

JULIANA ZAPATA GALVIS

**ESTIMATIVA DAS TENSÕES INTERNAS E EXTERNAS ATUANTES
NO AMOSTRADOR SPT DURANTE SUA CRAVAÇÃO**

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

Orientador: Prof. Dr. Edmundo Rogério Esquivel

Versão corrigida
Original se encontra disponível na Unidade que aloja o Programa

São Carlos-SP

2015

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

Z35e Zapata Galvis, Juliana
Estimativa das tensões internas e externas atuantes
no amostrador SPT durante sua cravação / Juliana Zapata
Galvis; orientador Edmundo Rogério Esquivel. São
Carlos, 2015.

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

1. ensaio SPT. 2. energia. 3. eficiência. 4. tensões
no amostrador. 5. instrumentação dinâmica. 6. parâmetro
a de Aoki. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **JULIANA ZAPATA GALVIS**.

Título da dissertação: "Estimativa das tensões internas e externas atuantes no amostrador SPT durante sua Cravação".

Data da defesa: 15/07/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

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

APROVADA

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

APROVADA

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

APROVADA

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

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

Aos meus pais Lucelly Galvis e Luis Fernando Zapata e irmãos, Daniel e Laura, que sempre estiveram comigo me incentivando, amando e contagiando com sua fortaleza para enfrentar os desafios da vida.

Aos meus primos, tios e amigos pelo apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a minha família por seu amor, apoio e entusiasmo, o que me ajudou a alcançar este objetivo de ser Mestre em Ciências. Esta vitória é nossa. Amo vocês.

Agradeço aos meus amigos Kate, Guido, Sergio Rincón, Sergio Andrés, Julieth, Zorany, Tati, Moisés e Manu, pela companhia, apoio, amizade e carinho neste período. Também aos meus companheiros da Geotecnia que estiverem sempre dispostos a ajudar.

Ao Professor Edmundo Rogério Esquivel que além de ser um grande professor e orientador foi, e sempre será um grande amigo.

Agradeço a empresa Rochedo Fundações e Sondagens Ltda, pelo apoio na realização dos ensaios de campo e aos funcionários que participaram dos ensaios, por serem pacientes e prestativos.

A Mestre Thaise da Silva Oliveira Morais, por sua ajuda e disponibilidade.

Agradeço aos Doutores Nelson Aoki e George de Paula Bernardes pela contribuição com ideias enriquecedoras sobre o assunto trabalhado e demais temas da Geotecnia.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos que contribuíram para minha formação como pessoa e Mestre.

**"Los sueños de los grandes soñadores jamás
Llegan a cumplirse, siempre son superados"**

Alfred Lord Whitehead

RESUMO

ZAPATA, J.G, **Estimativa das tensões médias internas e externas atuantes no amostrador SPT durante sua cravação**. 2015. 178 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

O ensaio SPT (Standard Penetration Test) é um dos ensaios geotécnicos mais utilizados no Brasil e em grande parte do mundo, para determinar o índice N_{SPT} . Esse índice é usado para estimar, através de correlações empíricas, parâmetros do solo, capacidade de suporte, recalque de fundações, etc.

Pelo fato destas correlações não terem nenhum fundamento científico, pesquisadores têm procurado desenvolver métodos racionais de análise, baseados em energia. Com esses métodos pode-se determinar a eficiência do ensaio SPT, que é uma importante característica utilizada nas análises dos resultados do ensaio.

As quantidades de energia envolvidas no ensaio SPT são determinadas através do método EFV. Para tanto, é necessária a utilização de hastes instrumentadas com acelerômetros e células de carga durante a realização dos ensaios.

Com os sinais de força e aceleração foram determinadas as quantidades de energia, força de reação dinâmica experimental do solo, forças de reação teórica estática e dinâmica e tensões atuantes no amostrador. Neste trabalho, como os sinais de força e aceleração foram registrados em uma seção instrumentada logo acima do amostrador, a eficiência do sistema pode ser determinada de acordo com a definição proposta por Aoki e Cintra (2000), e incluindo a correção sugerida por Odebrecht (2003).

Nesta pesquisa foi desenvolvido um sistema de extrator de amostras, constituído de uma base, um cilindro hidráulico e uma célula de carga, para quantificar experimentalmente a força de atrito interno para posteriormente determinar as demais tensões que atuam no amostrador e o parâmetro a de Aoki, o qual é a razão entre o atrito interno e o atrito externo entre o solo e o amostrador.

Palavras-chave: Ensaio SPT, energia, eficiência, tensões no amostrador, instrumentação dinâmica, parâmetro a de Aoki.

ABSTRACT

ZAPATA, J.G. **Evaluation of internal and external average stresses on the SPT sampler**. 2015. 178 p. Master Thesis- University of São Paulo at São Carlos School of Engineering, São Carlos, 2015.

The Standard Penetration Test (SPT) is one of the in-situ geotechnical tests most used in Brazil, as well as in many parts of the world. Through empirical correlations, the NSPT index is used to estimate parameters of the soil, carrying capacity, discharge of foundations, etc.

Because these correlations have no scientific basis, researchers have developed rational methods of analysis, based on energy concepts. Using these concepts, the efficiency of the SPT, which is essential in the analysis of the test results, can be assessed.

The amounts of energy involved in the SPT test are evaluated by the EFV method. Therefore, it is necessary instrumented rods with accelerometers and load cells for performing the tests. With force and acceleration records, amounts of energy, experimental dynamic reaction force of the soil, theoretical static and dynamic reaction forces and stresses acting on the sampler were assessed. In this work, as the force and acceleration signals were recorded at an instrumented section just above the sampler, the system efficiency could be determined according to the definition proposed by Cintra and Aoki (2000), including the energy corrections suggested by Odebrecht (2003).

In this study, a sample extractor system consisting of a base, a hydraulic cylinder and a load cell was designed. The objective of this equipment is to experimentally quantify the internal friction force, allowing evaluating the stresses acting on the sampler. Also, the Aoki's a parameter, which is the ratio of internal friction and external friction between the ground and the sampler, could be calculated.

Keywords: SPT test, energy, efficiency, stress on the sampler, dynamic instrumentation, Aoki's a parameter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Equipamento do SPT (Schnaid e Odebrecht, 2012).....	33
Figura 2.2 Esquema simplificado de propagação de ondas de tensão no SPT (Palácios, 1979 apud Belincanta e Ferraz, 2000).	36
Figura 2.3 Evolução da energia potencial, energia cinética e trabalho de forças não conservativas durante o golpe do martelo (Neves, 2004, modificado de AOKI e CINTRA, 2000).	38
Figura 2.4 Esquema de propagação de uma onda longitudinal de compressão uniforme nas hastes (modificado de Belincanta, 2000).	41
Figura 2.5 Extremidade da haste livre (adaptado de Belincanta, 1985).	45
Figura 2.6 Extremidade da haste engastada (adaptado de Belincanta, 1985).	46
Figura 2.7 Extremidade da haste semi-engastada (adaptado de Belincanta, 1985).	46
Figura 2.8 Ensaio de uma prova de carga estática sobre amostrador padrão (Noreña, 2011)..	50
Figura 2.9 O mecanismo de interação solo-amostrador: a) os mecanismos de reação do solo; b) relação carga-deslocamento; c) modelo reológico idealizado. (LOBO, 2009).	52
Figura 2.10 Comparação do ensaio SPT e CPT. Componentes da resistência à penetração (Schmertmann, 1979).	54
Figura 2.11 Esquema de esforços de uma estaca submetida a carregamento estático (NEVES, 2004).	56
Figura 2.12 Prova de carga estática (Noreña, 2011).	58
Figura 2.13 Equilíbrio de forças atuantes no amostrador (modificado de Schmertmann, 1979).	59
Figura 2.14 Forças atuantes na ponta aberta do amostrador (modificado de Schmertmann, 1979).	61
Figura 2.15 Tensões desenvolvidas no amostrador para as condições de (a) não embuchamento e (b) embuchamento (Paikowsky e Whitman, 1990).	64
Figura 2.16 Efeito da condição do embuchamento na resistência estática no solo (a) argiloso e (b) arenoso (Paikowsky & Whitman, 1990).	66
Figura 2.17 Correlação para o método proposto de N_1 versus ϕ (Schnaid et al., 2009).	69
Figura 2.18 Comparação com resultados de Hatanaka e Uchida (1996) de N_1 versus ϕ (Schnaid et al., 2009).	69
Figura 3.1 Projeto da haste: a) dimensões e posicionamento dos sensores; b) dimensões internas e roscas.	74
Figura 3.2 Acelerômetros instalados nas hastes: a) vista frontal, acelerômetros e suportes; b) vista lateral, acelerômetros e suportes.	74
Figura 3.3 Esquema da ponte de Wheatstone (Odebrecht, 2003).	75
Figura 3.4 Sistema de aquisição de dados HBM, modelo MX410.	76
Figura 3.5 Equipamento utilizado nos ensaios realizados em campo.	78

Figura 3.6 Amostrador bipartido tipo Raymond sem liner, utilizado nesta pesquisa modificado de Schmertmann (1979) (dimensões em mm).....	79
Figura 3.7 Calibração da célula de carga da haste instrumentada.....	80
Figura 3.8 Calibração da célula de carga da haste instrumentada.....	80
Figura 3.9 Proteção mecânica dos sensores instalados nas hastes instrumentadas (Morais, 2014).....	81
Figura 3.10 Totalidade dos dados adquiridos e seleção do intervalo de interesse do golpe. ...	82
Figura 3.11 Distância entre a instrumentação e a extremidade do amostrador.....	83
Figura 3.12 Regra dos trapézios.....	84
Figura 3.13 Verificação da qualidade dos sinais de um dos golpes dos ensaios SPT (7 m golpe 5) – equivalência entre os deslocamento medido e calculado.....	85
Figura 3.14 Resultados de energia para um dos golpes do ensaio SPT (7 m golpe 5).....	86
Figura 3.15 Algoritmo da rotina desenvolvida para o cálculo da energia no ensaio SPT (Morais, 2014).....	88
Figura 3.16 Força e deslocamento <i>versus</i> tempo de um dos registros típicos do ensaio SPT, para a instrumentação posicionada logo acima do amostrador (Profundidade 4 m, 4º golpe).....	89
Figura 3.17 Instrumentação para a determinação do atrito interno entre o solo e o amostrador.....	90
Figura 3.18 Célula de carga usada para medir a força de atrito interno (R_2).....	91
Figura 4.1 Seção esquemática da geologia de São Carlos (Bortolucci, 1983).....	93
Figura 4.2 Resultados de ensaios penetrométricos de SPT e CPTu (Machado, 1998).....	95
Figura 5.1 Locação da sondagem do SPT ensaios no campo experimental da EESC/USP (adaptado de Vianna, 2005).....	98
Figura 5.2 Controle da penetração permanente do amostrador por golpe do martelo.....	99
Figura 5.3 Equipamento para medir a força de atrito interna.....	99
Figura 5.4 Controle da recuperação de amostra: a) sem embuchamento. b) com embuchamento.....	100
Figura 6.1 Índices de resistência à penetração (N_{SPT}).....	101
Figura 6.2 Valores médios de energia <i>versus</i> comprimento de haste.....	104
Figura 6.3 Energia <i>versus</i> penetração para $L_h = 5,28$ m.....	105
Figura 6.4 Energia <i>versus</i> penetração para $L_h = 7,28$ m.....	105
Figura 6.5 Energia <i>versus</i> penetração para $L_h = 10,28$ m.....	106
Figura 6.6 Eficiência <i>versus</i> comprimento de haste.....	109
Figura 6.7 Eficiência <i>versus</i> penetração para $L_h = 5,28$ m.....	110
Figura 6.8 Eficiência <i>versus</i> penetração para $L_h = 7,28$ m.....	110
Figura 6.9 Eficiência <i>versus</i> penetração para $L_h = 10,28$ m.....	111

Figura 6.10 Efeito das condições do solo: $L_h = 2,28$ m, golpe 3 e $N_{SPT} = 2,01$. a) Sinais de força <i>versus</i> tempo e $v.Z$ <i>versus</i> tempo; b) Deslocamento, calculado a partir da velocidade; c) Energia entregue ao solo.....	114
Figura 6.11 Efeito das condições do solo: $L_h = 4,28$ m, golpe 4 e $N_{SPT} = 2,99$. a) Sinais de força <i>versus</i> tempo e $v.Z$ <i>versus</i> tempo; b) Deslocamento, calculado a partir da velocidade; c) Energia entregue ao solo.....	115
Figura 6.12 Efeito das condições do solo: $L_h = 7,28$ m, golpe 7 e $N_{SPT} = 5,36$. a) Sinais de força <i>versus</i> tempo e $v.Z$ <i>versus</i> tempo; b) Deslocamento, calculado a partir da velocidade; c) Energia entregue ao solo.....	116
Figura 6.13 Efeito das condições do solo: $L_h = 10,28$ m, golpe 9 e $N_{SPT} = 6,82$. a) Sinais de força <i>versus</i> tempo e $v.Z$ <i>versus</i> tempo; b) Deslocamento, calculado a partir da velocidade; c) Energia entregue ao solo.....	117
Figura 6.14 a) Resistência dinâmica do solo; b) deslocamento calculado a partir da velocidade e penetração medida em campo. Profundidade 2 m, golpe 3.	119
Figura 6.15 Resistência dinâmica do solo; b) deslocamento calculado a partir da velocidade e penetração medida em campo. Profundidade 4 m, golpe 4.	120
Figura 6.16 Resistência dinâmica do solo; b) deslocamento calculado a partir da velocidade e penetração medida em campo. Profundidade 7 m, golpe 7.	121
Figura 6.17 Resistência dinâmica do solo; b) deslocamento calculado a partir da velocidade e penetração medida em campo. Profundidade 10 m, golpe 9.	122
Figura 6.18 Perfil de resistência dinâmica experimental e teórica.	126
Figura 6.19 R_D e F_d <i>versus</i> N_{SPT}	127
Figura 6.20 R_D <i>versus</i> F_d	127
Figura 6.21 Perfil de resistência dinâmica experimental (RD) e resistência estática (RS)	129
Figura 6.22 R_D <i>versus</i> R_s	129
Figura 6.23 Peso específico γ <i>versus</i> comprimento da amostra L_a	131
Figura 6.24 Umidade <i>versus</i> comprimento da amostra L_a	131
Figura 6.25 Resistência N_{SPT} <i>versus</i> comprimento da amostra (L_a).	132
Figura 6.26 Relação entre o comprimento da amostra recuperada (L_a) e a penetração acumulada do amostrador ($\rho_{acumulado}$).	133
Figura 6.27 Força de atrito interno (R_2) <i>versus</i> tempo para 1 m de profundidade.	134
Figura 6.28 Força de atrito interno (R_2) <i>versus</i> tempo para 2 m de profundidade.	134
Figura 6.29 Força de atrito interno (R_2) <i>versus</i> tempo para 3 m de profundidade.	135
Figura 6.30 Força de atrito interno (R_2) <i>versus</i> tempo para 4 m de profundidade.	135
Figura 6.31 Força de atrito interno (R_2) <i>versus</i> tempo para 5 m de profundidade.	136
Figura 6.32 Força de atrito interno (R_2) <i>versus</i> tempo para 6 m de profundidade.....	136
Figura 6.33 Força de atrito interno (R_2) <i>versus</i> tempo para 7 m de profundidade.	137
Figura 6.34 Força de atrito interno (R_2) <i>versus</i> tempo para 8 m de profundidade.	137
Figura 6.35 Força de atrito interno (R_2) <i>versus</i> tempo para 9 m de profundidade.	138

Figura 6.36 Força de atrito interno (R_2) <i>versus</i> tempo para 10 m de profundidade.	138
Figura 6.37 Teor de umidade <i>versus</i> profundidade.	142
Figura 6.38 Curva de tendência do ângulo de atrito entre aço e areia em função da granulometria do solo (Jardine et al., 1998).	143
Figura 6.39 r_l do SPT <i>versus</i> o f_s do cone.....	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Instantes e eventos na evolução da energia potencial, energia cinética e trabalho durante o evento do golpe do martelo.	38
Tabela 2.2 Convenção de sinais e sentido adotada para velocidades e forças.	44
Tabela 4.1 Resultados dos ensaios de caracterização. (Peixoto, 2001).....	94
Tabela 6.1 Valores das quantidades de energia e das penetrações do amostrador.....	102
Tabela 6.2 Resultados de eficiência.....	106
Tabela 6.3 Valores médios de eficiência.	108
Tabela 6.4 Resultados de eficiência do ensaio SPT e das eficiências do martelo e do sistema.	111
Tabela 6.5 Resultados de resistência dinâmica do solo (R_D).....	123
Tabela 6.6 Resultados de resistência dinâmica experimental e teórica.	124
Tabela 6.7 Resistência estática R_S e resistência dinâmica experimental R_D	128
Tabela 6.8 Resultados do controle de recuperação de amostras.	130
Tabela 6.9 Força de atrito interno (R_2).....	139
Tabela 6.10 Resultados das tensões desenvolvidas no amostrador durante sua penetração no solo, a relação de atrito R_f e o parâmetro a de Aoki.	139
Tabela 6.11 Valores do peso específico do solo no interior do amostrador e do terreno natural.	140
Tabela 6.12 Valores de adesão-atrito (ft) no Campo Experimental EESC (Peixoto, 2001) ..	141
Tabela 6.13 Resultados das tensões desenvolvidas no amostrador, assumindo que $r_i = ft \max$	141
Tabela 6.14 resultados dos cálculos de σ'_v , K_0 , γ , ϕ , σ'_v , τ_f	143
Tabela 6.15 Resultados das tensões desenvolvidas no amostrador quando se assume que $r_{i=}$ τ_f de Mohr-Coulomb.....	144
Tabela 6.16 Resultados de r_i e do f_s do cone.	144

LISTA DE SÍMBOLOS

$a:$	Coeficiente do Aoki (2013).
$A_p:$	Área da ponta
$a_h:$	Área da seção transversal da haste
$A_o:$	Área lateral externa do amostrador
$A_i:$	Área lateral interna do amostrador
$A_e:$	Área da seção transversal do anel do amostrador (Schmertmann, 1979)
$A_r:$	Área do anel do amostrador (Paikowsky & Whitman, 1990)
$a_l:$	Área no eixo do amostrador
$A_{pe}:$	Área da ponta de uma estaca
$B:$	Diâmetro externo do amostrador (Paikowsky & Whitman, 1990)
$c:$	Velocidade teórica de propagação da onda nas hastes.
$C:$	Coesão do solo
$C_N:$	Fator de correção
$D:$	Profundidade de penetração (Paikowsky & Whitman, 1990)
$D_e:$	Diâmetro externo do amostrador (Lobo, 2009)
$D_{es}:$	Diâmetro de uma estaca
$D_{ex}:$	Diâmetro externo do amostrador (Aoki, 2013)
$D_i:$	Diâmetro interno do amostrador (Lobo, 2009)
$D_{int}:$	Diâmetro interno do amostrador (Aoki, 2013)
$d_i:$	Diâmetro interno do amostrador (Schmertmann, 1979)
$d_o:$	Diâmetro externo do amostrador (Schmertmann, 1979)
$D_p:$	Diâmetro da ponta do amostrador (Aoki, 2013)
$du:$	Encurtamento elástico de uma seção de haste
d_t	Intervalo de tempo
d_x	Seção de haste
$E:$	Módulo de elasticidade do aço
$E_{amostrado}$	Energia que efetivamente atinge o amostrador (Odebrecht et al., 2003)
$E_{Base}:$	Energia medida no topo do amostrador.
$E_h:$	Energia transferida ao topo da composição de hastes
$EP_H:$	Variação da energia potencial das hastes
$EP_i:$	Energia potencial nominal
$EP_M:$	Variação da energia potencial do martelo
$EP_{sistema}:$	Energia potencial imposta durante o evento

f :	Atrito entre as paredes internas e externas do amostrador
f_s :	Atrito lateral medido no ensaio CPTU
f_{so} :	Tensão de cisalhamento externa (Paikowsky & Whitman, 1990)
f_{si} :	Tensão de cisalhamento interna (Paikowsky & Whitman, 1990)
F_d :	Resistência dinâmica teórica do solo (Schnaid et al., 2009)
$F_{d,a}$:	Força de reação na ponta do amostrador (Lobo, 2009)
$F_{d,c}$:	Força de atrito lateral interno entre o solo e o amostrador (Lobo, 2009)
$F_{d,s}$:	Força de atrito lateral externo entre o solo e o amostrador (Lobo, 2009)
F_0 :	Parcela de resistência devido ao atrito externo (Schmertmann, 1979)
F_i :	Parcela de resistência devido ao atrito interno (Schmertmann, 1979)
F_e :	Resistencia da ponta (Schmertmann, 1979)
f_i :	Resistência de cisalhamento unitária entre o solo e a estaca
f_s :	Atrito lateral do ensaio CPTU
F :	Força de compressão uniforme.
g :	Aceleração da gravidade
G	Módulo de cisalhamento
H :	Altura de queda padrão do martelo
I_r :	Índice de rigidez do solo
J :	Dumping de Smith
J_p :	Amortecimento da ponta
J_s :	Amortecimento lateral
K :	Coefficiente lateral do solo
K' :	Rigidez do sistema estaca-solo
K_0 :	Coefficiente de empuxo em repouso
L :	Comprimento do martelo
L :	Profundidade do ensaio
L_a :	Comprimento da amostra de solo recuperada
L_e :	Comprimento do segmento cravado da estaca
L_{ext} :	Penetração total do amostrador
L_h :	Comprimento da composição de hastes
L_P :	Comprimento vertical da seção biselada do amostrador
m :	Massa do corpo considerado
M_h :	Massa da haste
M_m :	Massa do martelo
N :	Número de golpes

N_c :	Fator de capacidade de carga
N_q :	Fator de capacidade de carga
N_γ :	Fator de capacidade de carga
p'	Tensão efetiva média
P	Carga aplicada a uma estaca (Neves, 2004)
P_L	Força de atrito lateral entre o solo e a estaca (Neves, 2004)
P_P	Reação na ponta da estaca (Neves, 2004)
q :	Tensão normal atuante no anel do amostrador (Schmertmann, 1979)
Q :	Quake
Q_u :	Capacidade de suporte de uma estaca
Q_P :	Capacidade de ponta de uma estaca
Q_L :	Capacidade por atrito entre o solo e a estaca
q_c :	Resistência de ponta do ensaio CPTu
q_p :	Resistência de ponta
q_{pe} :	Resistência unitária da ponta da estaca
R_1 :	Força de atrito na parede vertical externa do amostrador
R_2 :	Força de atrito na parede vertical interna do amostrador
R_3 :	Força de reação vertical na seção anelar da ponta do amostrador
R_4 :	Componente vertical da força de atrito ao longo da superfície biselada tronco-cônica do amostrador
R_5 :	Componente horizontal da força de atrito ao longo da superfície biselada tronco-cônica do amostrador
R_D :	Resistência dinâmica experimental oferecida pelo solo
R_f :	Razão de atrito interno
R_t :	Atrito na parede externa e no chanfro do amostrador
R_{ti} :	Atrito na parede interna do amostrador
R_L :	Esforço de reação do solo ao longo do fuste da estaca
R_P :	Esforço de reação do solo na ponta da estaca
R_s :	Resistência estática no ensaio SPT
R_v :	Resistência viscosa mobilizada
S	Nega
S_u :	Resistência ao cisalhamento
T :	Energia cinética total do sistema
T_A :	Energia transferida ao sistema amostrador-solo

$u:$	Deslocamento
$V:$	Energia potencial de deformação
$v(t):$	Velocidade das partículas
$V_e:$	Energia potencial elástica
$V_{eh}:$	Energia potencial elástica de deformação das hastes
$V_{es}:$	Energia potencial elástica devido a deformação do solo
$v_p:$	Velocidade de penetração
$Z:$	Impedância da haste
$W':$	Somatório do peso das hastes, da cabeça de bater e do amostrador
$W_h:$	Peso das hastes e da cabeça de bater
$W_{nc}:$	Trabalho realizado por forças não conservativas
$W_p:$	Trabalho realizado por forças resistentes não conservativas para a cravação do amostrador no solo.
$ca:$	Coefficiente de adesão entre o solo e o amostrador
$\gamma:$	Peso específico do solo
$\delta:$	Ângulo de cisalhamento entre o solo e o amostrador
$\varepsilon:$	Deformação unitária
$\eta:$	Eficiência do ensaio SPT
$\eta^*:$	Eficiência do ensaio SPT redefinida por Aoki e Cintra (2000a)
$\eta_1:$	Eficiência do martelo (Odebrecht, 2003)
$\eta_2:$	Eficiência da composição de hastes (Odebrecht, 2003)
$\eta_3:$	Eficiência do sistema (Odebrecht, 2003)
$\rho:$	Penetração permanente do amostrador
$\rho:$	Massa específica do solo.
$\sigma'_e:$	Tensão vertical efetiva do solo fora do amostrador
$\sigma'_i:$	Tensão vertical efetiva do solo dentro do amostrador
$(\sigma'_{oct})_l$	Tensão octaédrica para uma areia sobre pressão vertical efetiva de 100 kPa
σ'_{oct}	Tensão octaédrica ao nível onde o SPT está sendo executado
$\sigma_x:$	Tensão de compressão
$\phi':$	Ângulo de atrito interno

SUMÁRIO

1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	29
1.1	INTRODUÇÃO	29
1.2	OBJETIVOS	29
2	REVISAO BIBLIOGRÁFICA.....	31
2.1	STANDARD PENETRATION TEST (SPT).....	31
2.1.1	<i>Equipamentos do ensaio SPT.....</i>	<i>31</i>
2.1.2	<i>Procedimentos de execução do ensaio SPT.....</i>	<i>33</i>
2.2	ENERGIA NO ENSAIO SPT.....	34
2.2.1	<i>Mecanismo de transferência de energia</i>	<i>35</i>
2.3	APLICAÇÃO DO PRINCIPIO DE HAMILTON NO ENSAIO SPT	37
2.4	TEORIA DA ONDA UNIDIMENSIONAL.....	40
2.5	CONDIÇÕES DE CONTORNO	43
2.5.1	<i>Extremidade da haste</i>	<i>43</i>
2.6	DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE ENERGIA.....	47
2.7	EFICIÊNCIA	48
2.8	RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO E INTERAÇÃO SOLO- AMOSTRADOR.....	50
2.8.1	<i>Força dinâmica experimental (R_D) mobilizada durante a cravação do amostrador SPT e força dinâmica teórica (F_d).....</i>	<i>51</i>
2.8.2	<i>Interação solo- amostrador: modelo desenvolvido por Lobo (2009).....</i>	<i>51</i>
2.9	ESTÁTICA NO ENSAIO SPT	54
2.9.1	<i>Resistencia estática mobilizada no sistema amostrador-solo segundo Neves 55</i>	
2.9.2	<i>Resistência estática mobilizada no sistema amostrador-solo através da aplicação do Princípio de Hamilton.....</i>	<i>57</i>
2.10	RESISTENCIA POR ATRITO LATERAL NO AMOSTRADOR SPT	58
2.11	MÉTODO PROPOSTO PARA A DETERMINAÇÃO DO TRABALHO REALIZADO PELAS FORÇAS NÃO CONSERVATIVAS ATUANTES NO AMOSTRADOR	62
2.12	MECANISMOS DE REAÇÃO MOBILIZADOS DURANTE A PENETRAÇÃO DO AMOSTRADOR SPT.....	63
2.13	PROPRIEDADES DOS SOLOS	66
2.13.1	<i>Propriedades de solos granulares.....</i>	<i>66</i>
2.13.2	<i>Propriedades de solos coesivos.....</i>	<i>70</i>
2.14	APLICAÇÃO.....	71

2.14.1	<i>Metodologia para prever a capacidade de suporte de uma estaca a partir da força dinâmica de reação do solo (F_d) segundo Schnaid e Langone (2013).....</i>	71
3	MATERIAIS, INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA.....	73
3.1	INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA PARA CALCULAR A QUANTIDADE DE ENERGIA .	73
3.1.1	<i>Haste instrumentada</i>	73
3.1.2	<i>Acelerômetros e Suportes.....</i>	73
3.1.3	<i>Célula de carga</i>	75
3.1.4	<i>Sistema de aquisição de dados.....</i>	76
3.1.5	<i>Configuração do sistema de aquisição de dados</i>	77
3.1.6	<i>Equipamentos das sondagens do SPT.....</i>	77
3.2	CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA.....	79
3.3	PROTEÇÃO MECÂNICA DA INSTRUMENTAÇÃO	81
3.4	PROCESSAMENTO DOS DADOS E CÁLCULO DAS QUANTIDADES DE ENERGIA	81
3.5	VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE DOS SINAIS.....	82
3.6	CÁLCULO DA QUANTIDADE DE ENERGIA	85
3.7	ROTINA PARA O CÁLCULO DA QUANTIDADE DE ENERGIA	86
3.8	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DINÂMICA DO SOLO PARA CERTA PROFUNDIDADE (R_D).....	87
3.9	EQUIPAMENTO PARA A DETERMINAÇÃO DO ATRITO INTERNO	89
3.10	PROCEDIMENTO PARA A DETERMINAÇÃO DO ATRITO INTERNO	91
4	CARACTERIZAÇÃO DA AREA DE ESTUDO.....	93
4.1	CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA.....	93
4.2	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA	94
5	ENSAIO DE CAMPO.....	97
5.1	CONTROLE DA PENETRAÇÃO DO AMOSTRADOR OU DESLOCAMENTO.....	98
5.2	MEDIÇÃO DA FORÇA DE ATRITO INTERNA (R_2).....	99
5.3	CONTROLE DA RECUPERAÇÃO DE AMOSTRAS.....	100
6	RESULTADOS E ANÁLISES.....	101
6.1	ENERGIA NOS ENSAIOS SPT	101
6.2	EFICIÊNCIA	106
6.3	INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DO SOLO NAS QUANTIDADES DE ENERGIA NO ENSAIO SPT	113
6.4	RESISTENCIA DINÂMICA DO SOLO NO ENSAIO SPT (R_D)	118
6.5	RESISTÊNCIA DINÂMICA EXPERIMENTAL (R_D) E TEÓRICA (F_D)	124
6.6	RESISTÊNCIA ESTÁTICA (R_S), OBTIDA A PARTIR DO ENSAIO SPT	128

6.7	CONTROLE DE RECUPERAÇÃO DA AMOSTRA	130
6.8	RESULTADOS DA FORÇA MEDIDA DO ATRITO INTERNO (R_2).....	133
6.9	TENSÕES DESENVOLVIDAS NO AMOSTRADOR DURANTE SUA PENETRAÇÃO NO ENSAIO SPT	139
7	CONCLUSÕES	147
7.1	ENERGIA E EFICIÊNCIA NO ENSAIO SPT.....	147
7.2	RESISTENCIA DINÂMICA EXPERIMENTAL E TEÓRICA E RESISTÊNCIA ESTÁTICA DO ENSAIO SPT	148
7.3	TENSÕES DESENVOLVIDAS NO AMOSTRADOR DURANTE SUA PENETRAÇÃO NO ENSAIO SPT	148
7.4	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	149
	APÊNDICE A- PROGRAMAÇÃO NO SOFTWARE MATLAB® PARA O CÁLCULO DA QUANTIDADE DE ENERGIA PELO MÉTODO EFV	155
	APÊNDICE B- RESULTADOS TÍPICOS DOS ENSAIOS SPT COM MEDIDA DA QUANTIDADE DE ENERGIA	161

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 Introdução

O SPT (Standard Penetration Test) é um dos ensaios geotécnicos mais utilizados no Brasil e em grande parte do mundo, pois utiliza um equipamento simples e de fácil manejo, além de apresentar um baixo custo. Esse ensaio, que também fornece o índice de resistência à penetração no solo (N_{SPT}), é normatizado no Brasil pela norma NBR 6484 (2001). Esse índice é o número de golpes de martelo necessários para a cravação de 0,30 m do amostrador SPT no solo, após uma penetração inicial de 0,15 m. Os golpes são produzidos por um martelo de 65 kg, que é elevado a uma altura de 0,75 m e deixado cair em queda livre para transmitir essa energia ao conjunto de hastes.

O índice N_{SPT} é utilizado para estimar através de correlações empíricas, parâmetros do solo, capacidade de suporte, recalque de fundações, etc. Pelo fato destas correlações não terem nenhum fundamento científico, pesquisadores têm procurado desenvolver métodos racionais de análise, baseados em energia. Com esses métodos pode-se determinar a eficiência do ensaio SPT, que é uma importante característica utilizada nas análises dos resultados do ensaio.

Com os sinais de força e aceleração podem ser determinadas as quantidades de energia, força de reação dinâmica experimental do solo, forças de reação teórica estática e dinâmica e tensões atuantes no amostrador.

1.2 Objetivos

Objetivo geral:

Estimar e analisar as quantidades de energia envolvidas no ensaio, eficiência do sistema, resistência do solo e as tensões desenvolvidas no amostrador no momento da sua penetração, por meio de instrumentação situada na base da composição das hastes.

Objetivos específicos:

- Realizar ensaios SPT com instrumentação localizada no topo do amostrador, e com os sinais de força e aceleração determinar a eficiência do sistema de acordo com a definição proposta por Aoki e Cintra (2000), incluindo a correção sugerida por Odebrecht (2003).

- Quantificar experimentalmente as parcelas de atrito lateral interno por meio de um sistema de extração de amostras.
- Determinar as tensões de atrito externo, tensão na ponta e demais tensões desenvolvidas no amostrador durante sua penetração no solo.
- Avaliar o embuchamento que ocorre no solo no momento da penetração do amostrador do ensaio SPT, considerando às características do solo encontrado.
- Achar o parâmetro a de Aoki, o qual é a razão entre o atrito interno e o atrito externo entre o solo e o amostrador.

2 REVISAO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Standard Penetration Test (SPT)

O SPT (Standard Penetration Test) é um dos ensaios geotécnicos mais utilizados no Brasil e em grande parte do mundo, por um equipamento simples e um fácil manejo, além de apresentar um baixo custo. Esse ensaio também é utilizado para determinar o índice de resistência N_{SPT} , normatizado no Brasil pela norma NBR 6484 (2001), que é uma medida de resistência à penetração dinâmica. O índice de resistência N_{SPT} é o número de golpes de um martelo necessários para a cravação de 0,30 m do amostrador SPT no solo, após uma penetração de 0,15 m. Os golpes são alcançados, elevando o martelo de 65 kg a uma altura de 0,75 m e deixando-o cair em queda livre para transmitir essa energia ao conjunto de hastes. A seguir são descritos os equipamentos e os procedimentos para a realização de ensaios SPT, de acordo com a norma NBR 6484 (ABNT, 2001).

2.1.1 Equipamentos do ensaio SPT

Segundo a norma NBR 6484 (ABNT, 2001), os equipamentos do ensaio SPT são constituídos dos seguintes componentes:

- Torre ou tripé, formado por quatro tubos de aço, os quais são utilizados para o manejo dos tubos de revestimento, da composição de hastes de cravação e perfuração, e para o acionamento do martelo.
- Composição de perfuração e de cravação, formada por um conjunto de hastes tubulares com 1 ou 2 m de comprimento, 25 mm de diâmetro nominal externo e peso teórico de 32 N/m. As hastes são interligadas mediante luvas com roscas.
- Tubos de revestimento são tubos de aço ($D_{\text{externo}} = 33,4 \pm 2,5$ mm, $D_{\text{interno}} = 24,3 \pm 2,5$ mm e massa linear de 3,23 kg/m) com comprimentos de 1 a 2 m, sendo acoplados entre si por meio de luvas com roscas.
- Trado helicoidal, que é utilizado para a abertura dos furos da sondagem. Deve apresentar uma diferença entre de 5 mm a 7 mm em relação ao diâmetro do tubo de revestimento para permitir sua operação dentro deste.
- Trado-concha que é utilizado para a escavação do primeiro metro e deve ter um diâmetro de (100 ± 10) mm.

- Trépano ou peça de lavagem que é uma peça de aço biselada e dotada de duas saídas laterais para água e com diâmetro nominal de 25 mm o qual deve ser 3 a 5 mm menor que o diâmetro do revestimento.
- Sistema de circulação da água é constituído por uma bomba hidráulica, uma caixa para decantação de detritos e mangueiras de engate rápido.
- O amostrador padrão (não usado neste projeto de pesquisa), que é do tipo Raymond, com diâmetro externo de $50,8 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ e diâmetro interno de $34,9 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$, é composto pelas seguintes partes:
 - Cabeça que deve possuir dois orifícios laterais, para saída de água e ar, e uma válvula interna constituída por uma esfera de aço inoxidável. A finalidade dos orifícios e da válvula é aliviar a pressão interna no amostrador durante a entrada de solo no seu interior durante a cravação e durante a sua retirada do solo.
 - Corpo é constituído por um tubo bipartido longitudinalmente, que deve ser perfeitamente retilíneo, com as seguintes dimensões nominais: comprimento de 609,6 m, e diâmetro interno e externo de 35 mm e 51 mm, respectivamente.
 - Sapata ou bico, devendo ser de aço temperado, isento de trincas, amassamentos, denteações, rebordos ou qualquer outro tipo de deformação que afete a seção nominal do mesmo.
 - Cabeça de bater é a peça que recebe o impacto do martelo, sendo constituída de um tarugo de aço temperado, com diâmetro de $83 \pm 5 \text{ mm}$, altura de $90 \pm 5 \text{ mm}$ e massa nominal entre 3,5 kg e 4,5 kg.
 - Martelo padronizado é constituído de uma massa cilíndrica ou prismática de aço de 65 kg. Na sua face inferior deve existir um coxim de madeira dura, cuja finalidade é proteger o martelo e para proporcionar um melhor contato entre as seções no instante do impacto. Os martelos maciços devem possuir uma haste-guia com 1,2 m de comprimento, com uma marca a uma distância de 0,75 m abaixo da face inferior do martelo.

Na Figura 2.1 estão mostrados os componentes do equipamento do SPT.

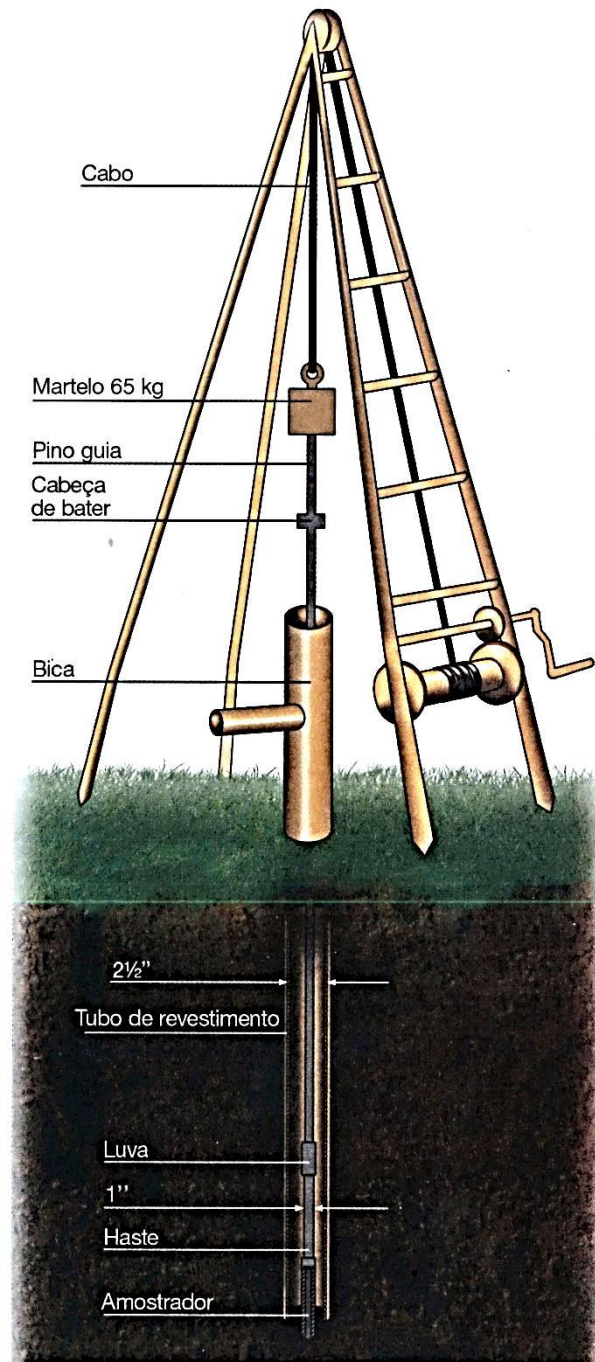


Figura 2.1 Equipamento do SPT (Schnaid e Odebrecht, 2012).

2.1.2 Procedimentos de execução do ensaio SPT

O ensaio SPT é iniciado com a instalação do tripé de tal forma que o furo seja executado na posição previamente fornecida pelo contratante. Na parte superior do tripé é montado um conjunto de roldanas por onde é passada a corda que serve para levantar o martelo e auxiliar no manejo das hastes. A seguir, procede-se com a abertura inicial do furo com o trado concha até

uma profundidade de 1 m e instalando-se até essa profundidade o primeiro segmento do tubo de revestimento com sapata cortante. Na continuação da perfuração, o trado helicoidal até se atingir o nível freático ou quando o avanço da perfuração com o trado helicoidal for inferior a 50 mm após 10 min de operação. A partir de então, utiliza-se o método de perfuração por circulação de água ou método de lavagem. Mas na prática, a abertura do primeiro metro do furo também se faz com trado helicoidal (Belincanta et al., 2010).

A amostragem de solo, a cada metro de profundidade, é realizada cravando-se o amostrador padrão no terreno, através da aplicação de golpes de um martelo de 65 kg que é deixado cair de uma altura de 0,75 m (segundo ASTM International (2008) a altura de queda é de $0,76 \pm 0,03$ m). São aplicados sucessivos golpes até que o amostrador penetre 0,45 m no solo. O número de golpes necessários para o amostrador penetrar os últimos 0,30 m é definido como o índice de resistência N_{SPT} . Terminado esta etapa, o amostrador é removido e levado à superfície para se retirar a amostra de solo contida no seu interior. Esse processo é repetido para cada metro de profundidade até que seja satisfeito um determinado critério de parada, previamente definido pelo contratante do serviço.

2.2 Energia no ensaio SPT

O ensaio SPT (Standard Penetration Test) é o ensaio de reconhecimento geotécnico mais utilizado no Brasil e em grande parte do mundo, devido à sua simplicidade e facilidade de operação e também por ser mais econômico. Entretanto, esse ensaio tem sofrido críticas devido ao uso de correlações empíricas dos seus resultados na determinação da capacidade de carga de fundações. Críticas também tem sido feitas pelo fato de haver dispersão nos resultados que podem ser obtidos para a mesma camada de solo, em função dos diversos tipos de equipamentos utilizados, desgaste destes, forma de operação, entre outros fatores que podem afetar a eficiência do equipamento.

É por esta razão que se deve conhecer a eficiência (η) de distintos equipamentos, a fim de possibilitar a comparação de seus resultados. A eficiência é determinada estudando-se as quantidades de energia que atingem o amostrador. Originalmente, essa eficiência era definida como a razão entre a quantidade de energia que é transferida à extremidade superior da composição de hastes (E_h), no instante do primeiro impacto do martelo, e a energia potencial teórica do ensaio SPT ($EP_i = m \times g \times h \approx 478,2$ J). Entretanto, a eficiência foi posteriormente redefinida por Aoki e Cintra (2000 a) como a relação entre a energia que realmente chega ao amostrador e a energia potencial nominal do ensaio.

Mas de acordo com Odebrecht (2003), a energia potencial do sistema é maior do que a energia potencial nominal, porque a esta deve ser incluída os acréscimos de energia referentes ao martelo e hastes devido à cravação do amostrador no solo.

2.2.1 Mecanismo de transferência de energia

No início do ensaio SPT, o martelo de 65 kg ao ser levantado a uma altura de 0,75 m (NBR 6484 (ABNT, 2001), lhe é fornecida uma energia potencial teórica. Essa energia é gradativamente transformada em energia cinética a partir do instante em que ele é liberado em queda livre. A energia potencial não se transforma integralmente em energia cinética, devido a perdas por atrito entre a corda e a roldana, eixo da roldana e outras perdas.

No momento que o martelo bate na cabeça de bater, parte da energia cinética do martelo é transferida ao conjunto de hastes na forma de energia cinética e energia elástica surgindo duas ondas que se propagam em sentidos opostos: uma onda ascendente no martelo, e outra onda longitudinal de compressão descendente nas hastes. Nem toda energia é transferida às hastes, devido às perdas que ocorrem durante o impacto ocasionado pelo mau contato das superfícies e desalinhamento (Odebrecht, 2003).

A onda de energia descendente de compressão atinge o mostrador no instante l/c , sendo l o comprimento da haste e (c) a velocidade de onda. Essa energia se divide em duas partes. Uma delas, a que causa a penetração do amostrador no solo, é transformada em trabalho de forças não conservativas. A outra parte da energia é refletida na forma de impulsos de tração em sentido ascendente, alcançando o topo da composição das hastes no instante $2l/c$ (Lukiantchuki, 2012). Nesse instante, o martelo e a cabeça de bater se separam momentaneamente, interrompendo a transferência de energia. O martelo e a cabeça de bater voltam a entrar em contato quando a força correspondente aos impulsos de tração se tornam menores que o peso do martelo, ocorrendo um novo impacto e conseqüentemente, transferindo energia remanescente no martelo, gerando uma nova onda de compressão descendente nas hastes e outra de tração no martelo (Figura 2.2) (Schmertman e Palacios, 1979).

No instante $t=L/c$, onde L é o comprimento do martelo, a onda de tensão ascendente gerada no instante do impacto do martelo com a haste é refletida na parte superior do martelo, atingido novamente o ponto de contato do martelo com a haste (base do martelo) no instante $t=2L/c$, ocorrendo um novo impacto. (Odebrecht, 2003).

Este processo termina quando toda a energia é consumida pelo trabalho de cravação do amostrador no solo, ou até a sua dissipação em perdas.

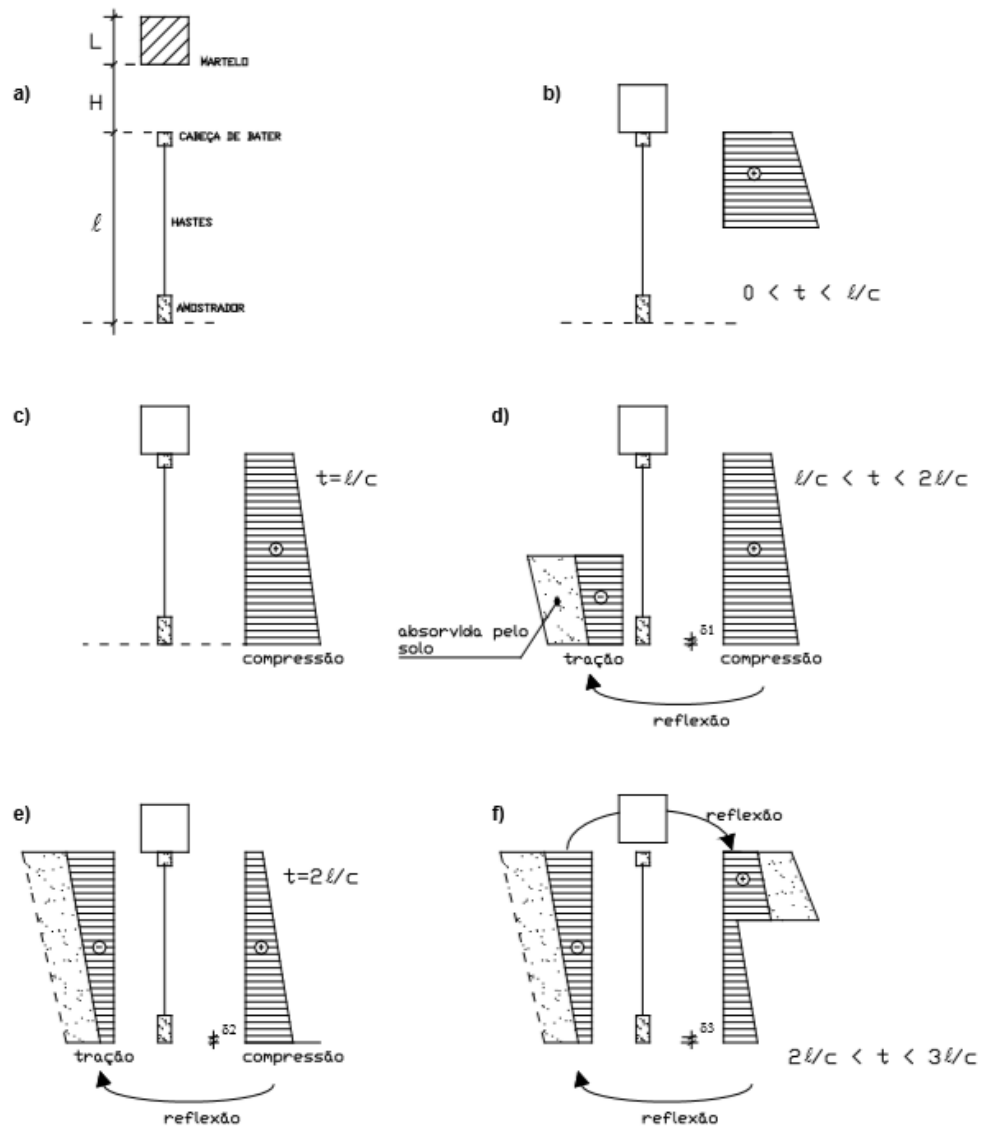


Figura 2.2 Esquema simplificado de propagação de ondas de tensão no SPT (Palácios, 1979 apud Belincanta e Ferraz, 2000).

Para uma melhor compreensão é importante notar que um golpe é composto de vários impactos, e no transcurso de um impacto acontecem vários impulsos. Também se deve notar que a duração de cada pulso depende do comprimento do martelo ($t=2L/c$) e a duração do impacto depende do comprimento das hastes ($t=2\ell/c$) (Odebrecht, 2003). O tempo decorrido entre dois impactos consecutivos é função do tipo do solo e o número de impactos em um mesmo golpe depende do comprimento da haste.

2.3 Aplicação do princípio de Hamilton no ensaio SPT

A variação das energias, segundo o princípio de Hamilton (Aoki e Cintra, 2000) é dado pela seguinte expressão:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(T - V)dt + \int \delta(W_{nc})dt = 0 \quad 2.1$$

onde:

δ = Variação no intervalo de tempo ($t_2 - t_1$).

T = Energia cinética total no sistema.

V = Energia potencial no sistema.

W_{nc} = Trabalho realizado por forças não conservativas (incluindo amortecimento).

A Equação 2.1 concorda com a lei da conservação da energia, ou seja, a energia não pode ser criada ou dissipada, somente transformada.

Para melhor compreender a aplicação do princípio de Hamilton ao evento do golpe do martelo, a Figura 2.3 mostra a evolução da energia potencial, energia cinética e trabalho de forças não conservativas e a transferência da energia pelas hastes no ensaio SPT. A Tabela 2.1 descreve os eventos que ocorrem durante um golpe de martelo e os respectivos instantes.

De acordo com a Figura 2.3, podem ser escritas as seguintes equações:

$$V_e = V_{es} + V_{eh} \quad 2.2$$

$$EP_i = V_e + W_{nc} \quad 2.3$$

$$T_A = V = V_{es} + W_p \quad 2.4$$

onde,

W_{nc} = trabalho total efetuado por forças não conservativas.

W_p = parcela do trabalho final, gerado pelas forças resistentes não conservativas, para a penetração do amostrador no solo.

