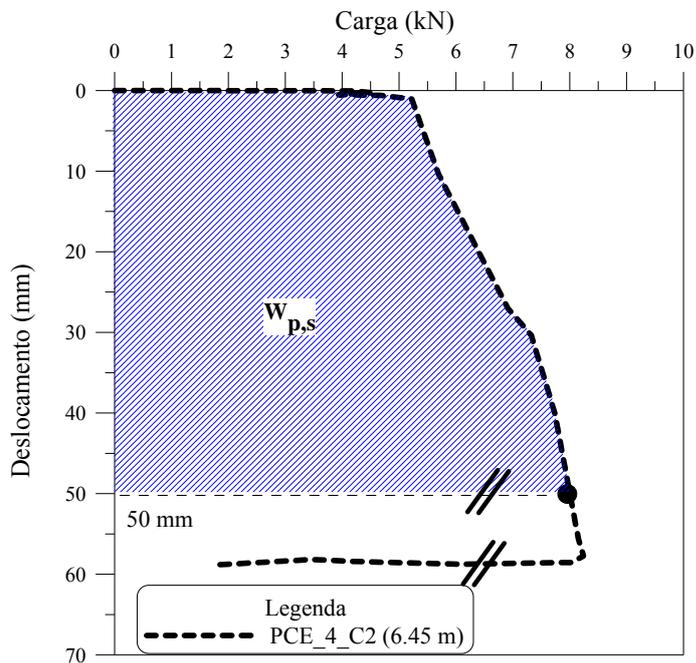


Figura B- 2-Trabalho calculado através da prova de carga estática PCE_4_C2 para a penetração obtida no último golpe dinâmico do martelo SPT.

Depois de calcular o valor de $W_{p,s}$, calcula-se o valor da energia potencial nominal U , a energia potencial gravitacional do martelo e haste para uma penetração

permanente (ρ_p) igual a 50mm . A seguir calcula-se a energia potencial nominal corrigida U' , através da equação 3.5.

Para este ensaio *SPT4* a massa do martelo é de $65,88\text{ kg}$ e uma altura de queda é de $0,75\text{m}$. Consequentemente o valor de U é igual a $484,71\text{ Joules}$. O conjunto de hastes tem um comprimento total de $8,3\text{ m}$ e uma densidade linear de $3,23\text{ kg/m}$. A aceleração da gravidade é assumida igual a $9,81\text{ m/s}^2$.

$$U' = 65.88 * 9.81 * (0.75 + 0.50) + (3.23 * 8.3) * 9.81 * 0.50 = 530.18(J) \quad (\text{B.1})$$

O valor da eficiência do ensaio SPT através da prova de carga estática η'_s é calculada então com a equação 3.7.

$$n'_s = \frac{W_{p,s(\text{estático})}}{U'} \cdot 100\% = \frac{337.03}{530.18} \cdot 100\% = 63.57\% \quad (\text{B.2})$$

A eficiência do ensaio *SPT* também pode ser avaliada com a energia cinética corrigida T_A' e U' . Esta energia corrigida T_A' é calculada através da equação 2.93, resultando para o ensaio *SPT4-C2* $351,06\text{ J}$. O valor da eficiência é então calculado com a equação 3.6.

$$\eta' = \frac{T_A'}{U'} \cdot 100\% = \frac{351.06}{530.18} \cdot 100\% = 66.22\% \quad (\text{B.3})$$

APÊNDICE C – PROCEDIMENTO DE CÁLCULO DA RESISTÊNCIA ESTÁTICA NA PONTA DO AMOSTRADOR SPT

- **Schmertmann (1979) e Souza (2009)**

O procedimento de cálculo para a determinação da força estática média para a penetração do amostrador para o caso de banco de dados da Campanha de Bauru é mostrado com um exemplo:

Bauru : Ensaio SPT4-C2

Profundidade: 6,45 m, solo areia com pouca argila

Golpes/ penetração (cm): 3/16; 3/15; 3/14

N_{SPT} : 6/29

Utilizando as equações 2.77 e 2.78 para calcular os valores de X_1 e X_2 .

$$X_1 = \frac{\Delta N_{15_{iniciais}}}{\Delta N_{15_{finais}}} = 0.88 \quad (C.1)$$

$$X_2 = \frac{\Delta N_{15_{intermediario}}}{\Delta N_{15_{finais}}} = 0.93 \quad (C.2)$$

Obtidos os valores de X_1 e X_2 consulta-se a tabela A-1 no apêndice A para obter a razão de atrito R_f , e as porcentagens de ponta e atrito devido à cravação do amostrador SPT.

Segundo a tabela A-1, os dados obtidos para X_1 e X_2 são R_f igual a 0,23%, Porcentagem de ponta igual a 87,35% e Atrito 12.65%.

