

THAISE DA SILVA OLIVEIRA MORAIS

**Interpretação racional de resultados de ensaios
SPT com base em conceitos de energia**

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para obtenção do título
de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Edmundo Rogério Esquivel

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

SÃO CARLOS

2014

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.

M827i Morais, Thaise da Silva Oliveira
 Interpretação racional de resultados de ensaios SPT
 com base em conceitos de energia / Thaise da Silva
 Oliveira Moraes; orientador Edmundo Rogério Esquivel .
 São Carlos, 2014.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
 e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de
 Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
 2014.

 1. Ensaio SPT. 2. Princípio de Hamilton. 3. energia
 no SPT. 4. instrumentação dinâmica. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **THAISE DA SILVA OLIVEIRA MORAIS**.

Título da dissertação: "Interpretação racional de resultados de ensaios SPT com base em conceitos de energia".

Data da defesa: 28/11/2014

Comissão Julgadora:

Resultado:

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

APROVADO

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

APROVADO

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

APROVADO

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

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

Aos meus pais, Maria do Socorro e José Morais, minhas referências de vida. À Minha amada irmã, Thamires Morais. Ao meu amado avô, José Gomes (Benoní) e à minha avó do coração, Georgina Sampaio. Ao meu namorado, João Manoel Sampaio Filho, pelo amor e apoio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS, meu pai e criador, por me guiar, guardar e estar comigo em todos os momentos desta caminhada, pelo cuidado, saúde e coragem para enfrentar os desafios. Obrigada meu “pai” pela conclusão de mais essa etapa.

À minha amada mãe, Maria do Socorro, por todo amor, apoio e por me dar forças para continuar, mostrando-me que tudo dá certo quando nos dedicamos, e que o trabalho é sempre o melhor caminho. Ao meu pai, José Morais, por todo carinho e apoio. À minha irmã, Thamires Morais, minha amiga e parceira, pela amizade e companheirismo, por ter ouvido minhas lamentações, sempre me incentivando na caminhada. Ao meu querido avô, José Gomes (vovô Benoni), por seu amor e por ser meu principal incentivador.

Ao meu namorado, companheiro e melhor amigo, João Manoel Sampaio Filho, por todo amor, apoio e compreensão a mim dedicados desde o início do nosso encontro, quando ainda éramos graduandos em engenharia civil, refletindo hoje neste trabalho. Pela ajuda nos ensaios de campo e discursões geotécnicas, que muito contribuíram neste trabalho. Amor, obrigada por todo apoio em mais essa etapa de nossas vidas.

Agradeço à minha família do coração: Georgina Sampaio (vovó Georgina), Marta Sampaio, José de Ribamar (*in memoriam*), Tia Vanda e Janete, pelo carinho, cuidado e incentivo durante todo o tempo de convivência. À Manuela Sampaio, Claudete Sampaio e João Manoel Sampaio, que mesmo longe, sempre torceram por mim.

Ao Prof. Dr. Edmundo Rogério Esquivel, meu orientador, pela oportunidade, pelo tema de mestrado, discursões, confiança em minha capacidade e apoio na realização deste trabalho. Agradeço pela amizade, paciência e conhecimentos transmitidos.

Agradeço a professora Dra. Juliana Azoia Lukiantchuki, por sua disponibilidade para discutirmos sobre o tema, pela paciência em responder minhas dúvidas, conversas e pelo constante incentivo.

Agradeço a empresa Sondosolo - Geotecnia e Engenharia Ltda., pelo apoio na realização dos ensaios de campo que garantiram a concretização deste trabalho. Agradeço a equipe de funcionários que participaram dos ensaios, por serem pacientes e prestativos.

Aos professores do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos que contribuíram para minha formação na área. Em especial, aos professores: Dr. Nelson Aoki, por sua disponibilidade, pelos momentos de conversa sobre o tema e ideias compartilhadas; Dra. Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha, pela amizade, conversas, valiosos conselhos e conhecimento compartilhado; professor Dr. José Carlos Angelo Cintra, pelo conhecimento compartilhado e conselhos; Dr. Jefferson Lins da Silva, pelas conversas,

conselhos e pela amizade; Dr. Orêncio Monje Villar, pelos conhecimentos compartilhados e amizade.

Aos funcionários e técnicos do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos, Maristela, Neiva, Álvaro, Herivelto, Toninho, Benê, Oscar, Zé Luís, Benedito e Clever, pela amizade, apoio e momentos de descontração. Agradeço ao Dr. Luiz Vareda, do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, pela disponibilidade em sanar minhas dúvidas sobre instrumentação.

À minha orientadora da graduação e amiga, Prof^a. Dra. Viviane C. Leão Ramos, por me incentivar a fazer o mestrado, conselhos e experiência compartilhada. Às minhas coorientadoras, Prof^a Dra. Heliene Ferreira e Prof^a Msc. Luciana Vieira, pela amizade e conselhos.

Agradeço especialmente aos amigos Christopher Fonseca e Phillipe Almeida (colegas de turma), pela convivência e amizade desde o início do mestrado, pelos momentos de trabalho e descontração, dentro e fora do departamento. Vocês foram essenciais para a conclusão de mais essa etapa.

Agradeço especialmente à querida amiga Loana Henriquez Sanchez e Família (Maria Helena, Victor, Mariusa, Luíz e Andíara), que se tornaram minha família em São Carlos. Obrigada pela amizade, cuidado, entusiasmo e pelos momentos de descontração.

Agradeço especialmente à querida amiga Rafaela Faciola, por todo apoio desde o momento da aprovação no mestrado, pela amizade, conselhos, conversas e momentos de descontração.

Agradeço às queridas amigas, Jussara Mechetti, Laurenn Macedo e família pelas conversas, apoio, viagens, amizade e momentos de descontração.

Aos colegas do Departamento de Geotecnia: José Antônio e Karen Bompan, Camila Regina, Breno Rocha, Roberto Aguiar, João Parizoto, Bruno Canoza, Liz Abreu, Tálita Nola, Ingrid Azevedo, Rafaela Machado, Ana Elisa Abreu, Mariana Alher, Katerin Guerrero, Milena Cardoso pelas conversas e momentos de descontração.

Aos amigos da UFAL que vieram para São Carlos na mesma época: Nichollas Nunes, Artur Piatti, Ketson Roberto, Marcell Gustavo, Ricardo Sampaio, Emerson Acácio, Gregório Ferreira, Cleilson Bernardino; e aos que vieram antes e ajudaram na adaptação à nova cidade: Irene Pimentel, Diego de Vasconcelos, Thiago Santos, David Nascimento, Guilherme Barbosa.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

“Que as coisas são inatingíveis?
Ora! Isso não é motivo para não querê-las.
Que tristes seriam os caminhos
Sem a presença distante das estrelas”
(Mario Quintana)

Resumo

MORAIS, T. S. O. **Interpretação racional de resultados de ensaios SPT com base em conceitos de energia**. 2014. 237 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

A sondagem de simples reconhecimento do solo com medida do índice de resistência à penetração dinâmica do amostrador (N_{SPT}), universalmente conhecida como ensaio SPT, é um dos ensaios de campo mais difundidos no Brasil. A popularidade deste ensaio deve-se a sua praticidade, baixo custo, à experiência já adquirida e a fácil utilização dos seus resultados. Entretanto, este ensaio tem sido amplamente criticado devido às variações de equipamentos e procedimentos, que causa dispersões significativas nos resultados. Usualmente, o índice N_{SPT} é utilizado na estimativa da capacidade de carga e recalque de fundações, a partir de correlações empíricas ou semi-empíricas, o que também recebe críticas, visto que essas correlações são baseadas em observações práticas e sem fundamento científico. O índice N_{SPT} é função da quantidade de energia entregue ao amostrador, durante o golpe no ensaio SPT. Assim, o conhecimento da eficiência permite normalizar os valores de N_{SPT} para um valor de referência padrão. O valor padrão adotado internacionalmente, correspondente a uma eficiência de 60%. Desta forma, a análise racional dos resultados de ensaios SPT, concentra-se na estimativa das quantidades de energia envolvidas no ensaio. Neste contexto, o presente trabalho trata da interpretação racional de ensaios SPT realizados com o monitoramento das quantidades de energia envolvidas no ensaio. As energias foram obtidas indiretamente, através de sinais de força e aceleração durante a propagação da onda de tensão pela composição de haste. Para tanto, foram utilizados segmentos de hastes instrumentadas com células de carga e acelerômetros; e um sistema de aquisição de dados indicado para o monitoramento de eventos dinâmicos. Os ensaios SPT foram realizados com instrumentação dinâmica em duas seções ao longo da composição de hastes (topo e base, simultaneamente). Assim, a partir desse arranjo, foram determinadas as quantidades de energia responsáveis pela cravação do amostrador e as perdas ocorridas. A partir dos sinais de força no topo do amostrador, foram determinadas as resistências dinâmicas mobilizadas no sistema solo-amostrador devido à cravação. Estes resultados experimentais foram comparados com resultados teóricos de resistência dinâmica e estática, obtidos com base no Princípio de Hamilton. De posse dos resultados de eficiência, comprimento das amostras recuperadas e do atrito adesão entre a parede externa do amostrador e o solo, foi feito o equilíbrio das reações mobilizadas no amostrador, segundo a proposta de Aoki (2013), sendo obtidas as resistências de ponta e atrito (interno e externo) no sistema solo-amostrador.

Palavras-chave: Ensaio SPT, Princípio de Hamilton, energia no SPT, instrumentação dinâmica.

Abstract

MORAIS, T. S. O. **Rational interpretation of SPT tests results based on energy concepts.** 2014. 237 p. Master Dissertation – Geotechnical Department, School of Engineering at São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2014.

The Standard Penetration Test (SPT) with measurement of the index of resistance to dynamic penetration of the sampler (N_{SPT}) is one of the most widespread in situ tests in Brazil. The popularity of this test is due to its practicality, low cost, acquired experience by practitioners and simple applicability of its results. However, this test has been widely criticized because of variation in equipment and procedures, which causes significant dispersion in the results. The N_{SPT} index is usually used to estimate the bearing capacity and settlement of foundations, using empirical or semi-empirical correlations. This fact also receives criticism, as these correlations are based on practical observations without any scientific basis. The N_{SPT} index depends on the amount of energy delivered to the sampler, during the blow in the SPT test. Thus, knowing the equipment efficiency allows normalizing the N_{SPT} values to a standard reference value. The international reference value corresponds to an efficiency of 60%. In this way, the rational analysis of the results of SPT tests essentially depends on the estimation of the quantities of energy involved in the test. This research presents the rational interpretation of the SPT test results based on monitoring the amounts of energy involved in the test. The energies were indirectly obtained through force and acceleration signals during the stress wave propagation along the string of rods. For this, rod subassemblies instrumented with load cells and accelerometers were used. A suitable data acquisition system for monitoring dynamic events was also used. The SPT tests were performed with instrumented subassemblies placed at two positions along the string of rods (top and bottom simultaneously). Thus, from this arrangement, the amounts of energy accountable for the sampler penetration and the energy losses occurred were determined. Likewise, the dynamic resistances mobilized in the soil-sampler system during the penetration were determined from the force and acceleration signals at the top of the sampler. These experimental results were compared with those theoretical results, based on the Principle of Hamilton. With the efficiency results, the length of recovered samples and the external skin friction in the soil-sampler system, the balance of the reactions mobilized in the sampler was verified, as proposed by Aoki (2013). Thus, the tip and skin friction (internal and external) resistances in the soil-sampler system were obtained.

Keywords: SPT, Principle of Hamilton, the SPT energy, dynamic instrumentation.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Martelos padronizados: a) com pino guia e, b) cilíndrico vazado (adaptado de BELINCANTA e CINTRA, 1998).....	35
Figura 2.2: Esquema do torquímetro acoplado ao topo da composição de hastes no ensaio SPT (ALONSO, 1994 adaptado por PEIXOTO, 2001).	37
Figura 2.3: Ensaio de compressão e tração no amostrador (adaptado de LUTENEGGER & KELLEY, 1998).	39
Figura 2.4: Propagação da onda de tensão na composição de hastes do ensaio SPT (BERNARDES, 1989 adaptado por LUKIANTCHUKI, 2012).....	42
Figura 2.5: Energia de deformação devido à aplicação de uma força numa barra elástica (ODEBRECHT, 2003).	47
Figura 2.6: Extremidade livre (adaptado de BELINCANTA, 1985).	51
Figura 2.7: Extremidade engastada (adaptado de BELINCANTA, 1985).....	52
Figura 2.8: Extremidade engastada (adaptado de BELINCANTA, 1985).....	53
Figura 2.9: Propagação da onda de longitudinal de tensão em uma composição de hastes do ensaio SPT (BERNARDES, 1989 adaptado por LUKIANTCHUKI, 2012).	54
Figura 2.10: Etapas da cravação do amostrador no solo (ODEBRECHT, 2003).....	58
Figura 2.11: Resultados teóricos de eficiência <i>versus</i> comprimento de haste (adaptado de AOKI e CINTRA 2000a; SCHMERTMANN e PALÁCIOS, 1979).....	61
Figura 2.12: Evolução das energias potencial, cinética e trabalho durante o golpe no ensaio SPT (adaptado de AOKI e CINTRA, 2000b e NEVES, 2004).	64
Figura 2.13: (a) Modelo elasto-visco-plástico de Smith (1960) e (b) Relação carga-deslocamento na cravação de elementos no solo segundo o modelo de Smith (1960) – carregamento e descarregamento. (LOBO, 2009 adaptado por NOREÑA, 2011).....	70
Figura 2.14: Curvas resistência <i>versus</i> penetração referente ao ensaio SPT (adaptado de AOKI et al., 2004).	73
Figura 2.15: Equilíbrio das forças atuantes no sistema solo-amostrador (adaptado de Aoki, 2013).....	76
Figura 3.1: Projeto das hastes: a) Dimensões e posicionamento dos sensores; b) Dimensões internas e roscas (LUKIANTCHUKI, 2012).....	80
Figura 3.2: Vista frontal dos acelerômetros instalados em um dos segmentos de haste instrumentado.	81
Figura 3.3: Esquema do circuito elétrico tipo ponte completa de Wheastone (ODEBRECHT, 2003).....	82
Figura 3.4: Detalhes da célula de carga.	82

Figura 3.5: Calibração da célula de carga das hastes instrumentadas.	83
Figura 3.6: Calibração das células de carga das hastes instrumentadas.	84
Figura 3.7: Sistema de aquisição de dados HBM, modelo MX410 (adaptado de Lukiantchuki, 2012).	85
Figura 3.8: Equipamento utilizados nos ensaios de campo.	86
Figura 3.9: Luva bipartida, utilizada nos ensaios de campo: (a) Comparação entre os dois tipos de luvas e, (b) Sistema de rosca cônica.	87
Figura 3.10: Torquímetro da marca Gedore, modelo R600.	87
Figura 3.12: Peça sextavada maciça para conexão da haste instrumentada inferior com o amostrador.	88
Figura 3.12: Alteração realizada na haste instrumentada inferior (dimensões em mm).	89
Figura 3.13: Impermeabilização das aberturas e dos cabos dos sensores.	90
Figura 3.14: Proteção mecânica dos sensores instalados na haste instrumentadas.	90
Figura 3.15: Aquisição total dos dados e o intervalo considerado para os cálculos (golpe). ...	91
Figura 3.16: Verificação da qualidade dos sinais de um golpe do ensaio SPT – equivalência entre F e vZ até o instante $2t/c$	93
Figura 3.17: Resultados de energia para um dos golpes dos ensaios SPT – equipamento convencional, 10 m de profundidade, 5º golpe.	94
Figura 3.18: Algoritmo da rotina desenvolvida para o cálculo da energia no ensaio SPT.	96
Figura 3.19: Resultado típico de R_D de um golpe do ensaio SPT, para a instrumentação acima do amostrador (Profundidade 10 m, 5º golpe).....	97
Figura 4.1: Resultados de ensaios de laboratório – campo experimental da FEAGRI (adaptado de Peixoto, 2001).	100
Figura 4.2: Resultados de ensaios de campo (6 SPT, 6 SPT-T e 9 SCPT) – campo experimental da FEAGRI (adaptado de Peixoto, 2001; Gianchetti e De Mio, 2008; Gianchetti, Peixoto e Marques, 2003).	101
Figura 4.3: Locação dos ensaios no campo experimental da FEAGRI/UNICAMP.	102
Figura 4.4: Posicionamento das hastes instrumentadas: a) superior e b) inferior.	103
Figura 4.5: Sistema de aquisição de dados simultâneo utilizado, HBM modelo MX 410.	104
Figura 4.6: Controle da penetração permanente do amostrador por golpe do martelo.	105
Figura 4.7: Controle da recuperação de amostra: A) houve embuchamento e, B) não houve embuchamento.	106
Figura 5.1: Valores médios de energia ao longo da profundidade dos ensaios realizados.	112
Figura 5.2: Gráfico energia versus penetração permanente (ensaio SP02, $L_h = 8,8$ m).	113
Figura 5.3: Gráfico energia versus penetração permanente (ensaio SP03, $L_h = 8,8$ m).	113

Figura 5.4: Gráfico energia versus penetração permanente (ensaio SP02, $L_h = 10,8$ m).	113
Figura 5.5: Gráfico energia versus penetração permanente (ensaio SP03, $L_h = 10,8$ m).	114
Figura 5.6: Gráfico energia versus penetração permanente (ensaio SP02, $L_h = 18,8$ m).	114
Figura 5.7: Gráfico energia versus penetração permanente (ensaio SP03, $L_h = 18,8$ m).	114
Figura 5.8: Gráfico energia versus penetração permanente (ensaio SP02, $L_h = 20,8$ m).	115
Figura 5.9: Gráfico energia versus penetração permanente (ensaio SP03, $L_h = 20,8$ m).	115
Figura 5.10: Gráfico energia <i>versus</i> penetração permanente acumulada ($L_h = 10,8$ m).....	116
Figura 5.11: Gráfico energia <i>versus</i> penetração permanente acumulada ($L_h = 20,8$ m).....	116
Figura 5.12: Eficiência <i>versus</i> comprimento de haste, ensaio SP02 (realizado com equipamento convencional e luvas bipartidas).....	122
Figura 5.13: Eficiência <i>versus</i> comprimento de haste, ensaio SP03 (realizado com equipamento e luvas convencionais).....	122
Figura 5.14: Energia versus tempo para a medida simultânea de energia no topo e na base da composição de haste, ensaio SP02, L_h de 11,6 m (luva bipartida).....	123
Figura 5.15: Energia versus tempo para a medida simultânea de energia no topo e na base da composição de haste, ensaio SP03, L_h de 11,6 m (luva convencional).....	123
Figura 5.16: Perda de energia versus comprimento da composição de haste (L_h).....	124
Figura 5.17: Gráfico Força <i>versus</i> tempo e $v.Z$ <i>versus</i> tempo par a instrumentação posicionada na base (amostrador), ensaio SP02, $L_h = 10,8$ m.....	125
Figura 5.18: Gráfico Força <i>versus</i> tempo e $v.Z$ <i>versus</i> tempo para a instrumentação posicionada no topo da composição de haste, ensaio SP02, $L_h = 10,8$ m (luva bipartida). ...	126
Figura 5.19: Gráfico Força <i>versus</i> tempo e $v.Z$ <i>versus</i> tempo para a instrumentação posicionada no topo da composição de haste, ensaio SP03, $L_h = 10,8$ m (luva convencional).	126
Figura 5.20: Efeito das condições do solo: ensaio SP02, $L_h = 2,8$ m, golpe 4 e $N_{SPT} = 2,9$. A) Sinais de força <i>versus</i> tempo e $v.Z$ <i>versus</i> tempo, medidas no topo da composição de haste; B) Deslocamento, calculado a partir da velocidade; C) Energia entregue ao solo.....	128
Figura 5.21: Efeito das condições do solo: ensaio SP02, $L_h = 10,8$ m, golpe 14 e $N_{SPT} = 12,4$. A) Sinais de força <i>versus</i> tempo e $v.Z$ <i>versus</i> tempo, medidas no topo da composição de haste; B) Deslocamento, calculado a partir da velocidade; C) Energia entregue ao solo.....	129
Figura 5.22: Efeito das condições do solo: ensaio SP02, $L_h = 20,8$ m, golpe 25 e $N_{SPT} = 21,7$. A) Sinais de força <i>versus</i> tempo e $v.Z$ <i>versus</i> tempo, medidas no topo da composição de haste; B) Deslocamento, calculado a partir da velocidade; C) Energia entregue ao solo.....	130
Figura 5.23: Eficiência do martelo (η_1) <i>versus</i> comprimento de haste, ensaio SP02 (luvas bipartidas).....	132

Figura 5.24: Eficiência do martelo (η_1) versus comprimento de haste, ensaio SP03 (luvas convencionais).....	132
Figura 5.25: Resistência dinâmica do solo. Ensaio SP02, profundidade 2 m, golpe 4.	137
Figura 5.26: Resistência dinâmica do solo. Ensaio SP02, profundidade 10 m, golpe 8.	137
Figura 5.27: Resistência dinâmica do solo. Ensaio SP02, profundidade 16 m, golpe 9.	138
Figura 5.28: Resistência dinâmica do solo. Ensaio SP02, profundidade 20 m, golpe 19.	138
Figura 5.29: Resistência dinâmica do solo. Ensaio SP03, profundidade 8 m, golpe 7.	139
Figura 5.30: Resistência dinâmica do solo. Ensaio SP03, profundidade 14 m, golpe 7.	139
Figura 5.31: Resistência dinâmica do solo. Ensaio SP03, profundidade 18 m, golpe 13.	140
Figura 5.32: Resistência dinâmica do solo. Ensaio SP03, profundidade 20 m, golpe 35.	140
Figura 5.33: Perfil de resistência dinâmica experimental e teórica, ensaios SP02 e SP03. ...	145
Figura 5.34: R_D versus F_d – ensaio SP02.....	145
Figura 5.35: R_D versus F_d – ensaio SP03.....	146
Figura 5.36: Ajustes dos valores de resistência dinâmica teóricos para o ensaio SP02.....	147
Figura 5.37: Ajustes dos valores de resistência dinâmica teóricos para o ensaio SP03.....	148
Figura 5.38: Valores experimentais de resistência dinâmica (R_D) versus valores teóricos de resistência estática (R_S), para o ensaio SP02.	149
Figura 5.39: Valores experimentais de resistência dinâmica (R_D) versus valores teóricos de resistência estática (R_S), para o ensaio SP03.	150
Figura 5.40: Perfil de resistência dinâmica e estática do sistema solo-amostrador, obtidos nos ensaios de campo.	151
Figura 5.41: Relação L_a versus $\rho_{\text{máx}}$ (ensaio SP02 no campo experimental da FEAGRI-Campinas, SP).	152
Figura 5.42: Relação L_a versus $\rho_{\text{máx}}$ (ensaio SP03 no campo experimental da FEAGRI-Campinas, SP).	152
Figura 5.43: Valores de N_{SPT} e Torque obtidos no ensaio SP01.	154
Figura 5.44: Correlação N_{SPT} ($\eta_{\text{topo}} = 63\%$) versus $T_{\text{máx}}$, para o ensaio SP01 realizado no campo experimental da FEAGRI/UNICAMP.....	155
Figura 5.45: Perfil de resistências de ponta e atrito lateral no sistema solo-amostrador, a partir do ensaio SPT.	157
Figura 5.46: Fator de atrito ao longo do perfil de solo investigado.	159

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Convenção de sinais e sentido para velocidades e forças (BELINCANTA, 1985).	50
Tabela 2.2: Possíveis ondas devido às discontinuidades das hastes (adaptado de BERNARDES, 1989).	56
Tabela 2.3: Etapas de transformação das energias envolvidas no ensaio SPT (Aoki e Cintra, 2000a e 2000b; Neves, 2004).	65
Tabela 2.4: Resumo das energias a cada instante da cravação do amostrador no solo (Aoki et al., 2007).	74
Tabela 5.1: Resultados de energia e penetração do ensaio SP02, nas profundidades 1 a 10 m, utilizando luvas bipartidas para conexão das hastes (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).	108
Tabela 5.2: Resultados de energia e penetração do ensaio SP02, nas profundidades 14 a 20 m, utilizando luvas bipartidas para conexão das hastes (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).	109
Tabela 5.3: Resultados de energia e penetração do ensaio SP03, nas profundidades 1 a 14 m, utilizando luvas convencionais para conexão das hastes (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).	110
Tabela 5.4: Resultados de energia e penetração do ensaio SP03, nas profundidades 16 a 20 m, utilizando luvas convencionais para conexão das hastes (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).	111
Tabela 5.5: Resultados de eficiência do ensaio SP02, nas profundidades de 1 a 10 m, utilizando luvas bipartidas para conexão das hastes (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).	117
Tabela 5.6: Resultados de eficiência do ensaio SP02, nas profundidades de 14 a 20 m, utilizando luvas bipartidas para conexão das hastes (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).	118
Tabela 5.7: Resultados de eficiência do ensaio SP03, nas profundidades de 1 a 14 m, utilizando luvas convencionais para conexão das hastes (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).	119
Tabela 5.8: Resultados de eficiência do ensaio SP03, nas profundidades de 16 a 20 m, utilizando luvas convencionais para conexão das hastes (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).	120
Tabela 5.9: Valores médios de eficiência.	123
Tabela 5.10: Resultados de eficiência do martelo (η_1).	131

Tabela 5.11: Resultados experimentais de R_D - ensaio SP02 (luvas bipartidas), profundidades de 1 a 10 m (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).....	133
Tabela 5.12: Resultados experimentais de R_D - ensaio SP02 (luvas bipartidas), profundidades de 14 a 20 m (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).....	134
Tabela 5.13: Resultados experimentais de R_D - ensaio SP03 (luvas convencionais), profundidades de 1 a 18 m (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).....	135
Tabela 5.14: Resultados experimentais de R_D - ensaio SP03 (luvas convencionais), profundidades de 20 m (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).....	136
Tabela 5.15: Resultados de F_D - ensaio SP02 (luvas bipartidas), profundidades de 1 a 10 m (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).....	141
Tabela 5.16: Resultados de F_D - ensaio SP02 (luvas bipartidas), profundidades de 14 a 20 m (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).....	142
Tabela 5.17: Resultados de F_D - ensaio SP03 (luvas bipartidas), profundidades de 1 a 18 m (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).....	143
Tabela 5.18: Resultados de F_D - ensaio SP03 (luvas bipartidas), profundidades de 20 m (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).....	144
Tabela 5.19: Valores experimentais médios de energia, para o topo e a base da composição de haste.....	147
Tabela 5.20: Resistência estática teórica (R_S) para as camadas de solo investigadas no ensaio SP02.....	149
Tabela 5.21: Resistência estática teórica (R_S) para as camadas de solo investigadas no ensaio SP03.....	149
Tabela 5.22: Resultados de comprimento das amostras de solo recuperadas nos ensaios SPT.....	152
Tabela 5.23: Valores de N_{SPT} corrigidos para η_{topo} de 63%, valores estimados de $T_{m\acute{a}x}$ e do atrito adesão entre o solo e o amostrador após a cravação de 0,45 m.....	155
Tabela 5.24: Tensões de atrito e ponta no sistema solo amostrador, ensaio SP02.....	156
Tabela 5.25: Tensões de atrito e ponta no sistema solo amostrador, ensaio SP03.....	157
Tabela 5.26: Fator de atrito (a) para os ensaios SPT realizados.....	158

SUMÁRIO

1. Introdução.....	25
1.1 Objetivos.....	26
1.1.1 Objetivo principal	26
1.1.2 Objetivos específicos	26
1.2 Organização da Dissertação.....	27
2. Revisão Bibliográfica	29
2.1 Desenvolvimento do Ensaio SPT	29
2.1.1 Ensaio SPT no Brasil	31
2.1.2 Metodologia do ensaio SPT segundo a NBR 6484/01	33
2.1.3 Ensaio SPT-T	36
2.1.4 Fatores Intervenientes no Ensaio SPT.....	39
2.2 Teoria da Equação da Onda.....	41
2.2.1 Velocidade de propagação da onda (c) e velocidade das partículas(v)	41
2.2.2 Equação unidimensional da onda.....	44
2.2.3 Energia contida em uma onda de tensão	46
2.2.4 Efeito das condições de contorno do ensaio SPT.....	49
2.3 Energia no SPT	56
2.3.1 Correção da Energia do Sistema no Ensaio SPT	57
2.3.3 Eficiência no Ensaio SPT.....	59
2.3.4 Interpretação do Ensaio SPT Segundo o Princípio de Hamilton	63
2.4 Medidas de Energia no Ensaio SPT	66
2.4.1 Método EF^2	67
2.4.2 Método EFV	68
2.5 Interação Solo-Amostrador	69
2.5.1 Resistência Dinâmica do Sistema Solo-amostrador (SCHNAID et al., 2009).....	72

2.5.3 Resistência Estática do Sistema Solo-amostrador (Aoki et al., 2004 e 2007)	73
2.6 Reações Mobilizadas no Sistema Solo-amostrador.....	75
3. Materiais e Métodos	79
3.1 Equipamento da EESC-USP para Medida de Energia no Ensaio SPT.....	79
3.1.1 Segmentos de Haste	79
3.1.2 Acelerômetros e Suportes	81
3.1.3 Célula de Carga	81
3.1.4 Sistema de Aquisição de Dados	84
3.2 Equipamentos das Sondagens com Medida do SPT.....	85
3.2.1 Equipamentos dos Ensaios SPT-T	87
3.3 Adaptações no Equipamento para Medida de Energia.....	88
3.3.1 Proteção Mecânica e Impermeabilização da Instrumentação	89
3.4 Processamento dos Dados e Cálculo das Energias.....	91
3.4.1 Verificação da Qualidade dos Sinais.....	92
3.4.2 Cálculo da Energia	94
3.4.3 Rotina para o Cálculo da Energia no Software Matlab®.....	95
3.5 Determinação da Força de Reação Dinâmica do solo (R_D).....	96
4. Campanha Experimental.....	99
4.1 Campo Experimental da FEAGRI - UNICAMP.....	99
4.1.1 Aspectos Geológicos	99
4.1.2 Caracterização Geotécnica	100
4.2 Ensaios de Campo	101
4.2.1 Configuração do sistema de aquisição de dados	103
4.2.2 Controle da penetração do amostrador.....	104
4.2.3 Ensaio SPT-T	105
4.2.4 Medida do comprimento da amostra recuperada	106
5. Resultados e Análises	107

5.1 Energia dos Ensaio SPT	107
5.2 Eficiência dos Ensaio SPT	117
5.2.1 Influência da peça maciça sextavada	125
5.2.2 Reflexões nas luvas	126
5.2.3 Influência das condições do solo.....	127
5.2.4 Determinação da eficiência (η_I).....	131
5.3 Resistência Dinâmica do Solo no Ensaio SPT (R_D)	133
5.3.1 Resultados experimentais e teóricos de resistência dinâmica	141
5.4 Resistência Estática Teórica do Solo (R_s) Obtida a Partir do Ensaio SPT	148
5.4 Recuperação da Amostra de Solo	151
5.5 Interpretação das Resistências Desenvolvidas na Cravação do Amostrador	153
5.5.1 Resultados dos ensaios SPT-T	153
5.5.2 Resistências unitárias de ponta (r_p) e atrito (r_L e r_{Li})	156
6. Conclusões.....	161
6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros	164
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	165
Apêndice A	171
Apêndice B	179
Apêndice C	183

1. Introdução

Na maior parte dos problemas geotécnicos, as decisões de engenharia baseiam-se em informações advindas de ensaios “*in situ*” que permitem estimar a estratigrafia da região de interesse, assim como propriedades geomecânicas dos materiais envolvidos. Atualmente, o ensaio geotécnico de campo mais difundido no Brasil, é o ensaio SPT (*Standard Penetration Test*), que é realizado juntamente com a sondagem de simples reconhecimento do subsolo.

O principal resultado do ensaio SPT é a resistência à penetração do solo, caracterizada pelo índice de resistência N_{SPT} . Esse índice é obtido através da cravação dinâmica no solo de um amostrador, com dimensões padronizadas, a partir da queda livre de um martelo de 65 kg, a uma altura de queda constante, de 750 mm. O N_{SPT} é o número de impactos necessários para a cravação de 300 mm do amostrador no solo, após a cravação inicial de 150 mm.

No Brasil a NBR 6484/01 (ABNT, 2001) especifica equipamentos e procedimentos do ensaio. Entretanto, ainda são realizados ensaios com alterações e adaptações não previstas por essa norma, acarretando em diferenças nos resultados do ensaio, devido à variação da eficiência. Essas divergências de resultados geram muitas críticas em relação à confiabilidade e repetibilidade do ensaio SPT. Outra grande preocupação é em relação às correlações empíricas que são utilizadas para os cálculos de fundações, pois são baseadas somente em observações práticas, sem haver fundamento científico.

Assim, na busca pela padronização do ensaio, a partir de 1970, diversos pesquisadores iniciaram os estudos voltados para quantificação da energia potencial do martelo, a qual é transferida à toda composição de hastes, na busca pela padronização do ensaio (SCHMERTMANN e PALÁCIOS, 1979; BELINCANTA, 1985 e 1998; ABOU-MATAR e GOBLE, 1997).

Posteriormente, no início da década passada, Aoki e Cintra (2000a) impulsionaram a interpretação racional dos resultados do ensaio SPT com base na quantidade de energia envolvida no ensaio, a partir da aplicação do Princípio de Hamilton (Conservação de Energia). Segundo os autores, o índice N_{SPT} está diretamente ligado à quantidade de energia que é disponibilizada ao amostrador durante a cravação. Assim, a partir de Aoki e Cintra (2000a), diversos pesquisadores tem buscado identificar a influência da parcela de energia no amostrador no índice N_{SPT} (CAVALCANTE, 2002; ODEBRECHT, 2003; NEVES, 2004; LUKIANTCHUKI, ESQUIVEL, BERNARDES, 2011 e 2012; LUKIANTCHUKI, 2012).

A continuidade no desenvolvimento de pesquisas relacionadas à interpretação racional do ensaio SPT, considerando a parcela de energia que realmente alcança o amostrador e é responsável pela sua cravação no solo, tem o potencial de alavancar a credibilidade do ensaio, podendo ser possível comparar ensaios realizados em diferentes condições de equipamento, execução e região. Neste contexto, o presente trabalho aborda os mecanismos de transferência de energia a partir do golpe do martelo no ensaio SPT, levando em consideração a energia que realmente atinge o amostrador. Dando continuidade, são realizadas medidas do comprimento da amostra recuperada e do atrito-adesão que se desenvolve entre o solo e o amostrador após a etapa de cravação (ensaio SPT-T). Tal procedimento, juntamente com a determinação da eficiência do ensaio, da resistência estática e dinâmica do solo, complementa o estudo das reações que desenvolvidas no solo devido à cravação do amostrador padrão, permitindo a avaliação das tensões atuantes no amostrador.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo principal

Esta pesquisa tem como objetivo principal a análise das energias envolvidas em ensaios SPT, realizados com equipamento padronizado pela NBR 6484/01 (ABNT, 2001), utilizando duas configurações de luvas para conexão entre as hastes, sendo: luvas bipartidas e luvas convencionais (normatizado).

1.1.2 Objetivos específicos

Para o desenvolvimento das análises anteriormente mencionadas, foram realizadas as seguintes atividades:

- Aprimorar o equipamento de medida de energia no ensaio SPT da EESC-USP (LUKIANCHUKI, 2012), incluindo a impermeabilização das hastes instrumentadas, viabilizando a realização das medias abaixo no nível freático;
- Executar ensaios SPT com medida de energia em seções situadas no topo e na base da composição de hastes, com a finalidade de verificar as perdas de energia durante a propagação da onda pela composição de haste;
- Realizar ensaios SPT com maior comprimento de composição de hastes, a fim de compreender a influência do comprimento da composição na eficiência do ensaio;

- Investigar o mecanismo de embuchamento do amostrador pela cravação no solo, através do controle da recuperação de amostra;
- Quantificar a força de reação dinâmica do solo, mobilizada durante a cravação do amostrador SPT;
- Estimar a força de reação estática do solo, segundo a proposta de Aoki et al. (2004) e Aoki et al. (2007);
- Avaliar as reações na ponta e de atrito no sistema solo-amostrador mobilizados devido à cravação do amostrador no solo, a partir do atrito-adesão desenvolvido entre o amostrador e o solo circundante (ensaio SPT-T) e do equilíbrio de forças no amostrador.

1.2 Organização da Dissertação

Este trabalho está organizado em seis capítulos distintos, sendo:

- Capítulo 1: Introdução. Aborda a importância da pesquisa, assim como os objetivos.
- Capítulo 2: Revisão Bibliográfica. Síntese da bibliografia consultada sobre o ensaio SPT, desde seu surgimento até os dias atuais, passando pela evolução da metodologia do ensaio até as atuais medidas das energias. Apresenta também a nova proposta de Aoki (2013) de análise do ensaio SPT com base no equilíbrio das reações no amostrador.
- Capítulo 3: Materiais e Métodos. Trata dos equipamentos e procedimentos utilizados na execução dos ensaios SPT com medida de energia no topo e na base da composição de haste, bem como as etapas para interpretação dos dados e obtenção dos resultados.
- Capítulo 4: Campanha Experimental. Aborda a caracterização geológico-geotécnica do campo experimental em que foram executados os ensaios de campo; como também, a descrição dos procedimentos adotados nos ensaios SPT com medida de energia, nas medidas de torque e no monitoramento da recuperação das amostras.
- Capítulo 5: Resultados e Análises. Apresenta os resultados obtidos, assim como as análises quantitativas referentes às energias medidas nos ensaios SPT utilizando duas configurações de luvas para conexão entre as hastes. É apresentado também, os prováveis perfis de resistência dinâmica e estática das camadas de solo investigadas e os comprimentos das amostras de solo recuperadas. Por fim, são apresentadas as análises com relação ao equilíbrio das reações que surgem no amostrador, obtendo-se

as parcelas de resistência de atrito lateral e resistência de ponta do sistema solo-amostrador, a partir dos resultados do atrito-adesão obtidos via ensaios SPT-T.

- Capítulo 6: Conclusões e sugestões para trabalhos futuros. Expõe as principais conclusões deste trabalho e sugestões para a continuidade da linha de pesquisa.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Desenvolvimento do Ensaio SPT

Os procedimentos do ensaio SPT como são conhecidos atualmente, passaram por aprimoramentos ao longo dos anos. Segundo Fletcher (1965) e Belincanta (1998), este desenvolvimento iniciou com as modificações introduzidas pelo engenheiro Charles R. Gow em 1902 nos Estados Unidos, que propôs o fim do processo de obtenção de amostras por circulação de água, sendo obtidas amostras tipo “Dry Sample” nas sondagens de simples reconhecimento. Esta nova proposta consistiu na cravação dinâmica de um tubo metálico oco, com aproximadamente 450 mm de comprimento e 25,4 mm de diâmetro nominal, sem utilização de água, a partir da queda de um peso de 0,49 kN (Fletcher, 1965; Cavalcante, 2002; Odebrecht, 2003). Ainda segundo Belincanta (1998), nesta primeira fase, a operação de cravação de um tubo oco no solo, não pode ser considerada como ensaio, visto que não são conhecidos ao certo os procedimentos adotados na época (intervalo de cravação, altura de queda do martelo, contagem dos golpes, etc.).

Em seguida, o ensaio passou por uma fase de considerável modificação, se estendendo até o final da década de 50, quando ocorreu a primeira tentativa de padronização. Foi na época de 1930, que Mohr e Fletcher propuseram as primeiras especificações com respeito à cravação de 150 mm do amostrador com 51 mm de diâmetro externo, antes da obtenção dos golpes necessários à cravação dos 300 mm seguintes, para a determinação do índice de resistência à penetração dinâmica (N_{SPT}) (FLETCHER, 1965; CAVALCANTE, 2002; ODEBRECHT, 2003).

Entretanto, o procedimento proposto por Mohr só veio a ser divulgado como “*Standard Penetration Test*” com a publicação do livro “*Soil Mechanics in Engineering Practice*” de Terzaghi e Peck em 1948. Este livro apresentou um procedimento de execução da sondagem com perfuração por circulação de água, a partir do uso de tubo de revestimento com 63,5 mm de diâmetro, hastes metálicas de 25,4 mm e amostrador do tipo Raymond (51 mm e 35 mm de diâmetro externo e interno, respectivamente). Nesta publicação foram apresentadas também as primeiras correlações entre o N_{SPT} e a consistência das argilas, a compacidade das areias, e com a capacidade de carga de fundações (TERZAGHI e PECK, 1948; FLETCHER, 1965; BELINCANTA e CINTRA, 1998).

Cavalcante (2002) destaca a importância da publicação de Terzaghi e Peck (1948) para a utilização racional e sistemática do ensaio, principalmente com relação aos equipamentos e procedimentos do ensaio. Ainda segundo o autor, as recomendações propostas neste livro foram adotadas por normas que prescreviam o ensaio, consolidando-o como uma importante ferramenta de investigação geotécnica.

Segundo Fletcher (1965), houve uma considerável melhoria na obtenção dos resultados do ensaio SPT a partir da proposta de James D. Parson em 1954, que propôs o registro dos golpes a cada intervalo de 152 mm de cravação do amostrador no solo. De acordo com Parson, a resistência à penetração seria igual a menor soma de dois dos três intervalos de cravação, contrariando Terzaghi e Peck (1948), que propuseram a soma dos golpes para as duas últimas penetrações de 150 mm (TERZAGHI e PECK, 1948; FLETCHER, 1965; CAVALCANTE, 2002).

A primeira tentativa de norma para o SPT da ASTM (*American Society For Testing and Materials*) ocorreu ainda na década de 50 e era designada “*Tentative Method for Penetration Test and Split-Barrel Sampling of Soils*” (ASTM D1586/58T). Entretanto, de acordo com Belincanta (1998), a resistência à penetração só foi claramente definida em 1963, com a edição da segunda tentativa (ASTM D1586-63T), sendo definido o índice N_{SPT} , como o número de golpes necessários à penetração do segundo e terceiro intervalos de 152 mm.

A partir da década de 60, o ensaio SPT entrou em descrédito impulsionado pela publicação de Fletcher (1965), em que eram apresentados vários fatores intervenientes no ensaio SPT, e pela publicação de Mohr (1966). Mas, a partir da segunda metade da década 70 e início da década de 80, inicia-se uma nova fase para o SPT, onde passou a ser dada importância às energias envolvidas no ensaio.

Os trabalhos pioneiros, como os desenvolvidos por Shmertmann e Palacios (1979), Kovacs (1979) e entre outros, buscaram identificar os fatores que influenciam o resultado do ensaio SPT devido às diferenças entre os equipamentos utilizados, ao estado de conservação, tipo de martelo e forma de liberação, que forneciam energias distintas ao sistema haste-amostrador, acarretando em resultados discrepantes.

Segundo Odebrecht (2003), estudos da energia envolvida em ensaios SPT, realizados com os equipamentos em vigor nos Estados Unidos, indicaram uma energia média de 55% da energia nominal (martelo de 63,5 kg, com altura de queda de 762 mm). Todavia, o valor médio de 60% se adequa melhor ao tipo de martelo que é utilizado, o “*Safety Hammer*” (Seed et. al., 1985). Além dos Estados Unidos, em outras regiões do mundo, o valor da energia média que é transferida às hastes é de 60% da energia nominal. Assim, Skempton (1986),

recomenda a adoção do valor de referência N_{60} , a partir da correção do valor N_{SPT} obtido para N_{60} (referência).

Ainda segundo Odebrecht (2003), a partir da década de 80, foram publicados trabalhos que reforçam a necessidade e importância da medida de energia no ensaio SPT. A partir desta fase, são desenvolvidos equipamentos para quantificar tal energia. Os equipamentos de medida de energia evoluíram a partir da utilização de acelerômetros iguais aos que eram utilizados em ensaios dinâmicos em estacas.

Entretanto, como ainda persistem as variações relação aos tipos de equipamentos utilizados e aos procedimentos de execução do SPT, é de comum acordo entre a comunidade científica que o controle de energia na cravação do amostrador é fundamental para a correta interpretação dos resultados, além de possibilitar a troca de experiência e comparações coerentes entre ensaios.

2.1.1 Ensaio SPT no Brasil

A sondagem de simples reconhecimento com SPT no Brasil data do final da década de 30. Nesta mesma década houve o surgimento da Seção de Estruturas e Fundações do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e o retorno do engenheiro Odair Grillo dos estudos na Universidade de Harvard, em 1936. Segundo Belincanta (1998), Odair Grillo foi quem impulsionou, no Brasil, a medida da resistência dinâmica à penetração.

Em 1943, começam a ser realizadas medias de penetração no Brasil, inicialmente de forma experimental. Entretanto, segundo Belincanta (1998), em 1944 as medidas de penetração já eram feitas de forma sistemática. Ainda segundo o autor, na época, o diâmetro do tubo de revestimento utilizado era de 51 mm, e o amostrador era denominado de amostrador IPT, que possuía 38 mm e 46 mm de diâmetro interno e externo, respectivamente.

A falta de normatização das sondagens à percussão no Brasil é destacada pelo professor Costa Nunes, em 1956. Mais tarde, na década de 70, diversos autores enfatizam que a sondagem SPT era realizada de forma artesanal, com uso de equipamentos e procedimentos distintos, não havendo padronização, sendo necessário conhecer previamente qual a empresa executora para a interpretação dos resultados (BELINCANTA, 1998; TEIXEIRA, 1977).

Segundo Belincanta (1998), devido à falta de padronização do ensaio, em 1974, é apresentada uma proposta de Método de Execução de Sondagem de Simples Reconhecimento dos Solos, no 5º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos. De acordo com Cavalcante (2002) após ser discutida ao longo de três anos, esta proposta de norma foi enviada à ABNT em 1977, para discussão e aprovação, tornando-se a primeira norma brasileira de sondagem

SPT apenas em 1979, sendo denominada “Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos”, MB 1211/79, mudando posteriormente para NBR 6484/80.

Na década de 80, iniciam no Brasil as medidas de energia no ensaio SPT, tendo iniciado com trabalho pioneiro do IPT em 1985. O trabalho é consolidado na dissertação de mestrado de Belincanta (1985), intitulada “Energia Dinâmica no SPT – Resultados de uma Investigação Teórico Experimental”. Algum tempo após, em 1998, o mesmo autor faz outro trabalho, no qual faz ampla pesquisa sobre a influência de fatores que comprometem o N_{SPT} , visto que agem diretamente na energia transferida do martelo ao restante do sistema (Odebrecht, 2003). Belincanta (1985) cita como principais fatores: tipo de martelo, procedimentos de execução, sistema de levantamento do martelo (ex.: por cabo de aço), conservação das hastes, uso ou não do coxim de madeira e o peso da cabeça de bater. O autor ainda cita que empresas acabam adotando variações nos procedimentos do ensaio, causando mudanças no método preconizado pela norma (BELINCANTA, 1985; BELINCANTA e CINTRA, 1998).

No ano 2001, a NBR 6484 foi revista e publicada. Cavalcante (2002) destaca que esta nova versão da norma trouxe inovações quanto às especificações relativas aos equipamentos, processos de perfuração, método de observação do nível d’água, sobre a forma de apresentação final dos resultados, além de apresentar uma classificação das camadas de solo em função dos valores de N_{SPT} e do tipo de solo (arenoso ou argiloso). Ainda segundo Cavalcante (2002), outro destaque desta nova versão é a preocupação com a questão da variabilidade na energia do ensaio devido a mudanças incorporadas pelas empresas de sondagem. A norma é clara ao estabelecer que ao serem feitas quaisquer mudanças nas condições preconizadas (por exemplo: tipo de haste, de martelo ou quaisquer equipamentos fora das especificações), a empresa deve apresentar respectiva correlação, obtida por estudo da energia disponibilizada (ABNT, 2001).

Atualmente, a norma NBR 6484 encontra-se em revisão. Assim, devido à prática corrente do ensaio no Brasil, esta nova versão da norma apresentará como parte complementar, porém ainda não obrigatória, uma metodologia para avaliação da energia em ensaios SPT.

Uma importante fase para o ensaio SPT, no contexto brasileiro, foi a partir da publicação do trabalho de Aoki e Cintra (2000a), em que os autores aplicam o Princípio de Conservação de Energia (Princípio de Hamilton) na interpretação do ensaio. Segundo Aoki e Cintra (2000a), a interpretação do ensaio está diretamente relacionada com a parcela de energia disponibilizada ao amostrador, sendo esta a responsável pela cravação.

A proposta de Aoki e Cintra (2000a) é considerada como pioneira, pois maior parte das pesquisas até então desenvolvidas com foco nas energias de ensaios SPT, só se preocupavam

com a parcela de energia incidente no sistema. Assim, Aoki e Cintra (2000a) contribuíram e continuam a contribuir, para o desenvolvimento de pesquisas na área, impulsionando a interpretação racional dos resultados do ensaio SPT (e.g. CAVALCANTE, 2002; ODEBRECHT, 2003; NEVES, 2004; ODEBRECHT et al., 2005; AOKI et al., 2007; LOBO, 2009; SCHNAID et al., 2009; LUKIANTCHUKI, ESQUIVEL e BERNARDES, 2011 e 2012; HAFEZ E SYAZANA, 2011; NOREÑA, 2011; LUKIANTCHUKI, 2012).

2.1.2 Metodologia do ensaio SPT segundo a NBR 6484/01

O ensaio SPT constitui na obtenção de um índice da resistência dinâmica da camada de solo investigada juntamente com a obtenção de amostras, em uma sondagem de simples reconhecimento.

O início do ensaio consiste na abertura de um furo de sondagem de simples reconhecimento, através de um trado helicoidal, ou circulação de água (quando abaixo do nível freático), seguido pelo ensaio dinâmico, que consiste na cravação de um amostrador com dimensões padronizadas, a partir de golpes de um martelo de 65 kg, caindo a uma altura de 750 mm (ABNT, 2001). O índice N_{SPT} é a quantidade de golpes necessários à cravação de 300 mm do amostrador na camada de solo, após a cravação inicial de 150 mm.

A aparelhagem necessária à execução do ensaio SPT, segundo a NBR 6484 (ABNT, 2001), é composta pelos seguintes equipamentos:

- 1) Torre com roldana ou tripé: formado por tubos de aço, podendo ter, opcionalmente, sistema de guincho motorizado para auxílio nas manobras com as hastes e tubos de revestimento. A roldana deve estar sempre lubrificada a fim de reduzir ao máximo o atrito em seu eixo;
- 2) Tubos de revestimento: tubos de aço, com diâmetro nominal de 63,5 ($D_{ext} = 76,1 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ e $D_{int} = 24,3 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$) e peso teórico de 32 N/m, segmentos com comprimento de 1,00 a 2,00 m que podem ser emendados por luvas;
- 3) Composição para perfuração: constituída por hastes de aço com diâmetro nominal interno 25 ($D_{ext} = 33,4 \text{ mm} \pm 2,5 \text{ mm}$ e $D_{int} = 24,3 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$) e peso teórico de 32 N/m, acopladas por sistema de roscas e luvas, que devem estar em bom estado de conservação e uso, que deve ser devidamente atarraxadas, de forma ser um conjunto retilíneo, em segmentos de 1,0 e/ou 2,0 m;
- 4) Trado-concha: O trado-concha possui diâmetro de $(100 \pm 10) \text{ mm}$;

- 5) Trado helicoidal: A diferença entre o diâmetro do trado helicoidal (diâmetro mínimo de 56 mm) e o diâmetro interno do tubo de revestimento deve estar entre 5,0 e 7,0 mm, de forma a permitir o uso do trado por dentro do tubo de revestimento e, mesmo ocorrendo algum desgaste, ainda permitir a abertura de furo com diâmetro mínimo de 56 mm, para que a descida do amostrador padrão seja livre dentro da perfuração;
- 6) Trépano ou peça de lavagem: deve ser constituído por aço, com diâmetro nominal de 25, terminada em bisel e dotada de duas saídas laterais para água. A largura da lâmina do trépano deve ter uma folga de 3,0 a 5,0 mm em relação ao diâmetro interno do tubo de revestimento.
- 7) Amostrador padrão tipo Raymond: possui diâmetro externo de $50,8 \text{ mm} \pm 2,5 \text{ mm}$ e diâmetro interno de $34,9 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$, sendo constituído por três partes distintas: cabeça – devendo ter dois orifícios laterais para saída de ar e água, assim como devendo conter interiormente uma válvula constituída por esfera de aço recoberta de material inoxidável; corpo – devendo ser retilíneo, isento de amassamentos, ondulações, denteamentos, estriamentos, rebordos ou qualquer deformação que altere a seção e rugosidade superficial, podendo ou não ser bipartido longitudinalmente; e sapata ou bico – constituído de aço temperado, isenta de trincas, amassamentos, ondulações, denteações, rebordos ou qualquer tipo de deformação que venha a alterar a seção;
- 8) Cabeça de bater: recebe o impacto direto do martelo, deve ser constituída por tarugo de aço de $(83 \pm 5) \text{ mm}$ de diâmetro, $(90 \pm 5) \text{ mm}$ de altura e massa nominal entre 3,5 a 4,5 Kg.
- 9) Martelo padronizado (Figura 2.1): deve consistir em uma massa de ferro de forma prismática ou cilíndrica, tendo encaixado, na parte inferior, um coxim de madeira dura (peroba rosa ou equivalente), perfazendo um total de 65 kg. O martelo pode ser maciço com haste guia ou vazado. A haste guia do martelo maciço deve ser retilínea e perpendicular à superfície que vai receber o impacto do martelo.

As sondagens de simples reconhecimento com medida do SPT são realizadas segundo três etapas principais, que sempre são executadas em cada camada investigada, sendo (ABNT, 2001):

- *Locação do furo*: cada furo de sondagem deve ser marcado por meio da cravação de piquetes de madeira ou de outro material apropriado. Este piquete deve conter a

identificação do furo e estar firme ao solo, de forma a servir de referência de nível topográfico;

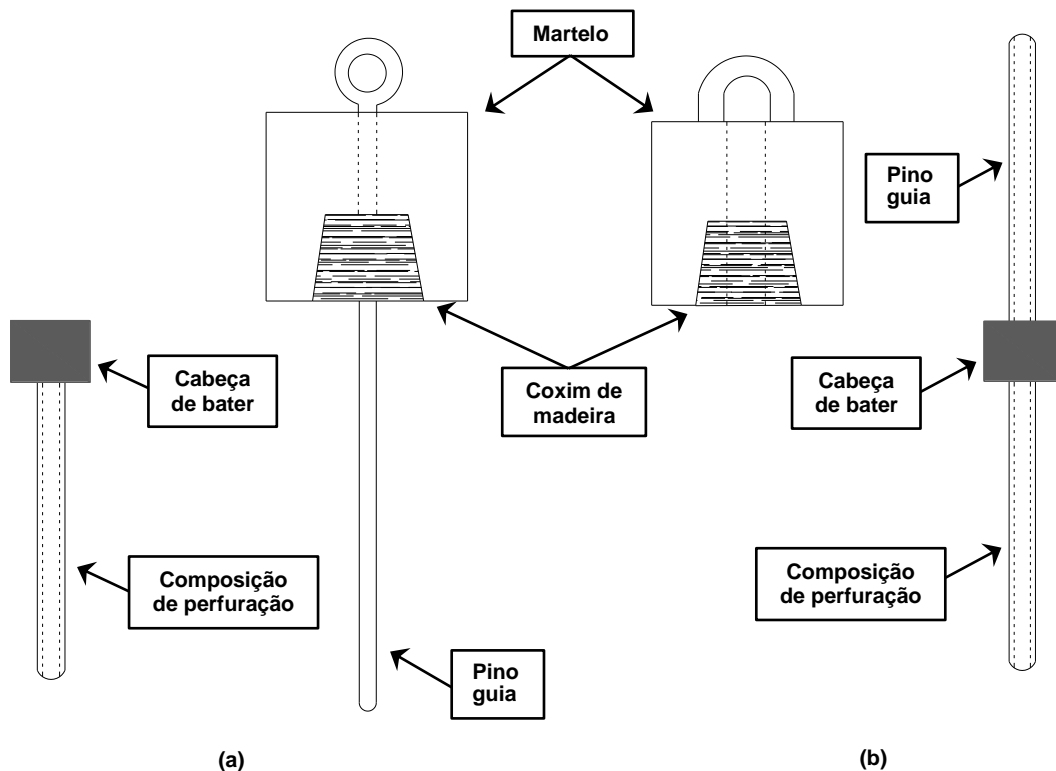


Figura 2.1: Martelos padronizados: a) com pino guia e, b) cilíndrico vazado (adaptado de BELINCANTA e CINTRA, 1998).