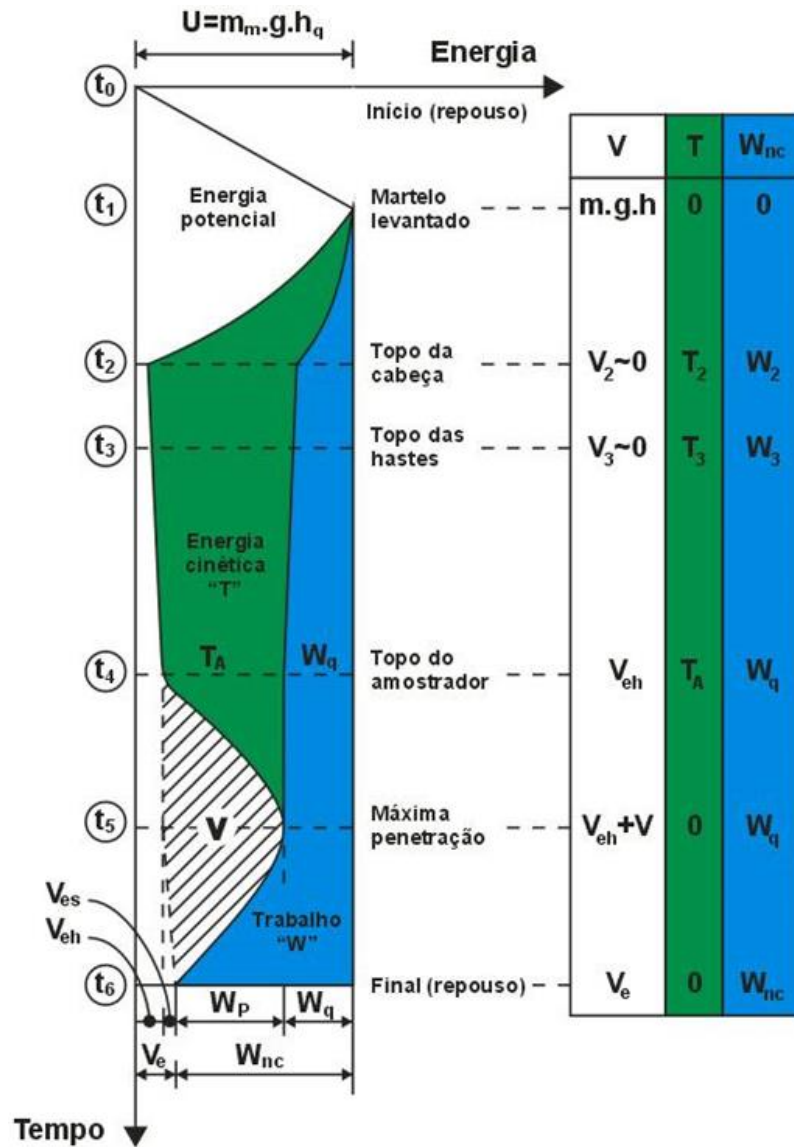


Figura 2.3 Evolução da energia potencial, energia cinética e trabalho de forças não conservativas durante o golpe do martelo (Neves, 2004, modificado de AOKI e CINTRA, 2000).

Tabela 2.1 Instantes e eventos na evolução da energia potencial, energia cinética e trabalho durante o evento do golpe do martelo.

Instante	Evento
t_0	Início do levantamento do martelo que passa a ganhar energia potencial
t_1	O martelo está posicionado 0,75 m acima da cabeça de bater, com uma energia potencial igual a 478,3 J. Essa energia é denominada <i>energia potencial nominal</i> (E_{pi}).

Instante	Evento
t_2	Após o martelo ter sido liberado, neste instante ele atinge a cabeça de bater. A energia potencial nominal (E_{pi}) é transformada em energia cinética (T_2), energia de deformação elástica (V_2) e certa quantidade de energia (W_2) que é dissipada na forma de atrito na corda e nas roldanas do equipamento. Essa energia correspondente então ao trabalho realizado por forças não conservativas. A quantidade de energia de deformação elástica é muito pequena e pode ser desprezada.
$t_2 \rightarrow t_3$	Nesse intervalo de tempo, a onda de tensão percorre a cabeça de bater. As variações das energias cinética e potencial, assim como do trabalho realizado pelas forças não conservativas são muito pequenas, podendo ser desprezadas.
$t_3 \rightarrow t_4$	Nesse intervalo de tempo, a onda de tensão percorre as hastes, chegando ao amostrador no instante t_4 . A energia cinética T_3 é reduzida para T_A e a energia correspondente ao trabalho das forças não conservativas aumenta de ligeiramente de W_3 para W_q , devido principalmente à acomodação das luvas de acoplamento entre as hastes. Essa variação de energia pode ser considerada desprezível. Devido à deformação elástica das hastes, a energia de deformação que era muito pequena passa a ser V_{eh} . A energia cinética T_A é a quantidade de energia que efetivamente chega ao topo do amostrador. Por isso que essa energia deve ser usada no cálculo da eficiência do ensaio SPT (Aoki e Cintra, 2000). Deve-se notar também que quanto maior o comprimento do conjunto de hastes, menor será o valor de T_A .
$t_4 \rightarrow t_5$	A partir do instante t_4 tem início à penetração do amostrador e a transformação da energia cinética T_A em energia potencial de deformação V .
$t_5 \rightarrow t_6$	Uma parte da energia potencial de deformação V é transformada em energia de deformação elástica V_e , sendo uma parcela devido à deformação elástica das hastes (V_{eh}) e a outra parcela devido à deformação elástica do solo e do amostrador (V_{es}). A outra parte da energia potencial de deformação V é transformada em trabalho W_p realizado pelas forças resistentes não conservativas que surgem durante a penetração do amostrador no solo.

Instante	Evento
t_6	Nesse instante, que representa o final do evento, toda a energia potencial de deformação elástica (V_e), que é constituída de uma parcela referente às hastes (V_{eh}) e uma parcela referente ao amostrador (V_{es}), é restituída ao sistema que entra em repouso. No final do evento, o trabalho total realizado por forças não conservativas é representado por W_{nc} , sendo que a parcela desse trabalho correspondente às forças resistentes à penetração do amostrador é representada por W_p .

De acordo com o Princípio de Hamilton aplicado ao ensaio SPT, a energia potencial inicial, é transformada em energia potencial elástica e em trabalho realizado por forças não conservativas (Equação 2.3). Aoki e Cintra (2000a) sugeriram que a eficiência (η_s) do ensaio SPT seja dada pela razão entre o trabalho gerado pelas forças não conservativas para a cravação do amostrador no solo e a energia potencial inicial (Equação 2.5).

$$\eta_s = \frac{W_p}{EP_i} \quad 2.5$$

Deve-se observar que nas transformações de energia mostradas na Figura 2.3, não consideram o acréscimo de energia potencial devido à penetração do amostrador no solo e nem os impactos subsequentes. Assim a interpretação correta das transformações de energia durante o ensaio SPT deve levar em conta esta parcela de energia, como será visto mais adiante.

2.4 Teoria da onda unidimensional

Para se entender como a onda percorre as hastes, após o impacto do martelo na cabeça de bater, é importante lembrar que, naquele momento, é gerada uma onda longitudinal de compressão descendente com uma força de compressão uniforme F , que se propaga ao longo da haste através do tempo com uma velocidade c . Sejam assumidas as seguintes hipóteses (Belincanta, 1985):

- a. A seção transversal das hastes é plana e deve permanecer plana no momento do passo da onda longitudinal de tensão.
- b. A tensão se distribui uniformemente sobre toda a seção transversal.

- c. O diâmetro da seção transversal da haste é muito pequeno comparado com o comprimento da onda longitudinal da tensão.
- d. A movimentação transversal das partículas é desprezível.
- e. As perdas de energia na propagação da onda longitudinal de tensão nas hastes são desprezíveis.
- f. A onda longitudinal de tensão se propaga nas hastes com uma velocidade c constante que depende, unicamente, das características do material constituinte das hastes.
- g. O material das hastes é elástico linear.

Pode-se então determinar a velocidade de propagação da onda (c) nas hastes, conforme mostrado a seguir. Em um intervalo de tempo dt , a força de compressão F é transmitida ao longo de uma distância dx , conforme mostrado na Figura 2.4. De acordo com essa figura, tem-se:

$$dx = c \times dt$$

2.6

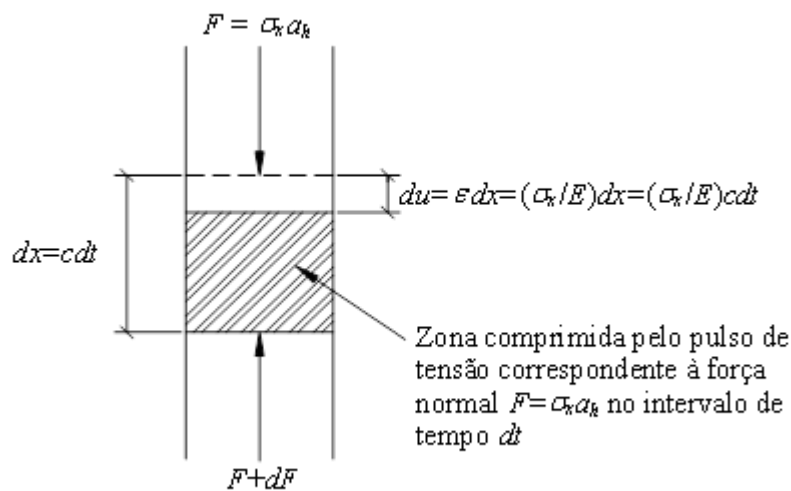


Figura 2.4 Esquema de propagação de uma onda longitudinal de compressão uniforme nas hastes (modificado de Belincanta, 2000).

O segmento da haste com comprimento dx , que está sendo comprimido, terá um encurtamento elástico (du) que é o deslocamento no topo do segmento de haste, podendo ser determinada pela lei de Hooke (Equações 2.7, 2.8 e 2.9).

$$\sigma_x = E \times \epsilon$$

2.7

onde:

σ_x = Tensão de compressão, assumida positiva.

E = Módulo de elasticidade do material da haste.

ε = Deformação.

$$\varepsilon = \frac{du}{dx} \quad 2.8$$

Combinando as Equações 2.7 e 2.8 e isolando du , se obtém:

$$du = \frac{\sigma_x}{E} \times dx \quad 2.9$$

Também substituindo a Equação 2.6 na Equação 2.9, obtém-se:

$$du = \frac{\sigma_x}{E} \times c \times dt \quad 2.10$$

Como a relação du/dt é a velocidade das partículas (v), então se pode escrever:

$$v = \frac{\sigma_x}{E} \times c \quad 2.11$$

Como todos os pontos que se encontram dentro da zona comprimida tem a mesma velocidade v , então os pontos que se encontram na zona próxima da seção comprimida vão se acelerar passando de uma velocidade zero a uma velocidade final v .

De acordo com a Equação 2.11, a velocidade das partículas (v) vai ter o mesmo sentido da velocidade da onda longitudinal (c), quando esta for de compressão. Entretanto, quando a onda longitudinal é de tração, essas velocidades têm sentidos contrários.

De acordo com a Figura 2.4, as partículas do elemento de massa m e comprimento dx são estimuladas por uma força F num intervalo de tempo dt . Assim, as partículas passam de uma velocidade zero para uma velocidade final v . Logo, de acordo com a Segunda Lei de Newton pode-se escrever:

$$F \times dt = m \times v \quad 2.12$$

onde:

$$F = a_h \times \sigma_x \quad 2.13$$

$$m = \rho \times a_h \times dx \quad 2.14$$

$$dx = c \times dt \quad 2.15$$

a_h = área de seção transversal.

m = massa do elemento.

ρ = massa específica do material da haste.

g = aceleração da gravidade.

Substituindo as equações 2.13, 2.14 e 2.15 na Equação 2.12, obtém-se:

$$a_h \times \sigma_x \times dt = \rho \times a_h \times v \times c \times dt \quad 2.16$$

Substituindo a Equação 2.11 nesta equação pode-se obter a velocidade de onda como se mostra na Equação 2.18:

$$\sigma_x = c \times \rho \times v = c \times \rho \times \frac{\sigma_x}{E} \times c \quad 2.17$$

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad 2.18$$

Da Equação 2.18 pode-se concluir que c depende somente das propriedades do meio, quer dizer, do módulo de elasticidade (E) e da densidade das hastes (ρ), enquanto a velocidade das partículas v depende tanto das características do meio como do nível de tensão.

Combinando as Equações 2.12, 2.14 e 2.18, obtém-se a seguinte equação:

$$F = \frac{E \times a_h}{c} \times v = Z \times v \quad 2.19$$

onde Z é uma constante de proporcionalidade entre a força e a velocidade das partículas, denominada *impedância*.

2.5 Condições de contorno

O comportamento da onda de tensão que se propaga ao longo das hastes do equipamento do SPT, depende de condições do contorno, tais como: resistência do solo, atrito entre o solo e o amostrador, alteração de seção e terminação das hastes (Belincanta; 1985). Como foi mencionado anteriormente, a seção transversal das hastes é suposta plana e devendo permanecer plana. Outras condições de contorno podem ser avaliadas por meio do equilíbrio de forças e verificação das velocidades das ondas ascendente e descendente.

2.5.1 Extremidade da haste

No momento que a onda longitudinal de tensão atinge o amostrador (l/c), se produz um deslocamento, e conseqüentemente uma reação dinâmica experimental do solo (R_D). Essa onda

de tensão é dividida em duas parcelas, uma delas é refletida e a outra é transformada em trabalho para a cravação do amostrador no solo. As características destas duas parcelas dependem das condições em que o solo se encontra. As condições limites são (Odebrecht, 2003; Belincanta, 1985 e Bernardes, 1989):

- Resistência dinâmica experimental do solo nula ($R_D = 0$), permitindo a penetração livre do amostrador.
- Resistência dinâmica do solo consideravelmente grande, impedindo a penetração do amostrador.

Mediante as equações 2.20 e 2.21 (equações de equilíbrio e compatibilidade), se obtém a resistência dinâmica experimental do solo (R_D) e a velocidade total (v_p) na base do amostrador.

$$R_D = F \downarrow + F \uparrow \quad (\text{Equilíbrio}) \quad 2.20$$

$$v_p = v \downarrow + v \uparrow \quad (\text{Compatibilidade}) \quad 2.21$$

onde $F \downarrow$ e $v \downarrow$ são a força e a velocidade correspondentes à onda incidente e $F \uparrow$ e $v \uparrow$ são a força e a velocidade correspondentes à onda refletida.

Para as condições de equilíbrio e compatibilidade, é importante adotar uma convenção de sinais para a velocidade das partículas e para as forças nas ondas longitudinais de tensão (ver Tabela 2.2).

Tabela 2.2 Convenção de sinais e sentido adotada para velocidades e forças.

Onda	Força
Descendente	$F \downarrow = vZ > 0$ (compressão)
Ascendente	$F \uparrow = -vZ < 0$ (tração)

2.5.1.1 Extremidade da haste livre

Esta condição acontece quando se faz a suposição que não haja reação dinâmica experimental do solo ($R_D = 0$), ou seja, o amostrador penetra livremente no solo. Nesse caso, a onda longitudinal de tensão que chega ao amostrador é refletida com igual intensidade, mas com sentido inverso. Assim, quando a onda longitudinal incidente for de compressão, a onda refletida será de tração. (Equação 2.22 e Figura 2.5).

$$R_D = 0 \therefore F \uparrow = -F \downarrow \quad 2.22$$

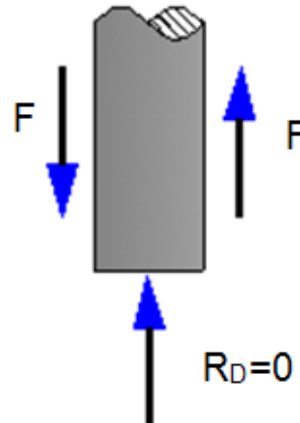


Figura 2.5 Extremidade da haste livre (adaptado de Belincanta, 1985).

A velocidade das partículas do amostrador pode ser calculada somando as velocidades provenientes da onda que chega e da onda refletida, tendo-se em conta o sentido de cada velocidade. Desta forma, as partículas no trecho de superposição das ondas longitudinais de tensão descendente e ascendente serão novamente aceleradas durante e após da reflexão, devido a que a velocidade das partículas no amostrador dobra seu valor (equação 2.23 e 2.24) (Belincanta, 1985).

$$v_p = v \downarrow + v \uparrow = \frac{F \downarrow}{Z} - \frac{F \uparrow}{Z} \quad 2.23$$

ou

$$v_p = \frac{F \downarrow}{Z} + \frac{F \downarrow}{Z} = \frac{2F \downarrow}{Z} = 2v \downarrow \quad 2.24$$

2.5.1.2 Extremidade da haste engastada

Nesta condição se faz a suposição que a resistência dinâmica do solo é suficientemente grande para impedir a penetração do amostrador, de modo que a velocidade das partículas seja nula. (Equação 2.25).

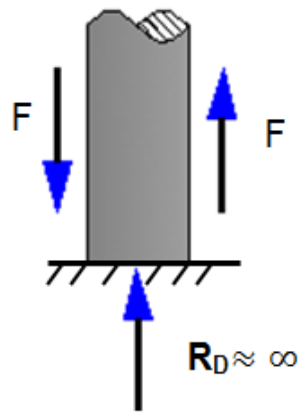


Figura 2.6 Extremidade da haste engastada (adaptado de Belincanta, 1985).

$$v_p = 0 \therefore v \uparrow = -v \downarrow \quad 2.25$$

Desta forma, a onda longitudinal de tensão que atinge ao amostrador é refletida com a mesma intensidade e mesmo sinal. Neste caso, tanto a onda descendente como a ascendente são de compressão. Assim, a força total, será duplicada pela superposição das ondas longitudinais.

$$F = F \downarrow + F \uparrow = 2F \downarrow \quad 2.26$$

Portanto, no instante que acontece aquela superposição, se causa um aumento de força e uma diminuição da velocidade das partículas, pois a onda refletida é uma onda de compressão ascendente com velocidade negativa.

2.5.1.3 Extremidade da haste semi-engastada

Para a condição de extremidade semi-engastada, é assumido que a resistência dinâmica do solo é finita e igual à força que atinge ao amostrador (Equação 2.27 e Figura 2.7).

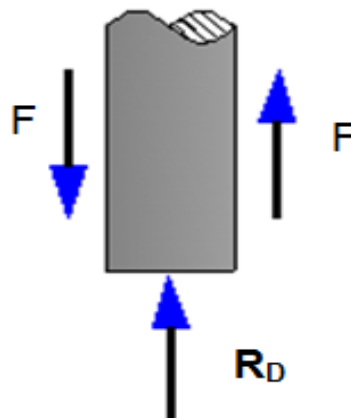


Figura 2.7 Extremidade da haste semi-engastada (adaptado de Belincanta, 1985).

$$R_D = F \downarrow + F \uparrow \therefore F \uparrow = R_D - F \downarrow \quad 2.27$$

Pela Equação 2.27 e supondo que a onda longitudinal descendente é de compressão, pode-se concluir que:

- Se a resistência dinâmica do solo (R_D) for igual à força incidente ($F \downarrow$) não haverá onda longitudinal refletida na extremidade da haste;
- Se a resistência de ponta do solo (R_D) for maior do que a força incidente ($F \downarrow$), então a onda longitudinal refletida será de compressão;
- Se a resistência dinâmica do solo (R_D) for menor do que a força incidente ($F \downarrow$), então a onda longitudinal refletida será de tração.

A velocidade (v_p) e o deslocamento (ρ) na ponta do amostrador podem ser calculados pelas Equações 2.28 e 2.29.

$$v_p = v \downarrow + v \uparrow \therefore v_p = \frac{F \downarrow}{Z} + \left(-\frac{F \uparrow}{Z} \right) = \frac{F \downarrow}{Z} - \frac{(R_D - F \downarrow)}{Z} = \frac{(2F \downarrow - R_D)}{Z} \quad 2.28$$

$$\rho = \int_{t_1}^{t_2} v_p dt \therefore \rho = \frac{1}{Z} \int_{t_1}^{t_2} (2F \downarrow - R_D) dt \quad 2.29$$

De acordo com a Equação 2.29 pode-se dizer que haverá deslocamento (ρ) quando $2F \downarrow$ for maior que R_D , isto é, quando a velocidade tiver valores positivos.

2.6 Determinação da quantidade de energia

Para determinar a quantidade de energia que atinge ao amostrador, recomenda-se o método EFV, introduzido por Sy e Campanella em 1991. Esse método consiste em calcular a quantidade total de energia presente em um golpe do martelo no ensaio SPT. Para isto, é necessário medir a aceleração e a força no topo do amostrador. Isso é feito com o auxílio de um segmento de haste instrumentado com dois acelerômetros e uma célula de carga. Integrando-se os sinais de aceleração se consegue a velocidade da partícula (v) em função do tempo (t). A energia que atinge o amostrador pode ser obtida pela integração do produto da força pela velocidade ao longo do tempo (Sy e Campanella, 1991):

$$E_{base} = \int_0^t F \times v dt \quad 2.30$$

onde:

E_{base} : energia no amostrador (ou TA usada por Aoki e Cintra 2000a) (J)

F = força normal (N).

v = velocidade da partícula (m/s).

t = tempo (s).

2.7 Eficiência

Originalmente, a eficiência (η), era considerada como a relação entre a energia que chega ao amostrador (ver Equação 2.30) e a energia potencial teórica (EP_i):

$$\eta = \frac{E_{base}}{EP_i} \quad 2.31$$

Entretanto, a energia total disponibilizada ao sistema é maior que a energia potencial teórica, pois ocorre um movimento descendente do sistema amostrador-haste-cabeça de batermartelo com a cravação ou penetração do amostrador no solo. Assim, a eficiência (η) deve ser calculada como a relação entre a energia que chega ao amostrador e a energia potencial do sistema (Equação 2.32). Segundo Odebrecht (2003), considerando um referencial fixo e externo ao sistema, a energia potencial ao sistema ($EP_{sistema}$) é representada por:

$$EP_{sistema} = EP_i + (\Delta\rho \times M_m \times g) + (\Delta\rho \times M_h \times g) \quad 2.32$$

onde

$$EP_i = (H \times M_m \times g) \quad 2.33$$

H = altura de queda (m).

$\Delta\rho$ = penetração do amostrador (m).

M_m = massa do martelo (kg).

M_h = massa das hastes (kg).

g = aceleração da gravidade (m/s^2).

Então a eficiência seria dada pela seguinte expressão:

$$\eta = \frac{E_{base}}{EP_{sistema}} \quad 2.34$$

Quando se tem solos resistentes, com $N_{SPT} \geq 15$, e comprimentos de hastes superiores a 20 metros, o valor da energia potencial gravitacional do martelo e das hastes é muito similar ao valor da energia potencial gravitacional teórica. Nestes casos, se considera aceitável dizer que esses dois valores são iguais (Odebrecht, 2003).

Outra forma de conhecer a quantidade de energia que chega ao amostrador é por meio de três coeficientes distintos η_1 (eficiência do martelo), η_2 (eficiência da composição de hastes) e η_3 (eficiência do sistema) (Odebrecht et al., 2004). Esses coeficientes quantificam as perdas de energia que ocorrem no processo de cravação do amostrador no solo. Eles dependem do tipo de equipamento utilizado (tipo do martelo, o comprimento das hastes, a geometria do amostrador, a forma de operação do equipamento, ou seja, mecânico ou automático, etc.) e do mal ajuste das peças e as reflexões nas luvas. Assim, a energia que realmente atinge o amostrador é dada por:

$$E_{amostrador} = \eta_3 [\eta_1 (EP_i + (\Delta\rho \times M_m \times g)) + \eta_2 (\Delta\rho \times M_h \times g)] \quad 2.35$$

A Equação 2.35 exige uma calibração prévia dos coeficientes de eficiência, que, como uma estimativa preliminar para configurações do equipamento SPT brasileiro pode ser

assumida como $\eta_1=0,76$ ou pode ser calculada mediante a equação: $\eta_1 = \frac{\left(\int_0^\infty F(t) \times v(t) dt \right)}{(0.75 + \Delta\rho) \times M_m \times g}$

$\eta_2=1$ e $\eta_3=1-0,0042 L_h$, onde L_h é o comprimento total da composição de hastes (Odebrecht et al., 2005).

Segundo Aoki e Cintra (2000a) a eficiência do sistema é como se mostra na Equação 2.36.

$$\eta = \frac{T_A}{EP_i} = \frac{E_{amostrador}}{478,2} \quad 2.36$$

onde T_A e EP_i são a energia que atinge ao amostrador e a energia potencial ou energia nominal ($\approx 478,2$ J), respectivamente.

A eficiência do ensaio SPT também pode ser determinada através da execução de prova de carga estática sobre o amostrador. Na Equação 2.5, W_p é o trabalho realizado pelas forças resistentes não conservativas geradas durante a penetração do amostrador no solo. Entretanto, este trabalho é igual à área abaixo da curva carga deslocamento de uma prova de carga estática sobre o amostrador (Figura 2.8).

$$\eta_s = \frac{W_p}{EP_i}$$

2.5 bis

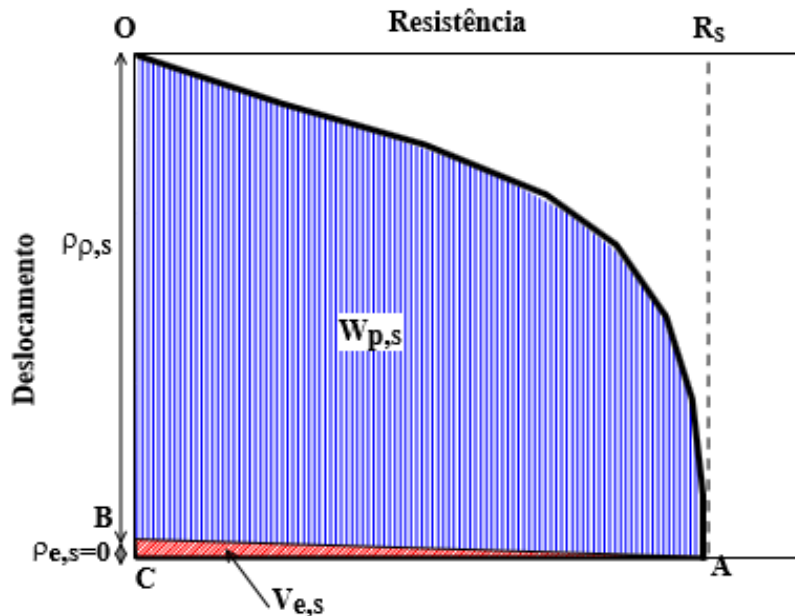


Figura 2.8 Ensaio de uma prova de carga estática sobre amostrador padrão (Noreña, 2011).

Nessa figura, a área $W_{p,s}$ é igual ao trabalho W_p (trabalho realizado por forças não conservativas), e a área V_{es} é igual à energia potencial elástica, devido à deformação elástica do solo e do amostrador, a qual é totalmente recuperada pelo sistema.

2.8 Resistência à penetração e interação solo- amostrador

Com o índice de resistência (N_{SPT}), podem ser estimadas características de engenharia, com base em correlações empíricas. Igualmente, o N_{SPT} é usado para o projeto de fundações, para conceber propriedades como a capacidade da fundação ou a tensão admissível do solo (ASTM International, 2010).

Entretanto, o índice N_{SPT} não representa a resistência à penetração real do solo. Essa resistência, representada pelas forças dinâmicas teóricas (F_d) ou estáticas teóricas (R_s) de penetração do amostrador no solo podem ser obtidas a partir da quantidade de energia que chega a ele. Com essas forças podem ser estimadas algumas propriedades dos solos.

A interpretação das propriedades do solo tanto em areias como em argilas, dependem da obtenção da força dinâmica teórica (F_d), a partir da qual os parâmetros do solo podem ser avaliados (Schnaid et al., 2009).

2.8.1 Força dinâmica experimental (R_D) mobilizada durante a cravação do amostrador SPT e força dinâmica teórica (F_d)

Conhecendo-se a quantidade de energia que atinge o amostrador, pode-se determinar o trabalho despendido para cravá-lo o amostrador no solo. Como esse trabalho é igual ao produto da força pelo deslocamento, pode-se obter a força de reação dinâmica teórica do solo à cravação do amostrador, através das seguintes equações.

$$E_{amostrador} = W_p = F_d \times \Delta\rho \quad 2.37$$

$$F_d = \frac{E_{amostrador}}{\Delta\rho} \quad 2.38$$

onde

$E_{amostrador}$ = energia que atinge ao amostrador.

W_p = trabalho realizado pelas forças não conservativas atuantes no sistema amostrador-solo.

F_d = Resistencia dinâmica teórica de reação do solo.

$\Delta\rho$ = penetração do amostrador no solo.

Schnaid et al. (2009), combinaram as equações 2.35 e 2.38, resultando:

$$F_d = \frac{\eta_3 [\eta_1 (EPI + (\Delta\rho \times M_m \times g)) + \eta_2 (\Delta\rho \times M_h \times g)]}{\Delta\rho} \quad 2.39$$

Nesta equação (Equação 2.39) se recomenda utilizar os valores de $\eta_1=0,761$, $\eta_2=1$ e $\eta_3=0,907-0,00661$ os quais, segundo Lobo, (2005) foram estimados por Odebrecht (2003) através de retro análise dos dados de Cavalcante (2002).

A força dinâmica de reação experimental do solo (R_D) para certa profundidade é definida como a média dos valores das reações dinâmicas do solo (R_{di}) para cada golpe. (Lukiantchuki et al., 2012).

$$R_D = \frac{\sum R_{di}}{N} \quad 2.40$$

onde N é o número de golpes para os últimos 0,3 m da penetração do amostrador no solo.

2.8.2 Interação solo- amostrador: modelo desenvolvido por Lobo (2009)

A força dinâmica teórica do solo (F_d) é resultante de três componentes (Lobo, 2009):

$$F_d = F_{d,a} + F_{d,c} + F_{d,s} \quad 2.41$$

onde $F_{d,a}$, $F_{d,c}$ e $F_{d,s}$ representam as resultantes da resistência de ponta, de atrito lateral interno e atrito lateral externo, respectivamente. Essa última resistência depende dos diferentes mecanismos de penetração do amostrador no solo (ponta aberta ou embuchamento) (Figura 2.9a).

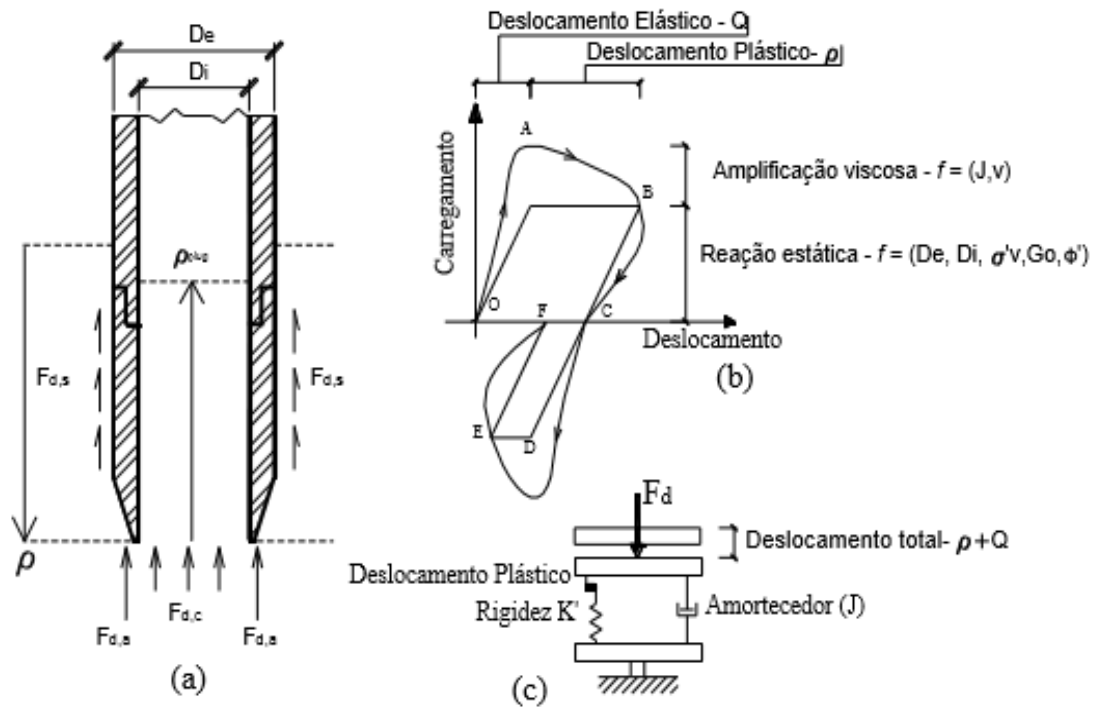


Figura 2.9 O mecanismo de interação solo-amostrador: a) os mecanismos de reação do solo; b) relação carga-deslocamento; c) modelo reológico idealizado. (LOBO, 2009).

Na Figura 2.9c, pode-se observar a representação adotada por Smith (1960) para o comportamento elasto-visco-plástico do solo no momento da cravação de um elemento no mesmo. Esse modelo é idealizado como um bloco de atrito, representando o comportamento plástico do solo, um elemento de mola K' representando a rigidez solo-amostrador e um amortecedor J , representando a resistência viscosa mobilizada (R_v).

Durante a cravação, a reação do solo (R_D) pode ser considerada como a soma de duas parcelas: uma resistência estática (R_s) e uma resistência viscosa (R_v).

$$F_d = R_s + R_v \quad 2.42$$

A parcela estática define o comportamento elasto-plástico do solo até que seja atingida a ruptura. A parcela elástica do deslocamento máximo é denominada quake (Q), a qual depende da rigidez do solo (K'). A parcela plástica do deslocamento, que é denominada nega (S), ocorre

após a ruptura e sem um aumento de carga. A resistência viscosa (R_v) representa uma resistência adicional decorrente do amortecimento do solo (J).

$$R_s = K' \times Q \quad 2.43$$

$$R_v = R_s \times J \times v_p \quad 2.44$$

sendo v_p a velocidade de penetração do amostrador no solo. Substituindo as Equações 2.43 e 2.44 na Equação 2.42, resulta:

$$F_d = K' \times Q \times (1 + J \times v_p) \quad u > Q \quad 2.45$$

$$F_d = K' \times u \times (1 + J \times v_p) \quad u < Q \quad 2.46$$

onde u representa o deslocamento.

O parâmetro (J) é normalmente determinado a partir de ensaios de capacidade de carga de uma estaca e nas cravações de estacas. Para estacas cravadas na areia, Smith (1960) sugeriu que o amortecimento na ponta J_p é igual a 0,50 s/m, e o amortecimento lateral. $J_s = 1/3J_p$. Forehand e Reese (1964) indicaram que amortecimento de ponta estava entre 0,15 a 0,50 s/m os quais são consistentes com as recomendações de Smith (Bernardes, 1989).

No modelo de carregamento e descarregamento de Smith (1960), mostrado na Figura 2.9b, pode-se observar o diagrama OABC que representa o modelo de carregamento e descarregamento dos mecanismos de reação da ponta enquanto que o diagrama OABCDEF representa o mecanismo de reação cisalhante correspondente ao atrito lateral externo (Lobo, 2009).

Lobo (2009) adaptou este modelo de Smith (1960), frequentemente utilizado na cravação de estacas, para uma abordagem adimensional, alterando assim o modelo em dois aspectos:

1. Os parâmetros de entrada do modelo (R_s (Resistência última estática), Q e J) foram estimados a partir de expressões teóricas, dando para cada um deles um caráter físico, e assim se permitir conhecer os fatores que realmente intervêm no processo da penetração de amostrador no solo, minimizando suas incertezas (Lobo, 2009).
2. As parcelas de reação na ponta do amostrador e cisalhante entre o aço do amostrador e o solo, são modeladas e calculadas para cada fase da penetração do amostrador no solo, onde podem acontecer os fenômenos de embuchamento ou não embuchamento, dependendo da compacidade do solo. (Lobo, 2009).

2.9 Estática no ensaio SPT

Para o entendimento da estática do ensaio SPT, Schmertmann (1979) desenvolveu um trabalho onde se compara o ensaio SPT e sua resistência à penetração com o ensaio de CPT. A Figura 2.10 mostra as forças verticais envolvidas no momento da penetração do amostrador no solo.

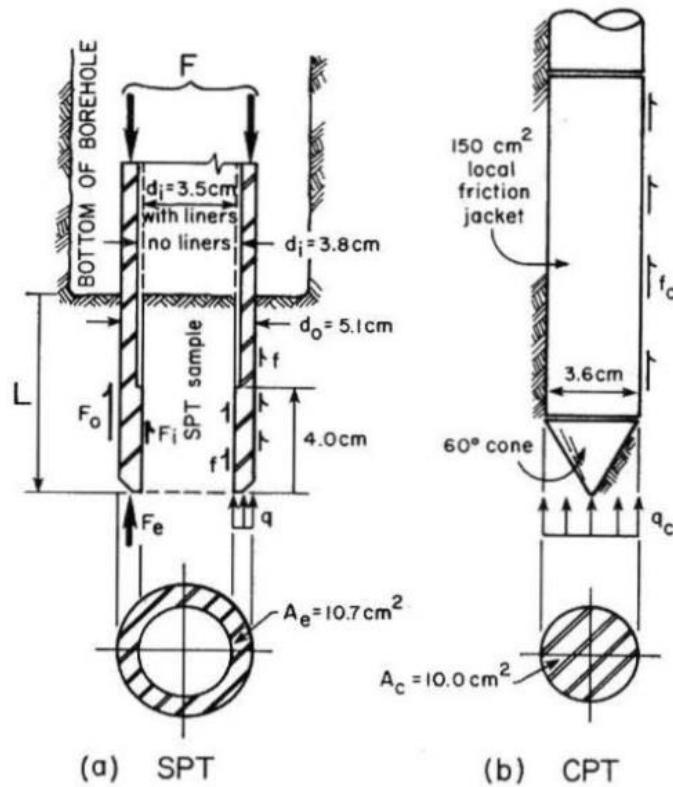


Figura 2.10 Comparação do ensaio SPT e CPT. Componentes da resistência à penetração (Schmertmann, 1979).

A Equação 2.47 representa a condição de equilíbrio na direção vertical.

$$F + W' = F_e + (F_0 + F_i) \quad 2.47$$

Nessa equação, a força externa (F) é somada com o peso submerso (W'), das hastes, da cabeça de bater e do amostrador, as quais são requeridas para a cravação do amostrador no solo. Estas são igualadas às resistências de ponta (F_e), à parcela de atrito externo (F_0) e à parcela de atrito interno (F_i) desenvolvidas pelo solo. É importante notar que no trabalho de Schmertmann (1979) só foi considerada a cravação do amostrador na condição de não embuchamento.

Considerando que f seja atrito ou aderência média para as paredes internas e externas do amostrador (com diâmetro interno d_i e externo d_o) ao longo do comprimento da penetração L , e que a tensão normal atuante no anel com área A_e seja igual a q , a Equação 2.47 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$F + W' = q \times A_e \times (d_i + d_o) \times \pi \times L \times f \quad 2.48$$

Segundo Schmertmann (1979), a tensão normal atuante no anel (q) e o atrito ou aderência média para as paredes internas e externas do amostrador (f) do ensaio SPT, são iguais à resistência de ponta (q_c) e de atrito lateral (f_c) do ensaio CPT, multiplicadas pelas constantes C_1 e C_2 respectivamente.

$$q = C_1 \times q_c \quad 2.49$$

$$f = C_2 \times f_c \quad 2.50$$

Substituindo as Equações 2.49 e 2.50 na Equação 2.48 e considerando a razão de atrito ($R_f = f_c / q_c$) do ensaio CPT, obtém-se:

$$F + W' = [C_1 \times A_e + (d_i + d_o) \times \pi \times L \times C_2 \times R_f] \times q_c \quad 2.51$$

Os valores das constantes C_1 e C_2 para cones mecânicos são da ordem de 1,0 e 0,7, respectivamente, e para cones elétricos são da ordem de 1,0. (Schmertmann, 1979).

2.9.1 Resistência estática mobilizada no sistema amostrador-solo segundo Neves

De acordo com Neves (2004), o equilíbrio de esforços de um corpo (amostrador do SPT ou estaca) submetido a um carregamento estático é muito mais simples do que o equilíbrio entre o solo e um elemento submetido a um esforço dinâmico.

A carga (P) aplicada sobre o elemento, neste caso uma estaca, se divide em duas parcelas, uma atuante sobre a lateral da estaca (fuste) (P_L) e a outra atuante na ponta (P_p) (Equação 2.52 e Figura 2.11).

$$P = P_p + P_L \quad 2.52$$

Analogamente, o solo responde com um esforço de reação ao longo do fuste (R_L) e outro esforço de reação na ponta (R_p). Para que o sistema permaneça em equilíbrio, a somatória destes esforços deve ser igual ao valor da carga P (Equações 2.53 e 2.54).

$$R_p + R_L = P \quad 2.53$$

$$R_p + R_L = P_p + P_L \quad 2.54$$

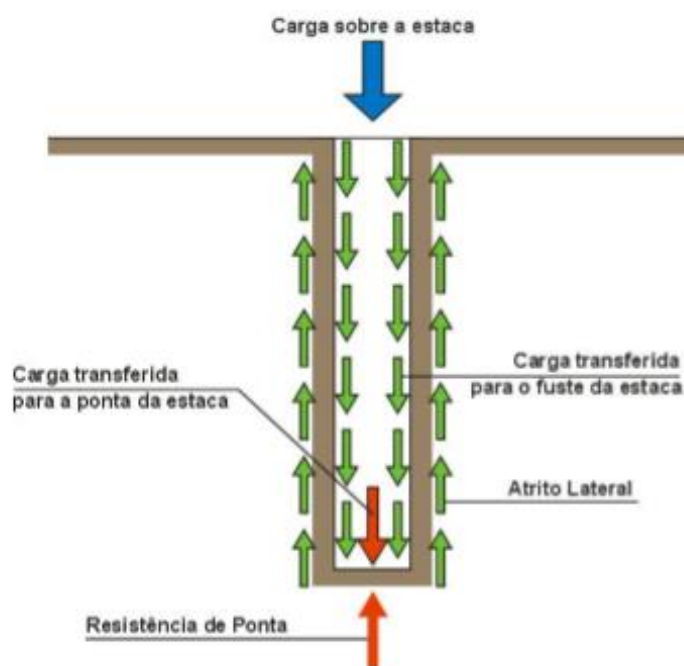


Figura 2.11 Esquema de esforços de uma estaca submetida a carregamento estático (NEVES, 2004).

A literatura mostra que a resistência de ponta (R_p) de uma estaca só é mobilizada após a resistência ao longo do fuste (R_L) atingir seu valor máximo. Se R_s , que é a reação estática do solo, for a única parcela da resistência total (R_t) apresentada pelo solo, no caso de aplicação de esforços estáticos sobre o amostrador, então a Equação 2.53 poderá ser escrita da seguinte forma:

$$R_p + R_L = R_s \quad 2.55$$

e

$$R_t = R_s \quad 2.56$$

Segundo Smith (1960) a reação dinâmica do solo (F_d) (Equação 2.42) é composta por uma parte estática (R_s) e outra dinâmica (R_v). Esta última depende do coeficiente de amortecimento dinâmico (J), da resistência estática e da velocidade das partículas da haste instrumentada (v). Ensaios SPT efetuados por Neves (2004) em areias e areias siltosas mostraram que as velocidades estimadas registradas através dos acelerômetros eram muito pequenas (1,0 a 2,0 m/s em média) resultando valores de (R_v) insignificantes, ou seja:

$$R_v \cong 0 \quad 2.57$$

ou

$$F_d = R_s + R_v = R_t \cong R_s \quad 2.58$$

Assim, a única parcela de reação do solo que envolve o amostrador é a parcela de resistência estática (R_s), independentemente do tipo dos esforços aplicados sobre a cabeça de bater (esforços dinâmicos ou estáticos) (Neves, 2004).

2.9.2 Resistência estática mobilizada no sistema amostrador-solo através da aplicação do Princípio de Hamilton

Conforme mencionado no item 2.9.1, a força de reação do solo (F_d) ou a força resistente total (R_t) é aproximadamente igual à resistência estática (R_s). Sabendo que o trabalho das forças não conservativas (W_p) (ver item 2.3) é igual ao produto da força resistente (R_t) pela penetração permanente do amostrador no solo ($\Delta\rho$), então a força resistente pode ser calculada segundo a Equação 2.59.

$$R_s = R_t = F_d = \frac{W_p}{\Delta\rho} = \frac{V}{\Delta\rho} = \frac{T_A}{\Delta\rho} \quad 2.59$$

onde V e T_A são, respectivamente, a energia potencial de deformação e a energia cinética que atinge ao amostrador (ver item 2.3).

Pelo fato da penetração do amostrador no solo ser diferente para cada golpe, numa determinada profundidade, calcula-se então uma penetração média:

$$\Delta\rho_m = \frac{0,3}{N_{SPT}} (m) \quad 2.60$$

Substituindo a Equação 2.60 na Equação 2.59, obtém-se:

$$R_s = \frac{T_A}{\Delta\rho_m} = T_A \frac{N_{SPT}}{0,3} (kN) \quad 2.61$$

Por sua vez, substituindo a Equação 2.36 na Equação 2.61, resulta:

$$R_s = \frac{\eta \times 0,478 \times N_{SPT}}{0,3} (kN) \quad 2.62$$

Assim, o índice N_{SPT} pode ser interpretado como um parâmetro com significado físico. Forças de resistência estática mobilizada no sistema solo-amostrador, determinadas através da Equação 2.62, podem ser comparadas entre diferentes equipamentos SPT pelo fato de serem dependentes da eficiência do ensaio.

Inicialmente, alguns autores consideravam que havia uma diferença entre a resistência dinâmica e resistência estática, devido a alterações que ocorrem nas condições do solo pelo carregamento dinâmico. Mas resultados experimentais mostraram que a resistência estática e

dinâmica do solo, podem ser consideradas iguais, permitindo calcular a resistência estática teórica a partir da Equação 2.39. Assim, estes valores determinados da resistência estática teórica, podem ser comparados com a resistência dinâmica do solo (F_d), desenvolvida durante a cravação do amostrador do SPT no solo (Figura 2.12).

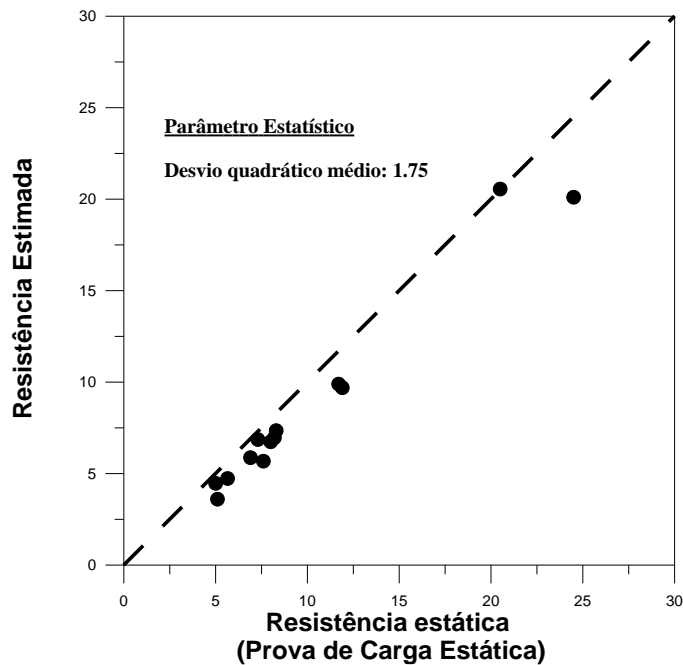


Figura 2.12 Prova de carga estática (Noreña, 2011).

2.10 Resistência por atrito lateral no amostrador SPT

Segundo Aoki (2013), para se determinar o atrito lateral entre o amostrador SPT e o solo, e a resistência à penetração do amostrador no terreno, não há necessidade de se conhecer o tipo do solo. Basta conhecer o comprimento de recuperação da amostra de solo no interior do amostrador, a eficiência, a resistência N_{SPT} e adotar um valor para o coeficiente α .

Na Figura 2.13, são mostradas as forças atuantes no amostrador, permitindo escrever a equação de equilíbrio (Equação 2.63) das forças verticais não conservativas atuantes no amostrador durante o impacto do martelo.

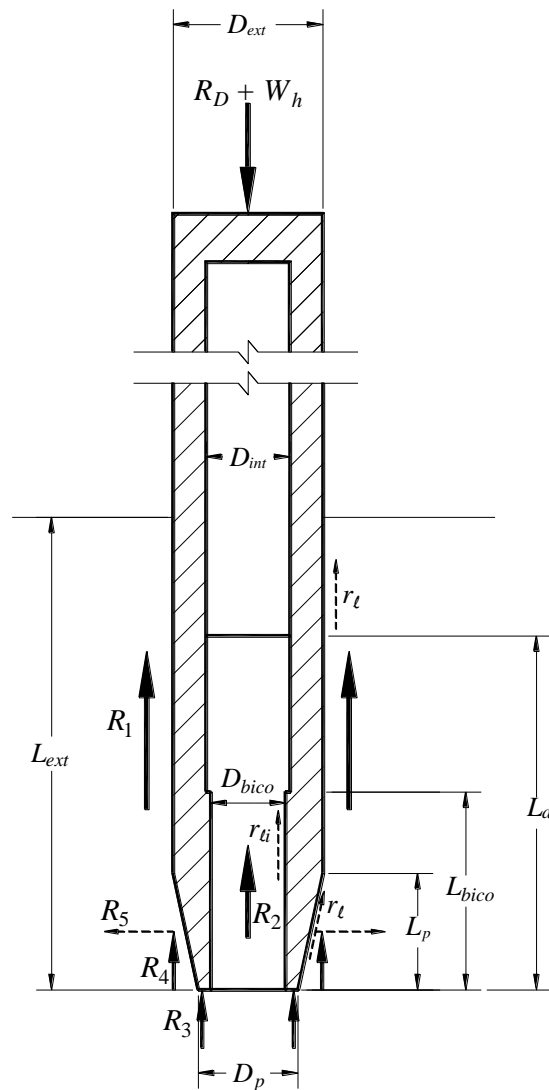


Figura 2.13 Equilíbrio de forças atuantes no amostrador (modificado de Schmertmann, 1979).

Nessa figura, tem-se:

$$D_{ext} = 50,8 \text{ mm}$$

$$D_{int} = 34,7 \text{ mm}$$

$$D_{bico} = 32,8 \text{ mm}$$

$$D_p = 34,7 \text{ mm}$$

$$L_p = 21,5 \text{ mm}$$

$$L_{bico} = 50,36 \text{ mm}$$

D_{ext} = diâmetro externo do amostrador.

D_{int} = diâmetro interno do amostrador.

D_{bico} = diâmetro interno do bico do amostrador.

D_p = diâmetro da ponta do amostrador.

L_p = comprimento da seção biselada do amostrador.

L_{bico} = comprimento do bico do amostrador.

L_{ext} = penetração total do amostrador.

L_a = comprimento da amostra.

r_e = atrito na parede externa e no chanfro do amostrador.

r_i = atrito na parede interna do amostrador.

R_D = resistência dinâmica experimental.

W_h = peso das hastes e cabeça de bater.

R_1 = força de atrito na parede vertical externa do amostrador.

R_2 = força de atrito na parede vertical interna do amostrador.

R_3 = força de reação vertical na seção anelar da ponta do amostrador.

R_4 = componente vertical da força de atrito ao longo da superfície biselada tronco-cônica do amostrador.

R_5 = componente horizontal da força de atrito ao longo da superfície biselada tronco-cônica do amostrador.

$$R_D + W_h = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad 2.63$$

onde,

$$R_1 = \pi \times D_{ext} \times (L_{ext} - L_p) \times r_e \quad 2.64$$

$$R_2 = \pi \times D_{bico} \times r_i \times L_{bico} \quad 2.65$$

Considerando que o atrito interno é a vezes maior que o atrito externo:

$$a = \frac{r_{li}}{r_\ell} \quad 2.66$$

Pode-se escrever:

$$R_2 = \pi \times D_{bico} \times a \times r_\ell \times L_{bico} \quad 2.67$$

A Figura 2.14 apresenta as forças atuantes na ponta aberta do amostrador, permitindo escrever que a força R_2 é igual à resultante da resistência sob a ponta aberta do amostrador:

$$R_2 = \pi \times \frac{D_{int}^2}{4} \times r_p \quad 2.68$$

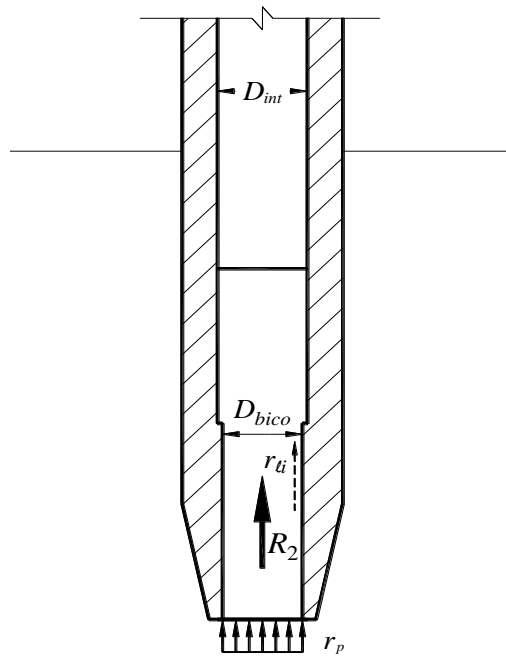


Figura 2.14 Forças atuantes na ponta aberta do amostrador (modificado de Schmertmann, 1979).