Segundo Schmertmann (1979) e Souza (2009) o valor de β é igual a 1,29 para solos arenosos e para uma eficiência do ensaio de 63,57%. Utilizando a equação 2.82 calcula-se o valor da constante α , que é utilizada para estimar a máxima energia transmitida ao amostrador.

$$\alpha = \frac{0.6357}{1.29} = 0.49 \quad (\text{C.3})$$

O valor da resistência estática é obtido da equação 2.85

$$F = \frac{E'}{\Delta\rho_s} = \frac{0.49 \cdot 6.21 \cdot 484.71 + 65.88 \cdot 9.81 \cdot 0.305}{0.30} = 5.60(\text{kN}) \quad (\text{C.4})$$

Do ensaio de campo trabalhou-se com um conjunto de hastes de 8,30 m e peso de 3,23 Kg/m, valor normalizado pela NBR 6484 (2001), o valor do peso da haste é de 263,02 N.

A resistência por atrito externa F_e é igual

$$F_e = 0.263 + 0.8735 \cdot 5.60 = 5.20(\text{kN}) \quad (\text{C.5})$$

O amostrador apresenta diâmetro externo e interno de 0,508m e 0,349m, respectivamente. Consequentemente, a área da ponta do amostrador é de $10,7 \times 10^{-4} \text{m}^2$, a área externa do amostrador para 300mm é igual a $0,0479 \text{m}^2$ e a área interna do amostrador é $0,0329 \text{m}^2$. E a área total do amostrador é a soma da área interna e externa e é igual a $0,0808 \text{m}^2$.

O valor da resistência de ponta do ensaio CPT (q_c) é a relação entre a resistência por atrito externa F_e e a área da ponta do amostrador. A seguinte equação mostra o calculo de q_c .

$$q_c = \frac{5.20}{10.7 \cdot 10^{-4}} = 4.82(\text{MPa}) \quad (\text{C.6})$$

A soma de resistência por atrito externo e interno (F_e e F_i) é o produto da porcentagem do atrito e o valor da resistência estática F .

$$F_e + F_i = 0.1265 \cdot 5.60 = 0.71(\text{kN}) \quad (\text{C.7})$$

O valor de atrito lateral unitário durante a cravação do amostrador é calculado como a relação da soma de resistência por atrito externo e interno e área total do amostrador.

$$f_s = \frac{0.71}{0.0808} = 0.009(\text{MPa}) \quad (\text{C.8})$$

$$R_f = \frac{0.009}{4,82} \cdot 100\% = 0.19\% \quad (\text{C.9})$$

O valor de R_f calculado corresponde aproximadamente ao valor obtido da tabela A-1.

O procedimento anterior é aplicado para todos os ensaios realizados na Campanha de Bauru. Com base nos valores de número de golpes para cada intervalo de 150 mm do amostrador, consulta-se a tabela A-1 para obter os valores de X_1 e X_2 . Com estes valores X_1 e X_2 na tabela A-1 adaptada de acordo à NBR 6484 (2001), obteve-se a razão de atrito, em relação à resistência total à penetração do amostrador.

- **Odebrecht (2003)**

O procedimento de cálculo é realizado para os dados do ensaio *SPT4-C2*. Alguns coeficientes propostos por Odebrecht (2003) permitem o cálculo da resistência estática no amostrador. Estes coeficientes de eficiência são η_1 é igual a 0,764; η_2 é igual a 1,0 e η_3 é função do comprimento da haste e é calculado a partir da equação 2.90.

$$\eta_3 = 1 - 0.0042l = 1 - 0.0042(8.30) = 0.965137 \quad (\text{C.10})$$

Para o ensaio *SPT4-C2*, o comprimento l é medido em campo é igual a 8,30 m, o valor de altura de queda do martelo h_q é 0,75 m, a penetração permanente ρ_p de 0,05 m, a massa do martelo de 65.88 kg, a densidade linear da haste de 3,23 kg/m e a aceleração da gravidade g . O cálculo da força dinâmica F_d é realizada utilizando a equação 2.98.

$$M_h = 3,23 \cdot 8.30 = 26.81(\text{kg}) \quad (\text{C.11})$$

$$F_d = \frac{0.96 \left[0.764(0.75 + 0.05)65.88 \cdot 9.81 + 1.0 \cdot 0.05 \cdot 26.81 \cdot 9.81 \right]}{0.05} = 7.88 \quad (\text{C.12})$$

A Tabela 2.2 mostra fatores de Incremento de carga, υ , para areias o intervalo está entre de 1,00 a 1,15. O valor utilizado de υ é igual a 1. Conseqüentemente, a força dinâmica é igual à força estática (equação 2.97).