- *Processos de perfuração*: a sondagem deve ser iniciada com o emprego do trado-concha ou cavadeira manual até a profundidade de 1 m, seguindo-se a instalação do segmento de tubo de revestimento dotado de sapata cortante. Nas operações subsequentes de perfuração, deve ser utilizado o trado helicoidal até ser atingido o nível freático. Quando abaixo do nível freático ou na impossibilidade de avanço da perfuração com o trado helicoidal, o avanço do furo é realizado com auxílio do trépano e com circulação de água. Este caso é considerado especial e deve ser devidamente registrado no relatório.
- *Amostragem e SPT*: nesta etapa, são coletadas partes representativas do solo recuperado pelo amostrador, para exame posterior e classificação táctil visual. As amostras são recolhidas a cada metro de profundidade. A determinação do N_{SPT} consiste na cravação de 450 mm do amostrador no solo, a partir de impactos sucessivos do martelo. O N_{SPT} corresponde aos golpes para cravação dos últimos 300 mm do amostrador

O ensaio SPT é interrompido antes da cravação dos 450 mm de cravação, segundo alguns critérios estabelecidos pela NBR 6484/01 (ABNT, 2001). Entretanto, geralmente, o ensaio é paralisado quando a penetração do amostrador ou o avanço com o trépano de lavagem tornam-se bastante difíceis. Quando em alguma destas situações, assume-se que foi atingido o impenetrável à percussão ou o impenetrável ao trépano de lavagem respectivamente.

2.1.3 Ensaio SPT-T

A obtenção do atrito lateral que se desenvolve na interface solo-amostrador no ensaio SPT, foi proposta pelo engenheiro brasileiro Ranzini, em 1988. O principal objetivo de Ranzini (1988) era obter o máximo de informações do ensaio SPT, sem a necessidade de grandes alterações.

Segundo Ranzini (1988), a operação de aplicar uma torção na composição de hastes com uma ferramenta (chave de grifo, por exemplo), após a etapa final de penetração do amostrador, já era prática constante em ensaios SPT, pois facilitava a extração do amostrador pelos operadores. Entretanto, o autor destaca que nunca foi dada devida importância ao esforço aplicado. Assim, Ranzini (1988) propôs, com apenas uma leitura adicional, obter um dado que dá subsídios a uma avaliação mais exata do atrito-adesão que se desenvolve na interface solo-amostrador após a sua cravação no solo.

Ranzini (1988) ainda sugere uma nomenclatura para este novo procedimento, intitulado pelo autor como SPTF (*Standard Penetration Test, with Friction Measurement*), a fim de manter a terminologia internacional. Atualmente, o procedimento proposto pelo autor é conhecido no meio técnico como SPT-T ou ensaio SPT com medida de torque.

Basicamente, o SPT-T consiste na execução do ensaio SPT segundo a NBR 6484/01 (ABNT, 2001) e, após o término da cravação de 450 mm do amostrador, na aplicação de uma torção no topo do conjunto haste-amostrador através de um torquímetro (Figura 2.2). O torquímetro deve ser diretamente acoplado à cabeça de bater, de forma que não sejam provocados esforços indesejáveis no amostrador, que poderiam afetar a medida do torque (PEIXOTO, 2001; BELINCANTA, PEIXOTO e MIGUEL, 2010).

No momento da aplicação do esforço de rotação, registra-se o valor máximo do torque alcançado ($T_{m\acute{a}x}$). Outro dado que também pode ser extraído, é o torque residual ou torque mínimo (T_{res}). Após a medida do $T_{m\acute{a}x}$, continua-se a rotação do conjunto haste-amostrador por mais duas voltas completas, até que a leitura no torquímetro seja constante, quando é registrada a segunda medida, correspondendo ao torque residual (PEIXOTO, 2001).



Figura 2.2: Esquema do torquímetro acoplado ao topo da composição de hastes no ensaio SPT (ALONSO, 1994 adaptado por PEIXOTO, 2001).

O torque medido no ensaio SPT-T pode ser transformado em adesão-atrito (f_t) a partir das equações propostas por Ranzini (1988 e 1994). Neste equacionamento Ranzini (1988 e 1994) assume que o atrito lateral é constante ao longo da superfície lateral do amostrador, como também na ponta. A equação proposta por Ranzini (1988) foi posteriormente modificada em 1994, resultando:

$$f_t = \frac{1000 \times T_{máx}}{(4.0537h - 0.003171)} \quad (2.1)$$

Onde:

f_t – Atrito-adesão (kPa),

$T_{máx}$ – Torque máximo aplicado no topo da composição (kN.m),

h – Profundidade de penetração do amostrador (m).

De acordo com Peixoto (2001), quando comparado às fontes de incertezas do ensaio SPT, a medida do torque (a partir de ensaios SPT-T) possui a vantagem de não ser afetada por erros já conhecidos, tais como: contagem de golpes, variação na altura de queda, peso do martelo, estado da sapata cortante e entre outras. Outro destaque do SPT-T que a autora menciona, é a possibilidade de medir a tensão cisalhante externa que atua na interface solo-amostrador por um baixo custo adicional.

Após a proposta de Ranzini (1988), alguns engenheiros introduziram a medida do torque no final da cravação do amostrador em ensaios SPT. Assim, segundo Peixoto (2001), existiram basicamente duas linhas de aplicação do ensaio SPT-T: a primeira, que aplicava o torque medido como fator de correção do N_{SPT} , e a segunda, que usava o valor do atrito-adesão (f_t) nos cálculos de capacidade de carga de fundações.

Lutenegger e Kelley (1998), a partir da proposta de Ranzini (1988 e 1994), incorporaram a idéia de medir o torque ao final do ensaio SPT. Assim, a fim de investigar os resultados de atrito obtidos no ensaio SPT-T, estes autores realizaram provas de carga à compressão e à tração no amostrador após a cravação no solo. Para tanto, Lutenegger e Kelley (1998) consideraram um equacionamento mais simplificado:

$$f_t = \frac{2 \times T}{\pi \times d^2 \times L} \quad (2.2)$$

Onde:

T – Torque medido (kN.m),

d – Diâmetro do amostrador (m),

L – Comprimento de cravação do amostrador SPT (m).

Nas provas de carga à compressão, Lutenegger e Kelley (1998) assumiram que surgem reações na ponta e de atrito lateral no amostrador. Entretanto, nos ensaios de prova de carga a tração, os autores consideraram que as reações que surgem são apenas referentes ao atrito lateral na interface amostrador-solo (Figura 2.3). Assim, os resultados de Lutenegger e Kelley (1998) demonstraram que existe coerência entre os valores de atrito lateral obtidos pelo ensaio SPT-T e pela prova de carga à tração.

Entretanto, os autores destacam que existem fatores que podem influenciar os resultados de atrito obtido tanto a partir do ensaio SPT-T, como na prova de carga à tração no amostrador, tais como: o peso próprio das hastes, sucção, área variável da superfície de atrito, e a anisotropia do solo (LUTENEGGER & KELLEY, 1998).

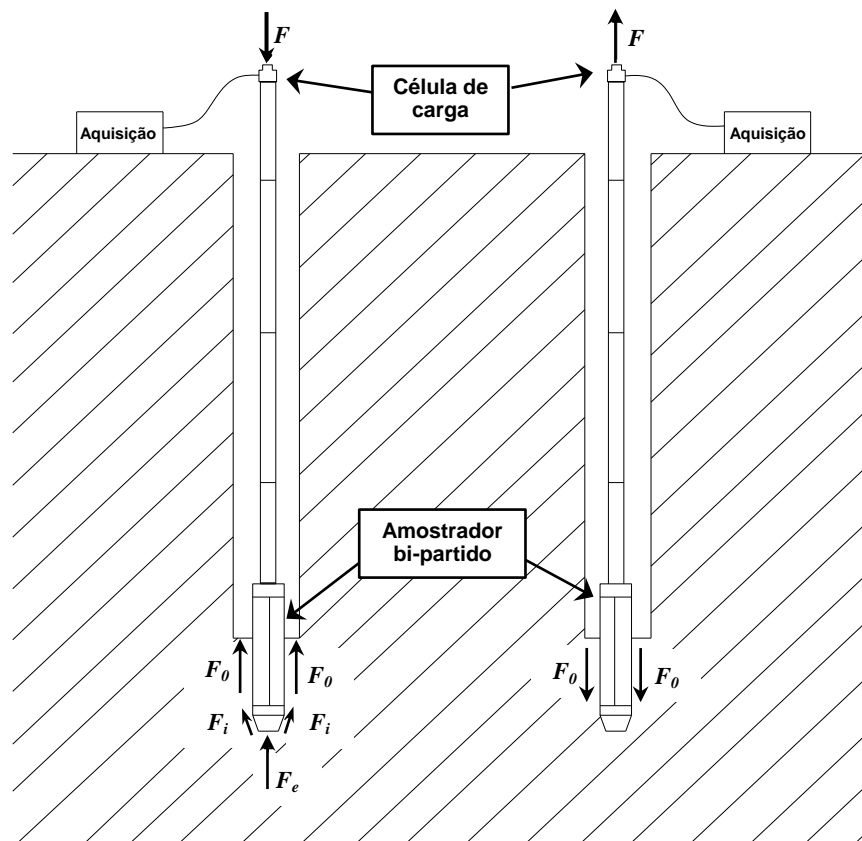


Figura 2.3: Ensaios de compressão e tração no amostrador (adaptado de LUTENEGGER & KELLEY, 1998).

2.1.4 Fatores Intervenientes no Ensaio SPT

De acordo com Cavalcante (2002), assim como qualquer outro tipo de ensaio, quer seja de campo ou de laboratório, o SPT é afetado por diversos fatores. Para o autor, na maioria dos ensaios, os fatores que incidem na energia transferida às hastes podem ser subdivididos em grupos, sendo: de natureza humana, equipamento e de procedimento. E em relação à resistência a penetração, os fatores intervenientes no SPT podem ser agrupados em: aparelhagem, procedimento e condições do solo (HVORSLEV, 1949).

Fletcher (1965) e Mohr (1966) enfatizaram diversos fatores que afetam o desempenho e a interpretação do ensaio SPT. Entretanto, estes autores também chamaram a atenção para variáveis relacionadas à interferência humana no ensaio (operador). No Brasil, os fatores intervenientes ao ensaio SPT foram discutidos por diversos pesquisadores, tais como Teixeira (1977), Décourt (1989) e Belincanta (1985 e 1998). Desta forma, com base nos fatores expostos por esses autores, podem ser citados:

- A circulação de água, quando a perfuração ainda está acima do lençol freático;
- Bomba insuficiente para a circulação de água durante a etapa de escavação;
- Direção do jato de água do trépano durante a etapa de escavação;
- Problema na limpeza do furo (limpeza insuficiente);

- Desequilíbrio hidrostático;
- Tipo e altura de queda do martelo;
- Frequência de golpes;
- Tipo e estado de conservação da corda;
- Estado de conservação do amostrador;
- Atrito durante a queda livre do martelo;
- Comprimento, tipo e condições das hastes;
- Uso ou não de coxim de madeira;
- Excentricidade na queda do martelo;
- Erros de contagem, medidas e anotações;
- Alívio das tensões de confinamento do solo por causa da perfuração;
- Camadas de solo com pedregulhos, seixos e matacões (condições do solo);
- Intervalo de penetração;
- Peso da cabeça de bater;
- Uso ou não de *liner*.

Em sua publicação, Mohr (1966) complementa os fatores intervenientes listados por Fletcher (1965). Estes novos fatores complementares abrangem essencialmente à questão comercial-econômica das empresas de sondagem. De acordo com Cavalcante (2002), quando a qualidade do serviço não é relevante para a empresa, sendo o lucro apenas o interesse, a mesma deve ser devidamente responsabilizada.

Além dos já mencionados, é importante destacar os fatores que afetam diretamente os resultados do ensaio SPT e que estão associados à deficiência na manutenção dos equipamentos, despreparo e desatualização dos funcionários responsáveis pelas atividades de campo, como também, de escritório (BELINCANTA e CINTRA, 1998).

Com relação às influências devido às condições do solo, Lobo (2009) avaliou a o efeito da compacidade do solo no N_{SPT} , a partir de simulações numéricas. Segundo a autora, os resultados indicaram que a transferência de energia em ensaios SPT é afetada pela compacidade da camada de solo investigada, entretanto, a compacidade não afeta a energia envolvida nos golpes.

Ainda com relação às condições do solo, Lukiantchuki (2012) mostrou experimentalmente que a compacidade do solo investigado interfere no número de impactos subsequentes necessários à cravação do amostrador. Assim, segundo a autora, a duração do evento do golpe depende da compacidade do solo. Entretanto, a energia, numa seção situada no topo da

composição de hastes, é independente das condições do solo. Já para a energia no topo do amostrador, há a interferência do número de ciclos para a transferência e dissipação da energia disponível.

2.2 Teoria da Equação da Onda

O início da aplicação dos conceitos de propagação de onda em barras para análise da cravação de elementos no solo remete ao início da década de 30 (LOBO, 2009). Entretanto, a consolidação destes conceitos aconteceu a partir da publicação de Smith (1960). A partir de então, esses conceitos vêm sendo utilizados por diversos pesquisadores para a interpretação de ensaios dinâmicos para investigação do subsolo, como exemplo, o SPT (SCHMERTMANN; PALÁCIOS, 1979; BELINCANTA 1985; CAVALCANTE, 2002; ODEBRECHT et al., 2005; AOKI et al., 2007; HOWIE et al., 2003; LOBO, 2009; LUKIANTCHUKI, ESQUIVEL e BERNARDES, 2011 e 2012, e LUKIANTCHUKI, 2012).

Em análises de propagação de ondas de tensão, considerando o caso de barras elásticas de comprimento finito, devem ser assumidas as seguintes hipóteses simplificadoras (BELINCANTA, 1985):

- A seção transversal plana de qualquer haste permanece plana, mesmo durante a passagem da onda de tensão;
- A tensão se distribui igualmente em toda a seção transversal da haste;
- O comprimento da onda longitudinal de tensão é considerado maior em relação ao diâmetro das hastes;
- Os movimentos transversais das partículas, durante a propagação da onda de tensão, são desprezíveis;
- As perdas de energia durante a propagação da onda longitudinal de tensão nas hastes são admitidas como desprezíveis;
- A onda longitudinal de tensão se propaga nas hastes a uma velocidade constante (c) que é função das características do material das hastes (propriedade do material);
- O material que compõe as hastes é elástico linear.

2.2.1 Velocidade de propagação da onda (c) e velocidade das partículas(v)

Segundo Belincanta (1985) quando um corpo elástico é submetido a uma força dinâmica, são formadas ondas de tensão e de deformação que se propagam ao longo deste corpo em velocidades finitas.

No ensaio SPT, ao ocorrer o impacto entre o martelo e a cabeça de bater, há a compressão de uma pequena zona da composição de hastes (Figura 2.4a). Tal deformação provoca uma tensão de compressão, que passa a ser transmitida às zonas subsequentes ao longo do tempo, causando deformações nessas regiões. A propagação desta tensão de compressão forma uma onda ao longo de toda a composição de hastes, que se propaga, de uma zona para outra, à velocidade constante (c). O esforço de compressão (F_x) é propagado a uma distância (dx), num intervalo de tempo (dt) (BELINCANTA, 1985; LUKIANTCHUKI, 2012). Desta forma, tem-se que:

$$dx = c \times dt \quad (2.3)$$

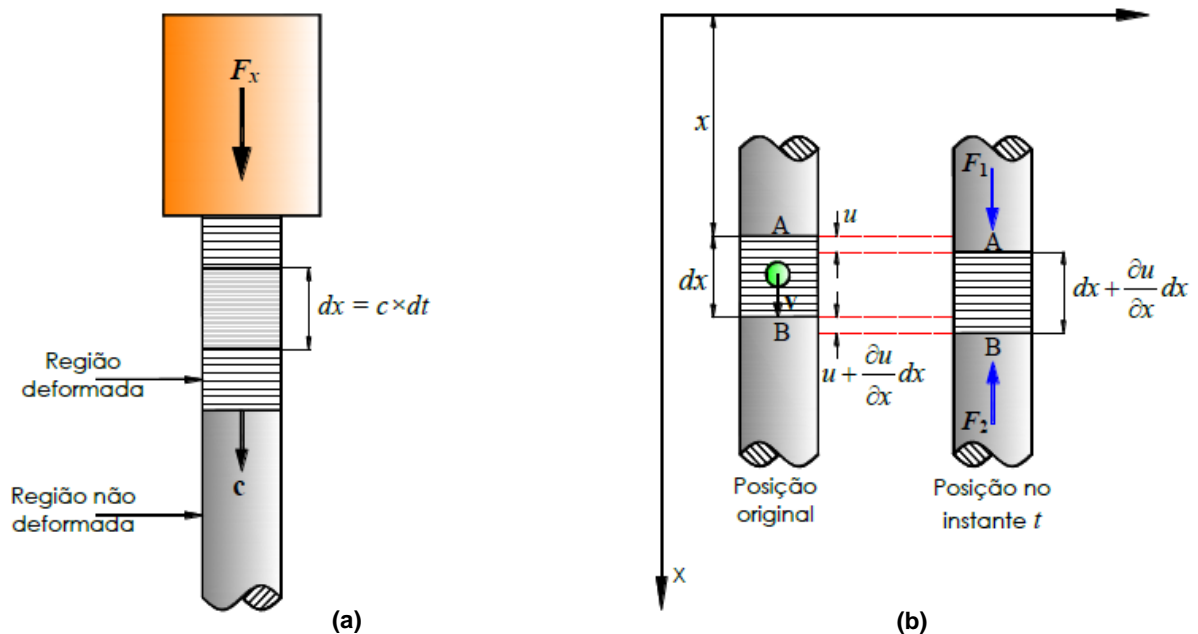


Figura 2.4: Propagação da onda de tensão na composição de hastes do ensaio SPT (BERNARDES, 1989 adaptado por LUKIANTCHUKI, 2012).

Na zona submetida à tensão de compressão, de comprimento igual a dx (Figura 2.4a); haverá um incremento de encurtamento elástico (du), que é proporcional ao incremento do deslocamento da seção superior da haste. Assim, é possível determinar a deformação (ε), devido ao encurtamento elástico, com base na Lei de Hooke (BELINCANTA, 1985):

$$\sigma_x = E \times \varepsilon \quad (2.4)$$

ou

$$\sigma_x = E \times \frac{du}{dx} \therefore du = \frac{\sigma_x}{E} \times dx \quad (2.5)$$

onde,

σ_x – tensão de compressão (kPa), assumida como positiva;

E – módulo de elasticidade do material das hastes (MPa).

As partículas da zona comprimida são submetidas à mesma velocidade de propagação de onda (c). Entretanto, segundo Belincanta (1985), as partículas à frente da onda de tensão são aceleradas, passando de uma velocidade de deformação inicial nula ($v = 0$), para uma velocidade final (v). Ao substituir a Equação 2.3 na Equação 2.5, tem-se que:

$$du = \frac{\sigma_x}{E} \times (c \times dt) \therefore \frac{du}{dt} = \frac{\sigma_x}{E} \times c \therefore v = \frac{\sigma_x}{E} \times c \quad (2.6)$$

A análise da Equação 2.6, mostra que a velocidade de deformação ou velocidade das partículas (v) tem sentido igual ao da velocidade de propagação de onda (c), durante a propagação da onda longitudinal de compressão, e terá o sentido contrário ao de c , quando a onda de tensão de tração. Desta forma, fica evidente a diferença entre as duas velocidades envolvidas no mecanismo de propagação de onda em hastes. A velocidade c corresponde à velocidade de propagação da onda no material em questão, sendo uma constante do material; enquanto que v corresponde à velocidade de animação das partículas de uma seção após a passagem da onda (Equação 2.6) (BELINCANTA, 1985).

É possível determinar c a partir da igualdade dos acréscimos de impulso (I) e da quantidade de movimento (Q):

$$I = F_x \times dt \quad (2.7)$$

$$Q = m \times v \quad (2.8)$$

onde,

F_x – força de compressão aplicada no corpo (kN);

dt – intervalo de tempo (s);

m – massa do corpo (g);

v – velocidade das partículas (m/s).

Igualando as Equações 2.7 e 2.8, tem-se:

$$F_x \times dt = m \times v \therefore (\sigma_x \times a) \times dt = v \times (\rho \times a \times dx) \quad (2.9)$$

substituindo as Equações 2.3 e 2.6 na Equação 2.9, tem-se:

$$E = \rho \times c^2 \therefore c = \sqrt{\frac{E}{\rho_s}} \quad (2.10)$$

onde,

a - área da seção transversal;

ρ_s - massa específica do material.

Assim, segundo Belincanta (1985), a partir da Equação 2.10, demonstra-se que a c é função exclusiva das propriedades do material das hastes (E e ρ). Mas v depende das propriedades do meio e da tensão envolvida (Equação 2.6).

De acordo com a Equação 2.6, considerando o trecho de comportamento elástico da haste, há uma relação de proporção entre F_x e v , durante a propagação da onda longitudinal de tensão na composição de hastes.

$$v = \frac{\sigma_x \times c}{E} = \frac{\sigma_x \times c \times a}{E \times a} = \frac{F_x \times c}{E \times a} \therefore v = \frac{F_x}{Z} \quad (2.11)$$

O fator de proporcionalidade Z (Equação 2.11) é denominado impedância. A impedância traduz a maneira como a barra transmite o pulso de tensão e depende, além das características da haste (E , c ou ρ), como também das características da seção transversal da haste (a) (BELINCANTA, 1985; LUKIANTCHUKI, 2012).

$$Z = \frac{E \times a}{c} = c \times \rho \times a \quad (2.12)$$

2.2.2 Equação unidimensional da onda

A Figura 2.4b representa o que acontece em um elemento dx de uma barra elástica, de seção transversal a , módulo de elasticidade E e massa específica ρ , submetido à atuação de uma força axial dinâmica provocada pela propagação da onda longitudinal de tensão. Durante a propagação da onda, o elemento infinitesimal dx , localizado inicialmente nas posições x e $x+dx$ da haste, sofre deslocamento devido às deformações elásticas induzidas pelo novo estado de tensão (BELINCANTA, 1985).

Desta forma, o deslocamento provocado na seção transversal do elemento dx é dependente tanto da sua posição (x), como do tempo (t). Assim, ao assumir que u é o deslocamento na seção x , o deslocamento na seção $x+dx$ será $u+(\partial u/\partial x)dx$. Portanto, no instante t , o elemento dx possuirá comprimento igual a $dx+(\partial u/\partial x)dx$ (BELINCANTA, 1985). A deformação (ε) no elemento dx pode ser determinada segundo a Equação 2.13, considerando o sistema de referencia apresentado na Figura 2.4b:

$$\varepsilon = \frac{\left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx\right) - u}{dx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.13)$$

Com base na Lei de Hooke, são calculadas as forças (F_1 e F_2), apresentadas na Figura 2.4b, que atuam no elemento dx :

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (2.14)$$

$$\frac{F}{a} = E \times \frac{\partial u}{\partial x} \therefore \frac{F}{a \times E} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.15)$$

Derivando parcialmente a Equação 2.15 em relação à x , e arrumando os termos, tem-se que:

$$\frac{\partial F}{\partial x} = E \times a \times \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.16)$$

As forças axiais que agem no elemento dx (Figura 2.4b) podem ser representadas por:

$$F_1 = E \times a \times \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.17)$$

$$F_2 = F_1 \times \left(\frac{\partial F_1}{\partial x} \right) dx \quad (2.18)$$

A partir da Segunda Lei de Newton, observa-se que:

$$F = m \times a_c \therefore F_2 - F_1 = m \times a_c \quad (2.19)$$

onde:

m - massa da haste (g);

a_c - aceleração uniforme do elemento infinitesimal (m/s^2).

Substituindo a Equação 2.18 na Equação 2.19, tem-se:

$$\frac{\partial F_1}{\partial x} = \rho \times a dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.20)$$

Ao fazer a substituição da Equação 2.16 na Equação 2.20, tem-se que:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\rho}{E} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.21)$$

De acordo com a definição da velocidade de propagação da onda (c) apresentada na Equação 2.10, fazendo a substituição na Equação 2.21, tem-se:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.22)$$

ou ainda:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.23)$$

A Equação 2.23 é a equação geral da propagação de uma onda longitudinal de tensão em uma barra ou haste (equação do movimento). A Equação 2.23 é uma equação diferencial de segunda ordem, e foi desenvolvida com base na consideração de que não existe atrito lateral na barra (BELINCANTA, 1985; ODEBRECHT, 2003; LUKIANTCHUKI, 2012).

2.2.3 Energia contida em uma onda de tensão

O processo de propagação da onda modifica o estado de tensões e a velocidade das partículas nas diversas seções da barra. Então, em um determinado instante da propagação, uma seção da barra vai estar comprimida e as demais seções estarão livres e em repouso (Figura 2.4a). No ensaio SPT, no instante em que a onda de tensão alcança o amostrador, a depender das condições do solo, a onda refletida será de tração ou de compressão. Esta onda refletida se propaga em direção ao topo da composição de hastes (sentido ascendente), dependendo da sua amplitude e das condições de contorno na ocasião do ensaio (LUKIANTCHUKI, 2012).

A energia de uma onda de tensão é constituída por duas parcelas distintas de energia, sendo: energia de deformação (E_d), armazenada no elemento submetido ao esforço, e a energia cinética das partículas (E_c).

A) Energia de Deformação:

A energia de deformação em uma barra (elástica) quando comprimida, pode ser determinada segundo duas hipóteses (BELINCANTA, 1985; ODEBRECHT, 2003):

- O trabalho de deformação devido aos esforços internos na haste, provocados pelo esforço de compressão, é análogo ao trabalho de deformação (W) das forças externas;
- Quando acontece um aumento infinitesimal na força (dF_x), o trabalho de deformação aumentará um incremento infinitesimal (dW) (Figura 2.5).

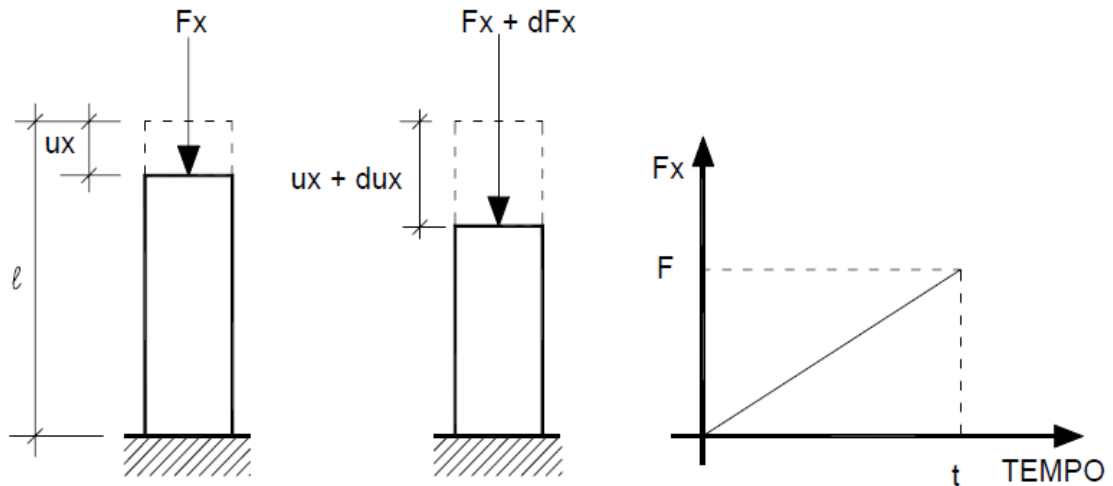


Figura 2.5: Energia de deformação devido à aplicação de uma força numa barra elástica (ODEBRECHT, 2003).

O deslocamento elástico (u) (Figura 2.5) ocasionado pela força F_x em uma barra, pode ser obtido pela Lei de Hooke:

$$u = F_x \times \frac{L}{E \times a} \quad (2.24)$$

Onde:

L - comprimento da barra elástica.

O aumento de trabalho (dW), quando ocorre o aumento (dF_x) na força (F_x), pode ser obtido segundo a Equação 2.25:

$$dW = F_x du + dF_x du \quad (2.25)$$

Onde du é o acréscimo infinitesimal de deslocamento. O segundo termo da Equação 2.25 ($dF_x du$), por ser infinitesimal de segunda ordem, pode ser desprezado. Assim, substituindo a Equação 2.24 na Equação 2.25:

$$dW = F_x \times d\left(F_x \times \frac{L}{E \times a}\right) \quad (2.26)$$

Integrando a Equação 2.26 de 0 a F , obtém-se:

$$\int_0^F dW = \int_0^F \frac{L}{E \times a} F_x dF_x \therefore W = \frac{a \times L \times \sigma^2}{2 \times E} \quad (2.27)$$

Assim, de acordo com a Equação 2.27, a energia de deformação (E_d) armazenada na deformação de um elemento dx ($dx=cdt$), quando submetido a esforços derivados da onda de tensão, pode ser representada por:

$$E_d = \frac{a \times \sigma^2}{2 \times E} \times cdt \quad (2.28)$$

B) Energia Cinética:

A energia cinética das partículas, que são animadas devido à passagem da onda longitudinal de tensão ao longo da barra elástica, pode ser representada de acordo com a Equação 2.29 (BELINCANTA, 1985; ODEBRECHT, 2003).

$$E_c = \frac{1}{2} \times m \times v^2 = \frac{1}{2} (dx \times a \times \rho) v^2 \therefore E_c = \frac{a \times \rho \times v^2}{2} \times cdt \quad (2.29)$$

Substituindo na Equação 2.29, as parcelas referentes às velocidades v e c (Equações 2.6 e 2.10), a energia cinética das partículas pode ser admitida como sendo igual a (Equação 2.30):

$$E_c = \frac{a \times \sigma^2}{2 \times E} \times cdt \quad (2.30)$$

Desta forma, a energia total de uma onda longitudinal de tensão é dada pela soma dessas duas parcelas de energias, que são iguais. Assim, de acordo com as expressões para o cálculo das energias de deformação (E_d) e cinética das partículas (E_c) (Equações 2.28 e 2.30, respectivamente), comprova-se que a energia total é constituída metade por energia de deformação e metade por energia cinética.

Desta forma, a energia total (E) pode ser obtida a partir da integração da soma das duas parcelas de energia (E_d e E_c), compreendendo o intervalo de tempo de duração da onda:

$$E = \frac{a \times c}{E} \int_0^t \sigma^2 \times dt = \frac{c}{E \times a} \int_0^t F^2(t) \times dt \quad (2.31)$$

Como existe uma relação direta entre a força e a velocidade das partículas (Equações 2.11 e 2.12), é possível reescrever a Equação 2.31, resultando em:

$$E = \frac{c}{E \times a} \int_0^t \left(\frac{E \times a}{c} \right)^2 \times v^2(t) dt = \frac{E \times a}{c} \int_0^t v^2(t) dt \quad (2.32)$$

Ao substituir um dos valores da força (F_x) da Equação 2.31, a energia total (E) pode ser calculada segundo a Equação 2.33:

$$E = \int_0^t F(t) \times v(t) dt \quad (2.33)$$

As Equações 2.31 a 2.33 correspondem aos métodos $EF2$, V^2 e EFV , respectivamente, que quantificam a energia de uma onda de tensão. Portanto, para obter a energia total basta

integrar a função F^2 , FV ou V^2 no intervalo de tempo da propagação da onda de tensão ao longo da barra (BELINCANTA, 1985; ODEBRECHT, 2003).

Na ocasião do monitoramento de energia no ensaio SPT, devido às peculiaridades da instrumentação para realizar tais medidas e às próprias condições de contorno do ensaio, são definidos alguns fatores de correção e intervalos de integração. De acordo com Odebrecht (2003), esses fatores de correção são apresentados na literatura e compõem também a Referência Internacional do SPT. Assim, as Equações 2.31 a 2.33 devem ser apresentadas da seguinte forma:

$$E = \frac{c \times K_1 \times K_2 \times K_c}{E \times a} \int_{t_1=0}^{t_2} F^2(t) \times dt \quad (2.34)$$

$$E = \frac{E \times a \times K_1 \times K_2 \times K_c}{c} \int_{t_1=0}^{t_2} v^2(t) dt \quad (2.35)$$

$$E = \int_{t_1=0}^{t_2=\infty} F(t) \times v(t) dt \quad (2.36)$$

onde:

K_1 – coeficiente para correção da parcela de energia que não é contabilizada pela instrumentação para medida de força, dentro do intervalo de tempo que a onda atinge o topo das hastes até o momento em que atinge a seção instrumentada;

K_2 – coeficiente para correção quando o comprimento da haste é menor que o comprimento equivalente;

K_c – coeficiente que considera uma eventual discrepância entre as velocidades teórica e real de propagação da onda no material que constitui a haste.

O intervalo de integração das Equações 2.34 e 2.35 é de $t_1 = 0$ a $t_2 = 2l/c$ ou de $t_1 = 0$ a $t_2 = (F=0)$. Já o intervalo de integração da Equação 2.36 é de $t_1 = 0$ até o momento em que toda a energia da onda tenha sido transferida ou dissipada. Os métodos para o cálculo da energia total (E) serão discutidos no item 2.4 deste trabalho.

2.2.4 Efeito das condições de contorno do ensaio SPT

A propagação da onda longitudinal de tensão no ensaio SPT está sujeita às interferências das condições de contorno do ensaio. Assim, a função geral de propagação da onda longitudinal de tensão está condicionada a: mudanças na seção transversal da haste,

resistência do solo investigado, excentricidade do golpe do martelo e mudança de impedância (BELINCANTA, 1985; ODEBRECHT, 2003; LOBO, 2009 e LUKIANTCHUKI, 2012).

Assim, devido às peculiaridades do ensaio SPT é imprescindível avaliar as condições de contorno por meio da verificação do equilíbrio de força e compatibilidade das velocidades das ondas de tensão (descendentes e ascendentes) (BELINCANTA, 1985; ODEBRECHT, 2003; LOBO, 2009; LUKIANTCHUKI, 2012). E, para esta avaliação é necessário adotar uma convenção de sinal e de sentido (setas gráficas) para força e velocidade das partículas (Tabela 2.1).

Tabela 2.1: Convenção de sinais e sentido para velocidades e forças (BELINCANTA, 1985).

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

2.2.4.1 Condições da extremidade da composição de hastes

A cravação do amostrador no solo inicia a partir da chegada da onda longitudinal de tensão no amostrador, no instante l/c . Neste instante, a depender das condições do solo situado na ponta do amostrador, parte da onda é consumida na cravação e parte é refletida. A penetração do amostrador no solo ocasiona o surgimento de uma força de reação dinâmica (R_D). Existem, basicamente, duas condições limites para o solo localizado na ponta do amostrador (BELINCANTA, 1985; BERNARDES, 1989; ODEBRECHT, 2003 e LUKIANTCHUKI, 2012):

- Reação dinâmica do solo nula ($R_D = 0$), ou seja, não existe resistência do solo à penetração dinâmica do amostrador;
- Reação dinâmica do solo é maior que a solicitação imposta pelo golpe ($R_D = \infty$), e admite-se a situação de engaste do amostrador, ou seja, não ocorre deslocamento do amostrador.

As equações 2.37 e 2.38 descrevem o equilíbrio e compatibilidade entre as forças e velocidades. Assim, com estas equações é possível determinar a reação dinâmica solo (R_D) e a velocidade na ponta do amostrador (v_p):

$$R_D = F \downarrow + F \uparrow \text{ (Equilíbrio)} \quad (2.37)$$

$$v_p = v \downarrow + v \uparrow \text{ (Compatibilidade)} \quad (2.38)$$

Onde

$F \downarrow$ e $v \downarrow$ – força e velocidade da onda propagada (descendente) e
 $F \uparrow$ e $v \uparrow$ – força e velocidade da onda refletida (ascendente).

2.2.4.1.1 Extremidade da composição de hastes livre

A condição de extremidade livre é adotada supondo-se que não há reação do solo à cravação do amostrador, ocorrendo assim a penetração (Figura 2.6). Para este caso, a resistência dinâmica do solo é adotada como sendo nula, $R_D=0$ (BELINCANTA, 1985):

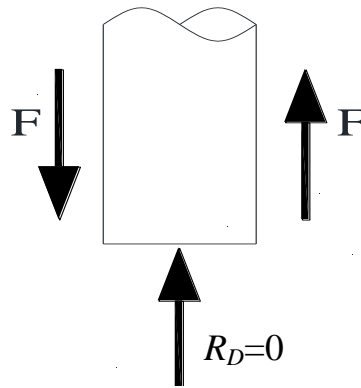


Figura 2.6: Extremidade livre (adaptado de BELINCANTA, 1985).

$$R_d = F \downarrow + F \uparrow = 0 \therefore F \uparrow = -F \downarrow \quad (2.39)$$

Assim, com o deslocamento do amostrador, que se move para baixo (velocidade positiva), a onda refletida terá a mesma intensidade da onda descendente (onda de compressão), mas com sinal contrário (onda de tração), como apresentado na Equação 2.39.

Quando a onda de compressão chega à ponta do amostrador e reflete-se em forma de onda de tração, para manter o equilíbrio, a ponta do amostrador acelera novamente e a velocidade reflete-se com o mesmo sinal, duplicando a amplitude da onda incidente e duplicando a velocidade (Equação 2.40) (BELINCANTA, 1985; ODEBRECHT, 2003):

$$v_p = v \downarrow + v \uparrow = \frac{F \downarrow}{Z} + \left(-\frac{F \uparrow}{Z} \right) = 2 \frac{F \downarrow}{Z} \therefore v_p = 2v \quad (2.40)$$

2.2.4.1.2 Extremidade da composição de hastes engastada

Com relação à condição de extremidade engastada, ou ponta fixa, assume-se que a resistência dinâmica do solo ($R_D = \infty$) é suficiente grande para impedir o deslocamento do amostrador (Figura 2.7) (BELINCANTA, 1985).

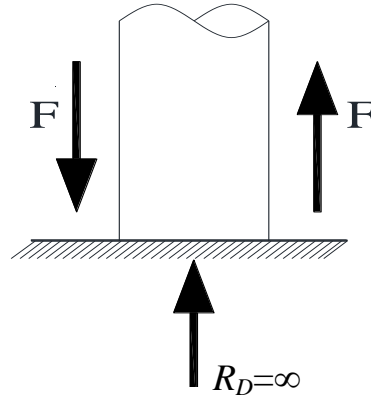


Figura 2.7: Extremidade engastada (adaptado de BELINCANTA, 1985).

Assim, neste caso, o deslocamento e a velocidade das partículas, são adotados como nulos (Equação 2.41 e 2.42).

$$v_p = v \downarrow + v \uparrow = 0 \therefore v \uparrow = -v \downarrow \quad (2.41)$$

ou

$$-\frac{F \uparrow}{Z} = -\left(\frac{F \downarrow}{Z}\right) \therefore F \uparrow = F \downarrow \quad (2.42)$$

Desta forma, a onda longitudinal que chega à extremidade engastada do amostrador é refletida como uma onda ascendente de mesma intensidade e sinal que a onda descendente (Equação 2.42). Portanto, se a onda que chega é de compressão, a onda refletida também será de compressão (BELINCANTA, 1985).

Desta forma, a força final, no trecho de superposição, pode ser obtida a partir da soma das ondas descendente e ascendente, sendo calculada a partir da Equação 2.43:

$$F = F \downarrow + F \uparrow = 2F \downarrow \quad (2.43)$$

Segundo Belincanta (1985), neste caso, no trecho da extremidade engastada (superposição) a onda refletida ascendente é de compressão e a velocidade da partícula é negativa, ocasionando um aumento da força e diminuição da velocidade (elevação do estado de tensão).

2.2.4.1.3 Extremidade da composição de hastes semi-engastada

Para a condição de extremidade do amostrador semi-engastada, Bellincanta (1985) sugere assumir que a força normal na região é igual à resistência dinâmica oferecida pelo solo

(R_D), que por sua vez pode ser considerada como finita e constante. Assim, a partir do esquema apresentado na Figura 2.8, chega-se a Equação 2.44.

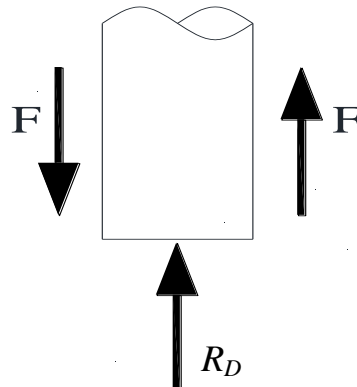


Figura 2.8: Extremidade engastada (adaptado de BELINCANTA, 1985).

$$R_D = F \downarrow + F \uparrow \therefore F \uparrow = R_D - F \downarrow \quad (2.44)$$

A partir da Equação 2.44, considerando que a primeira onda propagada (descendente) é de compressão, é possível concluir que (BELINCANTA, 1985; ODEBRECHT, 2003; LUKIANTCHUKI, 2012):

- Se R_D for equivalente à força incidente ($F \downarrow$), não existirá onda longitudinal de compressão refletida na extremidade da composição de hastes;
- Se R_D for maior que a força incidente ($F \downarrow$), existirá onda longitudinal de reflexão na extremidade da composição de hastes, na forma de onda de compressão;
- Se R_D for menor que a força incidente ($F \downarrow$), haverá onda refletida na extremidade da composição de hastes, na forma de onda de tração.

A velocidade na extremidade das hastes (v_p), que determina o seu deslocamento (ρ), pode ser calculada conforme a Equação 2.45:

$$v_p = v \downarrow + v \uparrow \therefore v_p = \frac{F \downarrow}{Z} + \left(-\frac{F \uparrow}{Z} \right) = \frac{F \downarrow}{Z} - \frac{(R_D - F \downarrow)}{Z} = \frac{(2F \uparrow - R_D)}{Z} \quad (2.45)$$

É possível determinar o deslocamento (ρ) a partir da integração da velocidade (v_p) (Equação 2.46).

$$\rho = \int_{t_1}^{t_2} v_p dt \therefore \rho = \frac{1}{Z} \int_{t_1}^{t_2} (2F \uparrow - R_D) dt \quad (2.46)$$

A partir da Equação 2.46, observa-se que o deslocamento do amostrador (ρ) só ocorrerá apenas quando $2F\downarrow$ for maior que R_D , ou seja, até quando a velocidade for positiva (BERNARDES, 1989; LUKIANTCHUKI, 2012).

2.2.4.2 Mudança na impedância

Podem ser citadas como causas comuns para a mudança de impedância (Z): variação na seção transversal das hastes (a), alteração do módulo de elasticidade (E) do material ou alteração da velocidade de propagação da onda (c). Com relação à mudança da área da seção transversal das hastes, pode ser citada a variação que existe na junção do conjunto de hastes e o amostrador (ODEBRECHT, 2003; LUKIANTCHUKI, 2012).

A Figura 2.9 apresenta esquematicamente a propagação da onda longitudinal de tensão ao longo da composição de hastes do ensaio SPT, destacando a mudança de área que ocorre na junção entre a composição de haste e o amostrador (seção A-A).

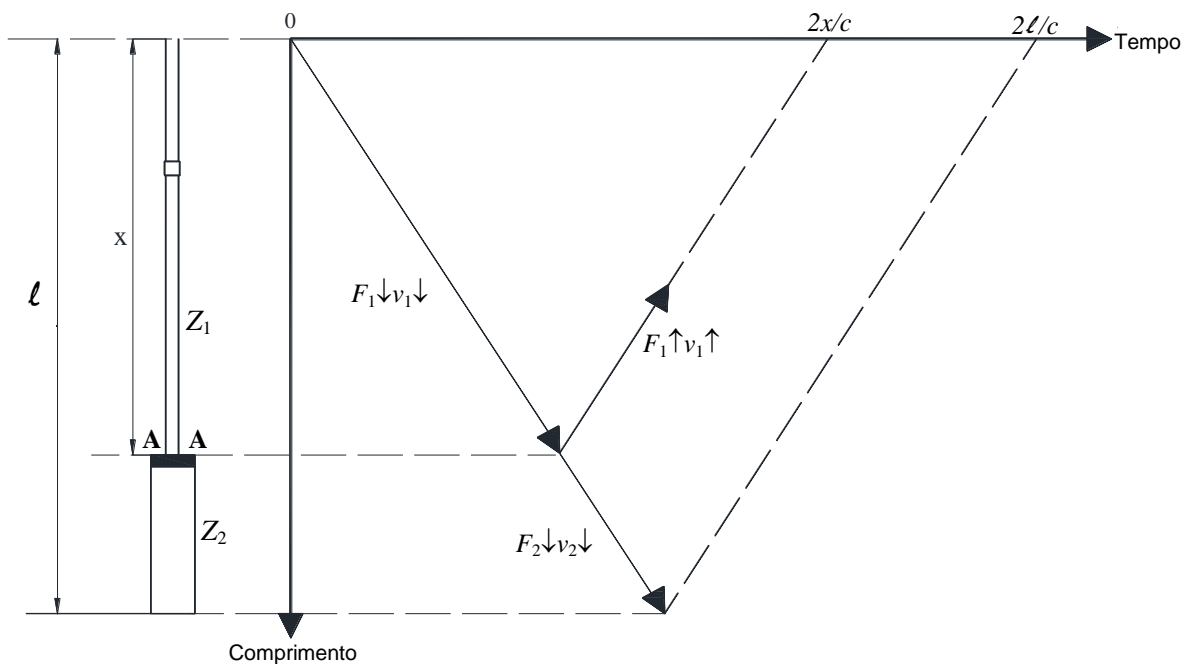


Figura 2.9: Propagação da onda longitudinal de tensão em uma composição de hastes do ensaio SPT (BERNARDES, 1989 adaptado por LUKIANTCHUKI, 2012).

Assim, ao chegar à seção A-A (Figura 2.9) parte da onda será transmitida ($F_2\downarrow$, $v_2\downarrow$) e outra parte será refletida ($F_1\uparrow$, $v_1\uparrow$) (ODEBRECHT, 2003; LUKIANTCHUKI, 2012). Assim, onde existir variação de impedância (Z_1 , Z_2), há o equilíbrio de forças e velocidades, acima e abaixo da descontinuidade, logo:

$$F = F_1\downarrow + F_1\uparrow = F_2\downarrow \text{ (Equilíbrio)} \quad (2.47)$$

$$v = v_1 \downarrow + v_1 \uparrow = v_2 \downarrow \text{ (compatibilidade)} \quad (2.48)$$

Ao resolver em conjunto as Equações 2.47 e 2.48, a força e a velocidade transmitidas são dadas por:

$$F_2 \downarrow = \frac{2 \times Z_2}{Z_1 + Z_2} F_1 \downarrow \quad (2.49)$$

$$v_2 \downarrow = \frac{2 \times Z_1}{Z_1 + Z_2} v_1 \downarrow \quad (2.50)$$

Substituindo a Equação 2.49 na Equação 2.47 e, a Equação 2.50 na Equação 2.48, obtêm-se a força e a velocidade que são refletidas:

$$F_1 \uparrow = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} F_1 \downarrow \quad (2.51)$$

$$v_1 \uparrow = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} v_1 \downarrow \quad (2.52)$$

A Tabela 2.2 apresenta possíveis resultados para as ondas transmitidas e refletidas devido às discontinuidades das hastes. A reflexão ou transmissão de ondas também é dependente da relação entre as impedâncias logo acima e logo abaixo das discontinuidades (Z_1 e Z_2) (BERNARDES, 1989; ODEBRECHT, 2003; LUKIANTCHUKI, 2012).

De acordo com a Tabela 2.2, a depender da relação entre as impedâncias Z_1 e Z_2 , podem existir as seguintes situações:

- $Z_1 = Z_2$: não há variação de impedância e a onda transmitida permanece sem alterações, não existindo onda refletida;
- $Z_1 > Z_2$: se houver uma diminuição na seção transversal da haste, há a diminuição da impedância e a onda refletida será de tração e sobreposta à onda inicial, reduzindo-a. Ocorre assim, o aumento da velocidade no topo da composição de hastes após o instante $t = 2x/c$;
- $Z_1 < Z_2$: há o aumento da impedância da haste e a onda refletida será de compressão, causará diminuição da velocidade e um aumento da força. As ondas refletidas de compressão podem ser ocasionadas pelas mudanças repentinas da seção transversal das hastes ou mesmo, devido ao embuchamento do amostrador.

Tabela 2.2: Possíveis ondas devido às descontinuidades das hastes (adaptado de BERNARDES, 1989).

Relação entre as impedâncias	$Z_1 = Z_2$	$Z_1 \gg Z_2$	$Z_1 \ll Z_2$
Onda inicial			
Onda refletida			
Onda transmitida			
	$v_2 \downarrow = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} v_1 \downarrow$	$v_1 \downarrow$	$2v_1 \downarrow$
	$F_2 \downarrow = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} F_1 \downarrow$	$F_1 \downarrow$	0
	$v_1 \uparrow = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} v_1 \downarrow$	0	$v_1 \downarrow$
	$F_1 \uparrow = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} F_1 \downarrow$	0	$-F_1 \downarrow$
Onda refletida	0	Tração	Compressão

2.3 Energia no SPT

Com o martelo do ensaio SPT erguido, toda a energia disponível neste momento, é integralmente do tipo potencial gravitacional. Assim, esta energia inicial é dependente da massa e da altura de queda do martelo. No Brasil, segundo a NBR 6494 (ABNT, 2001), a energia potencial teórica do sistema (EP_T) é igual a:

$$EP_T = M_m \times g \times h_q = 65 \times 9,81 \times 0,75 \cong 478,2J \quad (2.53)$$

Onde:

M_m – Massa do martelo padrão (kg),

g – Aceleração da gravidade (m/s^2),

h_q – Altura de queda do martelo (m).

Em seguida, durante a queda livre do martelo, a energia potencial que estava inicialmente disponível ao sistema, transforma-se em energia cinética. Entretanto, devido às perdas por atrito nas cordas e roldanas, nem toda a energia potencial gravitacional disponível é transformada em energia cinética.

Assim que há o impacto entre o martelo e a cabeça de bater, a energia cinética incide sobre o conjunto de hastes (ENTHRU) e ocorre a transformação da energia cinética em energia cinética e elástica (energia de deformação). Estas energias percorrem as hastes em direção ao amostrador na forma de onda longitudinal de compressão, energia sonora, térmica e perdas. As perdas ocorrem devido às características intrínsecas do próprio ensaio SPT, tais como: mau contato entre as superfícies, desalinhamento, reflexões nas luvas de junção das hastes, etc. (ODEBRECHT, 2003).

Como mencionado no item 2.2.4, quando a primeira onda de tensão alcança o amostrador no instante $t = \ell/c$, a depender da resistência do solo, uma parte dessa energia é transformada em trabalho para cravação do amostrador e, a outra, em ondas de tensão ascendentes refletidas em direção ao topo da composição de hastes. A onda refletida alcança a cabeça de bater no instante $t = 2\ell/c$ e, é a partir deste momento que há a separação entre a cabeça de bater e o martelo (BELINCANTA e FERRAZ, 2000; ODEBRECHT, 2003; LUKIANTCHUKI, 2012).

Quando o martelo entra novamente em contato com a cabeça de bater, após o instante $t = 2\ell/c$, surgem novamente impulsos de tensão descendentes. Estes novos impulsos alcançam o amostrador no instante $t = 3\ell/c$, e podem ou não continuar a cravação do amostrador no solo, dependendo da sua magnitude e da resistência à cravação oferecida pelo solo. O evento do golpe encerra quando as ondas de tensão não possuem mais magnitude para vencer a resistência do solo à cravação do amostrador (ODEBRECHT, 2003; LUKIANTCHUKI, 2012).

2.3.1 Correção da Energia do Sistema no Ensaio SPT

No ensaio SPT, a quantidade de energia do sistema (EP_{sistema}) difere da energia potencial teórica do ensaio (EP_T). Apesar da existência das perdas durante a queda livre do martelo, por causa do movimento descendente de todo o conjunto amostrador-haste-cabeça de bater, há o aumento na energia que realmente é disponibilizada ao sistema (ODEBRECHT, 2003; NEVES, 2004; LUKIANTCHUKI, 2012).

Desta forma, Odebrecht (2003) sugeriu a correção da energia potencial do sistema a fim de considerar o acréscimo de energia devido à composição de hastes e ao martelo. Segundo Odebrecht (2003), a cravação do amostrador no solo pode ser representada pelas etapas apresentadas na Figura 2.10.

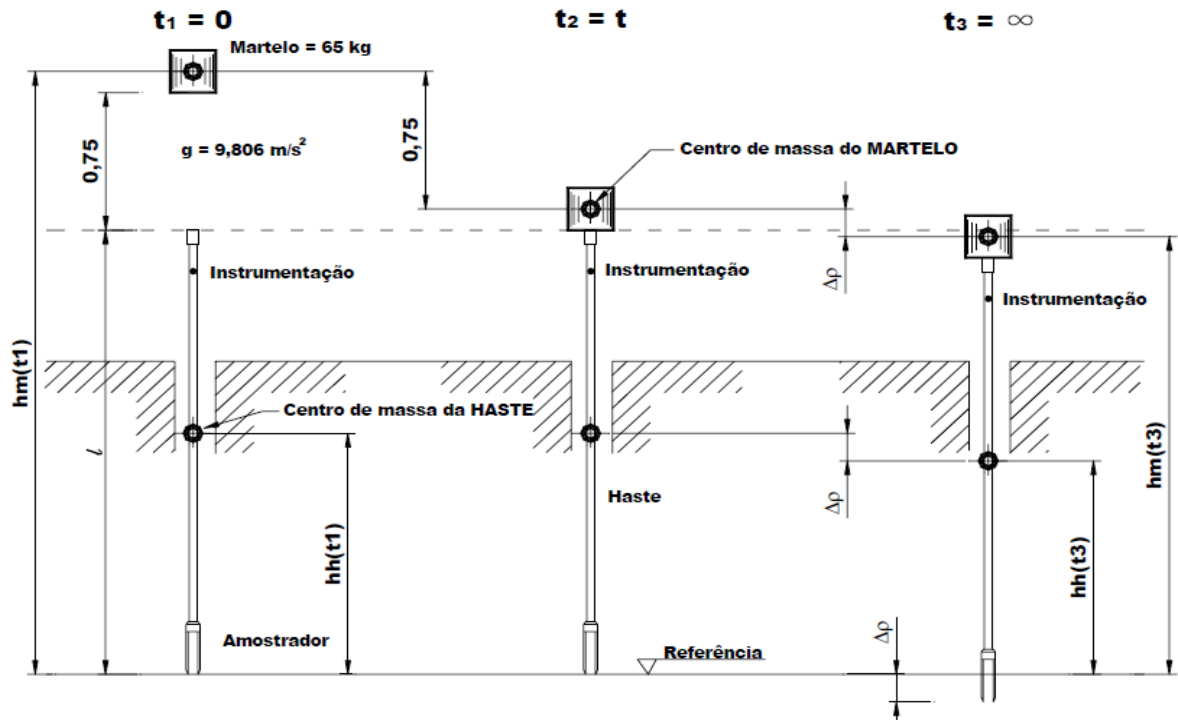


Figura 2.10: Etapas da cravação do amostrador no solo (ODEBRECHT, 2003).