Por semelhança com o ensaio CPT, pode-se denominar razão de atrito R_f , como sendo o número que relaciona o atrito lateral externo com a resistência de ponta (r_p) do solo sob o amostrador SPT.

$$R_f = \frac{r_\ell}{r_p} = \frac{r_{li}}{(a \times r_p)} \quad 2.69$$

Igualando as equações 2.65 e 2.68, e substituindo na Equação 2.69, se obtém:

$$R_f = \frac{D_{int}^2}{4 \times a \times D_{bico} \times L_{bico}} \quad 2.70$$

As forças R_3 e R_4 podem ser determinadas pelas equações 2.71 e 2.72.

$$R_3 = \frac{\pi}{4} \times (D_p^2 - D_{int}^2) \times \frac{r_\ell}{R_f} \quad 2.71$$

$$R_4 = r_\ell \times \left(S_L \times \frac{L_p}{L} \right) \quad 2.72$$

onde,

$$L = \left\{ L_p^2 + \left[\frac{D_{ext} - D_p}{2} \right]^2 \right\}^{0,5} \quad 2.73$$

$$S_L = \frac{\pi \times L \times (D_{ext} + D_p)}{2} \quad 2.74$$

Portanto,

$$r_\ell = \frac{R_D + W_h}{\pi \times D_{ext} (L_{ext} - L_p) + \pi \times D_{bico} \times a \times L_{bio} + \frac{\pi}{4} \times \frac{(D_p^2 - D_{int}^2)}{R_f} + S_L \times \frac{L_p}{L}} \quad 2.75$$

2.11 Método proposto para a determinação do trabalho realizado pelas forças não conservativas atuantes no amostrador

Segundo Brown e Hettiarachi (2008), a versão modificada do critério de ruptura de Mohr-Coulomb é muito utilizada para calcular a resistência ao cisalhamento entre o solo e o elemento que se está introduzindo:

$$r_\ell = c_a + K \times \sigma'_e \times \tan \delta \quad 2.76$$

onde

r_ℓ = resistência de cisalhamento entre o solo e o amostrador.

c_a = adesão entre o solo e o amostrador.

δ = ângulo de cisalhamento entre o solo e o amostrador.

K = coeficiente de empuxo lateral do solo.

σ'_e = tensão efetiva vertical do solo nessa profundidade.

Nos casos em que não ocorre embuchamento, a força dinâmica teórica (F_d) seria igual à resistência de cisalhamento ou tensão de atrito multiplicada pela soma das áreas lateral externa

e interna do amostrador. O trabalho realizado pelas forças não conservativas atuantes no amostrador (W_p) seria resistência de cisalhamento vezes a penetração do amostrador (ρ):

$$W_p = [A_o \times (c_a + K \times \sigma'_e \times \tan \delta) + A_i \times (c_a + K \times \sigma'_i \times \tan \delta)] \times \rho \quad 2.77$$

onde A_o , A_i , σ'_e e σ'_i são a área externa, área interna, tensão efetiva vertical do solo fora e dentro do amostrador, respectivamente.

Assumindo que a tensão lateral dentro do amostrador seja nula e que a área de contato interna é aproximadamente igual a 70% da área de contato externa, a Equação 2.77, pode ser escrita da seguinte forma:

$$W_p = [A_o \times (c_a + K \times \sigma'_e \times \tan \delta) + 0,7 \times A_o \times (c_a)] \times \rho \quad 2.78$$

2.12 Mecanismos de reação mobilizados durante a penetração do amostrador SPT

É importante saber que podem ocorrer diferentes mecanismos de reação do sistema solo-amostrador durante a penetração, dependendo da ocorrência ou não do fenômeno do embuchamento.

No início da cravação, o solo entra no amostrador a uma razão igual à penetração do amostrador no solo. À medida que a penetração continua, o solo que se encontra dentro do amostrador desenvolve uma resistência de atrito suficiente para prevenir a intrusão, causando o embuchamento. Isso faz que o amostrador do SPT tenha um comportamento de ponta fechada, onde a área da ponta seria todo o diâmetro externo do amostrador. Assim, a resultante do atrito lateral interno é igual à resistência de ponta mobilizada e é definido como a capacidade máxima estática de fundo (Paikowsky e Whitman, 1990).

No caso que não ocorrer o embuchamento, o solo continua a ser introduzido no amostrador, à medida que vai ocorrendo à cravação do mesmo. Dependendo da ocorrência de embuchamento ou não embuchamento, as deformações e tensões do solo em torno do amostrador serão bastante diferentes (Figura 2.15). Assim, a resistência estática última do solo (R_s) pode ser representada pelas seguintes expressões (Paikowsky & Whitman, 1990):

$$R_{s, \text{nãoembuchamento}} = \sum f_{so} \times A_o + \sum f_{si} \times A_i + q_p \times A_i \quad 2.79$$

$$R_{s, \text{embuchamento}} = \sum f_{so} \times A_o + q_p \times A_p = Q_{\text{ponta fechada}} \quad 2.80$$

onde

f_{so} = tensão de cisalhamento externa.

f_{si} = tensão de cisalhamento interna.

A_o = área lateral externa.

A_i = área lateral interna.

A_p = área total da ponta, considerando o diâmetro externo do amostrador.

A_r = área do anel de aço do amostrador.

q_p = tensão normal atuante na ponta do amostrador.

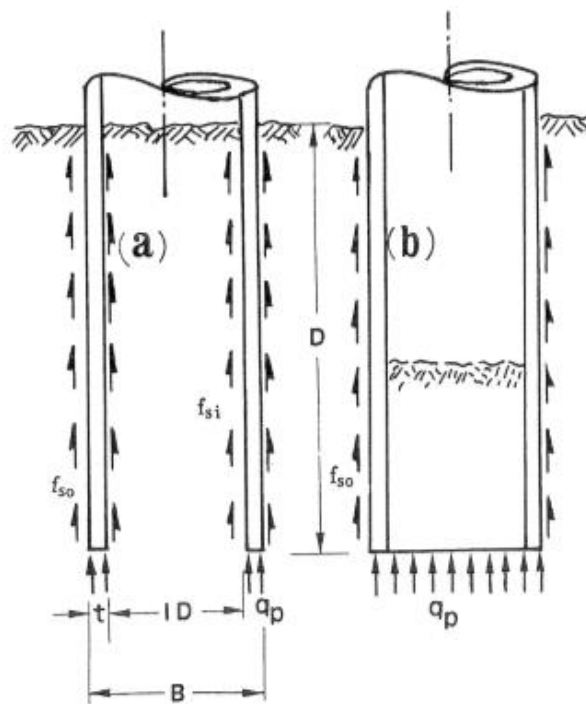


Figura 2.15 Tensões desenvolvidas no amostrador para as condições de (a) não embuchamento e (b) embuchamento (Paikowsky e Whitman, 1990).

Em argilas, os valores de f_{so} e f_{si} dependem da força de cisalhamento não drenada, da geometria da ponta do amostrador, e os atrasos na cravação de estacas. Em solos granulares o valor de f_{so} depende da compactação do solo, a qual é uma função do modo de penetração. O valor de f_{si} depende do fenômeno de arqueamento, que é controlada através do coeficiente de atrito lateral interno entre o solo e o aço do amostrador e a tensão normal ao longo da interface (Paikowsky e Whitman, 1990).

A Figura 2.16 mostra os efeitos do embuchamento na resistência estática em solos argilosos e arenosos:

- Na Figura 2.16(a) pode-se notar que a contribuição da resistência da ponta em comparação com a resistência total do amostrador na argila decai rapidamente com a profundidade. Na razão de $D/B=30$ (onde D é a profundidade de penetração e B o diâmetro do amostrador) a ponta resiste aproximadamente 25% da carga total.
- Em solos argilosos, espera-se que a situação de embuchamento ocorra quando $R_{s, não embuchamento}$ atingir $R_{s, ponta fechada}$, numa profundidade de $D/B \approx 10-20$,
- O embuchamento em argilas não contribui significativamente com a capacidade total duma estaca.
- Na Figura 2.16 (b), a contribuição da resistência da ponta em comparação com a resistência total do amostrador na areia decai gradualmente, mas não deve ser ignorado, especialmente nas penetrações profundas.
- Em solos arenosos espera-se que ocorra a situação de embuchamento, numa profundidade de $D/B \approx 25-35$.
- O embuchamento em areias contribui significativamente para a capacidade de carga total de uma estaca.

A probabilidade de ocorrência de embuchamento é maior para o caso das argilas e siltes, que são solos com pouca resistência de ponta, que para os solos arenosos e areias argilosas, os quais não apresentam condição de embuchamento. Conforme o índice N_{SPT} aumenta, a parcela do atrito lateral externo diminui e a soma das parcelas do atrito lateral interno e da resistência de ponta aumenta (Lukiantchuki, 2012).

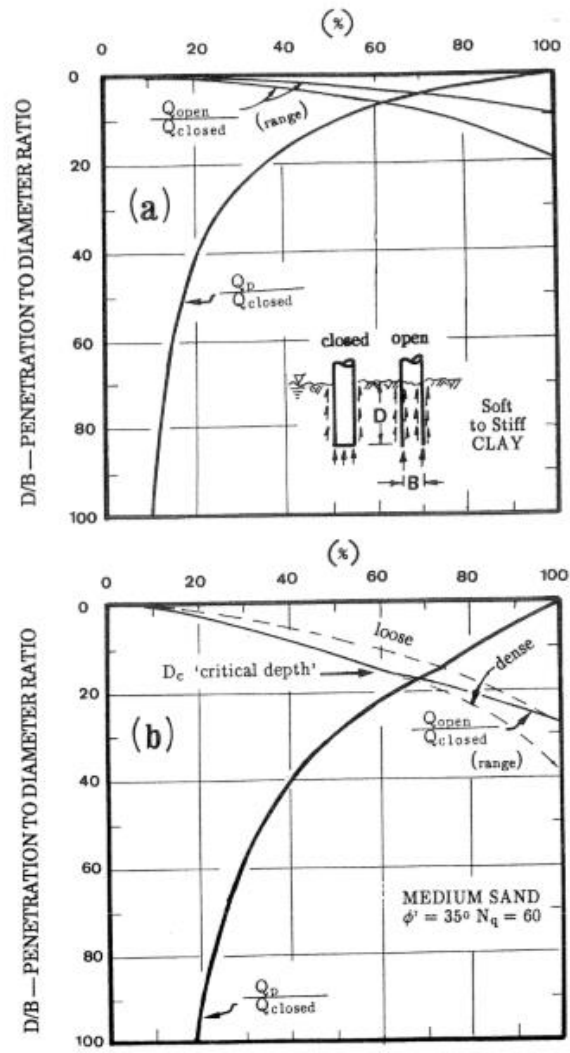


Figura 2.16 Efeito da condição do embuchamento na resistência estática no solo (a) argiloso e (b) arenoso (Paikowsky & Whitman, 1990).

2.13 Propriedades dos solos

2.13.1 Propriedades de solos granulares para a condição de ponta fechada.

Schnaid et al. (2009), utilizaram a energia que atinge ao amostrador no ensaio SPT combinada com as teorias de capacidade de carga e expansão de cavidades para estimar o ângulo de atrito interno ϕ' diretamente da força de reação necessária à cravação do amostrador no solo. Pela teoria da capacidade de carga, a resistência estática última (F_e) é dada pela expressão:

$$F_e = A_p (C \times N_c + p' \times N_q + 0,5 \times \gamma \times D_{ext} \times N_\gamma) + A_o (\gamma \times L \times K \times \tan \delta) \quad 2.81$$

onde

N_c , N_q e N_γ = fatores de capacidade de carga.

A_p = área total da ponta, considerando o diâmetro externo do amostrador.

A_o = área lateral externa do amostrador.

C := coesão do solo.

p' = tensão efetiva média.

γ = peso específico do solo.

D_{ext} = diâmetro externo do amostrador.

L = profundidade do ensaio.

K = coeficiente da pressão lateral do solo.

δ = ângulo de cisalhamento entre o solo e o amostrador.

Entretanto, $F_e = R_s$, então se tem:

$$R_s = A_p(C \times N_c + p' \times N_q + 0,5 \times \gamma \times D_{ext} \times N\gamma) + A_o(\gamma \times L \times K \times \tan \delta) \quad 2.82$$

Como para as areias $c=0$, então o produto $C \times N_c$ é igual a zero. O coeficiente da pressão lateral do solo pode ser adotado igual a 0,8 (Broms 1965) e o ângulo de atrito entre o solo e o amostrador (δ) igual a 20° (Aas, 1996). Segundo Schnaid (2009), para solos granulares, o termo $0,5 \times \gamma \times D_{ext} \times N\gamma$ é considerado desprezível.

O fator de capacidade de carga (N_q) é dependente do ângulo de atrito interno (ϕ') que é determinado através da teoria de expansão de cavidade (Vésic, 1972) (Equação 2.83).

$$N_q = \frac{3}{3 - \sin \phi'} \times e^{\left(\frac{\pi}{2} - \phi'\right) \tan \phi'} \times \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2}\right) \times I_r^{\frac{4 \sin \phi'}{3(1 + \sin \phi')}} \quad 2.83$$

O índice de rigidez (I_r) e a tensão efetiva média (p') são obtidos a partir das equações 2.84 e 2.85.

$$I_r = \frac{G}{p' \times \tan(\phi')} \quad 2.84$$

$$p' = \frac{1 + 2 \times K_o}{3} \sigma'_e \quad 2.85$$

onde

G = módulo de cisalhamento.

σ'_e = tensão vertical efetiva na profundidade onde se encontra o amostrador

K_o = coeficiente de empuxo em repouso.

O coeficiente de empuxo em repouso pode ser expresso em função da razão de pré-adensamento (OCR), como se mostra na Equação 2.86.

$$K_o = (1 - \sin(\phi')) \times OCR \quad 2.86$$

Segundo Schnaid et al. (2009), o método para a determinação do ângulo de atrito interno do solo deve levar em conta os efeitos derivados da transferência de energia no ensaio SPT, as tensões médias e a rigidez do solo. O procedimento para estimar o ângulo de atrito interno do solo, é constituído dos seguintes passos:

1. Medir a penetração do amostrador no solo.
2. Conhecendo a penetração média, determina-se o valor da força de reação dinâmica do solo (F_d) através da Equação 2.39.
3. Estimar a rigidez do solo e razão de pré-adensamento através da experiência ou dados geotécnicos.
4. Admitindo que $F_d = F_e$, determina-se o ângulo de atrito interno do solo através da Equação 2.81

A partir desse procedimento pode-se estabelecer uma correlação entre o índice de N_{SPT} e o ângulo de atrito interno (ϕ') (Figura 2.17).

Como o índice N_{SPT} depende da tensão efetiva média, esse efeito pode ser removido através da sua normalização em relação a uma tensão efetiva de referência. Esse índice normalizado é dado pela seguinte expressão.

$$N_1 = C_N \times N_{SPT} \quad 2.87$$

onde

C_N = fator de correção.

Segundo Quaresma et al. (1998), o fator de correção é definido pela expressão:

$$C_N = \left[\frac{(\sigma'_{oct})_1}{\sigma'_{oct}} \right]^{0,5} \quad 2.88$$

onde

$(\sigma'_{oct})_1$ = tensão octaédrica para uma areia sob pressão vertical efetiva de 100 kPa.

σ'_{oct} = tensão octaédrica ao nível onde o SPT está sendo executado.

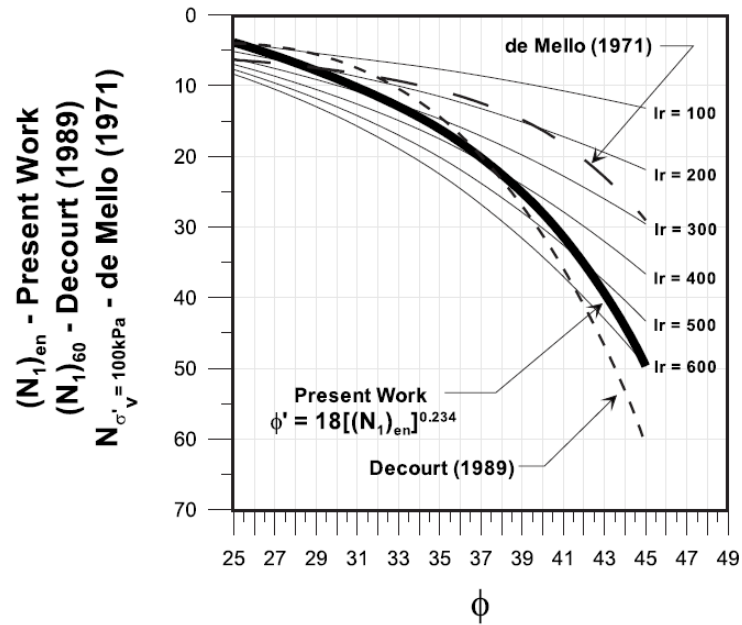


Figura 2.17 Correlação para o método proposto de N_1 versus ϕ (Schnaid et al., 2009).

Os resultados mostrados na Figura 2.18 indicam que a relação entre $(N_1)_{en}$ e ϕ' é altamente sensível à variação do índice de rigidez (I_r) para areias com ângulo de atrito elevado. A metodologia proposta foi validada utilizando-se resultados experimentais de Hatanaka e Uchida (Schnaid et al., 2009B).

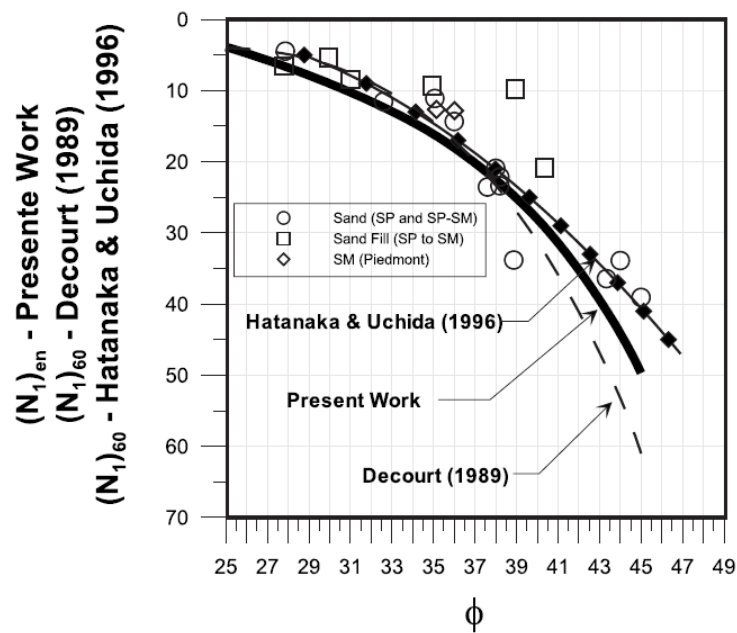


Figura 2.18 Comparação com resultados de Hatanaka e Uchida (1996) de N_1 versus ϕ (Schnaid et al., 2009).

2.13.2 Propriedades de solos coesivos para a condição de ponta fechada.

Como para as areias, Schnaid et al. (2009) também, desenvolveram uma relação entre a força de reação estática última do solo (R_s) com a resistência ao cisalhamento (S_u) mobilizada em condições não drenadas para solos coesivos, mediante a teoria da capacidade de carga de estacas em argilas (Equação 2.89).

$$R_s = A_p(N_c \times S_u + \gamma \times L) + (A_o \times S_u \times c_a) \quad 2.89$$

onde:

A_p = área total da ponta, considerando o diâmetro externo do amostrador.

A_o = área lateral externa do amostrador.

γ = peso específico do solo.

L = profundidade do ensaio.

c_a = coeficiente de adesão.

N_c = coeficiente de capacidade de carga.

O coeficiente de capacidade de carga pode ser obtido a partir da Equação 2.90.

$$N_c = 3,90 + 1,33 \ln(I_r) \quad 2.90$$

I_r = índice de rigidez do solo.

Segundo Schnaid et al. (2009), os valores de N_c variam no intervalo de 7 a 9, concordando com Skempton (1951), Caquot e Kerisel (1953), e De Beer (1977). Para argilas rijas, o valor de N_c é maior que o valor obtido através da Equação 2.90, o qual é aproximadamente igual a 30 (e.g., Lunne et al. 1997).

A Equação 2.89 pode então ser reescrita da seguinte forma:

$$S_u = \frac{R_s - \gamma LA_p}{N_c A_p + c_a A_o} \quad 2.91$$

É importante notar que os valores da área lateral (A_o) e da área de ponta (A_p), dependem da ocorrência do embuchamento, considerando assim duas situações distintas: ponta aberta e ponta fechada (Lukiantchuki, 2012).

O coeficiente c_a pode ser obtido através de diferentes correlações encontradas em distintas referências (e.g. Flaate 1968; Tomlinson 1969; McClelland 1974) obtendo assim o valor de S_u .

De acordo com Schnaid (2009), a força dinâmica (F_d) deve ser reduzida a uma força estática equivalente (R_s), através de um fator correção (v'), o qual pode ser adotado igual a 1,5 (Randolph, 2004).

$$F_d = v' \times R_s \quad \therefore \quad R_s = \left(\frac{E_{amostrador}}{\Delta \rho} \right) \times \left(\frac{1}{v'} \right) \quad 2.92$$

2.14 Aplicação

2.14.1 Metodologia para prever a capacidade de suporte de uma estaca a partir da força dinâmica de reação do solo (F_d) segundo Schnaid e Langone (2013)

A força dinâmica de reação (F_d) pode ser usada como um dado de entrada para obter a capacidade de suporte de uma estaca (Q_u), a qual é a soma da resistência de ponta da estaca (Q_p) e a resistência por atrito (Q_L) (Equação 2.93).

$$Q_u = Q_p + Q_L = A_{pe} q_{pe} + U \sum f_{l,i} \Delta L_e \quad 2.93$$

onde,

A_{pe} = área da ponta da estaca.

q_{pe} = resistência unitária da ponta.

U = perímetro da estaca.

f_i = resistência de cisalhamento unitária da estaca.

ΔL_e = comprimento do segmento cravado da estaca.

Pode-se adotar como referência para a resistência da ponta da estaca um valor da ordem de 70% da força dinâmica de reação do solo (F_d) (Lobo et al., 2009). Portanto pode-se concluir que para o caso de embuchamento (geralmente se apresenta em solos rijos) a resistência de ponta unitária é dada por:

$$q_{pe} = \frac{0,7 F_d}{A_p} \quad 2.94$$

onde

$$A_p = \text{área da ponta do amostrador SPT} = \left(\frac{\pi \times 5,1^2}{4} = 20,4 \text{ cm}^2 \right)$$

Deve-se observar que a resistência unitária de ponta da estaca (q_{pe}) não depende das condições do solo nem do comprimento da estaca (L_e), nem diâmetro da estaca (D_{es}), nem pela razão L_e/D_{es} .

Assim, a recomendação é calcular F_d correspondente ao valor médio de N_{SPT} obtido na zona de dois diâmetros acima e dois diâmetros abaixo da ponta da estaca, o que está consistente com estudos previamente realizados com ensaios SPT e de CPT (Schnaid e Langone, 2013).

A resistência de cisalhamento unitária da estaca é simplesmente a força dinâmica de reação (F_d) dividida pelas áreas interna e externa do amostrador (Equação 2.95). Neste caso, as componentes de cisalhamento interno e externo são consideradas iguais. Esta suposição foi avaliada numericamente por Lobo et al. (2009), e têm lugar na penetração em solos moles ou fofos.

$$f_l = \frac{F_d}{a_l} \tag{2.95}$$

onde

a_l = soma das áreas laterais, interna e externa do amostrador.

Substituindo essas contribuições de resistência unitária de ponta e resistência de atrito na Equação 2.93, tem-se:

$$Q_u = Q_p + Q_L = 0,7 F_d \frac{A_{pe}}{a_l} + \frac{0,2U}{a_l} \sum F_d \Delta L_e \tag{2.96}$$

onde o valor de 0,2 na equação representa efeitos da escala.

É importante notar que o ensaio SPT deve ser realizado em areias, solos não coesivos e granulares e de preferência que sejam solos residuais. Isto porque, quase todos os métodos de pesquisa do SPT ignoram os efeitos viscosos e a poro pressão gerados durante a penetração em solos argilosos.

3 MATERIAIS, INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

Neste capítulo se apresentam os equipamentos utilizados e os procedimentos seguidos para a realização dos ensaios SPT com avaliação das quantidades de energia, as quais foram obtidas por meio de instrumentação dinâmica. Também são mostradas a metodologia adotada para o cálculo das energias e eficiências, assim como a ferramenta computacional desenvolvida para cálculo e visualização dos resultados.

3.1 Instrumentação utilizada para calcular a quantidade de energia

Para o cálculo das quantidades de energia que chegam ao amostrador foi utilizado o método EFV (item 2.6). Para tanto, foi utilizada um segmento de haste instrumentado que consiste em uma célula de carga, constituída de extensômetros elétricos (strain gauges), e um par de acelerômetros. Esse segmento de haste instrumentado foi instalado logo acima do amostrador, conforme proposto por Aoki e Cintra (2000a). Assim, foi possível determinar a parcela de energia que efetivamente atinge ao amostrador, a qual é responsável pela sua cravação no solo, bem como a reação dinâmica do solo.

3.1.1 Haste instrumentada

A haste instrumentada utilizada neste trabalho foi desenvolvida por Lukiantchuki (2012). O segmento de haste instrumentado deve ter a mesma impedância mecânica das demais hastes usadas no ensaio SPT para evitar a reflexões de ondas. Portanto, as hastes instrumentadas, apresentam os mesmos diâmetros nominais interno e externo da haste de sondagem padronizada pela NBR 6484/01 (ABNT, 2001) (Figura 3.1). O segmento da haste instrumentado foi fabricado em aço inoxidável martensítico (VC-150), composto por 0.35 % de carbono e 13 % de cromo, e com limite de resistência à tração de 640 MPa e limite de escoamento de 345 MPa (Lukiantchuki, 2012).

3.1.2 Acelerômetros e Suportes

Os acelerômetros instalados nos segmentos da haste instrumentada medem a aceleração das partículas devido ao golpe do martelo nos ensaios SPT, necessária para calcular a velocidade mediante a integração dos sinais de aceleração registrados por esses sensores (Figura 3.2).

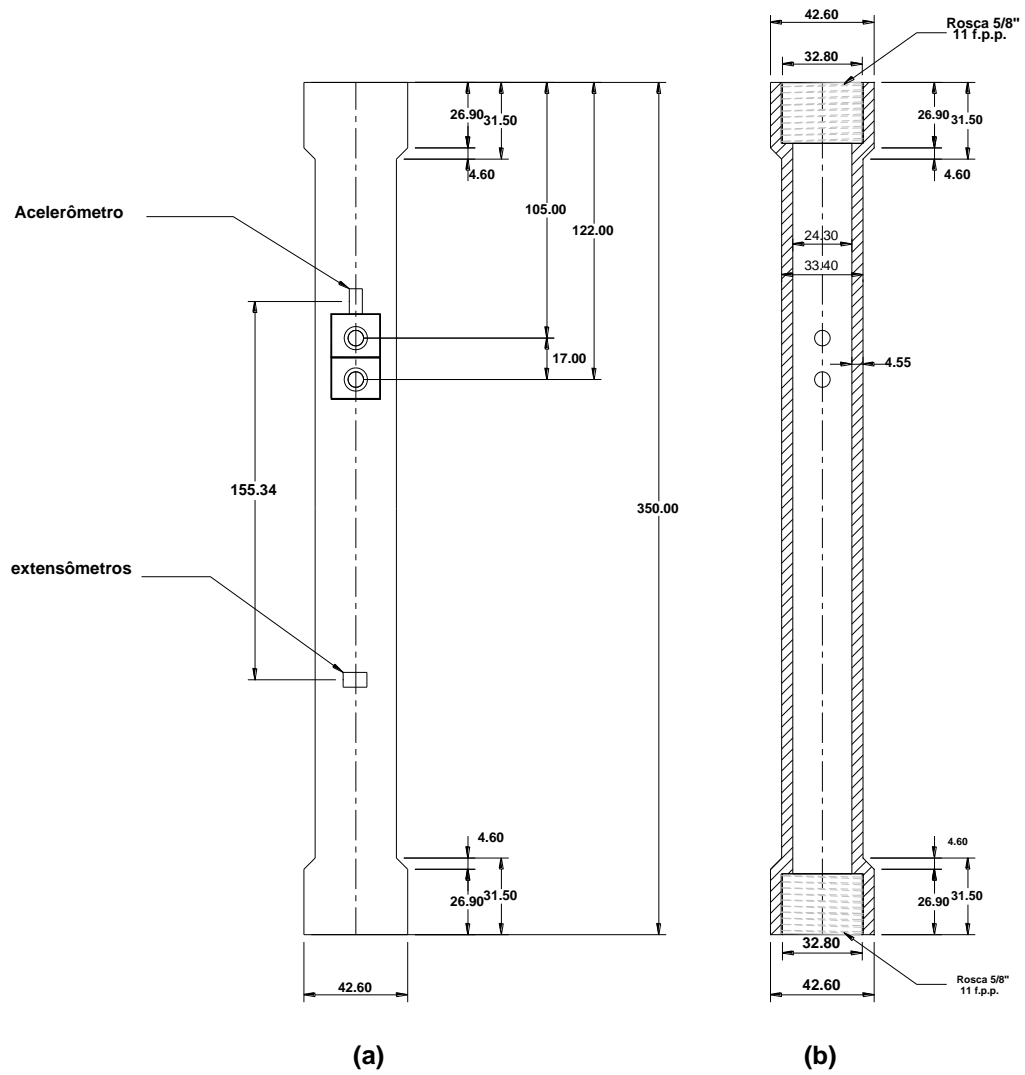


Figura 3.1 Projeto da haste: a) dimensões e posicionamento dos sensores; b) dimensões internas e roscas.

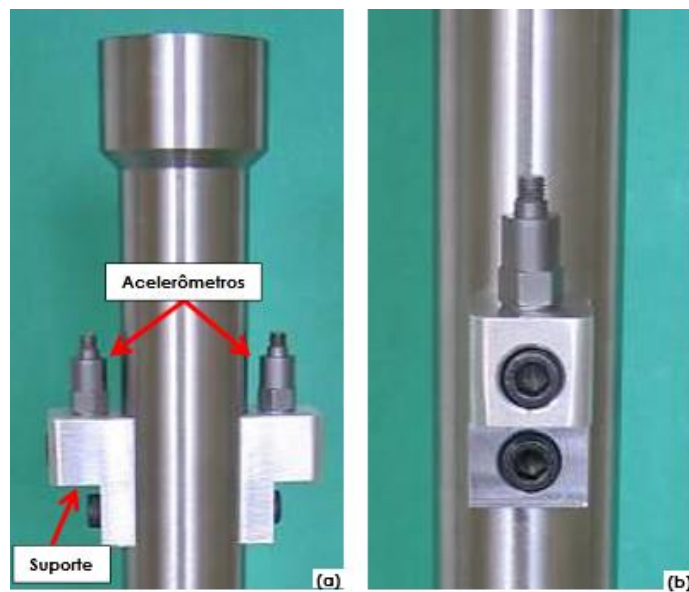


Figura 3.2 Acelerômetros instalados nas hastas: a) vista frontal, acelerômetros e suportes; b) vista lateral, acelerômetros e suportes.

Os acelerômetros piezoelétricos utilizados são da marca PCB Piezotronics, modelo 350M77, com capacidade para medir acelerações até 20000 g ($\approx 196200 \text{ m/s}^2$), trabalhando numa faixa de frequência de 1 a 15000 Hz. Outro fator importante é a frequência dos sinais de aceleração, onde frequências de até 15000 Hz podem ser atingidas para a instrumentação posicionada na base da composição de hastes. Os acelerômetros são fixados na haste com o auxílio de suportes confeccionados em alumínio (Lukiantchuki, 2012).

3.1.3 Célula de carga

A célula de carga (transdutor de força) da haste instrumentada é constituída por extensômetros do tipo PA-06-125TG-350-LEN, fornecidos pela Excel Engenharia de Sensores Ltda.. Estes extensômetros de tipo duplo (longitudinal e transversal) são dispostos em forma de ponte de Wheatstone, como se mostra na Figura 3.3, ficando diametralmente opostos no segmento de haste (Odebrecht, 2003).

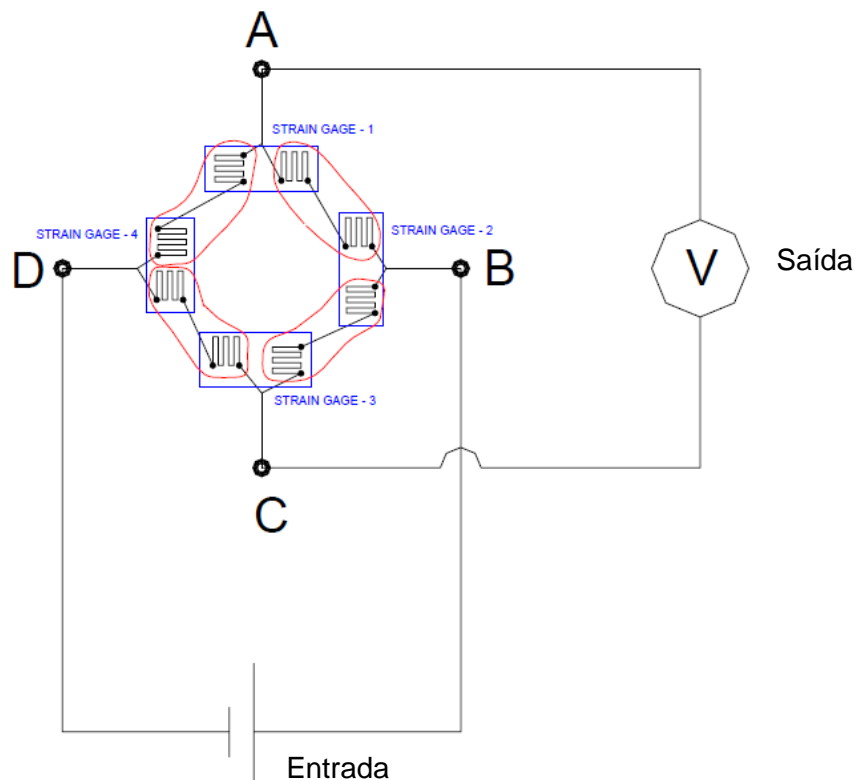


Figura 3.3 Esquema da ponte de Wheatstone (Odebrecht, 2003).

3.1.4 Sistema de aquisição de dados

O tempo de transcurso do evento do golpe pode variar entre 40 a 120 milissegundos em função do comprimento da composição de hastes. Portanto, o sistema de aquisição de dados deve ter uma taxa de amostragem adequada, para que a curva dos sinais obtidos tenha uma definição aceitável. De acordo com a ASTM (2010) D4633-10 as taxas de amostragem devem estar entre 10 kHz a 25 kHz para sistemas analógicos e entre 50 kHz e 250 kHz para sistemas digitais. As taxas de amostragem devem ser estabelecidas de acordo com o filtro passa-baixa.

Para o registro dos sinais de força e aceleração foi utilizado um sistema de aquisição de dados marca HBM, modelo MX-410 (Figura 3.4). Esse sistema permite a coleta de dados a uma taxa de até 96 kHz por canal com resolução de 24 bits. Também pode proporcionar uma excitação de 5 a 24 V (DC) aos sensores conectados a eles. Para a aquisição de dados dos acelerômetros é utilizado um condicionador de sinal do tipo IEPE (Figura 3.4) que amplifica os sinais durante a aquisição de dados.

O controle do sistema de aquisição de dados é realizado através do software CatmanEasy, também desenvolvido pela HBM. Este software permite o processamento, registro gráfico, visualização e tratamento dos dados após a aquisição.



Figura 3.4 Sistema de aquisição de dados HBM, modelo MX410.

Utilizando curvas de calibração adequadas, os registros de força correspondentes à célula de carga da haste instrumentada são apresentados em kN e os registros de aceleração são apresentados em m/s^2 .

3.1.5 Configuração do sistema de aquisição de dados

Depois da sincronização, se procedeu com a configuração das células de carga e os acelerômetros no CatmanEasy de acordo com suas respectivas calibrações. Os acelerômetros foram calibrados com os valores em mV/ms^2 da carta de calibração fornecida pelo fabricante. A célula de carga da haste instrumentada foi utilizada a equação da calibração estática realizada (item 3.2), apresentada na Figura 3.8. Posteriormente, os sensores configurados foram atribuídos aos seus respectivos canais de leitura.

Após da configuração dos sensores, selecionou-se a taxa de aquisição dos dados, igual a 96 kHz para a instrumentação da haste. Consequentemente, foi feita a programação do sistema *trigger*, que consiste em acionar os canais de leitura a partir de um critério imposto pelo usuário. O recurso de *pré-trigger* possibilita a gravação de certa quantidade de dados antes do *trigger* ser acionado. Assim, com esses dois recursos se assegura armazenar todos os dados correspondentes ao evento.

Foi utilizado nos ensaios um filtro tipo passa baixa (anti-aliasing), de acordo com as recomendações da norma americana D4633-10 (ASTM, 2010). Foi estabelecida uma frequência de corte de 15% da taxa de aquisição dos sinais, ou seja, 14,4 kHz.

Finalmente depois do procedimento descrito anteriormente, os sensores virtuais do CatmanEasy podiam ser zerados, para dar início as medições de força e aceleração nos ensaios.

3.1.6 Equipamentos das sondagens do SPT

O equipamento utilizado (Figura 3.5) e o procedimento seguido na realização dos ensaios SPT foram os recomendados pela norma NBR 6484 (ABNT, 2001).



Figura 3.5 Equipamento utilizado nos ensaios realizados em campo. As especificações dos equipamentos utilizados neste trabalho são:

- Torre de sondagem completa ou tripé;
- Composição de perfuração e de cravação, que é formada por um conjunto de hastes de 24,3 mm de diâmetro nominal interno, 33,4 mm de diâmetro nominal externo e peso teórico de 32,3 N/m de comprimentos de 1m a 2m. As hastes são interligadas por meio de luvas, para formar a composição.
- Martelo padronizado que é constituído por uma massa de ferro de forma cilíndrica ou prismática de 65 kg, com um coxim de madeira dura e com haste-guia ou pino-guia de 1,2 m.
- Cabeça de bater com 90 mm de altura, diâmetro de 87.5 mm e massa de 3.3 g.
- Trado concha e trado helicoidal (manual), utilizados para a abertura dos furos da sondagem.

- Amostrador bipartido tipo Raymond sem liner, com comprimento de 665 mm, diâmetro externo de 50,8 mm e interno de 34,7 mm e diâmetro interno do bico 32,8 mm.

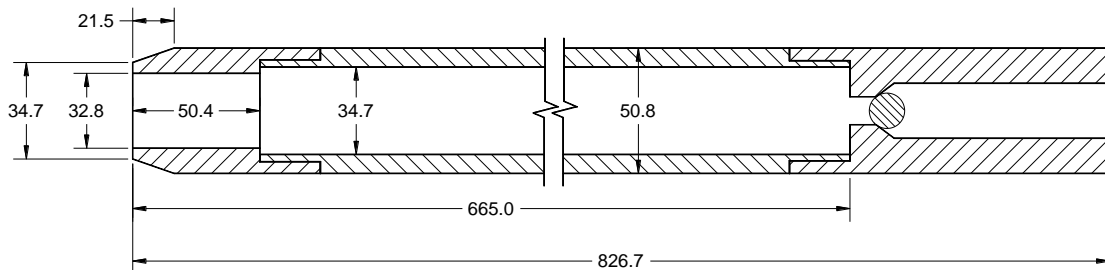


Figura 3.6 Amostrador bipartido tipo Raymond sem liner, utilizado nesta pesquisa modificado de Schmertmann (1979) (dimensões em mm).

- Luvas convencionais para conexão entre as hastes.
- Corda para levantar o martelo.
- Metro de balcão com resolução de 1 mm.

3.2 Calibração da célula de carga

A célula de carga da haste foi calibrada estaticamente, seguindo-se a norma ASTM 4633 (2010), a qual sugere carregá-la com pelo menos 70% da carga máxima prevista ou conhecida de ensaios anteriores do ensaio de penetração dinâmica (SPT). Desta forma, o ensaio foi realizado com incrementos de carga de 10 kN até a carga máxima de 220 kN (22 estágios de carga) e decrementos de 20 kN na descarga (11 estágios de descarga), até zerar a carga. Para isto, foi utilizada uma prensa servo controlada, modelo MTS 815 Rock Mechanics System (Figura 3.7) disponível no Laboratório de Mecânica das Rochas do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos. Os incrementos de carga/descarga foram controlados através do sistema de controle da própria prensa.

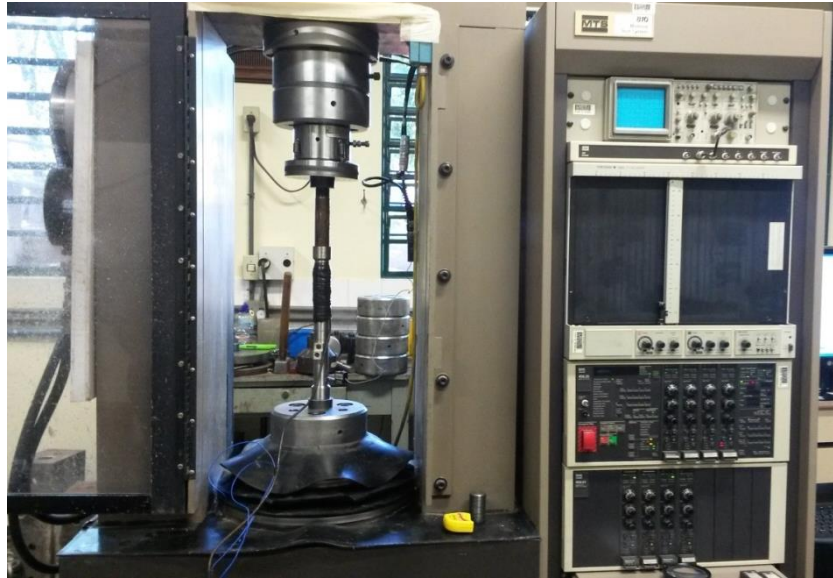


Figura 3.7 Calibração da célula de carga da haste instrumentada.

Para a aquisição dos sinais elétricos (mV/V) para cada incremento de carga/descarga, também foi utilizado o sistema de aquisição de dados da marca HBM modelo MX 410 e o software CatmanEasy. Neste software foi utilizado o sensor já registrado de ponte completa, com as mesmas características da célula de carga, relacionando a leitura da carga aplicada pela prensa com a respectiva leitura de voltagem em milivolt/volt (mV/V) registrada pelo sistema de aquisição HBM.

A calibração para a célula de carga (Figura 3.8) foi feita três vezes para verificar a repetibilidade dos dados obtidos, e assim conseguir adotar constantes de calibração médias das três leituras de carga (kN) *versus* voltagem (mV/V).

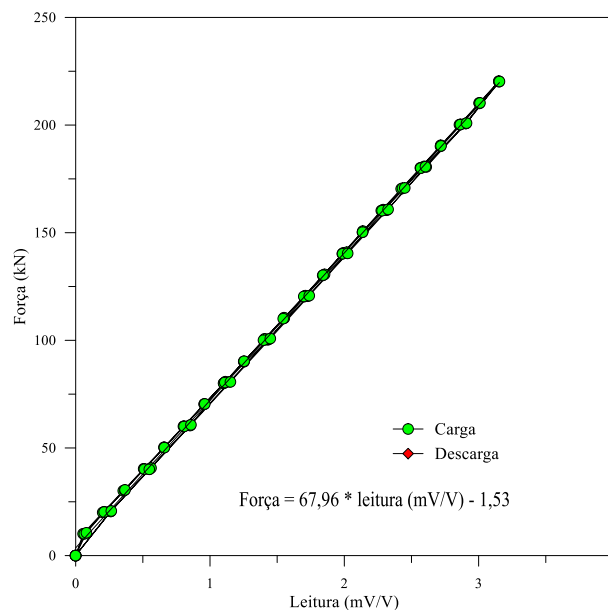


Figura 3.8 Calibração da célula de carga da haste instrumentada.

3.3 Proteção mecânica da instrumentação

Pelo fato da haste instrumentada estar posicionado no topo do amostrador e eventualmente estar em contato com as paredes do furo de sondagem, é necessário que a mesma seja protegida mecanicamente para sua preservação.

Antes de proceder à proteção mecânica, todas as superfícies foram limpas, removendo-se quaisquer resíduos existentes (poeira, solo, graxa, óxido, etc.).

Para a proteção dos acelerômetros, se colocou uma membrana impermeável de látex, sendo posteriormente envolvida por uma espessa camada de silicone (Figura 3.9). O circuito e os respectivos cabos da célula de carga foram protegidos com uma camada de fita auto-fusão (Figura 3.9).



Figura 3.9 Proteção mecânica dos sensores instalados nas hastes instrumentadas (Morais, 2014).

3.4 Processamento dos dados e cálculo das quantidades de energia

Em cada golpe de um ensaio do SPT, são registrados três sinais, sendo dois de aceleração e um de força. Estes sinais, posteriormente são armazenados em arquivos no formato binário (.bin) acompanhados por arquivos indexados de pequena extensão.

Os resultados armazenados nos arquivos.bin, podem ser visualizados e manipulados a qualquer momento com o software CatmanEasy, sendo possível identificar o real intervalo de

duração do golpe. Na Figura 3.10 se mostra um exemplo de um sinal de força e aceleração, onde se pode seleccionar o intervalo do golpe considerado.

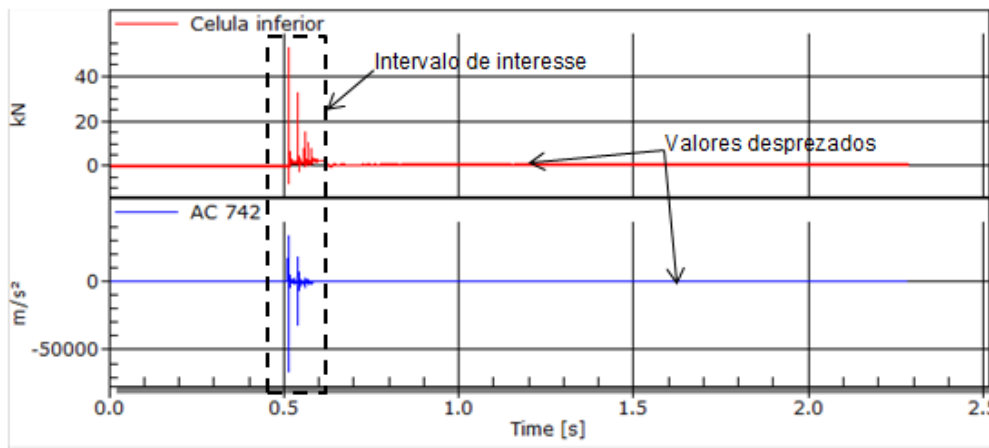


Figura 3.10 Totalidade dos dados adquiridos e seleção do intervalo de interesse do golpe.

Na visualização dos sinais, se consegue detectar possíveis problemas na instrumentação, principalmente nos acelerômetros. Assim, quando os valores dos sinais medidos nos dois acelerômetros são muito discrepantes, se despreza o sinal do acelerômetro com problema.

É importante ressaltar que durante o processamento dos dados, se deve fazer a correção da baseline (linha base), de modo que os sinais correspondentes a uma situação de repouso assumam um determinado valor, normalmente igual a zero (Howie et al., 2003). Como exemplo, pode ser citada a hipótese de que a velocidade no final do evento seja nula (repouso), sendo necessária uma correção da baseline, de modo que esta condição seja satisfeita.

Após a seleção do intervalo do golpe e da correção da baseline, os dados de força e aceleração armazenados no software CatmanEasy, são exportados em arquivos no formato ASCII, que podem ser lidos pelos softwares Microsoft Office Excel, Grapher (versão 9.0), e pelo ambiente de programação científica Matlab® da Mathworks®.

Com os arquivos dos dados tratados, se procede com a verificação da qualidade dos sinais e no cálculo da quantidade de energia. Para isto, foi usada a rotina de cálculo escrita por Morais (2014) para o software Matlab® (2014), a qual será mostrada adiante.

3.5 Verificação da qualidade dos sinais

A verificação da qualidade dos sinais é feita a partir da comparação dos sinais de força (F) com o produto dos sinais de velocidade (v) multiplicados pela impedância (Z) das hastes,

durante o intervalo de tempo igual a $2l_i/c$, onde l_i é a distância entre a posição da instrumentação e a extremidade do amostrador (Figura 3.11). Sendo constante a seção transversal da haste, a propagação da onda é unidirecional durante esse intervalo de tempo. Assim, tem-se:

$$F = \frac{a_h \times E}{c} \times v \quad \therefore F = Z \times v \quad 3.1$$

onde

a_h = área da seção transversal da haste (410 mm²).

E = módulo de elasticidade do aço (2.10×10^8 kN/m²).

c = velocidade teórica de propagação da onda (5120 m/s).

Z = impedância da haste (16.81 kN s/m).

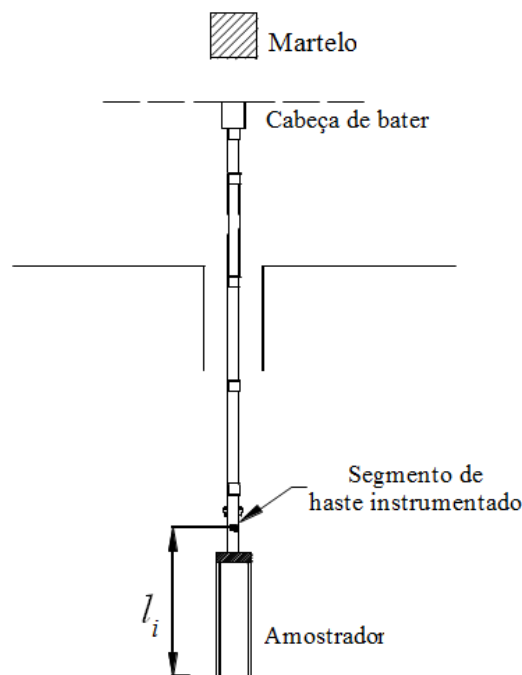


Figura 3.11 Distância entre a instrumentação e a extremidade do amostrador.

As velocidades (v) são determinadas, integrando-se os sinais de aceleração em relação ao tempo, segundo a regra dos trapézios ou regra de Simpson (Figura 3.12). Nesse procedimento, os intervalos de tempo (Δt) constantes são iguais ao inverso da taxa de frequência de aquisição dos dados (1/96000 s). A velocidade em um determinado instante é igual à soma das áreas dos trapézios até o instante considerado (Equação 3.2). Admite-se que no instante inicial a velocidade seja nula.