$$F_d = F_e = 7.88(\text{kN}) \quad (\text{C.13})$$

- **Aoki *et al.* (2007)**

Um exemplo do procedimento de cálculo pelo método de Aoki *et al.* (2007) é realizado utilizando os dados obtidos do ensaio SPT4-C2. O valor da energia potencial nominal U para esse solo é dada por:

$$U = M_m \cdot g \cdot h_q = 65.88 \cdot 9.81 \cdot 0.75 = 484.71 \text{ J} \quad (\text{C.14})$$

A eficiência do ensaio SPT é dada pela relação entre energia cinética T_A e a energia potencial nominal U . Os valores de T_A são obtidos a partir dos registros da aceleração e força utilizando o método FV.

$$\eta^* = \frac{T_A}{U} 100\% = \frac{337.91}{484.71} 100\% = 69.71\% \quad (\text{C.15})$$

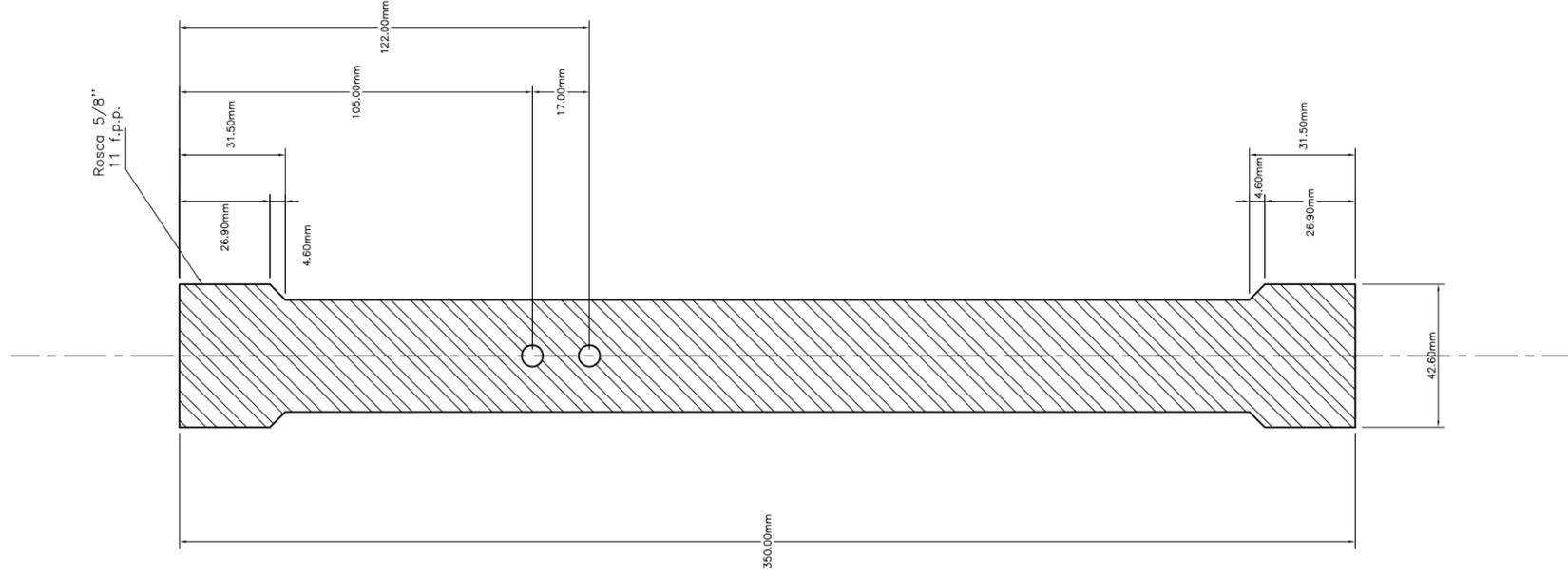
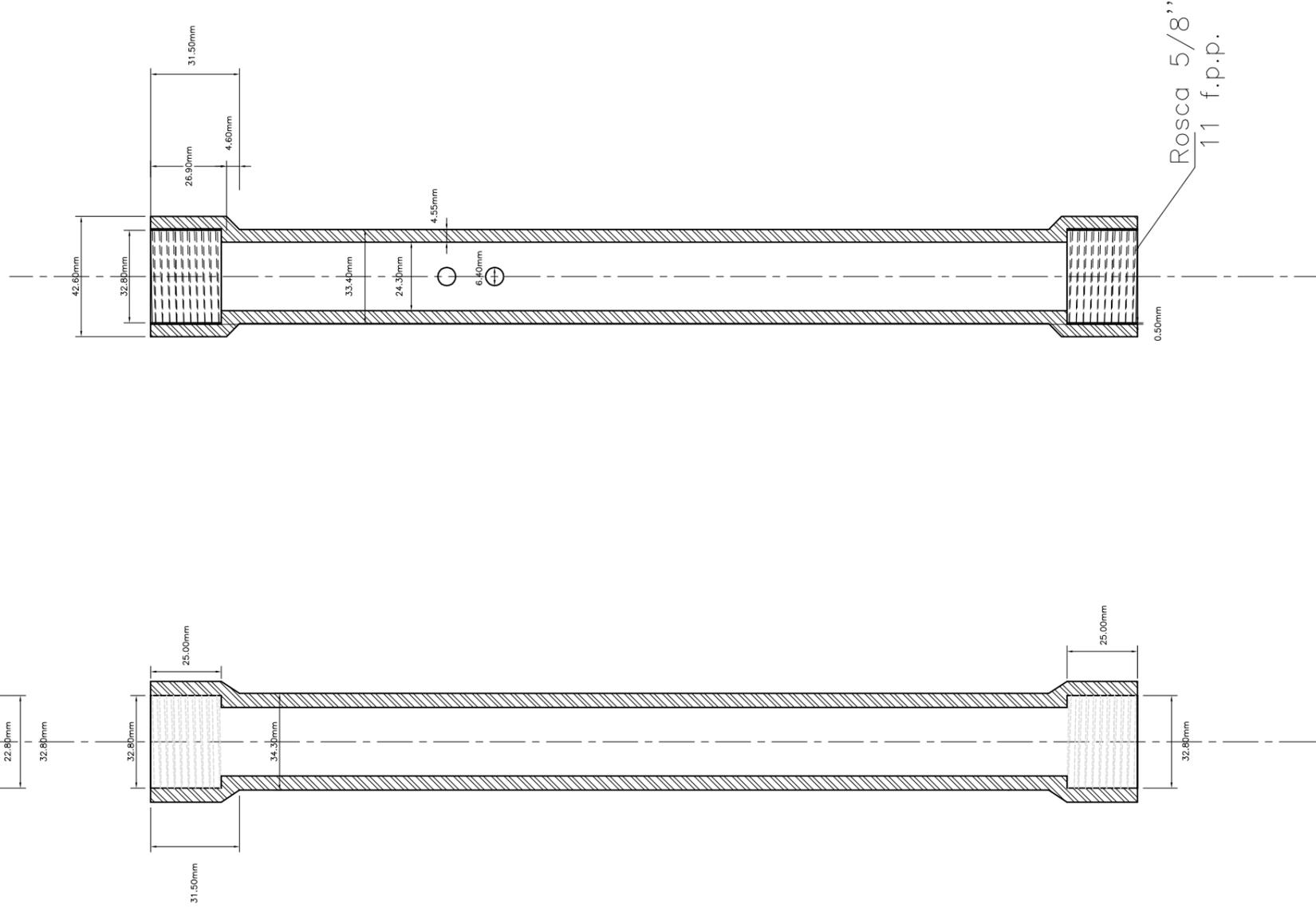
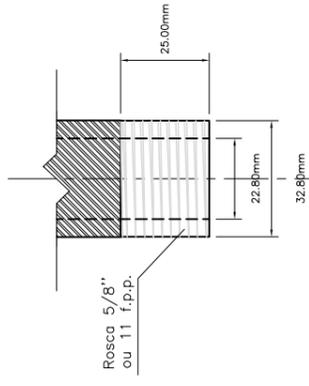
A equação 2.71, formulada por Aoki *et al.* (2007) fornece a resistência estática.