Na Figura 2.10, a primeira etapa ($t_1 = 0$), corresponde ao momento inicial, antes da queda livre do martelo. A segunda etapa ($t_2 = t$) representa o instante imediatamente antes do impacto entre o martelo e a cabeça de bater. E a última etapa ($t_3 = \infty$), quando a cravação do amostrador já aconteceu. Ao final do golpe ($t_3 = \infty$), segundo Odebrecht (2003), a energia potencial gravitacional (do martelo e das hastes) já foi gasta na cravação do amostrador, restituída elasticamente e amortecida dinamicamente.

Considerando um referencial fixo e externo ao sistema, Odebrecht (2003) demonstrou que a energia potencial disponibilizada na cravação do amostrador no solo (EP_{sistema}) é expressa pela Equação 2.54. De acordo com o autor, devem ser consideradas as influências do solo (ρ), massa da composição de hastes e da altura de queda do martelo.

$$EP_{\text{sistema}} = EP_m + EP_H = EP_T + (M_m \times g \times \rho) + (M_h \times g \times \rho) \quad (2.54)$$

onde:

ρ – Penetração permanente do amostrador devido à aplicação de um golpe (m),

M_h – Massa das hastes (kg),

EP_m – Variação da Energia potencial do martelo (J),

EP_H – Variação da Energia potencial das hastes (J).

A diferença entre as energias potenciais do martelo e das hastes após ocorrer a cravação do amostrador, pode ser obtida a partir da diferença entre as cotas no início do evento (t_1) e no final (t_3). Assim, tem-se que:

$$\Delta h_m = h_{m(t_1)} - h_{m(t_3)} = 0,75 + \rho \quad (2.55)$$

$$\Delta h_h = h_{h(t_1)} - h_{h(t_3)} = \rho \quad (2.56)$$

onde:

Δh_m – Variação da cota de posição do martelo(m),

Δh_h – Variação da cota de posição da composição de hastes (m).

Desta forma, pode ser obtida a variação da energia potencial do martelo, entre os instantes t_1 e t_2 , a partir da Equação 2.57 (ODEBRECHT, 2003). Similarmente, a variação da energia potencial referente às hastes pode ser obtida a partir da Equação 2.58.

$$EP_m = EP_T + (M_m \times g \times \rho) \quad (2.57)$$

$$EP_H = M_h \times g \times \rho \quad (2.58)$$

Para solos resistentes ($N_{SPT} \geq 15$), com pequena penetração por golpe e junto com longos comprimentos de hastes, a variação da energia potencial do martelo e das hastes é similar ao valor da energia potencial teórica. Assim, para solos resistentes, é aceitável a consideração de que $EP_T = EP_{sistema}$, visto que a contribuição do martelo e da composição de hastes na cravação é desprezível. Entretanto, para solos de menor resistência, onde ocorre uma maior penetração do amostrador a cada golpe do martelo, a diferença entre as energias potenciais do martelo e das hastes é considerável, sendo fundamental considerar o acréscimo da energia potencial devido à movimentação descendente de todo o conjunto de ensaio (ODEBRECHT, 2003; LUKIANTCHUKI, 2012).

2.3.3 Eficiência no Ensaio SPT

A energia envolvida em ensaios SPT pode ser analisada em quatro momentos distintos: no início do evento (martelo erguido), imediatamente antes do impacto do martelo com a cabeça de bater, durante e ao final do evento. Em cada um destes momentos, existem perdas de energia devido às características do ensaio (equipamento e procedimentos).

Tradicionalmente, entende-se como eficiência do ensaio SPT (η) a relação entre a energia transferida à composição de hastes (E_h) no primeiro golpe do martelo, também denominada de

ENTHRU, e a energia potencial total disponível quando o martelo é erguido (EP_T), que é de 478,2 J no caso do ensaio brasileiro, segundo a NBR 6484/01 (ABNT, 2001) (Equação 2.59).

$$\eta = \frac{E_h}{EP_T} \times 100\% = \frac{E_h}{478,2} \times 100\% \quad (2.59)$$

No momento do impacto do martelo com a cabeça de bater, os 478,2 J de energia potencial gravitacional total são transformados em energia cinética (E_c) e em perdas. Assim, Décourt (1989), visando quantificar a parcela de energia transferida às hastes (E_h), considerou estas perdas e propôs a Equação 2.60, em que são adotados fatores de correção da energia potencial total.

$$E_h = e_1 \times e_2 \times e_3 \times EP_T \quad (2.60)$$

onde e_1 , e_2 e e_3 são fatores que consideram as perdas de energia cinética: durante a queda do martelo, logo após o golpe (relacionado à massa da cabeça de bater) e devido ao comprimento da composição de hastes, respectivamente.

O fator e_1 foi definido por Décourt (1989) como a relação entre a energia cinética do martelo (E_{ci}), imediatamente antes do impacto com a cabeça de bater, e a energia potencial teórica do ensaio SPT (Equação 2.61 e 2.62).

$$e_1 = \frac{E_{ci}}{EP_T} \quad (2.61)$$

$$e_1 = \frac{0,5 \times M_m \times v_i^2}{478,2} \times 100\% \quad (2.62)$$

Já o fator e_2 , que é relativo à massa da cabeça de bater, é definido como a relação entre as energias numa seção logo abaixo da cabeça de bater (E_i ou ENTHRU), e a cinética imediatamente antes do impacto (E_{ci}) (Equação 2.63 a 2.64). O fator e_3 está associado ao comprimento da composição de hastes, e causou controvérsias no meio técnico na época. Contudo, pesquisas recentes têm indicado que a energia abaixo da cabeça de bater é independente do comprimento de hastes (CAVALCANTE, 2002; ODEBRECHT, 2003; SANTANA, DANZIGER e DANZIGER, 2012), sendo adotado e_3 igual a 1.

$$E_i = e_2 \times E_{ci} = e_2 \times e_1 \times EP_T \quad (2.63)$$

$$e_2 = \frac{E_i}{E_{ci}} \quad (2.64)$$

No trabalho de Aoki e Cintra (2000a), o tradicional conceito de eficiência no ensaio SPT foi redefinido (η^*), sendo agora a relação entre a energia disponível ao sistema amostrador-solo (T_A) e a energia teórica do ensaio SPT (Equação 2.65).

$$\eta^* = \frac{T_A}{478,2} \times 100\% = \frac{E_{amostrador}}{478,2} \times 100\% \quad (2.65)$$

Assim, de acordo com esta nova definição, a eficiência do ensaio SPT deve ser obtida considerando-se a energia que é efetivamente entregue ao amostrador. Para tanto, é necessária a determinação da energia numa seção logo acima do amostrador (AOKI e CINTRA, 2000a).

Ainda neste trabalho, Aoki e Cintra (2000a) apresentam resultados teóricos de eficiência, referentes a uma seção situada próxima ao amostrador (η^*) (Figura 2.11). Estes resultados diferem dos resultados teóricos de Schmertmann e Palácios (1979) (Figura 2.11), os quais mostram que para hastes curtas a eficiência (η) do ensaio SPT tende a zero.

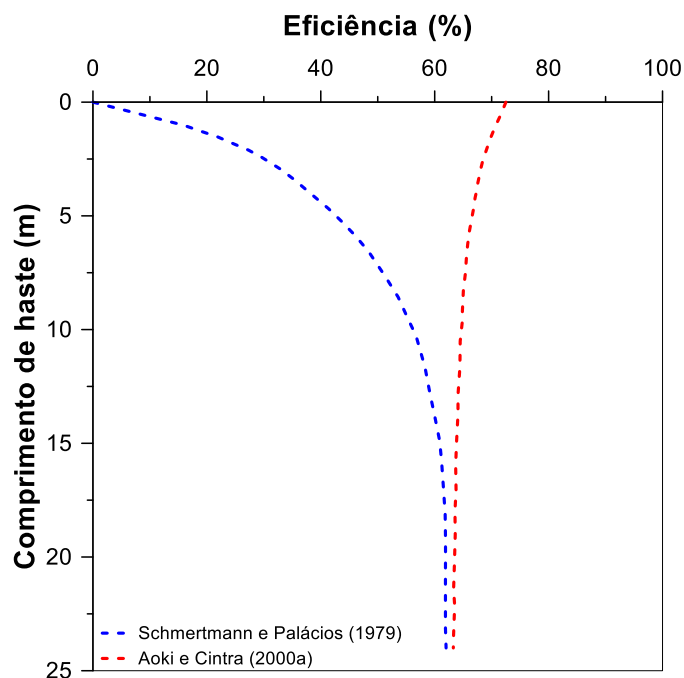


Figura 2.11: Resultados teóricos de eficiência *versus* comprimento de haste (adaptado de AOKI e CINTRA 2000a; SCHMERTMANN e PALÁCIOS, 1979).

A diferença entre os resultados de eficiência apresentados na Figura 2.11, consiste basicamente na interpretação dos resultados. Schmertmann e Palácios (1979) desenvolveram suas análises com base em resultados de energia que compreendiam apenas a primeira onda longitudinal de tensão incidente (onda de compressão). Desta forma, Schmertmann e Palácios (1979) não consideraram a contribuição dos impactos subsequentes na cravação do amostrador no solo (propagação e reflexão de ondas longitudinais de tensão).

Odebrecht (2003) propõe que a energia referente à cravação do amostrador ($E_{amostrador}$) seja quantificada considerando as parcelas de eficiência do martelo (η_1), da composição de hastes (η_2) e do sistema como um todo (η_3). Desta forma, Odebrecht (2003) propõe a Equação 2.66 para a determinação da energia que efetivamente atinge o amostrador, considerando as perdas que ocorrem ao longo do golpe.

$$E_{amostrador} = \eta_3 \times [\eta_1 \times (0,75 + \rho) \times M_m \times g + \eta_2 \times (M_h \times g \times \rho)] \quad (2.66)$$

Sendo,

$$\eta_1 = \frac{\int_0^{\infty} F(t) \times v(t) dt}{(0,75 + \Delta\rho) \times M_m \times g} \quad (2.67)$$

e η_2 e η_3 , determinados via processo iterativo, levando em consideração o menor erro entre os valores de energia medidos e os determinados pela Equação 2.66. Odebrecht (2003) obteve os valores 0,764 e 1 para os coeficientes η_1 e η_2 , respectivamente. Para o coeficiente η_3 , o autor encontrou uma relação em função do comprimento da composição de haste, Equação 2.68.

$$\eta_3 = 1 - 0,0042 \times L_h \quad (2.68)$$

Tomando como base a proposição de Aoki e Cintra (2000a) e a correção da energia do sistema proposta por Odebrecht (2003), Lukiantchuki (2012) determinou as eficiências de ensaios SPT realizados com duas configurações de equipamento (convencional e mecanizado). Para os dois tipos de equipamentos, Lukiantchuki (2012) determinou, simultaneamente, as energias em seções logo abaixo da cabeça de bater (topo) e logo acima do amostrador (base). As eficiências no topo e na base foram determinadas considerando a interação haste-amostrador-solo, a partir da correção da energia potencial disponível ao sistema (Equação 2.69 e 2.70).

$$\eta_{topo} = \frac{E_h}{EP_{sistema}} \times 100\% \quad (2.69)$$

$$\eta_{base} = \frac{E_{amostrador}}{EP_{sistema}} \times 100\% \quad (2.70)$$

2.3.4 Interpretação do Ensaio SPT Segundo o Princípio de Hamilton

A avaliação das energias envolvidas no ensaio SPT é tradicionalmente realizada a partir de instrumentação instalada numa seção do topo da composição de hastes, sendo feita a integração dos sinais em relação ao tempo necessário para a onda refletida atingir o topo da composição de hastes. Assim, de acordo com este procedimento, a eficiência do ensaio aumenta com o aumento do comprimento das hastes, como foi apresentado por Schmertmann e Palacios (1979) (Figura 2.11). Entretanto, a constatação do aumento da eficiência com o incremento de hastes não é coerente, devido a maiores comprimentos de haste acarretarem numa maior suscetibilidade à perda de energia (nas luvas, por atrito, flambagem, etc.).

Embasados no Princípio da Conservação de Energia (Princípio de Hamilton), Aoki e Cintra (2000a) avaliaram as energias referentes à aplicação de um golpe do martelo no ensaio SPT. O Princípio de Hamilton é representado pela expressão variacional apresentada na Equação 2.71 (CLOUGH e PENZIEN, 1975):

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(T - V)dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta(W_{nc})dt = 0 \quad (2.71)$$

Onde:

T – Energia cinética total do sistema (J);

V – Energia potencial do sistema (J);

W_{nc} – Trabalho realizado por forças não conservativas (J);

δ – Variação em um intervalo de tempo qualquer ($t_2 - t_1$).

Assim, o Princípio de Hamilton estabelece que a diferença da variação da energia cinética e da variação da energia potencial, somada à variação do trabalho das forças não conservativas atuantes sobre um sistema num intervalo de tempo ($t_2 - t_1$) deve ser nula (Equação 2.71). Este princípio pode ser aplicado a qualquer evento físico e preconiza que a energia se conserva apenas se transformando de um tipo para outro (CLOUGH e PENZIEN, 1975).

Aoki e Cintra (2000b) demonstraram e propuseram as etapas de transformação da energia potencial teórica do ensaio SPT (EP_T) em energia potencial de deformação (V), energia cinética (T) e trabalho (W), ao longo do golpe do martelo. A Figura 2.12 apresenta esquematicamente as etapas de transformação da energia envolvida no golpe do martelo no ensaio SPT, segundo a proposta de Aoki e Cintra (2000a e 2000b).

O início da análise do golpe segundo o Princípio da Conservação de Energia se dá no instante t_0 , a partir do erguimento do martelo e encerra no instante t_6 , quando todo o sistema

entra em repouso (NEVES, 2004). Entretanto, as transformações apresentadas na Figura 2.12 não contemplam a correção da energia potencial do sistema devido ao acréscimo de energia potencial por conta da cravação do amostrador no solo (Equação 2.54), assim como os impactos secundários. A Tabela 2.3 descreve resumidamente as etapas de transformação de energia apresentadas na Figura 2.12.

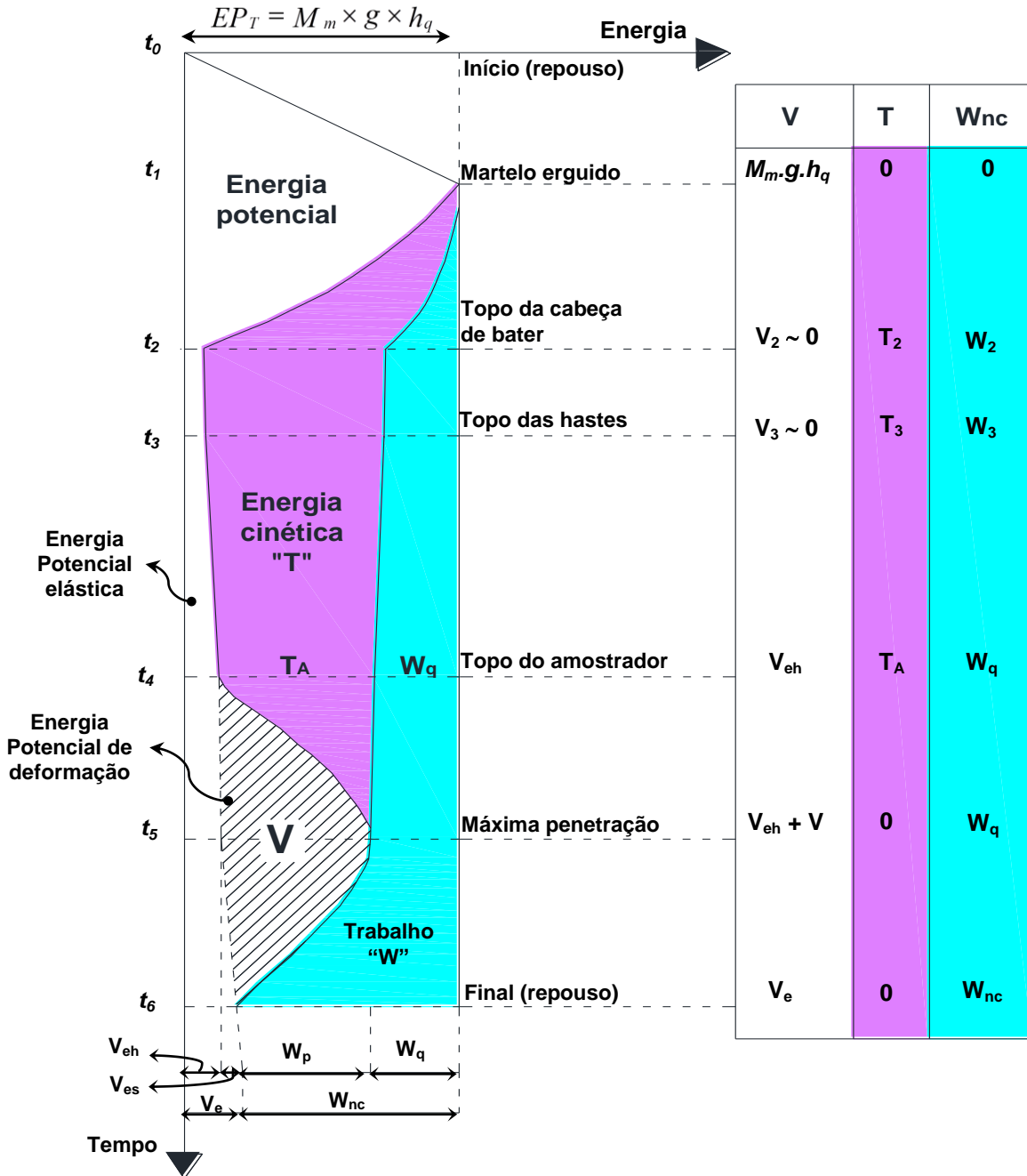


Figura 2.12: Evolução das energias potencial, cinética e trabalho durante o golpe no ensaio SPT (adaptado de AOKI e CINTRA, 2000b e NEVES, 2004).

Tabela 2.3: Etapas de transformação das energias envolvidas no ensaio SPT (Aoki e Cintra, 2000a e 2000b; Neves, 2004).

Instante	Evento
$(t_0 - t_1)$	Início a partir do levantamento do martelo. Neste momento, toda a energia do sistema é do tipo potencial gravitacional, sendo aproximadamente igual a 478,2 J para o ensaio brasileiro segundo a NBR 6484 (2001). Essa energia é denominada energia potencial nominal ou teórica (EP_T).
$(t_1 - t_2)$	Queda livre do martelo até o contato com a cabeça de bater. A energia potencial nominal (EP_T) se transforma em energia cinética (T_2), energia de deformação elástica (V_2) e em trabalho das forças não conservativas (W_2), devido às perdas que ocorrem. No instante t_2 , admite-se que praticamente não existe energia de deformação elástica ($V_2 \cong 0$).
$(t_2 - t_3)$	Propagação da onda longitudinal de tensão entre a cabeça de bater e a composição de hastes ($ENTHRU$). Neste intervalo, admite-se que as variações no trabalho e nas energias cinética e potencial, são desprezíveis, ou seja, neste intervalo de propagação da onda, o trabalho e as energias não se alteram;
$(t_3 - t_4)$	Propagação da onda longitudinal de tensão na composição de hastes e chegada ao amostrador. A energia cinética T_3 é reduzida a T_A , havendo acréscimo na energia referente ao trabalho das forças não conservativas, de W_3 para W_q . Este aumento ocorre devido à acomodação das luvas de acoplamento entre as hastes, entretanto, 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} .
t_4	A energia cinética T_A é a energia que efetivamente chega ao topo do amostrador. Desta forma, essa energia deve ser considerada no cálculo da eficiência do ensaio SPT, como proposto por Aoki e Cintra (2000). Esta parcela de energia (T_A) pode ser estimada a partir do posicionamento de instrumentação, específica para eventos dinâmicos, numa seção logo acima do amostrador.
$(t_4 - t_5)$	Energia percorre o amostrador causando sua cravação no solo (deslocamento máximo). O deslocamento é função da resistência do solo e da energia disponível à cravação. Durante este intervalo, há a transformação da energia cinética (T_A) em energia potencial de deformação (V).
$(t_5 - t_6)$	Consumo da energia na cravação do amostrador e final do evento. Parte da energia potencial de deformação (V) é transformada em energia potencial elástica (V_e), devido à deformação elástica do solo (V_{es}) e do amostrador. Ainda durante a cravação, a energia potencial de deformação restante (V), se transforma em trabalho das forças resistentes não conservativas (W_p). Esta etapa se repete até que toda a energia disponível seja consumida na cravação do amostrador no solo.
t_6	Final da propagação de onda. A energia potencial elástica (V_e) acumulada nas hastes (V_{eh}) e no solo que envolve o amostrador (V_{es}) é restituída. Assim, neste instante o sistema entra em repouso, e a cravação se encerra. Neste instante, W_{nc} representa todo o trabalho das forças não conservativas para a cravação do amostrador.

Assim, a partir da Figura 2.12, elaborada com base no Princípio da Conservação de Energia aplicado ao ensaio SPT, tem-se que a energia potencial de deformação equivale à soma de uma parcela elástica e do trabalho das forças não conservativas devido à cravação ($V = V_e + W_p$). A parcela de energia potencial elástica (V_e) é constituída por uma parcela devido ao solo e outra às hastes ($V_e = V_{es} + V_{eh}$). O trabalho W_p compreende a energia consumida na cravação do amostrador no solo (Figura 2.12). As transformações de energia no intervalo de tempo ($t_5 - t_4$) e a geração de trabalho que ocorre no intervalo de tempo ($t_6 - t_5$) acontecem ao mesmo tempo.

Desta forma, a partir da Figura 2.12 e da Tabela 2.3, podem ser estabelecidas as Equações 2.72 a 2.74.

$$V_e = V_{es} + V_{eh} \quad (2.72)$$

$$EP_T = V_e + W_{nc} \quad (2.73)$$

$$T_A = V = V_{es} + W_p \quad (2.74)$$

Assim, segundo Aoki e Cintra (2000a), a partir do Princípio de Hamilton aplicado ao ensaio SPT, a energia potencial total do sistema se transforma em energia potencial elástica (V_e) e em trabalho de forças não conservativas (W_{nc}) (Equação 2.73). Portanto, além da redefinição do conceito de eficiência do ensaio SPT (η^*), os autores também sugerem que a eficiência, no caso de solos arenosos e siltosos, pode ser determinada a partir do trabalho para cravar o amostrador no solo, sendo definida segundo a Equação 2.75.

$$\eta_s = \frac{W_p}{EP_i} \quad (2.75)$$

Onde:

η_s – Eficiência, calculada através do trabalho realizado para a penetração no amostrador.

2.4 Medidas de Energia no Ensaio SPT

A determinação da quantidade de energia no ensaio SPT é realizada com base na Teoria da Equação da Onda (item 2.2.3). Segundo a Teoria da Equação da Onda, a energia contida numa onda de tensão é composta por duas parcelas: a primeira devido à energia de deformação elástica e, a segunda parcela, decorrente da energia cinética proveniente da velocidade de animação das partículas (BELINCANTA, 1985; ODEBRECHT, 2003; LUKIANTCHUKI, 2012).

A energia dinâmica incidente no sistema haste-amostrador em um determinado tempo (t), pode ser obtida conhecendo-se a força normal nas hastes em função do tempo ou método EF^2 (Equação 2.34) ou, a partir da velocidade das partículas em função do tempo ou método V^2 (Equação 2.35) ou, através da utilização da força normal e da velocidade da partícula em função do tempo ou método EFV (Equação 2.36).

O intervalo de tempo (Δt) a ser considerado no cálculo da energia é função do método de cálculo utilizado. Os métodos EF^2 e EV^2 só são válidos quando não existem golpes subsequentes (reflexões de onda), ou seja, só compreendem o intervalo de tempo igual a $2l/c$. Já o método EFV compreende todo o tempo de duração do evento, ou seja, é válido quando existem impactos subsequentes (LUKIANCHUKI, 2012).

A utilização de cada método depende basicamente da instrumentação disponível para as medições. Em geral, quando disponíveis sinais de força e velocidade das partículas, o método a ser utilizado no cálculo da energia é o EFV . Se disponíveis apenas sinais de força, adota-se o método EF^2 . Entretanto, de acordo com Cavalcante (2002), mesmo que o método EF^2 seja utilizado como uma alternativa ao EFV , este último método é o único capaz de quantificar a energia corretamente, em qualquer situação. A utilização do método V^2 não é corrente.

A seguir, serão detalhados os métodos EF^2 e EFV , que são os mais utilizados para a quantificação da energia no ensaio SPT.

2.4.1 Método EF^2

Para o método EF^2 faz-se necessário integrar sinais de força obtidos a partir de um transdutor de força (célula de carga) instalado em uma seção situada ao longo da composição de hastes. Devido às condições de contorno inerentes ao ensaio SPT, para corrigir a energia calculada, a norma americana D4633-86 (ASTM, 1986) recomenda a utilização de fatores de correção no cálculo da energia pelo método EF^2 , assim como a definição dos intervalos de integração, conforme é apresentado na Equação 2.34, aqui representada pela Equação 2.76. Os coeficientes K_1 , K_2 e K_c foram anteriormente abordados no item 2.2.3.

$$E = \frac{c \times K_1 \times K_2 \times K_c}{E \times a} \int_{t_1=0}^{t_2=2l/c} F^2(t) \times dt \quad (2.76)$$

Devido às dificuldades e limitações para medir a velocidade das partículas ao longo da propagação da onda na seção instrumentada, o método EF^2 foi amplamente utilizado, principalmente nos trabalhos pioneiros para a quantificação da energia no SPT, podendo ser citados: Schmertmann e Palácios (1979), Seed et al. (1985) e Skempton (1986).

A partir de trabalhos experimentais posteriormente desenvolvidos, confirmou-se que os fatores de correção da energia para o método EF^2 (K_1 , K_2 e K_c) não eram eficazes, e que a principal limitação do método é o fato de ser válido apenas durante a proporcionalidade entre os sinais de força e velocidade, ou seja, até o instante $2U/c$ (propagação e reflexão da primeira onda) (CAVALCANTE, 2002; ASTM, 2010; LUKIANTCHUKI, 2012).

2.4.2 Método EFV

Segundo Lobo (2009) a principal diferença entre os métodos EFV e EF^2 consiste na instrumentação necessária para medir a variação da velocidade da partícula ao longo da propagação da onda longitudinal de tensão. Tal instrumentação adicional consiste em acelerômetros, instalados diametralmente opostos e próximos ao transdutor de força. A estimativa da quantidade de energia a partir do método EFV , foi proposta por Sy e Campanella em 1991, e desde então, vem sendo utilizado em pesquisas que visam quantificar as energias envolvidas em ensaios SPT.

A norma técnica D4633-10 (ASTM, 2010) indica o método EFV como método a ser adotado nos estudos relacionados à energia em ensaios de penetração dinâmica, visto que permite a estimativa da energia total envolvida no evento do golpe do martelo no ensaio SPT, ou seja, compreende todo o evento do golpe (impactos subsequentes).

Para a estimativa da energia, a partir do EFV , inicialmente é feita a integração dos sinais de aceleração, obtendo-se assim os respectivos valores de velocidade. Em seguida, a energia é calculada a partir da integração do produto da força (obtida via transdutor de força) pela velocidade, como é apresentado na Equação 2.36, sendo aqui representada pela Equação 2.77.

$$E = \int_{t_1=0}^{t_2=\infty} F(t) \times v(t) dt \quad (2.77)$$

Lobo (2009) destaca que no método EFV , o intervalo de tempo do golpe utilizado na integração do produto força *versus* velocidade, deve ser suficiente para que toda energia disponível no sistema seja transferida ou dissipada. Portanto, deve-se considerar a influência de todos os impactos subsequentes na cravação do amostrador.

De acordo com Lukiantchuki (2012), apesar de bastante utilizado, o método EFV tem sido prejudicado devido à falta de confiabilidade dos registros de velocidade, provocados por limitações nos acelerômetros disponíveis no mercado. Assim, segundo a autora, é indispensável fazer o monitoramento da qualidade dos sinais obtidos. O controle consiste na

comparação entre sinais de força e de velocidade multiplicados pela impedância do transdutor de força (Z), que é calculada pela Equação 2.12.

Enquanto houver a propagação da primeira onda de tensão, assume-se que os sinais obtidos são confiáveis se ocorrer similaridade entre os valores de velocidade multiplicados pela impedância (vZ) e os sinais de força obtidos pelo transdutor de força (F). Após a reflexão da primeira onda de tração ($t > 2l/c$) essa similaridade acaba (HOWIE et al., 2003; LOBO, 2009; LUKIANTCHUKI, 2012).

2.5 Interação Solo-Amostrador

O estudo dos mecanismos de interação do sistema solo-amostrador são baseados nos princípios da interação solo- estaca propostos por Smith (1960). De acordo com Smith (1960), durante a cravação dinâmica de uma estaca, a resistência dinâmica total apresentada pelo solo (R_t) corresponde à soma de duas parcelas: a resistência estática (R_s), e a resistência viscosa ou dinâmica (R_v) (Equação 2.78).

$$R_t = R_s + R_v \quad (2.78)$$

Em seu trabalho, Smith (1960) modela o carregamento dinâmico (F_d) que age numa estaca durante o processo de cravação, propondo a representação das reações do solo a partir de um modelo “elasto-visco-plástico” (Figura 2.13a). No modelo da Figura 2.13a, as deformações são equivalentes a um bloco de atrito (deformações plásticas) em série com uma mola (deformações elásticas) e todo este conjunto, em paralelo com um amortecedor (comportamento dinâmico).

A Figura 2.13b apresenta a solução do modelo proposto por Smith (1960), sendo: R_s a resistência estática na zona elástica do solo; R_u a resistência estática última do solo para o deslocamento elástico máximo (*quake*), δ o deslocamento do solo para a resistência R_s .

De acordo com Lobo (2009), a parcela referente à resistência estática na Equação 2.78, é caracterizada pelo comportamento elasto-plástico do solo. Assim, ocorrem deformações elásticas no solo até uma carga limite de ruptura (R_u), chegando a um deslocamento limite, denominado como *quake* (Q). Ao aumentar a carga imposta, passam a haver deformações plásticas e irreversíveis no solo, sendo observado este comportamento a partir da declividade da reta de rigidez do sistema estaca-solo (k') na Figura 2.13b (Equação 2.79).

$$R_u = k' \times Q \quad (2.79)$$

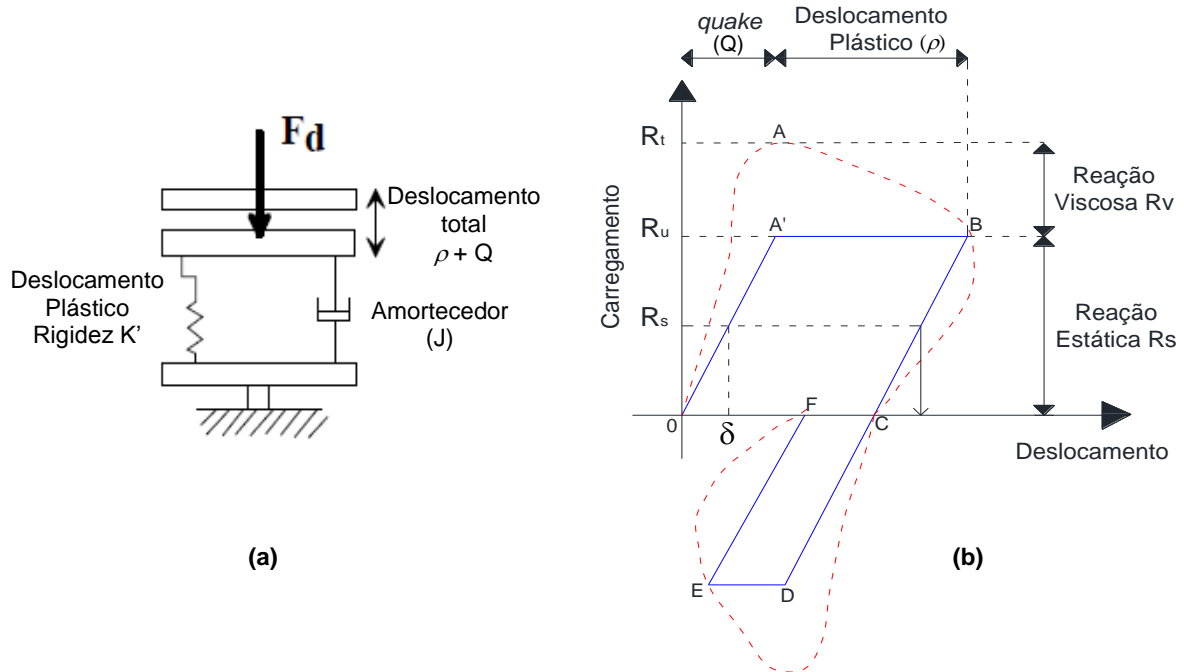


Figura 2.13: (a) Modelo elasto-visco-plástico de Smith (1960) e (b) Relação carga-deslocamento na cravação de elementos no solo segundo o modelo de Smith (1960) – carregamento e descarregamento. (LOBO, 2009 adaptado por NOREÑA, 2011).

Para Smith (1960), a reação viscosa do solo (R_v) depende linearmente da força estática mobilizada, assim como da velocidade de penetração da estaca no solo, podendo ser representada por:

$$R_v = R_s \times J \times v_p \quad (2.80)$$

onde J é o coeficiente *Damping* de Smith e v_p é a velocidade de cravação do amostrador no solo. Substituindo as Equações 2.79 e 2.80 na Equação 2.78, tem-se as expressões abaixo:

$$F_d = K' \times Q \times (1 + J \times v_p) \quad \text{para } u > Q \quad (2.81)$$

$$F_d = K' \times u \times (1 + J \times v_p) \quad \text{para } u < Q \quad (2.82)$$

Onde u é o deslocamento.

As Equações 2.81 e 2.82 representam a força dinâmica mobilizada devido à cravação de elementos no solo. O comportamento carga-deslocamento devido à propagação de onda de tensão é apresentado na Figura 2.13b. Nesta figura, a região dos pontos $OABC$ representa o carregamento e descarregamento das reações do anel e do núcleo (ponta); enquanto que a região referente aos pontos $OABCDEF$ correspondem ao carregamento e descarregamento referente ao atrito lateral externo (LOBO, 2009). Uma das grandes vantagens do modelo de reação do solo de Smith (1960) é a necessidade de poucos parâmetros de entrada, sendo

apenas três: Q (máxima deformação elástica ou *quake*), J (constante de amortecimento ou *Damping* de Smith) e R_s (resistência estática do solo).

Com base no modelo de cravação de estacas de Smith (1960) foram propostos modelos da interação solo-amostrador (Goble e Abou-Matar, 1992; Lobo, 2009). Segundo Goble e Abou-Matar (1992), no ensaio SPT, a resistência total (R_T) equivale às parcelas de força de amortecimento (R_d), força estática (R_s) e força inercial (R_a) (Equação 2.83).

$$R_T(t) = R_d(t) + R_s(t) + R_a(t) \quad (2.83)$$

Onde,

$$R_a(t) = \Delta m \times a(t) \quad (2.84)$$

$$R_d(t) = J \times v^N(t) \quad (2.85)$$

Sendo,

Δm – massa da amostra de solo no interior do amostrador;

$a(t)$ – aceleração;

$v(t)$ – velocidade;

J – constante de amortecimento de Smith.

O modelo de Lobo (2009), desenvolvido para solos granulares, toma como base além de Smith (1960), a Teoria da Expansão de Cavidades de Vesic (1972). Segundo a autora, a força de reação dinâmica do solo (F_d) é resultante da ação de três componentes (Equação 2.86): reação do anel ($F_{d,a}$), reação devido ao atrito lateral externo entre o solo e o amostrador ($F_{d,s}$) e a reação de núcleo ($F_{d,c}$) (LOBO, 2009).

$$F_d = F_{d,a} + F_{d,c} + F_{d,s} \quad (2.86)$$

A Equação 2.86 pode ser reescrita em função dos três tipos de reação (anel, núcleo e atrito lateral):

$$F_d = K'_a Q_a (1 + J_a \times v) + K'_c Q_c (1 + J_c \times v) + K'_s Q_s (1 + J_s \times v) \quad (2.87)$$

Onde:

v – velocidade em que o amostrador é cravado no solo;

Q_a , Q_c e Q_s – são os deslocamentos elásticos máximos (*quake*) das reações do anel, núcleo e atrito lateral externo;

K'_a , K'_c e K'_s – são as constantes de rigidez do sistema solo-amostrador correspondentes ao anel, ao núcleo e ao atrito lateral externo. São estimadas com base na razão entre a resistência estática do solo ($F_{u,a}$; $F_{u,c}$; $F_{u,s}$) e o deslocamento elástico máximo (Q_a , Q_c e Q_s);

J_a , J_c e J_s – são as constantes de reação viscosa ou amortecimento dinâmico, para as reações do anel, do núcleo e atrito lateral externo.

2.5.1 Resistência Dinâmica do Sistema Solo-amostrador (SCHNAID et al., 2009)

Com base no Princípio da Conservação de Energia aplicado ao ensaio SPT, Schnaid et al., (2009) desenvolveram um método teórico para a estimativa da reação dinâmica (F_d) mobilizada no momento da penetração do amostrador.

Segundo Schnaid et al., (2009) no final do golpe do ensaio SPT, toda a energia cinética foi completamente dissipada, assim como todas as perdas. Assim, a Equação 2.71 pode ser reformulada para (Equação 2.88):

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta V(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} \delta [W_s(t) + W_{nc}(t)] dt = 0 \quad (2.88)$$

sendo,

V – energia potencial do sistema;

W_s – trabalho das forças não conservativas sob o sistema solo-amostrador;

W_{nc} – trabalho efetuado por forças não conservativas (outras formas de perdas).

Desta forma, toda a variação de energia do sistema é equivalente ao trabalho das forças não conservativas, que no ensaio SPT, é a energia que chega ao amostrador e causa a penetração. Portanto, segundo Schnaid et al., (2009), a reação F_d pode ser estimada a partir das Equações 2.89 e 2.90.

$$E_{amostrador} = W_s = F_d \times \Delta\rho \quad (2.89)$$

$$F_d = \frac{E_{amostrador}}{\Delta\rho} \quad (2.90)$$

Assim, Schnaid et al., (2009) propõe a Equação 2.91 para a estimativa de F_d a partir das massas das hastes e do martelo, da aceleração da gravidade e da penetração permanente do amostrador, tomando como base a proposta de Odebrecht (2003) e a Equação 2.90.

$$F_d = \frac{\eta_3 [\eta_1 (0,75 + \rho) \times M_m \times g + \eta_2 (M_h \times g \times \rho)]}{\rho} \quad (2.91)$$

2.5.3 Resistência Estática do Sistema Solo-amostrador (Aoki et al., 2004 e 2007)

Com base no Princípio da Conservação de Energia (item 2.3.4), Aoki et al. (2004 e 2007) propõe o cálculo da resistência estática do sistema solo-amostrador (R_S). Segundo os autores, essa resistência pode ser obtida a partir do ensaio de prova de carga estática no sistema haste-amostrador-solo.

Curvas típicas de resistência *versus* penetração são apresentadas na Figura 2.14. Estas curvas correspondem às situações de carregamento e descarregamento do amostrador no ensaio SPT. No momento em que a onda atinge o amostrador (instante t_1), a energia no sistema é cinética (T_A). Segundo Aoki et al. (2004), quando ocorre a penetração máxima do amostrador no solo (DMX), instante t_2 , a energia cinética (T_A) se transforma em energia de deformação (V_A), sendo igual a área OAB sob a curva resistência *versus* penetração (Figura 2.14a). No final do evento dinâmico ou descarregamento (instante t_3), já ocorreu a penetração permanente (S) e a recuperação elástica (K) do sistema, como apresentado na Figura 2.14b.

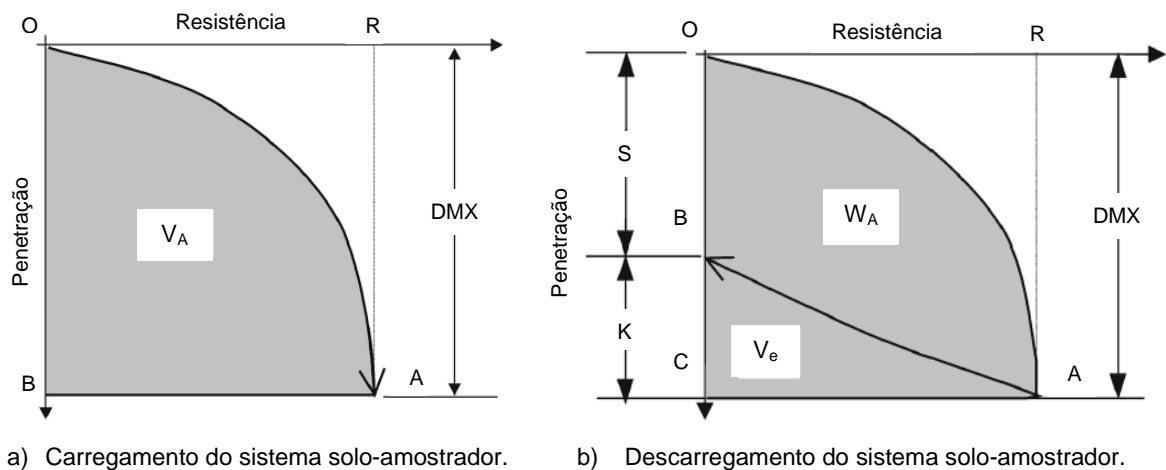


Figura 2.14: Curvas resistência *versus* penetração referente ao ensaio SPT (adaptado de AOKI et al., 2004).

Segundo Aoki et al. (2007), no intervalo $t_3 - t_2$ a energia potencial de deformação (V_A) e o trabalho das forças não conservativas (W_{nc}) se transformam em energia potencial elástica (V_e) e em trabalho de forças não conservativas devido à cravação (W_A). A Tabela 2.4 apresenta resumidamente, as variações de energia a cada instante da cravação do amostrador no solo, segundo a proposta de Aoki et al. (2007).

Assim, segundo a proposta de Aoki et al. (2007), com base no Princípio da Conservação de Energia (Equação 2.71), é possível inferir que entre o intervalo $t_3 - t_2$:

$$V_A = V_e + W_A \quad (2.92)$$

Tabela 2.4: Resumo das energias a cada instante da cravação do amostrador no solo (Aoki et al., 2007).

Tempo	T	V	W_{nc}
t_1	T_A	0	0
t_2	0	V_A	0
t_3	0	V_e	W_A
Varição δ_{12}	$-T_A$	(V_A)	(0)
Varição δ_{23}	0	$(V_e - V_A)$	(W_A)

Assim, segundo a proposta de Aoki et al. (2007), com base no Princípio da Conservação de Energia (Equação 2.71), é possível inferir que entre o intervalo $t_3 - t_2$:

$$V_A = V_e + W_A \quad (2.93)$$

Excluindo solos resilientes, a recuperação elástica (K) é desprezível quando comparada ao deslocamento plástico (S) (AOKI et al., 2004 e 2007). Assim, a Equação 2.93 pode ser reescrita como:

$$V_A \cong W_A \quad (2.94)$$

Porém, o trabalho realizado pelas forças não conservativas é equivalente ao produto força resistente (R_T) versus penetração permanente (S):

$$W_A = R_T \times S \quad (2.95)$$

Aoki et al. (2004 e 2007) consideram que a resistência total do sistema amostrador-solo na cravação (R_D) é semelhante à resistência do ensaio estático (R_S). Desta forma, a resistência estática pode ser estimada a partir da Equação 2.96.

$$R_S = R_T = \frac{W_A}{S} = \frac{V_A}{S} = \frac{T_A}{S} \quad (2.96)$$

Entretanto, quando o amostrador é cravado no solo, a penetração S a cada golpe varia ao longo dos 0,30 m que correspondem ao índice N_{SPT} . Assim, pode-se calcular uma penetração média equivalente a partir da Equação 2.97 (AOKI et al., 2004 e 2007).

$$S_m = \frac{0,30}{N_{SPT}} \quad (2.97)$$

Substituindo a Equação 2.97 na Equação 2.96, a resistência estática correspondente a um golpe pode ser determinada pela Equação 2.98.

$$R_s = \frac{T_A}{S_m} = T_A \times \frac{N_{SPT}}{0,3} \text{ (kN)} \quad (2.98)$$

Como mencionado no item 2.3.3, segundo Aoki e Cintra (2000a) a eficiência do ensaio SPT, determinada para uma seção situada próxima ao amostrador, pode ser obtida por meio da Equação 2.65, que combinada com a Equação 2.98, torna-se:

$$R_s = \frac{\eta^* \times 0,478 \times N_{SPT}}{0,3} \text{ (kN)} \quad (2.99)$$

Portanto, a partir da Equação 2.99, a resistência estática do sistema solo-amostrador durante a cravação pode ser estimada com base no índice N_{SPT} e na eficiência do ensaio. A partir da Equação 2.99, o índice N_{SPT} passa a ser interpretado com um significado físico (AOKI et al., 2004 e 2007).

A fim de incorporar a correção da energia potencial do sistema, Aoki (2013) redefine a Equação 2.99, agora considerando a correção proposta por Odebrecht (2003) de um referencial fixo e externo ao sistema (Equação 2.100).

$$R_s = \eta^* \times \frac{\left[M_m \times g \times 0,75 \times \left(\frac{0,3}{N_{SPT}} + 0,75 \right) \right]}{1000} \times \frac{N_{SPT}}{0,3} \text{ (kN)} \quad (2.100)$$

2.6 Reações Mobilizadas no Sistema Solo-amostrador

Aoki (2013), com base no Princípio da Conservação de Energia (Princípio de Hamilton) propõe o equilíbrio das forças não conservativas atuantes no amostrador. Segundo o autor, conhecendo-se o valor de N_{SPT} , eficiência no topo do amostrador (η^*) e o comprimento da amostrada de solo recuperada (L_a), é possível determinar as forças resistentes no sistema solo-amostrador e, a partir do equilíbrio estático, chegar aos valores de resistência de ponta (r_p), atrito lateral externo (r_L) e interno (r_{Li}). A Figura 2.15 apresenta esquematicamente as reações por atrito lateral que atuam no sistema solo-amostrador, segundo a proposta de Aoki (2013).

Na Figura 2.15, as forças de atrito que atuam nas paredes do amostrador padrão, são ocasionadas por tensões de atrito lateral nas paredes internas (r_{Li}) e externas (r_L) e no chanfro do amostrador. Ainda na Figura 2.15, são apresentadas as reações resultantes do atrito, sendo (Aoki, 2013):

- R_j : 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 troncocônica do amostrador.

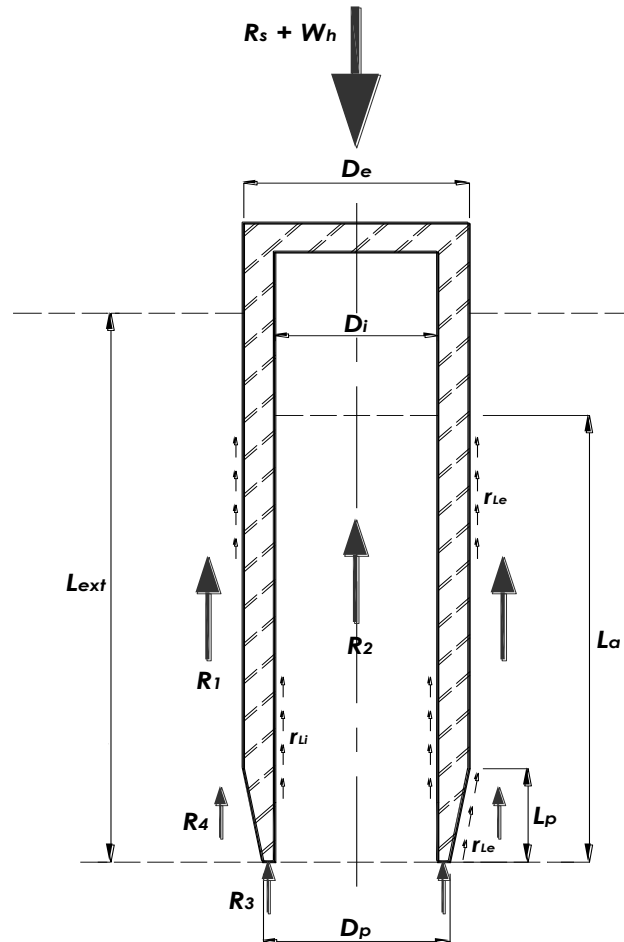


Figura 2.15: Equilíbrio das forças atuantes no sistema solo-amostrador (adaptado de Aoki, 2013).

A Equação 2.101 representa o equilíbrio estático das forças atuantes no amostrador, como o que é apresentado na Figura 2.15.

$$R_s + W_h = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (2.101)$$

Onde:

W_h – peso da composição de haste e da cabeça de bater;

R_s – resistência estática do sistema solo-amostrador (AOKI et al., 2007).

As reações resultantes do atrito, podem ser obtidas a partir das equações a seguir (AOKI, 2013):

$$R_1 = \pi \times D_{ext} \times (L_{ext} - L_p) \times r_L \quad (2.102)$$

$$R_2 = \pi \times D_{\text{int}} \times r_{Li} \times L_a \quad (2.103)$$

$$R_3 = \pi / 4 \times (D_p^2 - D_{\text{int}}^2) \times (r_L / R_f) \quad (2.104)$$

$$R_4 = (S_L \times L_p / L) \times r_L \quad (2.105)$$

Onde,

D_{ext} – diâmetro externo do amostrador;

D_{int} – diâmetro interno do amostrador;

D_p – diâmetro da ponta do amostrador;

L – comprimento da superfície biselada troncocônica (Equação 2.106) e,

S_L – área média da seção transversal da superfície biselada troncocônica (Equação 2.110).

$$L = \left\{ L_p^2 + \left[(D_{\text{ext}} - D_p) / 2 \right]^2 \right\}^{0,5} \quad (2.106)$$

$$S_L = \pi \times L \times (D_{\text{ext}} + D_p) / 2 \quad (2.107)$$

Ao considerar que o atrito na parede interna do amostrador é “ a ” vezes maior que o atrito na parede externa, Aoki (2013) sugere um fator de atrito (a), que é calculado a partir da Equação 2.108.

$$a = r_{Li} / r_L \quad (2.108)$$

No caso do equilíbrio das forças atuantes na ponta aberta do amostrador, a resultante R_2 é igual à resultante da resistência sob a ponta aberta do amostrador, ou seja:

$$R_2 = \pi \times D_{\text{int}}^2 / 4 \times r_p \quad (2.109)$$

Aoki (2013) menciona que pode ser determinada uma razão de atrito (R_f), por semelhança ao ensaio CPT (*Cone Penetration Test*), sendo a relação entre o atrito externo com a resistência de ponta do solo sob o amostrador (Equações 2.110 e 2.111).

$$R_f = r_L / r_p = r_{Li} / (a \times r_p) \quad (2.110)$$

ou

$$R_f = D_{\text{int}} / (4 \times a \times L_{\text{int}}) \quad (2.111)$$

Desta forma, segundo a proposta de Aoki (2013), de posse dos valores de N_{SPT} e da respectiva eficiência do ensaio, do comprimento da amostra recuperada (L_a) e adotando um valor para a razão de atrito (a), é possível obter as resistências unitárias de ponta e de atrito do solo a partir do ensaio SPT, independente da ocorrência ou não do fenômeno do

embuchamento da amostra no interior do amostrador padrão. Assim, segundo o autor, essa nova interpretação do ensaio SPT torna o ensaio uma ferramenta com potencial de substituir o ensaio CPT.

3. Materiais e Métodos

Este capítulo apresenta os equipamentos e procedimentos utilizados na realização dos ensaios SPT com medida de energia via instrumentação dinâmica. É apresentada também, a metodologia adotada para o cálculo das energias e eficiências, assim como a ferramenta computacional desenvolvida para cálculo e visualização dos resultados.

3.1 Equipamento da EESC-USP para Medida de Energia no Ensaio SPT

O equipamento utilizado para avaliar as quantidades de energia nos ensaios SPT foi desenvolvido por Lukiantchuki (2012) com base o método *EFV* (item 2.4.2). O equipamento consiste em dois segmentos de haste instrumentados com uma célula de carga, formada por extensômetros elétricos (*strain gauges*), e um par de acelerômetros.

Os segmentos de haste instrumentados podem ser posicionados em qualquer lugar ao longo da composição de hastes. Entretanto, os ensaios executados neste trabalho seguiram a proposta de Aoki e Cintra (2000a). Assim, um dos segmentos de haste instrumentados foi posicionado numa seção logo abaixo da cabeça de bater (topo da composição de hastes) e o outro, logo acima do amostrador (final da composição de hastes). Com esse posicionamento do equipamento, foi possível avaliar a energia entregue ao amostrador e responsável pela sua cravação, assim como a reação do solo à cravação dinâmica do amostrador.

3.1.1 Segmentos de Haste

Os segmentos de haste utilizado neste trabalho foram desenvolvidos de forma a apresentar a mesma impedância mecânica das hastes utilizadas nos ensaios SPT, evitando reflexões de ondas indesejadas. Assim, os segmentos de haste foram projetados segundo as características das hastes de sondagem (diâmetros nominais, interno e externo), de acordo com a padronização da NBR 6484/01 (ABNT, 2001) (Figura 3.1).

Belincanta (1998) constatou que os extensômetros elétricos (*Strain Gauges*) de células de carga que eram confeccionadas nas próprias hastes do ensaio SPT, sempre estavam danificados após vários ensaios, acarretando em mudanças significativas na constante de calibração da célula de carga. Tal fato pode estar associado à baixa resistência ao escoamento dessas hastes em relação às forças envolvidas no golpe do martelo no ensaio SPT, que podem

exceder ao limite de escoamento do material das hastes acarretado em deformações plásticas residuais, que por sua vez danificam os extensômetros.

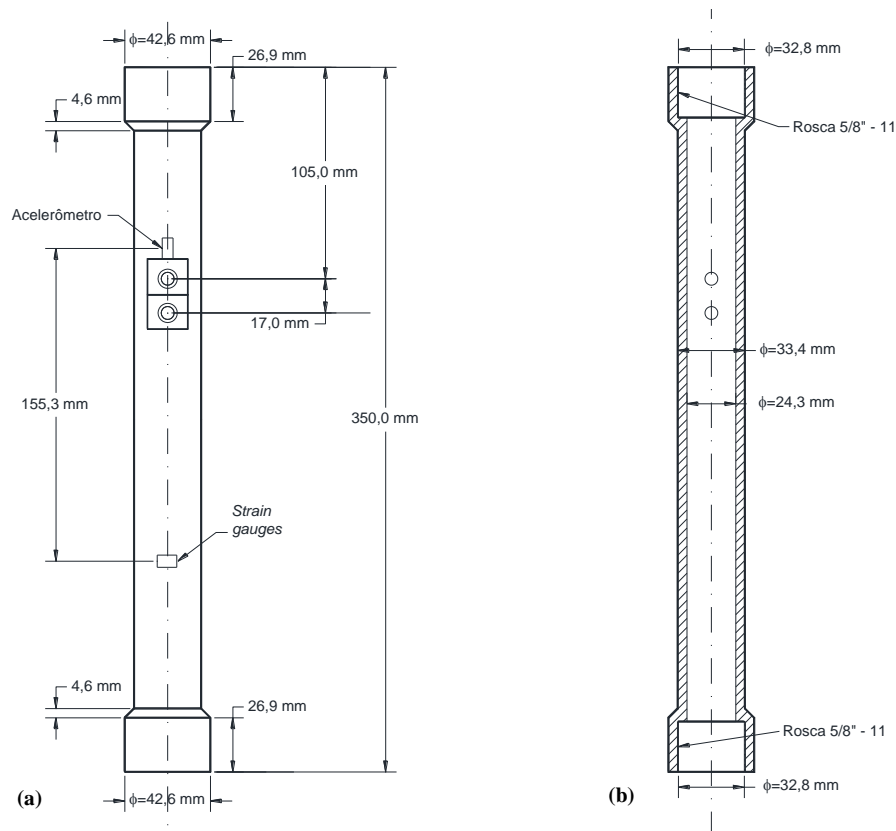


Figura 3.1: Projeto das hastes: a) Dimensões e posicionamento dos sensores; b) Dimensões internas e roscas (LUKIANCHUKI, 2012).