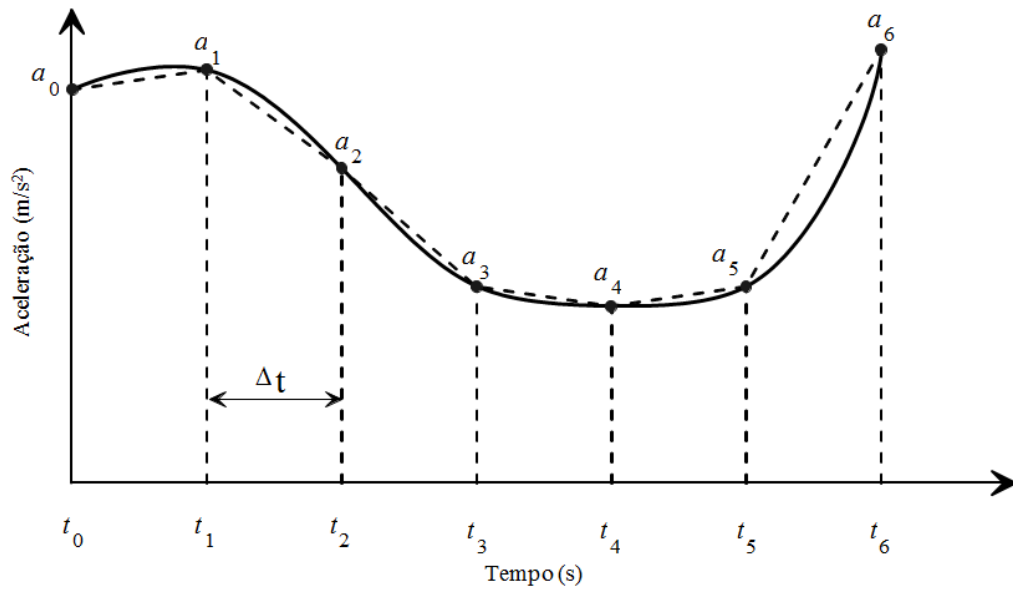


Figura 3.12 Regra dos trapézios.

$$v_i = \sum_{i=1}^n \frac{(a_{i-1} + a_i)}{2} \times (t_i - t_{i-1}) \quad 3.2$$

onde,

v_i = velocidade (m/s)

a_i = aceleração em um determinado instante t_i (m/s²)

n = número total dos intervalos de tempo.

Uma segunda forma de verificação consiste na comparação entre a penetração do amostrador ($\Delta\rho$) medida em campo com o deslocamento do amostrador calculado a partir da integração dos valores de velocidade, ou seja, a dupla integração dos sinais de aceleração.

Os deslocamentos do amostrador também são obtidos integrando-se os sinais de velocidade pela regra de Simpson (Equação 3.3). Nesta equação supõe-se que no instante inicial o deslocamento seja nulo.

$$\rho_i = \sum_{i=1}^n \frac{(v_{i-1} + v_i)}{2} \times (t_i - t_{i-1}) \quad 3.3$$

onde,

ρ_i = deslocamento (m).

v_i = velocidade em um determinado instante t_i (m/s).

Os resultados de penetração obtidos segundo a equação 3.3, para os registros na base da composição de hastes, foram comparados com as penetrações registradas no campo. Quanto mais próximos, melhor a qualidade dos sinais obtidos pela instrumentação (Figura 3.13).

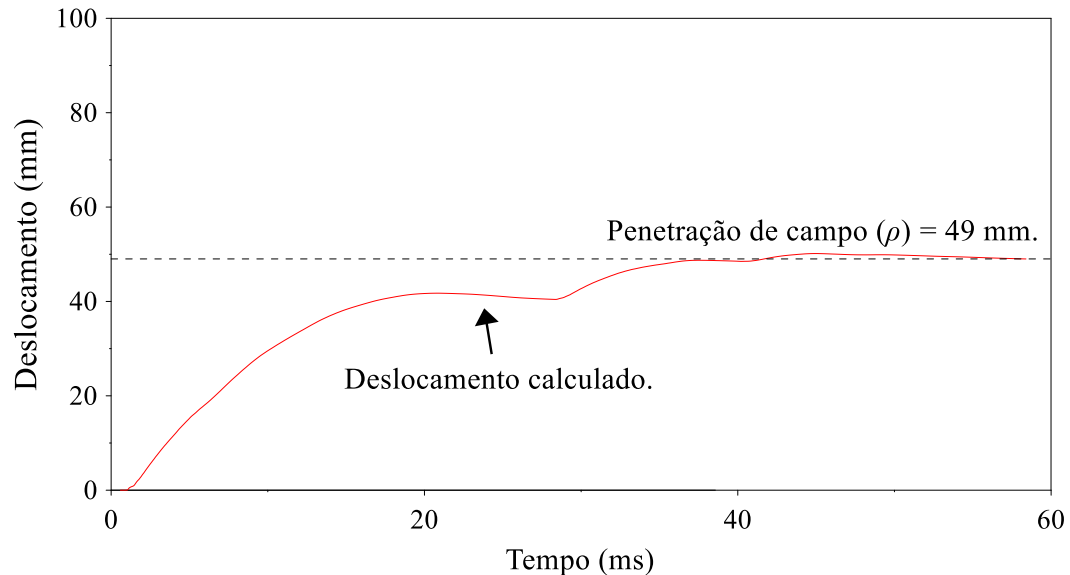


Figura 3.13 Verificação da qualidade dos sinais de um dos golpes dos ensaios SPT (7 m golpe 5) – equivalência entre os deslocamentos medidos e calculados.

3.6 Cálculo da quantidade de energia

O cálculo da quantidade de energia se faz segundo o método EFV a partir das Equações 3.4 e 3.5.

$$E = \int_{t_1=0}^{t_2=\infty} F(t) \cdot v(t) dt \quad 3.4$$

$$E_i = \sum_{i=1}^n \frac{(f_{i-1} \times v_{i-1} + f_i \times v_i)}{2} \times (t_i - t_{i-1}) \quad 3.5$$

onde,

E_i = Energia no instante t_i (J);

f_i = Força no instante t_i (kN).

O instante de integração t_1 corresponde ao início do evento, ou seja, quando a força deixa de ser zero. O tempo t_2 corresponde ao instante final do evento, quando a força novamente volta a ser nula e a velocidade é aproximadamente igual a zero.

Deve-se prestar atenção no instante t_2 , e verificar que realmente a velocidade seja nula. Se essa condição não é satisfeita, a linha base deve ser justada, para assim conseguir o repouso.

Para os sinais correspondentes à haste que está localizada no topo do amostrador, a energia máxima alcançada (E_i) (Figura 3.14) em relação ao tempo, é igual à energia cinética (T_A) que chega ao amostrador do ensaio SPT e causa a sua penetração no solo.

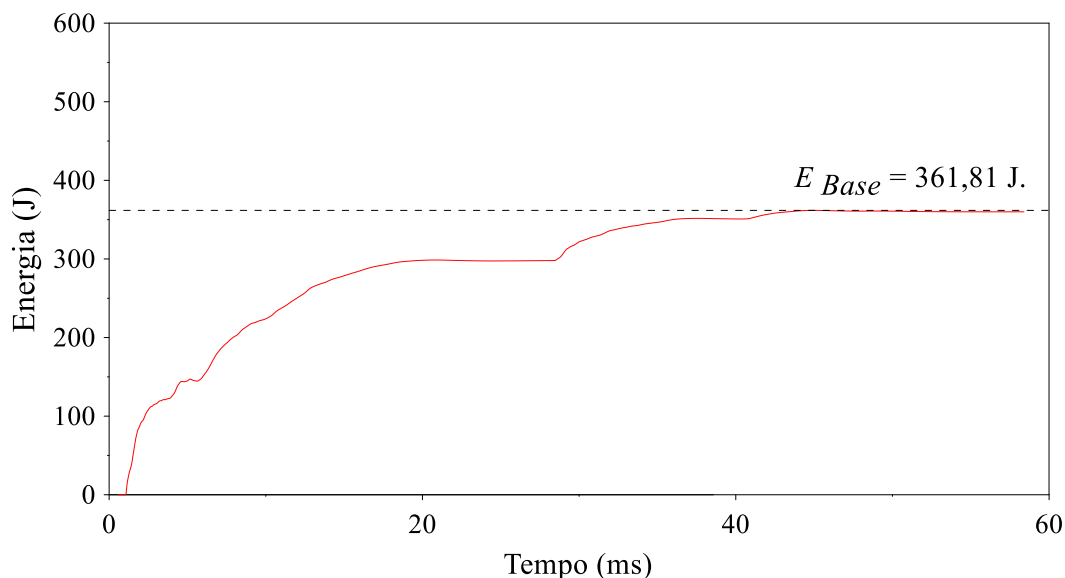


Figura 3.14 Resultados de energia para um dos golpes do ensaio SPT (7 m golpe 5).

3.7 Rotina para o cálculo da quantidade de energia

Para calcular a quantidade de energia, foi utilizada uma rotina para o software Matlab®, desenvolvida por Morais (2014). Nele, são realizadas as etapas de verificação da qualidade dos sinais, cálculo da quantidade de energia, e visualização gráfica dos resultados. Terminados os cálculos, os resultados são apresentados na janela de comando do programa e disponibilizados automaticamente para planilhas eletrônicas.

Assim, são fornecidos ao programa os arquivos no formato ASCII, relativos ao intervalo de interesse do golpe, previamente processados no programa CatmanEasy. Também são fornecidos o comprimento da composição de hastes (L_h) e a penetração medida do amostrador no respectivo golpe (ρ). Morais (2014) estabeleceu a seguinte ordem para a disposição dos dados de força e aceleração no arquivo ASCII: Força, Acelerômetro 1 e Acelerômetro 2.

Na Figura 3.15 é apresentado o algoritmo desenvolvido por Morais (2014) para o cálculo das quantidades de energias envolvidas no ensaio SPT. No Apêndice A é apresentado o código do programa desenvolvido.

3.8 Determinação da resistência dinâmica do solo para certa profundidade (R_D)

Neste trabalho, assumiu-se que a resistência dinâmica do solo (R_D), durante a penetração, é similar a de uma haste com extremidade semi-engastada, (item 2.5.1.3). Assim, a resistência dinâmica do solo para um impacto é igual à força medida pela célula de carga situada na haste instrumentada acima do amostrador, sendo registradas as parcelas de força ascendente e descendente, impostas ao solo (Equação 3.6).

$$R_{di} = F \downarrow + F \uparrow \quad 3.6$$

Admite-se que a resistência dinâmica do solo para um golpe (R_{di}) é igual à média das forças correspondentes a cada um dos impactos que ocorrem durante o intervalo de tempo em que acontece a penetração do amostrador SPT no solo (Figura 3.16) (Lukiantchuki, 2012).

Após serem determinadas as resistências dinâmicas do solo para cada golpe, se calcula a resistência dinâmica do solo (R_D) para certa profundidade, a qual é definida como a soma dos valores das resistências dinâmicas do solo (R_{di}) para cada golpe, dividido pelo número de golpes (N) para os últimos 0,3 m da penetração do amostrador no solo:

$$R_D = \frac{\sum R_{di}}{N} \quad 3.7$$

3.9 Equipamento para a determinação do atrito interno

Neste trabalho de pesquisa foi desenvolvido um equipamento para a extração de amostras, com o objetivo de avaliar o atrito entre o solo e o amostrador. Isso é feito através da medição da força (R_2) requerida para deslocar a amostra dentro do amostrador. Este equipamento é constituído de um suporte para um cilindro hidráulico e para o amostrador. O cilindro hidráulico aplica a força necessária deslocar a amostra que se encontra dentro do amostrador, que é medida por uma célula de carga. Assim, é possível estimar a força resultante correspondente ao atrito interno (R_2) entre o solo e o aço do amostrador.

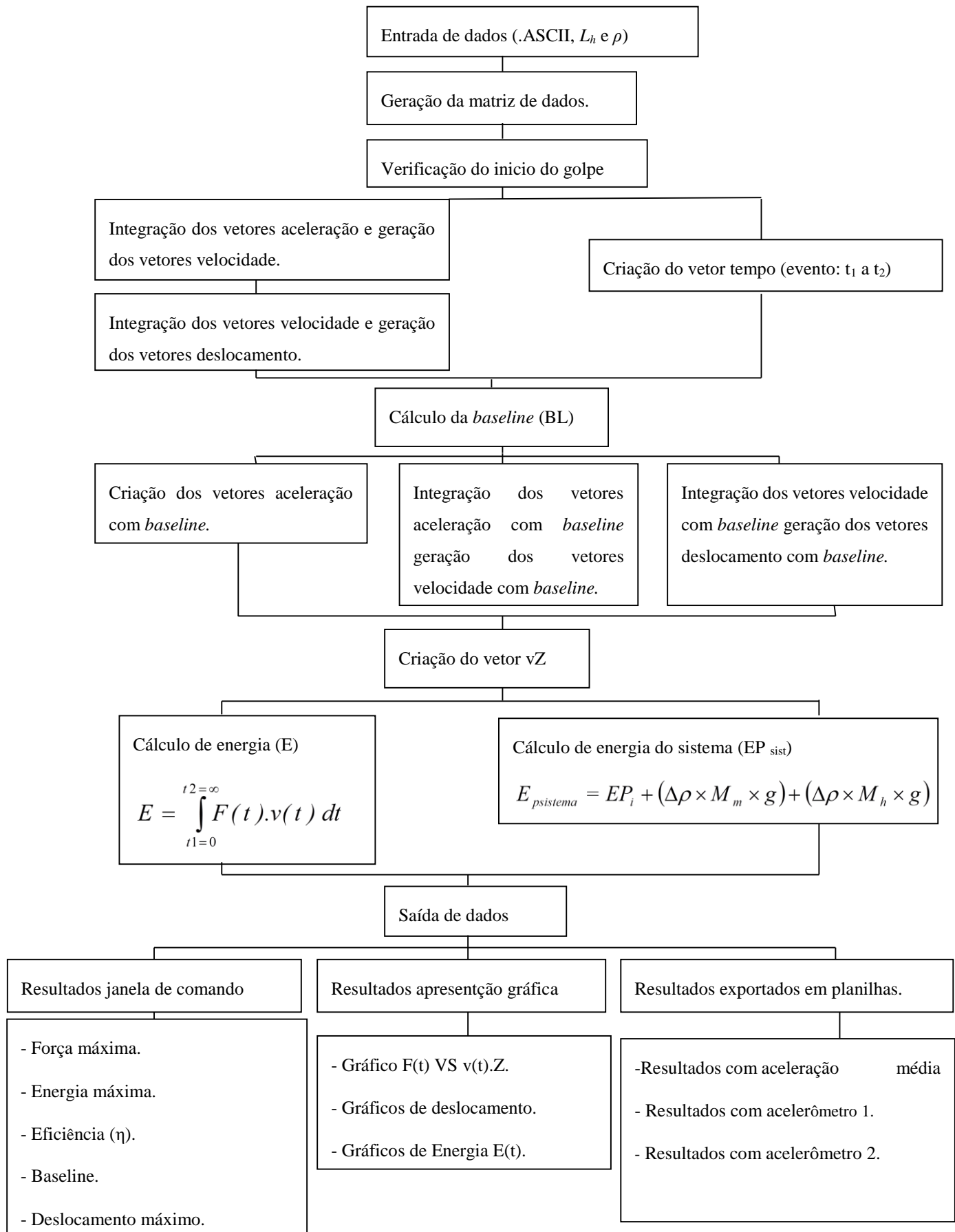


Figura 3.15 Algoritmo da rotina desenvolvida para o cálculo da energia no ensaio SPT (Morais, 2014).

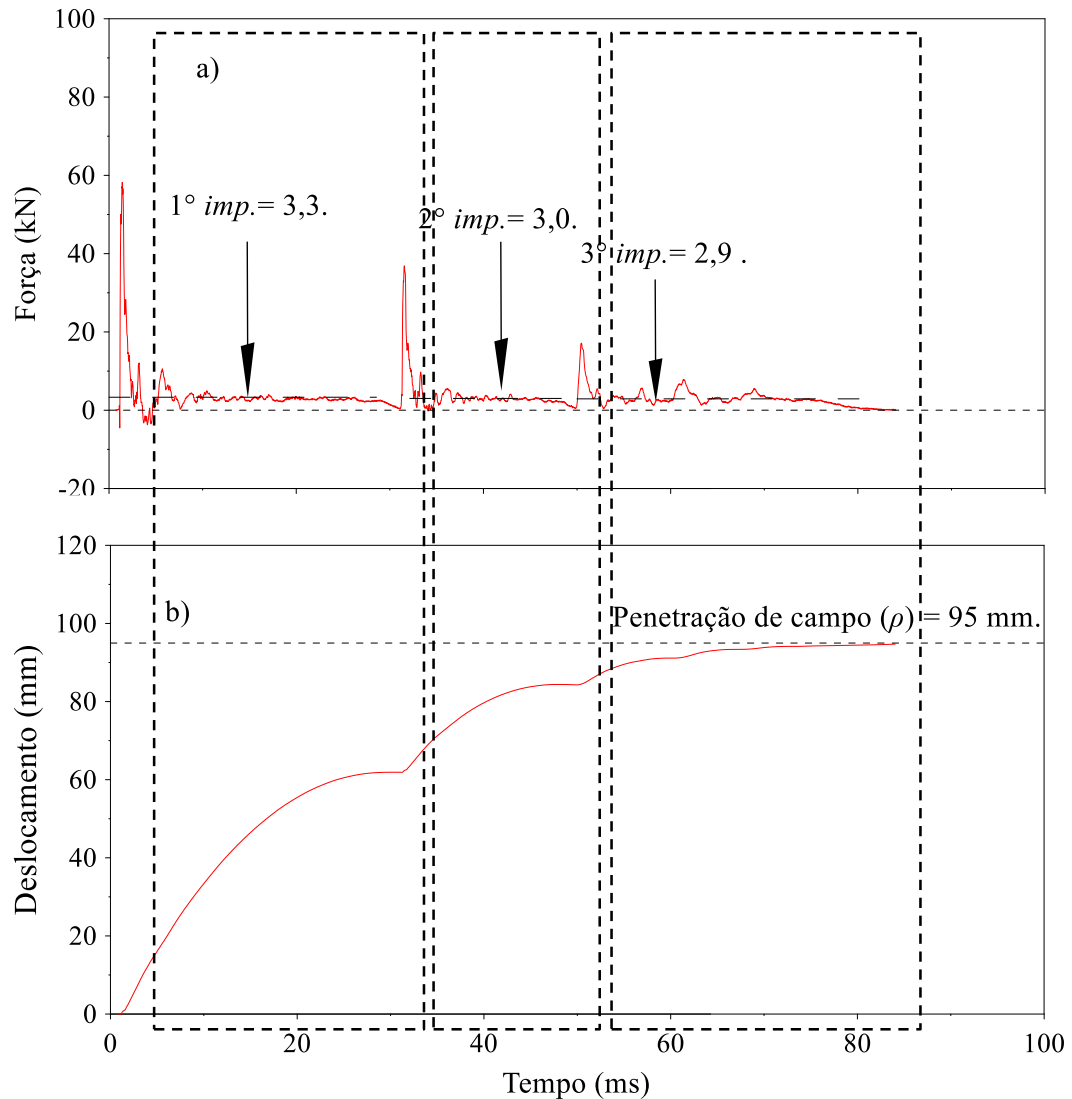


Figura 3.16 Força e deslocamento *versus* tempo de um dos registros típicos do ensaio SPT, para a instrumentação posicionada logo acima do amostrador (Profundidade 4 m, 4º golpe).

3.10 Equipamento para a determinação do atrito interno

Neste trabalho de pesquisa foi desenvolvido um equipamento para a extração de amostras, com o objetivo de avaliar o atrito entre o solo e o amostrador. Isso é feito através da medição da força (R_2) requerida para deslocar a amostra dentro do amostrador. Este equipamento é constituído de um suporte para um cilindro hidráulico e para o amostrador. O cilindro hidráulico aplica a força necessária deslocar a amostra que se encontra dentro do amostrador, que é medida por uma célula de carga. Assim, é possível estimar a força resultante correspondente ao atrito interno (R_2) entre o solo e o aço do amostrador.

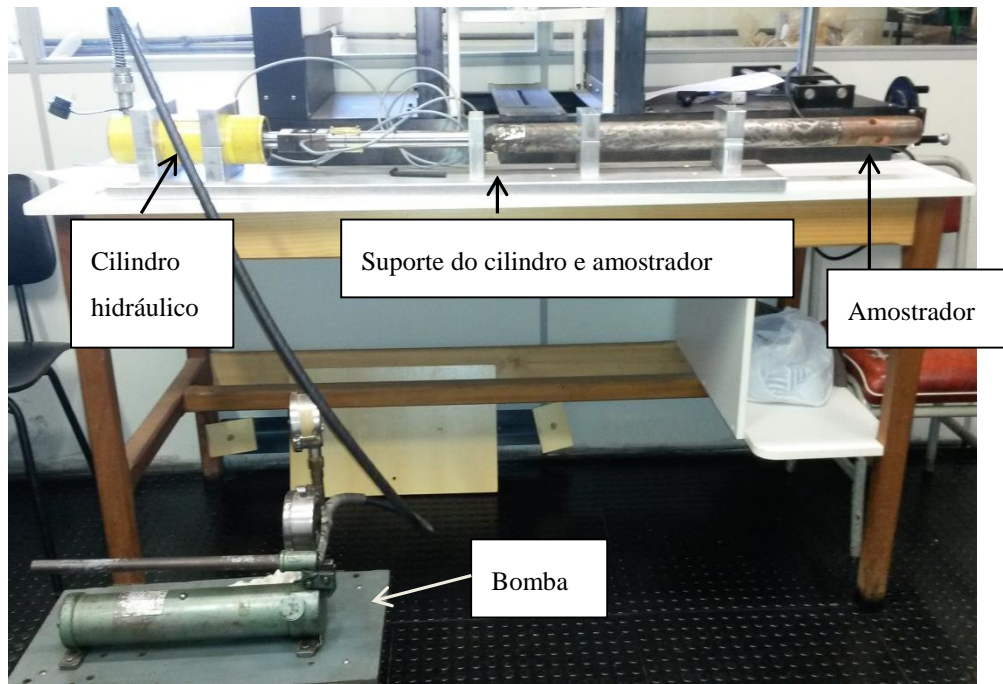


Figura 3.17 Instrumentação para a determinação do atrito interno entre o solo e o amostrador.

Este equipamento está composto por (Figura 3.17):

- Suportes de alumínio naval, onde são instalados o amostrador e o cilindro hidráulico.
- Cilindro hidráulico e bomba para aplicar a carga.
- Célula de carga (marca HBM modelo RSCBC3 com capacidade máxima de 500 kgf, pré-calibrada de fábrica), para medir e registrar a força aplicada necessária para movimentar a amostra dentro do amostrador. (Figura 3.18).

Os sinais de força da célula de carga, coletados a uma frequência de 5 Hz, são enviados ao sistema de aquisição de dados portátil da marca HBM, modelo MX-410, que serão armazenados no computador através do software CatmanEasy.

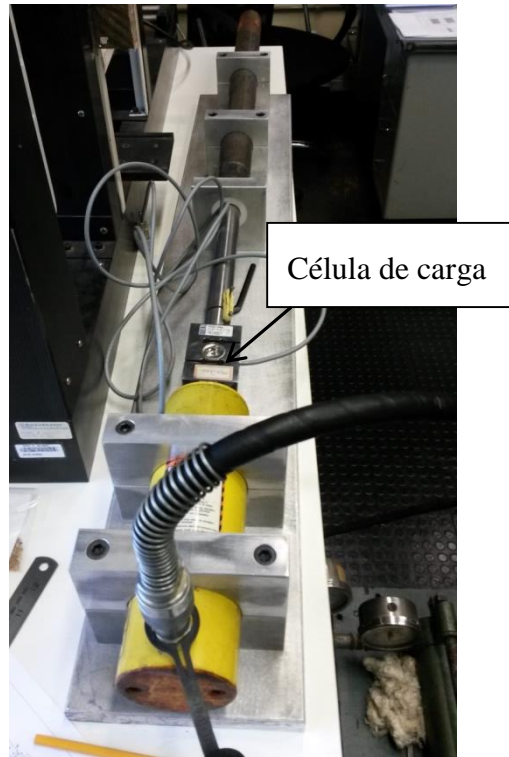


Figura 3.18 Célula de carga usada para medir a força de atrito interno (R_2).

3.11 Procedimento para a determinação do atrito interno

Inicialmente, com o auxílio do cilindro hidráulico, aplica-se uma força à amostra, necessária para movê-la dentro do amostrador. Os sinais dessa força, que são medidos pela célula de carga, são armazenados em função do tempo. Considera-se como força de cisalhamento interna (R_2) a força de pico da curva força *versus* tempo.

Conhecendo-se a força de cisalhamento interna (R_2), assim como a resistência dinâmica experimental (R_D) e o peso das hastes para certa profundidade, podem ser calculadas as resistências unitárias (de ponta e de cisalhamento, interna e externa) desenvolvidas durante a penetração do amostrador no solo através das equações mencionadas no item 2.10, além do coeficiente a de Aoki (2013) e a razão de atrito (R_f). Este procedimento se faz para cada metro de profundidade do ensaio SPT. O peso próprio da amostra não foi considerado pelo fato de ser muito pequeno, podendo ser considerado desprezível. Esses valores podem ser facilmente calculados utilizando-se a função Solver do Microsoft Excel.

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A cidade de São Carlos se encontra na parte centro oriental do estado de São Paulo, borda oeste das *cuestas basálticas*. As coordenadas que determinam sua localização são 22°01'22" de latitude sul e 47°53'38" de longitude oeste. (Menezes, 1990).

Esta região apresenta duas estações climáticas distintas. Na estação seca de inverno, que vai de abril a setembro, as temperaturas médias são de 16°, com 21% das chuvas. A estação chuvosa de verão vai de outubro a março e as temperaturas médias são de 26° (Bortolucci, 1983).

O Campo Experimental de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, em São Carlos (EESC), São Paulo, foi o lugar escolhido para a realização dos ensaios SPT. Esses ensaios foram realizados até uma profundidade de 10 m, com instrumentação adequada para avaliar as quantidades de energia. Também foram coletadas amostras para a medição da força de atrito interno entre o solo e o amostrador. Neste local têm sido realizadas diferentes pesquisas, cujos dados serviram para complementar as informações constantes do presente trabalho.

4.1 Caracterização geológica

O subsolo da área de estudo é composto de rochas do Grupo São Bento, constituídas pelos arenitos das Formações Botucatu e Pirambóia, e pelos derrames de rochas efusivas basálticas da Formação Serra Geral. Sobre estas, se encontram conglomerados e arenitos do Grupo Bauru e cobrindo superficialmente toda a região aparecem os sedimentos colapsíveis da era Cenozóica. (Carvalho, 1991). A Figura 4.1 mostra o perfil geológico de parte da cidade de São Carlos e a localização do campus da USP.

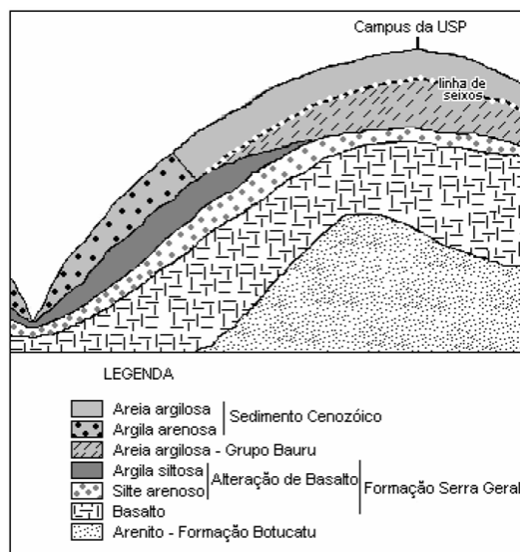


Figura 4.1 Seção esquemática da geologia de São Carlos (Bortolucci, 1983)

4.2 Caracterização geotécnica

O perfil geotécnico do Campo Experimental da EESC-USP é composto de duas camadas de areia fina a média, argilosa, pouco siltosa, e separadas pela linha de seixos que está numa profundidade aproximada de 6,50 m (Peixoto, 2001). A camada superficial é caracterizada como Sedimento Cenozóico, colapsível, muito porosa e pouco compacta, e a inferior, como residual do Arenito do Grupo Bauru (Moraes, 2005). O nível d'água de 7 a 10 m de profundidade entre os períodos mais úmidos e secos durante o ano. Ensaio de caracterização realizados por Peixoto (2001), cujos resultados estão mostrados na Tabela 4.1, comprovam a composição do perfil geotécnico do lugar descrito anteriormente.

Tabela 4.1 Resultados dos ensaios de caracterização. (Peixoto, 2001)

<i>Prof. (m)</i>	<i>Limites de consistência</i>		<i>Granulometria</i>			
	<i>LL (%)</i>	<i>LP (%)</i>	<i>argila (%)</i>	<i>silte (%)</i>	<i>areia fina (%)</i>	<i>areia média (%)</i>
1,30	24	17	26	11	51	12
2,30	26	18	21	14	55	10
3,30	27	20	31	8	51	10
4,30	28	18	28	11	56	5
5,30	30	10	20	17	54	9
6,30	31	22	22	16	54	8
7,30	31	22	19	14	57	10
8,30	34	20	21	9	54	16
9,30	30	10	17	10	56	17
10,30	32	10	20	8	56	16

A Figura 4.2 apresenta os resultados de ensaios SPT e CPTu, realizados no Campo Experimental da EESC-USP.

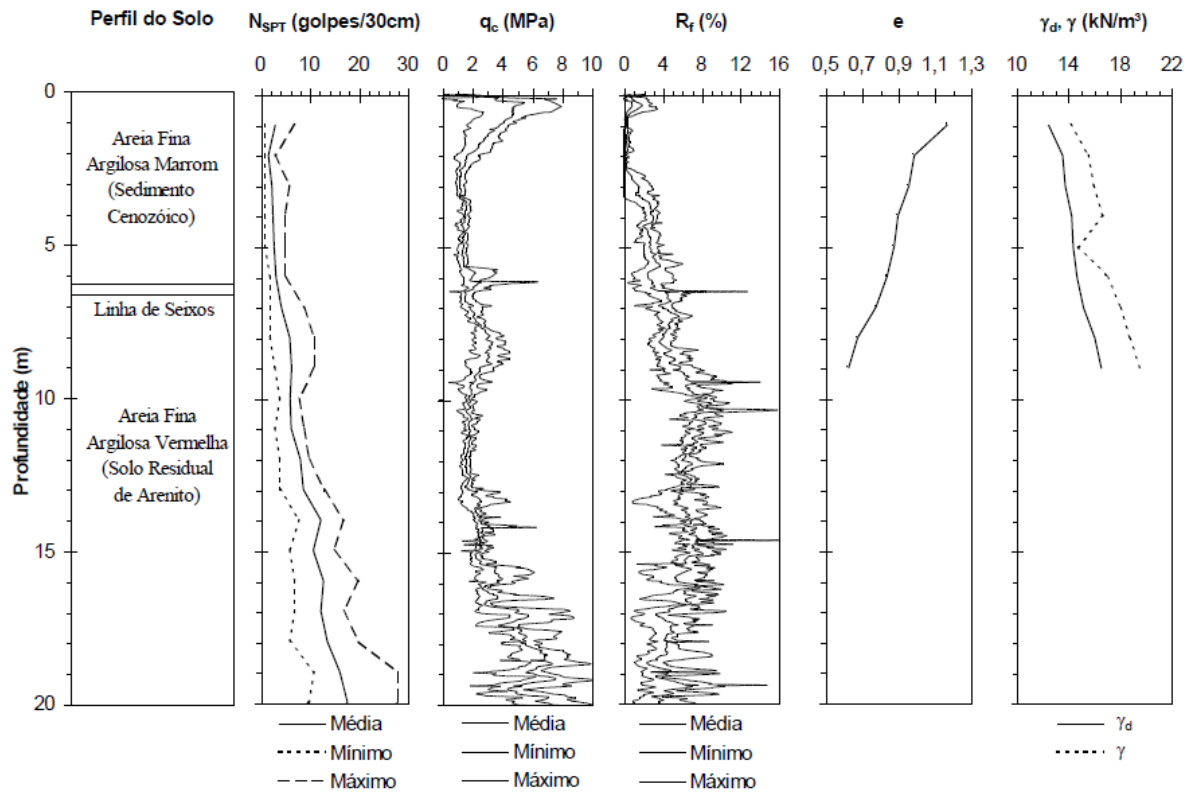


Figura 4.2 Resultados de ensaios penetrométricos de SPT e CPTu (Machado, 1998).

5 ENSAIO DE CAMPO

Para a execução do ensaio SPT, realizado no dia 11 de fevereiro de 2015, foi utilizado equipamento de sondagem tradicional, com acionamento manual. Este ensaio atingiu a profundidade de 10 m e sua localização está mostrada na

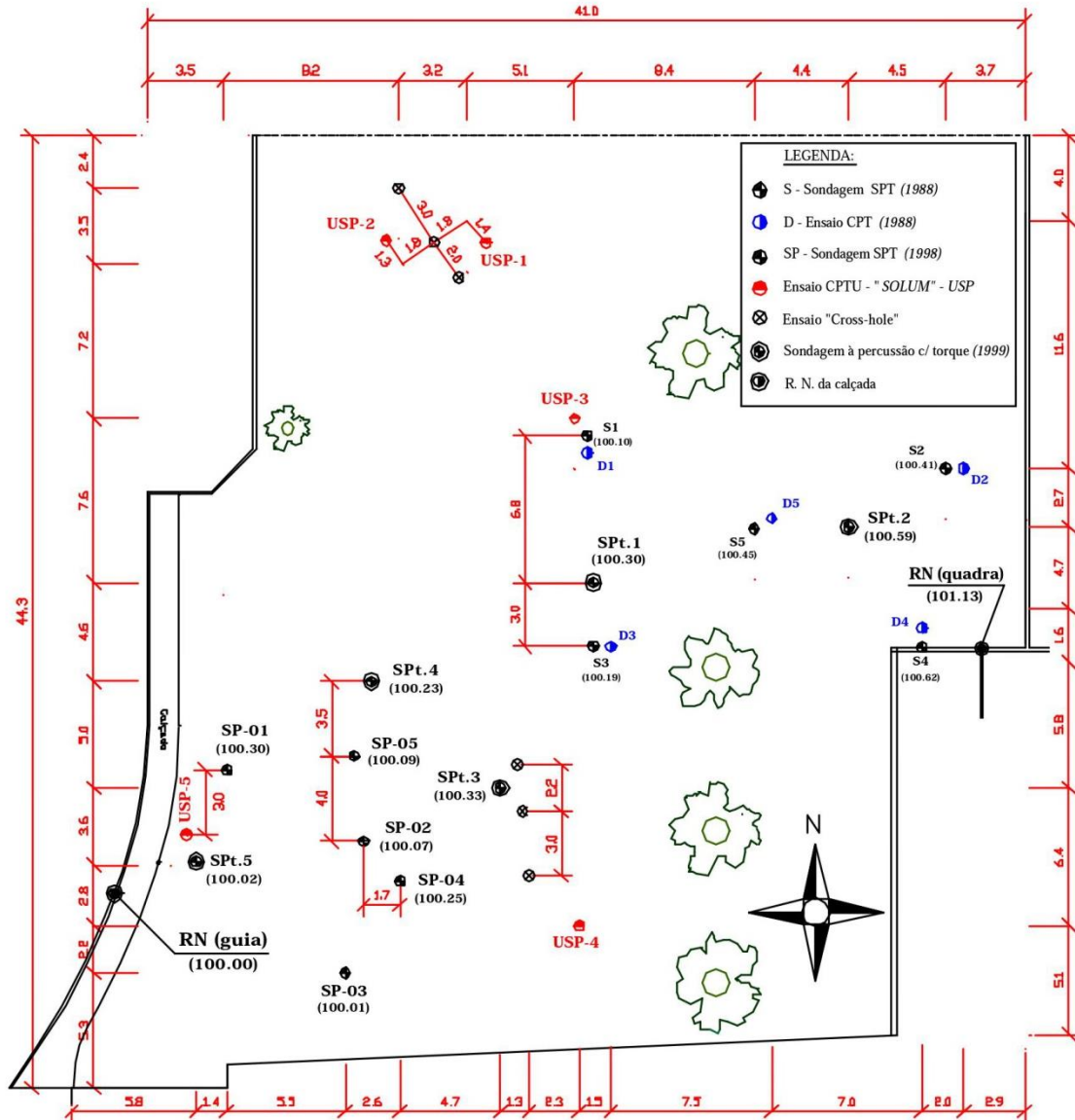


Figura 5.1. Os ensaios foram realizados com instrumentação adequada para avaliar as quantidades de energia a cada metro de profundidade acima do nível freático. Também foram coletadas amostras para a medição da força de atrito interno entre o solo e o amostrador.

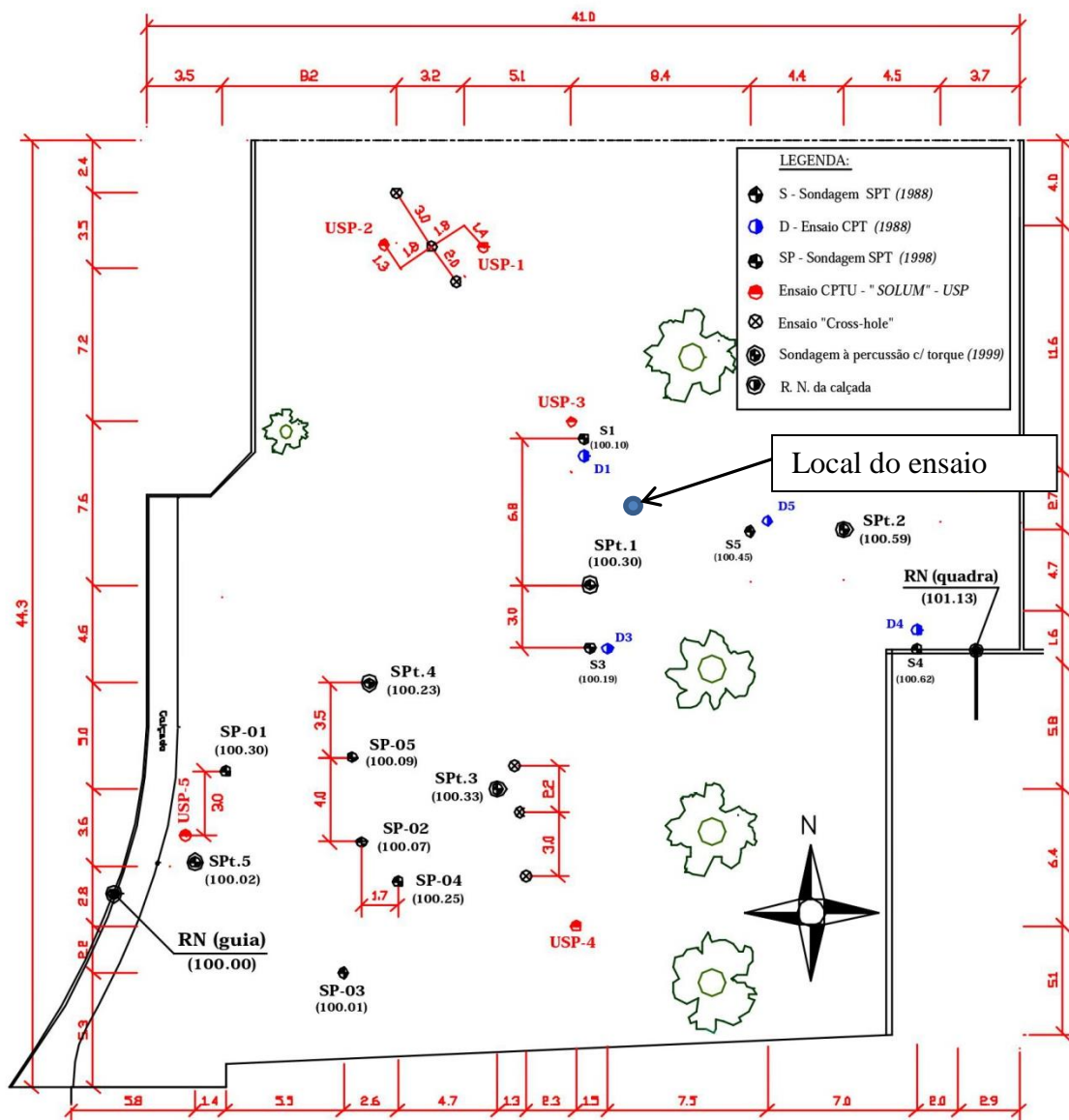


Figura 5.1 Localização da sondagem do SPT ensaios no campo experimental da EESC/USP (adaptado de Vianna, 2005).

5.1 Controle da penetração do amostrador ou deslocamento

A verificação da qualidade da instrumentação foi realizada através da medição da penetração do amostrador (ρ), para cada golpe do martelo (item 3.5). Essas medidas de penetração foram feitas utilizando-se como referência uma linha de nylon fixada em dois piquetes, próxima ao furo de sondagem. Inicialmente era feita uma marca na haste, correspondente à posição da linha. Após o golpe, era medida a distância entre a marca feita anteriormente e a linha de referência, que correspondia à penetração do amostrador no solo (Figura 5.2).



Figura 5.2 Controle da penetração permanente do amostrador por golpe do martelo.

5.2 Medição da força de atrito interna (R_2)

Ao finalizar o ensaio para uma determinada profundidade, o amostrador é desacoplado do conjunto de hastes e montado no suporte, conforme mostrado Figura 5.3. A seguir, com o auxílio do cilindro hidráulico, é aplicada uma força à amostra para deslocá-la, e assim medir a força de atrito interna (R_2) entre o solo e o aço do amostrador, conforme descrito no item 3.10.



Figura 5.3 Equipamento para medir a força de atrito interna.

5.3 Controle da recuperação de amostras

Após de medir a força R_2 , o amostrador preenchido com solo é pesado, para se determinar o peso específico da amostra. A seguir, o amostrador é aberto e o solo recuperado é medido, permitindo verificar a ocorrência ou não de embuchamento (a)
(b)

Figura 5.4). O embuchamento ocorre quando o comprimento da amostra é menor que a penetração do amostrador naquela profundidade. Posteriormente são coletadas porções do solo para a determinação do seu teor de umidade.



(a)



(b)

Figura 5.4 Controle da recuperação de amostra: a) sem embuchamento. b) com embuchamento.

6 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios e a avaliação das quantidades de energia na base da composição das hastes, determinadas através do Método EFV. Também são apresentados os valores da força de atrito interna (R_2), comprimento da amostra, teor de umidade e peso específico para cada metro de profundidade. O ensaio foi executado em solo colapsível até 10 m de profundidade.

A partir dos dados coletados da instrumentação situada na base da composição de hastes, também foram estimadas a eficiência (η), as reações dinâmicas experimentais (R_D) e teóricas (F_d) mobilizadas na cravação do amostrador no solo, as resistências estáticas teóricas (R_s), bem como as demais resistências desenvolvidas no amostrador no momento da sua penetração no solo, obtidas por meio da proposta de Aoki et. al. (2000a, 2007 e 2013).

A Figura 6.1 mostra o perfil dos índices de resistência à penetração (N_{SPT}).

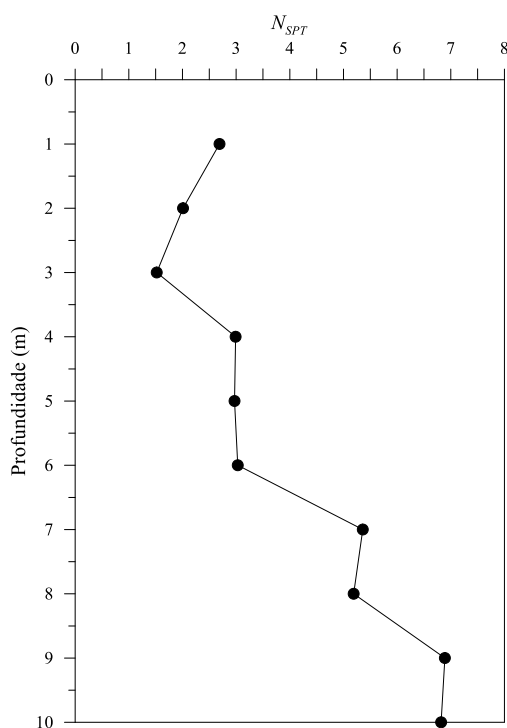


Figura 6.1 Índices de resistência à penetração (N_{SPT}).

6.1 Energia nos ensaios SPT

As quantidades de energia na base da composição de hastes foram determinadas para os golpes correspondentes aos últimos 0,3 m de penetração do amostrador no solo. Na Tabela 6.1, pode-se observar a penetração do amostrador, a quantidade de energia medida na base da

composição das hastes (no topo do amostrador), energia do sistema ($EP_{sistema}$) e a energia potencial do martelo (EP_M).

Tabela 6.1 Valores das quantidades de energia e das penetrações do amostrador.

<i>Prof.</i> <i>(m)</i>	<i>Golpe N°</i>	<i>L_h (m)</i>	<i>N_{SPT}</i>	<i>ρ (m)</i>	<i>E_{Base} (J)</i>	<i>EP_{sistema} (J)</i>	<i>EP_M (J)</i>
1	2	1,28	2,69	0,114	393,50	555,55	550,93
	3			0,106	429,24	550,13	545,83
	4			0,114	432,53	555,55	550,93
	Média			418,42	553,74	549,23	
2	2	2,28	2,01	0,148	411,94	583,30	572,61
	3			0,151	432,08	585,43	574,52
	Média			422,01	584,37	573,57	
3	2	3,28	1,52	0,207	476,47	631,74	610,23
	3			0,187	460,04	616,91	597,48
	Média			468,26	624,33	603,85	
4	2	4,28	2,99	0,116	417,01	567,94	552,20
	3			0,09	403,09	547,83	535,63
	4			0,095	435,75	551,70	538,81
	Média			418,62	555,82	542,22	
5	2	5,28	2,97	0,091	336,44	551,49	536,26
	3			0,109	389,68	565,98	547,74
	4			0,103	375,23	561,15	543,92
	Média			367,12	559,54	542,64	
6	2	6,28	3,03	0,135	438,69	591,18	564,32
	3			0,075	350,26	540,99	526,06
	4			0,087	420,94	551,03	533,71
	Média			403,30	561,06	541,36	
7	3	7,28	5,36	0,062	363,47	532,07	517,77
	4			0,064	380,14	533,81	519,05
	5			0,049	361,81	520,79	509,48
	6			0,048	359,87	519,92	508,84
	7			0,057	383,97	527,73	514,58
	Média			369,85	526,86	513,95	
8	2	8,28	5,19	0,081	364,66	551,14	529,89
	3			0,061	353,92	533,14	517,13
	4			0,051	341,13	524,14	510,76
	5			0,046	345,76	519,64	507,57
	6			0,05	360,07	523,24	510,12
	Média			353,11	530,26	515,09	

<i>Prof.</i> (<i>m</i>)	<i>Golpe N</i> •	<i>L_h</i> (<i>m</i>)	<i>N_{SPT}</i>	<i>ρ</i> (<i>m</i>)	<i>E_{Base}</i> (<i>J</i>)	<i>EP_{sistema}</i> (<i>J</i>)	<i>EP_M</i> (<i>J</i>)
9	4	9,28	6,89	0,045	339,98	520,16	506,93
	5			0,041	327,68	516,44	504,38
	6			0,044	329,81	519,23	506,29
	7			0,05	362,33	524,82	510,12
	8			0,04	343,76	515,51	503,74
	9			0,037	330,33	512,71	501,83
	10			0,048	370,77	522,96	508,84
	Média			343,52	518,83	506,02	
10	3	10,28	6,82	0,047	320,68	523,52	508,21
	4			0,053	367,01	529,30	512,03
	5			0,048	364,58	524,48	508,84
	6			0,046	362,67	522,55	507,57
	7			0,039	353,27	515,81	503,11
	8			0,036	335,27	512,92	501,19
	9			0,039	354,11	515,81	503,11
	Média			351,08	520,63	506,29	

As quantidades de energia foram obtidas através de uma rotina em Matlab®, desenvolvida por Moraes (2014), usando as equações 2.30, 2.32 e considerando $EP_M = EP_i + (\Delta\rho \times M_m \times g)$ como a energia potencial do martelo.

As diferenças entre a energia potencial nominal (EP_i) e a energia potencial do sistema ($EP_{sistema}$), apresentados na Tabela 6.1, mostram a importância da correção da energia sugerida por Odebrecht (2003).

A energia potencial do sistema nas camadas de solo de maior resistência ($N_{SPT} > 5$) foi 8,5% maior que a energia potencial teórica (478,2 J), enquanto que nas camadas de menor resistência ($N_{SPT} < 3$) esse valor chegou a 30,6%.

A Figura 6.2 apresenta as curvas de valores médios das quantidades de energia na base da composição de hastes e de energia do sistema, corrigida de acordo com Odebrecht (2003). Pode-se observar que essas curvas apresentam uma tendência de paralelismo. A distância entre as duas curvas corresponde às perdas de energia, as quais podem ser representadas pela eficiência (η).

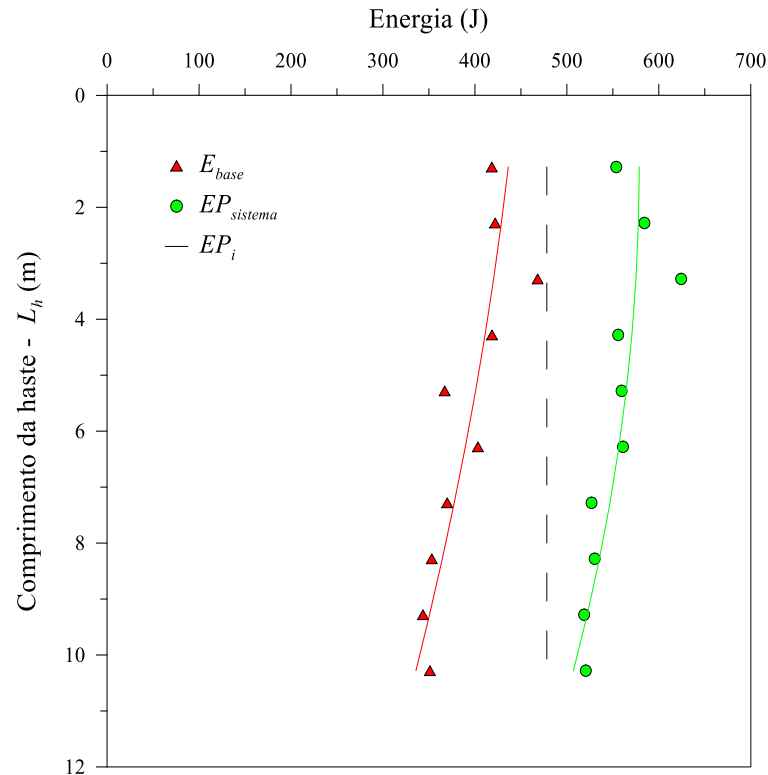


Figura 6.2 Valores médios de energia *versus* comprimento de haste.

As tendências das curvas da Figura 6.2 mostram que quanto menor o comprimento da composição de hastes, maior é a quantidade de energia do sistema, e maior é a quantidade de energia que chega ao amostrador.

Da Figura 6.3 à Figura 6.5 são mostrados valores das quantidades de energia em função da penetração do amostrador, para diferentes comprimentos da composição de hastes (L_h). Pode-se dizer que para um mesmo comprimento de composição de haste (L_h), a quantidade de energia medida acima do amostrador (E_{Base}) tende a aumentar com o aumento da penetração (ρ). O mesmo ocorre para a energia potencial do sistema e a energia potencial do martelo, pois ambos dependem da penetração do amostrador no solo. Pode-se então concluir que quanto menor for a resistência do solo, maior será a quantidade de energia que atinge o amostrador.

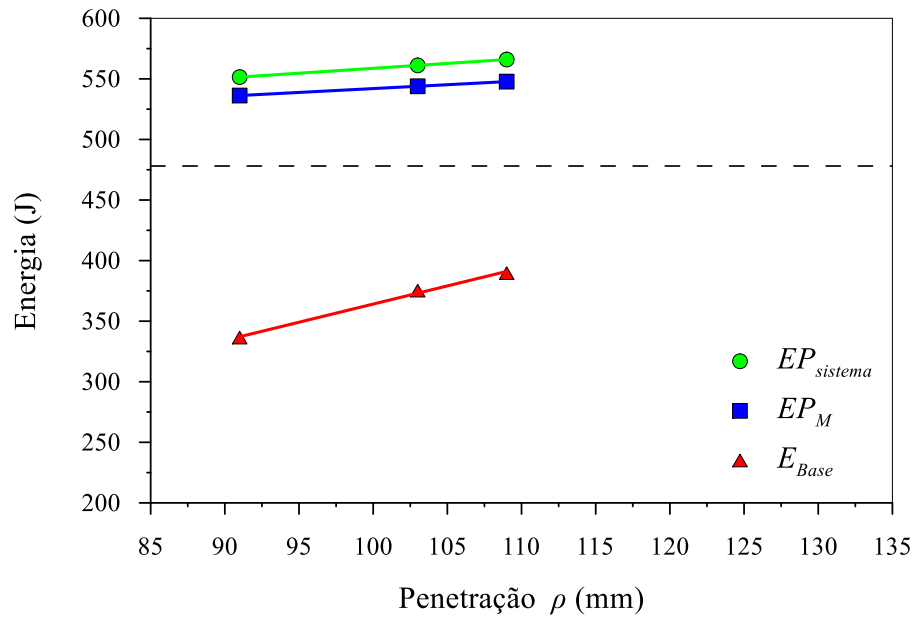


Figura 6.3 Energia versus penetração para $L_h=5,28$ m.