$$R_s = \frac{\eta^* \cdot U \cdot N_{SPT}}{0.30} (\text{N}) \quad (\text{C.16})$$

Para o ensaio *SPT4-C2*, o valor do índice N_{SPT} é igual a 6,20 *golpes/30 cm*, a eficiência de 69,71% e energia potencial nominal U igual a 484,71 J. Com esse valor, obtem-se a resistência estática:

$$R_s = \frac{0.6971 \cdot 484.71 \cdot 6.20}{0.30} = 6.98(kN) \quad (C.17)$$

**APÊNDICE D – PROJETO DA GEOMETRIA DA HASTE
INSTRUMENTADA**



NOTAS :

- 1.- A ESCALA GRÁFICA MOSTRADA É PARA O FORMATO A-1, PARA A-3 CONSIDERAR O DOBRO
- 2.- DIMENSÕES EM MILÍMETROS E NÍVEIS EM METROS, SALVO INDICADO.
- 3.- USAR SO DIMENSÕES INDICADAS NOS PLANOS.



REV. N°	DATA	EMITIDO PARA REVISÃO	DESCRIÇÃO	E.E.	E.E.
0	20/04/11				REVISADO APROVADO

PESQUISA ESTIMATIVA DA EFICIÊNCIA DO ENSAIO
 SPT ATRAVÉS DA EXECUÇÃO DA PROVA
 DE CARGA ESTATICA SOBRE O AMOSTRADOR