Desta forma, os segmentos de hastes utilizados neste trabalho foram confeccionados em aço inoxidável martensítico (VC – 150), possuindo 0,35 % de carbono e 13 % de cromo em sua composição. O aço selecionado possui limites de resistência de 640 MPa e 345 MPa para tração e escoamento, respectivamente (LUKIANCHUKI, 2012; ODEBRECHT, 2003).

Após a etapa de usinagem, os segmentos de haste receberam tratamento térmico a fim de melhorar características relacionadas à resistência, consistindo em duas etapas: têmpera, que aumenta a dureza e a fragilidade do material e; revenimento, que reduz a fragilidade do material por processo de aumento de temperatura com rápido resfriamento. A temperatura de revenimento é determinada em função do tipo de aço, existindo tabelas específicas para a escolha da temperatura (LUKIANCHUKI, 2012).

Segundo Lukiantchuki (2012), a temperatura de revenimento utilizada foi de 560°C para os dois segmentos de hastes desenvolvidos pela autora e utilizados neste trabalho. Assim, as resistências aproximadas dos segmentos de haste são: 1084 Mpa e 950 Mpa à tração e ao escoamento, respectivamente.

3.1.2 Acelerômetros e Suportes

Os valores de velocidade das partículas nos ensaios SPT realizados foram obtidos via integração dos sinais de aceleração registrados pelos acelerômetros instalados nos segmentos de hastes instrumentados (Figura 3.2).

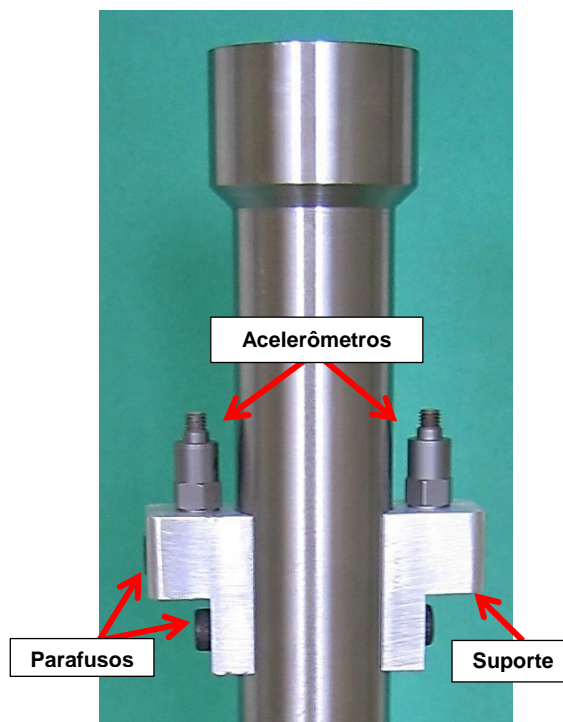


Figura 3.2: Vista frontal dos acelerômetros instalados em um dos segmentos de haste instrumentado.

Foram utilizados dois tipos de acelerômetros piezoelétricos da marca PCB Piezotronics, sendo: modelo *350B04*, com capacidade de até 5000 g ($\approx 49000 \text{ m/s}^2$), apto para trabalhar entre 0,4 a 10000 Hz de frequência; e do modelo *350M77*, com 20000 g ($\approx 196200 \text{ m/s}^2$) de capacidade, trabalhando na faixa de frequência de 1 a 15000 Hz.

Para a fixação dos acelerômetros nos segmentos de haste, foram utilizados suportes projetados por Lukiantchuki (2012). A autora desenvolveu alguns modelos de suportes e, os analisou por meio de ensaios dinâmicos de laboratório. Os modelos foram aprimorados, gradativamente, até chegar na configuração final apresentada na Figura 3.2 que, segundo Lukiantchuki (2012), atende adequadamente à situação do ensaio SPT.

3.1.3 Célula de Carga

As células de carga das hastes instrumentadas foram desenvolvidas de forma similar à proposta por Odebrecht (2003). Cada célula de carga (transdutor de força) é constituída por um circuito elétrico do tipo ponte completa de Wheastone (Figura 3.3), formado por

extensômetros duplos (longitudinal e transversal) do tipo PA-09-125TG-350-LEN, produzidos pela Excel Engenharia de Sensores Ltda.

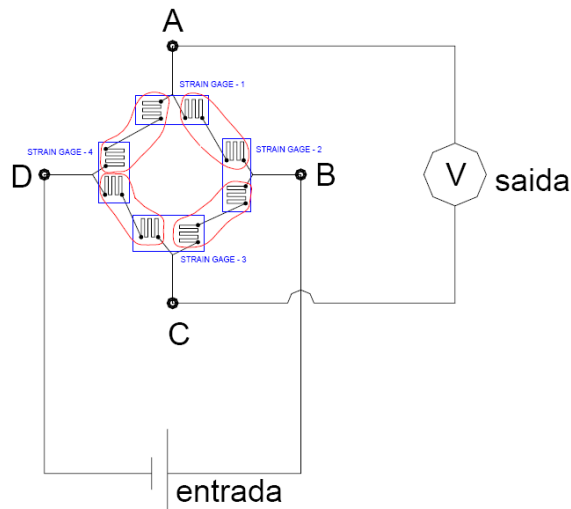


Figura 3.3: Esquema do circuito elétrico tipo ponte completa de Wheatstone (ODEBRECHT, 2003).

Os extensômetros elétricos (*strain gauges*) foram dispostos diametralmente opostos no segmento de haste, numa seção específica, que foi previamente preparada (superfície jateada), como é apresentado na Figura 3.4.

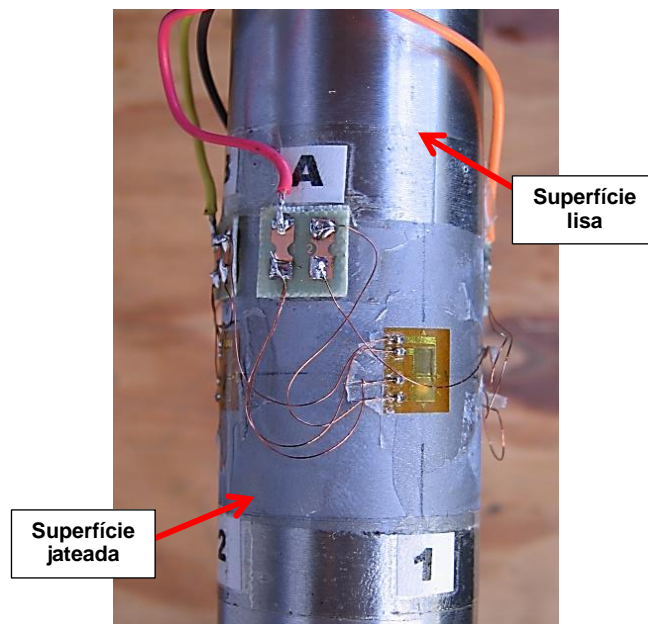


Figura 3.4: Detalhes da célula de carga.

A preparação prévia da superfície da seção onde serão dispostos os extensômetros elétricos é imprescindível para a aderência dos sensores com o material da haste (aço). Desta forma, para o tratamento das seções das hastes onde foram colados os extensômetros, optou-se pela técnica de jateamento com areia, a fim de ter uma limpeza uniforme da superfície (sem

impurezas), além de remover o polimento da superfície lisa da haste. O procedimento de colagem dos extensômetros elétricos seguiu as especificações do fornecedor.

3.1.3.1 Calibração da Célula de Carga

As células de carga dos dois segmentos de haste foram calibradas estaticamente utilizando uma prensa servo controlada, modelo *MTS 815 Rock Mechanics System* (Figura 3.5), do Laboratório de Mecânica das Rochas do Departamento de Geotecnia, na Escola de Engenharia de São Carlos. As calibrações realizadas seguiram as recomendações da ASTM 4633 (2010), sendo realizadas tanto para força como para deformação.



Figura 3.5: Calibração da célula de carga das hastes instrumentadas.

Segundo a ASTM 4633 (2010), a calibração deve ser realizada até 70% da carga máxima prevista para o ensaio dinâmico. Entretanto, neste trabalho, optou-se por realizar a calibração a partir de incrementos sucessivos de carga de 10 kN até a carga máxima de 220 kN. Para a etapa de descarga optou-se por incrementos de 20 kN, até não haver mais carga. No total, foram feitos 22 estágios de carga e 11 estágios de descarga. Os incrementos de carga/descarga foram controlados a partir do sistema de servo controle da prensa utilizada.

Para a aquisição dos sinais elétricos (mV/V) a cada incremento de carga/descarga, foi utilizado o sistema MX 410 da HBM e o software *CatmanEasy*, que permite relacionar as cargas aplicadas pela prensa com a leitura elétrica do sensor, em milivolt/volts (mV/V). Ao

final dos incrementos de carga/descarga, foram obtidas equações de calibração, as quais correlacionam as cargas aplicadas, em kN, com as respostas elétricas dos sensores, em mV/V.

A calibração de cada célula de carga foi repetida por 3 vezes, sendo verificada a repetibilidade dos resultados obtidos. Foram adotadas como equações de calibração padrão aquelas obtidas através da média das três leituras de carga (kN) *versus* voltagem (mV/V). A Figura 3.6 apresenta as calibrações encontradas para as células de carga que posteriormente foram posicionadas no topo e na base da composição de hastes, respectivamente.

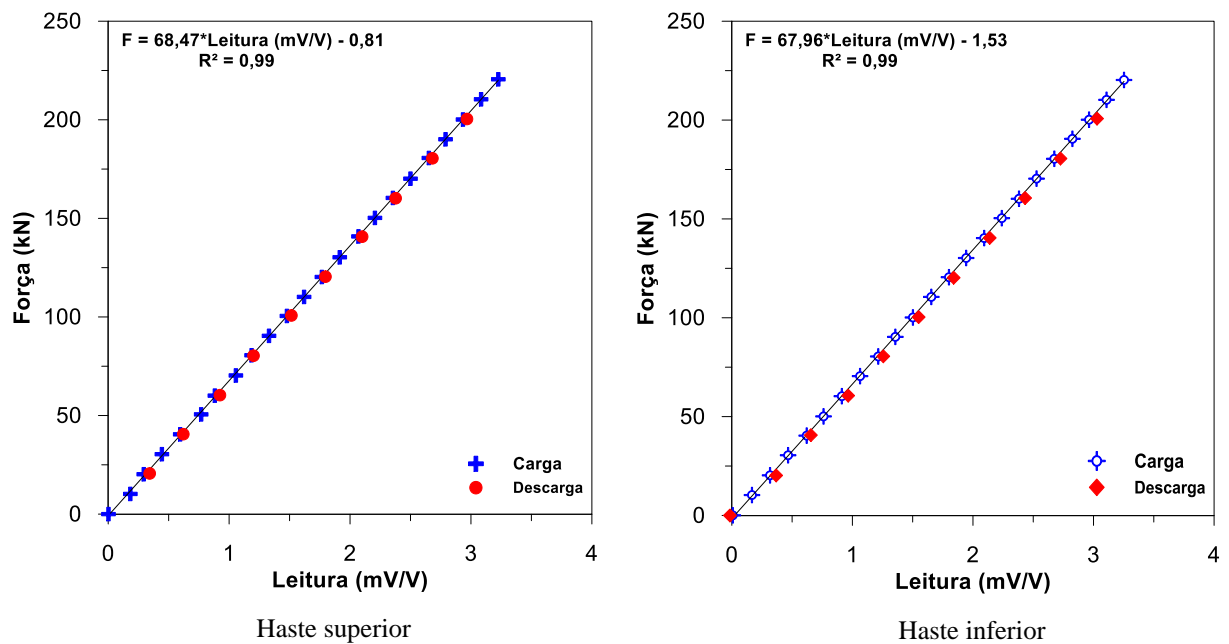


Figura 3.6: Calibração das células de carga das hastes instrumentadas.

3.1.4 Sistema de Aquisição de Dados

No ensaio SPT, o tempo médio para a dissipação da energia varia de 40 a 100 milissegundos, dependendo do comprimento da composição de hastes e das condições da camada de solo investigada (Lukiantchuki, 2012). Assim, para o estudo das energias envolvidas neste ensaio é fundamental utilizar um sistema de aquisição de dados para eventos dinâmicos, com uma taxa de aquisição suficiente para a situação do ensaio.

O sistema de aquisição de dados utilizado neste trabalho consiste em dois módulos MX-410 da marca HBM, que funcionam independentes ou acoplados (Figura 3.7). O módulo MX-410 é portátil, possui quatro canais para aquisição, e é indicado para a análise de eventos dinâmicos, pois possui taxa de aquisição de até 96 kHz por canal e resolução de 24 bits. Quando os dois módulos MX-410 estão acoplados, funcionam como um único sistema de aquisição com oito canais. A faixa de excitação do MX-410 é entre 5-24 V (DC).

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.

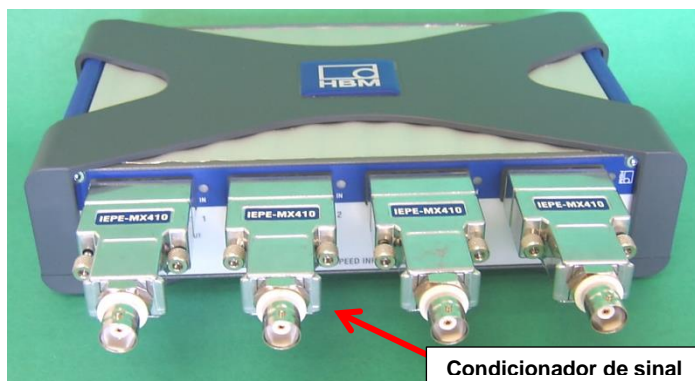


Figura 3.7: Sistema de aquisição de dados HBM, modelo MX410 (adaptado de Lukiantchuki, 2012).

Para a aquisição dos dados obtidos pelos acelerômetros, foram utilizados condicionadores de sinal do tipo IEPE (*Integral Electronic Piezoelectric*) (Figura 3.7) para amplificar os sinais adquiridos durante o ensaio. Os resultados de aceleração em m/s^2 foram obtidos a partir da constante de calibração disponibilizada pelo fabricante.

3.2 Equipamentos das Sondagens com Medida do SPT

Os ensaios SPT realizados neste trabalho foram executados utilizando os equipamentos recomendados pela norma NBR 6484 (ABNT, 2001), ou seja, com equipamento convencional e acionamento manual do martelo (Figura 3.8). Como já mencionado no item 2.1.2 deste trabalho, esta norma especifica tanto os equipamentos como os procedimentos a serem seguidos nas sondagens à percussão SPT. Todos os equipamentos foram aferidos e mostraram-se de acordo com a NBR 6484 (ABNT, 2001).

As especificações dos equipamentos utilizados neste trabalho são:

- Torre de sondagem completa ou tripé;
- Trado concha e trado helicoidal (mecanizado) para escavação do furo;
- Composição de hastes para perfuração, formada por hastes de aço com diâmetro externo igual a 33,4 mm, diâmetro interno de 24,3 mm, massa teórica de 3,23 kg/m e comprimentos de 1 e 2 m;
- Metro de balcão com resolução de 1mm;
- Cabeça de bater com 90 mm de altura, diâmetro de 87.5 mm e massa de 3.3 g;

- Amostrador tipo Raymond bipartido, com comprimento de 609,6 mm, diâmetro externo de 50,8 mm e interno de 34,9 mm;
- Martelo maciço com formato cilíndrico, 65 kg de massa, com haste guia de 1,20 m e coxim de madeira;
- Luvas para conexão entre as hastes;
- Corda sintética, em bom estado de conservação (nova), para erguer o martelo.



Figura 3.8: Equipamento utilizados nos ensaios de campo.

Neste trabalho, foram utilizadas também luvas bipartidas de aço para conexão entre as hastes (Figura 3.9). Nas extremidades desse tipo de luva, existe o mesmo tipo de rosca das hastes do ensaio SPT, permitindo que sejam previamente instaladas nos segmentos de hastes do ensaio. À cerca de 1/3 da altura da luva, há o sistema de rosca cônica, que permite a separação da luva em duas partes, assim como a posterior conexão.

Em relação às luvas que geralmente são utilizadas nos ensaios SPT, a luva bipartida apresenta maior comprimento e massa, além da seção transversal variável devido ao sistema de rosca cônica.



Figura 3.9: Luva bipartida, utilizada nos ensaios de campo: (a) Comparação entre os dois tipos de luvas e, (b) Sistema de rosca cônica.

3.2.1 Equipamentos dos Ensaios SPT-T

Para os ensaios SPT-T realizados neste trabalho, foram utilizados torquímetros analógicos da marca Gedore, com capacidades máximas e mínimas de: 6-17 kgf.m (modelo R200), 10-48 kgf.m (modelo R350) e 17-83 kgf.m (modelo R600) (Figura 3.10).



Figura 3.10: Torquímetro da marca Gedore, modelo R600.

Deve ser dada atenção especial à capacidade dos torquímetros antes da sua utilização, a fim de não exceder sua capacidade máxima e evitar danos ao equipamento (Peixoto, 2001). Todos os torquímetros utilizados nesta pesquisa foram adequadamente calibrados antes da utilização nos ensaios de campo.

Além dos torquímetros analógicos, também foram utilizadas as seguintes ferramentas:

- Pino adaptador para acoplamento entre os torquímetros e a cabeça de bater;
- Cabeça de Bater com furo central de forma quadrada, para o encaixe do pino adaptador usados nos torquímetro;
- Disco centralizador.

3.3 Adaptações no Equipamento para Medida de Energia

Lukiantchuki (2012) relata que para realizar as medidas de energia na base da composição de hastes (topo do amostrador) foi necessário projetar uma peça sextavada para conexão com o amostrador (Figura 3.11), devido à geometria da haste instrumentada. Entretanto, a autora relata que essa peça possui uma impedância mecânica cerca de 5 vezes maior que a impedância das hastes da composição, provocando reflexões de ondas de compressão durante a passagem da onda longitudinal de tensão devido ao golpe do martelo.

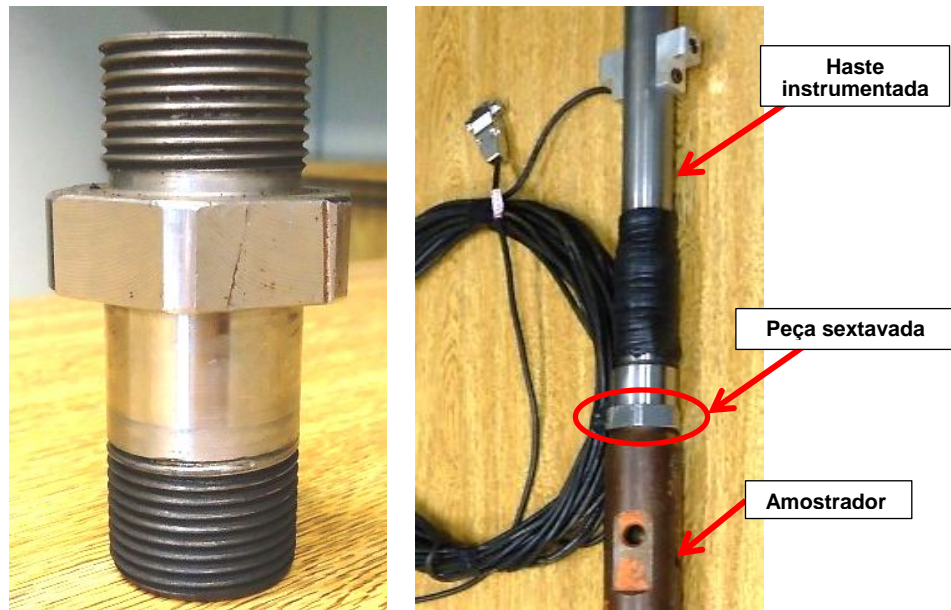


Figura 3.11: Peça sextavada maciça para conexão da haste instrumentada inferior com o amostrador.

A presença da peça maciça sextavada na base da composição de hastes ocasiona reflexão de ondas de compressão nos sinais registrados. Com o objetivo de aprimorar o equipamento, foi feita uma alteração na extremidade inferior do segmento de haste instrumentada que seria instalada no topo do amostrador (haste inferior).

De acordo com a Figura 3.1 (item 3.1.1), existem roscas internas nas extremidades dos segmentos de hastes, visando à possibilidade de posicioná-los em qualquer local ao longo da composição de hastes do ensaio SPT. Assim, para dispensar a utilização da peça sextavada na haste inferior, foi confeccionada uma rosca externa na extremidade da haste instrumentada inferior. Com esta mudança, a conexão entre esta haste instrumentada passa a ser diretamente com o amostrador, não sendo mais necessário o uso da peça sextavada ou de outras adaptações. A Figura 3.12 apresenta a nova configuração da haste instrumentada inferior, após a alteração do tipo de rosca na sua extremidade.

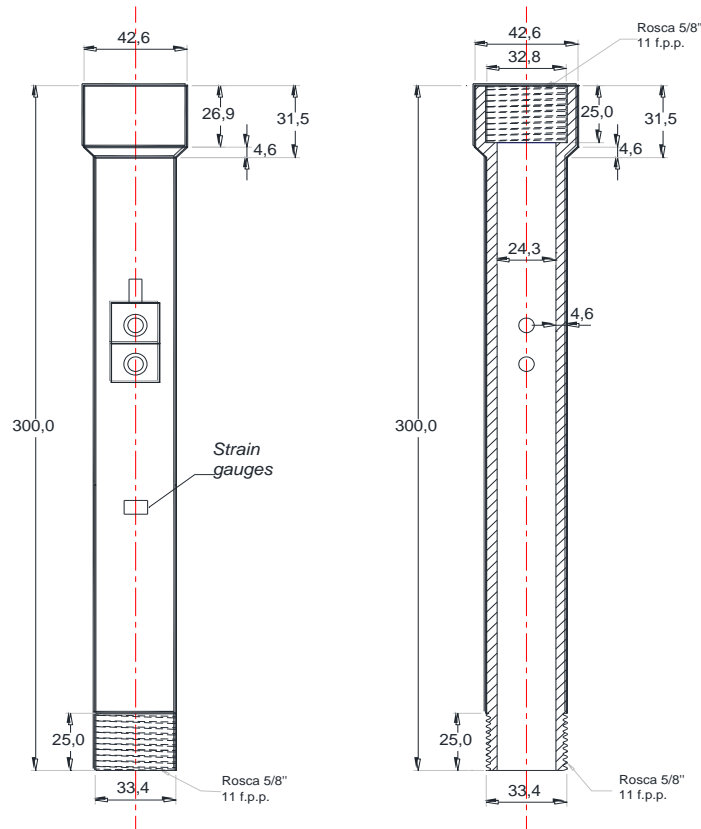


Figura 3.12: Alteração realizada na haste instrumentada inferior (dimensões em mm).

3.3.1 Proteção Mecânica e Impermeabilização da Instrumentação

O posicionamento dos sensores no interior do furo de sondagem exige maiores cuidados quando comparado com o posicionamento no topo do conjunto de hastes, devido à possibilidade de nível freático e de impacto com a lateral do furo de sondagem. Assim, neste trabalho, foi concedida atenção especial à preservação do equipamento para medidas de energia, com a proteção mecânica e impermeabilização da haste instrumentada instalada no topo do amostrador.

A impermeabilização dos acelerômetros e da célula de carga consiste basicamente na vedação de aberturas ao longo da haste instrumentada inferior com materiais impermeáveis. Os materiais utilizados possuem a capacidade de penetrar em pequenos orifícios, suportar grandes pressões, são impermeáveis e evitam o contato direto com o sensor e a água. Os materiais utilizados foram:

- Adesivo de silicone;
- Adesivo para juntas de motores à diesel;
- Fita elétrica de alta tensão (fita auto-fusão);
- Fita isolante líquida e;
- Fita isolante.

A Figura 3.13 apresenta etapas da impermeabilização da haste instrumentada inferior. Antes do início da impermeabilização, todas as superfícies foram limpas e os eventuais resíduos existentes removidos (poeira, solo, graxa, etc.). Atenção especial foi dada às aberturas existentes entre a superfície da haste com os cabos da célula de carga e dos acelerômetros, pois poderiam ser caminhos preferenciais para a entrada de água e solo. Esses espaços foram devidamente vedados.



Figura 3.13: Impermeabilização das aberturas e dos cabos dos sensores.

Após a etapa de impermeabilização, procedeu-se à proteção mecânica dos sensores. Para tanto, foi utilizada uma membrana impermeável de látex na região dos acelerômetros e, em seguida, foi envolvida por uma espessa camada de silicone (Figura 3.14). A célula de carga, recebeu uma camada de fita auto-fusão e também a camada de adesivo de silicone, a fim de proteger o circuito e os respectivos cabos (Figura 3.14).



Figura 3.14: Proteção mecânica dos sensores instalados na haste instrumentadas.

3.4 Processamento dos Dados e Cálculo das Energias

Nos ensaios SPT deste trabalho, são registrados simultaneamente, para cada golpe do martelo, sinais de força e de aceleração devido à propagação da onda longitudinal de tensão na composição de hastes do ensaio. Assim, a cada golpe são obtidos três sinais, sendo um de força e dois de aceleração, para as seções situadas no topo e na base da composição de hastes.

Após término da aquisição dos sinais de cada golpe, os dados de força e aceleração obtidos são imediatamente 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 a partir software *CatmanEasy*.

Os resultados armazenados são visualizados no módulo de análises do *CatmanEasy*. Neste módulo é possível identificar a real duração do golpe, visto que, por causa da alta taxa de aquisição de dados (96 kHz ou 100.000 amostras por segundo) sempre são armazenados sinais que não fazem parte do golpe. Estes sinais desprezados são desnecessários aos cálculos da energia e aumentam significativamente o tamanho do arquivo de dados. A Figura 3.15 apresenta um exemplo de um sinal de força obtido em um ensaio SPT, destacando o corte feito referente ao intervalo de interesse (golpe).

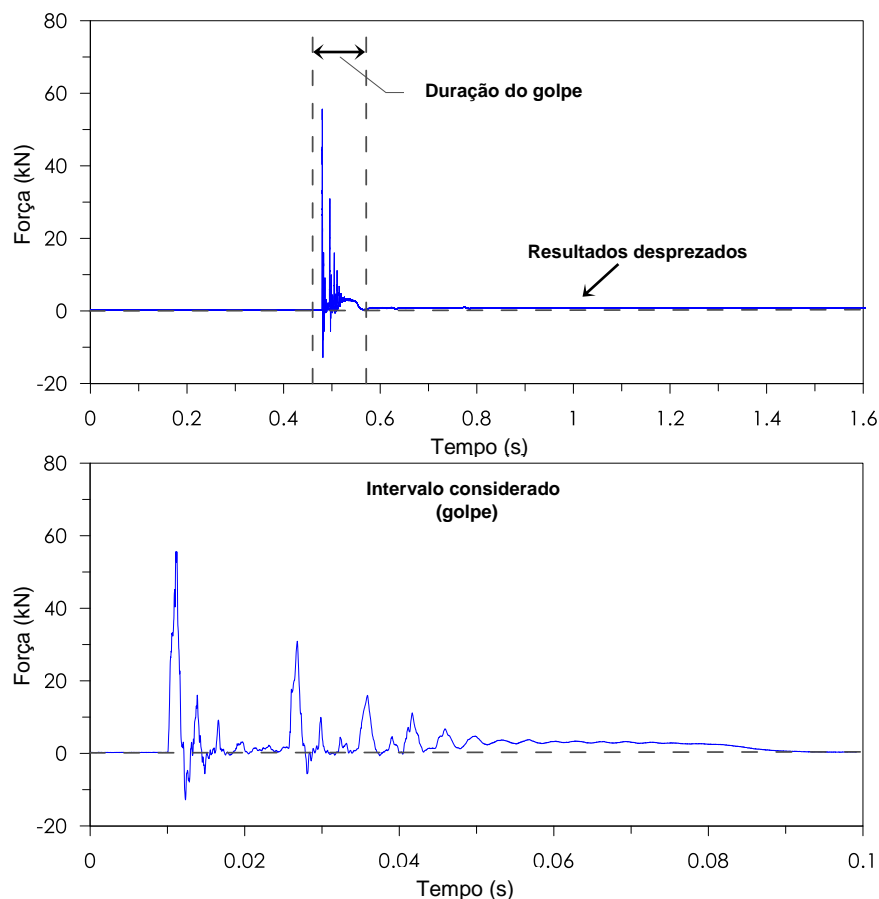


Figura 3.15: Aquisição total dos dados e o intervalo considerado para os cálculos (golpe).

Já nesta etapa de visualização do sinal e corte do intervalo de interesse, é possível detectar a ocorrência de possíveis problemas na instrumentação, em especial os acelerômetros. Como exemplo, pode ser citado o caso em que os valores dos sinais medidos nos dois acelerômetros são muito discrepantes. Nestes casos, o acelerômetro com problema foi desprezado.

Ainda na etapa de processamento dos dados, deve ser corrigida a *baseline* (linha base) dos sinais, de modo que os sinais referentes à situação de repouso sejam nulos (não há mais propagação de onda) (HOWIE et al., 2003). Como exemplo, pode ser idealizado que a velocidade seja aproximadamente nula (repouso) no final da propagação da onda de tensão, assim a correção da *baseline* deve satisfazer a esta condição.

Após a seleção do intervalo do golpe, o *CatmanEasy* permite que os dados de força e aceleração sejam exportados em arquivos no formato ASCII, que são compatíveis com os softwares *Microsoft Office Excel*, *Grapher* (versão 9.0), e com o ambiente de programação científica *Matlab®* da *Mathworks®*.

De posse dos arquivos dos dados tratados, as etapas posteriores consistem na verificação da qualidade dos sinais e no cálculo da energia. Para facilitar e dinamizar essas etapas, foi implementada uma rotina de cálculo no *Matlab®*, que será descrita adiante.

3.4.1 Verificação da Qualidade dos Sinais

A verificação da qualidade dos sinais armazenados é essencial para as análises dos dados dos ensaios dinâmicos. Para esta verificação, são necessários os sinais de força e os valores de velocidade das partículas (v).

As velocidades (v) são determinadas a partir da integração dos sinais de aceleração ($a(t)$) obtidos durante a propagação da onda ao longo da composição de hastes. A integração foi feita a partir da regra dos trapézios ou regra de Simpson (Equação 3.1). O intervalo de tempo adotado (Δt) nos cálculos foi o inverso da taxa de aquisição de dados utilizada nos ensaios realizados ($\Delta t = 1/96000$ s).

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

Onde,

v_i – velocidade (m/s);

a_i – aceleração num determinado instante t_i (m/s²);

n – número total de intervalos de tempo.

De posse da velocidade (v), a verificação da qualidade dos sinais é feita a partir da semelhança entre os sinais de força (F) com o produto velocidade (v) *versus* impedância das hastes (Z). Assume-se que os sinais são de boa qualidade, quando há concordância entre os valores vZ e F até o intervalo de tempo $2l/c$. A Figura 3.16 apresenta graficamente a comparação entre F e vZ , destacando a equivalência existente até o instante $2l/c$.

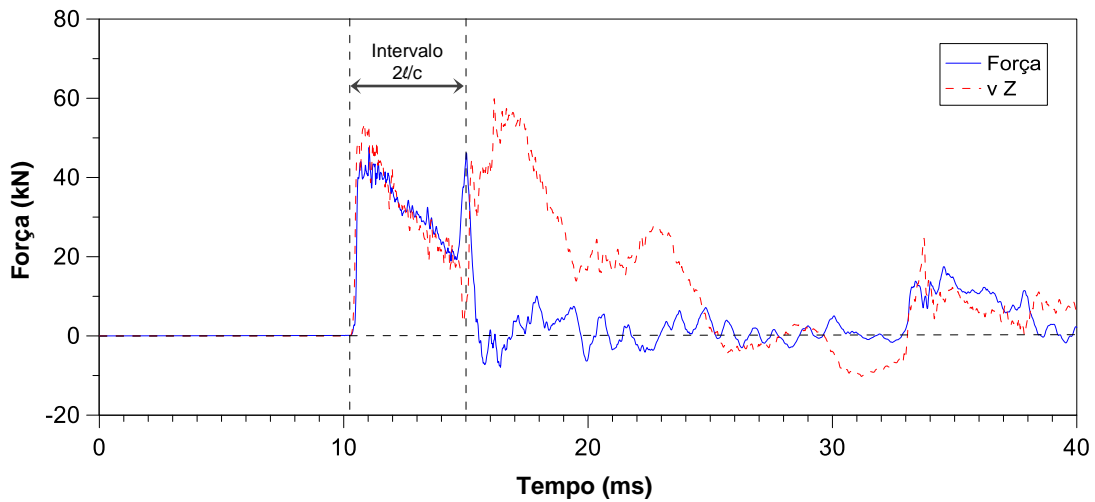


Figura 3.16: Verificação da qualidade dos sinais de um golpe do ensaio SPT – equivalência entre F e vZ até o instante $2l/c$.

Uma segunda forma de verificação consiste na comparação entre a penetração permanente do amostrador ($\Delta\rho$) por golpe, que é medida em campo, com a penetração calculada a partir da integração da velocidade ($v(t)$), ou seja, a partir da dupla integração da aceleração ($a(t)$).

Esta segunda verificação segue o mesmo procedimento de cálculo da primeira, ou seja, integração dupla de $a(t)$ segundo a regra de Sympson, obtendo-se o deslocamento do amostrador (Equação 3.2). Na integração, admite-se que no início do evento o deslocamento é nulo. Assume-se que os sinais são de qualidade quando o deslocamento calculado é similar à penetração medida no campo ($\Delta\rho$).

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

Onde,

ρ_i – deslocamento (m);

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

As duas verificações da qualidade dos sinais foram efetuadas, tanto para o topo como para a base da composição de hastes, nos ensaios realizados neste trabalho.

3.4.2 Cálculo da Energia

Após a verificação da qualidade dos sinais e, uma vez calculada a velocidade ($v(t)$) e com o registro de força ($F(t)$) ao longo do tempo do evento, procede-se ao cálculo da energia (E) com base no método *EFV* (item 2.4.2), a partir da integração do produto destes sinais a partir da regra de Simpson (Equação 3.3 e 3.4).

$$E = \int_{t_1=0}^{t_2=\infty} F(t) \times v(t) dt \quad (3.3)$$

$$E_i = \sum_{i=1}^n \frac{(F_{(i-1)} \times v_{(i-1)} + F_i \times v_i)}{2} \times (t_i - t_{i-1}) \quad (3.4)$$

Onde,

E_i – Energia no instante t_i (J);

F_i – Força no instante t_i (kN).

Para tanto, é assumido que o instante inicial da integração (t_1) corresponde ao início do evento, ou seja, quando a força normal deixa de ser nula. O instante final da integração (t_2) é quando a força normal volta a ser nula, a velocidade é aproximadamente igual a zero e não são observados impactos subsequentes.

Para os sinais correspondentes à base da composição de hastes, a energia máxima alcançada E_i (Figura 3.17) 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.

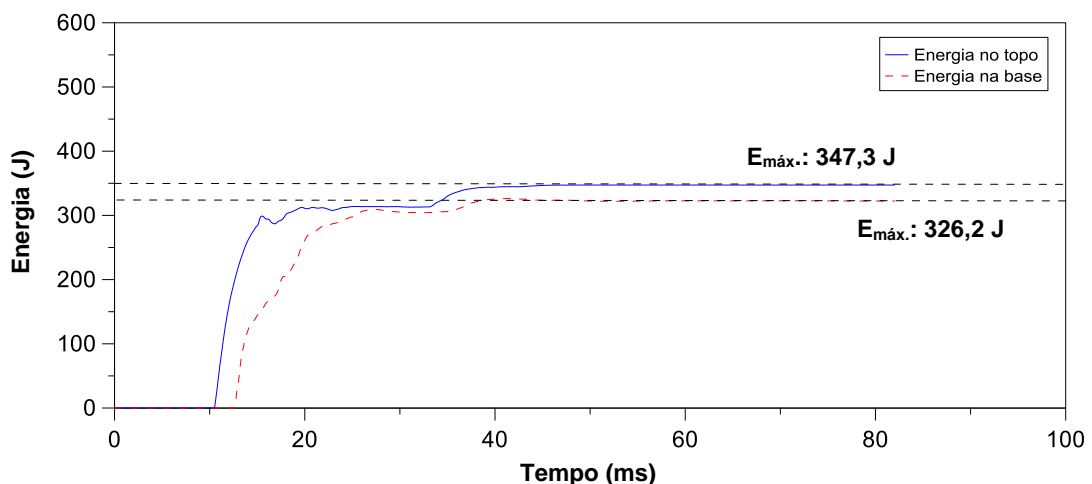


Figura 3.17: Resultados de energia para um dos golpes dos ensaios SPT – equipamento convencional, 10 m de profundidade, 5º golpe.

3.4.3 Rotina para o Cálculo da Energia no Software Matlab®

Normalmente, as etapas de descritas nos itens 3.4.1 e 3.4.2, são realizadas em planilhas de cálculo no *Microsoft Office Excel* e a visualização gráfica dos resultados é realizada em outro programa, a exemplo do *Grapher (versão 9.0)*.

Assim, o uso de planilhas de cálculo para a interpretação dos sinais obtidos nos ensaios SPT, é uma metodologia que demanda certo tempo e atenção do usuário, visto que os dados são diversas vezes exportados devido ao uso de mais de um programa para a análise, tornando essa ferramenta não produtiva.

Neste contexto, com o objetivo de otimizar as etapas de cálculo da energia, foi implementada uma rotina de cálculo no software Matlab®. Assim, no algoritmo implementado são realizadas as etapas de verificação da qualidade dos sinais, cálculo da energia e visualização gráfica dos resultados. Ao final dos cálculos, os resultados são apresentados ao usuário na janela de comando do programa e disponibilizados automaticamente em planilhas eletrônicas geradas após o processamento.

A entrada do programa são os arquivos .ASCII previamente processados no *CatmanEasy* (arquivos cortados relativos ao golpe), o comprimento da composição de hastes (L) e a penetração do amostrador no respectivo golpe (ρ). No arquivo de entrada .ASCII, foi estabelecida uma ordem para a disposição dos dados do golpe (força e aceleração), segundo a ordem que o programa implementado identifica os dados, sendo: Força, Acelerômetro 1 e Acelerômetro 2, respectivamente. A Figura 3.18 apresenta o algoritmo implementado para o cálculo das energias envolvidas no ensaio SPT. No Apêndice A é apresentado o programa desenvolvido.

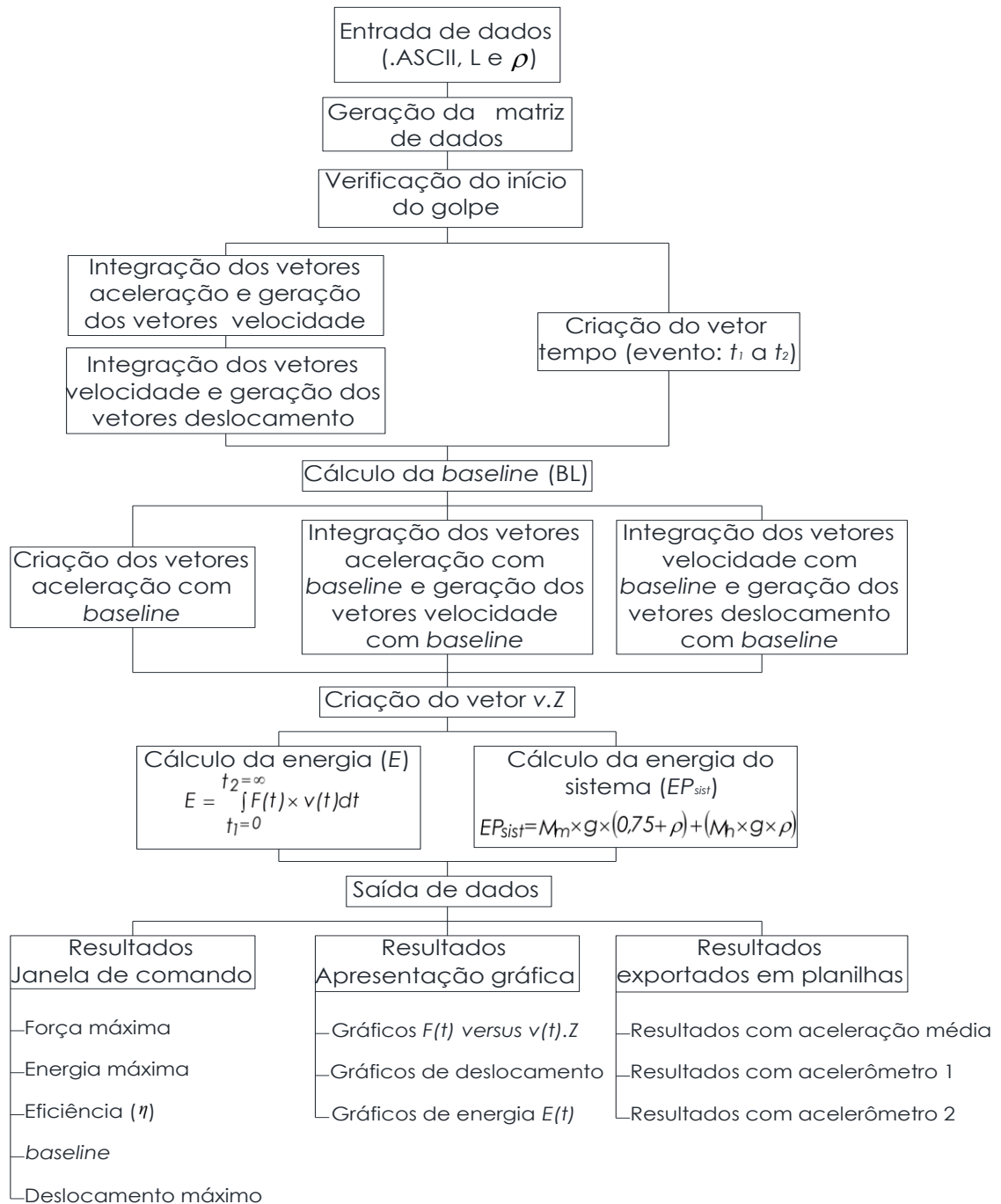


Figura 3.18: Algoritmo da rotina desenvolvida para o cálculo da energia no ensaio SPT.

3.5 Determinação da Força de Reação Dinâmica do solo (R_D)

O principal resultado do ensaio SPT, o índice N_{SPT} , não corresponde a real resistência do solo, apenas fornece uma estimativa. Neste trabalho, para a determinação da reação dinâmica (R_D) das camadas de solo investigadas, admitiu-se a condição de uma haste com extremidade semi-engastada, como já abordado no item 2.2.4.1.3 (Equação 2.44).

A resistência dinâmica do solo varia ao longo da superfície interna e externa do amostrador a cada acréscimo de penetração. Entretanto, é razoável adotar a simplificação proposta por Lukiantchuki (2012), na qual R_D pode ser assumida como a média das forças resultantes que atuam durante a penetração do amostrador no solo.

A Figura 3.19 apresenta um registro típico do ensaio SPT, correspondendo à instrumentação posicionada logo acima do amostrador. Ainda nesta figura, é possível observar que a penetração do amostrador inicia após o pico de força inicial. De acordo com Lukiantchuki (2012), este pico de força representa a quantidade de força necessária para retirar o amostrador do repouso (inércia). Quando ocorrerem impactos subsequentes, a penetração do amostrador reinicia atingindo o valor máximo e o evento se encerra.

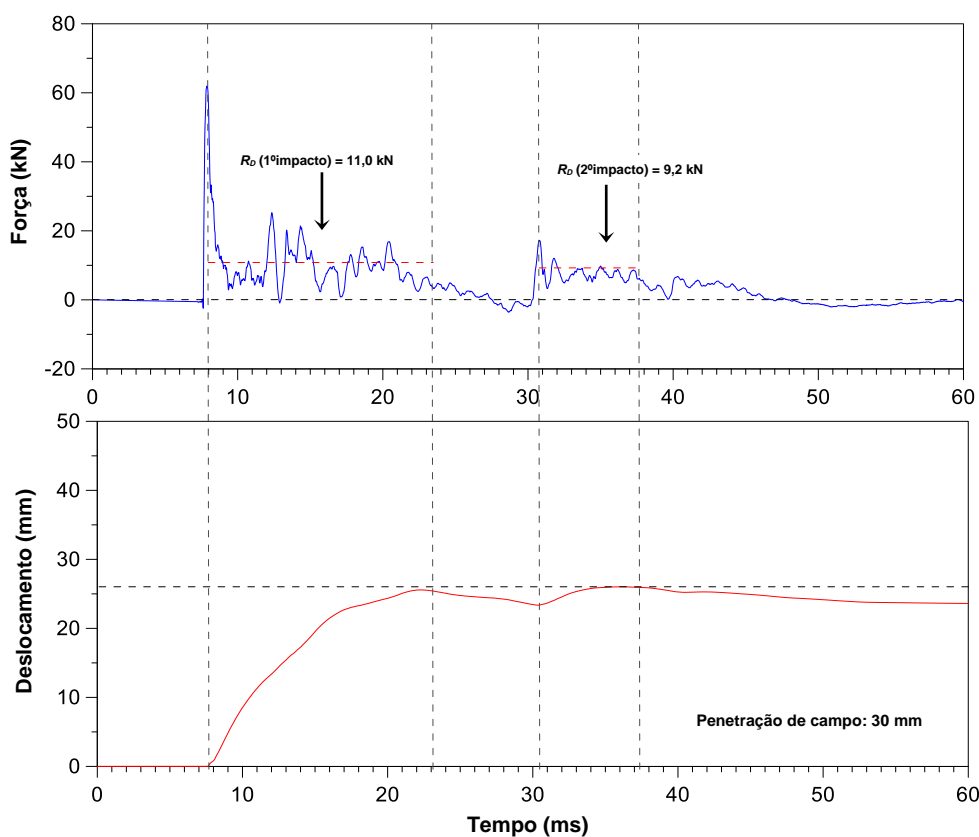


Figura 3.19: Resultado típico de R_D de um golpe do ensaio SPT, para a instrumentação acima do amostrador (Profundidade 10 m, 5º golpe)

Assim, para o golpe apresentado na Figura 3.19, a resistência dinâmica média, correspondendo ao primeiro (11,0 kN) e ao segundo impacto (9,2 kN), foi de 10,1 kN.

Adotando os critérios estabelecidos por Lukiantchuki (2012) para o cálculo das reações dinâmicas do solo no ensaio SPT, foram determinados os valores médios de resistência a cada golpe do martelo e em seguida, obtidas as resistências médias correspondentes aos 0,15 m de

cravação do amostrador (N_{SPT}). Assim, a resistência dinâmica (R_D) na profundidade relativa à cada ensaio SPT, foi determinada segundo a Equação 3.5.

$$R_D = \frac{\sum R_{D,i}}{N} \quad (3.5)$$

Onde,

$\sum R_{D,i}$ – Somatório de R_D dos golpes compreendidos nos 0,15 m finais de cravação do amostrador no solo;

N – Número de golpes referentes aos 0,15 m de cravação.

4. Campanha Experimental

4.1 Campo Experimental da FEAGRI - UNICAMP

O local onde foram realizados os ensaios SPT com medida de energia, foi o Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), em Campinas, São Paulo. A escolha deste local para a realização dos estudos foi baseada principalmente nos seguintes fatores:

- Na ampla base de dados geotécnicos da área, devido ao grande número de trabalhos já desenvolvidos na área experimental, incluindo provas de carga instrumentadas em estacas, assim como ensaios de campo;
- A possibilidade de alcançar camadas em profundidades superiores a 12 m, devido à geologia da área;
- Viabilidade financeira.

4.1.1 Aspectos Geológicos

O subsolo da região é formado por Migmatitos básicos, ocorrendo rochas intrusivas básicas da Formação Serra Geral, pertencente ao Grupo São Bento. A litologia predominante é o Diabásio. Os perfis geológicos demonstram a ocorrência dos Migmatitos Básicos, que afloram em três áreas da cidade de Campinas, perfazendo cerca de 98 km² e ocupando 14% da área total da folha de Campinas (GIACHETI, 1991; GIACHETI, 2001; CAVALCANTE et al., 2006).

De acordo com Giacheti (2001), nos afloramentos existentes, é possível observar que os Diabásios são bastante fraturados, formando blocos pequenos e que as fraturas geralmente estão abertas ou preenchidas com materiais argilosos.

Com relação ao perfil geotécnico, a área é constituída por duas camadas de solo bastante distintas, sendo: até a profundidade de 6 m, existe uma argila areno-siltosa, porosa, de comportamento laterítico e colapsível; seguido de zona de transição com eventual presença de crostas lateríticas e, em seguida, por uma camada de silte argiloso (solo residual maduro de Diabásio) de comportamento não laterítico, até aproximadamente 20 m de profundidade (Giacheti, 2001). Em profundidades maiores, ocorrem solos residuais jovens, com ocorrência

comum de núcleos de rocha menos alterada em meio ao solo residual. O nível d'água é encontrado à aproximadamente 18 m de profundidade.

4.1.2 Caracterização Geotécnica

O Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações da FEAGRI situa-se dentro do campus da UNICAMP, na Faculdade de Engenharia Agrícola, mais especificamente, ao lado do Laboratório de Materiais desta faculdade. Esta área é destinada exclusivamente à realização de pesquisas relacionadas à geotecnia. Assim, desde sua criação em 1989, já foram realizados várias pesquisas para a avaliação dos solos desta área, bem como para análises do seu comportamento perante os diversos tipos de estruturas de fundações.

Dentre os ensaios de laboratório realizados na área, podem ser citados: granulometria conjunta, limites de Atterberg, massa específica dos grãos do solo, resistência, compressão edométrica, ensaios de colapso, compactação, determinação da curva característica de retenção de água (sucção), assim como, ensaios para caracterização química e mineralógica. A Figura 4.1 apresenta alguns dos resultados da caracterização geotécnica da área.

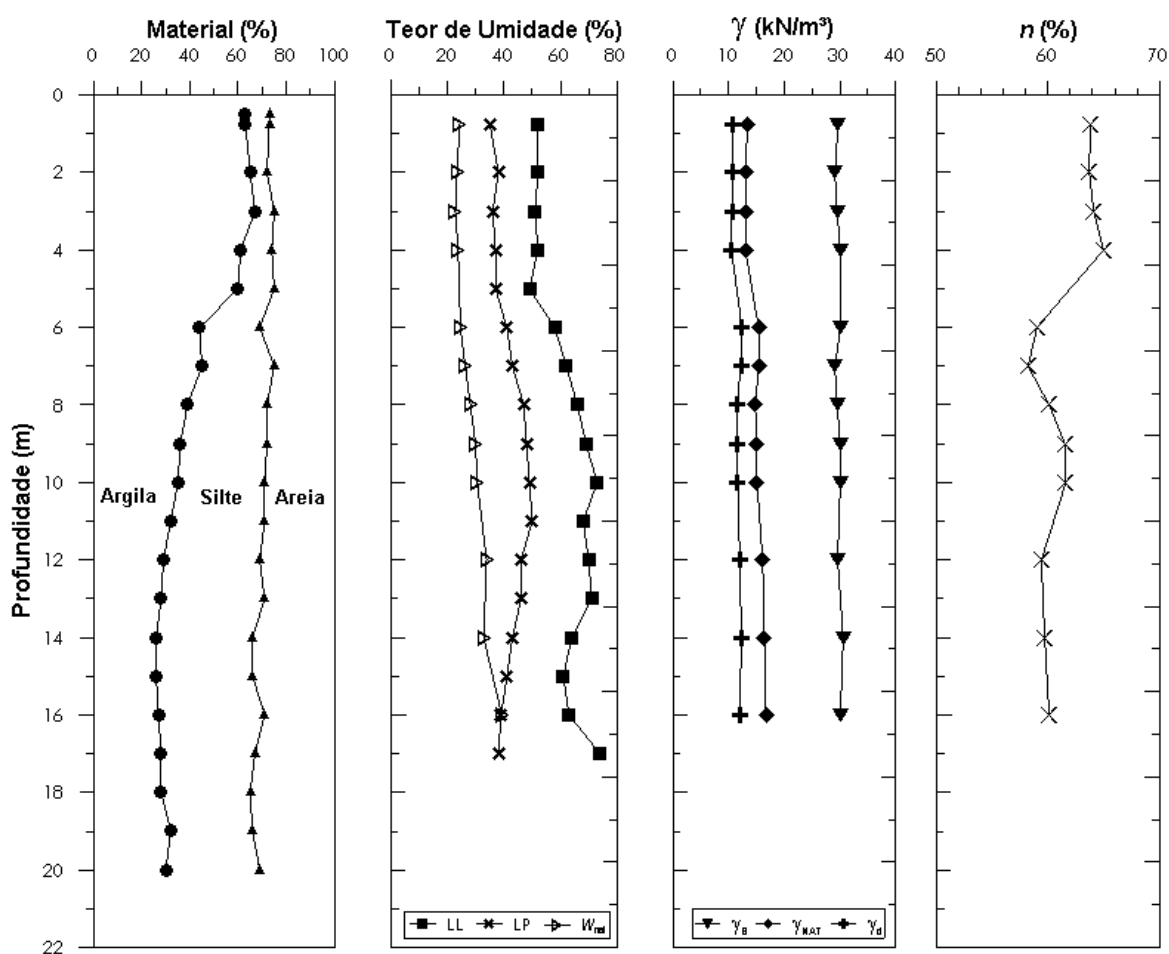


Figura 4.1: Resultados de ensaios de laboratório – campo experimental da FEAGRI (adaptado de Peixoto, 2001).

Com relação aos ensaios de campo, podem ser citados: sondagens de simples reconhecimento do solo com medida do SPT (*Standard Penetration Test*), SPT-T, CPT (*Cone Penetration Test*), DMT (Dilatômetro de Marchetti), PMT (Pressiômetro de Ménard), sondagem elétrica vertical e, ensaios sísmicos (cross-hole, SCPT e S-SPT) (Figura 4.2).