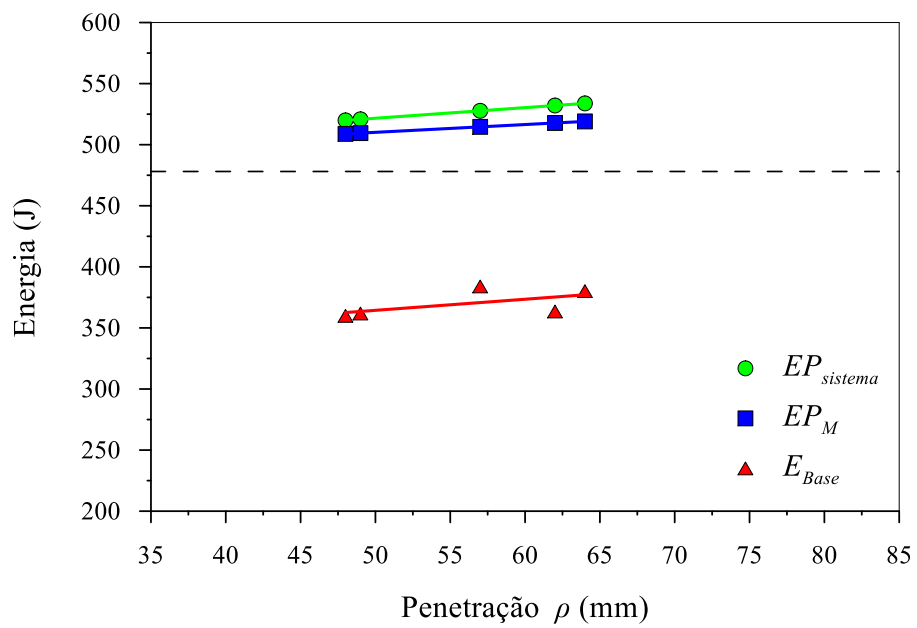


Figura 6.4 Energia versus penetração para $L_h=7,28$ m.

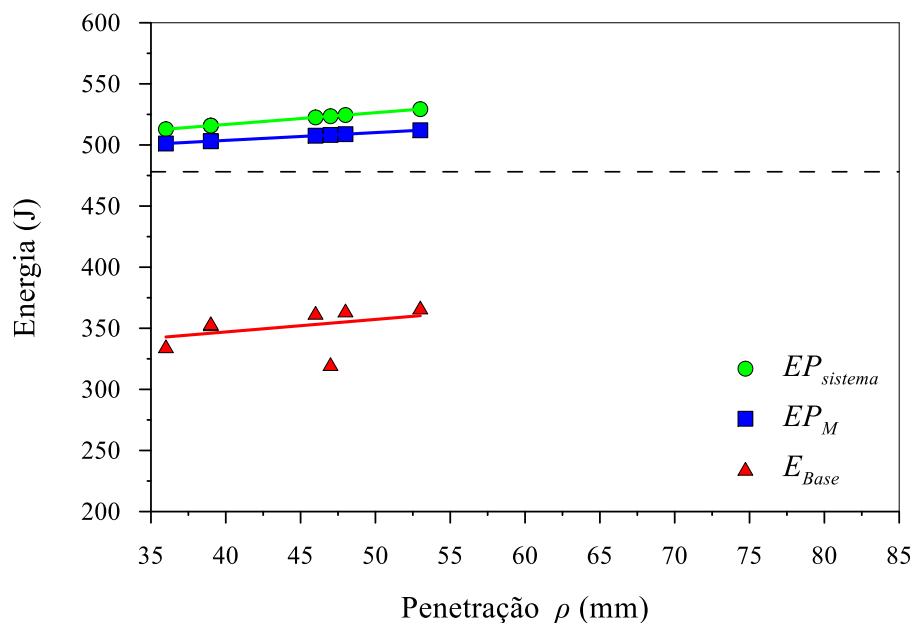


Figura 6.5 Energia versus penetração para $L_h=10,28$ m.

6.2 Eficiência

A Tabela 6.2 apresenta os valores de eficiência (η) do ensaio SPT, para cada profundidade, os quais foram determinados através da relação entre a energia obtida a partir da instrumentação e a energia potencial do sistema para os últimos 0,3 m da penetração do amostrador no solo (Item 2.7). Nessa tabela também são mostradas a energia medida na base das hastes (E_{Base}) e a penetração (ρ). A Tabela 6.3 mostra o valor médio das eficiências na base da composição de hastes, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Tabela 6.2 Resultados de eficiência.

<i>Prof. (m)</i>	<i>Golpe N°</i>	<i>L_h (m)</i>	<i>N_{SPT}</i>	<i>ρ (m)</i>	<i>E_{Base} (J)</i>	<i>η (%)</i>
1	2	1,28	2,69	0,114	393,50	70,83
	3			0,106	429,24	78,03
	4			0,114	432,53	77,86
	Média				418,42	75,57
	σ_d (%)					3,35
2	2	2,28	2,01	0,148	411,94	70,62
	3			0,151	432,08	73,81
	Média				422,01	72,21
	σ_d (%)					1,59
	cv (%)					2,20

<i>Prof. (m)</i>	<i>Golpe N°</i>	<i>L_h (m)</i>	<i>N_{SPT}</i>	<i>ρ (m)</i>	<i>E_{Base} (J)</i>	<i>η (%)</i>
3	2	3,28	1,52	0,207	476,47	75,42
	3			0,187	460,04	74,57
	Média			468,26	75,00	
	σd (%)				0,42	
	cv (%)				0,57	
4	2	4,28	2,99	0,116	417,01	73,43
	3			0,09	403,09	73,58
	4			0,095	435,75	78,98
	Média			418,62	75,33	
	σd (%)				2,58	
cv (%)		3,43				
5	2	5,28	2,97	0,091	336,44	61,01
	3			0,109	389,68	68,85
	4			0,103	375,23	66,87
	Média			367,12	65,58	
	σd (%)				3,33	
cv (%)		5,08				
6	2	6,28	3,03	0,135	438,69	74,21
	3			0,075	350,26	64,74
	4			0,087	420,94	76,39
	Média			403,30	71,78	
	σd (%)				5,06	
cv (%)		7,04				
7	3	7,28	5,36	0,062	363,47	68,31
	4			0,064	380,14	71,21
	5			0,049	361,81	69,47
	6			0,048	359,87	69,22
	7			0,057	383,97	72,76
Média	369,85	70,19				
σd (%)		1,59				
cv (%)		2,26				
8	2	8,28	5,19	0,081	364,66	66,16
	3			0,061	353,92	66,39
	4			0,051	341,13	65,08
	5			0,046	345,76	66,54
	6			0,05	360,07	68,82
Média	353,11	66,60				
σd (%)		1,22				
cv (%)		1,83				

<i>Prof. (m)</i>	<i>Golpe N°</i>	<i>L_h (m)</i>	<i>N_{SPT}</i>	<i>ρ (m)</i>	<i>E_{Base} (J)</i>	<i>η (%)</i>
9	4	9,28	6,89	0,045	339,98	65,36
	5			0,041	327,68	63,45
	6			0,044	329,81	63,52
	7			0,05	362,33	69,04
	8			0,04	343,76	66,68
	9			0,037	330,33	64,43
	10			0,048	370,77	70,90
	Média			343,52	66,20	
	σd (%)				2,64	
	cv (%)				4,00	
10	3	10,28	6,82	0,047	320,68	61,26
	4			0,053	367,01	69,34
	5			0,048	364,58	69,51
	6			0,046	362,67	69,40
	7			0,039	353,27	68,49
	8			0,036	335,27	65,36
	9			0,039	354,11	68,65
	Média			351,08	67,43	
	σd (%)				2,85	
	cv (%)				4,23	

Tabela 6.3 Valores médios de eficiência.

<i>η (%)</i>	<i>σd (%)</i>	<i>cv (%)</i>
70,59	2,46	3,51

A Figura 6.6 mostra os valores de eficiência em função do comprimento da composição de hastes. Pode-se observar nessa figura que a eficiência praticamente não depende do comprimento da composição de hastes.

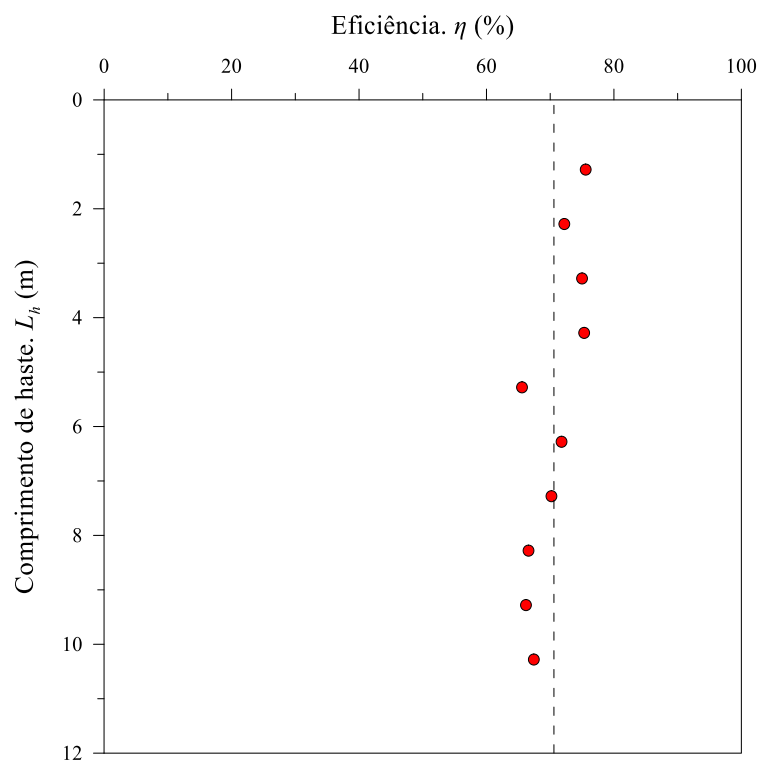


Figura 6.6 Eficiência *versus* comprimento de haste.

As Figura 6.7 a Figura 6.9 mostram a eficiência *versus* penetração, para diferentes comprimentos da composição de hastes (L_h). Da mesma forma como foi observado nas Figura 6.3 a Figura 6.5, que mostram energia *versus* penetração, pode-se notar que para um mesmo comprimento de haste (L_h), a eficiência (η) tende a aumentar com a penetração (ρ). Isso significa que a energia medida na base da composição das hastes (E_{Base}) cresce numa maior proporção que a energia do sistema ($E_{sistema}$).

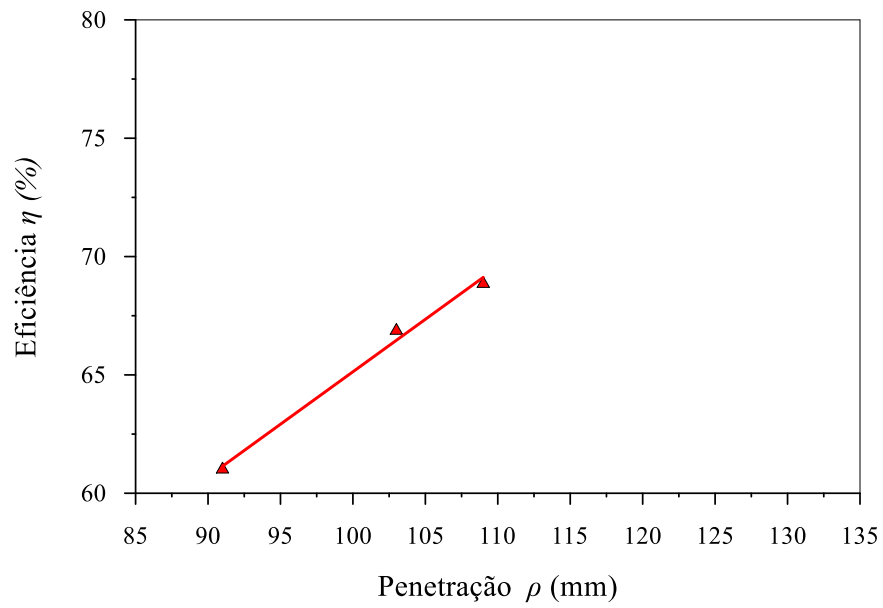


Figura 6.7 Eficiência *versus* penetração para $L_h=5,28$ m.

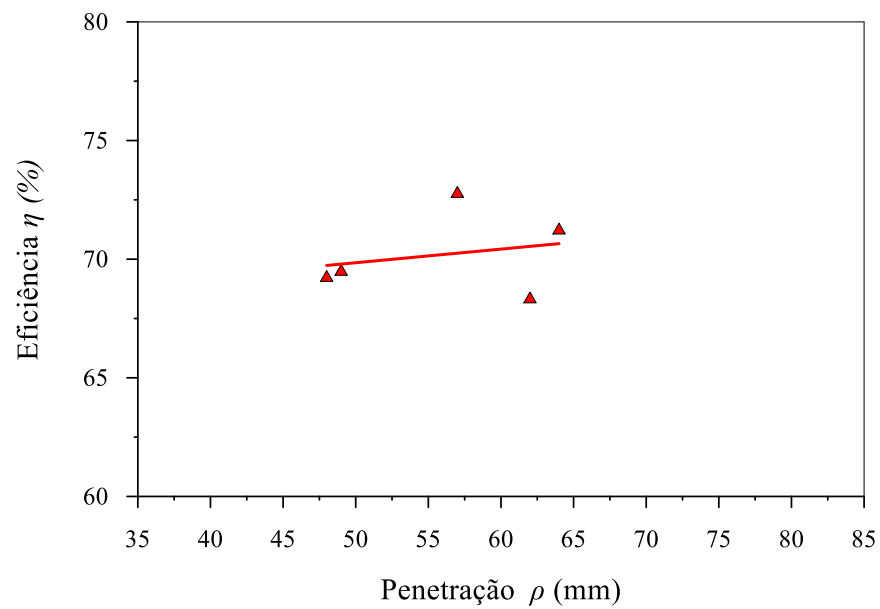


Figura 6.8 Eficiência *versus* penetração para $L_h=7,28$ m.

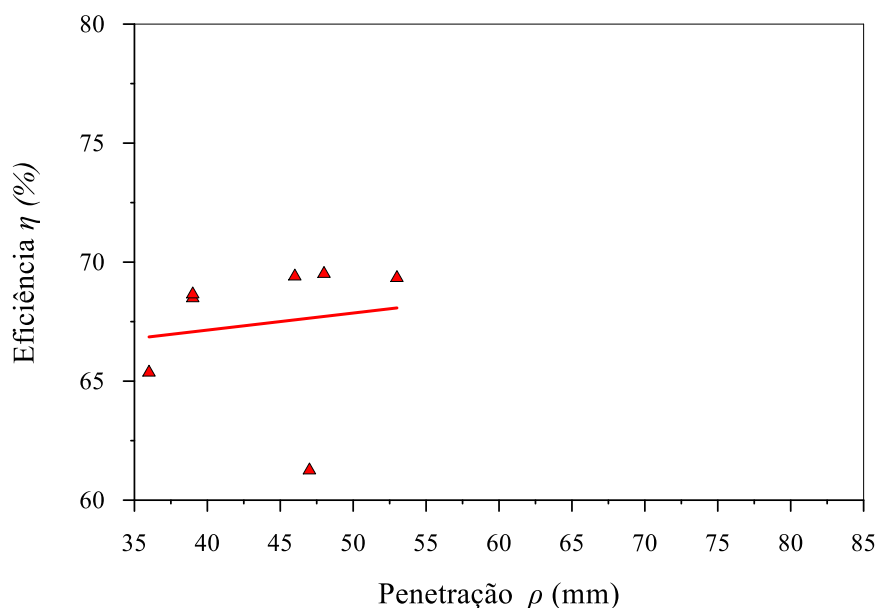


Figura 6.9 Eficiência versus penetração para $L_h=10,28$ m.

Na Tabela 6.4 são mostrados os resultados da eficiência (η) do ensaio SPT, os valores da energia que atinge o amostrador ($E_{amostrador}$), calculados através da Equação 2.35, bem como as eficiências do martelo (η_1), da composição de hastes (η_2) e do sistema (η_3), calculadas por meio das seguintes equações (item 2.7):

$$\eta_1 = \frac{\left(\int_0^{\infty} F(t) \times v(t) dt \right)}{(0,75 + \Delta\rho) \times M_m \times g}; \quad \eta_2=1 \text{ e } \eta_3=1-0,0042L_h, \text{ onde } L_h \text{ é o comprimento total da composição de hastes.}$$

Tabela 6.4 Resultados de eficiência do ensaio SPT e das eficiências do martelo e do sistema.

<i>Prof. (m)</i>	<i>Golpe N*</i>	<i>L_h (m)</i>	<i>N_{SPT}</i>	<i>ρ (m)</i>	<i>E_{Base} (J)</i>	<i>η (%)</i>	<i>E_{amostrador} (J)</i>	<i>η₁ (%)</i>	<i>η₃ (%)</i>
1	2	1,28	2,69	0,11	393,50	70,83	395,96	71,42	99,46
	3			0,11	429,24	78,03	431,18	78,64	99,46
	4			0,11	432,53	77,86	434,78	78,51	99,46
Média					418,42	75,57	420,64	76,19	99,46
2	2	2,28	2,01	0,15	411,94	70,62	418,56	71,94	99,04
	3			0,15	432,08	73,81	438,72	75,21	99,04
	Média					422,01	72,21	428,64	73,57
3	2	3,28	1,52	0,21	476,47	75,42	491,09	78,08	98,62
	3			0,19	460,04	74,57	472,85	77,00	98,62

		Média		468,26	75,00	481,97	77,54	98,62	
<i>Prof. (m)</i>	<i>Golpe N°</i>	<i>L_h (m)</i>	<i>N_{SPT}</i>	<i>ρ (m)</i>	<i>E_{Base} (J)</i>	<i>η (%)</i>	<i>E_{amostrador} (J)</i>	<i>η₁ (%)</i>	<i>η₃ (%)</i>
4	2	4,28	2,99	0,12	417,01	73,43	424,94	75,52	98,20
	3			0,09	403,09	73,58	407,81	75,26	98,20
	4			0,10	435,75	78,98	440,53	80,87	98,20
	Média			418,62	75,33	424,43	77,22	98,20	
5	2	5,28	2,97	0,12	336,44	61,01	343,85	62,74	97,78
	3			0,09	389,68	68,85	398,84	71,14	97,78
	4			0,10	375,23	66,87	383,74	68,99	97,78
	Média			367,12	65,58	375,48	67,62	97,78	
6	2	6,28	3,03	0,14	438,69	74,21	453,25	77,74	97,36
	3			0,08	350,26	64,74	355,52	66,58	97,36
	4			0,09	420,94	76,39	426,67	78,87	97,36
	Média			403,30	71,78	411,81	74,40	97,36	
7	3	7,28	5,36	0,06	363,47	68,31	366,20	70,20	96,94
	4			0,06	380,14	71,21	382,80	73,24	96,94
	5			0,05	361,81	69,47	361,67	71,01	96,94
	6			0,05	359,87	69,22	359,57	70,72	96,94
	7			0,06	383,97	72,76	384,95	74,62	96,94
	Média			369,85	70,19	371,04	71,96	96,94	
8	2	8,28	5,19	0,08	364,66	66,16	372,47	68,82	96,52
	3			0,06	353,92	66,39	357,04	68,44	96,52
	4			0,05	341,13	65,08	342,16	66,79	96,52
	5			0,05	345,76	66,54	345,36	68,12	96,52
	6			0,05	360,07	68,82	360,19	70,59	96,52
	Média			353,11	66,60	355,44	68,55	96,52	
9	4	9,28	6,89	0,05	339,98	65,36	339,42	67,07	96,10
	5			0,04	327,68	63,45	326,47	64,97	96,10
	6			0,04	329,81	63,52	329,37	65,14	96,10
	7			0,05	362,33	69,04	362,31	71,03	96,10
	8			0,04	343,76	66,68	341,64	68,24	96,10
	9			0,04	330,33	64,43	327,89	65,82	96,10
	10			0,05	370,77	70,90	369,86	72,87	96,10
	Média			343,52	66,20	342,42	67,88	96,10	
10	3	10,28	6,82	0,05	320,68	61,26	321,46	63,10	95,68
	4			0,05	367,01	69,34	367,66	71,68	95,68
	5			0,05	364,58	69,51	363,77	71,65	95,68
	6			0,05	362,67	69,40	361,32	71,45	95,68
	7			0,04	353,27	68,49	350,15	70,22	95,68
	8			0,04	335,27	65,36	331,99	66,89	95,68
	9			0,04	354,11	68,65	350,95	70,39	95,68
	Média			351,08	67,43	349,62	69,34	95,68	

Pode-se observar na Tabela 6.4, que a energia medida na base da composição das hastes (E_{Base}) é menor do que a energia que atinge o amostrador, calculada de acordo com o procedimento proposto por Odebrecht et al. (2005), para comprimentos de composição de haste inferiores a 7,28 m. Entretanto, ao aumentar o comprimento da composição de hastes, a energia E_{Base} se aproxima da quantidade de energia no amostrador, determinada segundo o procedimento de Odebrecht et al. (2005), até ultrapassá-la. Isto ocorre porque para grandes comprimentos da composição de hastes, a eficiência do sistema (η_3) passa a interferir no valor calculado de $E_{amostrador}$, que diminui de um valor de quase de 100% para 96%.

6.3 Influência das condições do solo nas quantidades de energia no ensaio SPT

A existência de vários subfatores relacionados com a condição do solo (resistência ao cisalhamento, compacidade ou consistência, grau de saturação, permeabilidade, forma, tamanho e distribuição dos grãos (no caso de solos granulares)), torna-a um dos fatores mais difíceis de serem quantificados no processo de transferência de energia.

Nas Figura 6.10 a Figura 6.13, são mostrados resultados típicos de força, velocidade multiplicada pela impedância, deslocamento e energia nos ensaios realizados. Mais resultados representativos deste trabalho são expostos no Apêndice B. As Figura 6.10 e Figura 6.11, que representam o solo mais superficial (de 0 m a 6 m), o qual têm uma baixa resistência ($N_{SPT} \leq 3$) e compacidade de muito fofa a fofa, apresenta um maior número de impactos subsequentes num golpe durante a cravação do amostrador, quando comparado com as camadas mais profundas (7 m a 10 m), as quais são mais resistentes e com uma compacidade media (Figura 6.12e Figura 6.13).

Deve-se observar que o tempo decorrido entre dois impactos consecutivos depende do tipo do solo e que o número de impactos em um mesmo golpe depende do comprimento da haste.

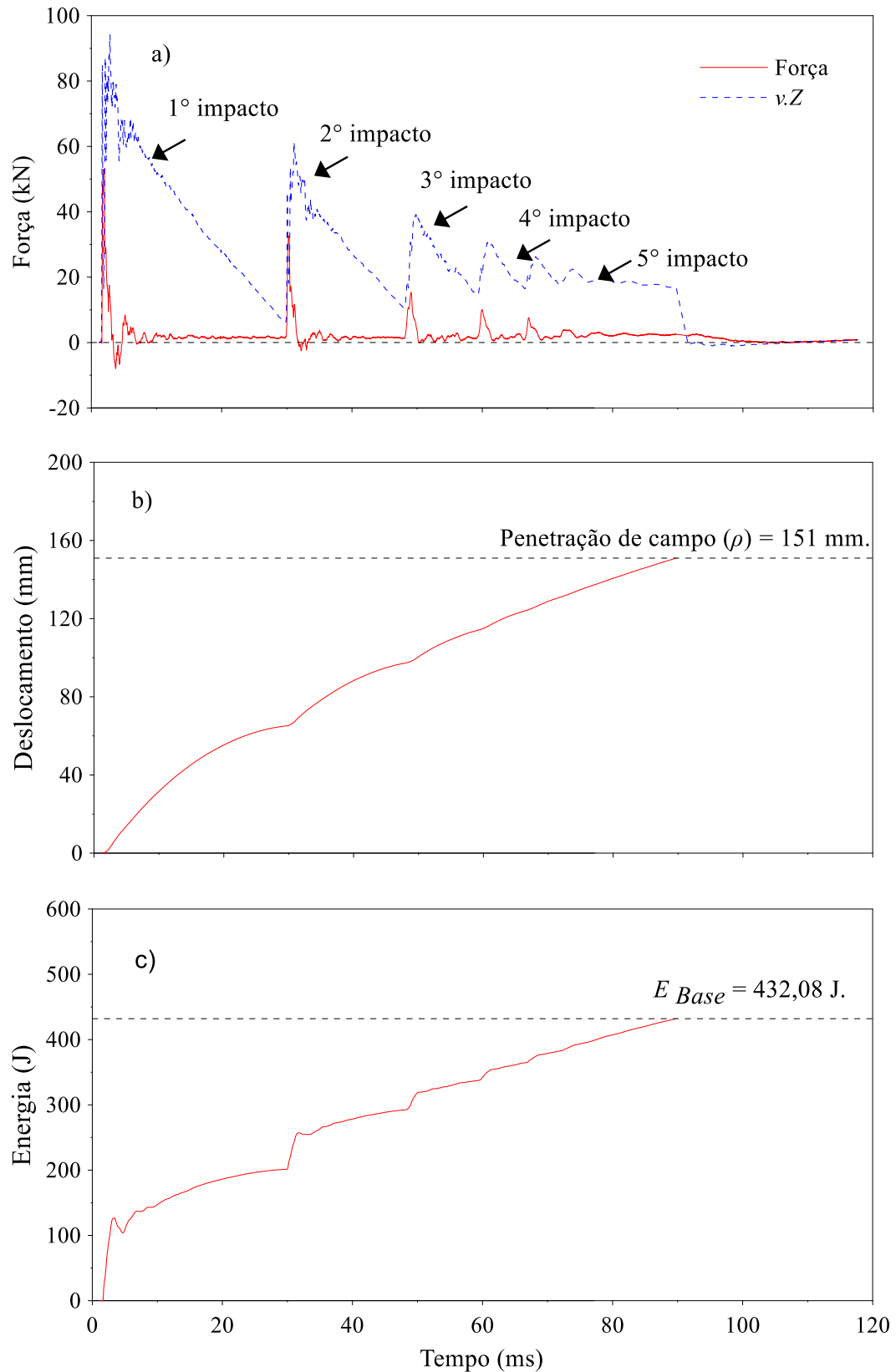


Figura 6.10 Efeito das condições do solo: $L_h = 2,28$ m, golpe 3 e $N_{SPT} = 2,01$. a) Sinais de força versus tempo e $v.Z$ versus tempo; b) Deslocamento, calculado a partir da velocidade; c) Energia entregue ao solo.

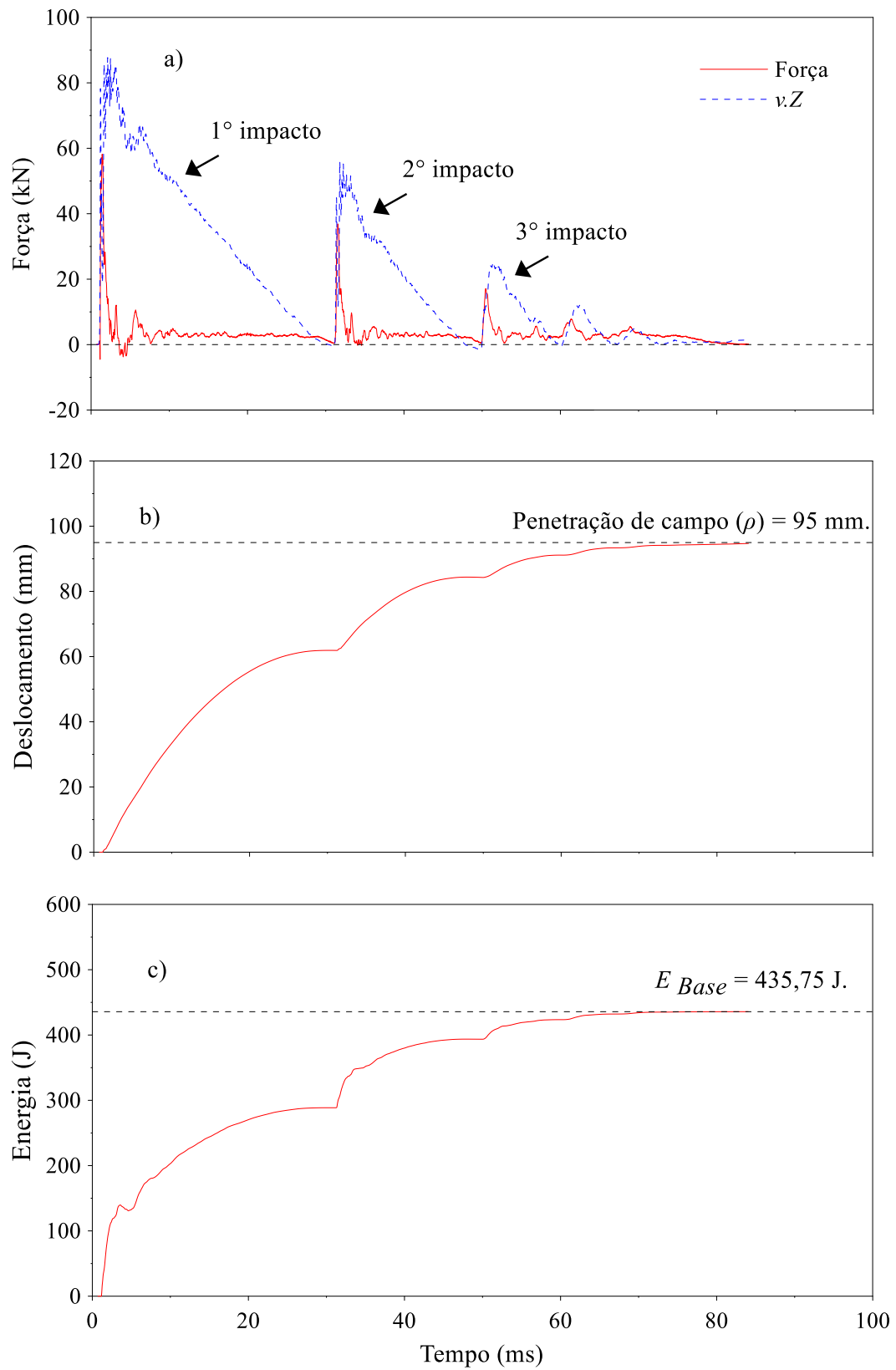


Figura 6.11 Efeito das condições do solo: $L_h = 4,28$ m, golpe 4 e $N_{SPT} = 2,99$. a) Sinais de força *versus* tempo e $v.Z$ *versus* tempo; b) Deslocamento, calculado a partir da velocidade; c) Energia entregue ao solo.

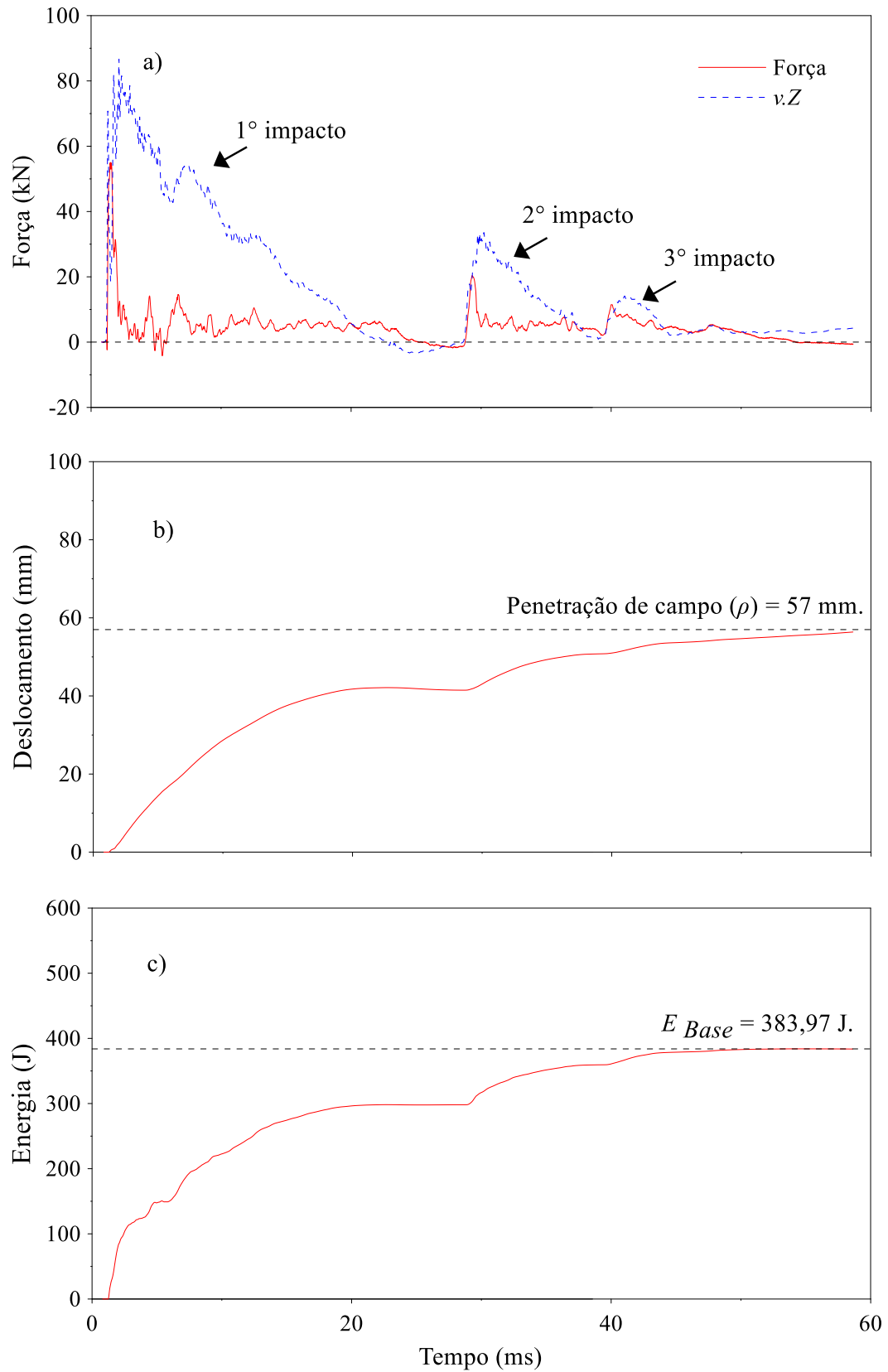


Figura 6.12 Efeito das condições do solo: $L_h = 7,28$ m, golpe 7 e $N_{SPT} = 5,36$. a) Sinais de força *versus* tempo e $v.Z$ *versus* tempo; b) Deslocamento, calculado a partir da velocidade; c) Energia entregue ao solo.

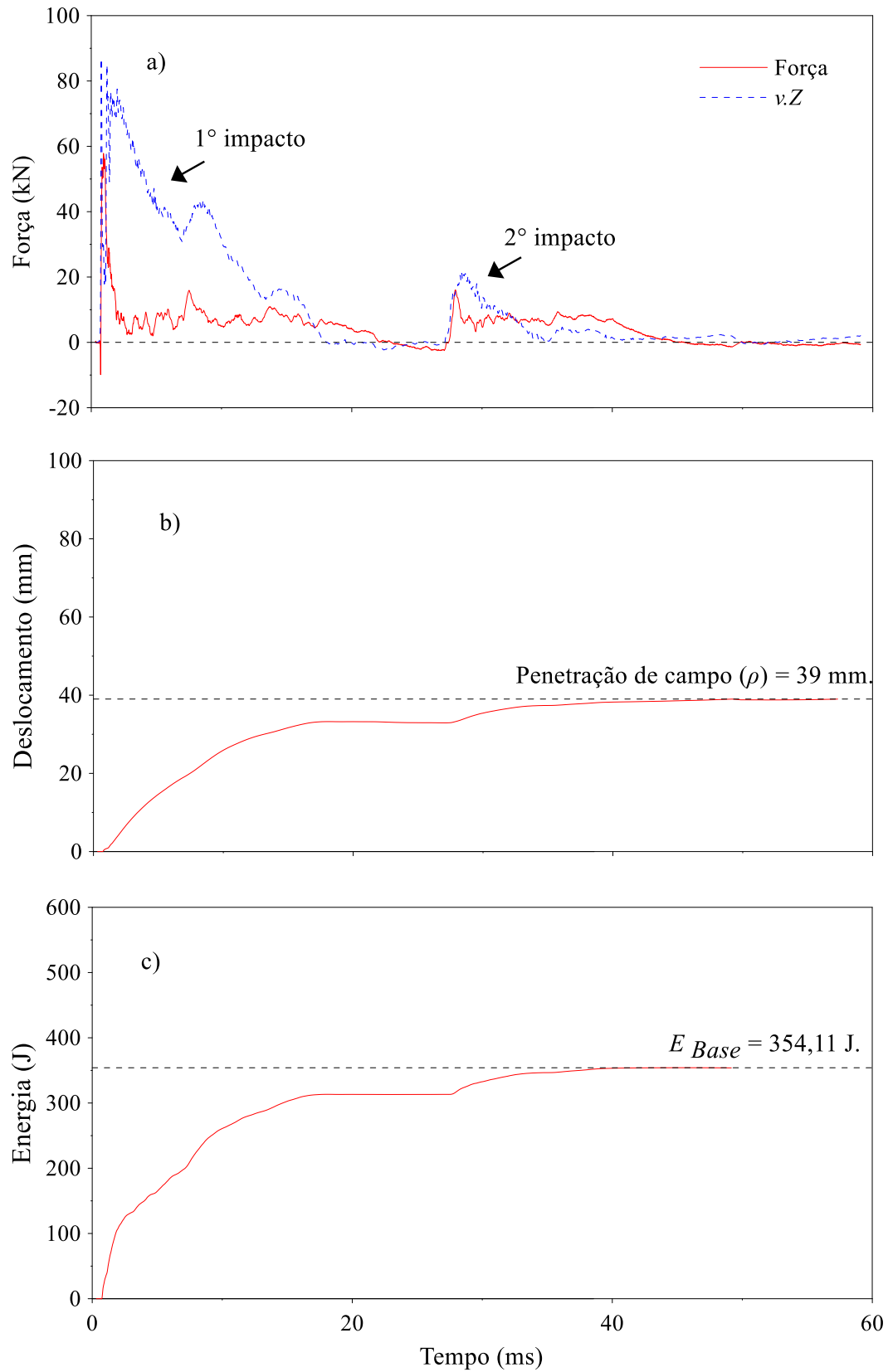


Figura 6.13 Efeito das condições do solo: $L_h = 10,28$ m, golpe 9 e $N_{SPT} = 6,82$. a) Sinais de força versus tempo e $v.Z$ versus tempo; b) Deslocamento, calculado a partir da velocidade; c) Energia entregue ao solo.

Nas figuras anteriores (Figura 6.10 a Figura 6.13) pode-se observar que o intervalo de tempo de dissipação da energia disponibilizada para a penetração do amostrador no solo, é maior para solos com menor resistência (Figura 6.10 e Figura 6.11), do que para solos com maior resistência. No primeiro caso, o tempo médio para a dissipação é de 92,5 ms, enquanto que para o segundo caso esse tempo é de 55 ms. A razão disto é que para solos mais resistentes, essa energia disponibilizada é rapidamente consumida na cravação do amostrador, resultando num número menor de impactos subsequentes. Já com os solos com menor resistência, as ondas refletidas apresentam maior intensidade e retornam ao sistema com energia suficiente para causar deslocamentos adicionais no amostrador. Essa maior intensidade das ondas refletidas se deve ao fato de que os solos com menor resistência consomem menos energia por ciclo de carregamento devido à reduzida força de reação do solo (Lobo, 2009).

A penetração provocada pela força referente ao primeiro impacto nos solos menos resistentes (Figura 6.10 e Figura 6.11) varia de 43% a 65% da penetração total provocada pelo golpe. Nos solos de maior resistência (Figura 6.12 e Figura 6.13) essa proporção é maior, variando de 75% a 83%. Isto confirma o que foi anteriormente mencionado, onde nos solos de menor resistência, as ondas refletidas possuem maior intensidade e retornam ao sistema com energia suficiente para causar deslocamentos adicionais no amostrador, diferentemente do que acontece nos solos de maior resistência.

Também se pode notar, principalmente na Figura 6.10 e Figura 6.11 (solos de menor resistência), que à medida que avança o processo da cravação do amostrador no solo, os intervalos de tempo entre os impactos subsequentes diminuem. Isso se deve ao fato de que à medida que ocorre a penetração, o solo vai adquirindo resistência, provocando uma diminuição na intensidade da onda refletida e nos intervalos de tempo entre os impactos.

6.4 Resistência dinâmica do solo no ensaio SPT (R_D)

Neste trabalho, assumiu-se que a resistência dinâmica do solo (R_D), durante a penetração, é similar a de uma haste com extremidade semi-engastada, (item 2.5.1.3). Assim, a resistência dinâmica do solo para um impacto, pode ser obtida a partir da medida direta da força na célula de carga situada na haste instrumentada acima do amostrador (item 3.8).

Como um golpe tem vários impactos, se optou por seguir a proposta de Lukiantchuki (2012), para se determinar a resistência dinâmica do solo. Assim, a resistência dinâmica do solo para um golpe (R_{di}), é considerada como sendo a média das forças correspondentes aos

impactos, durante o intervalo de tempo em que ocorre a penetração do amostrador SPT no solo. As Figura 6.14 a Figura 6.17, se mostram sinais de força e seus respectivos deslocamentos.

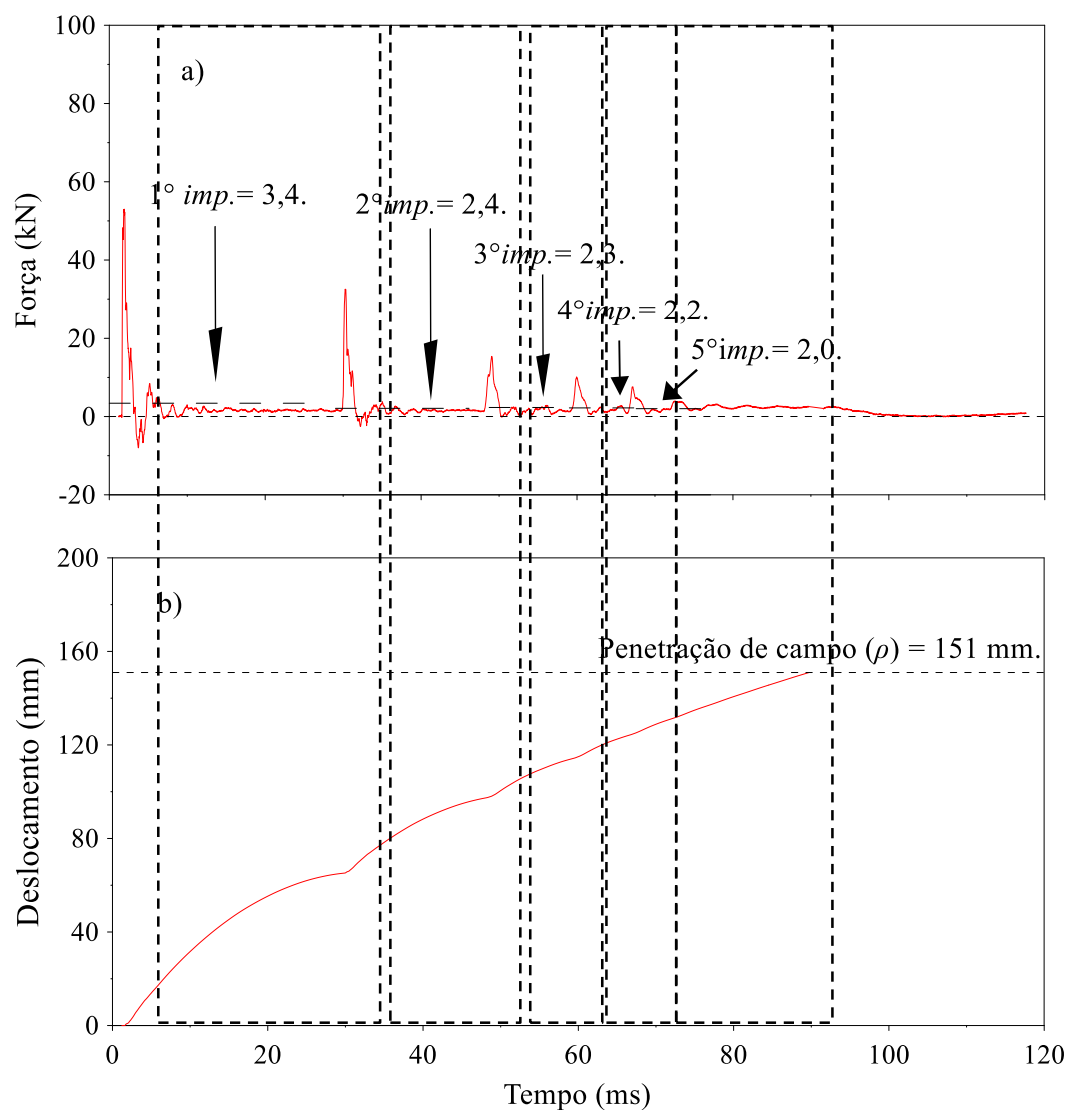


Figura 6.14 a) Resistência dinâmica do solo; b) deslocamento calculado a partir da velocidade e penetração medida em campo. Profundidade 2 m, golpe 3.

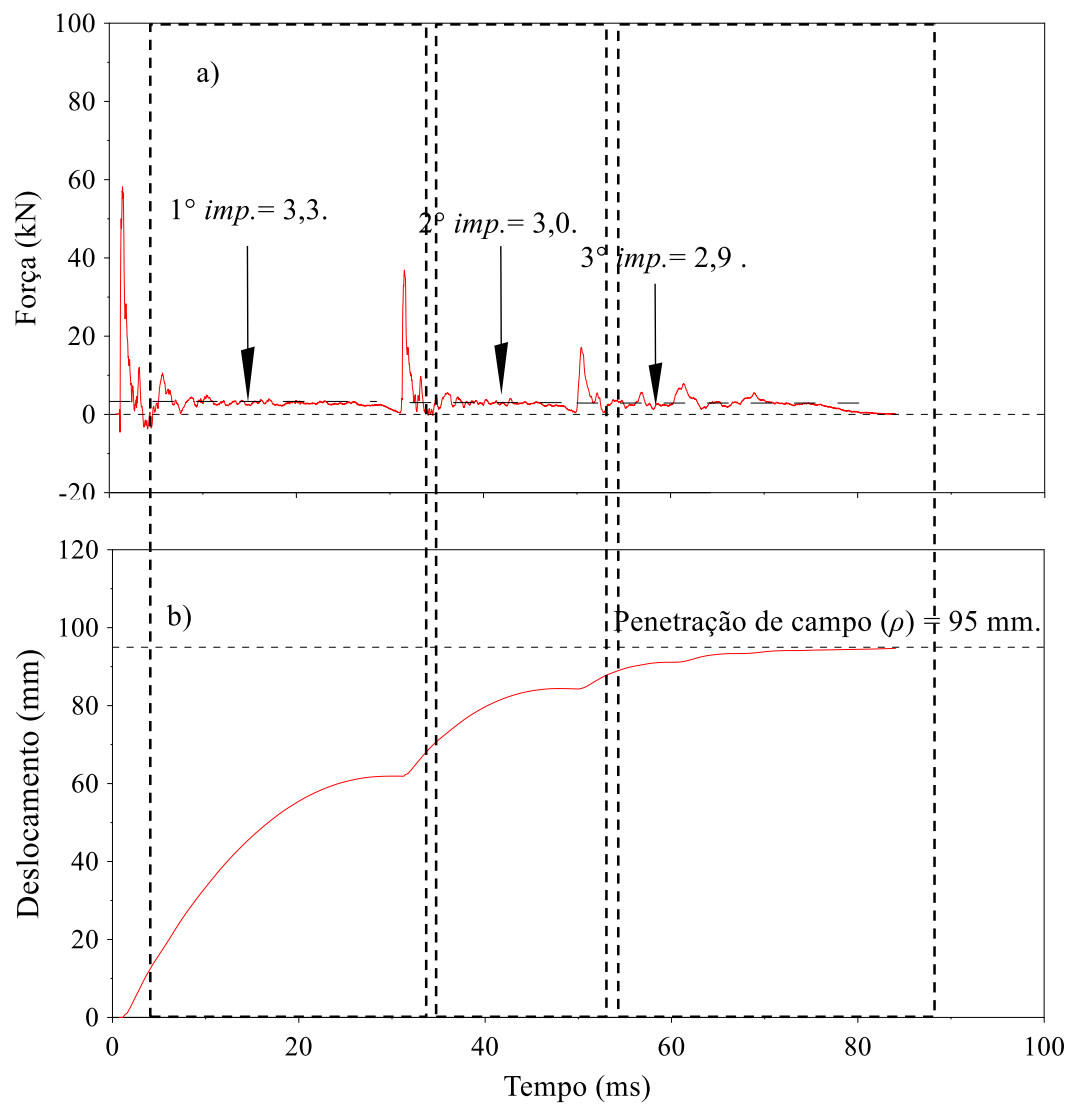


Figura 6.15 Resistência dinâmica do solo; b) deslocamento calculado a partir da velocidade e penetração medida em campo. Profundidade 4 m, golpe 4.

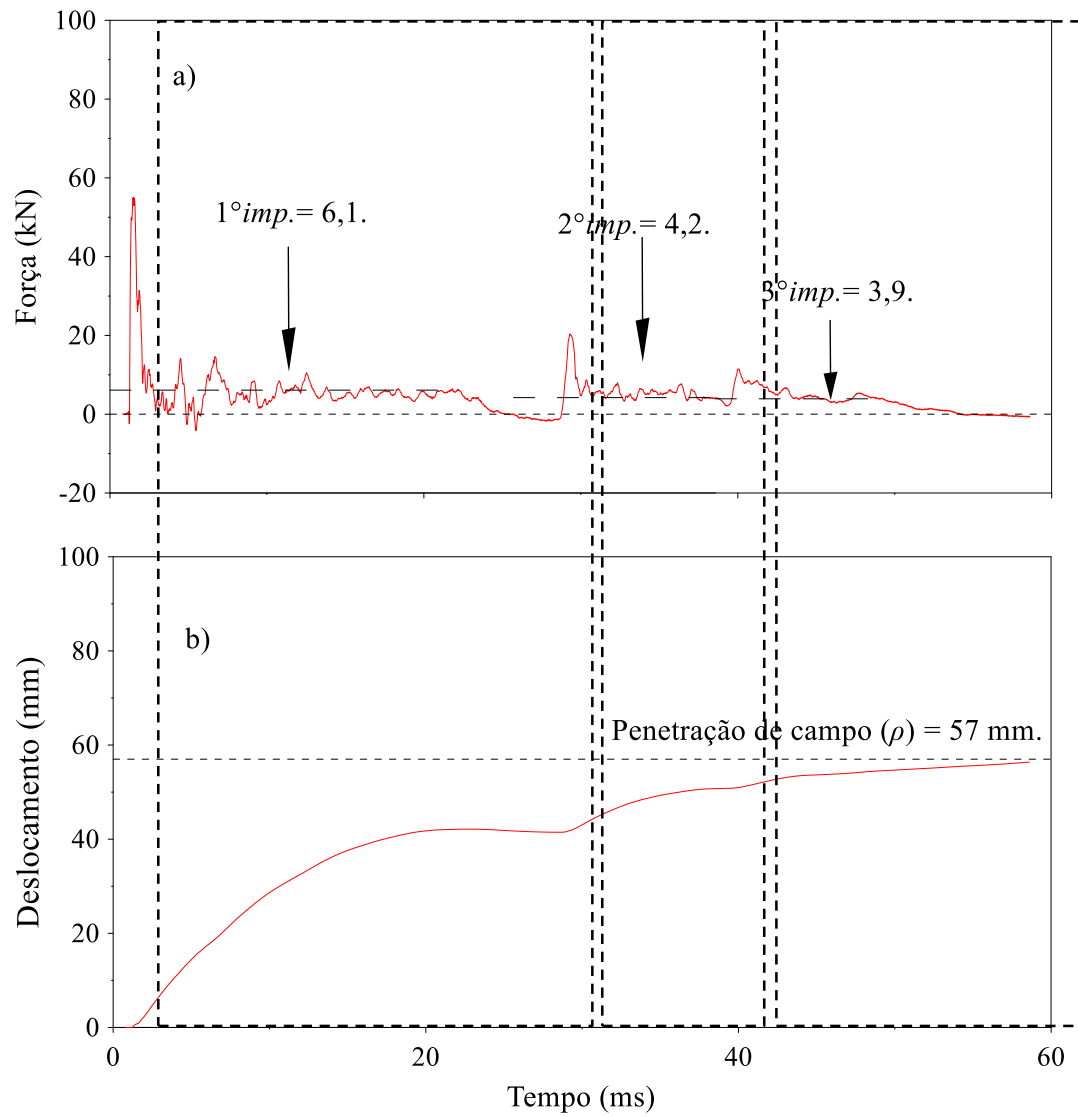


Figura 6.16 Resistência dinâmica do solo; b) deslocamento calculado a partir da velocidade e penetração medida em campo. Profundidade 7 m, golpe 7.