ALUNO DO MESTRADO
 PROJETO: DETALHE DA HASTE UTILIZADA NA INSTRUMENTAÇÃO

GEOTECNIA

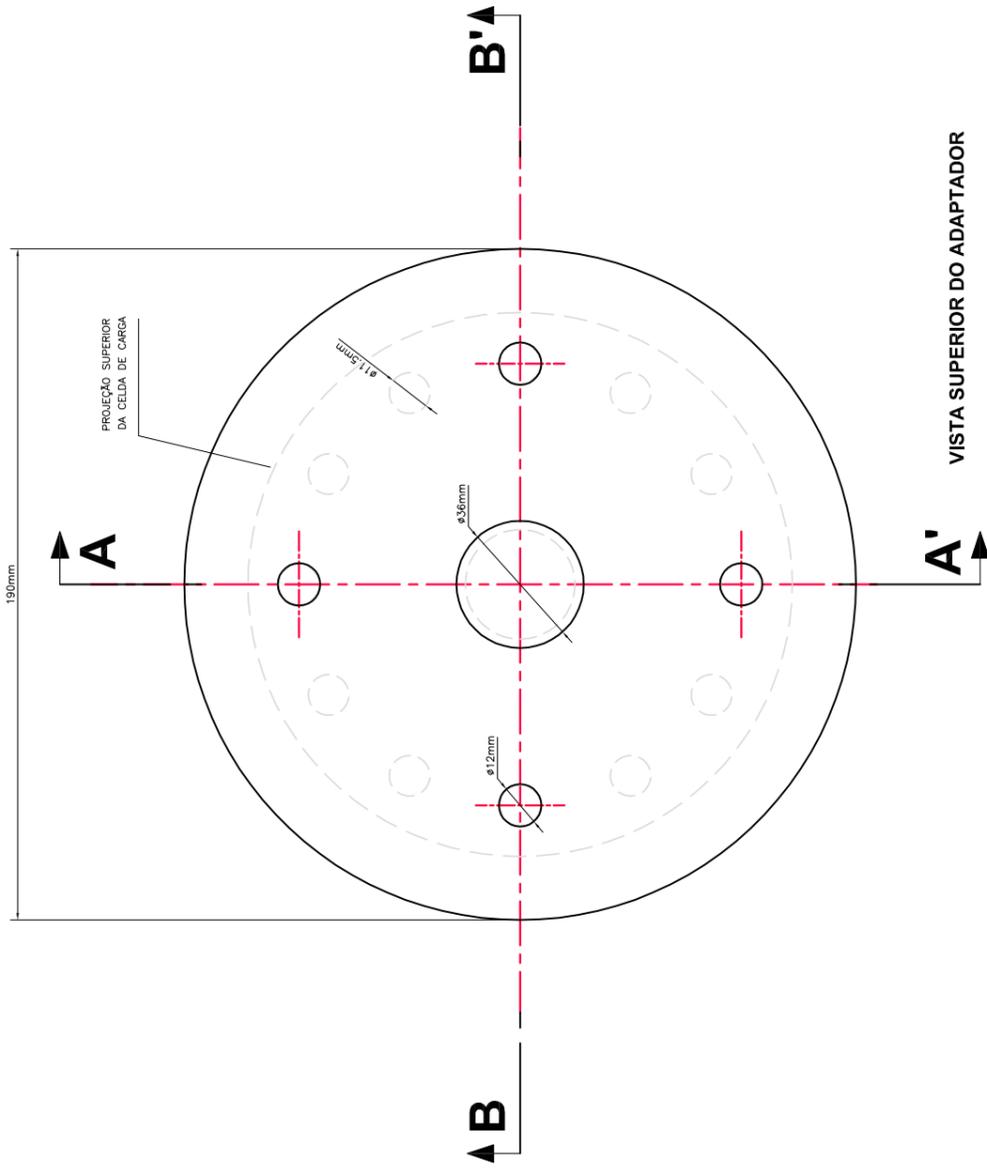
TITULO: GEOMETRIA DE SEGMENTO DE HASTE
 UTILIZADO PARA A INSTRUMENTAÇÃO

MAPA N°: D-2011-001

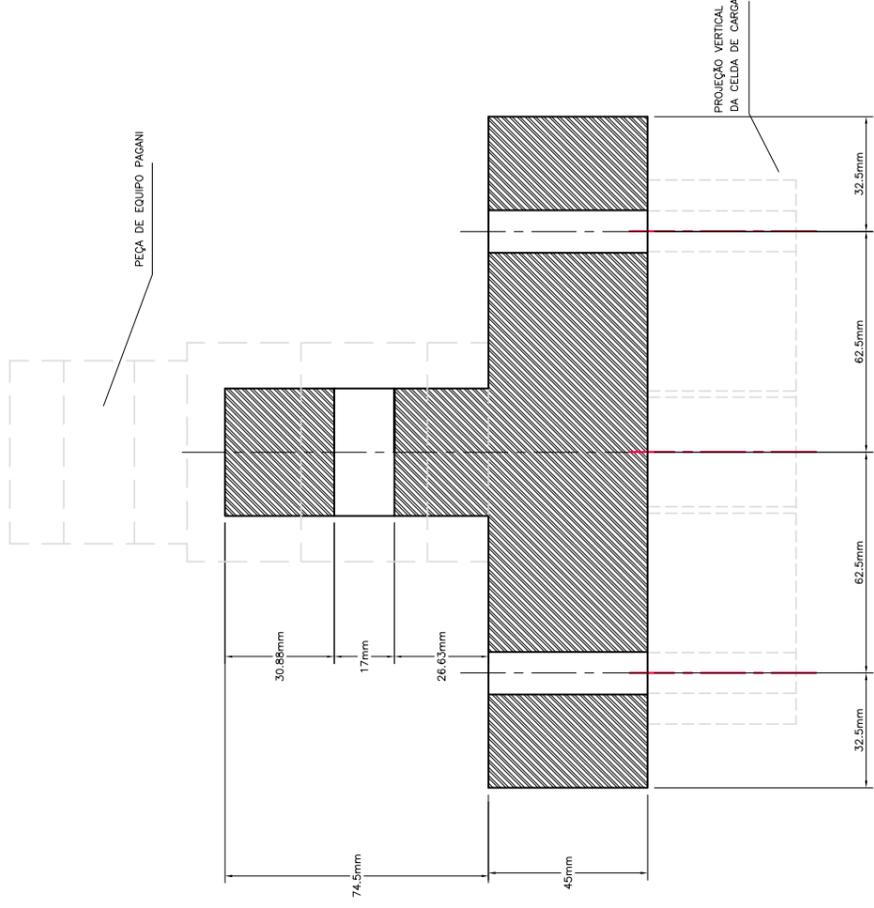
USP

ELABORADO : P.T.N. E.E. ESCALA : 1:1000
 DESENHO : APROVADO : DATA : ABRIL 2011
 P.T.N. E.E. TRABALHO : 2011

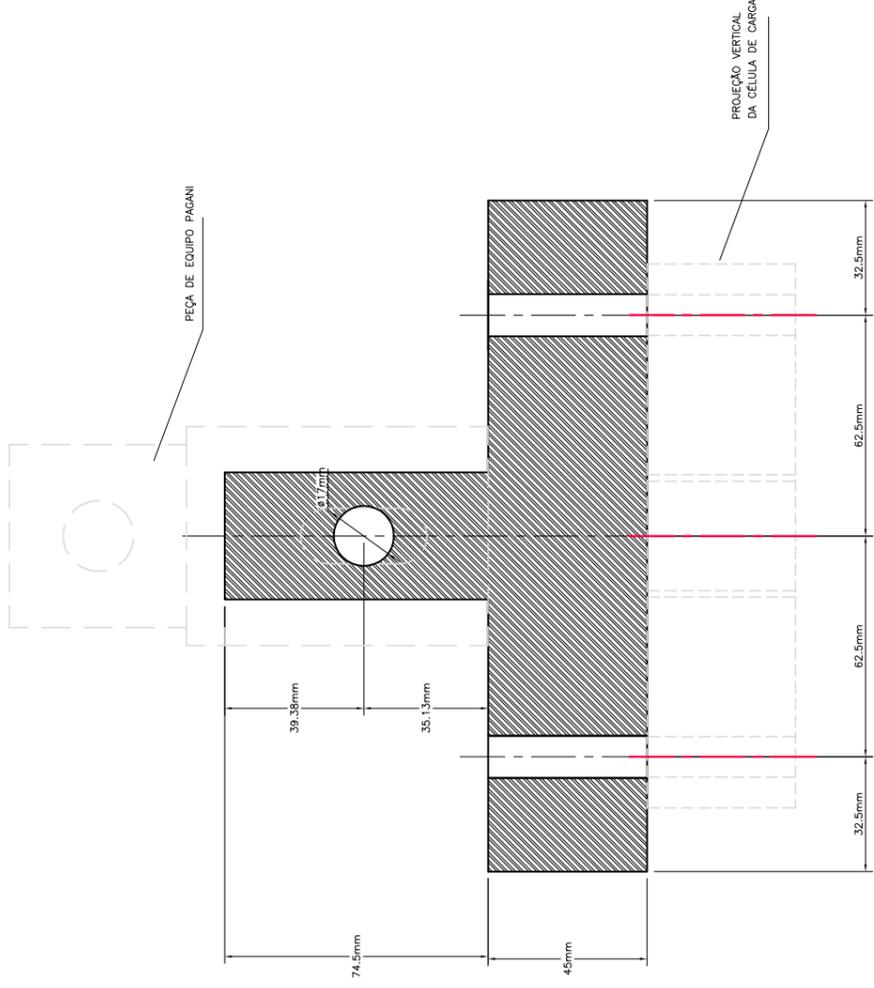
**APÊNDICE E – PROJETO DE ADAPTADORES DE EQUIPAMENTO
PAGANI**



VISTA SUPERIOR DO ADAPTADOR



CORTE A-A'



CORTE B-B'

NOTAS :
 1.- A ESCALA GRÁFICA MOSTRADA É PARA O FORMATO A-1, PARA A-3 CONSIDERAR O DOBRO
 2.- DIMENSÕES EM MILÍMETROS E NÍVEIS EM METROS, SALVO INDICADO.
 3.- USAR SO DIMENSÕES INDICADAS NOS PLANOS.



REV. N°	DATA	EMITIDO PARA REVISÃO	DESCRIÇÃO	E.E.	REVISADO APROVADO
0	20/04/11			E.E.	