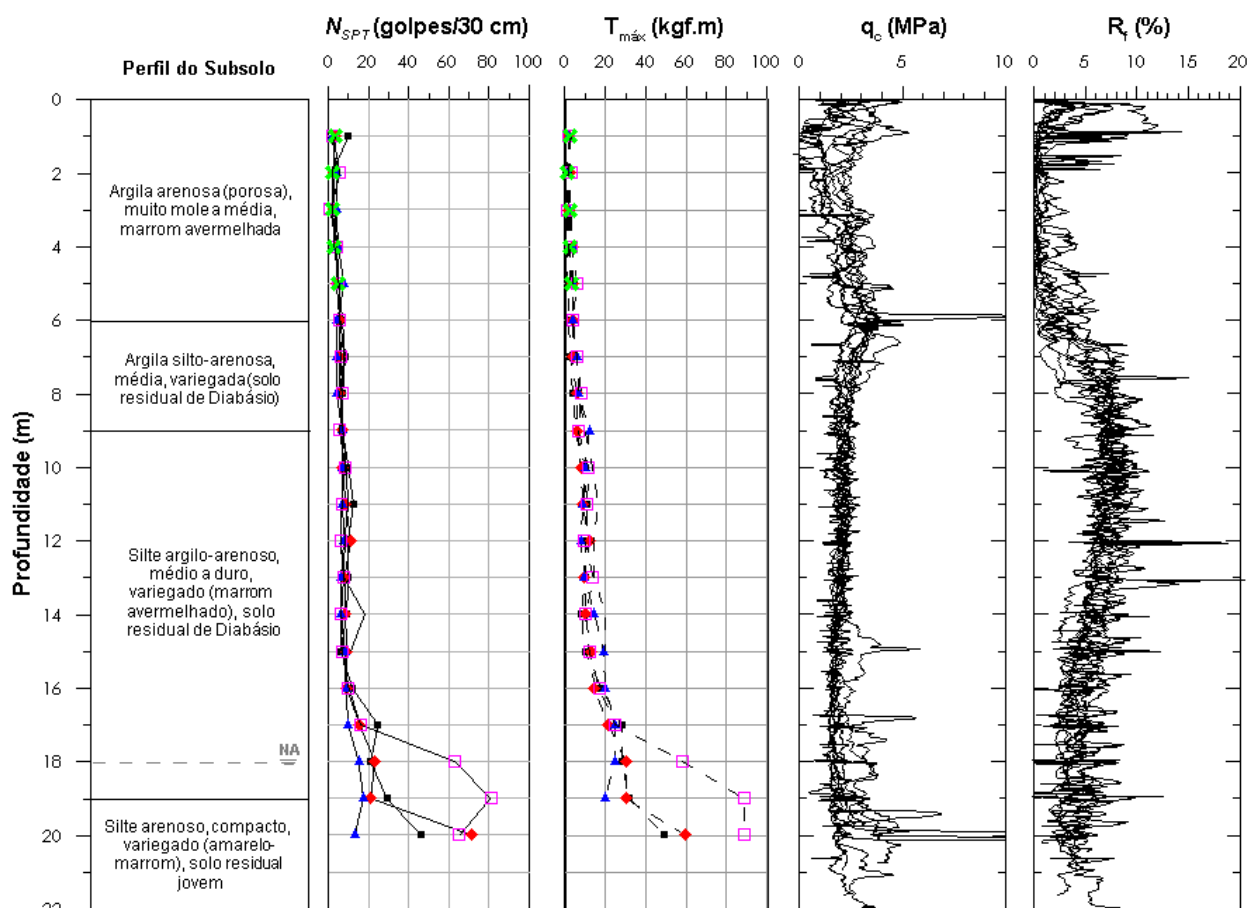


Figura 4.2: Resultados de ensaios de campo (6 SPT, 6 SPT-T e 9 SCPT) – campo experimental da FEAGRI (adaptado de Peixoto, 2001; Gianchetti e De Mio, 2008; Giacheti, Peixoto e Marques, 2003).

A partir dos resultados dos ensaios CPT da Figura 4.2, (Gianchetti e De Mio, 2008; Giacheti, Peixoto e Marques, 2003), é possível observar que até 9 m de profundidade há uma grande dispersão dos resultados de resistência de ponta (q_c), indicando a grande variabilidade das camadas de solo investigadas.

4.2 Ensaios de Campo

Como já mencionado no item 3.2, os ensaios SPT foram realizados segundo a NBR 6484 (ABNT, 2001), utilizando o equipamento de sondagem tradicional, com acionamento manual. No total, foram realizadas três sondagens de simples reconhecimento com medida do SPT (SP01 a SP03), todas executadas até 20 m de profundidade. Entretanto, as medidas de energia

no topo e na base da composição de hastes foram realizadas apenas nas sondagens SP02 e SP03, utilizando duas configurações de luvas para conexão entre as hastes: luvas bipartidas e luvas convencionais, respectivamente (ver item 3.2). O ensaio SP01, foi realizado com medida de energia apenas no topo da composição de hastes e com medida do torque após a cravação do amostrador (ensaio SPT-T), entre os dias 01 a 03 do mês de outubro de 2013. Os ensaios SP02 e SP03 foram realizados entre os dias 26 a 30 de novembro de 2013.

Os ensaios SPT foram realizados com espaçamento de 1 m entre os pontos investigados, de modo a minimizar a variabilidade das camadas de solo (Figura 4.3). A seguir, são detalhadas as etapas seguidas em campo para a realização dos ensaios.

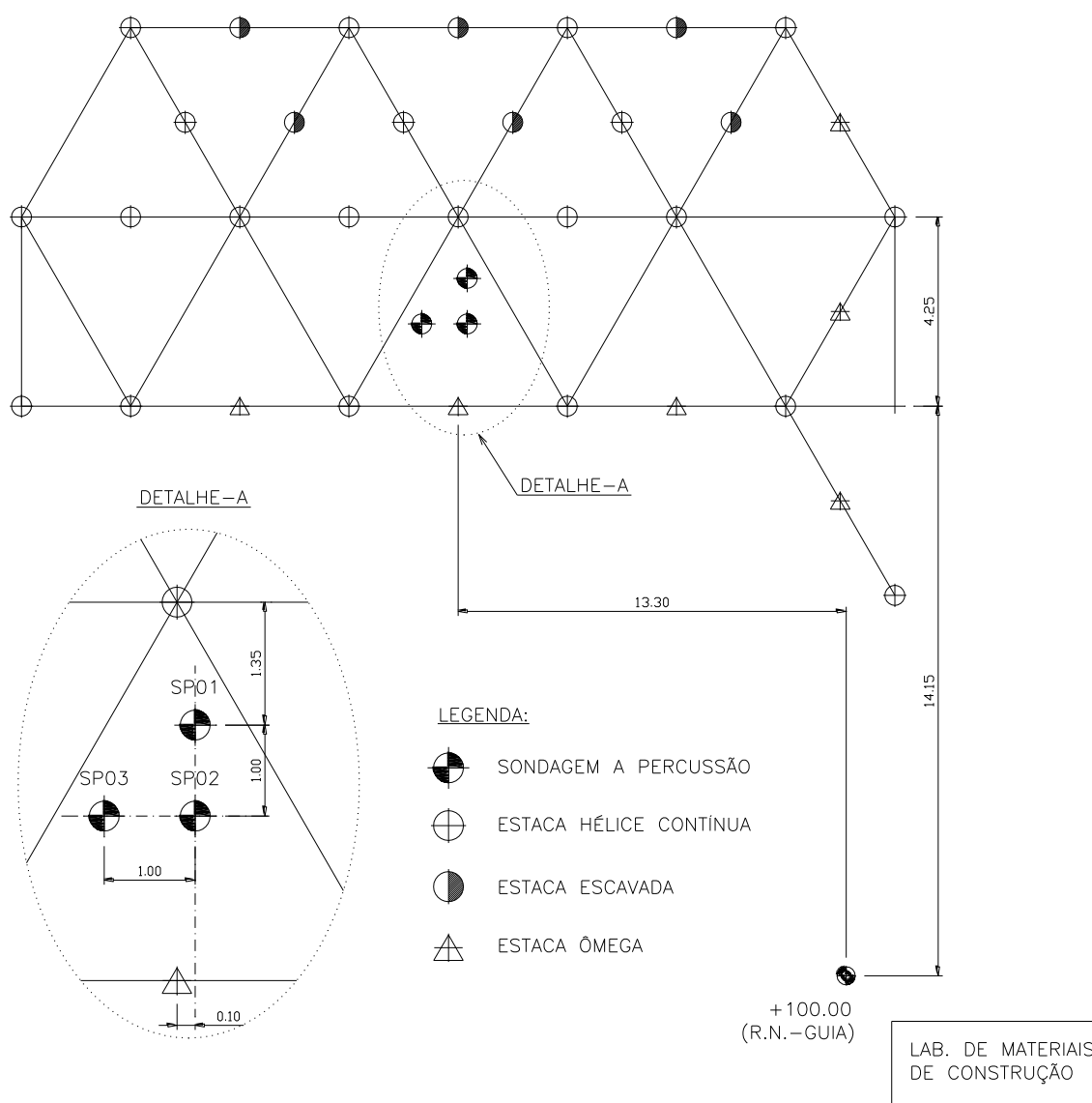


Figura 4.3: Locação dos ensaios no campo experimental da FEAGRI/UNICAMP.

Neste trabalho, adotou-se como procedimento usual realizar medidas de energia no topo e na base da composição de hastes, a fim de determinar as perdas de energia ao longo da

composição e quantificar a energia que é efetivamente responsável pela cravação do amostrador no solo, segundo a proposta de Aoki e Cintra (2000a).

Os segmentos de haste instrumentados foram protegidos mecanicamente e além desta proteção, a haste inferior foi impermeabilizada. A Figura 4.4 apresenta a disposição dos segmentos de haste nos ensaios de campo realizados.

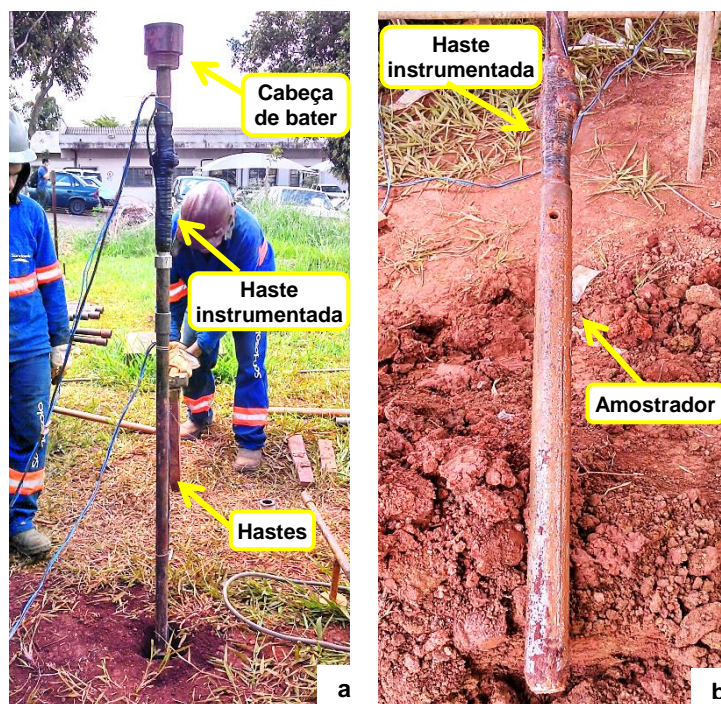


Figura 4.4: Posicionamento das hastes instrumentadas: a) superior e b) inferior.

Após o posicionamento dos segmentos de hastes instrumentados, eram acopladas hastes com 1 m e 2 m de comprimento de modo a ser suficiente para alcançar cada profundidade de ensaio. Os cabos da célula de carga e dos acelerômetros da haste instrumentada inferior eram fixados ao longo da composição de hastes por meio de abraçadeiras plásticas.

4.2.1 Configuração do sistema de aquisição de dados

Os sistemas de aquisição de dados do modelo MX 410 da HBM, foram configurados para trabalhar de forma simultânea, como se fossem um único sistema de aquisição (Figura 4.5); o que possibilitou medir a energia no topo e na base da composição de hastes simultaneamente, ou seja, num mesmo golpe.

Para o acoplamento dos sistemas de aquisição, foi seguido o mesmo procedimento realizado por Lukiantchuki (2012). Quando os módulos MX 410 estão acoplados entre si e com o computador, o software *CatmanEasy* reconhece automaticamente e disponibiliza ao usuário a opção de sincronização.



Figura 4.5: Sistema de aquisição de dados simultâneo utilizado, HBM modelo MX 410.

Após a sincronização, as células de carga e os acelerômetros foram configurados no *CatmanEasy* de acordo com as respectivas calibrações. Já para as células de carga, foram utilizadas as equações da calibração estática realizada (apresentadas no item 3.1.3.1). Em seguida, os sensores configurados foram atribuídos aos seus respectivos canais de leitura.

Depois da configuração dos sensores, selecionou-se a taxa de aquisição dos dados, igual a 96 kHz, e foi feita a programação do sistema *trigger*, que consiste num gatilho que aciona os canais de leitura a partir de um critério imposto pelo usuário. O software *CatmanEasy* também possui um sistema de *pré-trigger*, que possibilita a gravação de uma certa quantidade de dados antes do *trigger* ser acionado. Assim, com esses dois sistemas de gatilho, é assegurado que todos os dados correspondentes ao evento sejam armazenados.

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

Por fim, após todas as configurações dos sensores, filtro e taxa de aquisição, os sensores virtuais do *CatmanEasy* eram zerados, e já era possível iniciar as medições de força e aceleração nos ensaios.

4.2.2 Controle da penetração do amostrador

O controle da penetração do amostrador, para cada golpe do martelo, é importante para a verificação da qualidade da instrumentação. Assim, neste trabalho, as medidas da penetração do amostrador (ρ), foram feitas utilizando-se como referência uma linha de nylon fixada em dois piquetes, próxima a cada furo de sondagem (Figura 4.6).

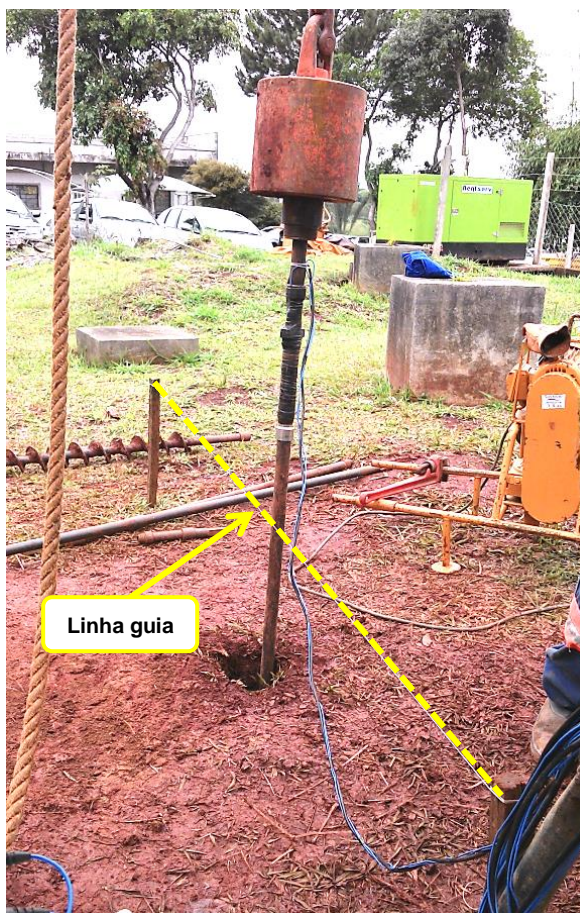


Figura 4.6: Controle da penetração permanente do amostrador por golpe do martelo.

Antes do início do ensaio dinâmico, a cada profundidade ensaiada, foi feita, na composição de hastes, uma marca de referência coincidente com a altura da linha de nylon. A cada golpe do martelo, era medida então a distância entre a linha de nylon e a nova posição deste ponto.

4.2.3 Ensaio SPT-T

Com relação aos ensaios SPT-T, os procedimentos adotados consistiram em: posicionar um disco centralizador no solo ou no tubo de revestimento, para evitar o contato entre a composição de haste e a parede do furo de sondagem, no momento da aplicação do torque; atentar para o comprimento da composição de hastes após a cravação do amostrador, de modo que a altura disponível para o acoplamento do torquímetro na cabeça de bater fosse, aproximadamente, na posição do cotovelo do operador.

4.2.4 Medida do comprimento da amostra recuperada

Após a cravação do amostrador no solo, o mesmo é trazido à superfície para extração da amostra de solo. Corriqueiramente, com a amostra de solo recuperada é feita a identificação táctil-visual do solo, ou seja, sua classificação.

Não é costume na prática do ensaio SPT medir o comprimento de solo recuperado pelo amostrador, esta informação é simplesmente desprezada. Entretanto, esta simples prática pode fornecer informações importantes, como por exemplo, dar subsídios para análises sobre as reações no sistema solo-amostrador após a cravação.

Desta forma, foi realizado neste trabalho o controle do comprimento da amostra, imediatamente após a etapa de cravação do amostrador, permitindo verificar a ocorrência ou não de embuchamento do solo à cada profundidade de ensaio (Figura 4.7). Para tanto, foi utilizada um metro de balcão, com resolução de 1 mm, e realizada a medida do comprimento da amostra dentro do amostrador (Figura 4.7). Esta metodologia pode ser facilmente incorporada à prática do ensaio SPT, dando subsídios à interpretação dos resultados do ensaio e sem custos adicionais.

Convencionou-se que se o comprimento de amostra recuperada é menor que a penetração do amostrador, que no caso do ensaio SPT é 0,45 m, houve o embuchamento. Quando o comprimento da amostra é igual ou maior que os 0,45 m, não houve embuchamento.



Figura 4.7: Controle da recuperação de amostra: A) houve embuchamento e, B) não houve embuchamento.

5. Resultados e Análises

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados na campanha experimental descrita no capítulo 4.

Inicialmente, são abordadas as quantidades de energia envolvidas nos ensaios SPT (realizados com dois tipos de luva para conexão entre as hastes), obtidas com base no *Método EFV* (sinais de força e aceleração). A partir da instrumentação situada na base da composição de hastes, foram estimadas as reações dinâmicas mobilizadas na cravação do amostrador no solo (F_D). São apresentadas também as resistências estáticas teóricas das camadas de solo investigadas, obtidas por meio da proposta de Aoki et al. (2004 e 2007).

Em seguida, é proposta uma correlação N_{SPT} versus torque para os ensaios realizados no trabalho, a partir dos valores de atrito adesão (f_i) obtidos em ensaios SPT-T. Por fim, é apresentada análise das resistências desenvolvidas no sistema solo-amostrador, devido à cravação e estimadas as razões de atrito (a) para as camadas de solo investigadas. Estas análises foram desenvolvidas de acordo com o equilíbrio de forças no amostrador, como apresentado no item 2.6 deste trabalho.

5.1 Energia dos Ensaio SPT

As energias no topo e a base da composição de hastes foram determinadas para os golpes considerados na determinação do índice N_{SPT} , ou seja, para os 0,3 m finais de penetração do amostrador no solo. As Tabelas 5.1 a 5.4 apresentam resumidamente os resultados de energia, obtidos nos ensaios SP02 e SP03. Para cada golpe do martelo, foram determinadas as energias no topo e na base da composição de hastes, através do método *EFV*, a energia potencial do sistema ($EP_{sistema}$) e a energia potencial do martelo (EP_M). Os resultados de energia do ensaio SP01, determinados apenas para o topo da composição, são apresentados no Apêndice B.

Observa-se que as energias potencias do martelo e das hastes diminuem quando a penetração permanente do amostrador diminui, independente do comprimento da composição de haste. Assim, mesmo com um maior comprimento de haste, haverá a gradativa diminuição da contribuição das parcelas de energia referentes ao martelo e as hastes ao longo da cravação.

Tabela 5.1: Resultados de energia e penetração do ensaio SP02, nas profundidades 1 a 10 m, utilizando luvas bipartidas para conexão das hastes (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).

Prof. (m)	N_{SPT}	ρ (m)	$\rho_{acumulada}$ (m)	Golpe n°	L_h (m)	E_{topo} (J)	E_{base} (J)	$EP_{sistema}$ (J)	EP_M (J)	
1	2,8	0,097	0,337	3	1,9	396,5	355,0	545,8	540,1	
		0,102	0,439	4		391,8	363,8	549,3	543,3	
		0,125	0,564	5		404,4	355,0	565,4	557,9	
Média						397,5	357,9	553,5	547,1	
2	2,9	0,113	0,258	2	2,8	382,6	351,6	560,5	550,3	
		0,100	0,358	3		370,7	358,3	551,0	542,0	
		0,098	0,456	4		363,7	347,7	549,5	540,7	
Média						376,6	354,9	555,7	544,3	
4	4,3	0,055	0,222	3	4,8	386,7	369,3	521,7	513,3	
		0,055	0,277	4			344,6	521,7	513,3	
		0,063	0,340	5			364,3	528,1	518,4	
		0,060	0,400	6			359,5	538,5	529,2	
		0,058	0,458	7			380,4	370,9	524,1	515,2
Média						383,6	361,7	526,1	517,9	
8	9,1	0,046	0,203	3	8,8	357,3	372,2	520,5	507,6	
		0,036	0,239	4			344,6	336,9	511,3	501,2
		0,035	0,274	5			353,5	323,6	510,4	500,6
		0,033	0,307	6			323,7	508,5	499,3	
		0,029	0,336	7			332,9	504,9	496,7	
		0,035	0,371	8			364,6	344,4	510,4	500,6
		0,028	0,399	9			365,3	337,7	503,9	496,1
		0,027	0,426	10			348,6	333,8	503,0	495,5
0,029	0,455	11	360,6	346,5	504,9	496,7				
Média						358,3	334,9	508,6	499,4	
10	12,4	0,039	0,182	3	10,8	352,3	360,4	307,7	516,5	503,1
		0,033	0,215	4			350,0	334,2	510,6	499,3
		0,030	0,245	5			347,3	326,2	507,7	497,4
		0,025	0,270	6			363,4	336,0	502,8	494,2
		0,025	0,295	7			359,3	330,3	502,8	494,2
		0,026	0,321	8			316,7	503,7	494,8	
		0,022	0,343	9			361,1	321,9	499,8	492,3
		0,022	0,365	10			345,8	322,0	499,8	492,3
		0,022	0,387	11			354,0	335,2	499,8	492,3
		0,019	0,406	12			356,1	328,5	496,9	490,4
		0,021	0,427	13			361,7	339,0	498,8	491,6
0,021	0,448	14	361,0	341,4	498,8	491,6				
Média						352,6	328,3	502,0	494,4	

Tabela 5.2: Resultados de energia e penetração do ensaio SP02, nas profundidades 14 a 20 m, utilizando luvas bipartidas para conexão das hastes (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).

Prof, (m)	N_{SPT}	ρ (m)	$\rho_{acumulada}$ (m)	Golpe n°	L_h (m)	E_{topo} (J)	E_{base} (J)	$EP_{sistema}$ (J)	EP_M (J)			
14	12,6	0,037	0,221	4	14,8	-	309,6	519,2	501,8			
		0,030	0,251	5		-	309,9	511,5	497,4			
		0,029	0,280	6		-	312,6	510,4	496,7			
		0,025	0,305	7		-	323,9	505,9	494,2			
		0,021	0,326	8		-	328,0	501,5	491,6			
		0,025	0,351	9		-	322,0	505,9	494,2			
		0,021	0,372	10		-	321,7	501,5	491,6			
		0,019	0,391	11		-	314,4	499,3	490,4			
		0,019	0,410	12		-	304,5	499,3	490,4			
		0,017	0,427	13		-	311,5	497,1	489,1			
		0,018	0,445	14		-	313,2	498,2	489,7			
		Média						-	315,6	503,1	493,4	
16	11,1	0,046	0,238	3	16,8	-	324,3	532,1	507,6			
		0,037	0,275	4		-	328,6	521,6	501,8			
		0,033	0,308	5		-	345,0	516,9	499,3			
		0,030	0,338	6		-	352,4	513,4	497,4			
		0,032	0,370	7		-	342,8	515,7	498,6			
		0,023	0,393	8		-	332,9	505,2	492,9			
		0,024	0,417	9		-	337,6	506,3	493,5			
		0,020	0,437	10		-	326,8	501,7	491,0			
		Média						-	336,3	514,1	497,8	
		18	10,7	0,048		0,225	3	18,8	-	359,0	537,5	508,8
0,038	0,263			4	-	330,5	525,2		502,5			
0,035	0,298			5	-	314,6	521,4		500,6			
0,028	0,326			6	-	322,2	512,8		496,1			
0,022	0,348			7	-	319,9	505,4		492,3			
0,026	0,374			8	-	343,3	510,3		494,8			
0,022	0,419			10	-	320,0	505,4		492,3			
0,021	0,440			11	-	339,1	504,2		491,6			
0,018	0,458			12	-	321,8	500,5		489,7			
Média						-	330,0	513,6	496,5			
20	21,7	0,025	0,195	6	20,8	337,9	319,7	510,7	494,2			
		0,021	0,216	7		338,5	332,5	505,5	491,6			
		0,019	0,235	8		339,3	323,4	502,9	490,4			
		0,014	0,300	12		326,7	319,6	496,4	487,2			
		0,013	0,313	13		340,1	329,6	495,1	486,5			
		0,013	0,326	14		328,0	-	495,1	486,5			
		0,011	0,337	15		344,8	320,6	492,5	485,3			
		0,011	0,362	17		324,9	310,0	492,5	485,3			
		0,013	0,373	18		334,9	317,5	495,1	486,5			
		0,013	0,386	19		326,3	317,0	495,1	486,5			
		0,010	0,396	20		339,8	306,0	491,2	484,6			
		0,010	0,406	21		355,2	335,6	491,2	484,6			
		0,011	0,417	22		331,8	311,8	492,5	485,3			
		0,009	0,426	23		336,7	311,7	489,9	484,0			
		0,010	0,436	24		347,8	338,1	491,2	484,6			
0,010	0,446	25	351,9	339,7	491,2	484,6						
Média						337,8	322,2	495,5	486,7			

Tabela 5.3: Resultados de energia e penetração do ensaio SP03, nas profundidades 1 a 14 m, utilizando luvas convencionais para conexão das hastes (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).

Prof, (m)	N_{SPT}	ρ (m)	$\rho_{acumulada}$ (m)	Golpe n°	L_h (m)	E_{topo} (J)	E_{base} (J)	$EP_{sistema}$ (J)	EP_M (J)
1	3,1	0,101	0,256	2	1,9	413,5	404,1	548,6	542,6
		0,084	0,340	3		384,3	379,6	536,8	531,8
		0,101	0,441	4		365,2	357,4	548,6	542,6
		0,105	0,546	5		430,6	412,9	551,4	545,2
Média						398,4	388,5	546,4	540,6
8	9,0	0,037	0,216	4	8,8	-	349,8	512,2	501,8
		0,034	0,250	5		-	338,4	509,4	499,9
		0,032	0,282	6		-	325,0	507,6	498,6
		0,031	0,313	7		-	331,3	506,7	498,0
		0,034	0,347	8		-	337,6	509,4	499,9
		0,035	0,382	9		-	344,3	510,3	500,6
		0,034	0,416	10		-	339,9	509,4	499,9
Média						-	338,4	508,8	499,5
10	10,9	0,039	0,222	4	10,8	349,9	335,2	516,5	503,1
		0,034	0,256	5		346,7	327,2	511,6	499,9
		0,031	0,287	6		349,9	342,3	508,6	498,0
		0,025	0,312	7		326,8	311,0	502,7	494,2
		0,026	0,338	8		322,4	314,2	503,7	494,8
		0,029	0,367	9		355,6	339,6	506,7	496,7
		0,025	0,392	10		-	348,4	502,7	494,2
		0,021	0,413	11		-	344,9	498,8	491,6
		0,022	0,435	12		-	325,0	499,8	492,3
Média						341,9	333,0	505,2	495,8
14	11,4	0,047	0,208	3	14,8	327,5	313,6	530,3	508,2
		0,038	0,246	4		331,6	311,1	520,3	502,5
		0,032	0,278	5		322,5	299,1	513,7	498,6
		0,033	0,311	6		-	310,6	514,8	499,3
		0,027	0,338	7		338,0	311,0	508,1	495,5
		0,025	0,363	8		335,7	-	505,9	494,2
		0,023	0,391	10		321,6	309,4	503,7	492,9
		0,022	0,413	11		-	317,9	502,6	492,3
		0,021	0,434	12		342,7	327,5	501,5	491,6
Média						331,5	313,1	509,7	496,3

Tabela 5.4: Resultados de energia e penetração do ensaio SP03, nas profundidades 16 a 20 m, utilizando luvas convencionais para conexão das hastes (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).

Prof. (m)	N_{SPT}	ρ (m)	$\rho_{acumulada}$ (m)	Golpe n°	L_h (m)	E_{topo} (J)	E_{base} (J)	$EP_{sistema}$ (J)	EP_M (J)			
16	7,6	0,064	0,204	2	16,8	318,2	287,7	553,1	519,0			
		0,051	0,255	3		325,0	537,9	510,8				
		0,045	0,300	4		324,2	303,2	530,9	506,9			
		0,038	0,338	5		320,9	302,7	522,7	502,5			
		0,032	0,370	6		310,7	291,0	515,7	498,6			
		0,031	0,401	7		310,2	514,5	498,0				
		0,029	0,430	8		309,5	282,7	512,2	496,7			
		0,026	0,456	9		322,9	293,5	507,0	494,8			
		Média						318,8	295,9	524,3	503,4	
18	11,2	0,044	0,201	3	18,8	341,9	309,7	532,5	506,3			
		0,039	0,240	4		346,6	311,5	526,4	503,1			
		0,035	0,275	5		342,7	521,4	500,6				
		0,025	0,300	6		345,3	322,1	509,1	494,2			
		0,029	0,329	7		353,7	330,8	514,0	496,7			
		0,022	0,351	8		346,3	297,9	505,4	492,3			
		0,023	0,374	9		346,7	324,0	506,6	492,9			
		0,019	0,393	10		345,5	311,4	501,7	490,4			
		0,019	0,412	11		319,9	501,7	490,4				
		0,019	0,431	12		364,1	501,7	490,4				
		0,021	0,452	13		363,7	328,0	504,1	491,6			
		Média						350,4	319,8	511,3	495,3	
		20	32,7	0,011		0,195	8	20,8	333,4	276,8	492,5	485,3
0,011	0,219			10	308,5	299,8	492,5		485,3			
0,011	0,230			11	311,2	302,2	492,5		485,3			
0,012	0,253			13	335,7	308,4	493,8		485,9			
0,009	0,262			14	319,8	296,0	489,9		484,0			
0,010	0,272			15	313,4	300,5	491,2		484,6			
0,011	0,283			16	302,0	285,8	491,2		484,6			
0,010	0,293			17	304,0	298,7	489,9		484,0			
0,009	0,302			18	327,2	299,9	489,9		484,0			
0,009	0,311			19	331,6	299,3	489,9		484,0			
0,009	0,320			20	326,6	284,7	489,9		484,0			
0,009	0,329			21	314,6	296,8	489,9		484,0			
0,009	0,338			22	313,9	294,7	489,9		484,0			
0,008	0,347			23	303,8	488,6	483,3					
0,009	0,355			24	315,5	283,9	489,9		484,0			
0,008	0,364			25	323,6	288,0	488,6		483,3			
0,007	0,372			26	305,2	271,3	487,3		482,7			
0,008	0,379			27	330,5	292,4	488,6		483,3			
0,008	0,387			28	331,4	287,5	488,6		483,3			
0,008	0,395			29	328,7	296,5	487,3		482,7			
0,007	0,402			30	331,4	288,3	487,3		482,7			
0,007	0,409			31	322,3	285,1	486,0		482,1			
0,006	0,415			32	327,9	283,0	488,6		483,3			
0,008	0,423			33	303,3	284,9	488,6		483,3			
0,003	0,431			34	311,6	284,5	482,1		480,2			
0,011	0,434			35	323,7	287,0	492,5		485,3			
0,009	0,445			36	322,6	289,4	489,9		484,0			
Média						320,0	291,8	489,7	483,9			

Os resultados de energia apresentados nas Tabelas 5.1 a 5.4 evidenciam a importância da correção da energia potencial do sistema, segundo a proposta de Odebrecht (2003), principalmente para o caso de solos de baixa resistência (maior penetração). Os resultados indicam que a energia potencial do sistema foi pelo menos 2,5% superior ao valor da energia potencial teórica (478,2 J), para as camadas de solo de maior resistência ($N_{SPT} > 30$ golpes), chegando a ser 16% superior nas camadas de menor resistência.

Os valores médios de energia, anteriormente apresentados, foram plotados em função da profundidade. Os gráficos da Figura 5.1 mostram que existe uma tendência de paralelismo entre as curvas ajustadas aos pontos experimentais de energia, concordando com o que foi identificado por Lukiantchuki, Esquível e Bernardes (em fase de elaboração)¹. A distância entre as curvas de energia medida pela instrumentação (topo ou base) em relação à curva da energia potencial do sistema representa a energia perdida.

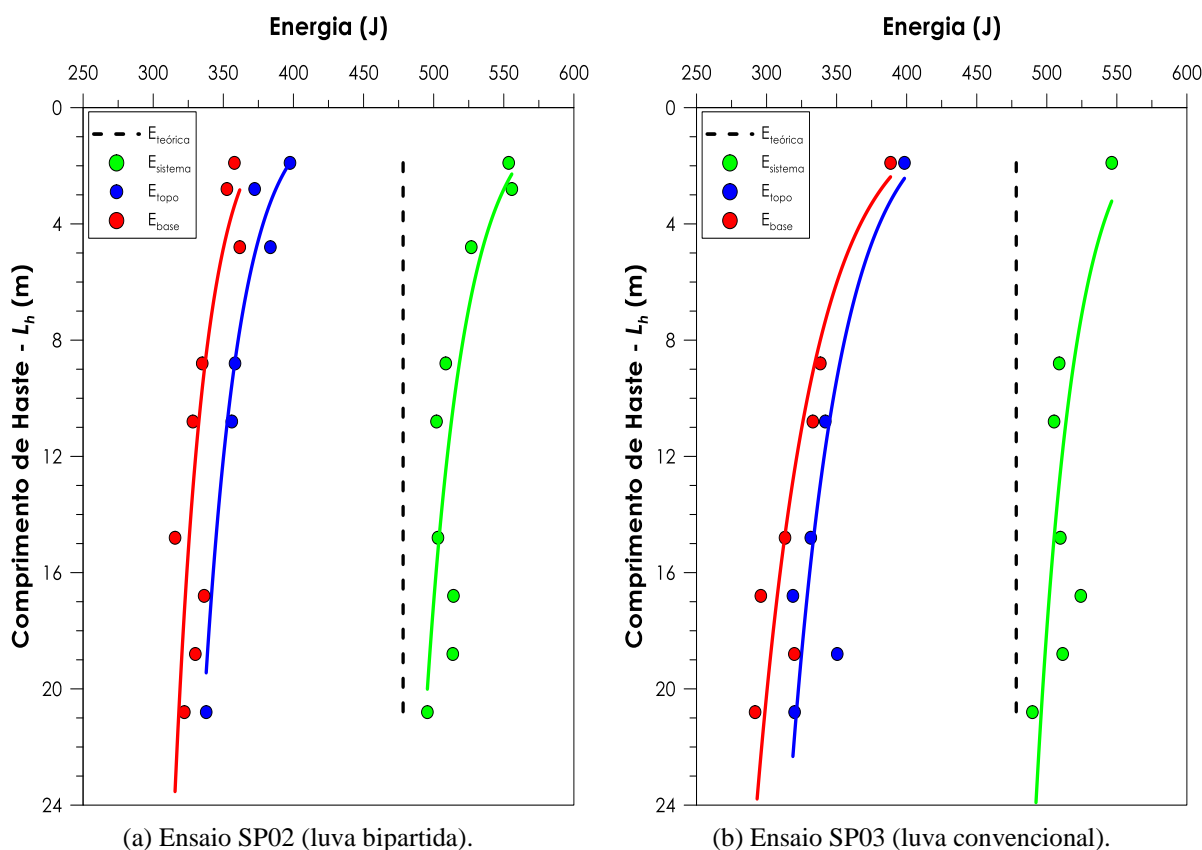


Figura 5.1: Valores médios de energia ao longo da profundidade dos ensaios realizados.

Os resultados das Tabela 5.1 a 5.4 foram plotados em gráficos de penetração permanente (ρ) versus energia (topo, base, potencial do sistema e do martelo), que são apresentados nas Figura 5.2 a 5.9.

¹LUKIANCHUKI, J. A.; ESQUÍVEL, E. R.; BERNARDES, G. P. E HOWIE, J. **Energy of SPT described by two single parameters**. A ser editado, 2014.

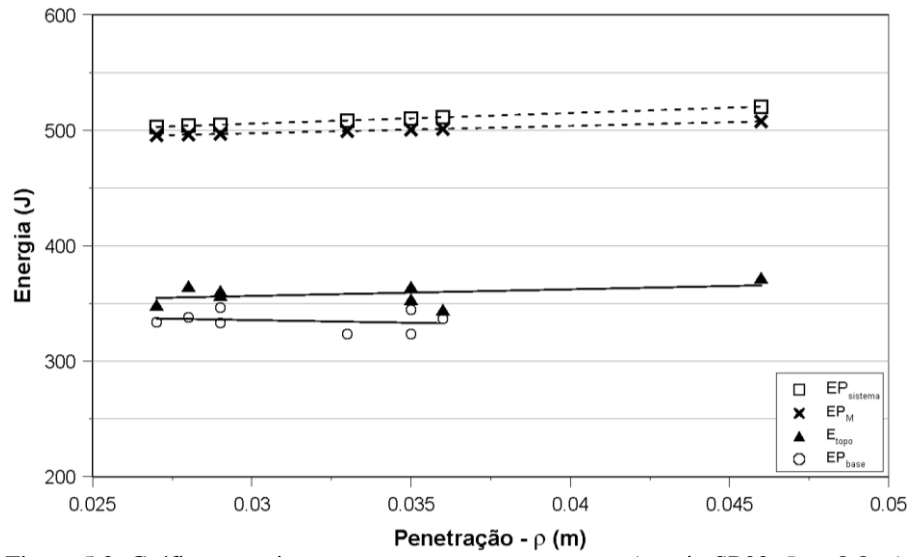


Figura 5.2: Gráfico energia versus penetração permanente (ensaio SP02, $L_h = 8,8$ m).

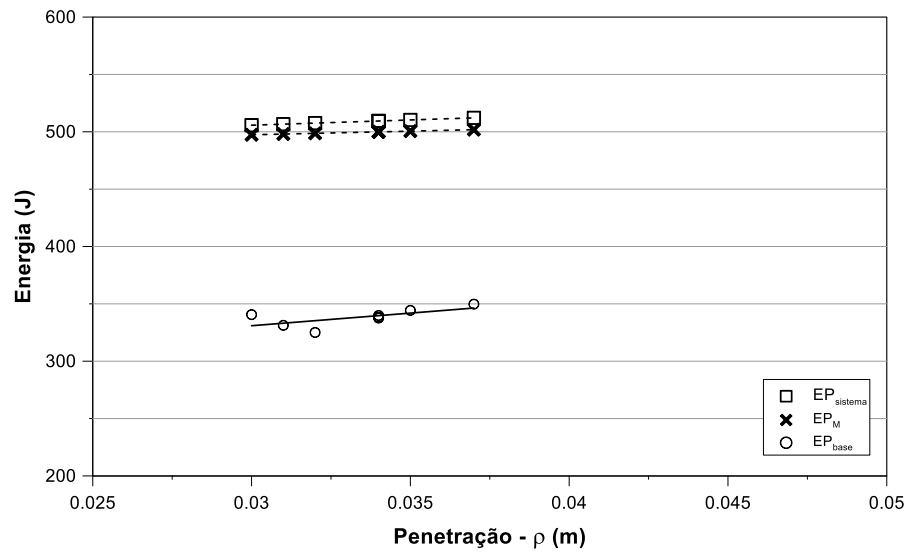


Figura 5.3: Gráfico energia versus penetração permanente (ensaio SP03, $L_h = 8,8$ m).

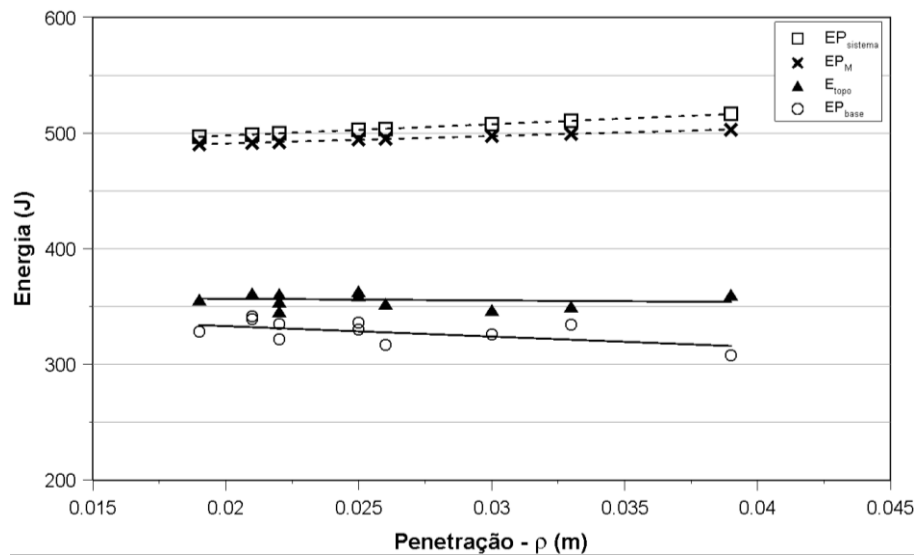


Figura 5.4: Gráfico energia versus penetração permanente (ensaio SP02, $L_h = 10,8$ m).

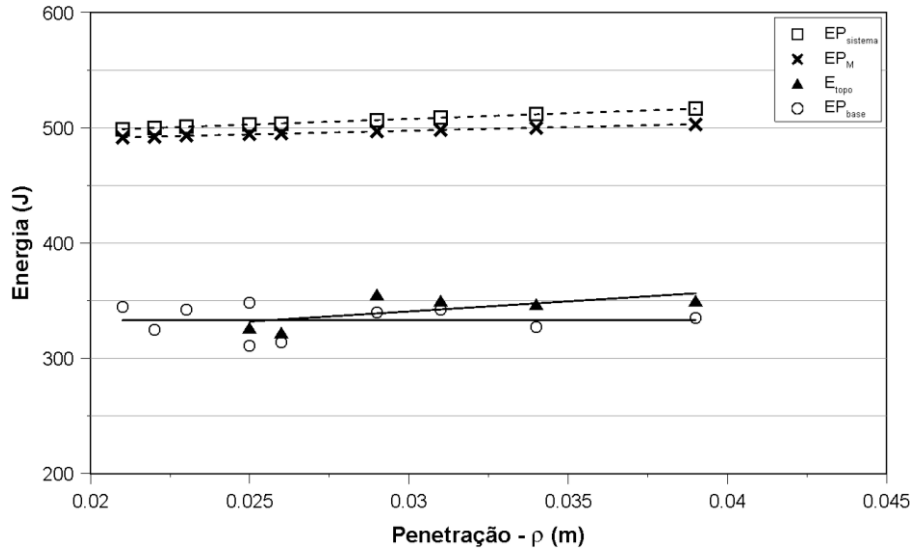


Figura 5.5: Gráfico energia versus penetração permanente (ensaio SP03, $L_h = 10,8$ m).

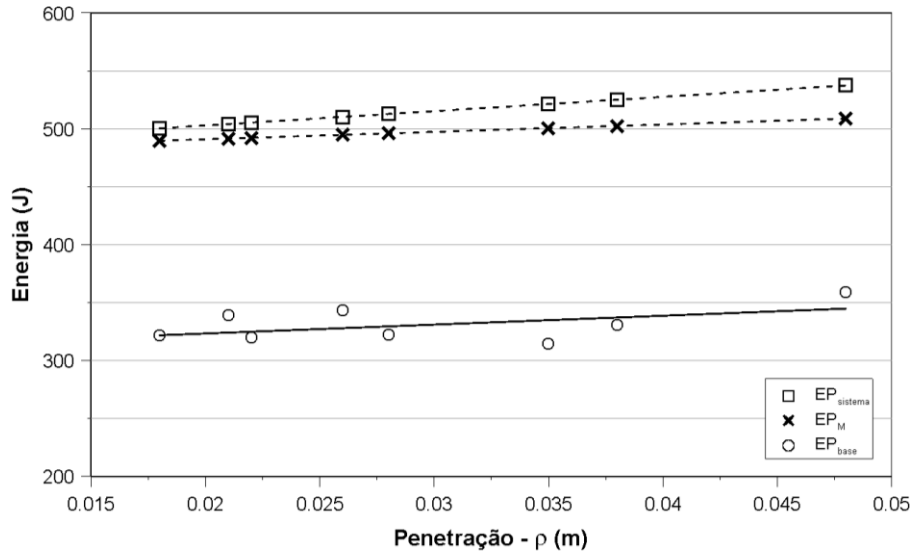


Figura 5.6: Gráfico energia versus penetração permanente (ensaio SP02, $L_h = 18,8$ m).

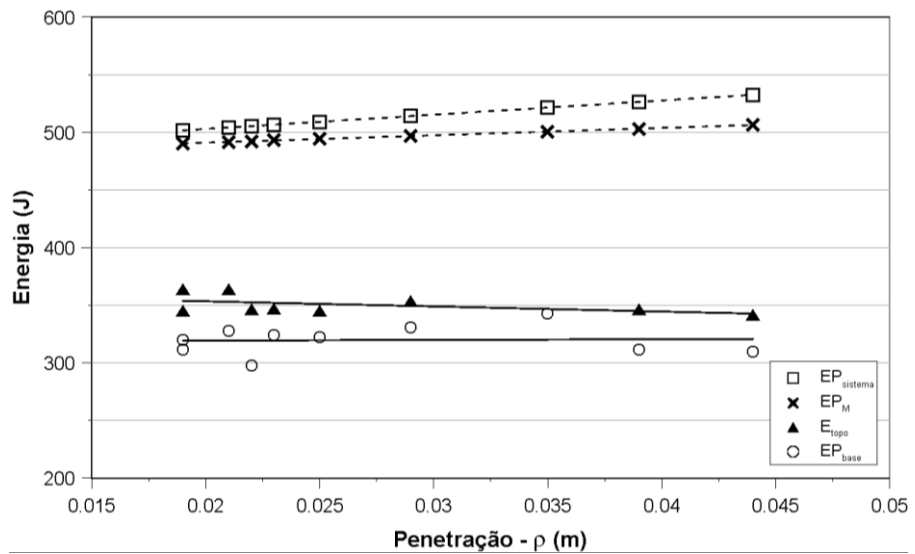


Figura 5.7: Gráfico energia versus penetração permanente (ensaio SP03, $L_h = 18,8$ m).

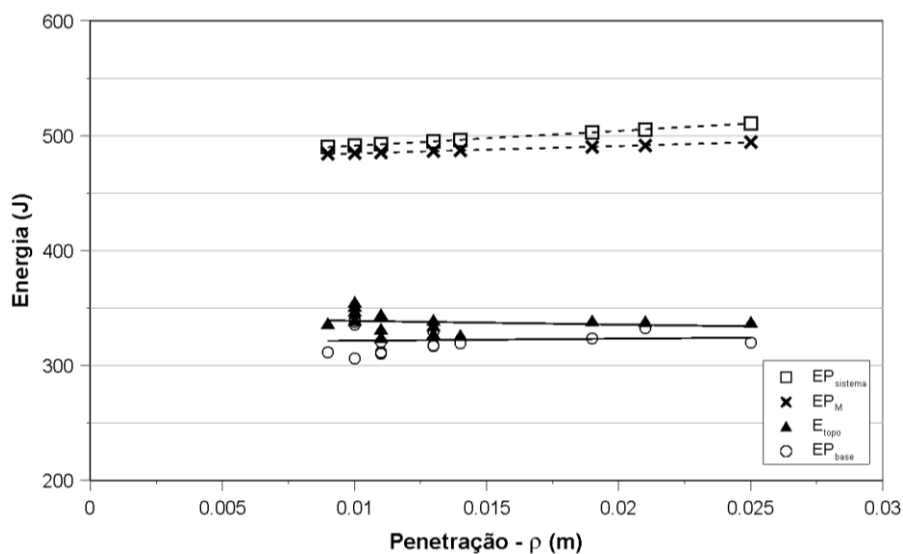


Figura 5.8: Gráfico energia versus penetração permanente (ensaio SP02, $L_h = 20,8$ m).

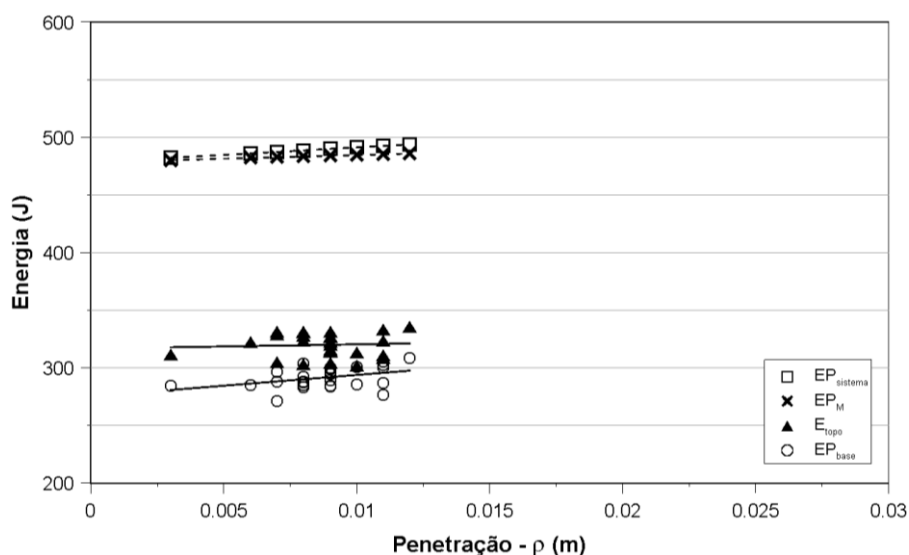


Figura 5.9: Gráfico energia versus penetração permanente (ensaio SP03, $L_h = 20,8$ m).

Nos gráficos das Figuras 5.2 a 5.9, é possível notar que existe uma relação entre as energias (topo e base) obtidas a partir da integração com base no método *EFV* com as energias do sistema e do martelo. Nota-se que as energias potenciais do sistema e do martelo, praticamente se sobrepõem para o caso de pequenos comprimentos de haste. Observa-se também que no início da cravação do amostrador a defasagem entre as energias potenciais do martelo e do sistema é sempre maior e vai diminuindo ao longo da cravação. Esta tendência mostra que a contribuição da composição de hastes na cravação do amostrador diminui a cada incremento de penetração do amostrador no solo.

No caso do ensaio realizado em solos de maior resistência e comprimento de haste longo, observa-se que há a mesma tendência de superposição entre as energias potenciais do sistema e do martelo, devido às menores penetrações permanentes do amostrador no solo (Figura 5.8 e

Figura 5.9). Nestes casos, a energia potencial do sistema se assemelha à energia potencial teórica do ensaio SPT (478,2 J), como mencionado por Odebrecht (2003).

Ainda com relação aos resultados de energia *versus* penetração permanente (Figuras 5.2 a 5.9), observa-se que para uma mesma penetração, as quantidades de energia envolvidas são distintas (tanto para o topo como para a base da composição de hastes). De acordo com Lukiantchuki (2012), essas discrepâncias estão associadas às características intrínsecas do ensaio SPT (perdas de energia). As Figuras 5.10 e 5.11 apresentam variações de energia (topo e base) que ocorreram em alguns dos ensaios realizados.

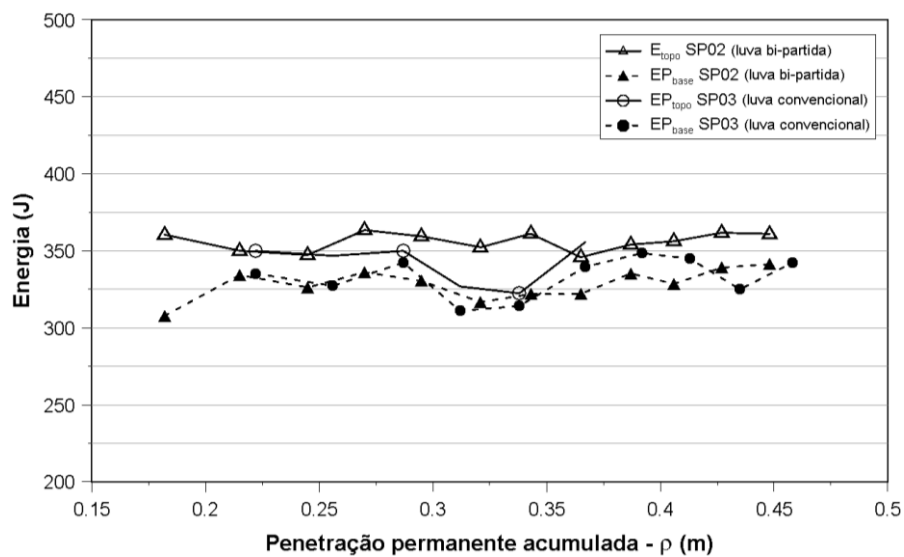


Figura 5.10: Gráfico energia *versus* penetração permanente acumulada ($L_h = 10,8$ m).

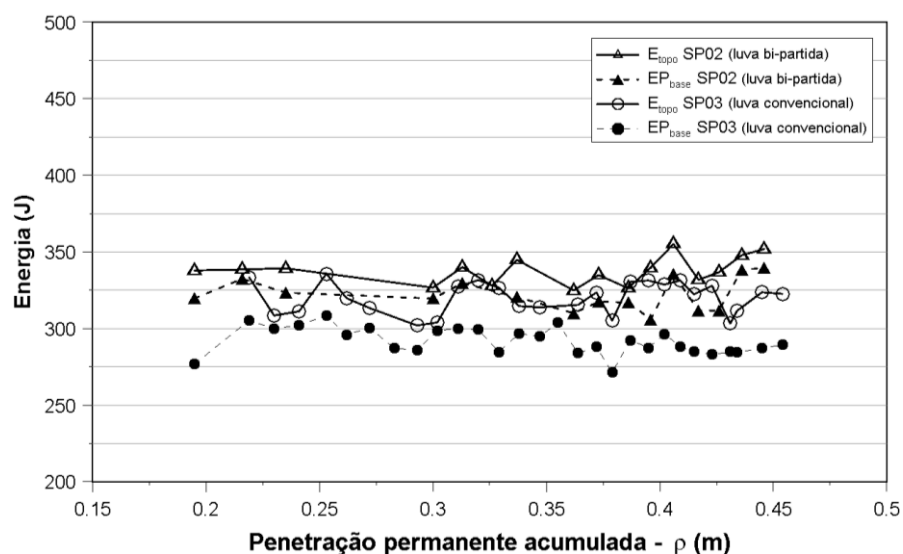


Figura 5.11: Gráfico energia *versus* penetração permanente acumulada ($L_h = 20,8$ m).

5.2 Eficiência dos Ensaios SPT

De posse dos resultados de energia, foram determinadas as eficiências de topo (abaixo da cabeça de bater) e de base (topo do amostrador), em relação à energia total do sistema ($EP_{sistema}$), segundo as Equações 2.69 e 2.70. As Tabelas 5.5 a 5.8 apresentam os resultados de eficiência dos ensaios SP02 e SP03, utilizando o equipamento convencional (manual) e duas configurações de luvas para conexão dos segmentos de haste.

Tabela 5.5: Resultados de eficiência do ensaio SP02, nas profundidades de 1 a 10 m, utilizando luvas bipartidas para conexão das hastes (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).