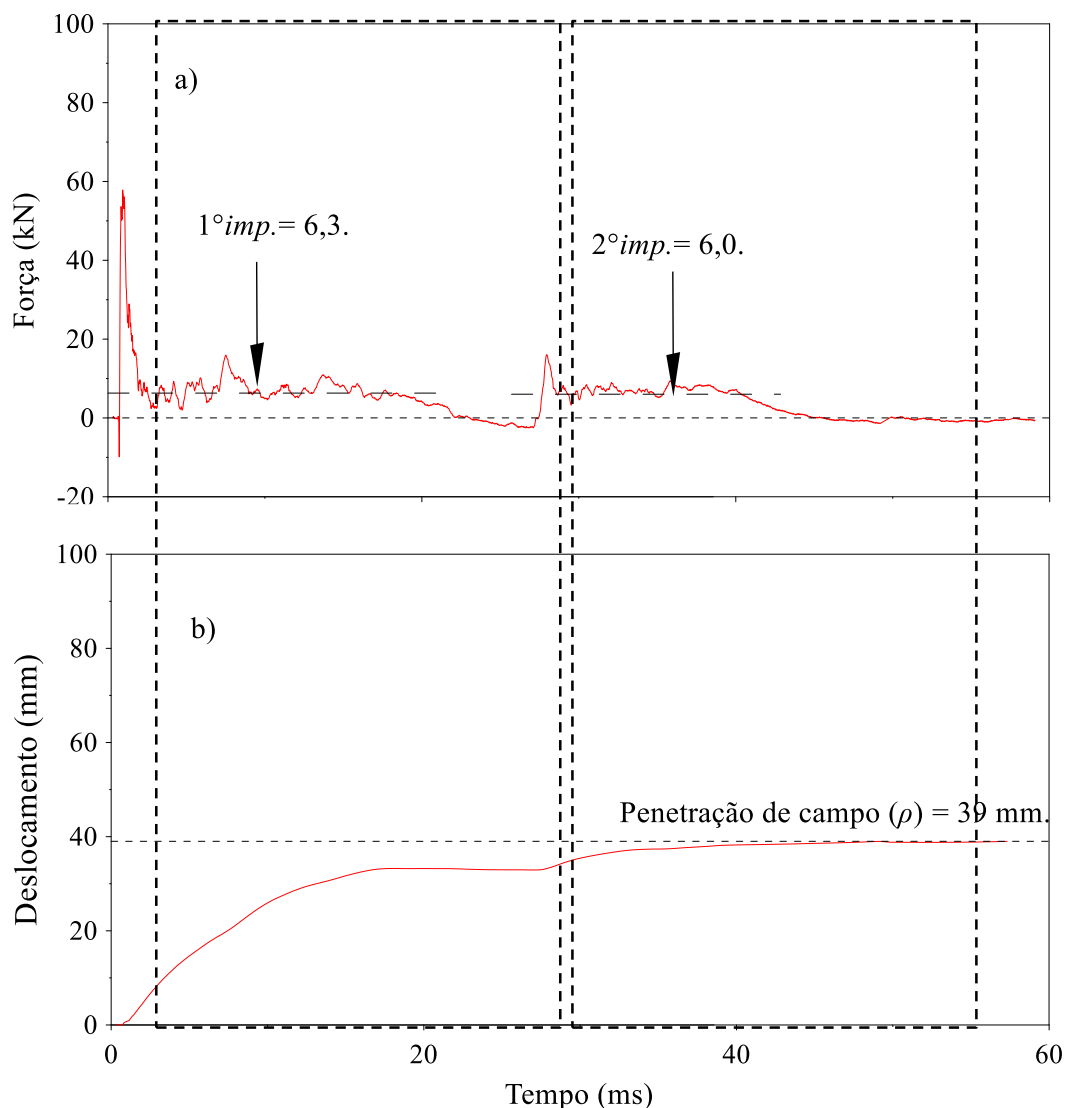


Figura 6.17 Resistência dinâmica do solo; b) deslocamento calculado a partir da velocidade e penetração medida em campo. Profundidade 10 m, golpe 9.

Após a determinação das resistências dinâmicas do solo para cada golpe (R_{di}), a resistência dinâmica de reação do solo (R_D) para certa profundidade é definida como sendo a soma dos valores das reações dinâmicas do solo para cada golpe (R_{di}), dividido pelo número de golpes (N) correspondentes aos últimos 0,3 m da penetração do amostrador no solo (Equação 3.7). A Tabela 6.5 apresenta os valores da resistência dinâmica de reação do solo de R_D , ao longo do perfil investigado com 10 m de profundidade.

Tabela 6.5 Resultados de resistência dinâmica do solo (R_D)

<i>Prof. (m)</i>	<i>Golpe N°</i>	<i>L_h (m)</i>	<i>ρ (m)</i>	<i>R_D (kN)</i>
1	2	1,28	0,114	3,13
	3		0,106	2,95
	4		0,114	2,65
	Média			2,91
2	2		0,148	2,47
	3		0,151	2,46
	Média			2,46
3	2	3,28	0,207	2,05
	3		0,187	2,18
	Média			2,12
4	2	4,28	0,116	2,65
	3		0,090	3,67
	4		0,095	3,37
	Média			3,23
5	2	5,28	0,091	3,53
	3		0,109	3,47
	4		0,103	3,48
	Média			3,49
6	2	6,28	0,135	2,97
	3		0,075	3,95
	4		0,087	3,90
	Média			3,61
7	3	7,28	0,062	4,67
	4		0,064	4,43
	5		0,049	5,30
	6		0,048	5,53
	7		0,057	4,73
	Média		4,93	
8	2	8,28	0,081	3,67
	3		0,061	3,93
	4		0,051	5,75
	5		0,046	6,60
	6		0,050	5,85
	Média		5,16	
9	4	9,28	0,045	5,80
	5		0,041	6,15
	6		0,044	5,90
	7		0,050	5,70
	8		0,040	6,30
	9		0,037	6,50
	10		0,048	5,40
	Média		5,96	

<i>Prof. (m)</i>	<i>Golpe N*</i>	<i>L_h (m)</i>	<i>ρ (m)</i>	<i>R_D (kN)</i>
10	3	10,28	0,047	5,65
	4		0,053	5,55
	5		0,048	5,65
	6		0,046	5,70
	7		0,039	6,15
	8		0,036	6,35
	9		0,039	6,15
			Média	5,89

6.5 Resistência dinâmica experimental (R_D) e teórica (F_d)

Na Tabela 6.6 se encontram os resultados da força dinâmica experimental (R_D) e teórica (F_d), onde esta última foi calculada a partir da equação 2.39, proposta por Schnaid et al. (2009). Nos cálculos da F_d , foram adotados os valores dos coeficientes (η_1), (η_2) e (η_3), conforme mostrado na Tabela 6.4.

Tabela 6.6 Resultados de resistência dinâmica experimental e teórica.

<i>Prof. (m)</i>	<i>N_{SPT}</i>	<i>Golpe N*</i>	<i>L_h (m)</i>	<i>ρ (m)</i>	<i>R_D (kN)</i>	<i>F_d (kN)</i>
1	2,69	2	1,28	0,114	3,13	3,47
		3		0,106	2,95	4,07
		4		0,114	2,65	3,81
				Média	2,91	3,78
2	2,01	2	2,28	0,148	2,47	2,83
		3		0,151	2,46	2,91
				Média	2,46	2,87
3	1,52	2	3,28	0,207	2,05	2,37
		3		0,187	2,18	2,53
				Média	2,12	2,45
4	2,99	2	4,28	0,116	2,65	3,66
		3		0,090	3,67	4,53
		4		0,095	3,37	4,64
				Média	3,23	4,28
5	2,97	2	5,28	0,091	3,53	3,78
		3		0,109	3,47	3,66
		4		0,103	3,48	3,73
				Média	3,49	3,72
6	3,03	2	6,28	0,135	2,97	3,36
		3		0,075	3,95	4,74
		4		0,087	3,90	4,90
				Média	3,61	4,33

<i>Prof. (m)</i>	<i>Golpe N°</i>	<i>L_h (m)</i>	<i>ρ (m)</i>	<i>R_D (kN)</i>	<i>Prof. (m)</i>	<i>F_d (kN)</i>
7	5,36		7,28	3	4,67	5,91
				4	4,43	5,98
				5	5,30	7,38
				6	5,53	7,49
				7	4,73	6,75
				Média	4,93	6,70
8	5,19		8,28	2	3,67	4,60
				3	3,93	5,85
				4	5,75	6,71
				5	6,60	7,51
				6	5,85	7,20
				Média	5,16	6,37
9	6,89		9,28	4	5,80	7,54
				5	6,15	7,96
				6	5,90	7,49
				7	5,70	7,25
				8	6,30	8,54
				9	6,50	8,86
				10	5,40	7,71
Média	5,96	7,91				
10	6,82		10,28	3	5,65	6,84
				4	5,55	6,94
				5	5,65	7,58
				6	5,70	7,85
				7	6,15	8,98
				8	6,35	9,22
				9	6,15	9,00
Média	5,89	8,06				

Na Figura 6.18 pode-se notar que a força dinâmica experimental (R_D) sempre é menor que a força dinâmica teórica (F_d).

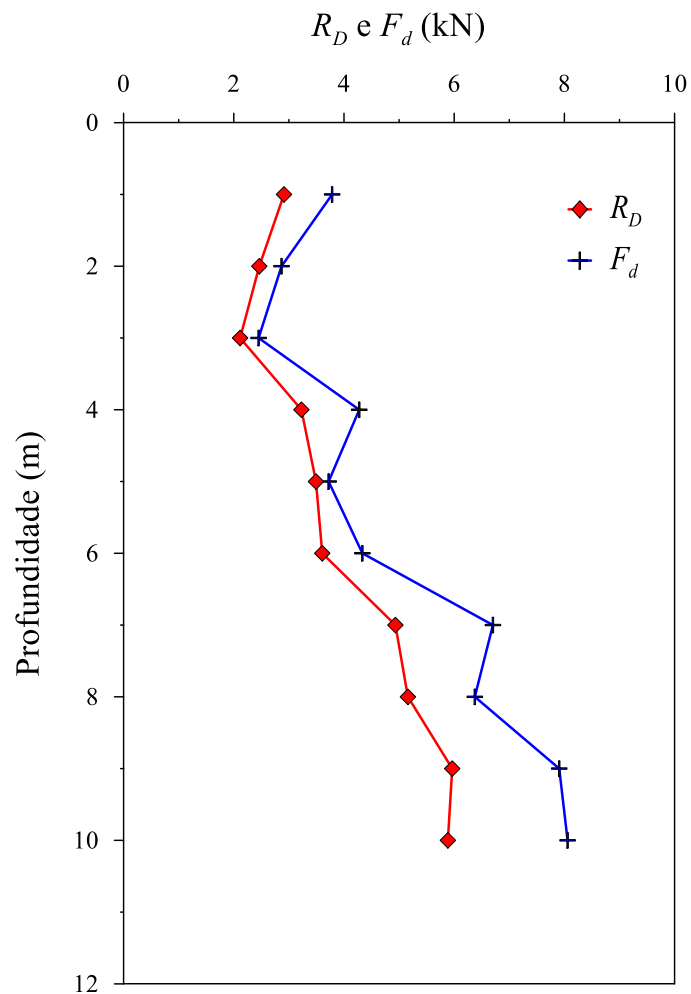


Figura 6.18 Perfil de resistência dinâmica experimental e teórica.

As curvas de R_D e F_d nas Figura 6.18 e Figura 6.19 mostram um aumento gradual da diferença entre esses resultados com a profundidade. Essa diferença apresenta uma tendência crescente com o aumento da resistência do solo. Esse mesmo comportamento foi notado nos resultados da pesquisa realizada por Lukiantchuki (2012).

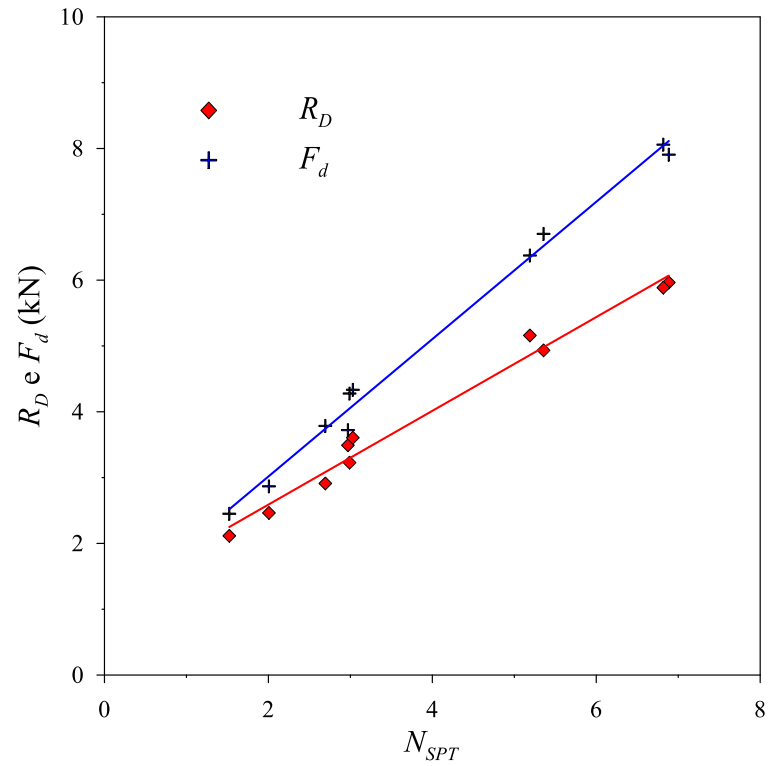


Figura 6.19 R_D e F_d versus N_{SPT} .

A Figura 6.20 mostra uma correlação entre R_D , e a força dinâmica teórica (F_d).

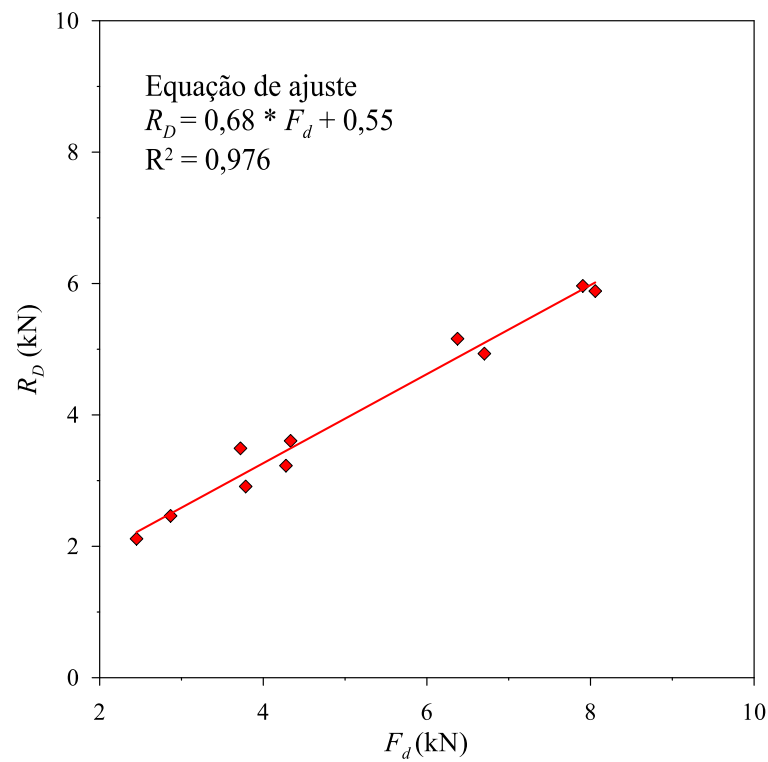


Figura 6.20 R_D versus F_d .

6.6 Resistência estática (R_S), obtida a partir do ensaio SPT

Os resultados da resistência estática (R_S), obtidos a partir da equação 2.62 são apresentados na Tabela 6.7 e comparados com os valores da resistência dinâmica experimental (R_D).

Tabela 6.7 Resistencia estática R_S e resistência dinâmica experimental R_D .

<i>Prof. (m)</i>	<i>NSPT</i>	<i>Lh (m)</i>	<i>η (%)</i>	<i>R_D (kN)</i>	<i>R_S (kN)</i>
1	2,69	1,28	75,57	2,91	3,24
2	2,01	2,28	72,21	2,46	2,31
3	1,52	3,28	75,00	2,12	1,82
4	2,99	4,28	75,33	3,23	3,59
5	2,97	5,28	65,58	3,49	3,10
6	3,03	6,28	71,78	3,61	3,47
7	5,36	7,28	70,19	4,93	5,99
8	5,19	8,28	66,60	5,16	5,51
9	6,89	9,28	66,20	5,96	7,26
10	6,82	10,28	67,43	5,89	7,33

Nessa tabela pode-se verificar que os valores da resistência dinâmica experimental (R_D) são muito similares aos valores da resistência estática (R_S) (Figura 6.21). Tal fato ratifica a conclusão de Aoki et al. (2007) de que a resistência dinâmica experimental (R_D) é aproximadamente igual à resistência estática (R_S), visto que os esforços atuantes no sistema solo-amostrador são não conservativos.

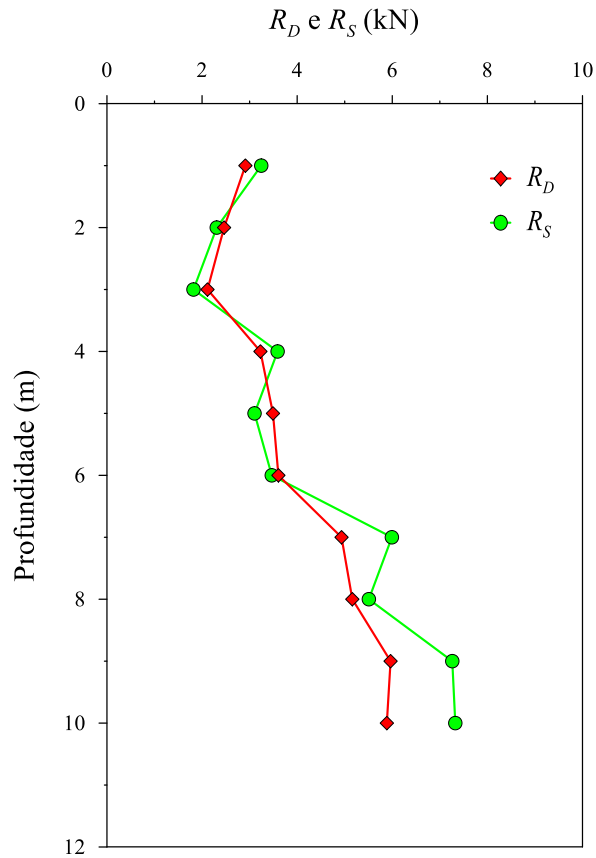


Figura 6.21 Perfil de resistência dinâmica experimental (R_D) e resistência estática (R_S)

A Figura 6.22 mostra uma correlação entre a resistência dinâmica experimental (R_D) e a resistência estática (R_S), sendo possível determinar os valores de R_D a partir da resistência estática R_S .

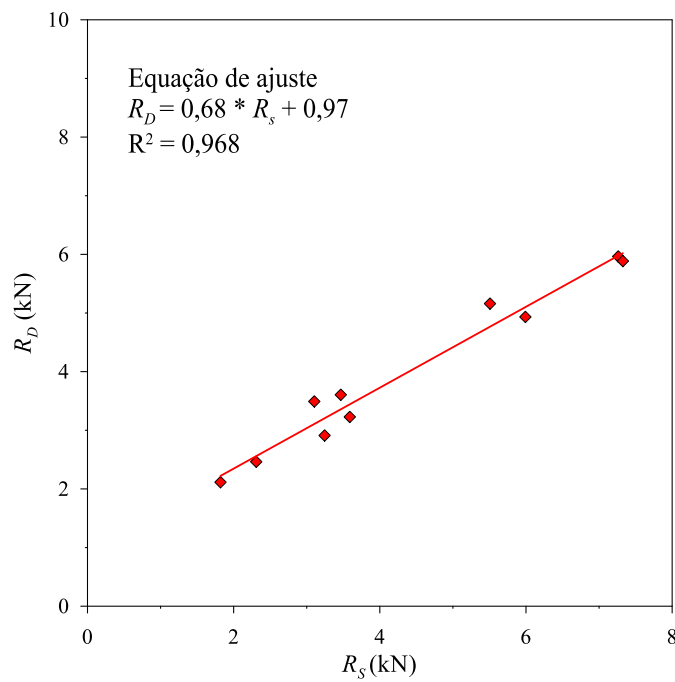


Figura 6.22 R_D versus R_S .

6.7 Controle de recuperação da amostra

O controle de recuperação da amostra do solo foi realizado medindo-se o comprimento de solo recuperado (L_a) a cada profundidade do ensaio e comparando-o com a penetração total do amostrador, permitindo verificar a ocorrência ou não de embuchamento do solo (item 5.3).

Na Tabela 6.8 são mostrados os comprimentos das amostras recuperadas no ensaio SPT, realizado acima do nível da água, com os respectivos teores de umidade e pesos específicos. Também é mostrada a penetração total ou acumulada, assim como o índice de resistência N_{SPT} .

Tabela 6.8 Resultados do controle de recuperação de amostras.

<i>Prof.</i> <i>(m)</i>	N_{SPT}	ρ <i>acumulado(m)</i>	L_a <i>(m)</i>	<i>Embuchamento</i> <i>(m)</i>	<i>Teor de</i> <i>umidade (%)</i>	<i>Peso específico (γ)</i> <i>(kN/m³)</i>
1	2,69	0,50	0,33	0,17	10,76	18,33
2	2,01	0,47	0,45	0,02	13,45	14,11
3	1,52	0,61	0,56	0,05	16,63	16,00
4	2,99	0,48	0,45	0,02	14,81	14,91
5	2,97	0,44	0,30	0,14	15,42	16,09
6	3,03	0,48	0,40	0,08	16,75	17,12
7	5,36	0,49	0,36	0,14	16,37	17,29
8	5,19	0,48	0,44	0,05	15,49	16,46
9	6,89	0,48	0,46	0,02	13,53	17,00
10	6,82	0,47	0,49	0,00	16,94	19,01

Do exame da Tabela 6.8 e das Figura 6.23 e Figura 6.24, se pode notar que o comprimento da amostra não depende das propriedades do solo (teor de umidade e peso específico), pois não mostram nenhuma tendência.

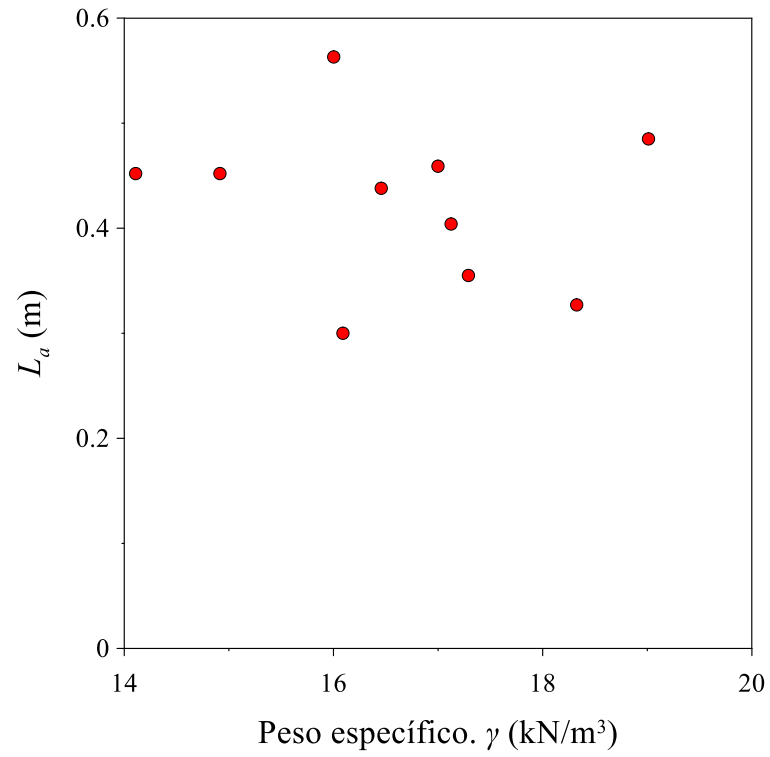


Figura 6.23 Peso específico γ versus comprimento da amostra L_a .

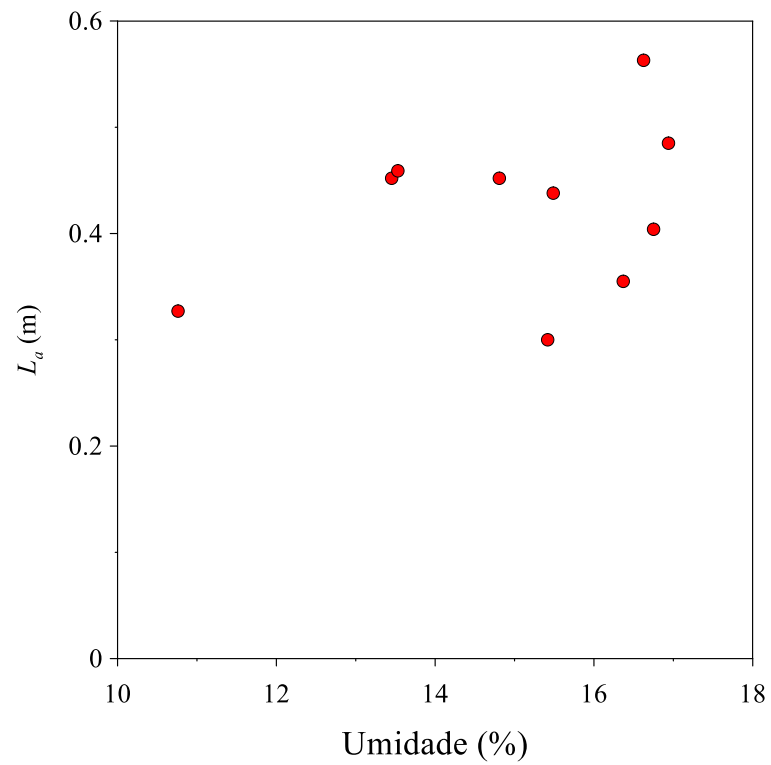


Figura 6.24 Umidade versus comprimento da amostra L_a .

A Figura 6.25 também mostra que não existe nenhuma tendência entre o comprimento da amostra e o índice de resistência N_{SPT} do solo.

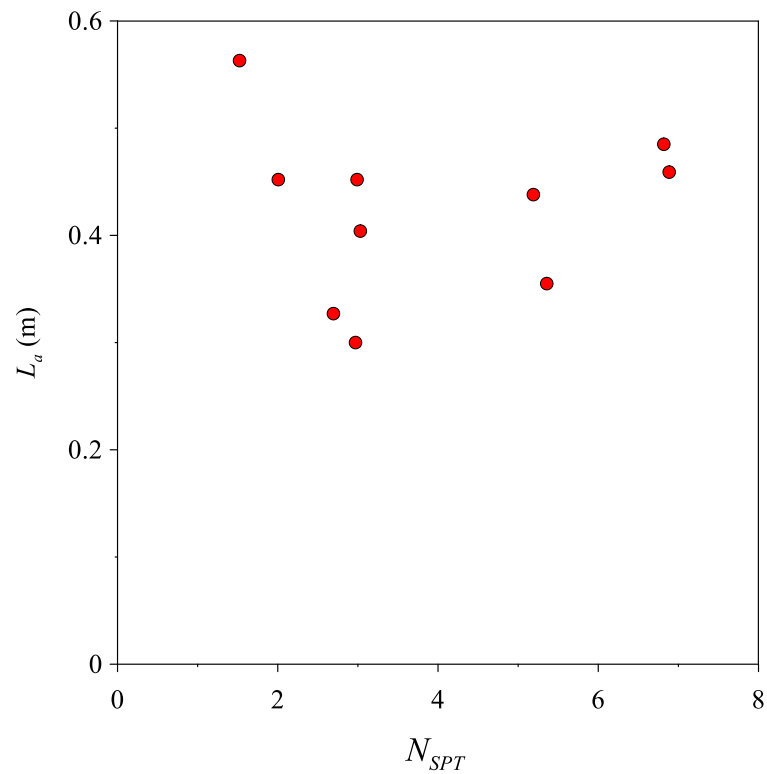


Figura 6.25 Resistência N_{SPT} versus comprimento da amostra (L_a).

Conforme constatado por Morais (2014) e Lukiantchuki (2012), o embuchamento ocorre nos solos predominantemente constituídos por argila, diferentemente dos solos arenosos, como aqueles estudados nesta pesquisa. A condição de não embuchamento pode ser vista na Figura 6.26, onde são mostradas as relações entre os comprimentos das amostras (L_a) e a penetração acumulada máxima do amostrador ($\rho_{acumulado}$).

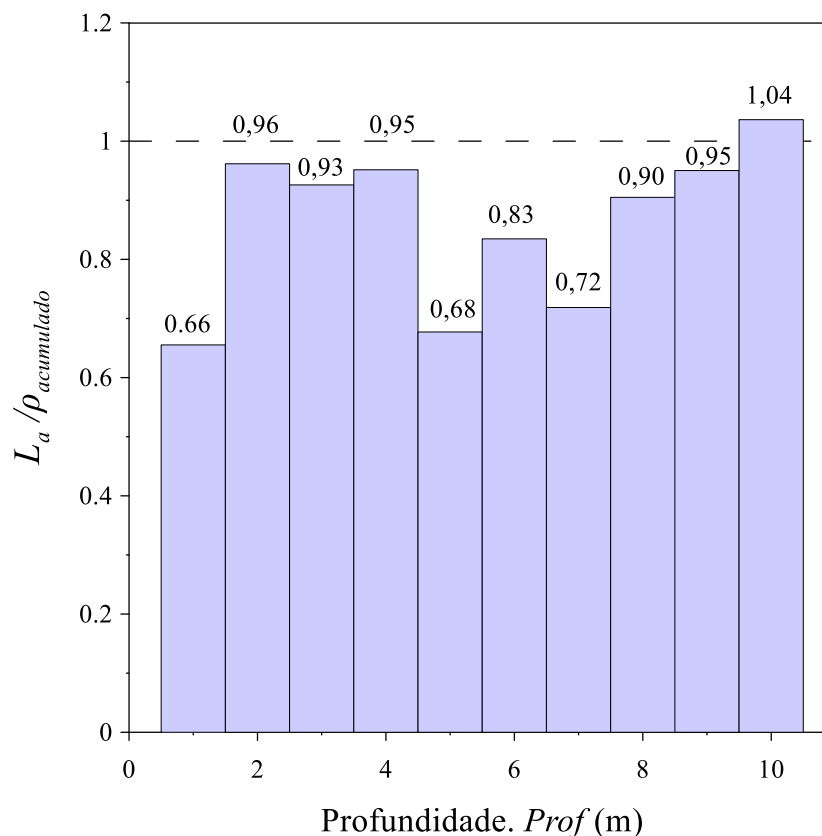


Figura 6.26 Relação entre o comprimento da amostra recuperada (L_a) e a penetração acumulada do amostrador ($\rho_{acumulado}$).

Embora os valores de $L_a / \rho_{acumulado}$ sejam ligeiramente inferiores a um, pode-se dizer que para estes solos não ocorreu embuchamento. Nas profundidades entre 5 e 7 m, a razão de $L_a / \rho_{acumulado}$ é consideravelmente menor que um, ou seja, ocorreu embuchamento. Uma provável explicação para este fato é que pode ter acontecido um processo de lixiviação abaixo da linha de seixos, que se encontra aproximadamente nessa profundidade, aumentando a quantidade de finos o solo e causando o embuchamento.

6.8 Resultados da força medida do atrito interno (R_2)

As Figura 6.27 a Figura 6.36 mostram os gráficos da força de atrito interno *versus* o tempo transcorrido, para cada profundidade. A Tabela 6.9 mostra os máximos valores das forças de atrito interno (R_2) medidas.

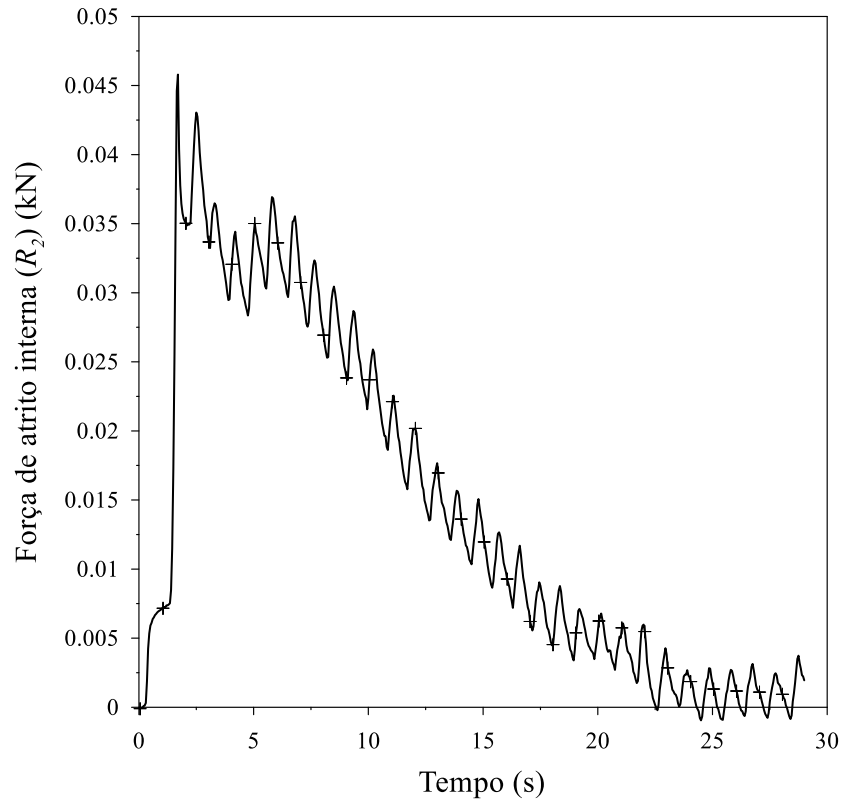


Figura 6.27 Força de atrito interno (R_2) versus tempo para 1 m de profundidade.

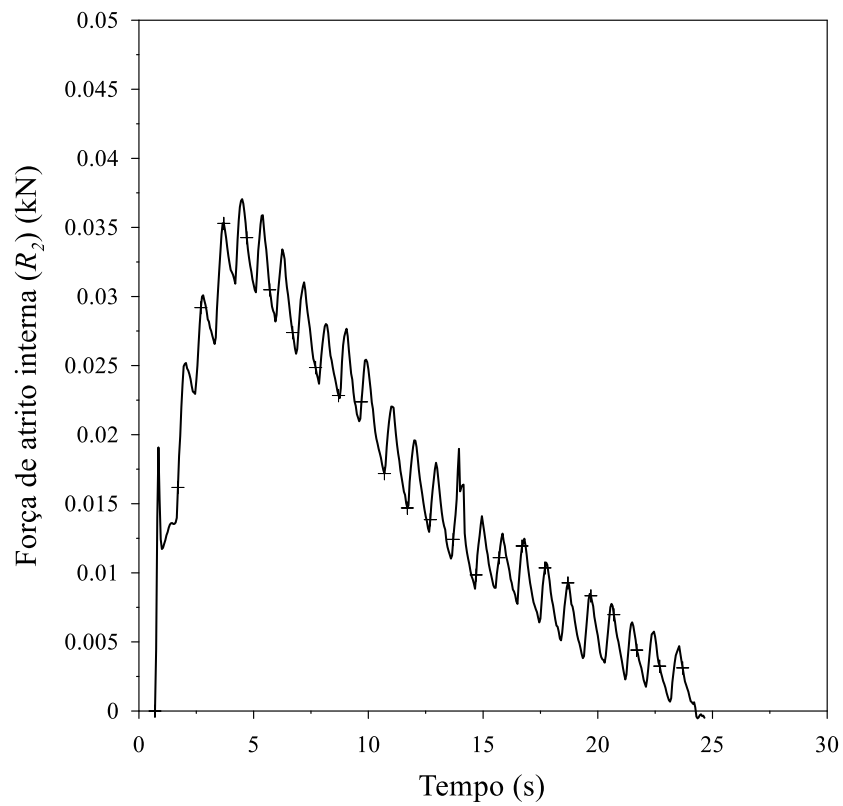


Figura 6.28 Força de atrito interno (R_2) versus tempo para 2 m de profundidade.

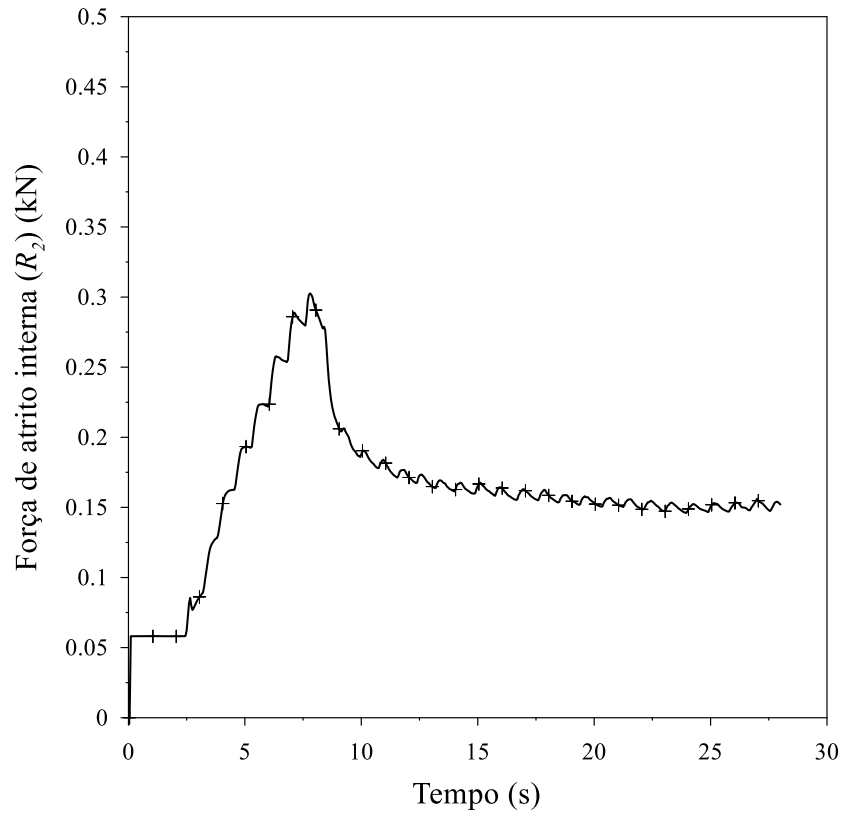


Figura 6.29 Força de atrito interno (R_2) versus tempo para 3 m de profundidade.

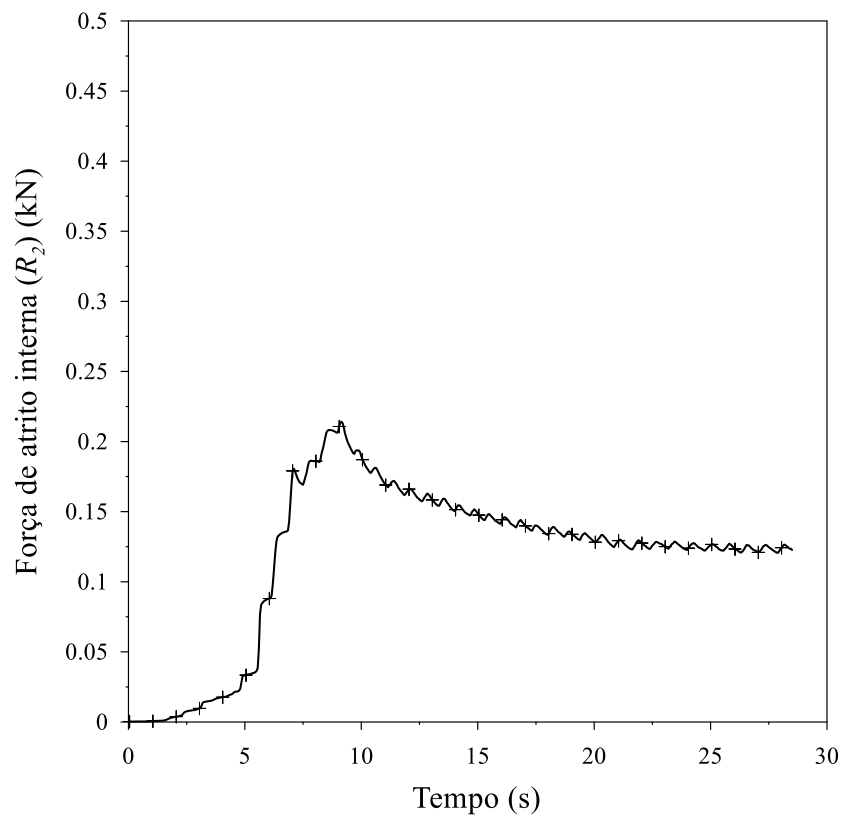


Figura 6.30 Força de atrito interno (R_2) versus tempo para 4 m de profundidade.

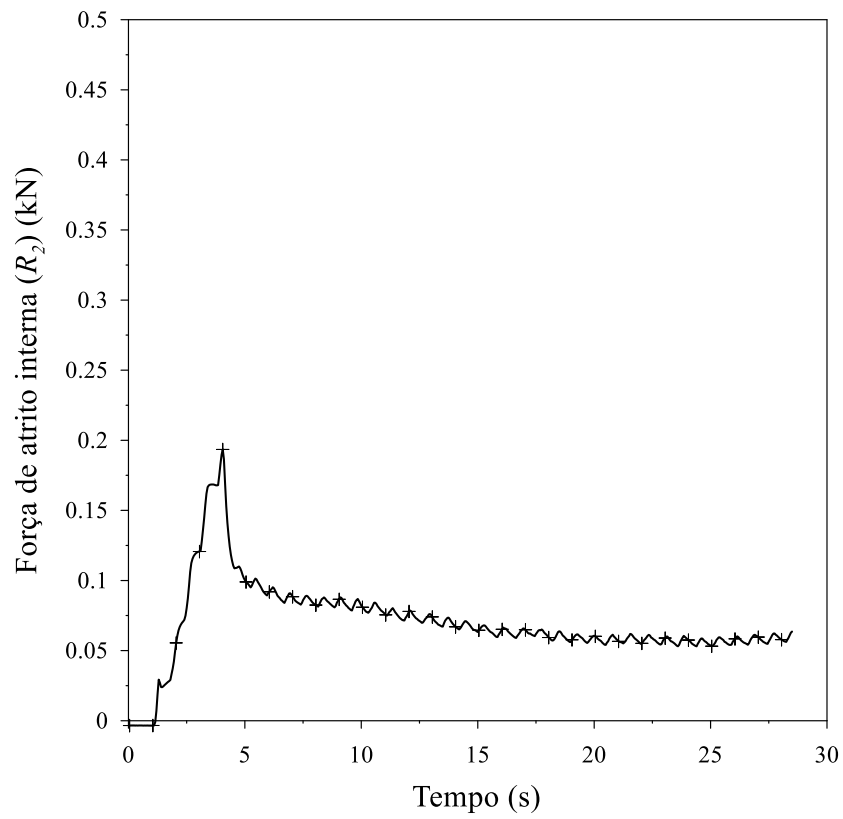


Figura 6.31 Força de atrito interno (R_2) versus tempo para 5 m de profundidade.

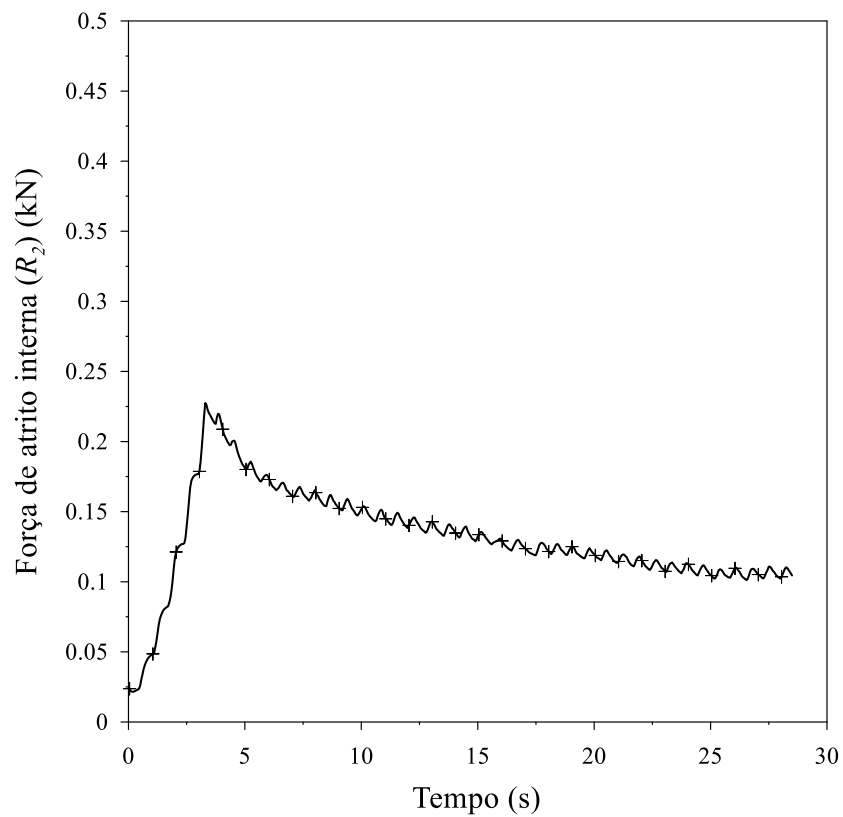


Figura 6.32 Força de atrito interno (R_2) versus tempo para 6 m de profundidade.

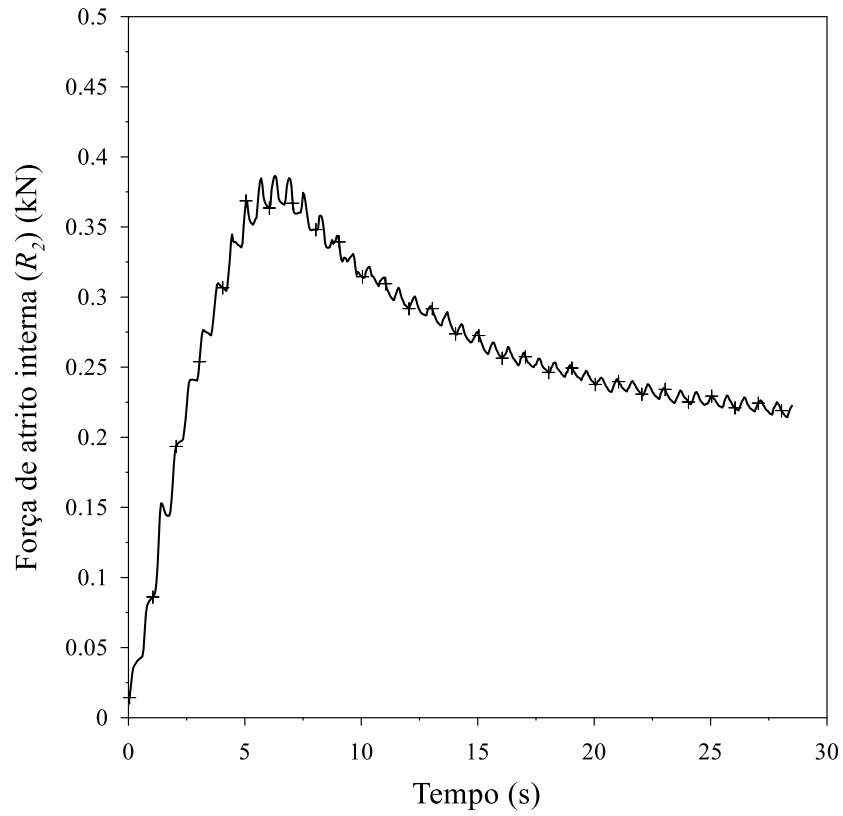


Figura 6.33 Força de atrito interno (R_2) versus tempo para 7 m de profundidade.

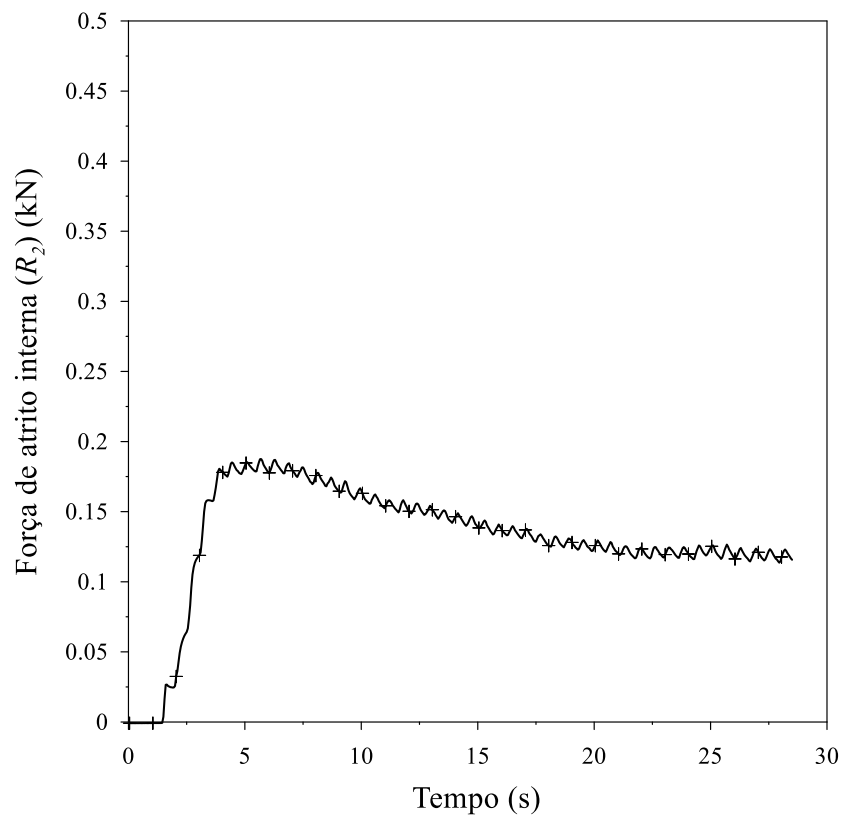


Figura 6.34 Força de atrito interno (R_2) versus tempo para 8 m de profundidade.