PESQUISA ESTIMATIVA DA EFICIÊNCIA DO ENSAIO SPT ATRAVÉS DA EXECUÇÃO DA PROVA DE CARGA ESTÁTICA SOBRE O AMOSTRADOR

ALUNO DO MESTRADO

PROJETO: ADAPTADOR PARA O EQUIPAMENTO PAGANI

GEOTECNIA

TÍTULO: ADAPTADOR DE PEÇA DE EQUIPAMENTO PAGANI E CÉLULA DE CARGA

MAPA N°: E-2011-001

USP

ELABORADO : P.T.N. E.E. 1:1000 REV. : 0

DESENHO : APROVADO : DATA : ABRIL 2011 TRABALHO : 2011

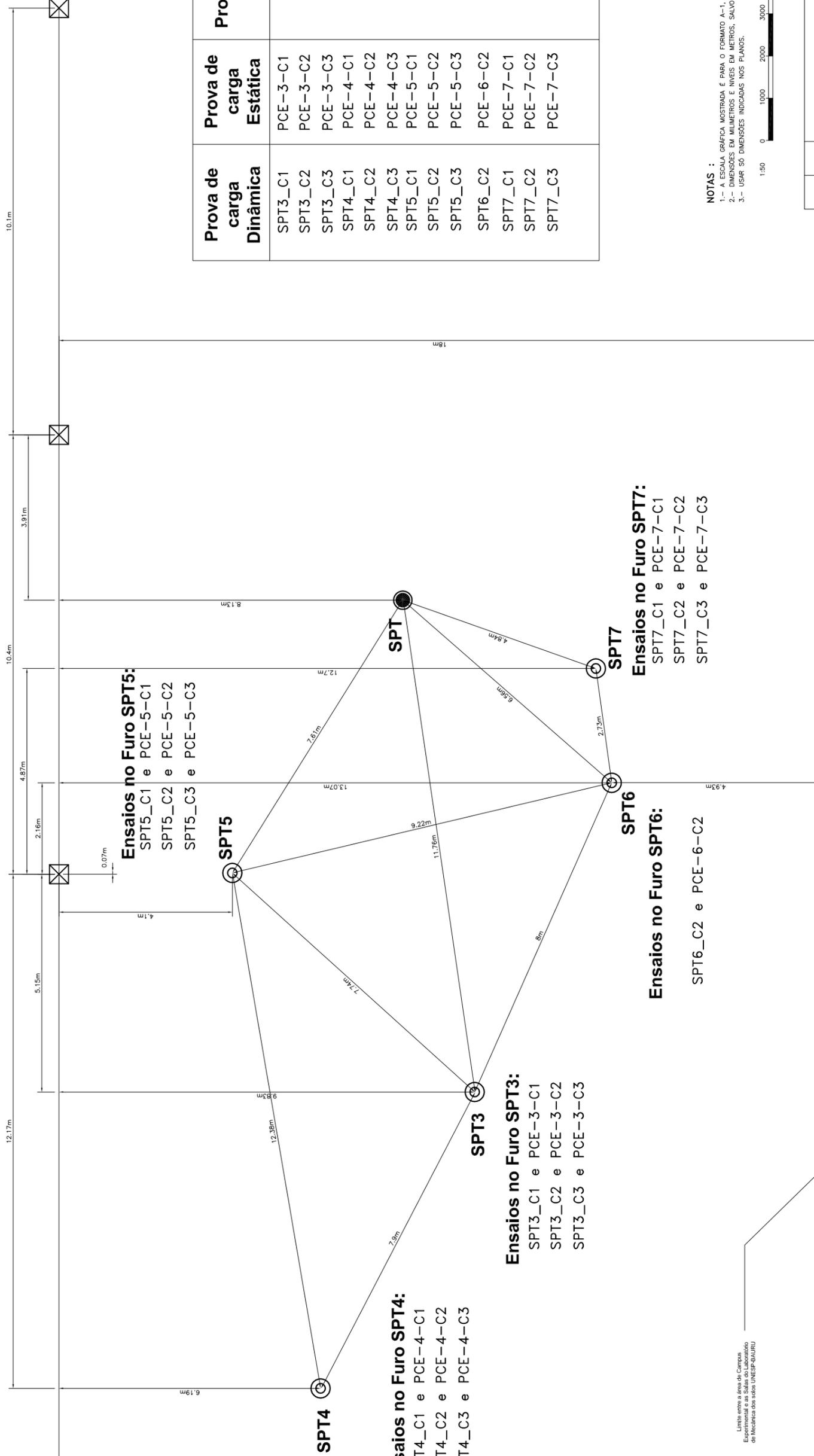
P.T.N. E.E. ABRIL 2011

**APÊNDICE F – MAPA DE LOCALIZAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DOS
ENSAIOS**

Poste 1

Poste 2

Poste 3



Ensaio no Furo SPT5:
 SPT5_C1 e PCE-5-C1
 SPT5_C2 e PCE-5-C2
 SPT5_C3 e PCE-5-C3

Ensaio no Furo SPT4:
 SPT4_C1 e PCE-4-C1
 SPT4_C2 e PCE-4-C2
 SPT4_C3 e PCE-4-C3

Ensaio no Furo SPT3:
 SPT3_C1 e PCE-3-C1
 SPT3_C2 e PCE-3-C2
 SPT3_C3 e PCE-3-C3

Ensaio no Furo SPT6:
 SPT6_C2 e PCE-6-C2

Ensaio no Furo SPT7:
 SPT7_C1 e PCE-7-C1
 SPT7_C2 e PCE-7-C2
 SPT7_C3 e PCE-7-C3

Prova de carga Dinâmica	Prova de carga Estática	Profundidade (m)
SPT3_C1	PCE-3-C1	4.48
SPT3_C2	PCE-3-C2	6.46
SPT3_C3	PCE-3-C3	8.46
SPT4_C1	PCE-4-C1	4.48
SPT4_C2	PCE-4-C2	6.45
SPT4_C3	PCE-4-C3	8.45
SPT5_C1	PCE-5-C1	4.48
SPT5_C2	PCE-5-C2	6.47