Prof. (m)	N_{SPT}	Golpe n°	L_h (m)	E_{topo} (J)	η_{topo} (%)	E_{base} (J)	η_{base} (%)
1	2,8	3	1,9	396,5	72,6	355,0	65,0
		4		391,8	71,3	363,8	66,2
		5		404,4	71,5	355,0	62,8
Média				397,5	71,8	357,9	64,7
2	2,9	2	2,8	382,6	68,3	351,6	62,7
		3		370,7	67,3	358,3	65,0
		4		363,7	66,2	347,7	63,3
Média				372,3	67,2	352,5	63,7
4	4,3	3	4,8	-	-	369,3	70,8
		4		-	-	344,6	66,1
		5		386,7	73,2	364,3	69,0
		6		-	-	359,5	66,8
		7		380,4	72,6	370,9	70,8
Média				383,6	72,9	361,7	68,7
8	9,1	3	8,8	372,2	71,5	-	-
		4		344,6	67,4	336,9	65,9
		5		353,5	69,3	323,6	63,4
		6		-	-	323,7	63,7
		7		357,3	70,8	332,9	65,9
		8		364,6	71,4	344,4	67,5
		9		365,3	72,5	337,7	67,0
		10		348,6	69,3	333,8	66,4
Média				358,3	70,5	334,9	66,0
10	12,4	3	10,8	360,4	69,8	307,7	59,6
		4		350,0	68,5	334,2	65,5
		5		347,3	68,4	326,2	64,3
		6		363,4	72,3	336,0	66,8
		7		359,3	71,5	330,3	65,7
		8		352,3	69,9	316,7	62,9
		9		361,1	72,2	321,9	64,4
		10		345,8	69,2	322,0	64,4
		11		354,0	70,8	335,2	67,1
		12		356,1	71,7	328,5	66,1
		13		361,7	72,5	339,0	68,0
14	361,0	72,4	341,4	68,4			
Média				356,0	70,8	328,3	65,3

Tabela 5.6: Resultados de eficiência do ensaio SP02, nas profundidades de 14 a 20 m, utilizando luvas bipartidas para conexão das hastes (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).

Prof. (m)	N_{SPT}	Golpe n°	L_h (m)	E_{topo} (J)	η_{topo} (%)	E_{base} (J)	η_{base} (%)			
14	12,6	4	14,8	-	-	309,6	59,6			
		5		-	-	309,9	60,6			
		6		-	-	312,6	61,3			
		7		-	-	323,9	64,0			
		8		-	-	328,0	65,4			
		9		-	-	322,0	63,6			
		10		-	-	321,7	64,1			
		11		-	-	314,4	63,0			
		12		-	-	304,5	61,0			
		13		-	-	311,5	62,7			
		14		-	-	313,2	62,9			
		Média				-	-	315,6	62,6	
		16		11,1	3	16,8	-	-	324,3	60,9
					4		-	-	328,6	63,0
5	-		-		345,0		66,7			
6	-		-		352,4		68,6			
7	-		-		342,8		66,5			
8	-		-		332,9		65,9			
9	-		-		337,6		66,7			
10	-		-		326,8		65,1			
Média				-	-	336,3	65,4			
18	10,7	3	18,8	-	-	359,0	66,8			
		4		-	-	330,5	62,9			
		5		-	-	314,6	60,3			
		6		-	-	322,2	62,8			
		7		-	-	319,9	63,3			
		8		-	-	343,3	67,3			
		10		-	-	320,0	63,3			
		11		-	-	339,1	67,3			
		12		-	-	321,8	64,3			
Média				-	-	330,0	64,3			
20	21,7	6	20,8	337,9	66,2	319,7	62,6			
		7		338,5	67,0	332,5	65,8			
		8		339,3	67,5	323,4	64,3			
		12		326,7	65,8	319,6	64,4			
		13		340,1	68,7	329,6	66,6			
		14		328,0	66,2	-	-			
		15		344,8	70,0	320,6	65,1			
		17		324,9	66,0	310,0	62,9			
		18		334,9	67,6	317,5	64,1			
		19		326,3	65,9	317,0	64,0			
		20		339,8	69,2	306,0	62,3			
		21		355,2	72,3	335,6	68,3			
		22		331,8	67,4	311,8	63,3			
23	336,7	68,7	311,7	63,6						
24	347,8	70,8	338,1	68,8						
25	351,9	71,6	339,7	69,1						
Média				337,8	68,2	322,2	65,0			

Tabela 5.7: Resultados de eficiência do ensaio SP03, nas profundidades de 1 a 14 m, utilizando luvas convencionais para conexão das hastes (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).

Prof. (m)	N_{SPT}	Golpe nº	L_h (m)	E_{topo} (J)	η_{topo} (%)	E_{base} (J)	η_{base} (%)
1	3,1	2	1,9	413,5	75,4	404,1	73,7
		3		384,3	71,6	379,6	70,7
		4		365,2	66,6	357,4	65,1
		5		430,6	78,1	412,9	74,9
Média				398,4	72,9	388,5	71,1
8	9,0	4	8,8	-	-	349,8	68,3
		5		-	-	338,4	66,4
		6		-	-	325,0	64,0
		7		-	-	331,3	65,4
		8		-	-	337,6	66,3
		9		-	-	344,3	67,5
		10		-	-	339,9	66,7
11	-	-	340,6	67,3			
Média				-	-	338,4	66,5
10	10,9	4	10,8	349,9	67,7	335,2	64,9
		5		346,7	67,8	327,2	64,0
		6		349,9	68,8	342,3	67,3
		7		326,8	65,0	311,0	61,9
		8		322,4	64,0	314,2	62,4
		9		355,6	70,2	339,6	67,0
		10		-	-	348,4	69,3
		11		-	-	344,9	69,1
		12		-	-	325,0	65,0
13	-	-	342,2	68,3			
Média				341,9	67,3	333,0	65,9
14	11,4	3	14,8	327,5	61,8	313,6	59,1
		4		331,6	63,7	311,1	59,8
		5		322,5	62,8	299,1	58,2
		6		-	-	310,6	60,3
		7		338,0	66,5	311,0	61,2
		8		335,7	66,4	-	-
		10		321,6	63,8	309,4	61,4
		11		-	-	317,9	63,2
		12		342,7	68,3	327,5	65,3
13	332,5	67,1	318,2	64,2			
Média				331,5	65,1	313,1	61,4

Tabela 5.8: Resultados de eficiência do ensaio SP03, nas profundidades de 16 a 20 m, utilizando luvas convencionais para conexão das hastas (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).

Prof. (m)	N_{SPT}	Golpe nº	L_h (m)	E_{topo} (J)	η_{topo} (%)	E_{base} (J)	η_{base} (%)			
16	7.6	2	16,8	318,2	57,5	287,7	52,0			
		3		325,0	60,4	-	-			
		4		324,2	61,1	303,2	57,1			
		5		320,9	61,4	302,7	57,9			
		6		310,7	60,2	291,0	56,4			
		7		-	-	310,2	60,3			
		8		309,5	60,4	282,7	55,2			
		9		322,9	63,7	293,5	57,9			
		Média				318.8	60.7	295.9	56.7	
18	11.2	3	18,8	341,9	64,2	309,7	58,2			
		4		346,6	65,9	311,5	59,2			
		5		-	-	342,7	65,7			
		6		345,3	67,8	322,1	63,3			
		7		353,7	68,8	330,8	64,4			
		8		346,3	68,5	297,9	59,0			
		9		346,7	68,4	324,0	64,0			
		10		345,5	68,9	311,4	62,1			
		11		-	-	319,9	63,8			
		12		364,1	72,6	-	-			
		13		363,7	72,1	328,0	65,1			
		Média				350.4	68.6	319.8	62.4	
		20		32.7	8	20,8	-	-	276,8	56,2
10	333,4		67,7		305,4		62,0			
11	308,5		62,6		299,8		60,9			
12	311,2		63,2		302,2		61,4			
13	335,7		68,0		308,4		62,4			
14	319,8		65,3		296,0		60,4			
15	313,4		63,8		300,5		61,2			
16	-		-		287,1		58,3			
17	302,0		61,5		285,8		58,2			
18	304,0		62,1		298,7		61,0			
19	327,2		66,8		299,9		61,2			
20	331,6		67,7		299,3		61,1			
21	326,6		66,7		284,7		58,1			
22	314,6		64,2		296,8		60,6			
23	313,9		64,1		294,7		60,2			
24	-		-		303,8		62,2			
25	315,5		64,4		283,9		57,9			
26	323,6		66,2		288,0		58,9			
27	305,2		62,6		271,3		55,7			
28	330,5		67,6		292,4		59,8			
29	331,4		67,8		287,5		58,8			
30	328,7		67,5		296,5		60,8			
31	331,4		68,0		288,3		59,2			
32	322,3		66,3		285,1		58,7			
33	327,9		67,1		283,0		57,9			
34	303,3		62,1		284,9		58,3			
35	311,6		64,6		284,5		59,0			
36	323,7		65,7		287,0		58,3			
37	322,6		65,9		289,4		59,1			
Média					320,0		65,4	291,8	59,7	

Para o ensaio SP02 (realizado com equipamento convencional e luvas bipartidas), o valor médio de eficiência para o topo da composição de haste foi de 69,7%, apresentando um desvio padrão de 2,3%, resultando num coeficiente de variação de 3,3%. Para o ensaio SP03 (realizado com equipamento e luvas convencionais), a eficiência média para o topo da composição foi de 65,9%, com desvio padrão de 3,7% e coeficiente de variação de 5,6%.

Os resultados de eficiência para o topo da composição de haste, mesmo sendo utilizado o mesmo equipamento de sondagem, apresentaram uma diferença média de 3,8%. Esta diferença pode estar associada às características do ensaio realizado, que por ser manual é mais susceptível às variações do golpe (excentricidade, atrito entre a haste guia do martelo e a composição de haste, variações na liberação do martelo pelo operador).

Os valores de eficiência dos ensaios indicaram que a eficiência no topo da composição de haste, é independente do comprimento de haste, como pode ser visto nos gráficos das Figuras 5.13 e 5.14, que apresentam os valores médios de eficiência de cada profundidade investigada.

No caso da eficiência determinada na base da composição de haste, obteve-se um valor médio de 64,9% com desvio padrão de 2,5% para o ensaio SP02, e um valor médio de eficiência de 62% com desvio padrão de 4,3%, para o ensaio SP03. Os coeficientes de variação para os ensaios SP02 e SP03 foram de 3,9% e 6,9%, respectivamente. Estes resultados comprovam que a variabilidade da energia determinada na base da composição de haste é superior à determinada no topo da composição.

Entretanto, para as camadas mais resistentes (a 20 m de profundidade e N_{SPT} de 20 a 30 golpes), nota-se que a variabilidade da eficiência determinada na base da composição de haste diminui, em relação às variabilidades encontradas para as demais camadas (de menor resistência). Esta menor variação, apesar do maior comprimento de haste, pode estar associada ao fato do amostrador estar fixo num solo mais resistente, o que reduz substancialmente as possíveis movimentações laterais que ocasionam perdas de energia.

A Tabela 5.9 apresenta resumidamente os resultados médios de eficiência dos ensaios SP02 e SP03, determinados para o topo e a base da composição de haste, considerando as variações de equipamento (luvas).

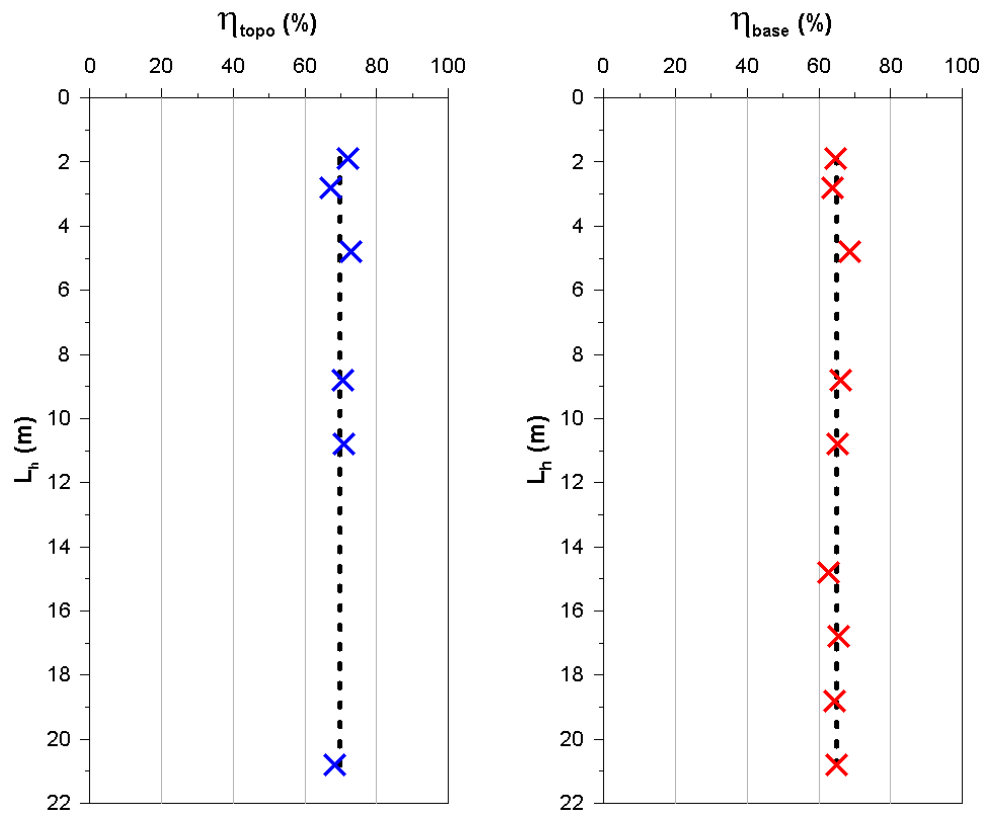


Figura 5.12: Eficiência *versus* comprimento de haste, ensaio SP02 (realizado com equipamento convencional e luvas bipartidas).

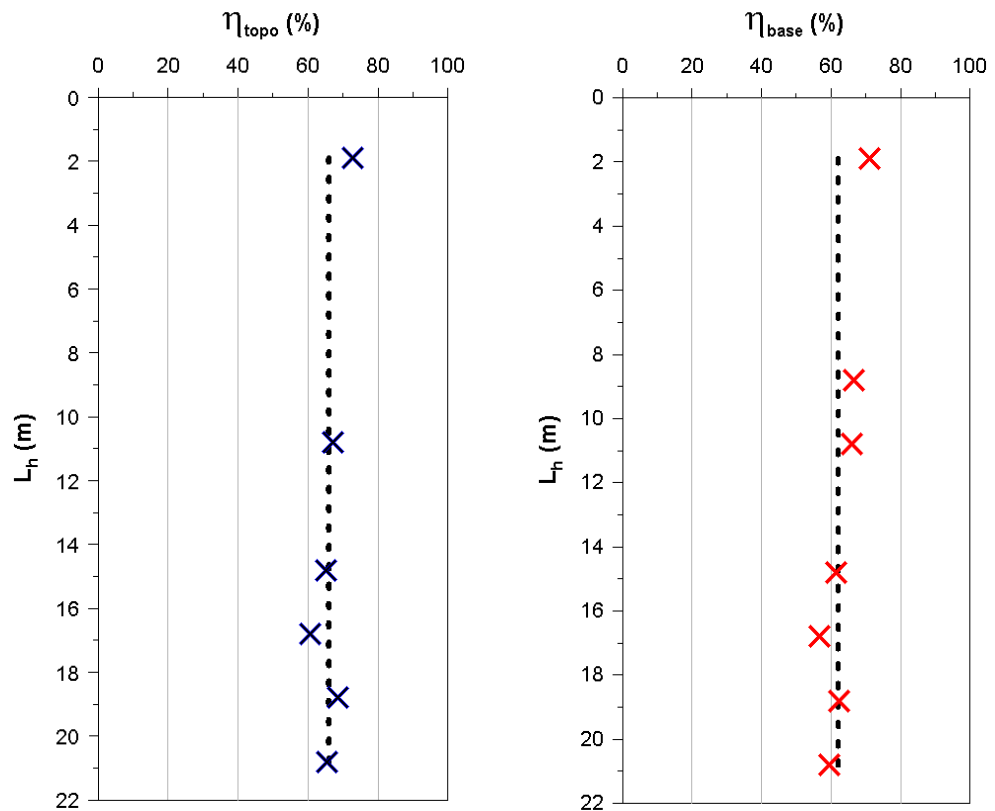


Figura 5.13: Eficiência *versus* comprimento de haste, ensaio SP03 (realizado com equipamento e luvas convencionais).

Tabela 5.9: Valores médios de eficiência.

Equipamento Convencional											
Luvas bipartidas cônicas			Luvas convencionais								
η_{topo} (%)	σ_d (%)	cv (%)	η_{base} (%)	σ_d (%)	cv (%)	η_{topo} (%)	σ_d (%)	cv (%)	η_{base} (%)	σ_d (%)	cv (%)
69,7	2,3	3,3	64,9	2,5	3,9	65,9	3,7	5,6	62,0	4,3	6,9

*cv – coeficiente de variação

* σ_d – desvio padrão

As Figuras 5.14 e 5.15 apresentam resultados de energia determinadas no topo e na base da composição de haste para os ensaios SP02 e SP03, respectivamente. A partir dos resultados é possível observar que as perdas de energia ao longo da composição de haste nos ensaios SP02 e SP03, realizados com equipamento convencional e com duas configurações de luvas (bipartidas e convencionais), não apresentaram diferenças significativas.

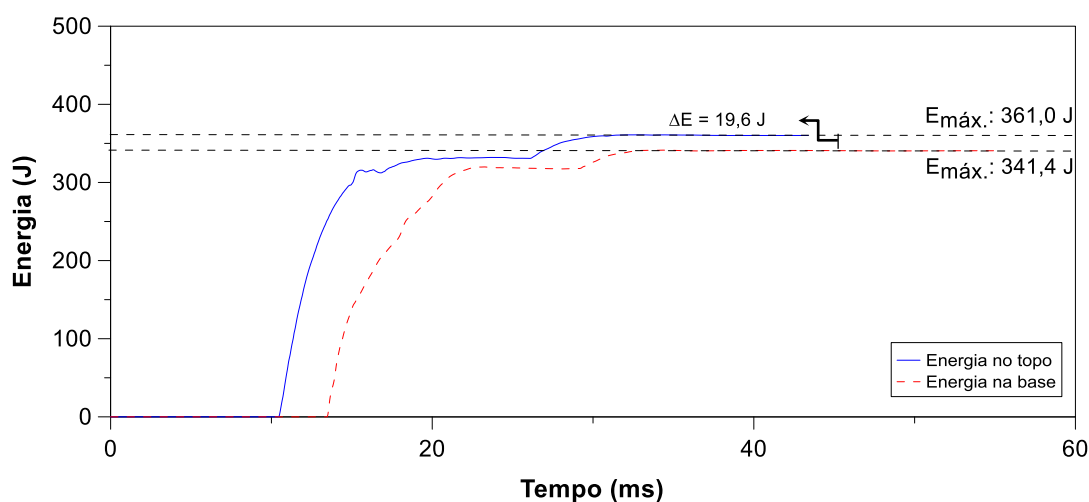


Figura 5.14: Energia versus tempo para a medida simultânea de energia no topo e na base da composição de haste, ensaio SP02, L_h de 11,6 m (luva bipartida).

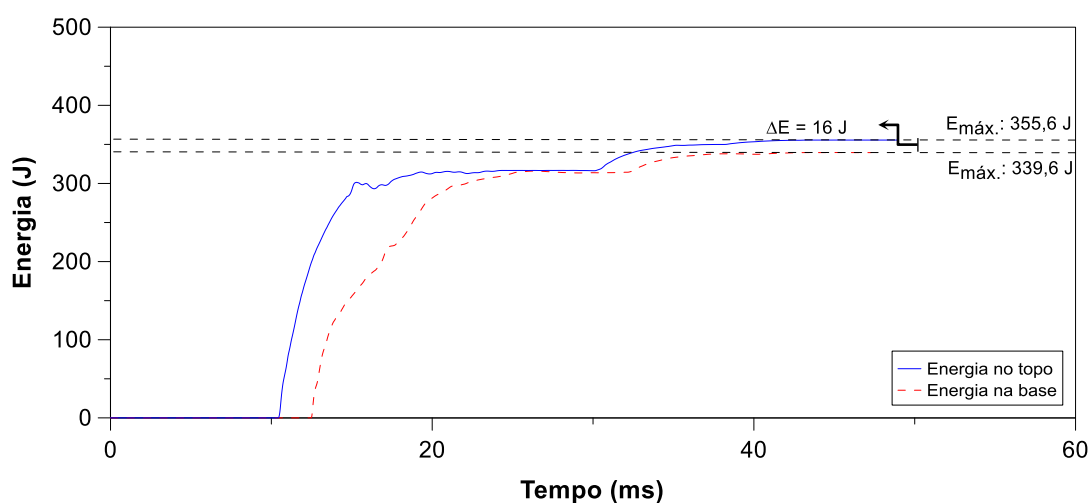


Figura 5.15: Energia versus tempo para a medida simultânea de energia no topo e na base da composição de haste, ensaio SP03, L_h de 11,6 m (luva convencional).

Ao longo do perfil de solo investigado, a perda média de energia para o ensaio SP02 (realizado com luvas bipartidas) foi de 4,8%. Para o ensaio SP03 (realizado com luvas convencionais), a perda média de energia foi de 3,9%, ao longo do perfil. Desta forma, as perdas médias encontradas para ambos os ensaios, apontam que a utilização das luvas bipartidas pouco influenciou nas perdas de energias ao longo da composição de haste. A Figura 5.16 apresenta as perdas de energia (entre o topo e a base da composição de haste) a cada profundidade.

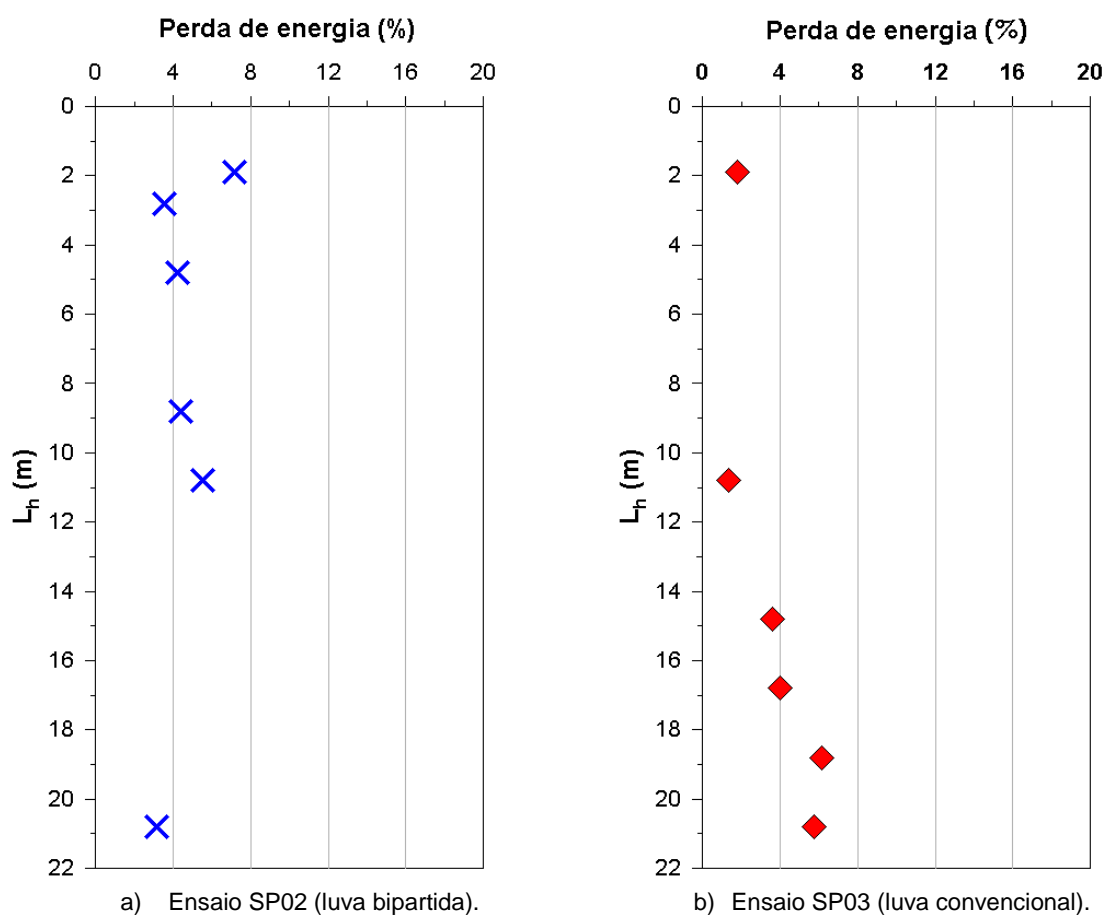


Figura 5.16: Perda de energia *versus* comprimento da composição de haste (L_h).

Lukiantchuki (2012) realizou ensaios SPT com medida simultânea de energia no topo e na base da composição de haste, com duas configurações de equipamento (convencional e mecanizado), nas cidades de Baurú/SP e São Carlos/SP. Para o equipamento convencional, a autora encontrou perdas médias de 19,4% e 16,1%, para comprimentos de haste (L_h) de 12,95m e 10,95 m, respectivamente. A diferença entre os valores de perdas de energia encontrados por Lukiantchuki (2012) e os encontradas neste trabalho, pode estar relacionada aos seguintes fatores: uso da peça maciça sextavada para conexão entre a haste instrumentada inferior e o amostrador, reflexões em forma de ondas de tração nas luvas, características dos

perfis estratigráficos investigados, e variabilidades inerentes ao ensaio SPT realizado com equipamento convencional (excentricidade, atrito nas hastes, etc.). A seguir, serão abordados estes fatores, para os ensaios realizados neste trabalho.

5.2.1 Influência da peça maciça sextavada

Neste trabalho, não foi utilizada a peça maciça sextavada (Figura 3.11), anteriormente mencionada no item 3.3, que possui uma impedância de $86,67 \text{ kN} \times \text{s/m}$, aproximadamente 5 vezes maior que a impedância das hastes da composição de perfuração ($Z = 16,81 \text{ kN.s/m}$). Segundo Lukiantchuki (2012), a peça sextavada causou reflexões na forma de ondas de compressão nos sinais obtidos pela instrumentação posicionada na base da composição (amostrador). Entretanto, o mesmo comportamento de reflexão na forma de onda de compressão foi observado nos ensaios deste trabalho, como pode ser visto na Figura 5.17. Os pontos A e B na Figura 5.17, representam o intervalo de tempo real de propagação da primeira onda de compressão ($\Delta t_{\text{real}} \cong 0,46 \text{ ms}$).

Desta forma, o comportamento de reflexão de onda de compressão quando a onda de tensão chega ao amostrador não é apenas atribuído à utilização da peça maciça sextavada, visto que o mesmo comportamento foi identificado nos ensaios deste trabalho. Assim, é possível atribuir esse comportamento à brusca variação da seção transversal entre a haste e a cabeça do amostrador, que ocasiona a indesejada reflexão de ondas. Entretanto, com relação às perdas, acredita-se que a utilização da peça maciça sextavada cause uma maior perda de energia quando da chegada da onda de tensão no amostrador.

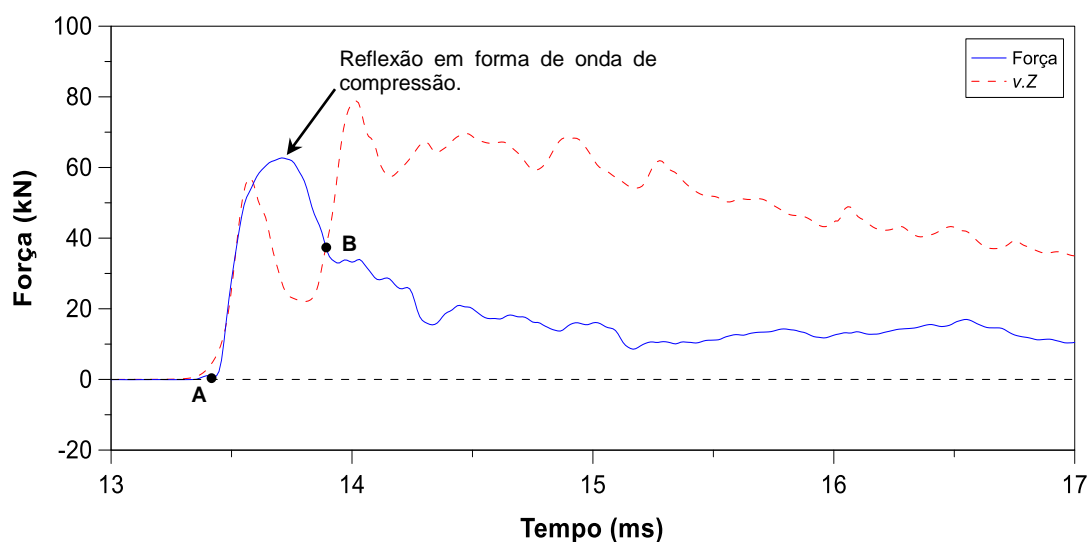


Figura 5.17: Gráfico Força versus tempo e $v.Z$ versus tempo par a instrumentação posicionada na base (amostrador), ensaio SP02, $L_h = 10,8 \text{ m}$.

5.2.2 Reflexões nas luvas

Com relação às perdas de energia nas luvas para conexão entre as hastes, não foram identificadas reflexões significativas ao longo da propagação da onda longitudinal de tensão até o instante $2l/c$. As Figuras 5.18 e 5.19 apresentam comparações entre sinais de força e de velocidade multiplicada pela impedância das hastes, obtidos via instrumentação situada no topo da composição de haste, para os ensaios SP02 e SP03 respectivamente. Os pontos A e B nas Figuras 5.18 e 5.19, indicam o início e o fim da propagação e reflexão da primeira onda de tensão, respectivamente. Ainda são apresentados, os intervalos de duração teórico e real da primeira onda ($2l/c$).

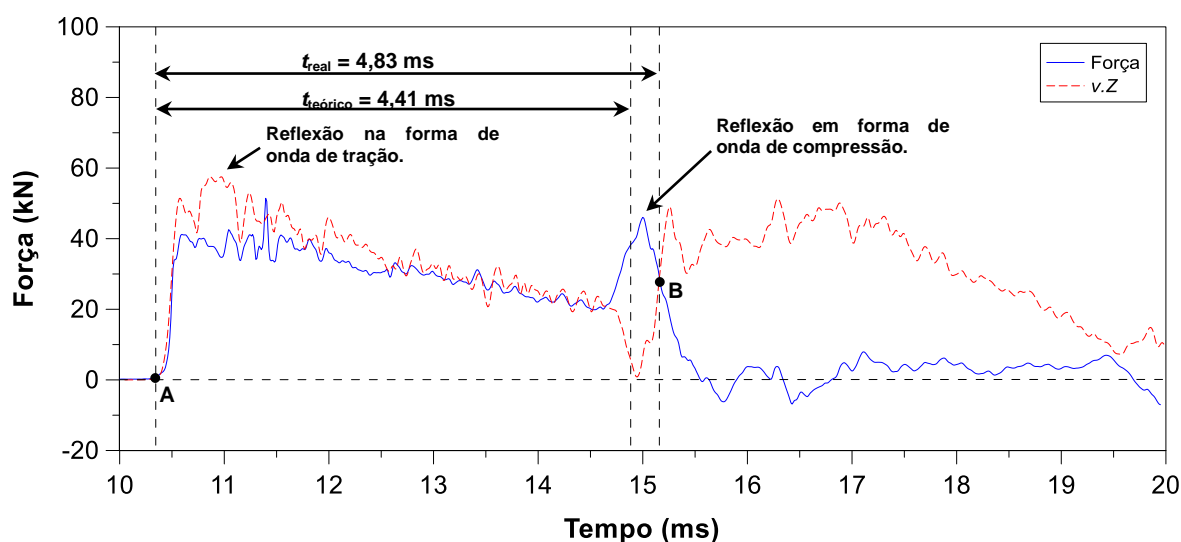


Figura 5.18: Gráfico Força *versus* tempo e *v.Z versus* tempo para a instrumentação posicionada no topo da composição de haste, ensaio SP02, $L_h = 10,8$ m (luva bipartida).

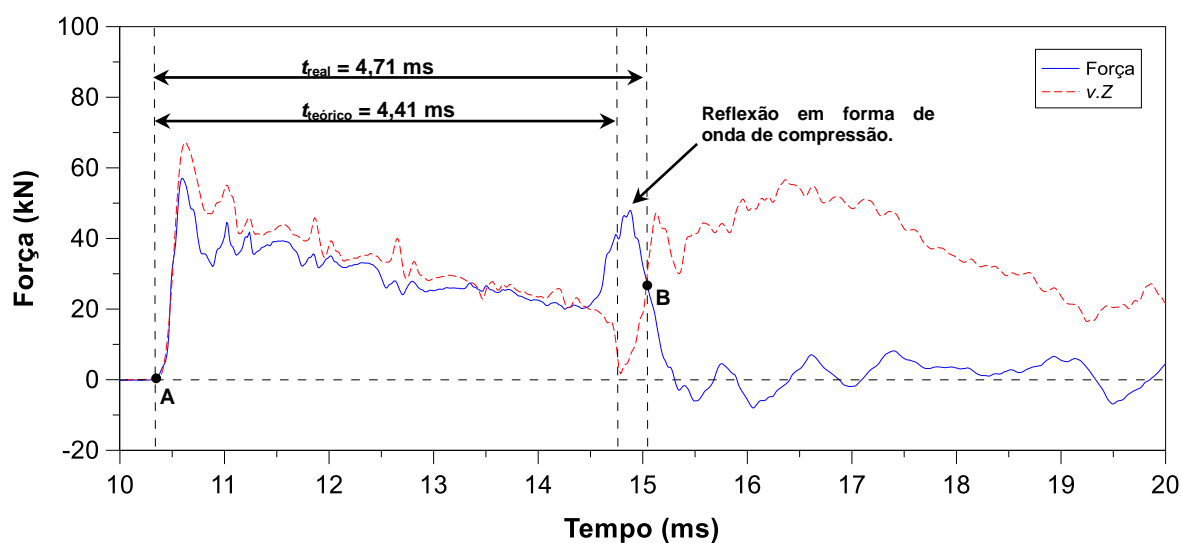


Figura 5.19: Gráfico Força *versus* tempo e *v.Z versus* tempo para a instrumentação posicionada no topo da composição de haste, ensaio SP03, $L_h = 10,8$ m (luva convencional).

Observa-se que o tempo teórico ($t_{\text{teórico}}$) de propagação e reflexão da primeira onda de tensão é o mesmo para os dois ensaios, visto que é dependente apenas do comprimento da composição de haste (adotando $c = 5120$ m/s). Entretanto, os intervalos de tempo real (t_{real}) são diferentes, visto que as interferências à propagação da onda são particulares a cada ensaio (perdas de energia). Para os golpes apresentados nas Figuras 5.18 e 5.19, a redução na velocidade foi de aproximadamente 8,6% e 6,4% para os ensaios SP02 e SP03, respectivamente, em relação à velocidade teórica ($c = 5120$ m/s).

Lukiantchuki (2012) menciona que as reflexões ocorridas sob forma de onda de tração nas luvas são causadas pela diminuição repentina da impedância ou devido a folgas existentes nas luvas, ou seja, pelo mau ajuste entre as roscas das luvas e das hastes. Assim, a partir das Figuras 5.18 e 5.19, observa-se que as reflexões de tração não foram persistentes ao longo da propagação da onda longitudinal de tensão nos ensaios realizados neste trabalho, indicando o bom ajuste entre as luvas e as hastes.

5.2.3 Influência das condições do solo

A respeito das condições do solo, mais precisamente com relação a compacidade e/ou consistência, os resultados dos ensaios SP02 e SP03 demonstraram que para camadas superficiais e de baixa resistência (camadas de consistência muito mole a média), o número de impactos subsequentes durante a cravação do amostrador no solo foi superior, quando comparado com camadas mais profundas e resistentes (camadas de consistência e/ou compacidade classificadas como duras a compactas). Assim, foi necessário um tempo maior para a total dissipação da energia disponibilizada à cravação do amostrador, no caso das camadas de solo de baixa resistência.

As Figuras 5.20 a 5.22 apresentam resultados típicos obtidos nos ensaios realizados, onde é possível identificar os impactos responsáveis pela cravação do amostrador. Outros resultados são apresentados no Apêndice C.

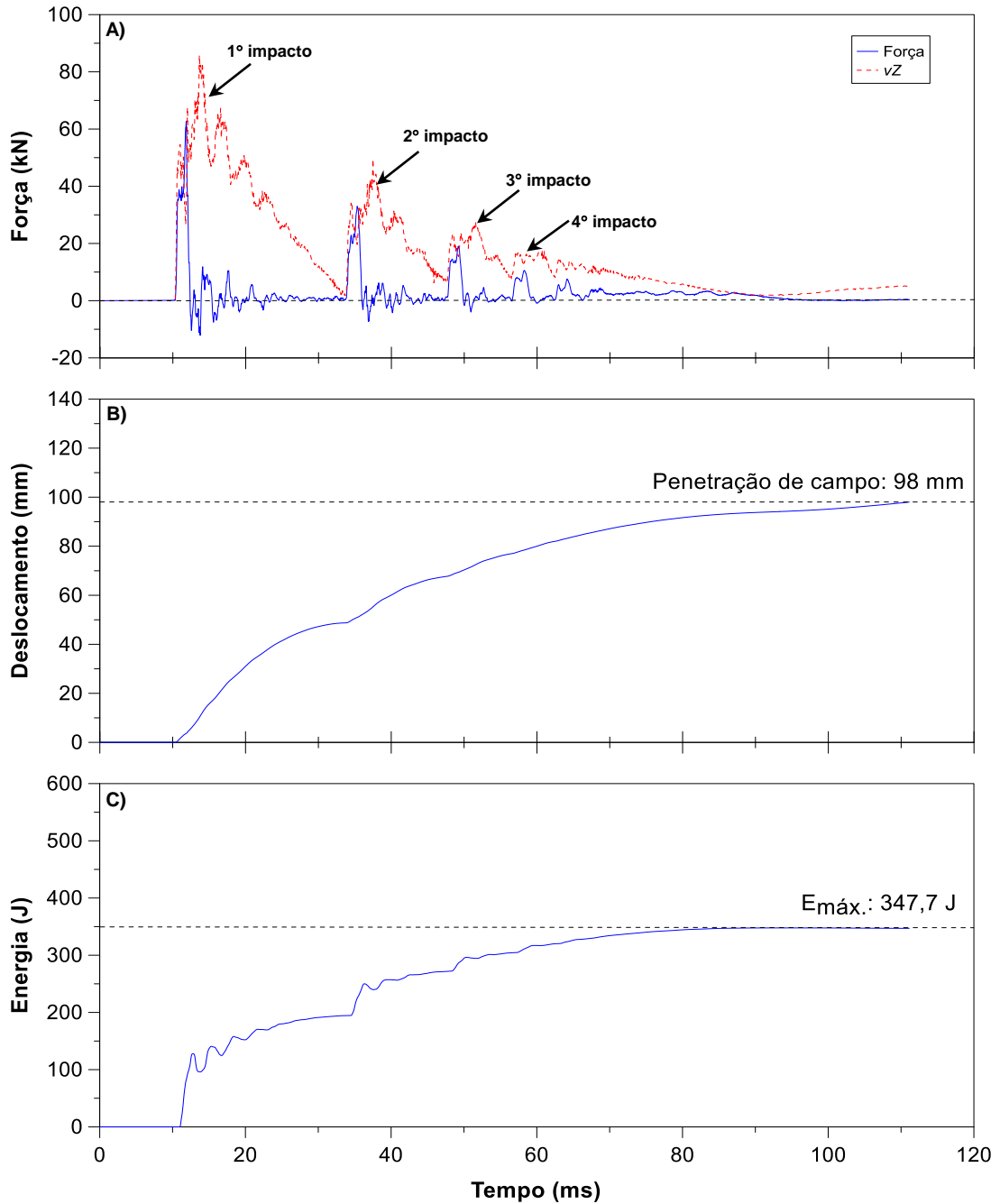


Figura 5.20: Efeito das condições do solo: ensaio SP02, $L_h = 2,8$ m, golpe 4 e $N_{SPT} = 2,9$. A) Sinais de força versus tempo e $v.Z$ versus tempo, medidas no topo da composição de haste; B) Deslocamento calculado; C) Energia entregue ao solo.

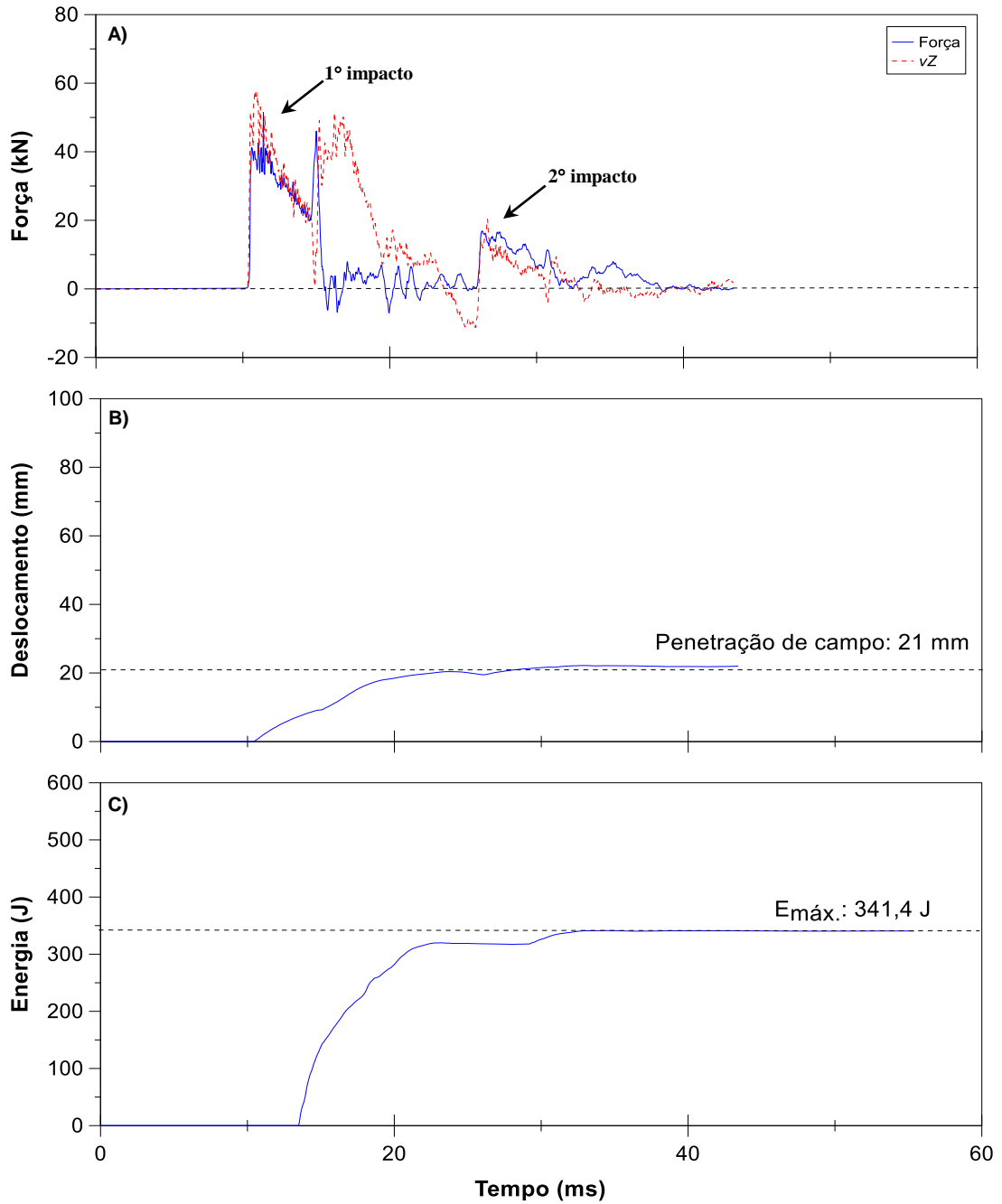


Figura 5.21: Efeito das condições do solo: ensaio SP02, $L_h = 10,8$ m, golpe 14 e $N_{SPT} = 12,4$. A) Sinais de força *versus* tempo e *v.Z versus* tempo, medidas no topo da composição de haste; B) Deslocamento calculado; C) Energia entregue ao solo.

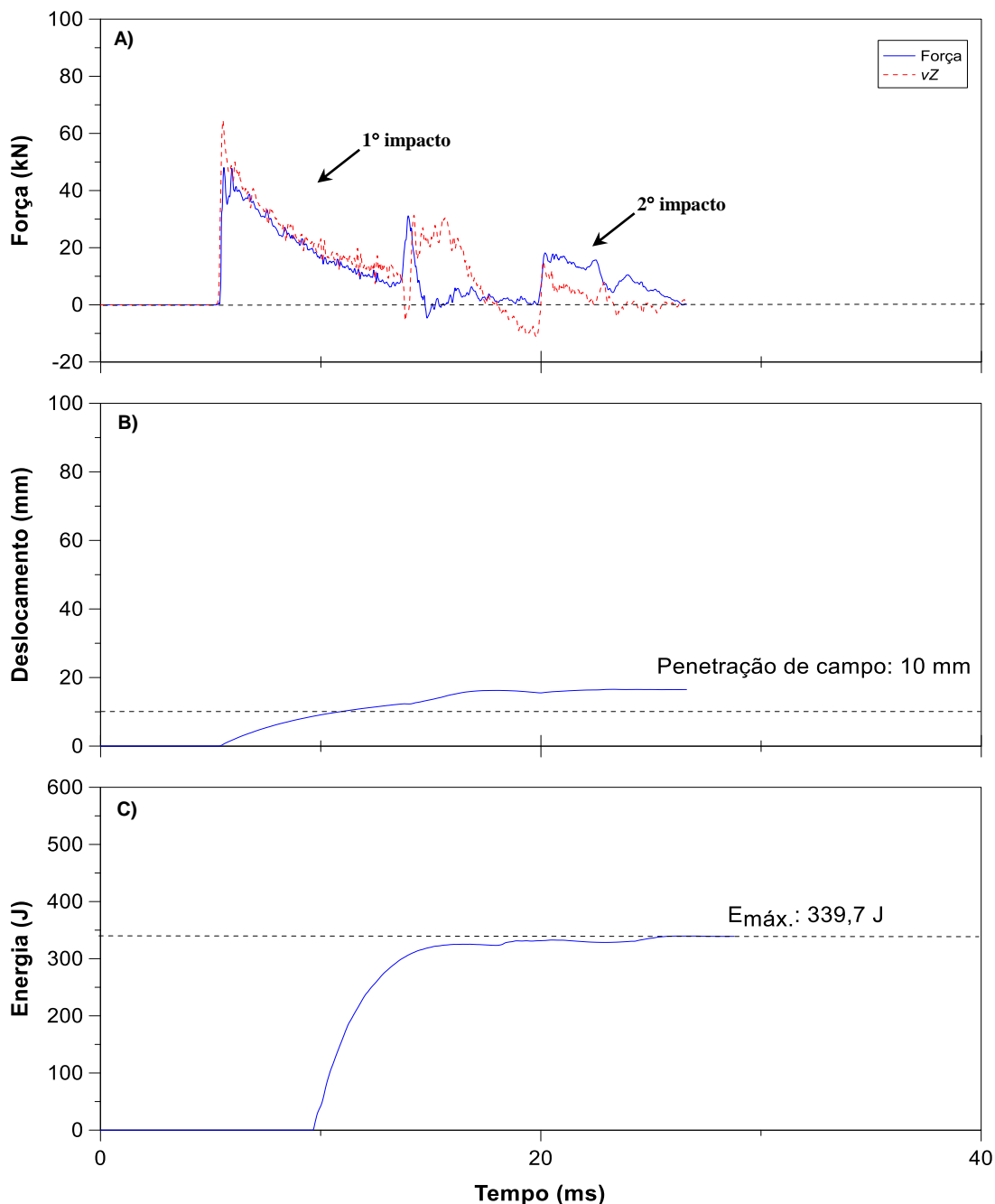


Figura 5.22: Efeito das condições do solo: ensaio SP02, $L_h = 20,8$ m, golpe 25 e $N_{SPT} = 21,7$. A) Sinais de força versus tempo e $v.Z$ versus tempo, medidas no topo da composição de haste; B) Deslocamento calculado; C) Energia entregue ao solo.

As Figuras 5.20 a 5.22 mostram os efeitos da compactidade das camadas de solo na energia transmitida e nos sinais registrados pela instrumentação. Observa-se que no caso de solos de baixa resistência as ondas refletidas possuem maior intensidade e voltam com quantidade de energia capaz de causar deslocamentos adicionais no amostrador, como pode ser visto nos impactos subsequentes da Figura 5.20 (Lobo, 2009; Lukiantchuki, 2012). Entretanto, para solos mais resistentes (Figura 5.22), a energia disponibilizada é logo consumida na cravação do amostrador, resultando em um número menor de impactos subsequentes.

Apesar dos diferentes comprimentos de haste e profundidades das camadas, a quantidade de energia transferida ao amostrador é praticamente a mesma, para os golpes apresentados nas Figuras 5.20 a 5.22. Tal fato comprova que a quantidade de energia é independente das condições de compactação do solo, como já observado por Lukiantchuki (2012).

A partir dos resultados observou-se que nos solos de baixa resistência, o intervalo de tempo entre os impactos subsequentes diminuiu gradativamente com o avanço da cravação, visto que cada novo impacto possuía menor intensidade e intervalo de tempo (ver Figura 5.20). Para os ensaios realizados neste trabalho, o tempo médio de duração dos golpes foi de 30 ms para as camadas mais resistentes (N_{SPT} de 20 a 33 golpes) e de 120 ms para as camadas menos resistentes (N_{SPT} de 2,8 a 4,3 golpes).

5.2.4 Determinação da eficiência (η_I)

A partir dos dados de energia (topo e a base) foram calculados os respectivos valores de eficiência η_I (Equação 2.67). Os resultados médios de η_I (topo e base) são apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10: Resultados de eficiência do martelo (η_I).

Ensaio SP02		Ensaio SP03	
η_I (topo)	η_I (base)	η_I (topo)	η_I (base)
0,709	0,663	0,662	0,633
σ_a	σ_a	σ_a	σ_a
0,022	0,025	0,035	0,042
cv (%)	cv (%)	cv (%)	cv (%)
3,1	3,7	5,3	6,7

* σ_a – desvio padrão
*cv – coeficiente de variação (%)

Os dados da Tabela 5.10 mostram que, nos dois ensaios realizados a variabilidade é maior para a seção situada na base da composição de hastes. Observa-se também que tanto para o valor médio de topo como para o de base, o ensaio SP03 (realizado com luvas convencionais) é o que apresenta maior variabilidade.

O resultado médio de η_I (topo) encontrado por Lukiantchuki (2012) ($\eta_I = 0,751$) foi semelhante ao valor encontrado por Odebrecht (2003) ($\eta_I = 0,764$). Considerando que os ensaios deste trabalho foram realizados com o mesmo equipamento de sondagem SPT, o valor médio de η_I (topo) pode ser adotado como 0,686. Assim, o valor médio de η_I (topo) para os ensaios deste trabalho apresentaram-se com considerável diferença dos encontrados por Odebrecht (2003) e Lukiantchuki (2012). Tal fato pode ser explicado pela diferença entre os equipamentos utilizados pelos autores e o utilizado neste trabalho.

Para a eficiência do martelo η_1 (base), observa-se que há uma menor discrepância entre os valores médios obtidos em cada ensaio (Tabela 5.10). Optou-se por não adotar um valor médio de η_1 (base) devido ao fato de terem sido usadas diferentes configurações de luvas para conexão entre as hastes (bipartida e convencional) nos ensaios SP02 e SP03. Entretanto, no geral, os valores médios de η_1 (base) encontrados apresentaram-se superiores ao valor médio η_1 (base) encontrado por Lukiantchuki (2012) ($\eta_1 = 0,569$).

As variações da eficiência do martelo (η_1) nos ensaios SP02 e SP03 (topo e a base) em função do comprimento da composição de haste são apresentadas nas Figuras 5.23 e 5.24.

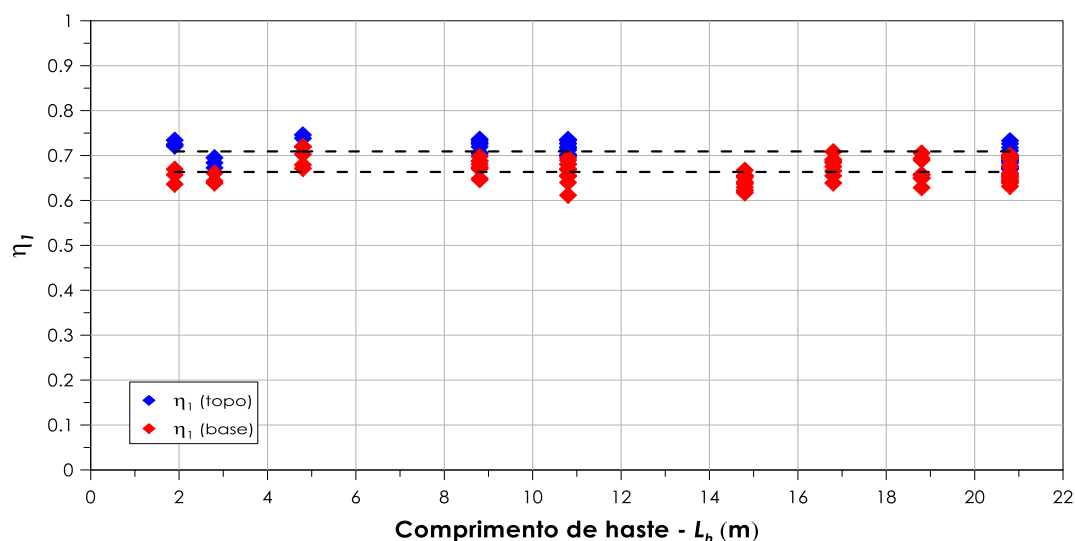


Figura 5.23: Eficiência do martelo (η_1) versus comprimento de haste, ensaio SP02 (luvas bipartidas).

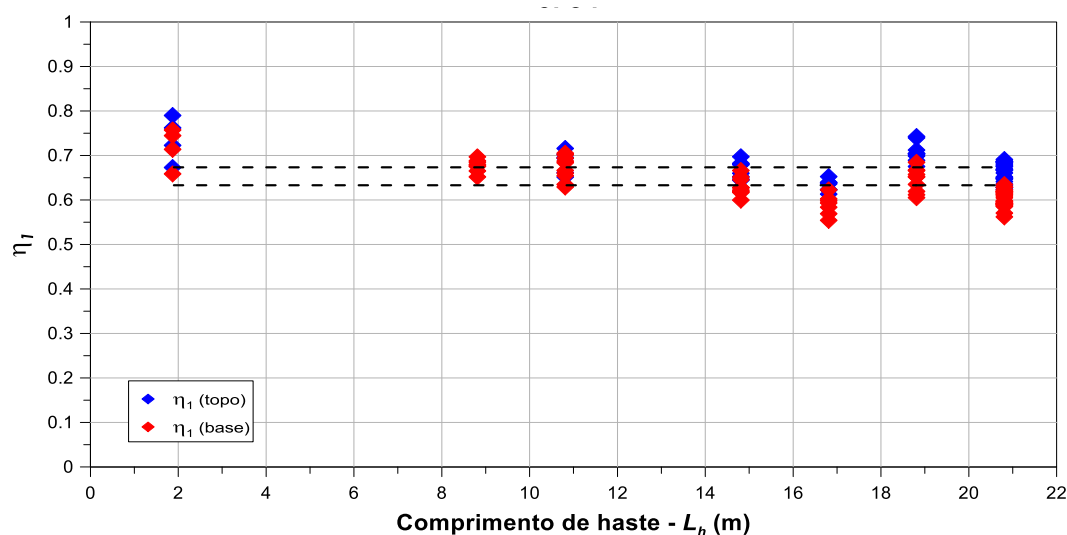


Figura 5.24: Eficiência do martelo (η_1) versus comprimento de haste, ensaio SP03 (luvas convencionais).