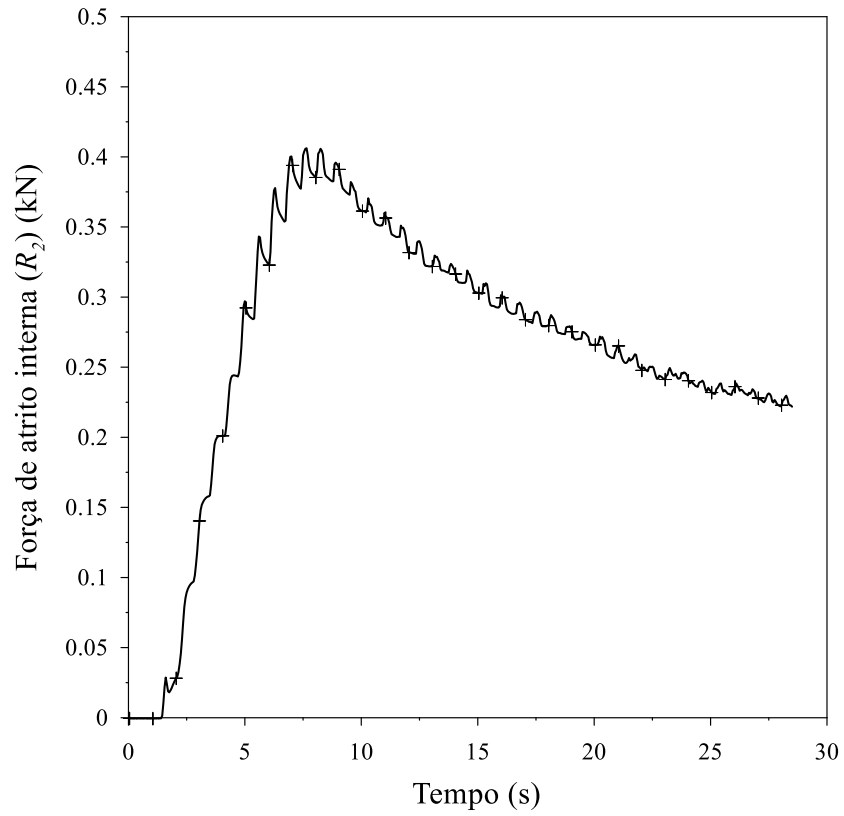


Figura 6.35 Força de atrito interno (R_2) versus tempo para 9 m de profundidade.

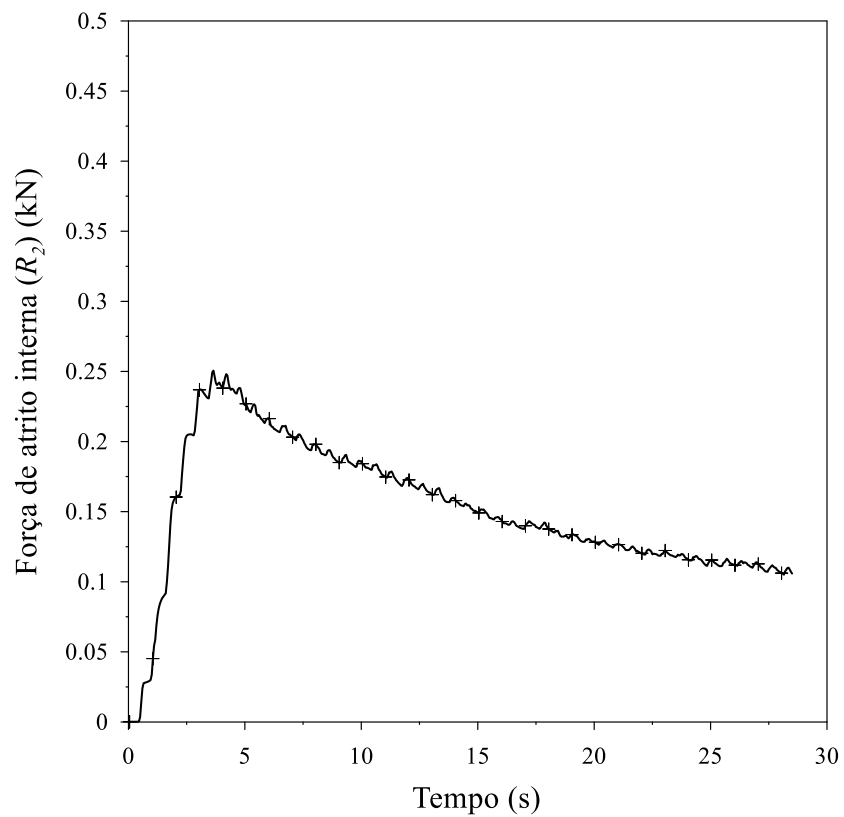


Figura 6.36 Força de atrito interno (R_2) versus tempo para 10 m de profundidade.

Tabela 6.9 Força de atrito interno (R_2)

<i>Prof.</i> (m)	R_2 (kN)
1	0,046
2	0,037
3	0,303
4	0,214
5	0,194
6	0,228
7	0,387
8	0,188
9	0,406
10	0,251

6.9 Tensões desenvolvidas no amostrador durante sua penetração no ensaio SPT

Após de medir a força de atrito interna (R_2), e conhecendo a resistência dinâmica experimental (R_D) para certa profundidade, podem-se calcular as demais resistências (ponta e cisalhamento externo e interno), desenvolvidas durante a penetração do amostrador no solo, além do coeficiente a de Aoki (2013) e a razão de atrito (R_f). Esses resultados estão mostrados na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 Resultados das tensões desenvolvidas no amostrador durante sua penetração no solo, a relação de atrito R_f e o parâmetro a de Aoki.

<i>Prof.</i> (m)	R_D+W_h (kN)	a	R_f	R_1 (kN)	R_2 (kN)	R_3 (kN)	R_4 (kN)	r_t (kPa)	r_i (kPa)	r_p (kPa)
1	2,98	0,24	0,76	2,83	0,046	0,00	0,11	37,14	8,82	48,56
2	2,57	0,21	0,86	2,43	0,037	0,00	0,10	33,98	7,14	39,29
3	2,25	2,89	0,06	1,89	0,303	0,00	0,06	20,18	58,33	320,98
4	3,40	0,98	0,19	3,06	0,214	0,00	0,12	42,26	41,26	227,07
5	3,69	0,75	0,24	3,35	0,194	0,00	0,14	49,85	37,29	205,21
6	3,84	0,93	0,19	3,47	0,228	0,00	0,14	47,05	43,84	241,28
7	5,20	1,21	0,15	4,63	0,387	0,00	0,18	61,41	74,48	409,89
8	5,45	0,53	0,35	5,07	0,188	0,00	0,20	68,66	36,15	198,92
9	6,29	1,02	0,18	5,66	0,406	0,00	0,22	76,86	78,27	430,75
10	6,24	0,60	0,30	5,76	0,251	0,00	0,23	80,82	48,29	265,76

Como se pode verificar na Tabela 6.10, os valores do coeficiente a do Aoki (2013) são aproximadamente iguais a um, excetuando-se os valores correspondentes ao primeiro e segundo metro de profundidade. Isto faz sentido pelo fato dos pesos específicos do solo contido no interior do amostrador e no terreno natural, serem aproximadamente iguais (Tabela 6.11).

Tabela 6.11 Valores do peso específico do solo no interior do amostrador e do terreno natural.

Prof. (m)	γ no interior do amostrador (kN/m ³)	γ natural do terreno* (kN/m ³)	$\gamma_{amostrador} / \gamma_{natural}$
1	18,7	15,6	1,2
2	14,4	15,5	0,9
3	16,3	15,8	1,0
4	15,2	16,9	0,9
5	16,4	17,2	1,0
6	17,5	17	1,0
7	17,6	18,3	1,0
8	16,8	19	0,9
9	17,3	18,4	0,9
10	19,4	18,9	1,0

* valores obtidos por Peixoto (2001)

Na Tabela 6.12, são apresentados os valores de adesão-atrito (ft_{max} e ft_{res}) obtidos por Peixoto (2001) mediante a aplicação de torque no SPT, realizados no Campo Experimental da EESC. Deve-se observar que os valores de ft_{max} são menores que os valores de r_i mostrados na Tabela 6.10. Uma razão para esta diferença de valores é o fato de serem diferentes os teores de umidade do solo quando foram feitos os ensaios por Peixoto (2001) e os realizados nesta pesquisa. Peixoto (2001) determinou os teores de umidade *versus* a profundidade da mesma forma como foi feito neste trabalho (Figura 6.37). Os teores de umidade do solo, na data da realização dos ensaios por Peixoto, são de 1,03 a 1,5 vezes maiores que aqueles determinados no dia 11 de fevereiro de 2015.

Se fosse assumido $r_i = ft_{max}$, conforme sugerido por Morais (2014), os valores da resistência de atrito interna (r_k), além das forças R_1 e R_4 , determinados com as equações constantes do item 2.10 (Aoki, 2013) e os valores da força de atrito interno (R_2), seriam aqueles mostrados na Tabela 6.13. Os valores de r_k e de R_2 dessa tabela, excetuando-se os valores correspondentes dos primeiros dois metros de profundidade, são aproximadamente 10 vezes maiores que os valores da resistência de atrito interno (r_k) e da força de atrito interno medido (R_2), mostrados na Tabela 6.10.

Tabela 6.12 Valores de adesão-atrito (f_t) no Campo Experimental EESC (Peixoto, 2001)

<i>Prof.</i> (m)	<i>f_t max</i> (kPa)	<i>f_t res</i> (kPa)
1	12,09	5,58
2	17,38	10,66
3	17,34	13,72
4	23,07	16,19
5	20,31	13,85
6	18,57	10,85
7	16,30	13,70
8	27,54	20,70
9	36,63	23,83
10	42,50	42,50

Tabela 6.13 Resultados das tensões desenvolvidas no amostrador, assumindo que $r_t = f_t \text{ max}$.

<i>Prof.</i> (m)	<i>a</i>	<i>R₁</i> (kN)	<i>R₂</i> (kN)	<i>R₄</i> (kN)	<i>r_L = f_t</i> (kPa)	<i>r_{Li}</i> (kPa)
1	32,32	0,92	2,03	0,03	12,09	390,71
2	14,12	1,24	1,27	0,05	17,38	245,40
3	6,42	1,62	0,58	0,05	17,34	111,36
4	13,86	1,67	1,66	0,07	23,07	319,73
5	21,50	1,37	2,27	0,06	20,31	436,70
6	25,03	1,37	2,41	0,05	18,57	464,86
7	46,34	1,23	3,92	0,05	16,30	755,38
8	23,39	2,03	3,34	0,08	27,54	644,04
9	18,34	2,70	3,49	0,11	36,63	671,91
10	14,02	3,03	3,09	0,12	42,50	595,90

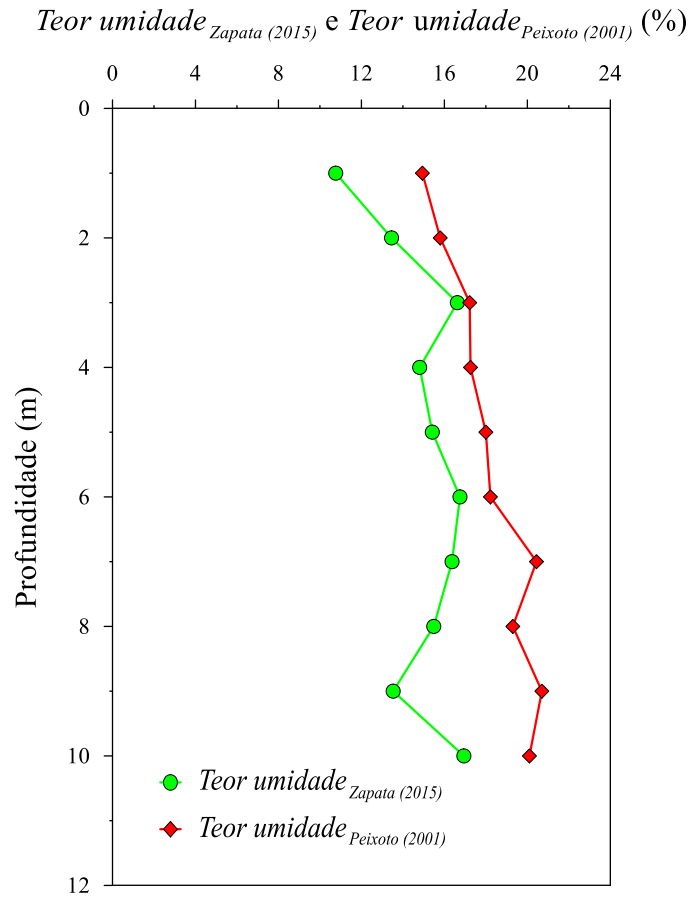


Figura 6.37 Teor de umidade *versus* profundidade.

Quando se assume que $r_i = ft \text{ max}$, o parâmetro a do Aoki resulta muito maior do que a unidade (Tabela 6.13).

Ao calcular a tensão de atrito interno r_i pelo critério de Mohr-Coulomb (Equação 6.1), assumindo que $r_i = \tau_f$:

$$\tau_f = \sigma'_{rf} \tan \delta_f \quad 6.1$$

onde τ_f é a tensão de cisalhamento (atrito), σ'_{rf} é a tensão normal radial média e δ_f é o ângulo de atrito entre o solo e o aço.

$$\sigma'_{rf} = \sigma'_v \times K_0 \quad 6.2$$

$$\sigma'_v = \gamma \times \text{prof}. \quad 6.3$$

$$K_0 = 1 - \text{sen} \phi \quad 6.4$$

onde, σ'_v é a tensão vertical média, K_0 é o coeficiente de empuxo em repouso, γ é o peso específico do solo e ϕ é o ângulo de atrito do solo.

Como o solo do Campo Experimental da EESC- USP é constituído de uma areia fina (Tabela 4.1), de acordo com a NBR 6502, pode-se assumir que para este solo o tamanho médio das partículas (d_{50}) é cerca de 0,1 mm a 0,2 mm, resultando $\delta_f = 28^\circ$ (Figura 6.38).

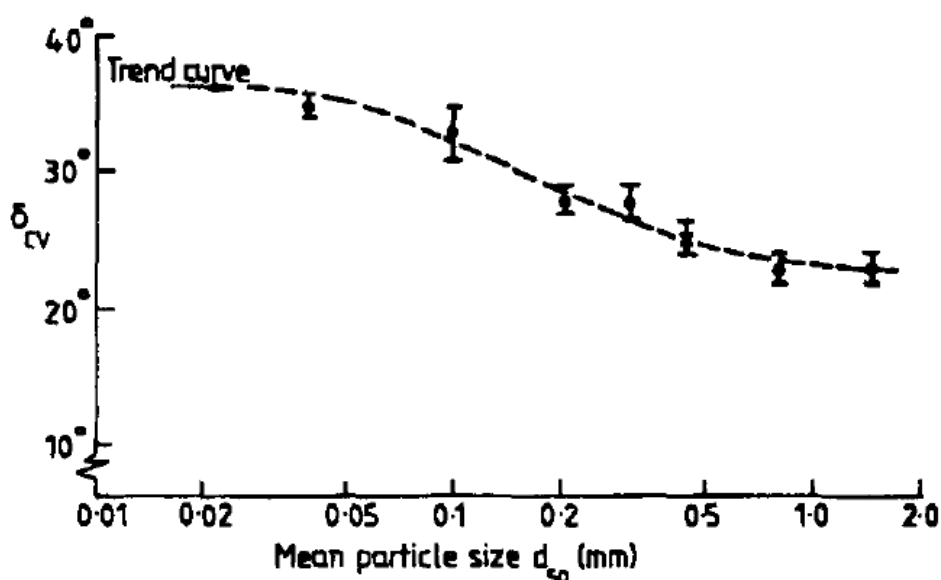


Figura 6.38 Curva de tendência do ângulo de atrito entre aço e areia em função da granulometria do solo (Jardine et al., 1998).

Na Tabela 6.14, são apresentados os valores da tensão vertical média (σ'_v), o coeficiente de empuxo em repouso (K_0), o peso específico do solo (γ), o ângulo de atrito do solo (ϕ), obtidos por Peixoto (2001), e as tensões verticais médias (σ'_v) e a tensão de cisalhamento (τ_f).

Tabela 6.14 resultados dos cálculos de σ'_v , K_0 , γ , ϕ , σ'_v , τ_f .

Prof. (m)	γ (kN/m ³)	σ'_v (kPa)	ϕ (°)	K_0	σ'_{vf} (kPa)	$\tan \phi$	$\tau_f = r_i$ (kPa)
1	18,33	18,33	32,00	0,47	8,61	0,53	4,58
2	14,11	32,43	26,00	0,56	18,21	0,53	9,68
3	16,00	48,43	24,50	0,59	28,35	0,53	15,07
4	14,91	63,34	27,00	0,55	34,59	0,53	18,39
5	16,09	79,43	29,50	0,51	40,32	0,53	21,44
6	17,13	96,56	23,00	0,61	58,83	0,53	31,28
7	17,29	113,85	23,00	0,61	69,36	0,53	36,88
8	16,45	130,30	20,00	0,66	85,73	0,53	45,58
9	17,00	147,30	27,50	0,54	79,28	0,53	42,16
10	19,01	166,31	13,00	0,78	128,90	0,53	68,54

Conhecendo-se os valores de r_i , obtidos com a Equação 6.1, podem ser calculadas as demais tensões atuantes no amostrador através das equações apresentadas no item 2.10. Os resultados dessas tensões são apresentados na Tabela 6.15.

Tabela 6.15 Resultados das tensões desenvolvidas no amostrador quando se assume que $r_i = \tau$ de Mohr-Coulomb.

<i>Prof.</i> (m)	<i>a</i>	<i>R_f</i>	<i>R₁</i> (kN)	<i>R₂</i> (kN)	<i>R₃</i> (kN)	<i>R₄</i> (kN)	<i>r_t</i> kPa)	<i>r_i</i> (kPa)	<i>r_p</i> (kPa)
1	0,12	1,48	2,85	0,02	0,00	0,11	37,42	4,58	25,21
2	0,29	0,63	2,42	0,05	0,00	0,10	33,80	9,68	53,30
3	0,67	0,27	2,11	0,08	0,00	0,07	22,52	15,07	82,95
4	0,42	0,43	3,17	0,10	0,00	0,13	43,84	18,39	101,20
5	0,42	0,43	3,43	0,11	0,00	0,15	51,02	21,44	117,97
6	0,65	0,28	3,54	0,16	0,00	0,14	47,90	31,28	172,14
7	0,58	0,31	4,82	0,19	0,00	0,18	63,91	36,88	202,96
8	0,67	0,27	5,02	0,24	0,00	0,20	68,02	45,58	250,86
9	0,53	0,34	5,84	0,22	0,00	0,23	79,32	42,16	231,99
10	0,86	0,21	5,66	0,36	0,00	0,23	79,40	68,54	377,17

Na Tabela 6.15, se observa que os valores de R_2 encontrados pela equação de Mohr-Coulomb têm a mesma ordem de grandeza que os valores do R_2 medidos em campo, sendo os medidos em campo aproximadamente 0,7 vezes menores que os calculados pela equação de Mohr-Coulomb.

Os resultados da tensão de atrito externo (r_t), mostrados na Tabela 6.10, foram comparados com a tensão de atrito lateral do cone (f_s) apresentados na Tabela 6.16 (Peixoto, 2001).

Tabela 6.16 Resultados de r_t e do f_s do cone.

<i>Prof.</i> (m)	<i>f_s</i> (kPa)	<i>r_t</i> (kPa)
1	0	37,14
2	0	33,98
3	10	20,18
4	30	42,26
5	40	49,85
6	50	47,05
7	100	61,41
8	120	68,66
9	120	76,86
10	140	80,82

A Figura 6.39 mostra uma comparação entre os valores de r_t e f_s do ensaio de cone. Pode-se notar que o comportamento do solo se altera abaixo de 6 m de profundidade, onde se encontra localizada a linha de seixos. Observa-se que os valores da tensão de cisalhamento externa do amostrador, até os 6 m de profundidade, são próximos dos valores de f_s .

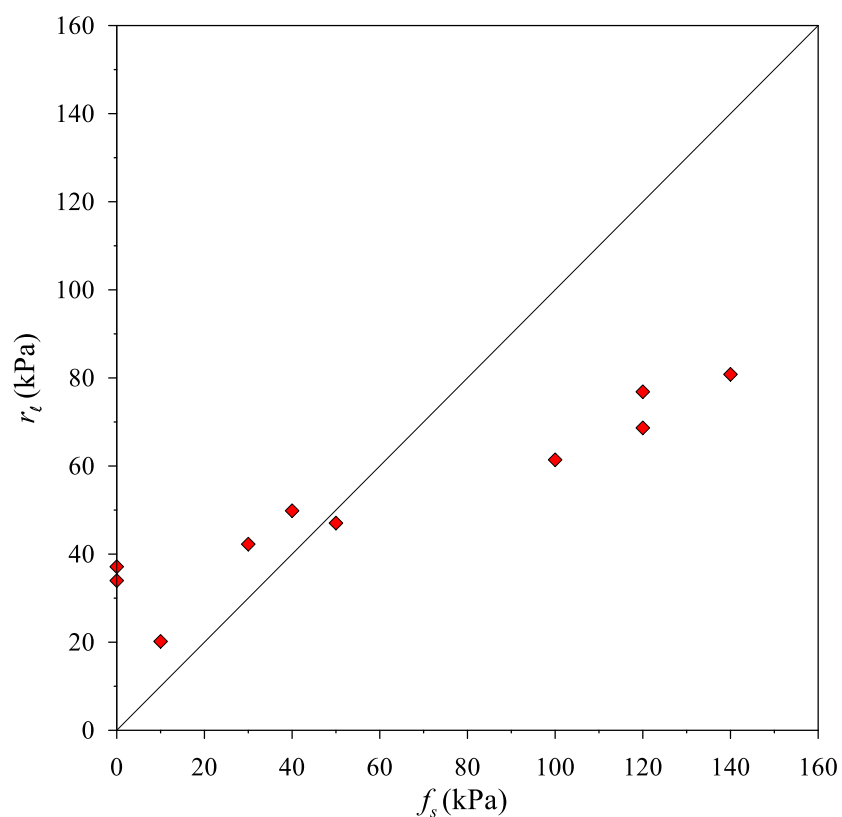


Figura 6.39 r_t do SPT versus f_s do cone.

Na realidade, o r_t do SPT e o f_s do cone, podem ser comparados quando o solo sofre embuchamento. Isto acontece porque quando ocorre o embuchamento, a distribuição de tensões no amostrador do SPT é similar àquela que acontece no cone. Como o solo estudado não sofreu embuchamento, esta comparação não seria válida.

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho, se determinou experimentalmente os sinais de força e aceleração registradas em uma seção instrumentada logo acima do amostrador, para assim obter a quantidade de energia que atingia o amostrador bipartido, tipo Raymond sem liner, e finalmente calcular a eficiência do ensaio SPT.

Com os sinais de força pode-se obter a resistência do solo, chamada resistência dinâmica experimental (R_D), a qual foi comparada com as resistências teóricas estática (R_s) e dinâmica (F_d).

Finalmente, conhecendo a resistência dinâmica (R_D) e medindo a parcela de atrito lateral interno (R_2), por meio de um equipamento apropriado, se conseguiu avaliar as demais tensões que atuam sobre o amostrador, assim como o parâmetro a de Aoki (2013).

7.1 Energia e eficiência no ensaio SPT amostrador bipartido, tipo Raymond sem liner.

- As diferenças entre a energia potencial nominal (EP_i) e a energia potencial do sistema ($EP_{sistema}$), mostram a importância da correção da energia sugerida por Odebrecht (2003). A energia potencial do sistema nas camadas de solo de maior resistência ($N_{SPT} > 5$) foi 8,5% maior que a energia potencial teórica (478,2 J), enquanto que nas camadas de menor resistência ($N_{SPT} < 3$) esse valor chegou a 30,6%.
- As curvas das quantidades de energia medidas na base (E_{Base}) e de energia do sistema ($EP_{sistema}$), em função do comprimento da composição de hastes, apresentam uma tendência de paralelismo. A distância entre as duas curvas corresponde às perdas de energia, as quais podem ser representadas pela eficiência (η).
- Para um mesmo comprimento de composição de haste (L_h), a quantidade de energia medida acima do amostrador (E_{Base}) tende a aumentar com o aumento da penetração (ρ). O mesmo ocorre para a energia potencial do sistema e a energia potencial do martelo, pois ambos dependem da penetração do amostrador no solo. Assim, quanto menor for a resistência do solo, maior será a quantidade de energia que atinge o amostrador.
- A energia medida na base da composição das hastes (E_{Base}) é menor do que a energia que atinge o amostrador, calculada de acordo com o procedimento proposto por Odebrecht et al. (2005), para comprimentos de composição de haste inferiores a 7,28 m. Entretanto, ao aumentar o comprimento da composição de hastes, a energia E_{Base} se aproxima da quantidade de energia no amostrador, determinada segundo o

procedimento de Odebrecht et al. (2005), até ultrapassá-la. Isto ocorre porque para grandes comprimentos da composição de hastes, a eficiência do sistema (η_3) passa a interferir no valor calculado de $E_{amostrador}$, que diminui de um valor de quase de 100% para 96%.

- A eficiência calculada, considerando a quantidade de energia na base da composição de hastes, apresentou um valor médio de 70,59% com desvio padrão de 2,46% e coeficiente de variação de 3,51%.
- A eficiência depende muito pouco do comprimento da composição de hastes.
- Para um mesmo comprimento de haste (L_h), a eficiência (η) tende a aumentar com a penetração (ρ), significando que a energia medida na base da composição das hastes (E_{Base}) cresce numa maior proporção que a energia do sistema ($E_{sistema}$).
- O processo de transferência de energia em solos de alta resistência ocorre num intervalo de tempo menor, sendo necessário menor número de impactos subsequentes, para a cravação do amostrador no solo.

7.2 Resistência dinâmica experimental e teórica e resistência estática do ensaio SPT

- A força dinâmica experimental (R_D) sempre é menor que a força dinâmica teórica (F_d).
- As curvas de R_D e F_d mostram um aumento gradual da diferença entre esses resultados com a profundidade. Essa diferença apresenta uma tendência crescente com o aumento da resistência do solo.
- Os valores da resistência dinâmica experimental (R_D) são muito similares aos valores da resistência estática (R_S). Tal fato ratifica a conclusão de Aoki et al. (2007) de que a resistência dinâmica experimental (R_D) é aproximadamente igual à resistência estática (R_S), visto que as forças atuantes no sistema solo-amostrador são não conservativas.

7.3 Tensões desenvolvidas no amostrador durante sua penetração no ensaio SPT

- Com exceção para as profundidades de 5 a 7 m, não ocorreu o fenômeno de embuchamento. Uma provável explicação para este fato é que pode ter acontecido um processo de lixiviação abaixo da linha de seixos, que se encontra aproximadamente nessa profundidade, aumentando a quantidade de finos o solo e causando o embuchamento.
- Os resultados obtidos nesta pesquisa mostram que o comprimento da amostra não depende nem do índice de resistência do solo (N_{SPT}), nem de propriedades como peso específico e umidade.

- Os resultados do coeficiente a que relaciona o atrito externo e interno, obtidos nesta pesquisa são aproximadamente iguais a um, excetuando-se os valores correspondentes ao primeiro e segundo metro de profundidade. Isto faz sentido pelo fato dos pesos específicos do solo contido no interior do amostrador e no terreno natural, serem aproximadamente iguais. Esses resultados comprovam a eficiência do novo equipamento desenvolvido para medir o atrito interno (R_2) no amostrador.

7.4 Sugestões para futuras pesquisas

- Repetir o procedimento realizado neste trabalho, mas com um amostrador onde seu diâmetro interno seja igual em todo seu comprimento. Comparar resultados com os do presente trabalho.
- Medir a força de arrancamento do amostrador para avaliar a resistência de atrito externa (r_i) e determinar as outras resistências desenvolvidas no amostrador durante sua cravação, como se fez na presente pesquisa.
- Avaliar experimentalmente as resistências dinâmicas e estáticas do sistema solo-amostrador em camadas de solo saturado, de forma a entender o efeito da viscosidade nestas resistências.
- Investigar o fenômeno do embuchamento da amostra de solo no interior do amostrador padrão para o caso de camadas de solo na condição saturada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOU-MATAR, H., RAUSCHE, F., THENDEAN, G., LIKINS, G., GOBLE, G. Wave equation soil constants from dynamic measurements on SPT. In: PROCEEDINGS OF THE FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE APPLICATION OF STRESS-WAVE THEORY TO PILES, Orlando, FL, USA, 1996, p.163-175.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2001). Solo. Sondagens de simples reconhecimento com SPT. Método de ensaio. In: *ABNT (NBR 6484). Associação Brasileira de Normas Técnicas*. Rio de Janeiro. P. 3, 11 e 12.

AOKI, N. **Determinação da capacidade de carga última de estaca cravada em um ensaio de carregamento dinâmico de energia crescente**. 1997. 111p. v.1. Tese (Doutorado em Geotecnia)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP.

AOKI, N; CINTRA, J.C.A. The application of energy conservation Hamilton's principle to the determination of energy efficiency in SPT tests. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE APPLICATION OF STRESS WAVE THEORY TO PILES, 6., 2000a, São Paulo, v. 1, P.457-460.

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

AOKI, N. **Inovação no SPT**. In: CINTRA, J.C.A; AOKI, N; TSUHA, C; GIACHETI, H.L. Fundações, Ensaio estáticos e dinâmicos. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. P. 25-38.

ASTM International. Terminology. In: Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils, **D1586- 99**. 2008. p. 1-5.

ASTM international. Standard Test Method for Energy Measurement for Dynamic Penetrometers, **D4633**. 2010.

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

BELINCANTA, A; FERRAZ, R. L. Fundamentos e métodos de medidas de energia dinâmica no SPT. **Acta Scientiarum**, UEM, Maringá (PR), v. 22, n. 5. p. 1473-1482. 2000.

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

BERNARDES, G.P. **Dynamic and static testing of large model piles in sand**. 1989. Thesis of Doctor of Engineering. Institutt for Geoteknikk, Universitetet I Trondheim, Norwegian.

BORTOLUCCI, A.A. **Caracterização geológico-geotécnica da região urbana de São Carlos, a partir de sondagens de simples reconhecimento**. 1983. 67 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

BROWN, T; HETTIARACHCHI, H. Estimating shear strength properties of soils using SPT blow counts: an energy balance approach. In: GEOCONGRESS, ASCE, 2008, P.364-371.

CARVALHO, D. **Análises de cargas últimas à tração de estacas escavadas, instrumentadas, em campo experimental de São Carlos-SP**. 1991. 226 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

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

GIACHETI, H. L. Os ensaios de campo na investigação do subsolo: estudo e considerações quanto à aplicação em solos tropicais. 2001. 327 p. Livro – Docência, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2001.

HOWIE, J.A., DANIEL, C.R., JACKSON, R.S. and WALKER, B. **Comparison of energy measurement methods in the standard penetration test**. 2003. Report prepared for the U.S. Bureau of Reclamation. Geotechnical Research Group, Department of Civil Engineering. The University of British Columbia, Vancouver, Canada.

JARDINE, R. J; OVERY, R.F; CHOW, F.C. Axial Capacity of Offshore Piles in Dense North Sea Sands. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 124, p. 171-178, 1998.

LOBO, B. O. **Método de previsão de capacidade de carga de estacas: Aplicação dos conceitos de energia do ensaio SPT**. 2005. 139 p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

LOBO, B. O. **Mecanismo de penetração dinâmica em solos granulares**. 2009. 231 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

LOBO, B.O et al. Previsão de capacidade de carga de estacas através de conceitos de transferência de energia no ensaio SPT. *Geotecnia*, n 115, p. 5-20, 2009.

LUKIANCHUKI, J. A. **Interpretação de resultados do ensaio SPT com base em instrumentação dinâmica**. 2012. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 358 p.

LUKIANCHUKI, J. A.; BERNARDES, G. P.; ESQUIVEL, E. R. Experimental soil dynamic force: an improvement of standard penetration test (SPT) interpretation. In: Proc., 4th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, 2012, Porto de Galinhas, Brazil.

MACHADO, S.L. **Aplicação de Conceitos de Elastoplasticidade a Solos Não Saturados**. Tese (doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos. 1998, 360 p.

MENEZES, S.M. **Correlações entre os ensaios de penetração (SPT; CPT) e os resultados de ensaios de laboratório para a região de São Carlos- SP**. 1990. 106 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

MORAES, L.S. **Prova de carga dinâmica em placa**. 2005. Tese (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 159 p.

MORAIS, T.D.O. **Interpretação racional de resultados de ensaios SPT com base em conceitos de energia**. 2014. Tese (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 228 p.

NEVES, L.F.S. **Metodologia para a determinação da eficiência do ensaio SPT através de prova de carga estática sobre o amostrador padrão**. 2004. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP. 90p.

NOREÑA, P. C. T. **Estimativa da eficiência do ensaio SPT através da execução da prova de carga estática sobre o amostrador**. 2011. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP. 187p.

ODEBRECHT, E, **Medidas de energia no ensaio SPT**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 250 p.

ODEBRECHT, E; SCHNAID, F; ROCHA, M.M; BERNARDES, G.P. Energy measurements for Standard Penetration Tests and the effects of the length of rods. **Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Millpress**, Rotterdam, ISBN 90 5966 009 9, p. 351-358, 2004.

ODEBRECHT, E; SCHNAID, F; ROCHA, M.M; BERNARDES, G.P. Energy efficiency for standard penetration tests. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, p. 1252-1263, Oct. 2005.

PAIKOWSKY, S. G., & WHITMAN, R. V. The effects of plugging on pile performance and design. **Can. Geotech. J.**, p. 429-440, 1990.

PEIXOTO, A.S.P. **Estudo do ensaio SPT-T e sua aplicação na prática de engenharia de fundações**. 2001. Tese de Doutorado- Universidade Estadual de Campinas/Faculdade de Engenharia Agrícola (UNICAMP/FEAGRI). Campinas- SP. 468 p.

QUARESMA, A.R, DÉCOURT, L., QUARESMA, A.F, DE SOUZA SOARES DE ALMEIDA, M., & DANZIGER, F. **Investigações Geotécnicas**. in W. HACHICH, F. F. FALCONI, J. L. SAES, R. G. Q. FROTA, C. S. CARVLHO, & S. NIYAMA. *Fundações Teoria e Prática*. São Paulo: Pini Ltda. 1998. p. 120-123.

ROBERTSON, P.K; CAMPANELLA, R.G; GILLESPIE, D; GREIG, J. Use of piezometer cone data. In: ASCE SPECIALITY CONFERENCE IN SITU: USE OF IN SITU TEST IN GEOTECHNICAL ENGINEERING, 1986, Blacksburg, Virginia. Proceeding... ASCE, 1986. P. 1263-1280.

SCHMERTMANN, J.H.; PALÁCIOS, A. Energy dynamics of SPT. **Journal of the Geotechnical Engineering Division - ASCE**, v. 105, n. GT8, p. 909-926, Ago. 1979.

SCHMERTMANN, J.H. Statics of SPT. **Journal of the Geotechnical Engineering Division - ASCE**, v. 105, n. GT5, p. 655-670, May. 1979.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E.; ROCHA, M. M.; BERNARDES, G. P. Prediction of soil properties from the concepts of energy transfer in dynamic penetration tests. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - ASCE**, v. 135, n.8, p. 1092-1100, Aug. 2009a.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E.; LOBO, B.; ROCHA, M. M. **Ensaio de penetração dinâmica: inovações aplicadas à prática de engenharia**. In: Engenharia de fundações – Passado recente e perspectivas. Suprema Gráfica e Editora Ltda., São Carlos/SP, 371p. 2009b.

SCHNAID, F.; LANGONE, M.J. A method for predicting bearing capacity from dynamics penetration tests. In: **Soils and Rocks- Na International Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. v 36, n 1, p. 55-65. 2013.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT E. **SPT (Standard Penetration test)**. in SCHNAID, F.; ODEBRECHT E. *Ensaio de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações*. São Paulo: Oficina de Textos. 2012. p. 23-61.

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

SMITH, E.A.L. Pile-driving analysis by the wave equation. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division - ASCE**, v. 86, n. SM4, p. 25 - 61, 1960.

SY, A.; CAMPANELLA, R.G. Wave equation modeling of SPT. In: ASCE GEOTECHNICAL ENGINEERING CONGRESS, 1991, Boulder, Colorado. p. 8-23.

VÉSIC, A. S. Expansion of cavities in infinite soil mass. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division - ASCE**, v. 98, n. SM3, p. 265 - 290, 1972.

VIANNA, A.P.F. Influência da dimensão e da sucção matricial no comportamento de fundações superficiais assentes em solo arenoso não-saturado. 2005. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-28042006-100500/>>. Acesso em: 2015-11-01.

APÊNDICE A- Programação no software Matlab® para o cálculo da quantidade de energia pelo método EFV

```

clear all;

nomearq = input('Entre com o nome do arquivo com a extensão ,asc: ','s');

comp_haste = input('Entre com o comprimento de hastes, em metros: ');

penetracao = input('Entre com a penetração, em metros: ');

peso_haste=comp_haste*3.23;
cabeca_de_bater=3.27;
peso_composicao=(peso_haste+65+cabeca_de_bater)*9.81/1000;
Energia_sist=478.2375+(65+peso_haste)*penetracao*9.81;

E_amost=(1-0.0042*comp_haste)*(0.76*(0.75+penetracao)*65+
+1*peso_haste*penetracao)*9.81;

Z = load(nomearq);

acel_1 = Z(:,2);
acel_2 = Z(:,3);
acel = (acel_1+acel_2)*0.5;
força = Z(:,1);

[a,b] = size(Z);

tempo = 0:1/96000:(a-1)/96000;

c=1;
for w=1:a+1
if acel(w)<-1000
break
end
c=c+1;
end

for j=1:1:a-c+31
tempo_veloc(j)=(j-1)/96000+(c-30)/96000;
força_evento(j)=força(j+c-31);
end

d=2;
for i=(c-30):1:a-2
veloc(d)=-1*(acel(i)+acel(i+1))/2*1/96000;
veloc(d)=veloc(d)+veloc(d-1);

veloc_1(d)=-1*(acel_1(i)+acel_1(i+1))/2*1/96000;
veloc_1(d)=veloc_1(d)+veloc_1(d-1);

veloc_2(d)=-1*(acel_2(i)+acel_2(i+1))/2*1/96000;
veloc_2(d)=veloc_2(d)+veloc_2(d-1);

d=d+1;
end

d=2;
for i=1:1:a-c+29
Desloc(d)=(veloc(i)+veloc(i+1))/2*1/96000*1000;
Desloc(d)=Desloc(d)+Desloc(d-1);

```

```

Desloc_1(d)=(veloc_1(i)+veloc_1(i+1))/2*1/96000*1000;
Desloc_1(d)=Desloc_1(d)+Desloc_1(d-1);

Desloc_2(d)=(veloc_2(i)+veloc_2(i+1))/2*1/96000*1000;
Desloc_2(d)=Desloc_2(d)+Desloc_2(d-1);

d=d+1;
end

[x,y]=size(veloc);
BL=-2*(penetracao-Desloc(y)/1000)/((tempo(y+c-30)-tempo_veloc(1))^2);
BL_1=-2*(penetracao-Desloc_1(y)/1000)/((tempo(y+c-30)-tempo_veloc(1))^2);
BL_2=-2*(penetracao-Desloc_2(y)/1000)/((tempo(y+c-30)-tempo_veloc(1))^2);

for i=1:1:a
    acel_BL(i)=acel(i)+BL;
    acel_BL_1(i)=acel_1(i)+BL_1;
    acel_BL_2(i)=acel_2(i)+BL_2;
end

for j=1:1:a-c+30
    veloc_BL(j)=0;
    veloc_BL_1(j)=0;
    veloc_BL_2(j)=0;
    Desloc_BL(j)=0;
    Desloc_BL_1(j)=0;
    Desloc_BL_2(j)=0;
end

d=2;
for i=(c-30):1:a-1
    veloc_BL(d)=-1*(acel_BL(i)+acel_BL(i+1))/2*1/96000;
    veloc_BL(d)=veloc_BL(d)+veloc_BL(d-1);

    veloc_BL_1(d)=-1*(acel_BL_1(i)+acel_BL_1(i+1))/2*1/96000;
    veloc_BL_1(d)=veloc_BL_1(d)+veloc_BL_1(d-1);

    veloc_BL_2(d)=-1*(acel_BL_2(i)+acel_BL_2(i+1))/2*1/96000;
    veloc_BL_2(d)=veloc_BL_2(d)+veloc_BL_2(d-1);

    d=d+1;
end

d=2;
for i=1:1:a-c+30
    Desloc_BL(d)=(veloc_BL(i)+veloc_BL(i+1))/2*1/96000*1000;
    Desloc_BL(d)=Desloc_BL(d)+Desloc_BL(d-1);

    Desloc_BL_1(d)=(veloc_BL_1(i)+veloc_BL_1(i+1))/2*1/96000*1000;
    Desloc_BL_1(d)=Desloc_BL_1(d)+Desloc_BL_1(d-1);

    Desloc_BL_2(d)=(veloc_BL_2(i)+veloc_BL_2(i+1))/2*1/96000*1000;
    Desloc_BL_2(d)=Desloc_BL_2(d)+Desloc_BL_2(d-1);

    d=d+1;
end

força_calc=16.816*veloc_BL;

```

```

força_calc_1=16.816*veloc_BL_1;
força_calc_2=16.816*veloc_BL_2;

for j=1:1:a-c+31
Energia(j)=0;
Energia_1(j)=0;
Energia_2(j)=0;
end

d=2;
for i=1:1:a-c+29
    Energia(d)=(1000*veloc_BL(i)*força(i+c-30)+1000*veloc_BL(i+1)*força(i+1+c-30))/2*1/96000;
    Energia(d)=Energia(d)+Energia(d-1);

    Energia_1(d)=(1000*veloc_BL_1(i)*força(i+c-30)+1000*veloc_BL_1(i+1)*força(i+1+c-30))/2*1/96000;
    Energia_1(d)=Energia_1(d)+Energia_1(d-1);

    Energia_2(d)=(1000*veloc_BL_2(i)*força(i+c-30)+1000*veloc_BL_2(i+1)*força(i+1+c-30))/2*1/96000;
    Energia_2(d)=Energia_2(d)+Energia_2(d-1);

    d=d+1;
end

F_max=max(força);

E=max(Energia);
Des_max=max(Desloc_BL);
Eficiencia=E/Energia_sist*100;

E_1=max(Energia_1);
Des_max_1=max(Desloc_BL_1);
Eficiencia_1=E_1/Energia_sist*100;

E_2=max(Energia_2);
Des_max_2=max(Desloc_BL_2);
Eficiencia_2=E_2/Energia_sist*100;

E_F2=max(Energia_F2)*C;

disp('_____ -')
disp('Força máx, medida (kN) =')
disp(F_max)

disp('_____ PARA A MÉDIA DOS DOIS ACELERÔMETROS _____ -')
disp('Energia máxima do golpe (Joules) =')
disp(E)
disp('Eficiência do golpe (%) =')
disp(Eficiencia)
disp('Base-line utilizada (m/s^2)=')
disp(BL)
disp('Deslocamento máximo (mm) =')
disp(Des_max)

disp('_____ PARA SOMENTE O ACELERÔMETRO 1 _____')
disp('Energia máxima do golpe (Joules) =')
disp(E_1)
disp('Eficiência do golpe (%) =')
disp(Eficiencia_1)

```

```

disp('Base-line utilizada (m/s^2)=')
disp(BL_1)
disp('Deslocamento máximo (mm) =')
disp(Des_max_1)

disp('_____ PARA SOMENTE O ACELERÔMETRO 2 _____')
disp('Energia máxima do golpe (Joules) =')
disp(E_2)
disp('Eficiência do golpe (%) =')
disp(Eficiencia_2)
disp('Base-line utilizada (m/s^2)=')
disp(BL_2)
disp('Deslocamento máximo (mm) =')
disp(Des_max_2)

disp('_____ ENERGIA ENTREGUE AO SOLO - ODEBRECHT (Joules) _____')
disp(E_amost)

OUT=zeros((a-c+31),5);
OUT_1=zeros((a-c+31),5);
OUT_2=zeros((a-c+31),5);

OUT(:,1)=tempo_veloc;
OUT(:,2)=força_evento;
OUT(:,3)=força_calc;
OUT(:,4)=Desloc_BL;
OUT(:,5)=Energia;

OUT_1(:,1)=tempo_veloc;
OUT_1(:,2)=força_evento;
OUT_1(:,3)=força_calc_1;
OUT_1(:,4)=Desloc_BL_1;
OUT_1(:,5)=Energia_1;

OUT_2(:,1)=tempo_veloc;
OUT_2(:,2)=força_evento;
OUT_2(:,3)=força_calc_2;
OUT_2(:,4)=Desloc_BL_2;
OUT_2(:,5)=Energia_2;

xlswrite('Energia.xlsx',OUT,1);
xlswrite('Energia.xlsx',OUT_1,2);
xlswrite('Energia.xlsx',OUT_2,3);

figure(1)
plot(tempo,força)
hold on
plot(tempo_veloc,força_calc,'r')
plot(tempo_veloc,força_calc_1,'y')
plot(tempo_veloc,força_calc_2,'g')
title('MÉDIA - ACELEROMETRO 1 - ACELEROMETRO 2');
xlabel('tempo (s)');
ylabel('Força (kN)');
hleg=legend('MEDIDO','V*Z-MÉD','V*Z-ACEI, 1','V*Z-ACEL, 2');

figure(2)
plot(tempo_veloc,Desloc_BL)
hold on
plot(tempo_veloc,Desloc_BL_1,'r')

```

```
hold on
plot(tempo_veloc,Desloc_BL_2,'g')
title('DESLOCAMENTO');
xlabel('tempo (s)');
ylabel('Deslocamento (mm)');
xlim([0;tempo_veloc(a-c+30)]);
ylim([0;(1,2*Des_max)]);
hleg=legend('MÉDIA','ACEL, 1','ACEL, 2');
```

```
figure(3)
plot(tempo_veloc,Energia)
hold on
plot(tempo_veloc,Energia_1,'r')
hold on
plot(tempo_veloc,Energia_2,'g')
title('ENERGIA');
xlabel('tempo (s)');
ylabel('Energia (J)');
xlim([0;tempo_veloc(a-c+30)]);
ylim([0;(E+80)]);
hleg=legend('MÉDIA','ACEL, 1','ACEL, 2');
```


APÊNDICE B- Resultados típicos dos ensaios SPT com medida da quantidade de energia

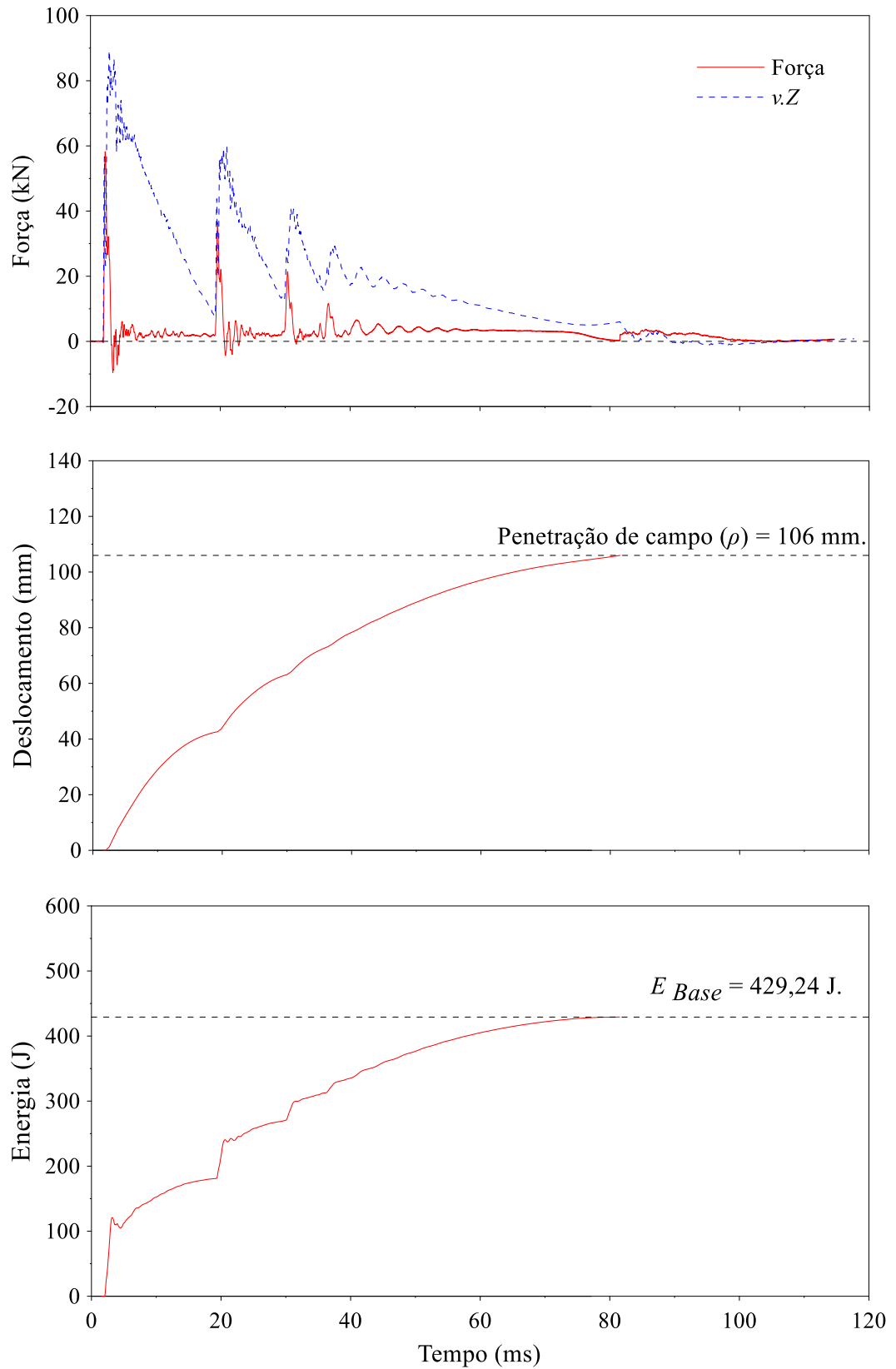


Figura B.1 Resultados do ensaio SPT. Profundidade 1 m, golpe 3.

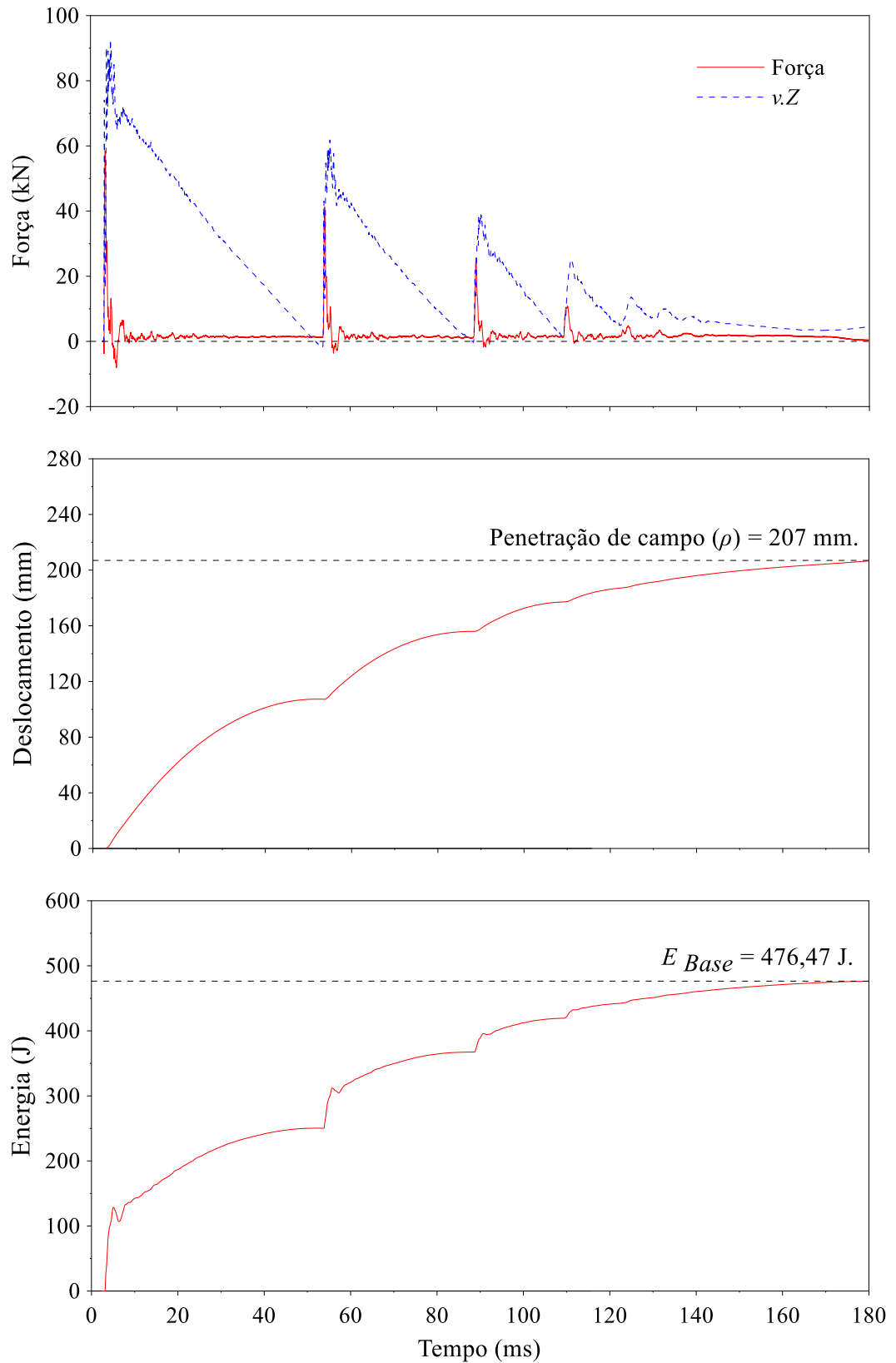


Figura B.2 Resultados do ensaio SPT. Profundidade 3 m, golpe 2.