SPT5_C3	PCE-5-C3	8.45
SPT6_C2	PCE-6-C2	6.49
SPT7_C1	PCE-7-C1	4.55
SPT7_C2	PCE-7-C2	6.49
SPT7_C3	PCE-7-C3	8.46

NOTAS :

- 1.- A ESCALA GRÁFICA MOSTRADA É PARA O FORMATO A-1, PARA A-3 CONSIDERAR O DOBRO
- 2.- DIMENSÕES EM MILÍMETROS E NÍVEIS EM METROS, SALVO INDICADO.
- 3.- USAR SÓ DIMENSÕES INDICADAS NOS PLANOS.



Unidade: metros e área de Campos
 Experimental e as Salas do Laboratório
 de Mecânica dos Solos UNESP-BAURU

LEGENDA

	Furo para Ensaio Dinâmico (SPT) e Prova de Carga Estática (PCE).
	Ensaio SPT (AVESANI, 2010)

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS SOLOS-UNESP-BAURU

REV. N°	DATA	EMITIDO PARA REVISÃO	DESCRIÇÃO	E.E.	REVISADO/APROVADO
0	20/04/11			E.E.	REVISADO/APROVADO

PESQUISA ESTIMATIVA DA EFICIÊNCIA DO ENSAIO SPT ATRAVÉS DA EXECUÇÃO DA PROVA DE CARGA ESTÁTICA SOBRE AMOSTRADOR

ALUNO DO VESTIBULAR

PROJETO: ENSAIOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS IN SITU

GEOTECNIA

TÍTULO:	LOCAÇÃO DOS ENSAIOS DE CAMPO NO CAMPUS EXPERIMENTAL DO LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS SOLOS UNESP-BAURU	MAPA N°:	F-2011-001
ELABORADO :	REVISADO :	ESCALA :	REV. :
DESENHO :	APROVADO :	P.T.N. :	E.E. :
		DATA :	TRABALHO :
		E.E. :	2011

USP