Os gráficos das Figuras 5.23 e 5.24 mostram que as eficiências do martelo (η_1) (topo e base), para os ensaios deste trabalho, apresentaram praticamente o mesmo comportamento com relação à dispersão dos valores de η_1 . Assim, é possível concluir que não houve

tendência de variação da eficiência (η_1), para a seção situada na base da composição de hastes.

5.3 Resistência Dinâmica do Solo no Ensaio SPT (R_D)

Os perfis de resistência dinâmica do solo foram obtidos por meio da força normal numa seção localizada na base da composição de hastes (acima do amostrador), conforme mencionado no item 3.5.

Os valores de R_D foram determinados para os últimos 0,15 m de penetração do amostrador no solo, para os ensaios SP02 e SP03. Não foi possível determinar as resistências dinâmicas para o ensaio SP01, visto que este ensaio foi realizado com instrumentação para medida de energia (célula de carga e acelerômetros) apenas no topo da composição de hastes. As Tabelas 5.11 a 5.14 apresentam os resultados de R_D , determinados para os perfis investigados nos ensaios SP02 e SP03 respectivamente, com profundidade variando entre 1 a 20 m.

Tabela 5.11: Resultados experimentais de R_D - ensaio SP02 (luvas bipartidas), profundidades de 1 a 10 m (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).

Profundidade (m)	L_h (m)	Golpe n°	ρ (m)	R_D (kN)
1	1,9	3	0,097	2,8
		4	0,102	3,5
		5	0,125	2,5
Média				2,9
2	2,8	3	0,100	3,5
		4	0,098	3,5
Média				3,5
4	4,8	5	0,063	5,2
		6	0,060	5,3
		7	0,058	5,3
Média				5,3
8	8,8	7	0,029	7,5
		8	0,035	8,1
		9	0,028	10,0
		10	0,027	10,9
		11	0,029	12,0
Média				9,7
10	10,8	8	0,026	11,5
		9	0,022	11,9
		10	0,022	11,6
		11	0,022	12,6
		12	0,019	14,0
		13	0,021	13,2
Média				12,6

Tabela 5.12: Resultados experimentais de R_D - ensaio SP02 (luvas bipartidas), profundidades de 14 a 20 m (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP)..

Profundidade (m)	L_h (m)	Golpe n°	ρ (m)	R_D (kN)
14	14,8	8	0,021	10,5
		9	0,025	10,3
		10	0,021	16,4
		11	0,019	15,6
		12	0,019	16,0
		13	0,017	14,3
		14	0,018	14,3
			Média	13,9
16	16,8	6	0,030	10,6
		7	0,032	11,1
		8	0,023	11,7
		9	0,024	12,1
		10	0,020	12,2
			Média	11,6
18	18,8	6	0,028	7,2
		7	0,022	9,6
		8	0,026	11,8
		10	0,022	14,0
		11	0,021	14,7
		12	0,018	14,9
			Média	12,0
20	20,8	13	0,013	19,2
		15	0,011	21,1
		17	0,011	21,4
		18	0,013	23,6
		19	0,013	22,1
		20	0,010	22,3
		21	0,010	23,8
		22	0,011	24,6
		23	0,009	25,6
		24	0,010	25,4
		25	0,010	25,2

Tabela 5.13: Resultados experimentais de R_D - ensaio SP03 (luvas convencionais), profundidades de 1 a 18 m (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).

Profundidade (m)	L_h (m)	Golpe n°	ρ (m)	R_D (kN)
1	1,9	3	0,097	3,9
		4	0,102	3,9
		5	0,125	3,8
Média				3,8
8	8,8	7	0,031	8,1
		8	0,034	8,4
		9	0,035	8,8
		10	0,034	9,3
		11	0,030	9,3
Média				8,8
10	10,8	7	0,025	10,3
		8	0,026	10,2
		9	0,029	11,4
		10	0,025	11,2
		11	0,021	11,6
		12	0,022	11,9
		13	0,023	11,9
Média				11,2
14	14,8	6	0,033	10,1
		7	0,027	11,0
		10	0,023	10,8
		11	0,022	11,5
		12	0,021	11,3
		13	0,016	11,9
Média				11,1
16	16,8	5	0,038	7,0
		6	0,032	8,0
		7	0,031	9,0
		8	0,029	7,4
		9	0,026	9,2
Média				8,1
18	18,8	7	0,029	10,6
		8	0,022	11,2
		9	0,023	13,0
		10	0,019	13,2
		11	0,019	14,2
		13	0,021	15,4
Média				13,0

Tabela 5.14: Resultados experimentais de R_D - ensaio SP03 (luvas convencionais), profundidades de 20 m (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).

Profundidade (m)	L_h (m)	Golpe n°	ρ (m)	R_D (kN)
20	20,8	19	0,009	27,5
		20	0,009	28,9
		21	0,009	28,1
		22	0,009	28,5
		23	0,009	28,8
		24	0,008	30,2
		25	0,009	29,2
		26	0,008	29,8
		27	0,007	30,1
		28	0,008	30,7
		29	0,008	30,6
		30	0,007	30,9
		31	0,007	31,8
		32	0,006	31,8
		33	0,008	31,7
		34	0,008	32,2
		35	0,003	32,6
		36	0,011	32,5
		37	0,009	32,6
			Média	30,4

As resistências dinâmicas apresentadas nas Tabelas 5.11 a 5.14, foram calculadas com base na proposta de Lukiantchuki (2012) (item 3.5) e, para tanto, foram utilizados golpes que apresentassem consistência e qualidade nos sinais de força e aceleração. A seguir, são apresentados alguns gráficos que correspondem a sinais de força e ao deslocamento do amostrador registrados para os ensaios SP02 e SP03.

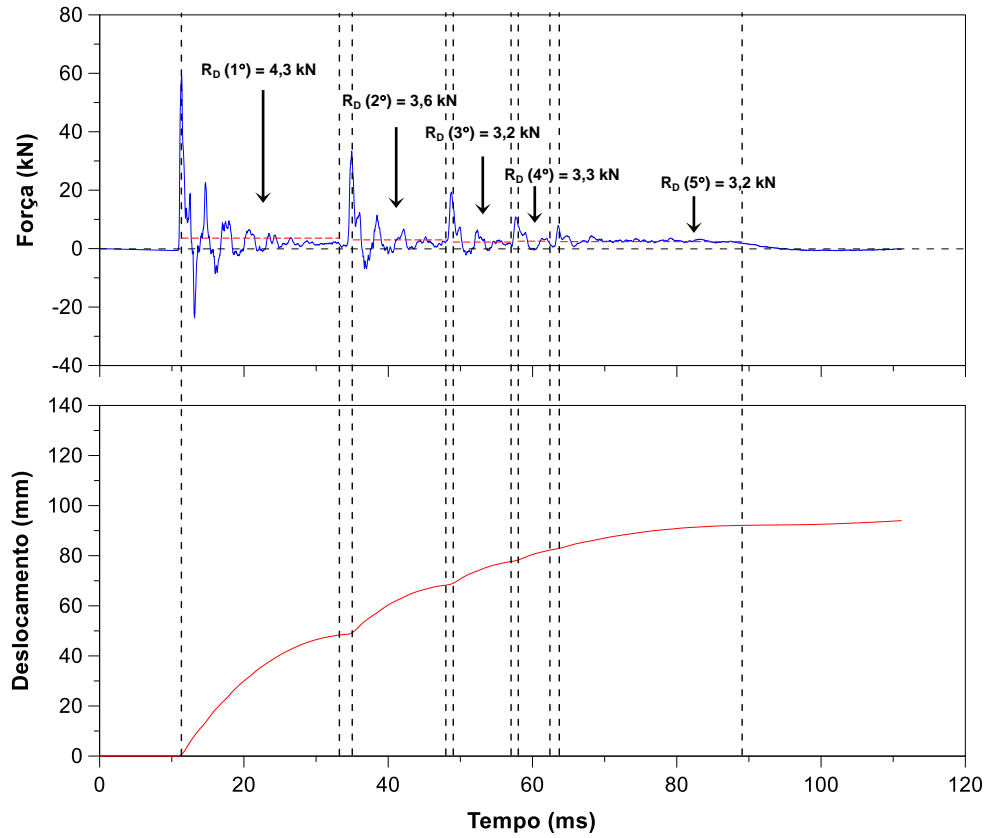


Figura 5.25: Resistência dinâmica do solo. Ensaio SP02, profundidade 2 m, golpe 4.

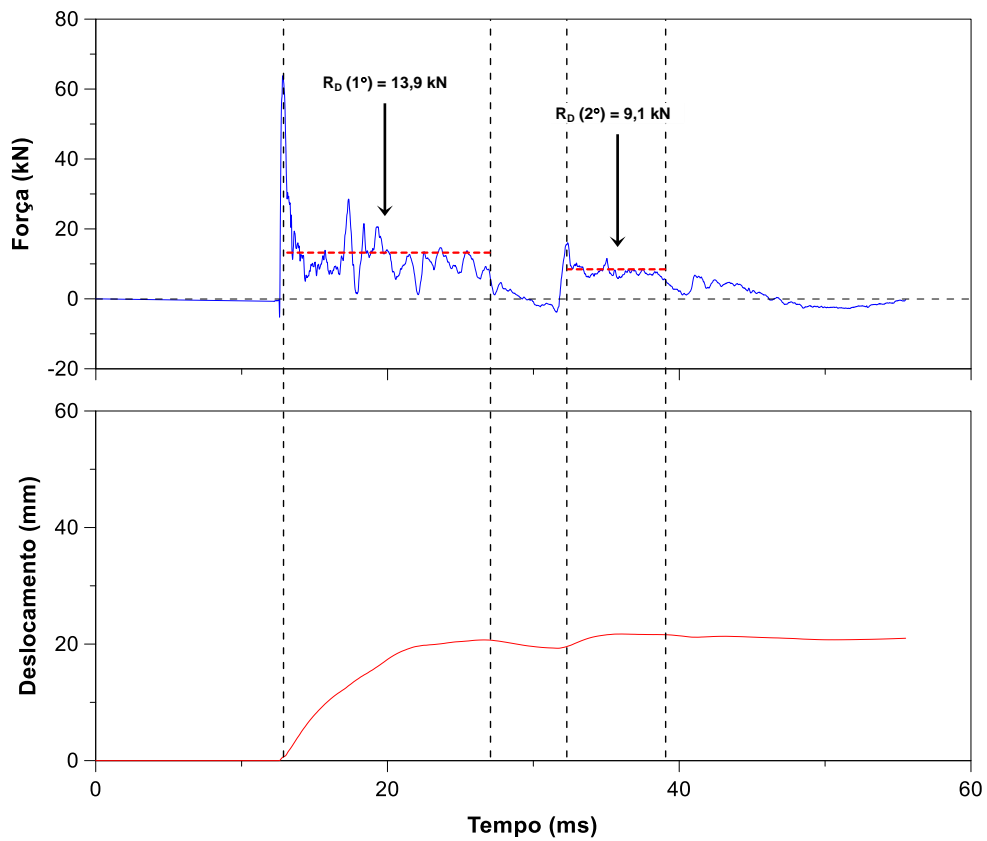


Figura 5.26: Resistência dinâmica do solo. Ensaio SP02, profundidade 10 m, golpe 8.

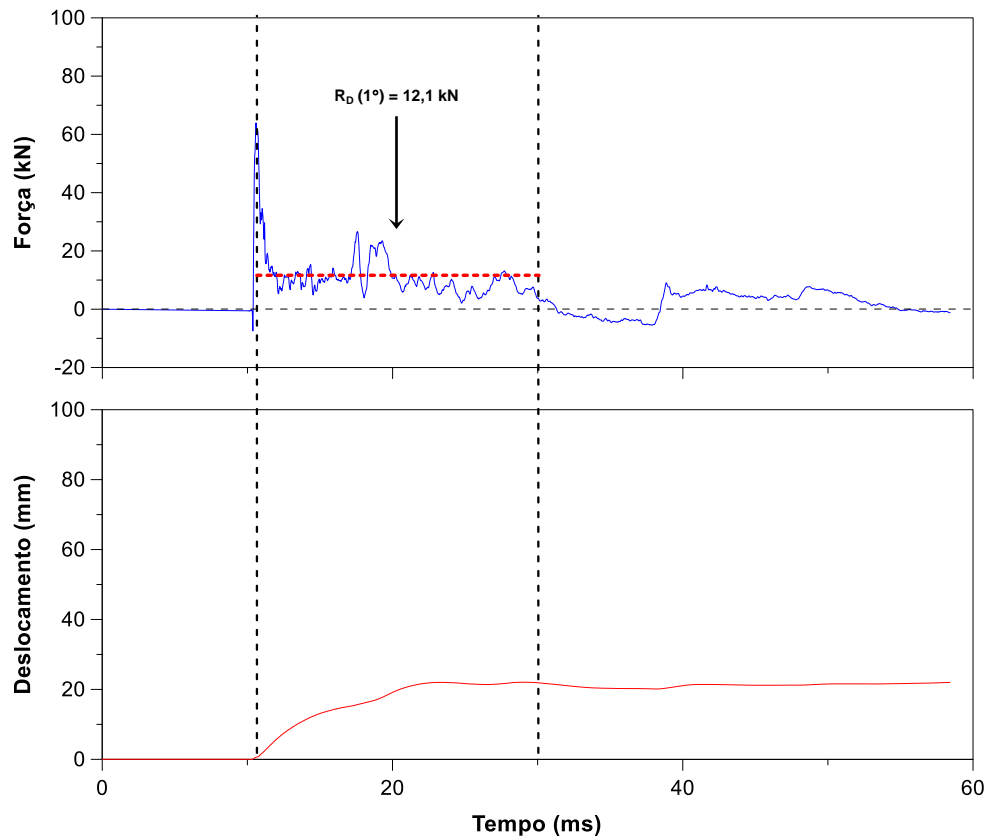


Figura 5.27: Resistência dinâmica do solo. Ensaio SP02, profundidade 16 m, golpe 9.

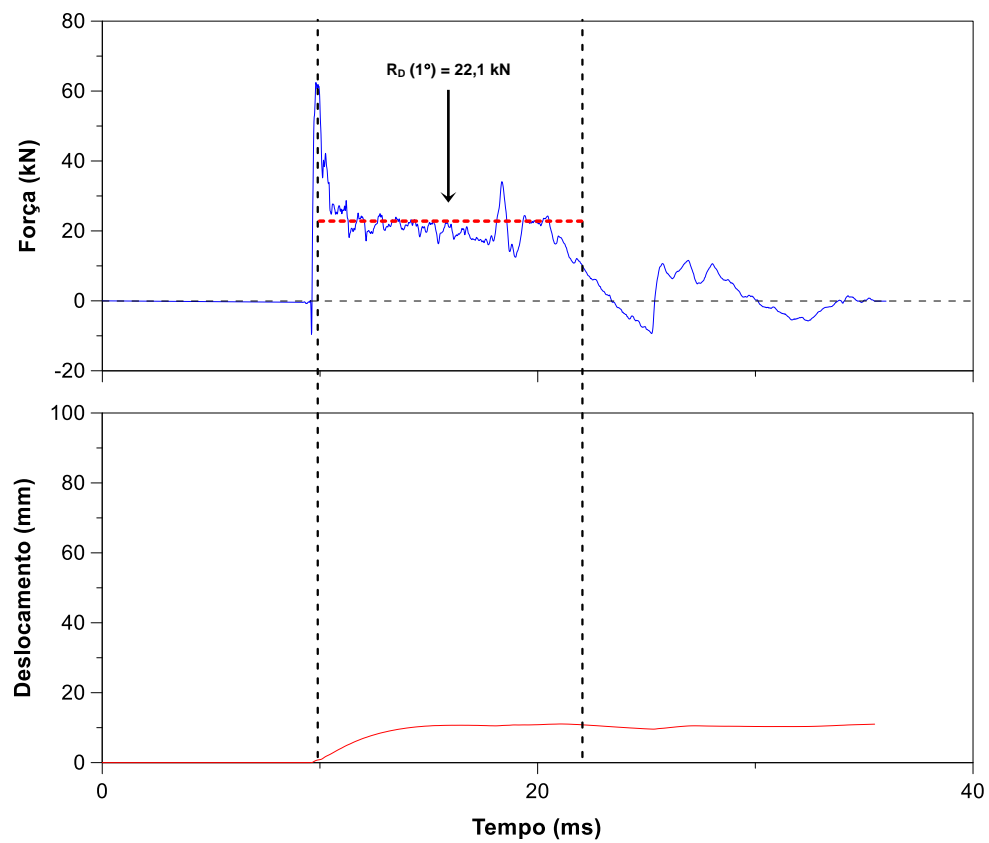


Figura 5.28: Resistência dinâmica do solo. Ensaio SP02, profundidade 20 m, golpe 19.

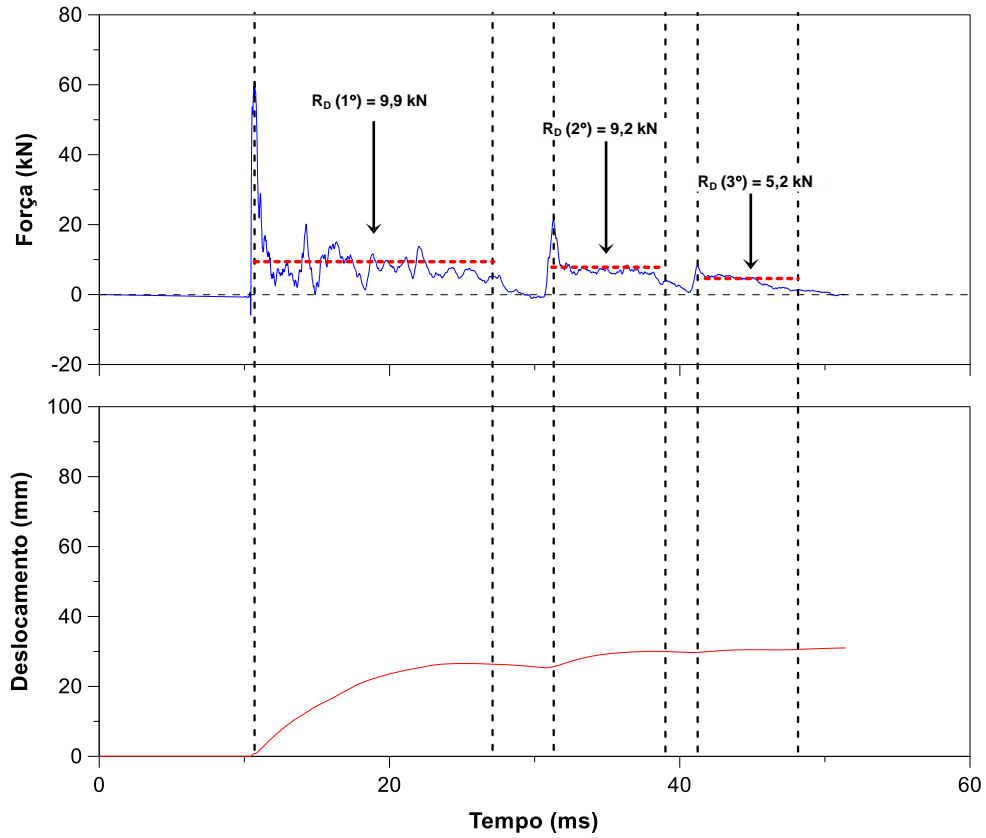


Figura 5.29: Resistência dinâmica do solo. Ensaio SP03, profundidade 8 m, golpe 7.

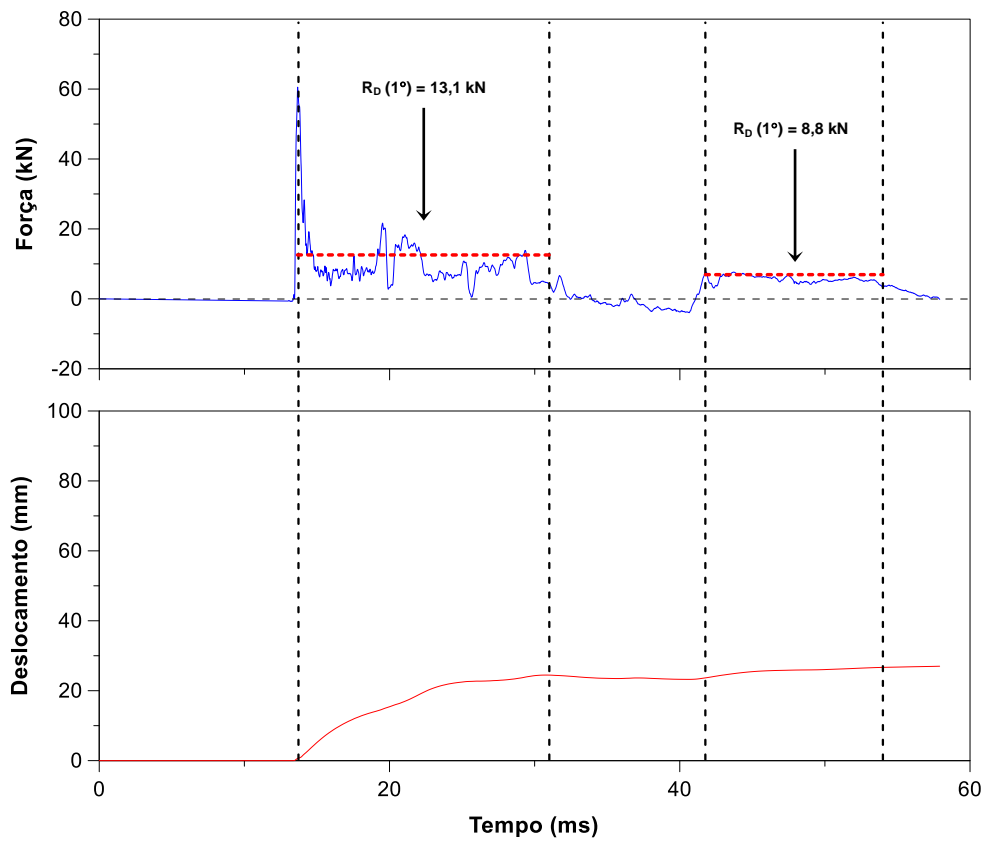


Figura 5.30: Resistência dinâmica do solo. Ensaio SP03, profundidade 14 m, golpe 7.

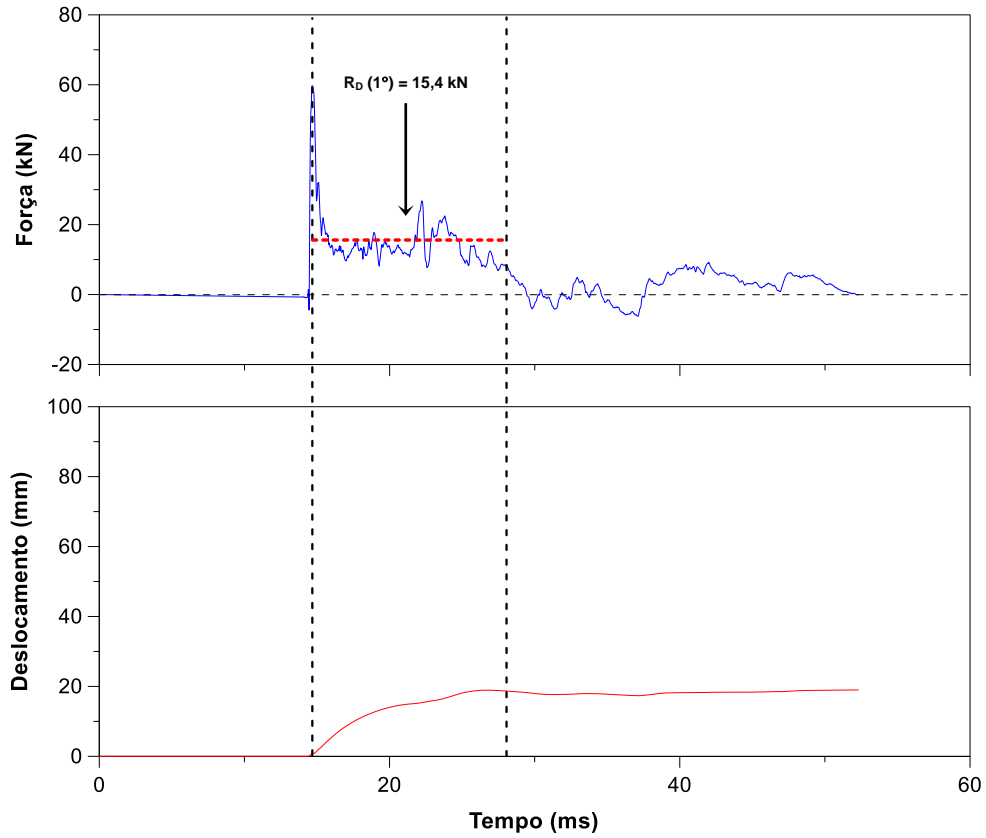


Figura 5.31: Resistência dinâmica do solo. Ensaio SP03, profundidade 18 m, golpe 13.

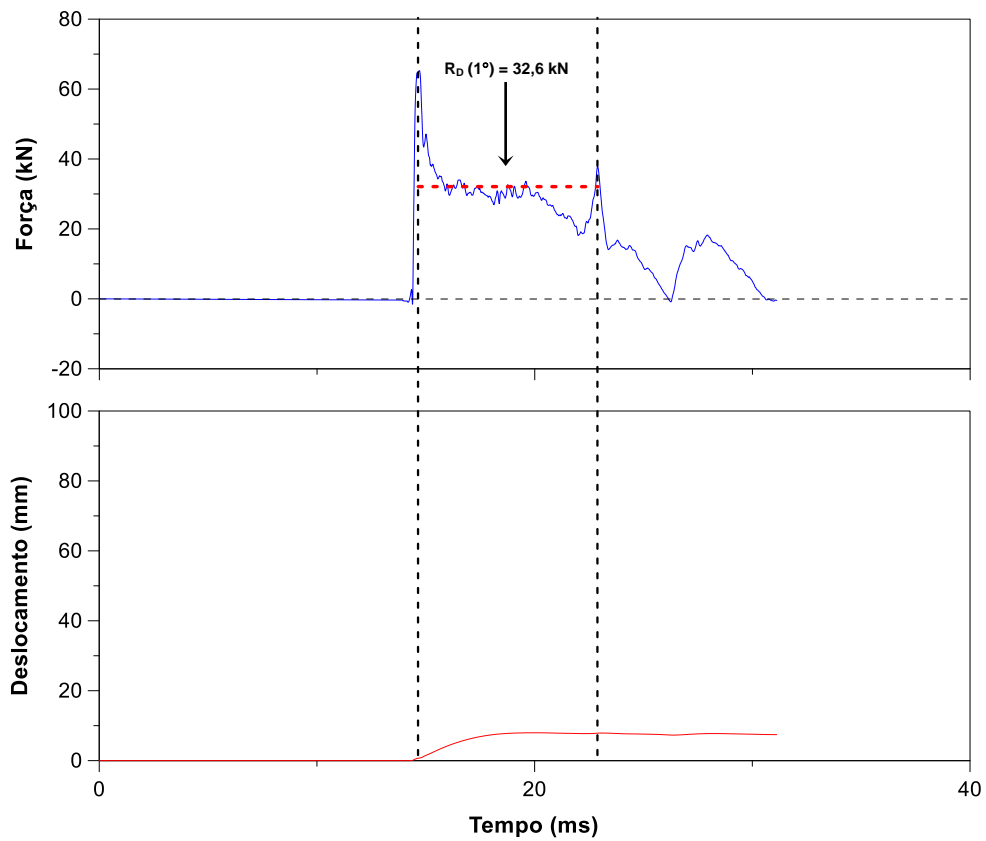


Figura 5.32: Resistência dinâmica do solo. Ensaio SP03, profundidade 20 m, golpe 35.

5.3.1 Resultados experimentais e teóricos de resistência dinâmica

De posse dos valores experimentais de R_D (Tabelas 5.11 a 5.14), foi feita a comparação com os resultados teóricos de resistência dinâmica (F_D), segundo a proposta de Schnaid et al. (2009) (Equação 2.91).

Nos cálculos dos valores de F_D , assumiu-se que os coeficientes η_1 , η_2 e η_3 eram iguais a: 0,764, 1 e $(1-0,0042.L_h)$ respectivamente, segundo proposto por Odebrecht (2003). Os resultados teóricos de resistência dinâmica do solo são apresentados nas Tabelas 5.15 a 5.18.

Tabela 5.15: Resultados de F_D - ensaio SP02 (luvas bipartidas), profundidades de 1 a 10 m (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).

Profundidade (m)	L_h (m)	Golpe n°	ρ (m)	F_D (kN)
1	1,9	3	0,097	4,3
		4	0,102	4,1
		5	0,125	3,4
Média				3,9
2	2,8	3	0,100	4,2
		4	0,098	4,3
Média				4,2
4	4,8	5	0,063	6,3
		6	0,060	6,6
		7	0,058	6,8
Média				6,6
8	8,8	7	0,029	12,9
		8	0,035	10,8
		9	0,028	13,3
		10	0,027	13,8
		11	0,029	12,9
Média				12,7
10	10,8	8	0,026	14,2
		9	0,022	16,6
		10	0,022	16,6
		11	0,022	16,6
		12	0,019	19,1
		13	0,021	17,4
		14	0,021	17,4
Média				16,9

Tabela 5.16: Resultados de F_D - ensaio SP02 (luvas bipartidas), profundidades de 14 a 20 m (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).

Profundidade (m)	L_h (m)	Golpe n°	ρ (m)	F_D (kN)
14	14,8	8	0,021	17,2
		9	0,025	14,6
		10	0,021	17,2
		11	0,019	18,9
		12	0,019	18,9
		13	0,017	21,1
		14	0,018	19,9
			Média	18,3
16	16,8	6	0,030	12,3
		7	0,032	11,6
		8	0,023	15,7
		9	0,024	15,1
		10	0,020	17,9
			Média	14,5
18	18,8	6	0,028	13,0
		7	0,022	16,3
		8	0,026	13,9
		10	0,022	16,3
		11	0,021	17,0
		12	0,018	19,7
			Média	16,0
20	20,8	13	0,013	26,7
		15	0,011	31,4
		17	0,011	31,4
		18	0,013	26,7
		19	0,013	26,7
		20	0,010	34,4
		21	0,010	34,4
		22	0,011	31,4
		23	0,009	38,1
		24	0,010	34,4
		25	0,010	34,4

Tabela 5.17: Resultados de F_D - ensaio SP03 (luvas bipartidas), profundidades de 1 a 18 m (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).

Profundidade (m)	L_h (m)	Golpe n°	ρ (m)	F_D (kN)		
1	1,9	3	0,097	4,3		
		4	0,102	4,1		
		5	0,125	3,4		
Média				3,9		
8	8,8	7	0,031	12,1		
		8	0,034	11,1		
		9	0,035	10,8		
		10	0,034	11,1		
		11	0,030	12,5		
Média				11,5		
10	10,8	7	0,025	14,7		
		8	0,026	14,2		
		9	0,029	12,8		
		10	0,025	14,7		
		11	0,021	17,4		
		12	0,022	16,6		
14	14,8	13	0,023	16,0		
		Média				15,2
		6	0,033	11,3		
		7	0,027	13,6		
		10	0,023	15,8		
		11	0,022	16,5		
16	16,8	12	0,021	17,2		
		13	0,016	22,3		
		Média				16,1
		5	0,038	9,9		
		6	0,032	11,6		
18	18,8	7	0,031	11,9		
		8	0,029	12,7		
		9	0,026	14,0		
		Média				12,0
		7	0,029	12,6		
18	18,8	8	0,022	16,3		
		9	0,023	15,6		
		10	0,019	18,7		
		11	0,019	18,7		
		13	0,021	17,0		
Média				16,5		

Tabela 5.18: Resultados de F_D - ensaio SP03 (luvas bipartidas), profundidades de 20 m (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).

Profundidade (m)	L_h (m)	Golpe nº	ρ (m)	F_D (kN)
20	20,8	19	0,009	38,1
		20	0,009	38,1
		21	0,009	38,1
		22	0,009	38,1
		23	0,009	38,1
		24	0,008	42,7
		25	0,009	38,1
		26	0,008	42,7
		27	0,007	48,7
		28	0,008	42,7
		29	0,008	42,7
		30	0,007	48,7
		31	0,007	48,7
		32	0,006	56,6
		33	0,008	42,7
		34	0,008	42,7
		35	0,003	112,2
		36	0,011	31,4
		37	0,009	38,1
			Média	45,8

A partir dos resultados apresentados nas Tabelas 5.15 a 5.18, constata-se que os valores teóricos de resistência dinâmica aumentaram com a profundidade do perfil investigado. Assim, a proposta de Schnaid et al. (2009) foi capaz de identificar as variações na resistência dinâmica em função da penetração do amostrador, visto que, pequenas penetrações resultaram num maior valor de F_D (camadas profundas), enquanto que para grandes penetrações, resultaram em menores valores de F_D (camadas superficiais).

Entretanto, ao comparar os resultados teóricos (F_d) e os experimentais (R_D) obtidos para os ensaios SP02 e SP03, os valores teóricos de resistência dinâmica foram superiores aos experimentais em ambos os ensaios (Figura 5.33). A discrepância entre R_D e F_D apresentou tendência de aumento com o aumento da resistência do solo, como pode ser observado nas Figuras 5.34 e 5.35

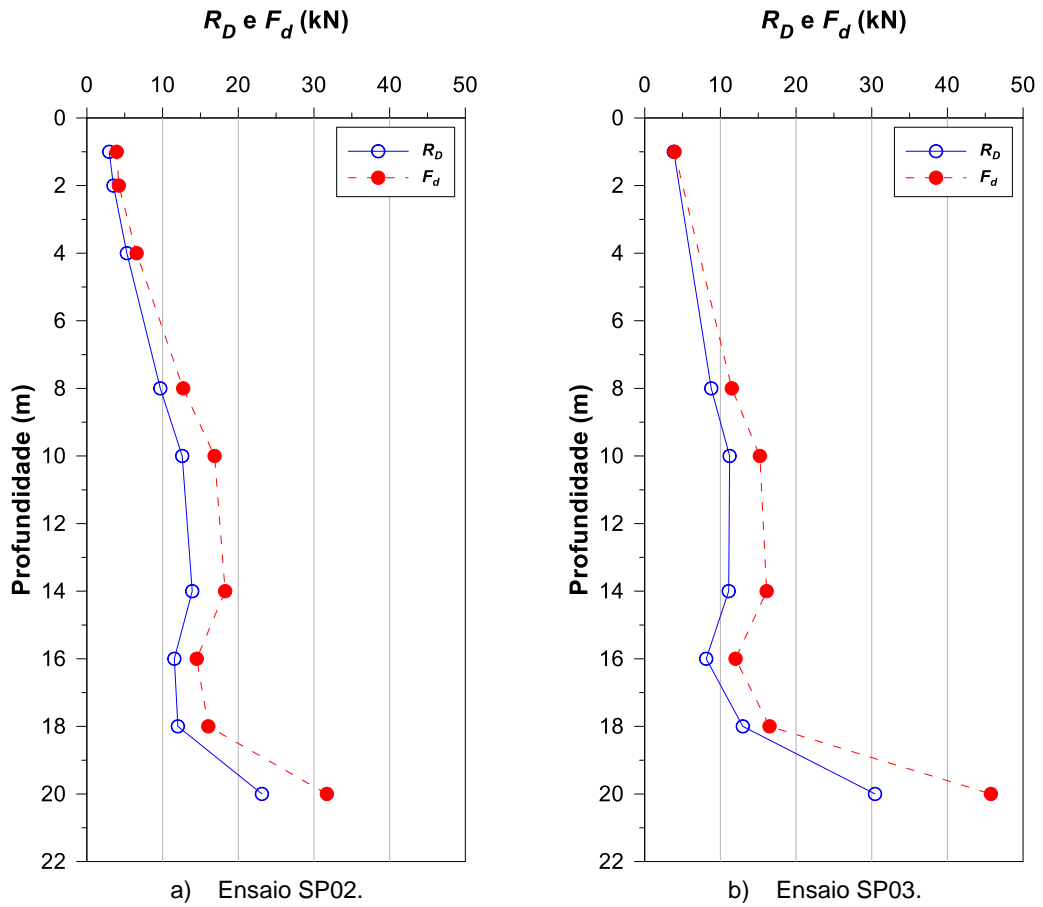


Figura 5.33: Perfil de resistência dinâmica experimental e teórica, ensaios SP02 e SP03.

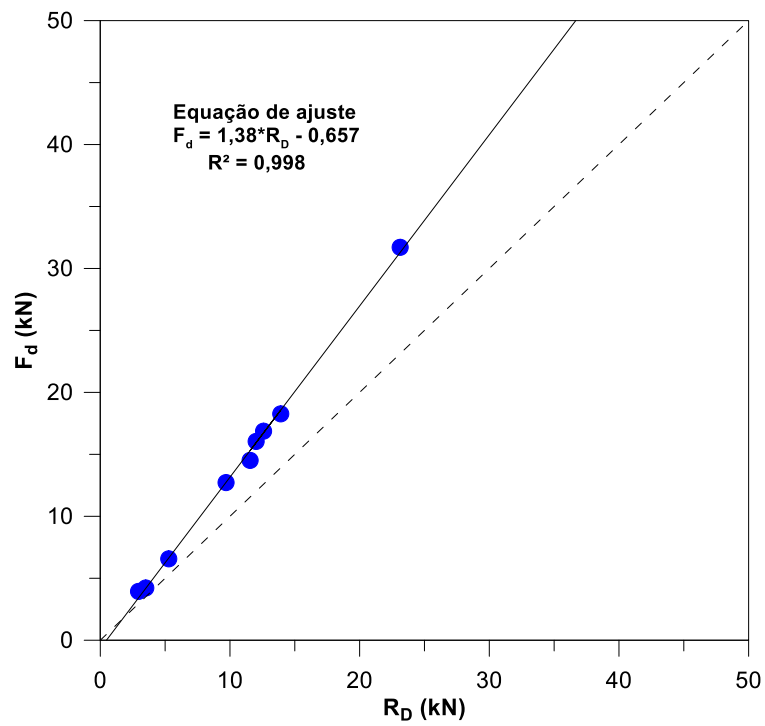


Figura 5.34: R_D versus F_d – ensaio SP02.

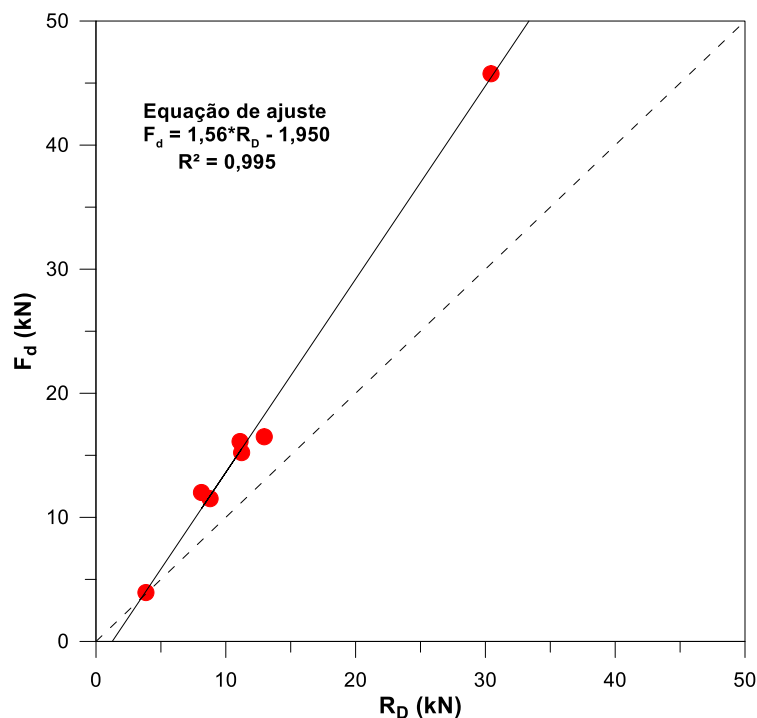


Figura 5.35: R_D versus F_d – ensaio SP03.

A resistência dinâmica do solo, determinada a partir da Equação 2.91 é dependente da quantidade de energia que alcança o amostrador que, segundo a proposta de Odebrecht (2003), pode ser determinada pela Equação 2.66. Entretanto, para o uso da Equação 2.66, Odebrecht (2003) recomenda que os coeficientes η_1 , η_2 e η_3 devem ser calibrados de forma a representar a prática regional do ensaio. Assim, conclui-se que para o caso dos ensaios realizados neste trabalho, os valores adotados para os coeficientes η_1 , η_2 e η_3 e conseqüentemente, as quantidades de energia no amostrador determinadas utilizando a Equação 2.66, não representaram com fidelidade as condições reais encontradas em campo.

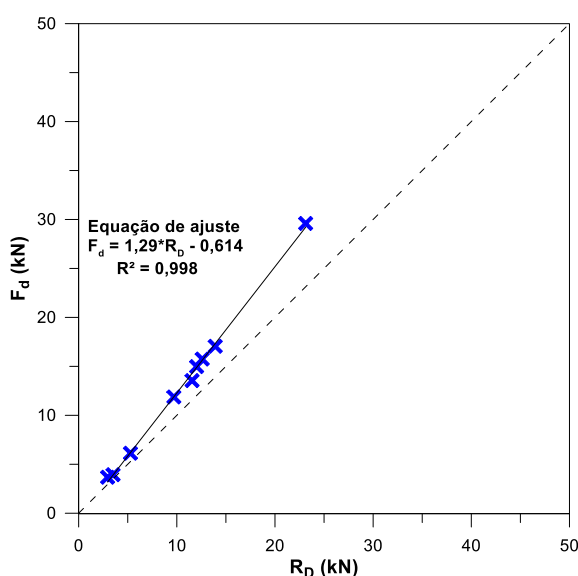
Segundo Lukiantchuki (2012), é possível calcular um fator de multiplicação, a fim de considerar as perdas de energia ocorridas ao longo da composição de haste. Este fator é admitido como sendo a relação entre as quantidades médias de energia determinadas para a base e o topo da composição de hastes, respectivamente ($E_{\text{base}}/E_{\text{topo}}$).

Desta forma, foi feita a correção dos valores teóricos de resistência dinâmica obtidos, considerando as correções propostas por Odebrecht (2003) e por Lukiantchuki (2012). Para a definição dos coeficientes η_1 , η_2 e η_3 , propostos por Odebrecht (2003), utilizou-se da análise anteriormente realizada no item 5.2.4, em que são determinados os valores de η_1 (Tabela 5.10), η_2 igual a 1 e chega-se a conclusão de que η_3 não representa os resultados experimentais encontrados para os ensaios deste trabalho. Para a determinação do fator de multiplicação citado por Lukiantchuki (2012), foram utilizados dados referentes às energias

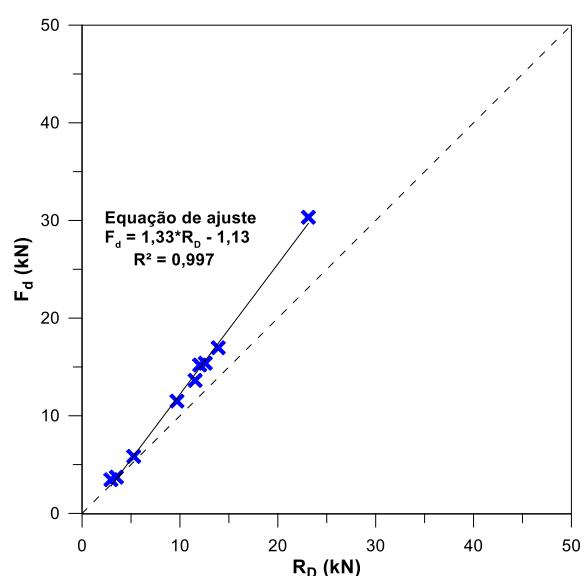
médias (topo e base) determinadas nos ensaios SP02 e SP03, que são apresentados na Tabela 5.19. As Figuras 5.36 e 5.37 apresentam os resultados obtidos com as correções realizadas nos valores de resistência dinâmica teóricos.

Tabela 5.19: Valores experimentais médios de energia, para o topo e a base da composição de haste.

Profundidade (m)	Energia SP03			Energia SP04			
	E_{topo} (J)	E_{base} (J)	$E_{\text{base}}/E_{\text{topo}}$	E_{topo} (J)	E_{base} (J)	$E_{\text{base}}/E_{\text{topo}}$	
1	397,53	357,90	0,90	398,4	388,5	0,98	
2	372,32	352,54	0,95	-	338,4	-	
4	383,56	361,71	0,94	-	-	-	
8	358,33	334,95	0,93	-	-	-	
10	356,03	328,26	0,92	341,9	333,0	0,97	
14	-	315,57	-	331,5	313,1	0,94	
16	-	336,30	-	318,8	295,9	0,93	
18	-	330,03	-	350,4	319,8	0,91	
20	337,79	322,19	0,95	320,0	291,8	0,91	
Média $E_{\text{base}}/E_{\text{topo}}$			0,93	Média $E_{\text{base}}/E_{\text{topo}}$			0,94



a) Resultados ajustados a partir do fator de multiplicação ($E_{\text{base}}/E_{\text{topo}}$).



b) Resultados ajustados a partir dos coeficientes η_1 , η_2 e η_3 .

Figura 5.36: Ajustes dos valores de resistência dinâmica teóricos para o ensaio SP02.

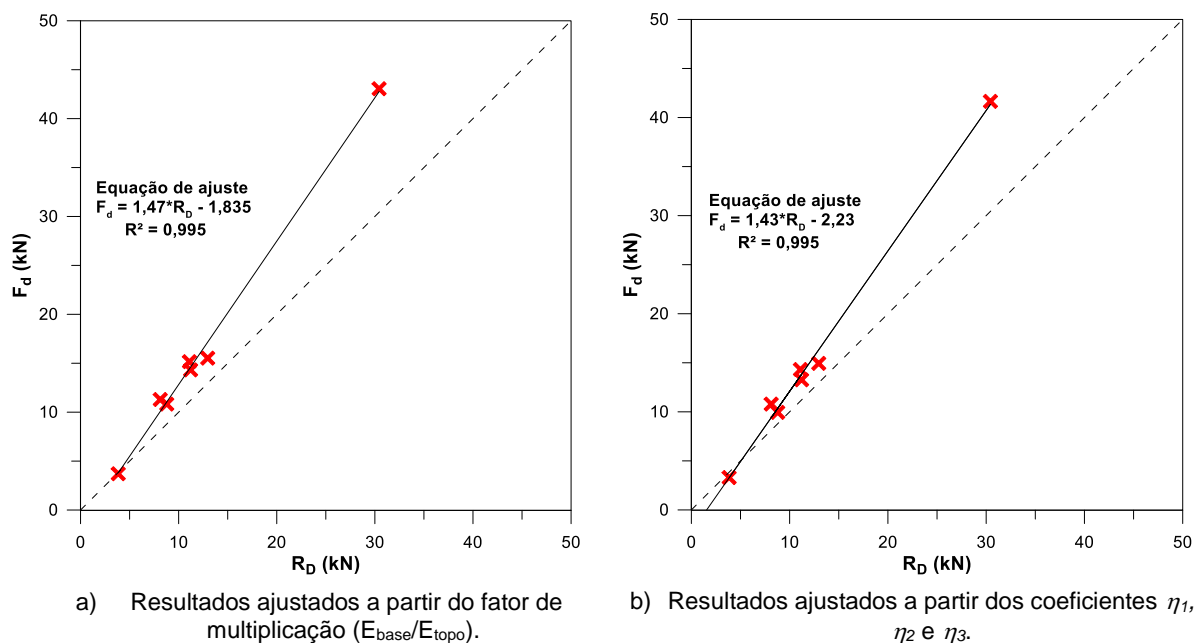


Figura 5.37: Ajustes dos valores de resistência dinâmica teóricos para o ensaio SP03.

Os resultados teóricos corrigidos (Figuras 5.36 e 5.37), obtidos com o uso do fator de multiplicação (E_{base}/E_{topo}) ou com os coeficientes η_1 , η_2 e η_3 , mostram a tendência de diminuição da discrepância entre os resultados experimentais e teóricos. Entretanto, observa-se que esta tendência é mais pronunciada para valores de resistência até aproximadamente 20 kN, tanto para o ajuste feito por meio da proposta de Odebrecht (2003), como para o fator de multiplicação (E_{base}/E_{topo}). Para valores de resistência superiores a 20 kN, nota-se que a tendência de aumento da discrepância persiste, mesmo com as correções.

5.4 Resistência Estática Teórica do Solo (R_S) Obtida a Partir do Ensaio SPT

A partir das Equações 2.99 e 2.100 (item 2.5.3), dos resultados de N_{SPT} e dos respectivos valores de eficiência média determinadas no topo do amostrador, foram calculadas as resistências estáticas teóricas do sistema solo-amostrador (R_S) para os ensaios realizados neste trabalho, segundo a proposta de Aoki et al. (2004 e 2007) e Aoki (2013).

Os resultados de R_S são apresentados nas Tabelas 5.20 e 5.21. Em seguida, os valores de R_S foram comparados com os valores experimentais de R_D (Figuras 5.38 e 5.39), sendo observada certa concordância entre resultados.

Tabela 5.20: Resistência estática teórica (R_S) para as camadas de solo investigadas no ensaio SP02.

Profundidade (m)	η^* (%)	Ensaio SP02		
		N_{SPT}	R_S (kN) (1)	R_S (kN) (2)
1,0		2,8	2,9	3,3
2,0		2,9	3,0	3,4
4,0		4,3	4,4	4,9
8,0		9,1	9,4	9,8
10,0	64,9	12,4	12,8	13,3
14,0		12,6	13,1	13,5
16,0		11,1	11,4	11,9
18,0		10,7	11,0	11,5
20,0		21,7	22,5	22,9

(1) Obtida a partir da Equação 2.99.

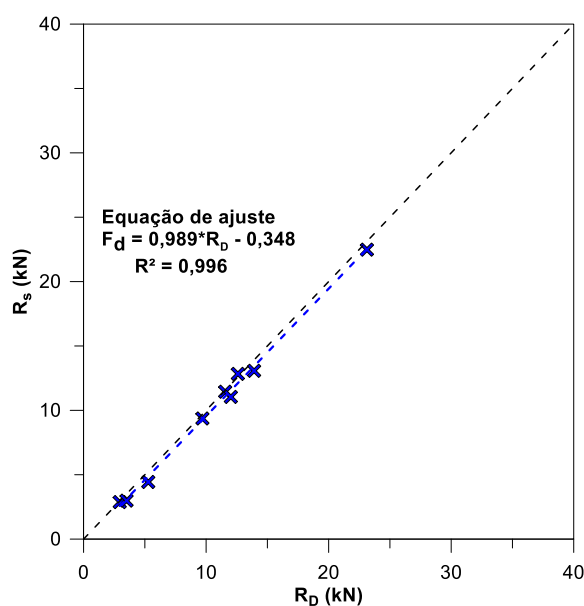
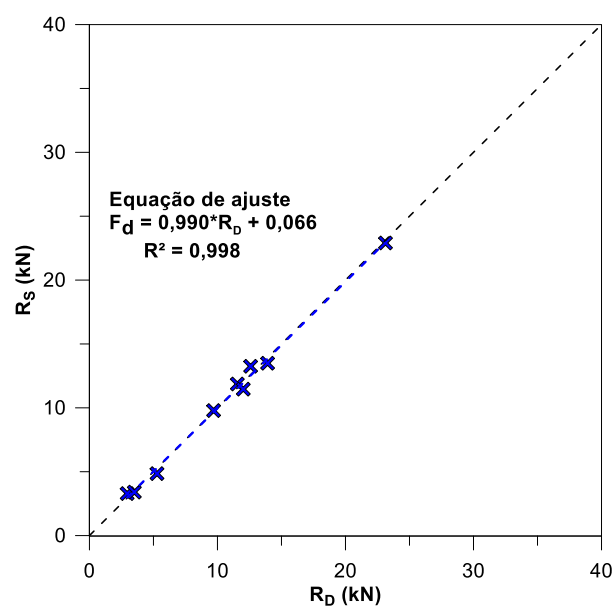
(2) Obtida a partir da Equação 2.100.

Tabela 5.21: Resistência estática teórica (R_S) para as camadas de solo investigadas no ensaio SP03.

Profundidade (m)	η^* (%)	Ensaio SP03		
		N_{SPT}	R_S (kN) (1)	R_S (kN) (2)
1,0		3,1	3,5	3,1
8,0		9,0	9,3	8,9
10,0		10,9	11,2	10,8
14,0	62,0	11,4	11,7	11,3
16,0		7,6	7,9	7,5
18,0		11,2	11,5	11,1
20,0		32,7	32,7	32,3

(1) Obtida a partir da Equação 2.99.

(2) Obtida a partir da Equação 2.100.

a) R_S calculado a partir da Equação 2.99.b) R_S calculado a partir da Equação 2.100.Figura 5.38: Valores experimentais de resistência dinâmica (R_D) versus valores teóricos de resistência estática (R_S), para o ensaio SP02.