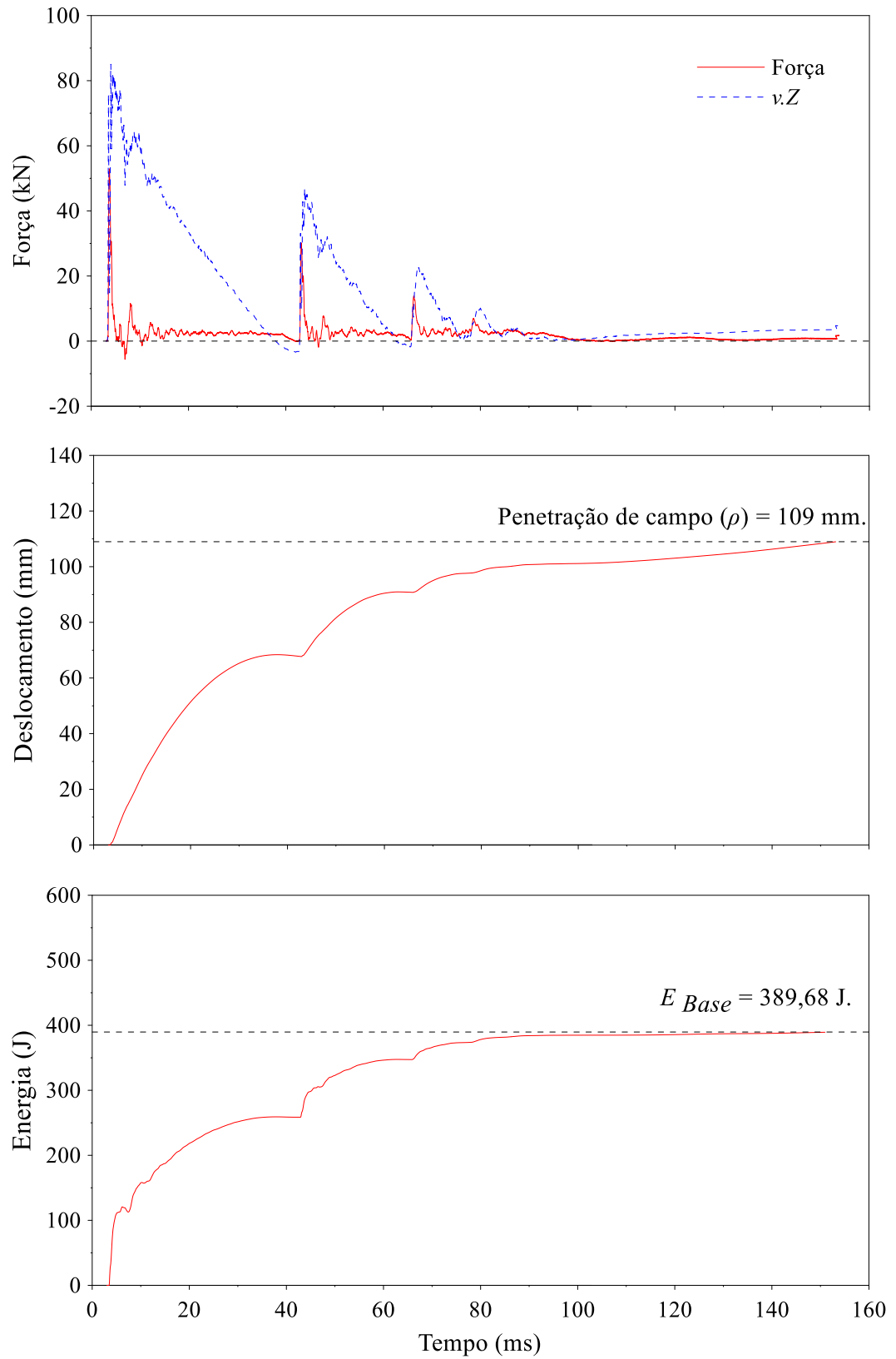


Figura B.3 Resultados do ensaio SPT. Profundidade 5 m, golpe 3.

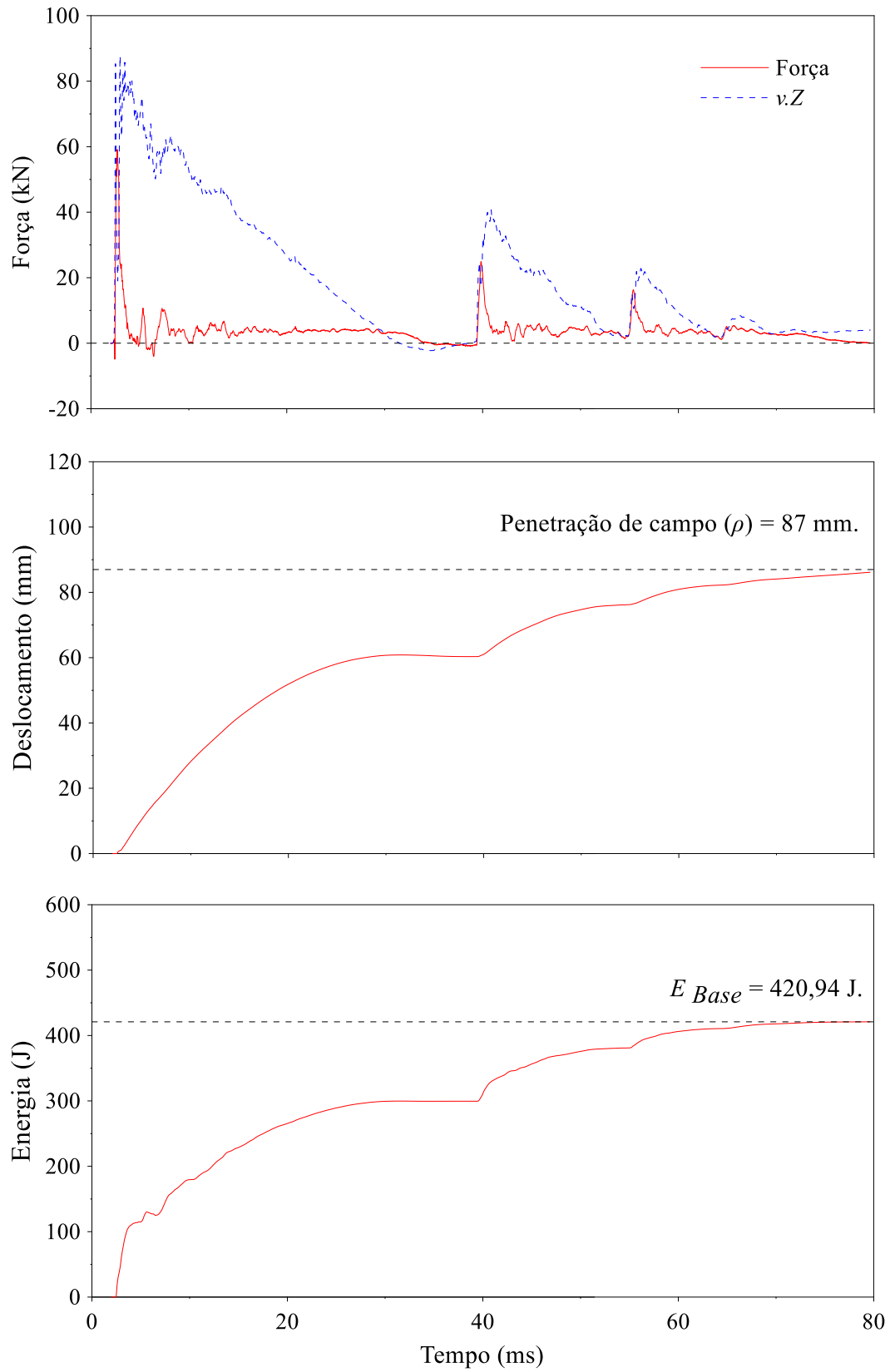


Figura B.4 Resultados do ensaio SPT. Profundidade 6 m, golpe 4.

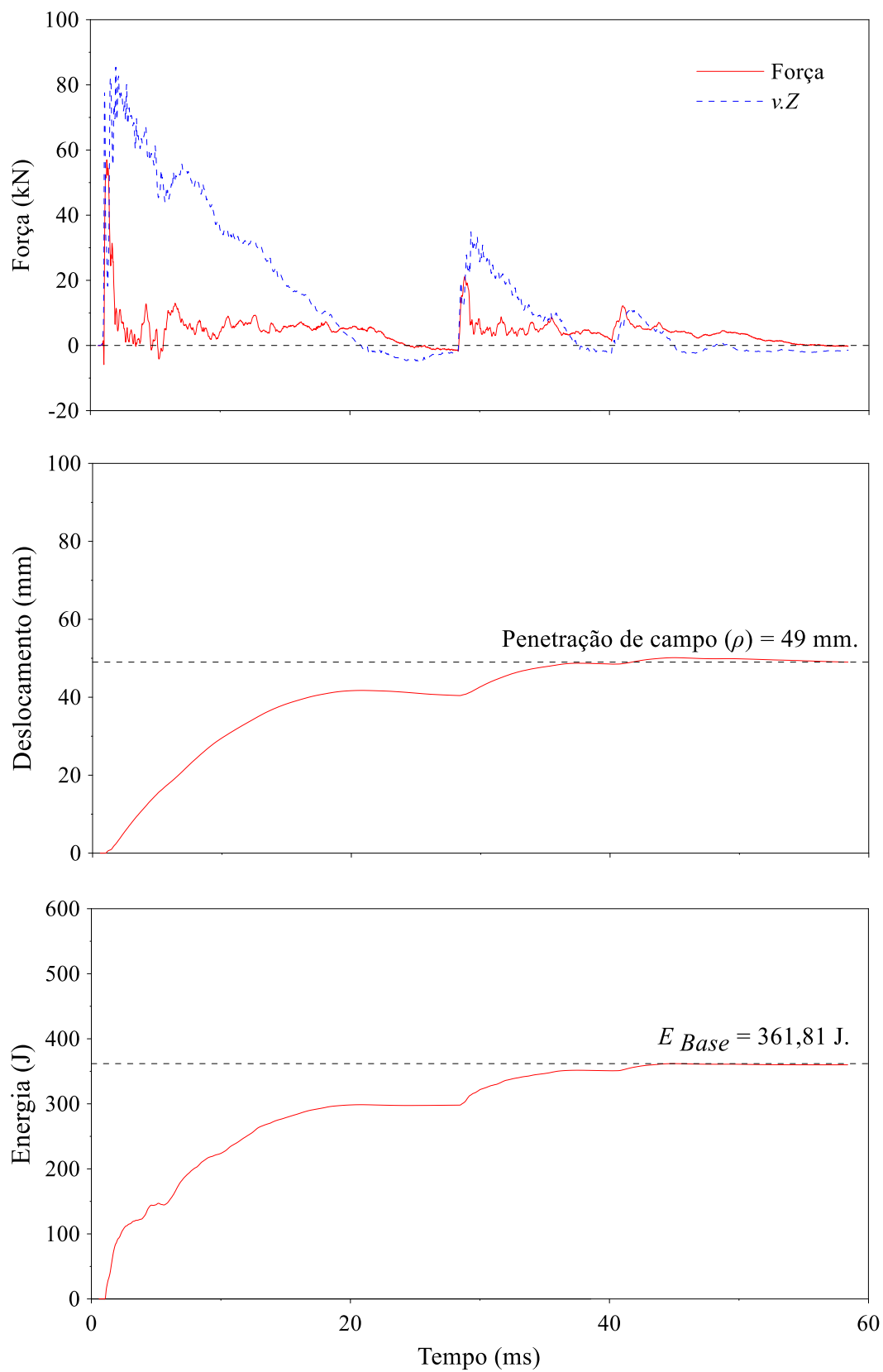


Figura B.5 Resultados do ensaio SPT. Profundidade 7 m, golpe 5.

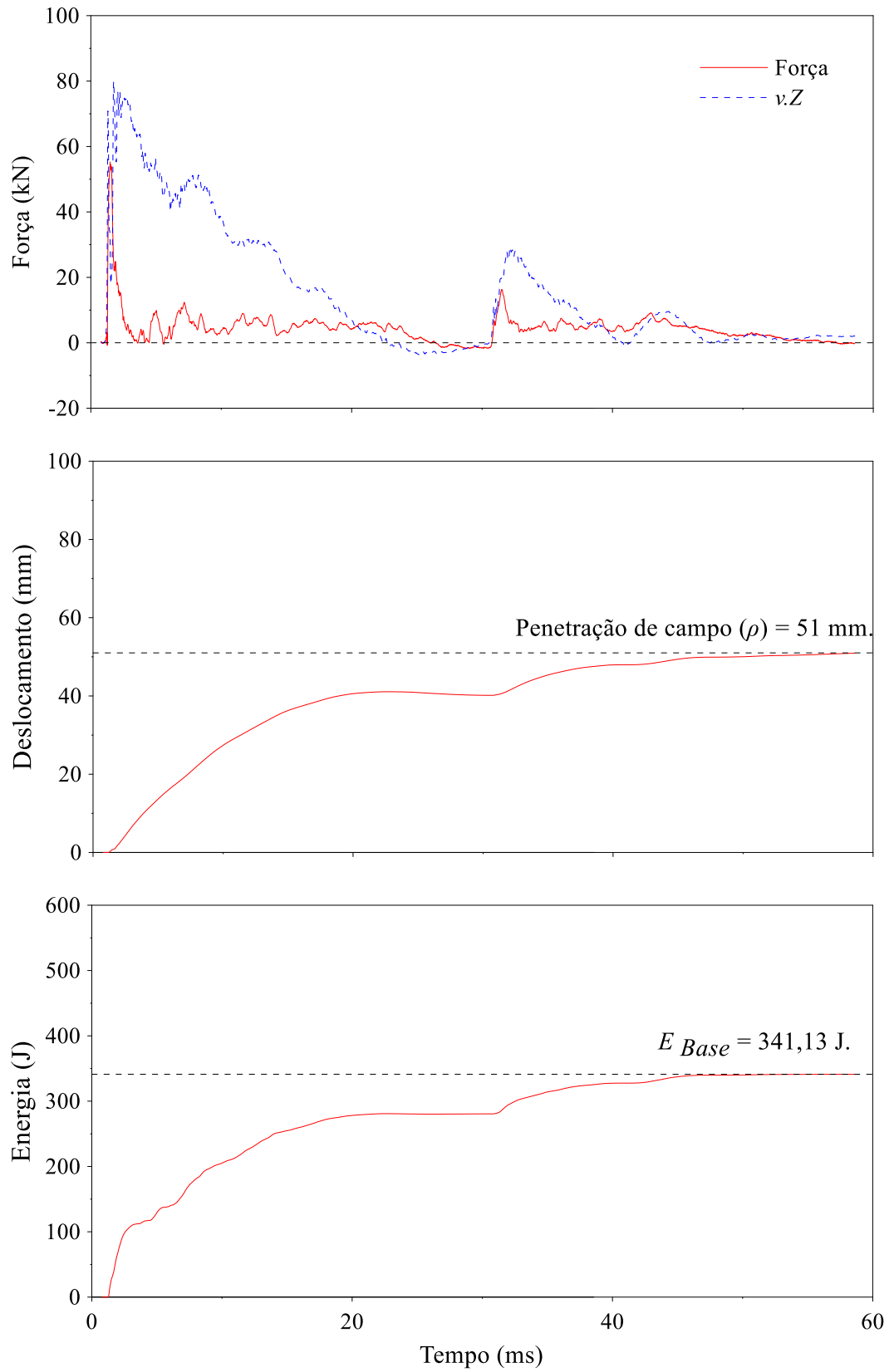


Figura B.6 Resultados do ensaio SPT. Profundidade 8 m, golpe 4.

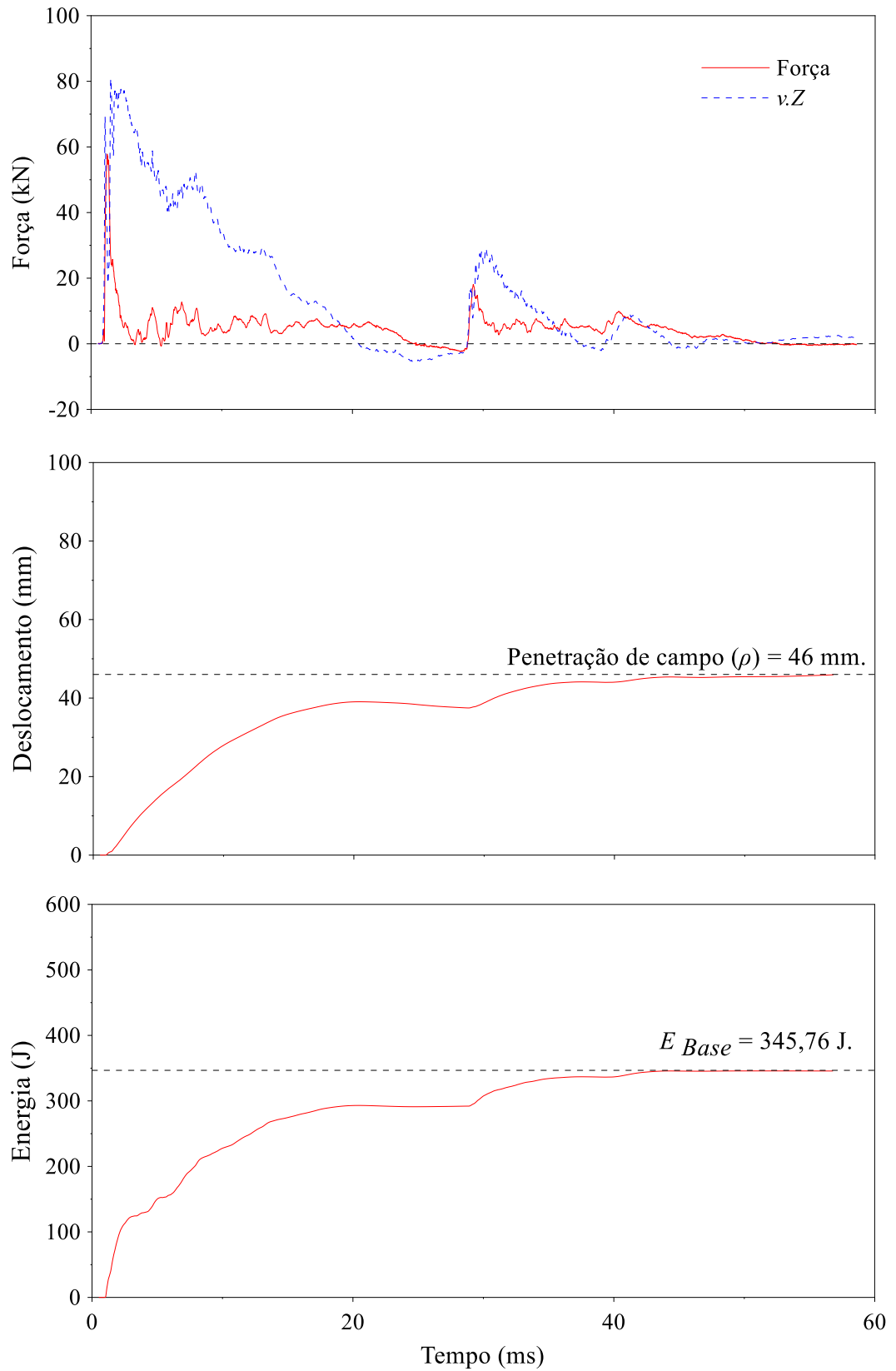


Figura B.7 Resultados do ensaio SPT. Profundidade 8 m, golpe 5.

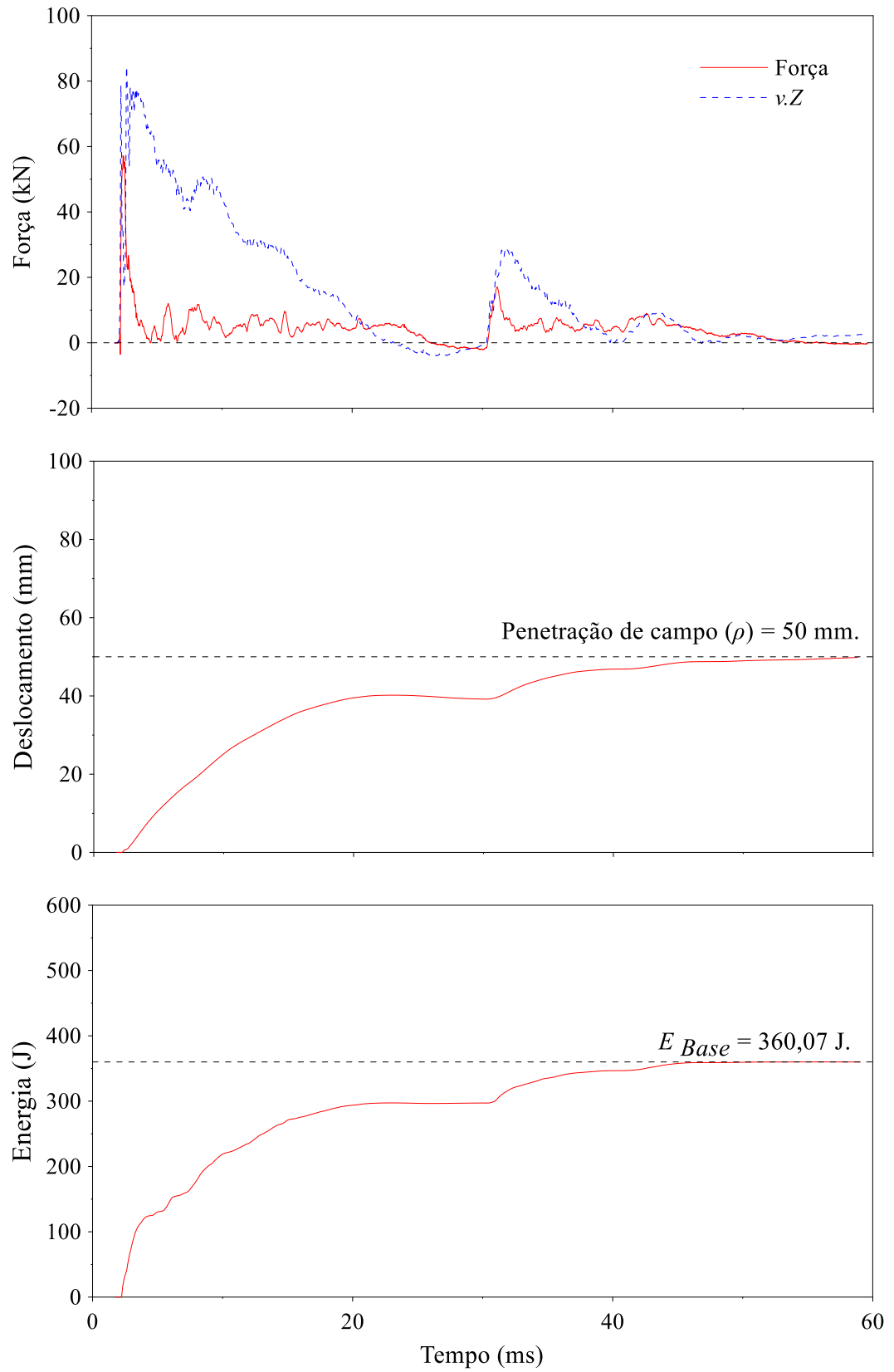


Figura B.8 Resultados do ensaio SPT. Profundidade 8 m, golpe 6.

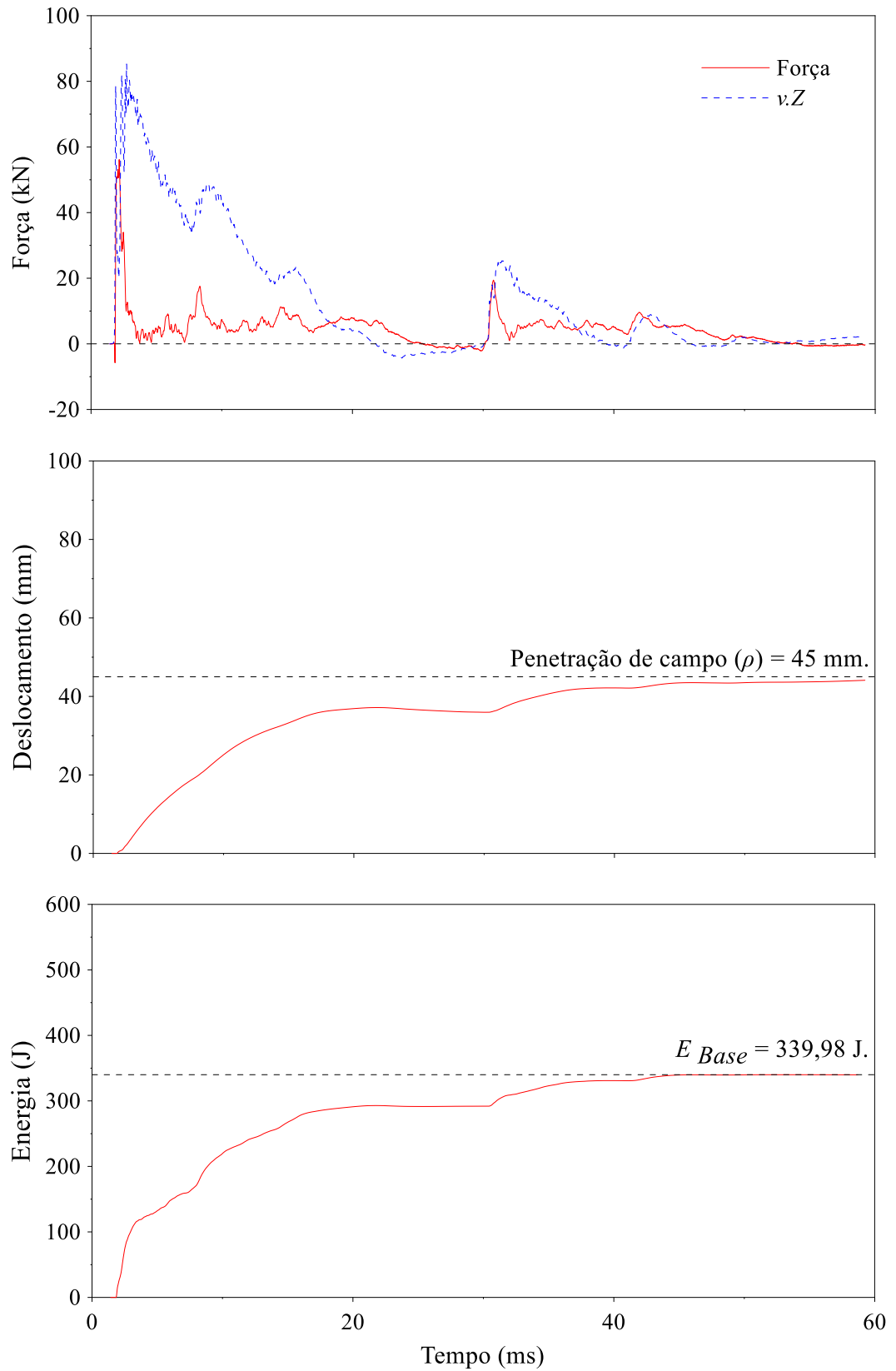


Figura B.9 Resultados do ensaio SPT. Profundidade 9 m, golpe 4.

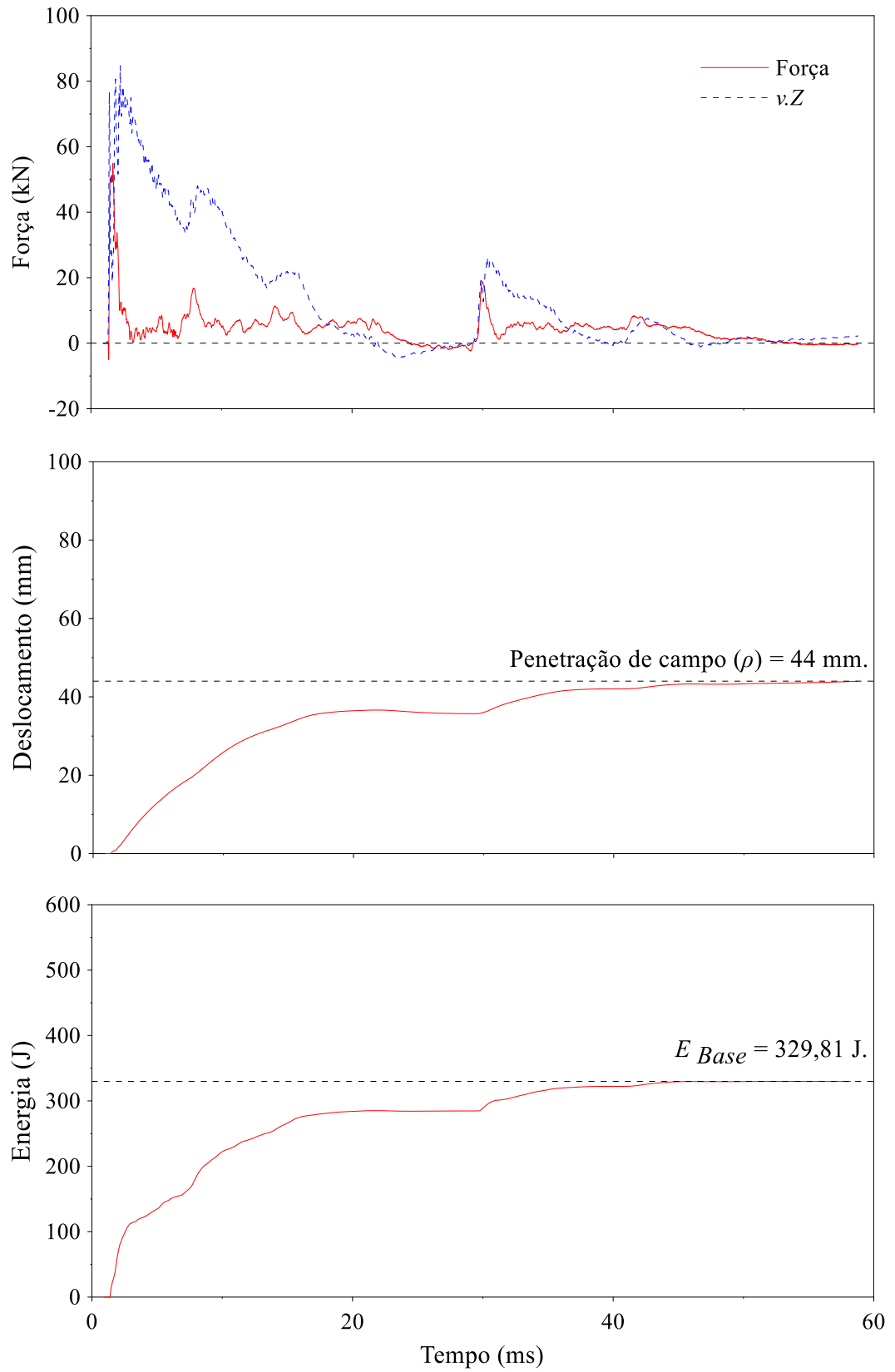


Figura B.10 Resultados do ensaio SPT. Profundidade 9 m, golpe 6.

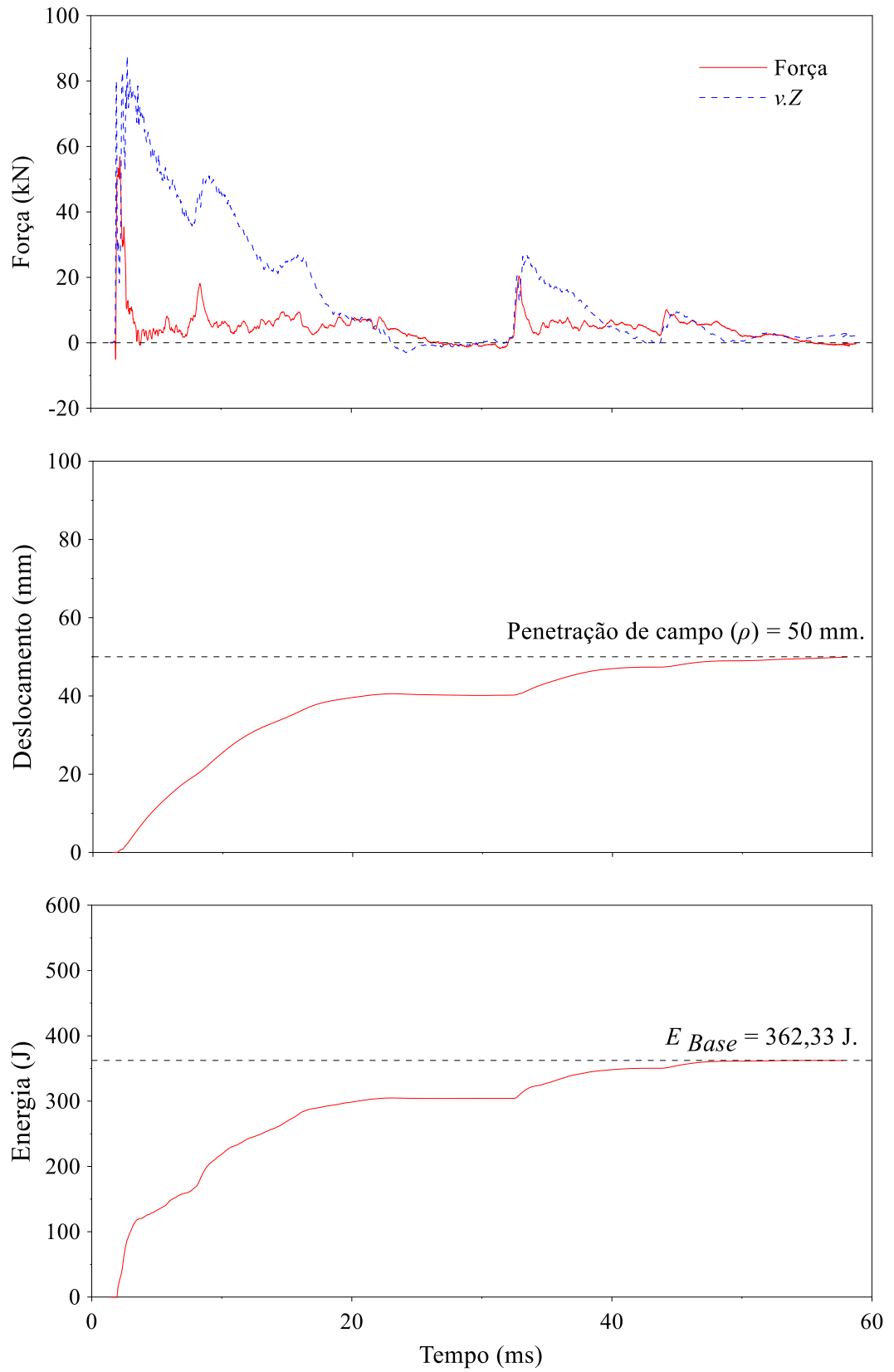


Figura B.11 Resultados do ensaio SPT. Profundidade 9 m, golpe 7.

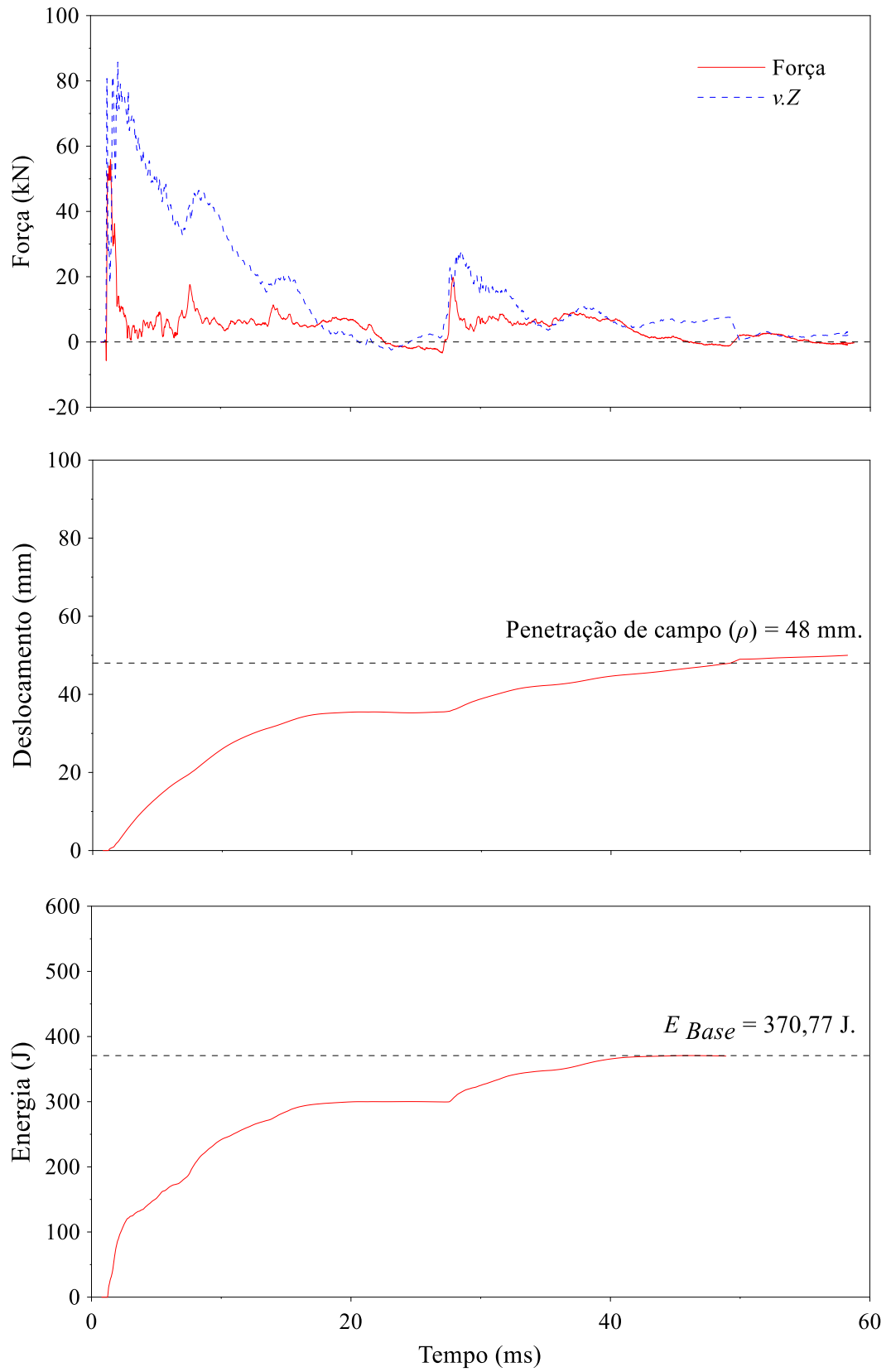


Figura B.12 Resultados do ensaio SPT. Profundidade 9 m, golpe 10.

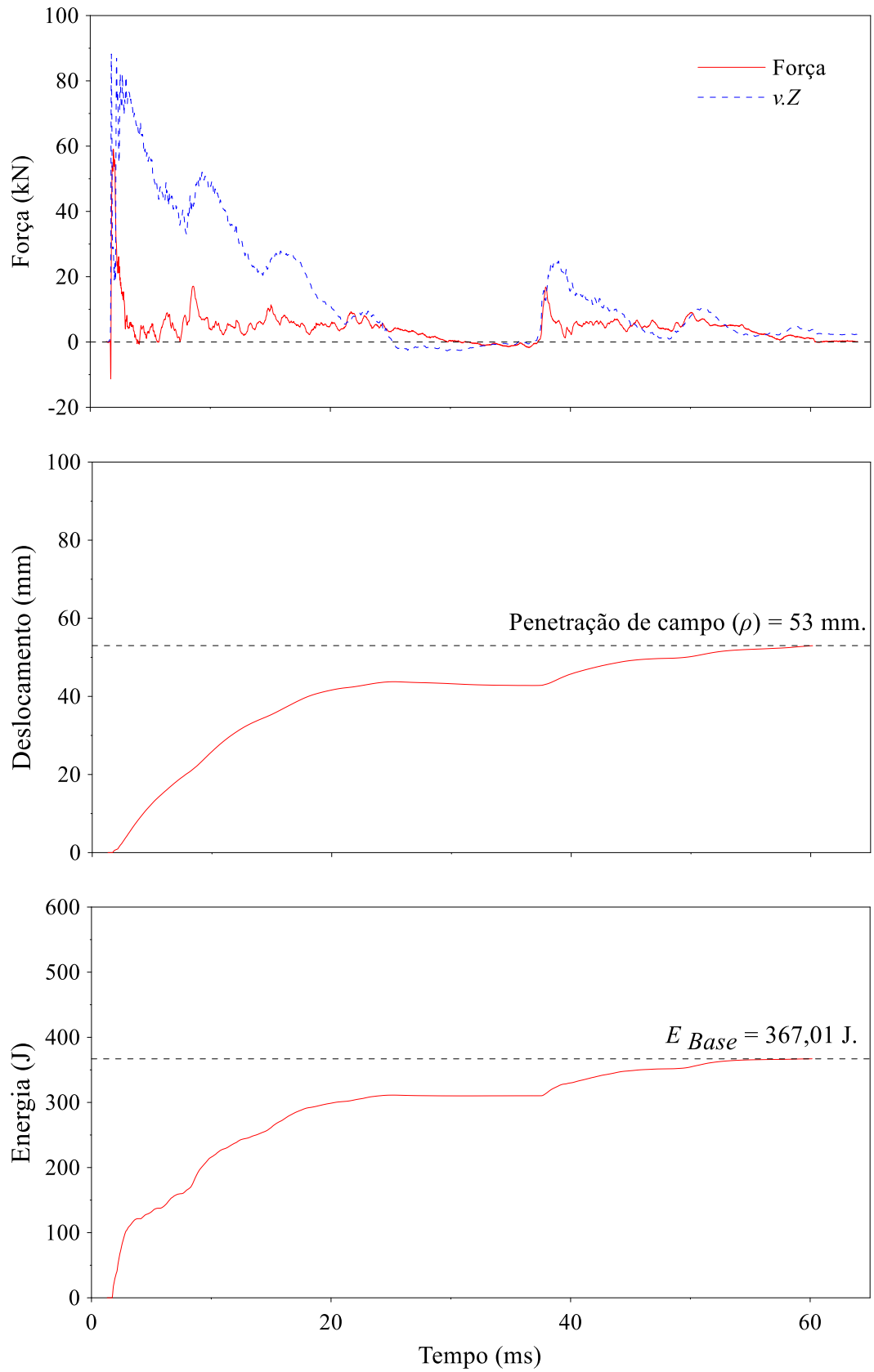


Figura B.13 Resultados do ensaio SPT. Profundidade 10 m, golpe 4.

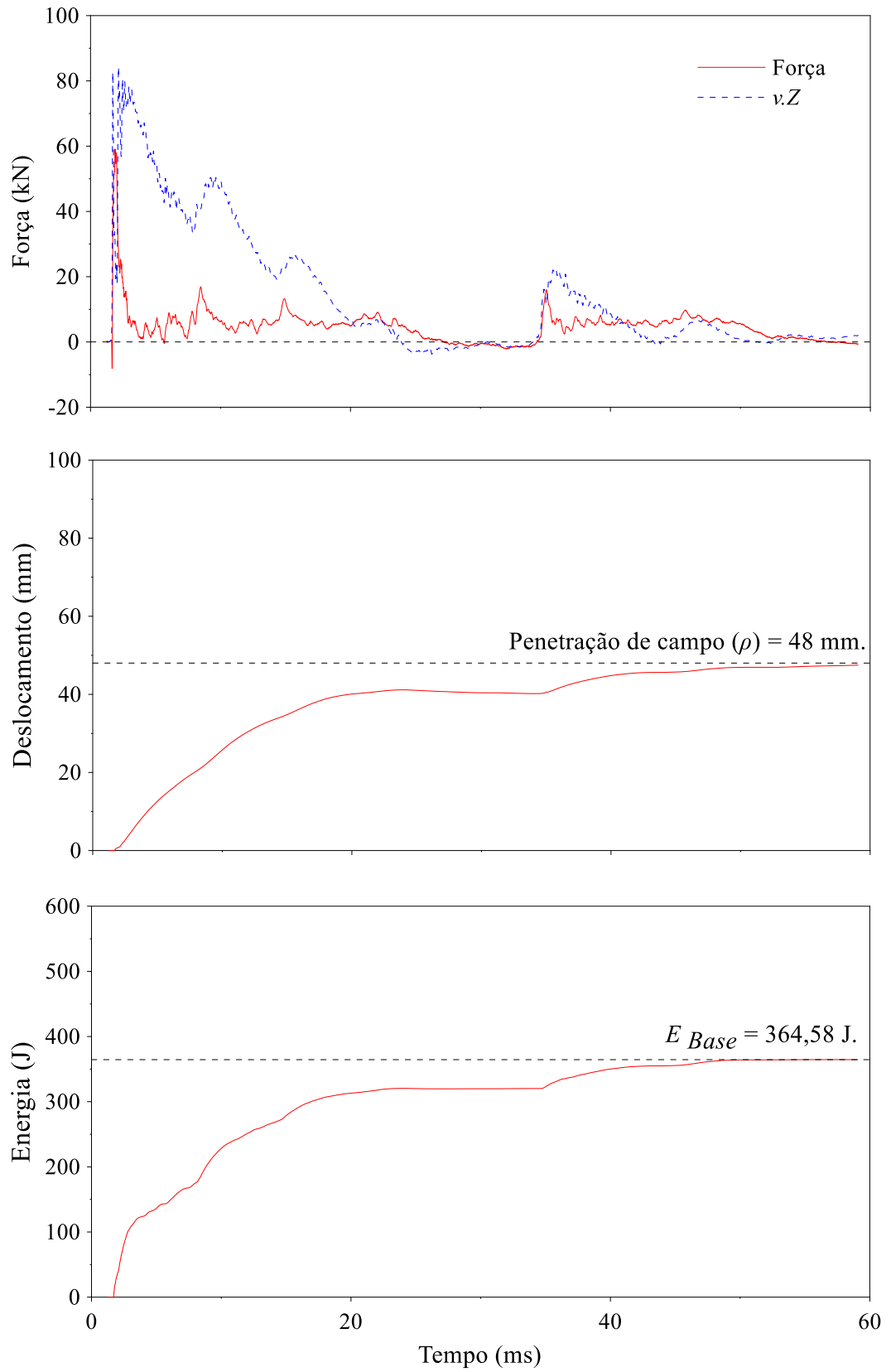


Figura B.14 Resultados do ensaio SPT. Profundidade 10 m, golpe 5.

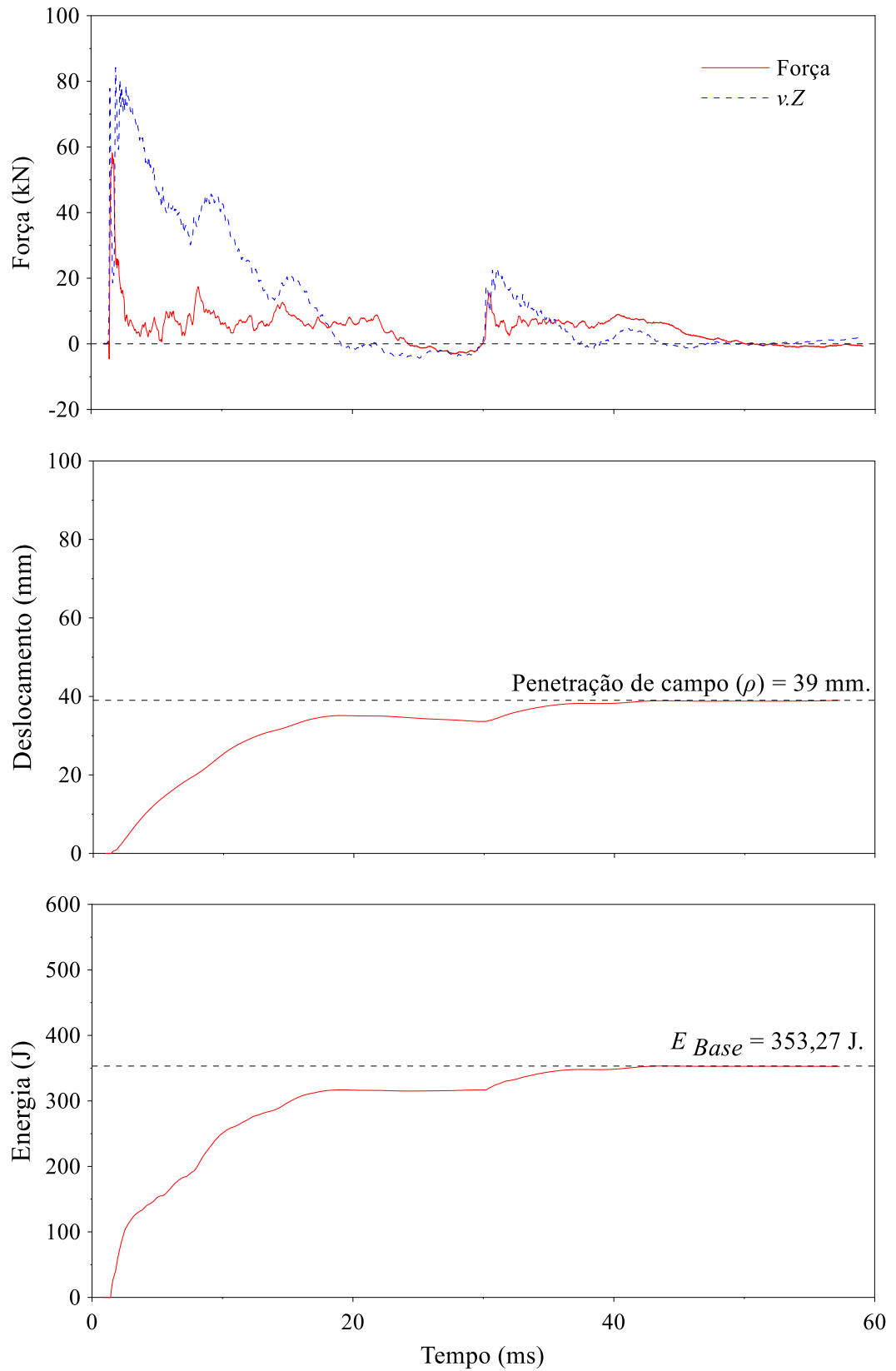


Figura B.15 Resultados do ensaio SPT. Profundidade 10 m, golpe 7.