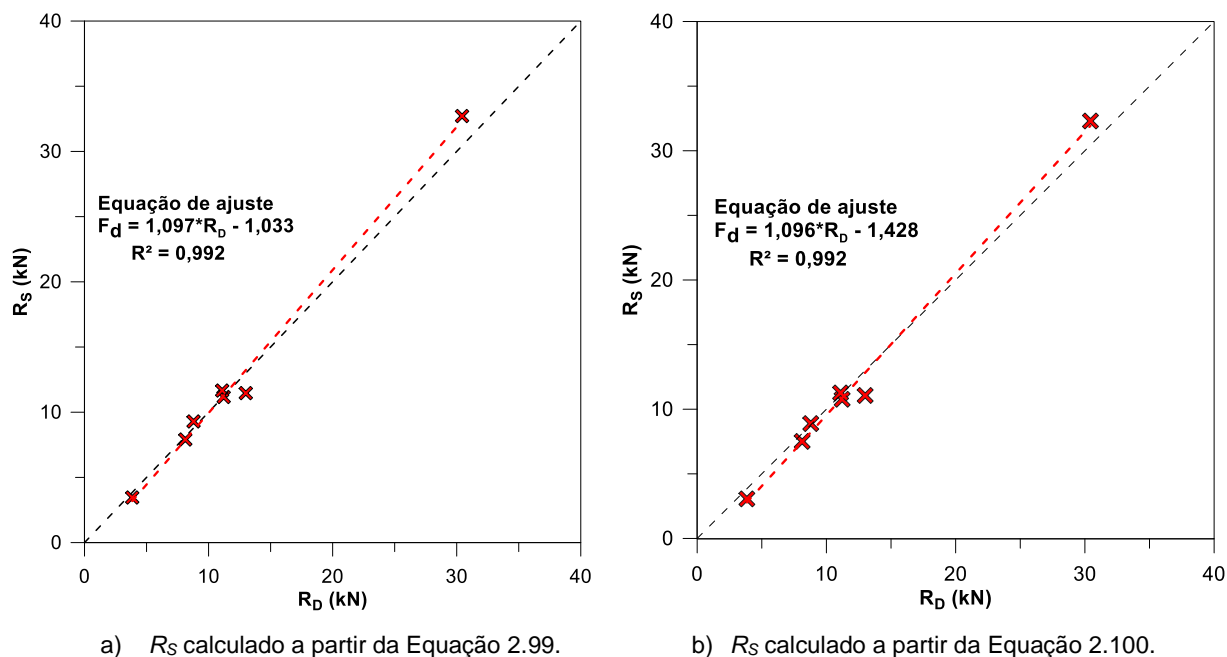
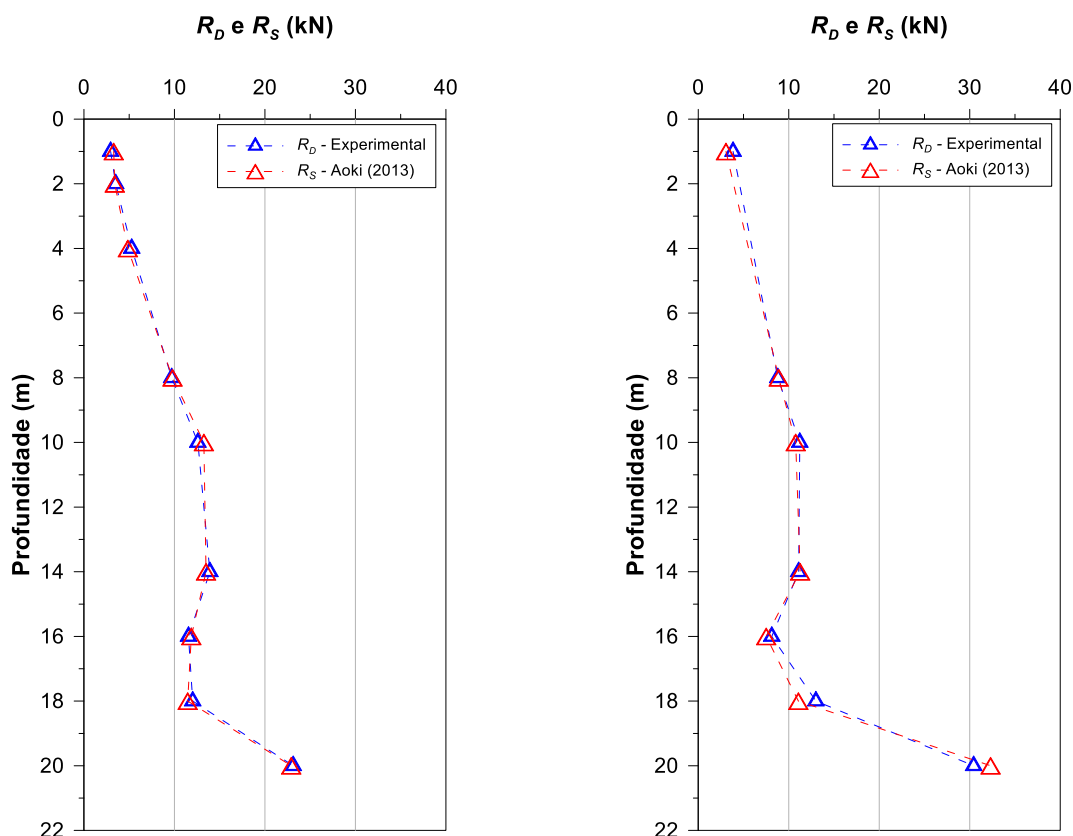


Figura 5.39: Valores experimentais de resistência dinâmica (R_D) versus valores teóricos de resistência estática (R_S), para o ensaio SP03.

As Figuras 5.38 e 5.39 mostram que os resultados de resistência estática teórica são similares aos resultados experimentais de resistência dinâmica obtidos nos ensaios deste trabalho (item 5.3). Tal fato, mostra que a resistência total, oferecida pelo sistema solo-amostrador durante o evento dinâmico, é aproximadamente igual a resistência estática ($R_D \approx R_S$), visto que as forças atuantes no sistema solo-amostrador são não conservativas, como já havia sido proposto por Aoki et. al. (2007). A Figura 5.40 apresenta os perfis de resistência dinâmica experimental (R_D) e estática teórica (R_S).

A Equação 2.100 proposta por Aoki (2013), apresentou melhor concordância com os resultados experimentais de R_D . Entretanto, observa-se que maior parte dos resultados de R_D apresentaram-se ligeiramente superiores aos de R_S . Neste trabalho, a maior diferença de R_D em relação a R_S foi de aproximadamente 25%, para a camada de argila arenosa, superficial e com baixo valor de N_{SP_T} . Este comportamento já foi identificado por Bernardes (1989) e por Lukiantchuki (2012). Segundo Bernardes (1989), para areias siltosas os valores de R_D apresentam-se de 5 a 15% superiores aos de R_S , e para siltes e argilas, de 15 a 110% superiores aos de R_S . Lukiantchuki (2012) relata ter obtido valores de R_D aproximadamente 35% superiores aos de R_S , para camadas de solo classificadas como areia pouco argilosa, com baixos valores de N_{SP_T} e baixas profundidades.



a) Resistências obtidas a partir do ensaio SP02.

b) Resistências obtidas a partir do ensaio SP03.

Figura 5.40: Perfil de resistência dinâmica e estática do sistema solo-amostrador, obtidos nos ensaios de campo.

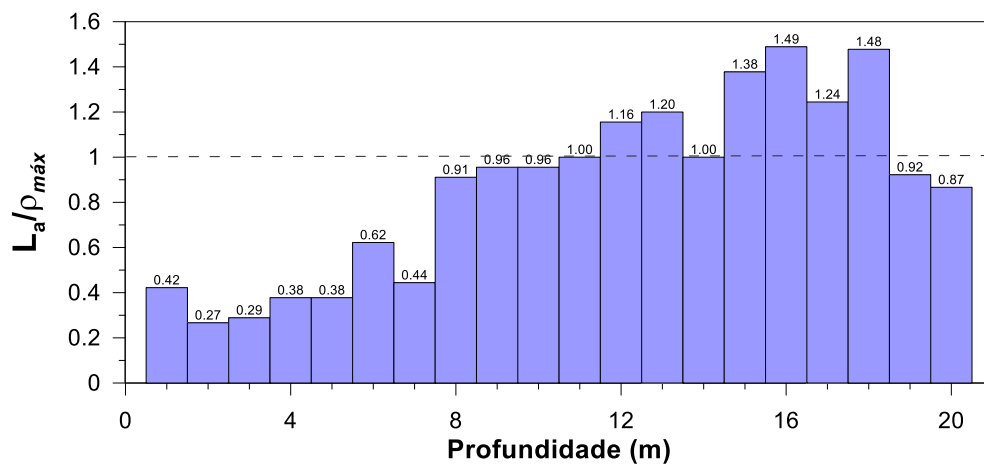
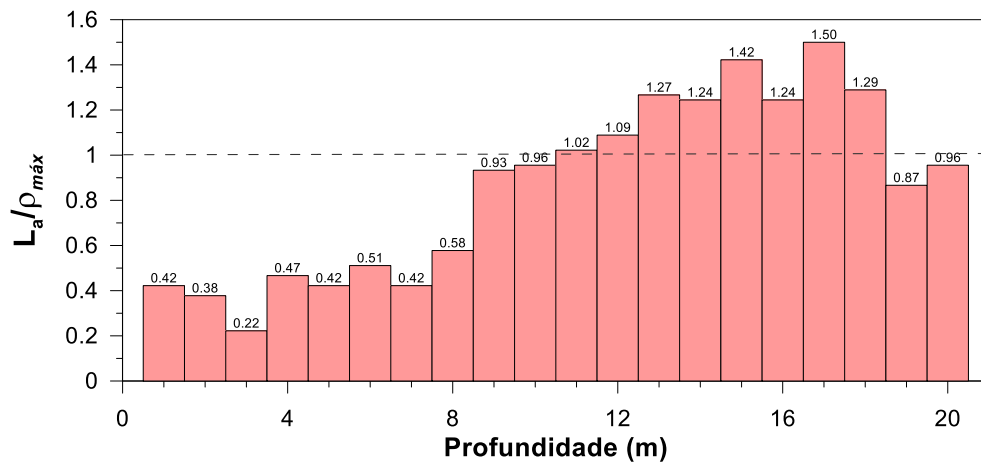
Com relação às duas camadas de solo que estavam saturadas (nível d'água situado a 18 m de profundidade), classificadas como silte argilo-arenoso e silte arenoso respectivamente, nota-se que para a primeira camada a resistência dinâmica apresentou-se em torno de 5% e 17% superior à resistência estática, para os ensaios SP02 e SP03, respectivamente. Entretanto, para a segunda camada de solo (silte arenoso), a diferença encontrada entre R_D e R_S no ensaio SP02 foi de 1%. Para o ensaio SP03, esta camada apresentou a resistência dinâmica cerca de 6% inferior ao valor obtido para a resistência estática (ver Figura 5.40b).

5.4 Recuperação da Amostra de Solo

O controle da recuperação da amostra de solo foi realizado em todos os ensaios deste trabalho, a partir da medida do comprimento da amostra (L_a), logo após a cravação do amostrador no solo. Os resultados do controle da recuperação das amostras são apresentados na Tabela 5.22. As Figuras 5.41 e 5.42 apresentam as relações entre os comprimentos das amostras (L_a) e a penetração máxima do amostrador ($\rho_{\text{máx}}$), de cada ensaio SPT realizado. Os dados referentes ao ensaio SP01 são apresentados no Apêndice B deste trabalho.

Tabela 5.22: Resultados de comprimento das amostras de solo recuperadas nos ensaios SPT.

Profundidade (m)	SP02 - L_a (m)	SP03 - L_a (m)
1	0,19	0,19
2	0,12	0,17
3	0,13	0,10
4	0,17	0,21
5	0,17	0,19
6	0,28	0,23
7	0,20	0,19
8	0,41	0,26
9	0,43	0,42
10	0,43	0,43
11	0,45	0,46
12	0,52	0,49
13	0,54	0,57
14	0,45	0,56
15	0,62	0,64
16	0,67	0,56
17	0,56	0,68
18	0,67	0,58
19	0,42	0,39
20	0,39	0,43

Figura 5.41: Relação L_a versus $\rho_{\text{máx}}$ (ensaio SP02 no campo experimental da FEAGRI-Campinas, SP).Figura 5.42: Relação L_a versus $\rho_{\text{máx}}$ (ensaio SP03 no campo experimental da FEAGRI-Campinas, SP).

No caso das camadas de solo do campo experimental da FEAGRI, os resultados indicam a redução volumétrica da amostra de solo recuperada, ou seja, o fenômeno do embuchamento da amostra de solo no interior do amostrador, principalmente nas camadas superficiais, até aproximadamente 9 m de profundidade. De acordo com a caracterização do subsolo da área, estas camadas superficiais são classificadas como argila arenosa porosa até 6 m e argila silto-arenosa entre 6 e 9 m.

A partir de 10 m de profundidade, (camada de silte argilo-arenoso) não há mais o fenômeno. Entretanto, na camada de silte arenoso, a partir de 19 m de profundidade, a redução volumétrica da amostra volta a ocorrer, o que pode ser atribuído ao fato desta camada estar abaixo do nível d'água, ocasionando a redução mesmo para solos com maior teor de areia.

Os resultados de recuperação das amostras nos ensaios realizados confirmaram a ocorrência da redução volumétrica da amostra de solo no interior do amostrador (embuchamento) em camadas de solos argilosos (argila arenosa e argila silto-arenosa). Este resultado também foi encontrado por Lukaintchuki (2012), para os mesmos tipos de solos, em ensaios SPT realizados nas cidades de São Carlos e Ribeirão Preto. As camadas de solo com fração areia foram as de silte argilo-arenoso e de silte arenoso; e para esses solos, foi comum a condição não embuchada.

5.5 Interpretação das Resistências Desenvolvidas na Cravação do Amostrador

Com base no equilíbrio das forças mobilizadas no sistema solo-amostrador (item 2.5.3), segundo a proposta de Aoki (2013), foram obtidos os valores de resistência de ponta (r_p), atrito lateral externo (r_L) e interno (r_{Li}) para as camadas de solo investigadas. Para tanto, foram estimados valores de atrito-adesão (f_t) entre o solo e o amostrador após a cravação, a partir da proposta de Ranzini (1988) e da correlação N_{SPT} versus torque, estabelecida a partir dos ensaios SPT realizados no Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP.

5.5.1 Resultados dos ensaios SPT-T

Os ensaios SPT-T foram realizados apenas no ensaio SP01 (ver Figura 4.3). Neste ensaio, foi feito o monitoramento das quantidades de energia apenas para uma seção da composição de haste, situada logo abaixo da cabeça de bater. Não foi possível determinar a quantidade de energia para a base da composição de haste devido à aplicação do torque nos ensaios SPT-T. A eficiência média encontrada para o ensaio SP01 foi de 63%. Os resultados de energia, eficiência e comprimento das amostras recuperadas no ensaio SP01, são apresentados no

Apêndice B. Os resultados de N_{SPT} e Torque, encontrados para o ensaio SP01 são apresentados na Figura 5.43.

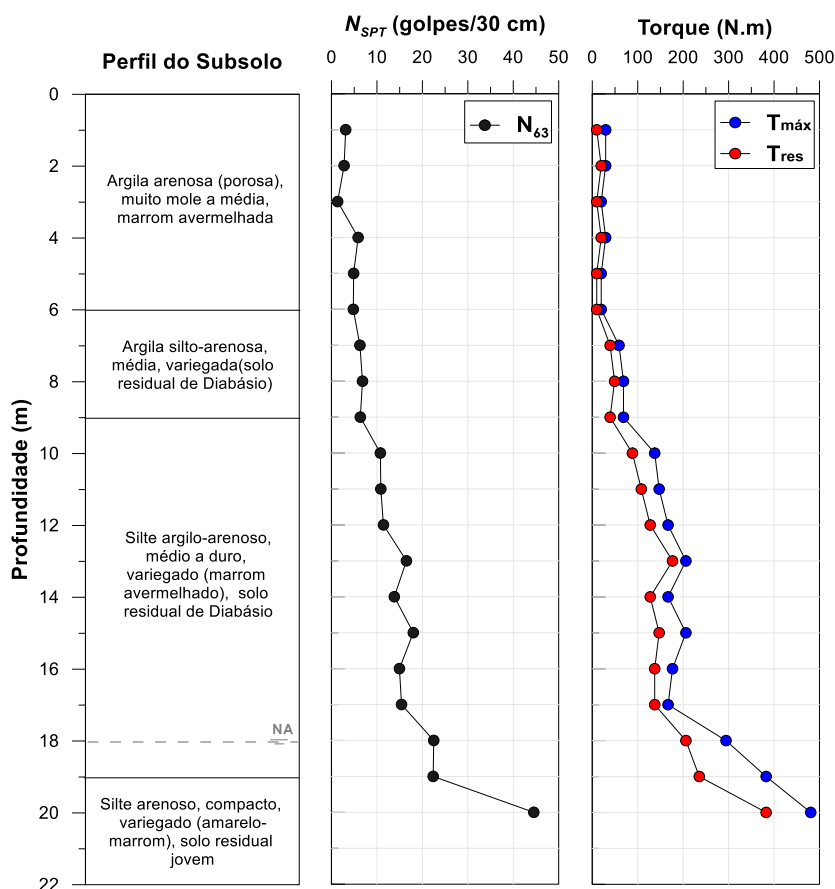


Figura 5.43: Valores de N_{SPT} e Torque obtidos no ensaio SP01.

Desta forma, a fim de se obter os valores do atrito adesão entre o solo e o amostrador para os ensaios SP02 e SP03, foi estabelecida uma correlação N_{SPT} versus torque a partir dos resultados encontrados para o ensaio SP01 (Figura 5.44). Admitiu-se que esta correlação é representativa, visto que os ensaios foram realizados com um espaçamento de 1 m entre as sondagens, com monitoramento da energia e por não terem sido encontradas diferenças significativas nas camadas de solo investigadas (profundidade e classificação).

Assim, a partir da correlação estabelecida (Figura 5.44), foram estimados os valores de atrito-adesão (f_i) entre o solo e o amostrador para os ensaios SP02 e SP03. A Tabela 5.23 apresenta os resultados encontrados.

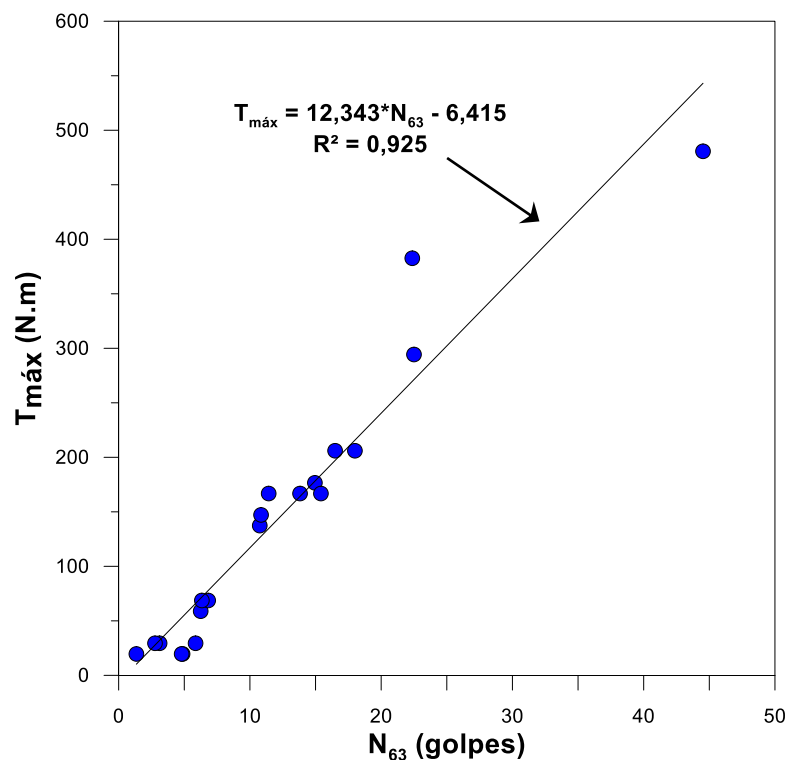


Figura 5.44: Correlação N_{SPT} ($\eta_{\text{topo}} = 63\%$) versus $T_{\text{máx}}$, para o ensaio SP01 realizado no campo experimental da FEAGRI/UNICAMP.

Tabela 5.23: Valores de N_{SPT} corrigidos para η_{topo} de 63%, valores estimados de $T_{\text{máx}}$ e do atrito adesão entre o solo e o amostrador após a cravação de 0,45 m.

Profundidade (m)	SP02			SP03		
	N_{63}	$T_{\text{máx}}$ (N.m)	f_t (kPa)	N_{63}	$T_{\text{máx}}$ (N.m)	f_t (kPa)
1	2,5	24,6	13,5	2,9	29,8	16,4
2	2,6	25,8	14,2	2,8	28,2	15,5
3	2,8	28,7	15,8	3,8	40,5	22,3
4	3,9	41,4	22,8	3,7	39,6	21,7
5	5,4	59,9	32,9	5,8	65,1	35,7
6	5,5	61,0	33,5	4,3	46,2	25,4
7	5,3	58,5	32,1	5,3	59,3	32,6
8	8,2	94,7	52,0	8,6	99,7	54,7
9	8,5	98,1	53,9	8,4	96,7	53,1
10	11,2	132,0	72,5	10,4	122,3	67,2
11	8,6	100,0	54,9	12,8	151,7	83,3
12	11,7	138,1	75,8	13,4	158,8	87,2
13	11,4	134,0	73,6	12,0	142,1	78,1
14	11,4	134,6	73,9	10,9	128,3	70,5
15	9,6	112,3	61,7	9,7	113,6	62,4
16	10,0	117,1	64,3	7,3	83,1	45,7
17	10,5	122,7	67,4	10,3	120,8	66,3
18	9,7	112,7	61,9	10,7	125,6	69,0
19	16,5	197,7	108,6	21,8	262,3	144,0
20	19,7	236,1	129,7	31,2	378,8	208,0

5.5.2 Resistências unitárias de ponta (r_p) e atrito (r_L e r_{Li})

Com base no equilíbrio de forças de reação no amostrador (item 2.6) e nos resultados de tensões de atrito lateral (externo) apresentadas no item 5.5.1 (Tabela 5.23), foram estimados os valores de resistência de ponta e de atrito no sistema solo-amostrador. Para tanto, foram utilizadas as formulações propostas por Aoki (2013), anteriormente mencionadas no item 2.6 deste trabalho.

Desta forma, a partir dos dados de N_{SPT} e as respectivas eficiências (η^*), atrito adesão na parede externa do amostrador (f_t , aqui adotado igual a r_L) e do comprimento das amostras recuperadas (L_a , ver item 5.4), foram calculadas as resistências de atrito e ponta apresentadas nas Tabelas 5.24 e 5.25. A Figura 5.45 apresenta esquematicamente a distribuição de resistências por atrito e de ponta ao longo da profundidade do perfil de solo investigado nos ensaios SP02 e SP03.

Tabela 5.24: Tensões de atrito e ponta no sistema solo amostrador, ensaio SP02.

Profundidade (m)	N_{SPT}	L_a (m)	R_S (kN)	W_h (N)	R_f	$r_L = f_t$ (kPa)	r_{Li} (kPa)	r_p (MPa)
1	2,8	0,19	3,29	92,28	0,0064	13,51	97,37	2,12
2	2,9	0,12	3,40	120,80	0,0064	14,18	160,18	2,20
3	3,2	0,13	3,67	152,49	0,0067	15,78	158,86	2,37
4	4,3	0,17	4,85	184,17	0,0076	22,76	153,55	2,99
5	5,9	0,17	6,56	215,86	0,0085	32,87	199,32	3,88
6	6,0	0,28	6,66	247,55	0,0084	33,48	123,51	3,96
7	5,8	0,20	6,44	279,23	0,0083	32,13	169,11	3,88
8	9,1	0,41	9,79	310,92	0,0093	51,98	119,19	5,60
9	9,4	0,43	10,11	342,60	0,0093	53,88	117,50	5,79
10	12,4	0,43	13,25	374,29	0,0098	72,51	150,37	7,41
11	9,5	0,45	10,28	405,98	0,0093	54,92	115,09	5,94
12	13,0	0,52	13,81	437,66	0,0098	75,82	130,02	7,75
13	12,6	0,54	13,44	469,35	0,0097	73,61	122,61	7,59
14	12,6	0,45	13,49	501,04	0,0097	73,92	148,18	7,64
15	10,6	0,62	11,42	532,72	0,0093	61,66	93,20	6,62
16	11,1	0,67	11,87	564,41	0,0094	64,30	89,54	6,88
17	11,6	0,56	12,38	596,09	0,0094	67,36	111,64	7,17
18	10,7	0,66	11,46	627,78	0,0092	61,91	88,26	6,73
19	18,3	0,41	19,35	659,47	0,0101	108,59	225,91	10,75
20	21,7	0,39	22,91	691,15	0,0103	129,67	281,32	12,57

Tabela 5.25: Tensões de atrito e ponta no sistema solo amostrador, ensaio SP03.

Profundidade (m)	N_{spt}	L_a (m)	R_s (kN)	W_h (N)	R_f	$r_L = f_t$ (kPa)	r_{Li} (kPa)	r_p (MPa)
1	3,1	0,19	3,43	92,28	0,0079	16,37	94,76	2,06
2	2,9	0,17	3,29	120,80	0,0076	15,46	103,88	2,02
3	4,0	0,10	4,33	152,49	0,0088	22,27	221,26	2,54
4	3,9	0,21	4,25	184,17	0,0086	21,75	104,99	2,53
5	6,1	0,19	6,38	215,86	0,0101	35,75	163,04	3,55
6	4,5	0,23	4,80	247,55	0,0089	25,38	107,76	2,84
7	5,6	0,19	5,90	279,23	0,0096	32,57	155,22	3,38
8	9,0	0,26	9,28	310,92	0,0110	54,73	167,27	4,98
9	8,7	0,42	9,03	342,60	0,0108	53,11	101,73	4,90
10	10,9	0,43	11,18	374,29	0,0113	67,17	120,23	5,93
11	13,4	0,46	13,64	405,98	0,0117	83,31	134,69	7,10
12	14,0	0,49	14,23	437,66	0,0118	87,20	131,86	7,41
13	12,6	0,57	12,84	469,35	0,0115	78,06	103,83	6,78
14	11,4	0,56	11,68	501,04	0,0112	70,48	97,71	6,27
15	10,2	0,64	10,45	532,72	0,0109	62,38	78,02	5,72
16	7,6	0,56	7,90	564,41	0,0100	45,66	71,07	4,56
17	10,8	0,68	11,05	596,09	0,0109	66,33	78,33	6,06
18	11,2	0,58	11,46	627,78	0,0110	68,99	94,42	6,28
19	22,8	0,39	22,90	659,47	0,0124	144,02	260,47	11,64
20	32,7	0,43	32,67	691,15	0,0128	208,04	329,22	16,23

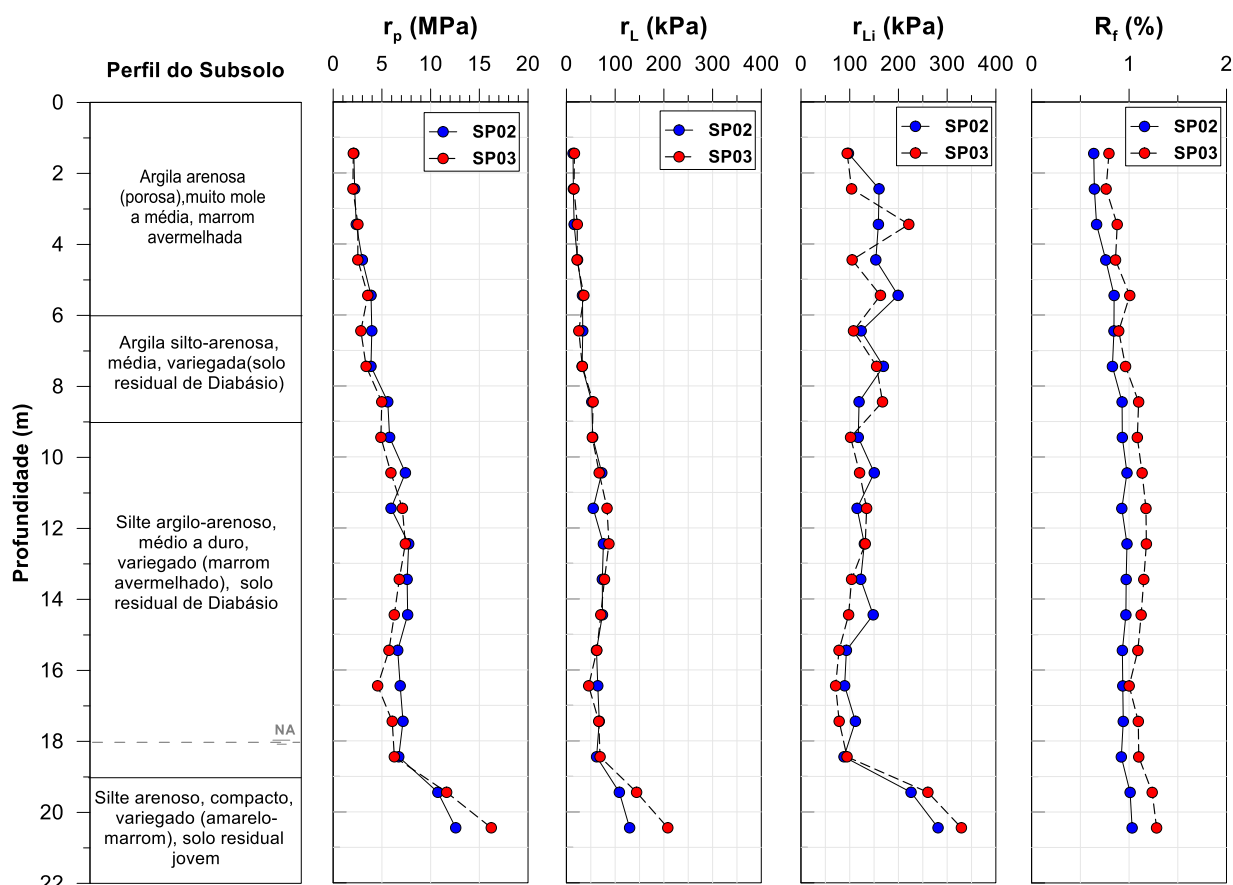


Figura 5.45: Perfil de resistências de ponta e atrito lateral no sistema solo-amostrador, a partir do ensaio SPT.

Como apresentado na Figura 5.45, as resistências de ponta e de atrito lateral externo aumentaram gradativamente com a profundidade, sendo menor nas camadas superficiais de argila e aumentando nas camadas de silte. Os resultados mostram que a partir de 19 m de profundidade (camada de silte arenoso saturado) houveram picos nas tensões cisalhantes nas paredes do amostrador e na ponta.

O atrito desenvolvido nas paredes internas do amostrador apresentou maior variabilidade nas camadas superficiais do perfil, até aproximadamente 9 m de profundidade. Até esta profundidade, existem duas camadas de argila (argila arenosa e argila silto-arenosa, respectivamente) e foi verificado que os ensaios SPT realizados nestas camadas apresentaram o fenômeno do embuchamento da amostra de solo no interior do amostrador.

A partir dos valores de atrito nas paredes internas e externas do amostrador (r_L e r_{Li}) foi estimado o fator de atrito (a), segundo a proposta de Aoki (2013). Os valores do fator de atrito são apresentados na Tabela 5.26 e na Figura 5.46.

Tabela 5.26: Fator de atrito (a) para os ensaios SPT realizados.

Profundidade (m)	Tipo de solo	a (r_{Li}/r_L)	
		SP02	SP03
1	Argila arenosa (porosa)	7,2	5,8
2		11,3	6,7
3		10,1	9,9
4		6,7	4,8
5		6,1	4,6
6	Argila silto- arenosa	3,7	4,2
7		5,3	4,8
8		2,3	3,1
9	Silte argilo- arenoso	2,2	1,9
10		2,1	1,8
11		2,1	1,6
12		1,7	1,5
13		1,7	1,3
14		2,0	1,4
15		1,5	1,3
16		1,4	1,6
17		1,7	1,2
18		1,4	1,4
19	Silte arenoso	2,1	1,8
20		2,2	1,6

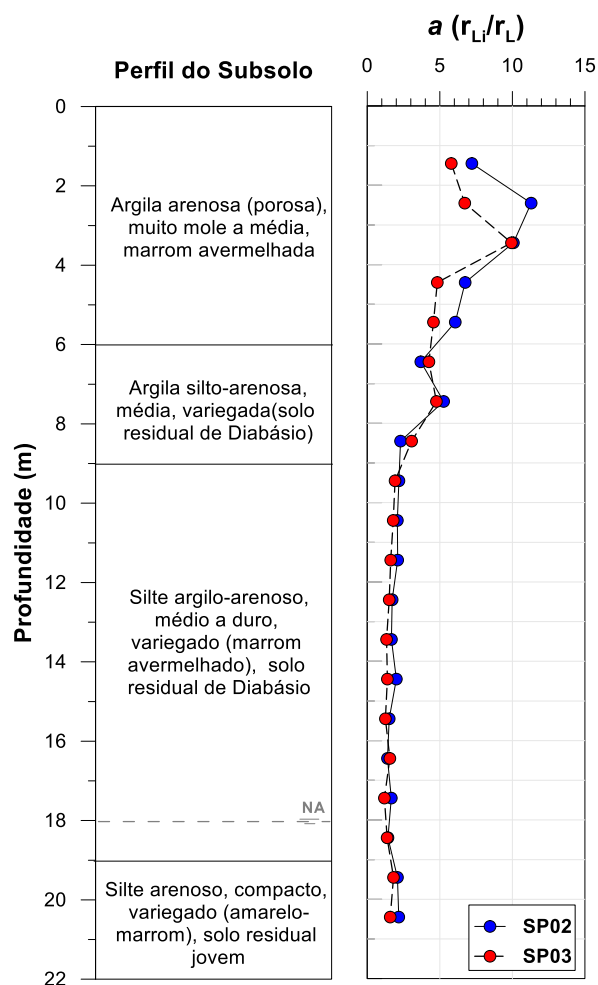


Figura 5.46: Fator de atrito ao longo do perfil de solo investigado.

Os maiores valores encontrados para o fator a concentraram-se nas camadas superficiais de argila (até 9 m de profundidade). Com o aumento da fração areia ao longo do perfil investigado, observou-se que há diminuição do fator a , chegando a um valor praticamente constante. Estes resultados concordam com os resultados da recuperação das amostras anteriormente apresentados no item 5.4, visto que a ocorrência do fenômeno de variação volumétrica da amostra de solo no interior do amostrador (embuchamento) indica que a tensão de cisalhamento desenvolvida entre a parede interna e a amostra de solo é superior a tensão cisalhante na parede externa.

Assim, o valor médio do fator a para as camadas investigadas que apresentaram redução volumétrica no interior do amostrador, foi de 7,3 para a camada de argila arenosa porosa (1 a 6 m de profundidade) e de 3,9 para a camada de argila silto-arenosa (de 6 a 9 m de profundidade). Para a camada de silte argilo-arenoso que não apresentou o fenômeno, o valor médio do fator a foi de 1,6. Entretanto, para a camada de silte arenoso saturado, o valor médio de a foi de 1,9.

Desta forma, nota-se que solos com maior proporção de argila apresentam valores superiores do fator a , quando comparados com solos arenosos. Entretanto, cabe salientar que, para as camadas saturadas de silte arenoso e de maior resistência ($N_{SPT} > 20$ golpes), os valores do fator a , foram similares aos encontrados para as camadas que não apresentaram embuchamento, apesar de ter ocorrido o fenômeno nessa camada (19 e 20 m de profundidade). Tal comportamento pode estar associado ao fato dessas profundidades ensaiadas estarem na zona de mudança de camada. Assim, com base nos resultados apresentados, o comportamento de embuchamento e a definição do fator a , devem ser melhor investigados para esta camada.

6. Conclusões

O trabalho tratou da interpretação racional de resultados do ensaio SPT. Para tanto, foram apresentados resultados experimentais obtidos por meio de ensaios SPT realizados com monitoramento da energia envolvida a cada golpe do martelo e na respectiva cravação do amostrador. Assim, com base nestes resultados, foi feita a determinação da eficiência (topo e base). Com a instrumentação situada no topo do amostrador, foi possível obter o provável perfil de resistência dinâmica das camadas de solo.

Os resultados de eficiência no topo do amostrador, do monitoramento do comprimento da recuperação e a medida do atrito-adesão entre o solo e a parede externa do amostrador (ensaio SPT-T), forneceram subsídios para quantificar as forças de reação desenvolvidas no sistema solo-amostrador, segundo a proposta de Aoki (2013). Assim, foi estimada a relação entre as tensões de atrito desenvolvidas no interior e exterior do amostrador (fator *a*).

Assim, com o desenvolvimento do presente trabalho, foi possível chegar às seguintes conclusões:

Energia e Eficiência no Ensaio SPT

- Os resultados de eficiência encontrados neste trabalho evidenciam a necessidade do monitoramento das quantidades de energia envolvidas nos ensaios SPT. Para o mesmo equipamento (acionamento manual), foram encontrados diferentes valores de eficiência para o topo da composição de haste (69,7 e 65,9%). Portanto, os resultados encontrados destacam a necessidade do controle do procedimento executivo, a fim de permitir a obtenção de resultados confiáveis. Para tanto, é fundamental a determinação das quantidades de energia e, conseqüentemente, da eficiência do ensaio. Assim, a qualidade dos resultados obtidos no ensaio SPT e o controle das variabilidades, são dependentes de uma supervisão e execução qualificada.
- Os resultados indicaram que a eficiência no topo da composição de hastes apresentou menor variabilidade (3,3 a 5,6%) que a eficiência determinada para a base da composição (3,9 a 6,9%).
- A eficiência determinada na base da composição de haste apresentou valores médios de 64,8% e 62%, sendo referentes ao uso de luvas cônicas bipartidas e luvas convencionais, respectivamente.

- As perdas de energia encontradas para os ensaios SP02 e SP03, não indicaram diferenças significativas devido ao uso da luva cônica bipartida. Entretanto, devem ser realizadas mais campanhas experimentais, utilizando esta configuração de luva e com maiores comprimentos da composição de haste, a fim de verificar essa tendência.
- É fundamental garantir que as ligações entre as luvas e os segmentos de haste estejam rosqueadas adequadamente, de forma a evitar indesejadas reflexões de ondas, que geram perdas significativas de energia ao sistema martelo-haste-amostrador.
- A luva cônica bipartida apresentou uma alternativa às luvas convencionais, pois conferem maior agilidade no tempo de realização dos ensaios, comparado ao tempo médio de realização dos ensaios com a luva convencional.
- O processo de transferência de energia em solos de baixa resistência ocorre num intervalo de tempo maior, sendo necessário um maior número de impactos subsequentes, para a cravação do amostrador no solo.
- Os valores de eficiência η_1 encontrados neste trabalho divergiram dos encontrados por Odebrecht (2003) e Lukiantchuki (2012), apesar de ter sido utilizado os equipamentos preconizados na NBR 6484 (ABNT, 2001). Entretanto, atribui-se essas diferenças às pequenas variações no equipamento (corda, roldana, etc.) e as variações inerentes ao acionamento manual, reforçando a necessidade do estudo das energias envolvidas no ensaio SPT em função da prática regional.

Resistência Dinâmica e Estática Mobilizadas na Cravação do Amostrador

- A resistência dinâmica (R_D) das camadas de solo investigadas apresentou comportamento crescente com a profundidade. Os resultados teóricos de resistência dinâmica (F_d), obtidos a partir da proposta de Schnaid et al. (2009), apresentaram-se superiores aos resultados experimentais obtidos.
- A correção da equação para a determinação de F_d proposta por Schnaid et al. (2009), com base na correção da quantidade de energia que atinge o amostrador (proposta de Odebrecht, 2003), se mostrou adequada para solos com resistência máxima de aproximadamente 15 kN, para o caso dos ensaios realizados neste trabalho.
- As resistências estáticas teóricas, obtidas com base na proposta de Aoki et al. (2004 e 2007), apresentaram-se similares aos valores de resistência dinâmica experimental. Tal

fato evidencia que as forças de reação atuantes no ensaio SPT, são do tipo não conservativas.

Reações Desenvolvidas na Cravação do Amostrador

- Em relação aos mecanismos de reação mobilizados durante a cravação do amostrador padrão no solo, os resultados experimentais mostraram que o fenômeno do embuchamento ocorreu para as camadas de argila arenosa e argila silto-arenosa. Entretanto, na camada de silte arenoso saturado, com índice N_{SPT} maior que 20 golpes, também ocorreu o embuchamento.
- A ocorrência do embuchamento da amostra recuperada na camada de silte arenoso saturado (19 e 20 m de profundidade) pode ser devido à transição entre camadas, sendo necessário aprofundar a investigação para ter certeza desse comportamento.
- Os resultados de fator de atrito (a) indicaram que o atrito interno que se desenvolve na interface solo-amostrador devido à cravação foi sempre maior que o atrito externo. Para os solos estudados neste trabalho, as camadas com maior proporção da fração argila foram as que apresentaram maiores valores do fator a (variando de 2,3 a 11,3). Nestas camadas, ocorreu a redução de volume da amostra de solo recuperada (embuchamento). As camadas de silte arenoso apresentaram menores valores do fator a (variando de 1,2 a 2,2) e tendência de aumento de volume da amostra de solo no interior do amostrador (sem ocorrência de embuchamento).
- O controle do comprimento da amostra recuperada (L_a) é um procedimento simples, não introduz custos adicionais ao ensaio, sendo importante para a análise das reações devido à cravação do amostrador no solo.
- A interpretação do ensaio SPT com base no Princípio da Conservação de Energia (Princípio de Hamilton) e no equilíbrio das forças de reação no sistema solo-amostrador, possibilitou a obtenção das resistências por atrito e ponta das camadas investigadas. Esta nova forma de interpretação, confere ao ensaio uma base científica, alavancando sua credibilidade.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

- 1- Desenvolver e projetar um novo segmento de haste instrumentada para medidas de energia, com características mecânicas (resistência, ductilidade, e etc.) suficientes para suportar os esforços de torque em ensaios SPT-T;
- 2- Avaliar experimentalmente as resistências dinâmicas e estáticas do sistema solo-amostrador em camadas de solo saturado;
- 3- Avaliar, experimentalmente, a aplicabilidade dos métodos teóricos para a obtenção das resistências dinâmicas e estáticas para camadas de solo saturado; investigando a aplicação do Princípio da Conservação de Energia neste caso;
- 4- Determinar, experimentalmente, o atrito interno que se desenvolve entre a amostra de solo e a parede interna do amostrador após a etapa de cravação no ensaio SPT;
- 5- Avaliar diferentes metodologias para a determinação do atrito externo que se desenvolve entre o amostrador e o solo após a cravação (ensaio SPT-T, medida da força para arrancamento do amostrador cravado no solo, e etc.).
- 6- Aprimorar a rotina de cálculo desenvolvida neste trabalho, no software Matlab®, para a determinação das energias e eficiências de ensaios SPT.
- 7- Estudar o comportamento de variação de volume (expansão e redução) das amostras de solo no interior do amostrador, investigando o efeito da cravação nas propriedades físicas do solo amostrado. Avaliar nas condições de solo saturado e não saturado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOU-MATAR H.; GOBLE, G. G.; SPT Dynamic Analysis and Measurements. **Journal of Geotechnical and Environmental Engineering**, v,123, n,10, p,921-928, 1997.

ALONSO, U. R. Correlação entre o Atrito lateral medido com o Torque e o SPT. **Solos e Rochas**, Vol, 17, nº 3, p, 191-194, 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D4633-10: standard test method for energy measurement for dynamic penetrometers**, West Conshohocken, PA, United States, 2010, 7p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D4633-86: standard test method for stress wave energy measurement for dynamic penetrometer testing systems**, Philadelphia, PA, United States, 1986, 4p.

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, vol, 1, p 457-460.

AOKI, N.; CINTRA, J.C.A. **SGS 5817: Engenharia de Fundações – Notas de aula**, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000b.

AOKI, N. Inovação no SPT. 2013. In: Cintra, J. C. A.; Aoki, N.; Tsuha, C. H. C.; Giacheti, H. L. **Fundações: ensaios estáticos e dinâmicos**. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, p. 25-38.

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, 2007.

AOKI, N.; NEVES, L.F.S.; ESQUIVEL, E.R.; CINTRA, J.C.A. Prova de carga estática no amostrador SPT para obtenção da eficiência e da resistência estática em solos arenosos. **Solos e Rochas**. São Paulo, v. 27, p. 147-160, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), **NBR 6484 – Solo: sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio**, 2001, 17 p, Rio de Janeiro.

BELINCANTA, A. **Avaliação de fatores intervenientes no índice de resistência à penetração do SPT**. 1998. 141p, v.1. Tese (Doutorado em Geotecnia)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP.

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.; CINTRA, J. C. A. Fatores Intervenientes em Variantes do Método ABNT para a Execução do SPT. **Solos e Rochas**, v. 21, n. 3, 1998, ABMS, São Paulo, p. 119-133.

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, 64 p. 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, Norweigan.

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

CAVALCANTE, E. H. et al.. Campos Experimentais Brasileiros. In: XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica e III Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, Curitiba. 2006. Anais. 91 p.

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

DÉCOURT, L. The standard penetration test – state of the art, In: XII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, v. 4, 1989, Rio de Janeiro.

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

GIACHETI, H. L. **Estudo experimental de parâmetros dinâmicos de alguns solos tropicais do Estado de São Paulo**. 1991. 232 p. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

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

GIACHETI, H. L.; DE MIO, G. Seismic cone penetration tests on tropical soils the ratio G_0/q_c . In: The 3 International Conference on Site Characterization, 2008, Taipei – Taiwan. **Proceedings...** The 3 International Conference on Site Characterization, ISC’S. Londres: Taylor e Francis Group. v. 1. p. 1289-1295.

GIACHETI, H. L.; PEIXOTO, A. S. P.; MARQUES, M. E. M. Cone penetration testing on Brazilian tropical soils. In: Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 12., 2003, Cambridge/MA/USA. **Proceedings...** v. 1. p. 397-402.

GLOBE, G. G.; ABOUMATAR, H. Determination of wave equation soil constants from the standard penetration test. Application of Stress-Wave Theory to piles. Balkema, Rotterdam. 1992.

HAFEZ, M. A.; SYAZANA, S. J.; Study of shear strength on natural soil using laboratory modeling of static penetration test (SSPT). **The Electronic Journal of Geotechnical Engineering**. V. 16/N, p.1201 - 1214, 2011.

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.

HVORSLEV, M. J. **Subsurface exploration and sampling of soils for civil engineering purposes**. Vicksburg, Mississippi. 1949. 521 pp.

KOVACS, W. D. Velocity measurement of free-fall SPT hammer. **Journal of Geotechnical Engineering Division - ASCE**, v.105, n. GT1, p. 1-10, Jan. 1979.

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.

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

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.

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

LUTENEGGER, A. J. & KELLEY, S. P. Standard penetration tests with torque measurement. In: PROCEEDINGS, GEOTECHNICAL SITE CHARACTERIZATION, Balkema, Atlanta, USA, p. 939 a 945, 1998.

MOHR, H. A. Discussion of “standard penetration test: its uses and abuses”. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE**, v. 92, n. SM1, p. 196-199, Jan. 1966.

NEVES, L. F. S. **Metodologia para a determinação as eficiência do ensaio spt através de prova de carga estática sobre o amostrador padrão**. 2004. Dissertação (Mestrado em

Ciências), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 90 p.

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 Ciências), 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 efficiency for standard penetration tests. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering – ASCE**. p. 1252-1263, Out. 2005.

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.

RANZINI, S. M. T. SPTF. **Solos e Rochas**. ABMS, São Paulo, vol. 11, n. único, p. 29-30, 1988.

RANZINI, S. M. T. SPTF: Parte II. **Solos e Rochas**. ABMS, São Paulo, vol. 17, n. 3, p. 189-190, 1994.

SANTANA, C. M.; DANZIGER, F. A. B.; DANZIGER, B. R. The measurement of energy reaching in SPT. In: 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTECHNICAL AND GEOPHYSICAL SITE CHARACTERIZATION, 2012, Porto de Galinhas, Brazil.

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.

SCHNAID, F. **Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações**. São Paulo: Oficina de Texto, 2000, 189 p.

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. 2009.

SEED, R. B.; TOKIMATSU, K.; HARDER, L. F.; CHUNG, R. M. Influence of spt procedures in soil liquefaction resistance evaluations. **Journal of Geotechnical Engineering Division - ASCE**, v. 111, n. 12, p. 1425-1445, 1985.

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.

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

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

TERZAGHI, K. ; PECK, R. B. Soil mechanics in engineering practice. **Soil Exploration**. Chapter 7. New York, USA: John Willey & Sons, Inc. 1948.

TEXEIRA, A. H. Sondagens: Metodologia, Erros mais comuns, Normas de Execução. In: Anais do I Simpósio de Prospecção do Subsolo promovido pela ABMS-NE, 1977, Recife. v. único, p. 39-61.

VESIC, 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.

Apêndice A

Programação no software Matlab® para o Cálculo da 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;
forca = 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;
forca_evento(j)=forca(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

forca_calc=16.816*veloc_BL;
forca_calc_1=16.816*veloc_BL_1;
forca_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)*forca(i+c-
30)+1000*veloc_BL(i+1)*forca(i+1+c-30))/2*1/96000;
    Energia(d)=Energia(d)+Energia(d-1);

    Energia_1(d)=(1000*veloc_BL_1(i)*forca(i+c-
30)+1000*veloc_BL_1(i+1)*forca(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)*forca(i+c-
30)+1000*veloc_BL_2(i+1)*forca(i+1+c-30))/2*1/96000;
    Energia_2(d)=Energia_2(d)+Energia_2(d-1);

    d=d+1;
end

```

```

F_max=max(forca);

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;

disp('_____')
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)=forca_evento;
OUT(:,3)=forca_calc;
OUT(:,4)=Desloc_BL;
OUT(:,5)=Energia;

OUT_1(:,1)=tempo_veloc;
OUT_1(:,2)=forca_evento;
OUT_1(:,3)=forca_calc_1;
OUT_1(:,4)=Desloc_BL_1;
OUT_1(:,5)=Energia_1;

OUT_2(:,1)=tempo_veloc;
OUT_2(:,2)=forca_evento;
OUT_2(:,3)=forca_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,forca)
hold on
plot(tempo_veloc,forca_calc,'r')
plot(tempo_veloc,forca_calc_1,'y')
plot(tempo_veloc,forca_calc_2,'g')
title('MÉDIA - ACELEROMETRO 1 - ACELEROMETRO 2');
xlabel('tempo (s)');
ylabel('Força (kN)');
hleg=legend('MEDIDO','V*Z-MÉD','V*Z-ACEL, 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 de energia, eficiência e recuperação de amostras do ensaio SP01

Tabela B.1: Resultados de energia e penetração do ensaio SP01, nas profundidades 10 a 20 m, utilizando luvas bipartidas para conexão das hastes (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).

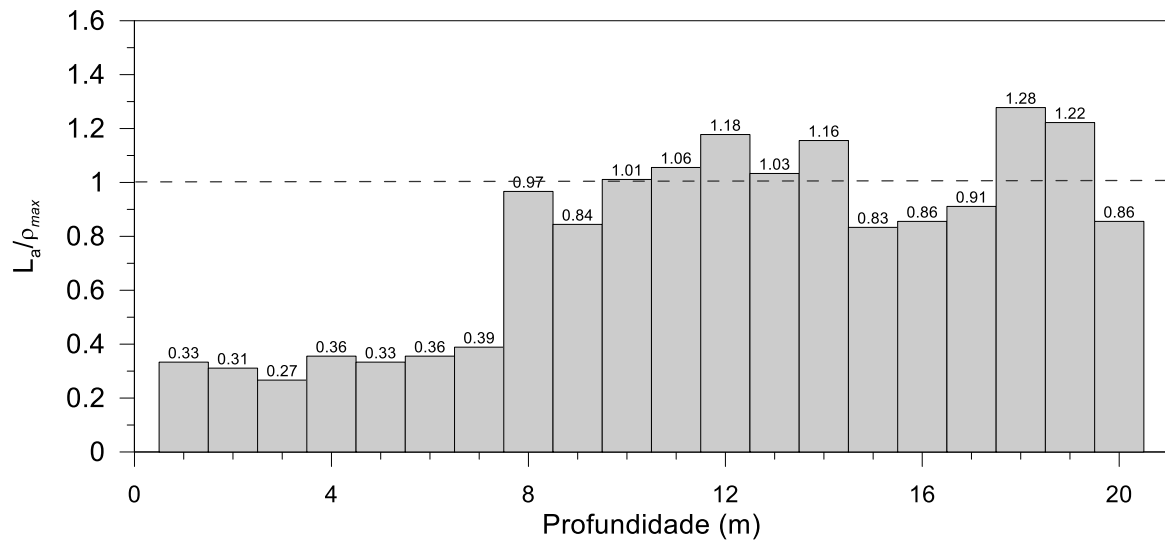
Prof. (m)	N_{SPT}	ρ (m)	$\rho_{acumulada}$ (m)	Golpe n°	L_n (m)	E_{topo} (J)	$EP_{sistema}$ (J)	EP_M (J)
10	10,8	0,038	0,187	4	11,3	325,9	516,1	502,5
		0,033	0,249	6		338,5	511,1	499,3
		0,028	0,277	7		325,4	506,1	496,1
		0,032	0,309	8		337,9	510,1	498,6
		0,026	0,335	9		331,3	504,1	494,8
		0,020	0,355	10		325,8	498,1	491,0
		0,027	0,382	11		309,5	505,1	495,5
		0,026	0,408	12		310,4	504,1	494,8
		0,010	0,418	13		318,5	488,2	484,6
		0,038	0,456	14		312,0	516,1	502,5
Média						323,5	505,9	496,0
12	11,4	0,039	0,185	4	13,3	317,1	519,5	503,1
		0,025	0,246	6		316,7	504,7	494,2
		0,028	0,321	9		326,8	507,9	496,1
		0,027	0,368	11		313,2	506,8	495,5
		0,023	0,391	12		308,4	502,6	492,9
		0,031	0,422	13		325,6	511,1	498,0
		0,014	0,436	14		315,0	493,1	487,2
		0,025	0,461	15		319,8	504,7	494,2
Média						317,8	506,3	495,1
14	13,8	0,016	0,274	9	15,5	300,2	496,3	488,4
		0,018	0,456	18		317,4	498,5	489,7
Média						308,8	497,4	489,1
16	15,0	0,028	0,171	6	17,5	306,5	511,6	496,1
		0,024	0,287	11		304,7	506,8	493,5
		0,021	0,308	12		307,1	503,2	491,6
		0,014	0,365	15		283,9	494,9	487,2
Média						300,5	504,1	492,1
18	22,5	0,020	0,180	6	19,5	290,4	503,3	491,0
		0,020	0,220	8		334,2	503,3	491,0
		0,028	0,248	9		356,8	513,3	496,1
		0,012	0,260	10		301,5	493,3	485,9
		0,017	0,277	11		340,0	499,6	489,1
		0,018	0,295	12		329,9	500,8	489,7
		0,016	0,346	16		298,6	498,3	488,4
		0,011	0,357	17		292,1	492,0	485,3
		0,005	0,395	21		308,9	484,5	481,4
		0,015	0,410	22		310,4	497,0	487,8
		0,020	0,440	25		276,7	503,3	491,0
		0,010	0,450	26		344,4	490,8	484,6
		Média						315,3
20	44,5	0,013	0,105	6	21,5	322,5	495,4	486,5
		0,010	0,177	13		318,6	491,4	484,6
		0,007	0,304	32		310,9	487,5	482,7
Média						317,3	491,4	484,6

Tabela B.2: Resultados de eficiência do ensaio SP01, nas profundidades 10 a 20 m, utilizando luvas bipartidas para conexão das hastes (Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP).

Prof. (m)	N_{SPT}	Golpe n°	L_n (m)	E_{topo} (J)	η_{topo} (%)
10	10,8	4	11.3	325,9	63,2
		6		338,5	66,2
		7		325,4	64,3
		8		337,9	66,3
		9		331,3	65,7
		10		325,8	65,4
		11		309,5	61,3
		12		310,4	61,6
		13		318,5	65,2
		14		312,0	60,5
Média				323,5	64,0
12	11,4	4	13.3	317,1	61,0
		6		316,7	62,7
		9		326,8	64,3
		11		313,2	61,8
		12		308,4	61,4
		13		325,6	63,7
		14		315,0	63,9
15	319,8	63,4			
Média				317,8	62,8
14	13,8	9	15.5	300,2	60,5
		18		317,4	63,7
Média				308,8	62,1
16	15,0	6	17.5	306,5	59,9
		11		304,7	60,1
		12		307,1	61,0
		15		283,9	57,4
Média				300,5	59,6
18	22,5	6	19.5	290,4	57,7
		8		334,2	66,4
		9		356,8	69,5
		10		301,5	61,1
		11		340,0	68,1
		12		329,9	65,9
		16		298,6	59,9
		17		292,1	59,4
		21		308,9	63,7
		22		310,4	62,4
		25		276,7	55,0
26	344,4	70,2			
Média				315,3	63,3
20	44,5	6	21.5	322,5	65,1
		13		318,6	64,8
		32		310,9	63,8
Média				317,3	64,6

Tabela B.3: Resultados de comprimento das amostras de solo recuperadas no ensaios SP01.

Profundidade (m)	SP01
	Recuperação (m)
1	0,15
2	0,14
3	0,12
4	0,16
5	0,15
6	0,16
7	0,18
8	0,44
9	0,38
10	0,46
11	0,48
12	0,53
13	0,47
14	0,52
15	0,38
16	0,39
17	0,41
18	0,58
19	0,55
20	0,39

Figura B.1: Relação entre o comprimento da amostra recuperada (L_a) e a penetração do amostrador (ρ_{\max}) (ensaio SP01 no campo experimental da FEAGRI-Campinas, SP).

Apêndice C

Resultados Típicos dos Ensaios SPT com Medida de Energia

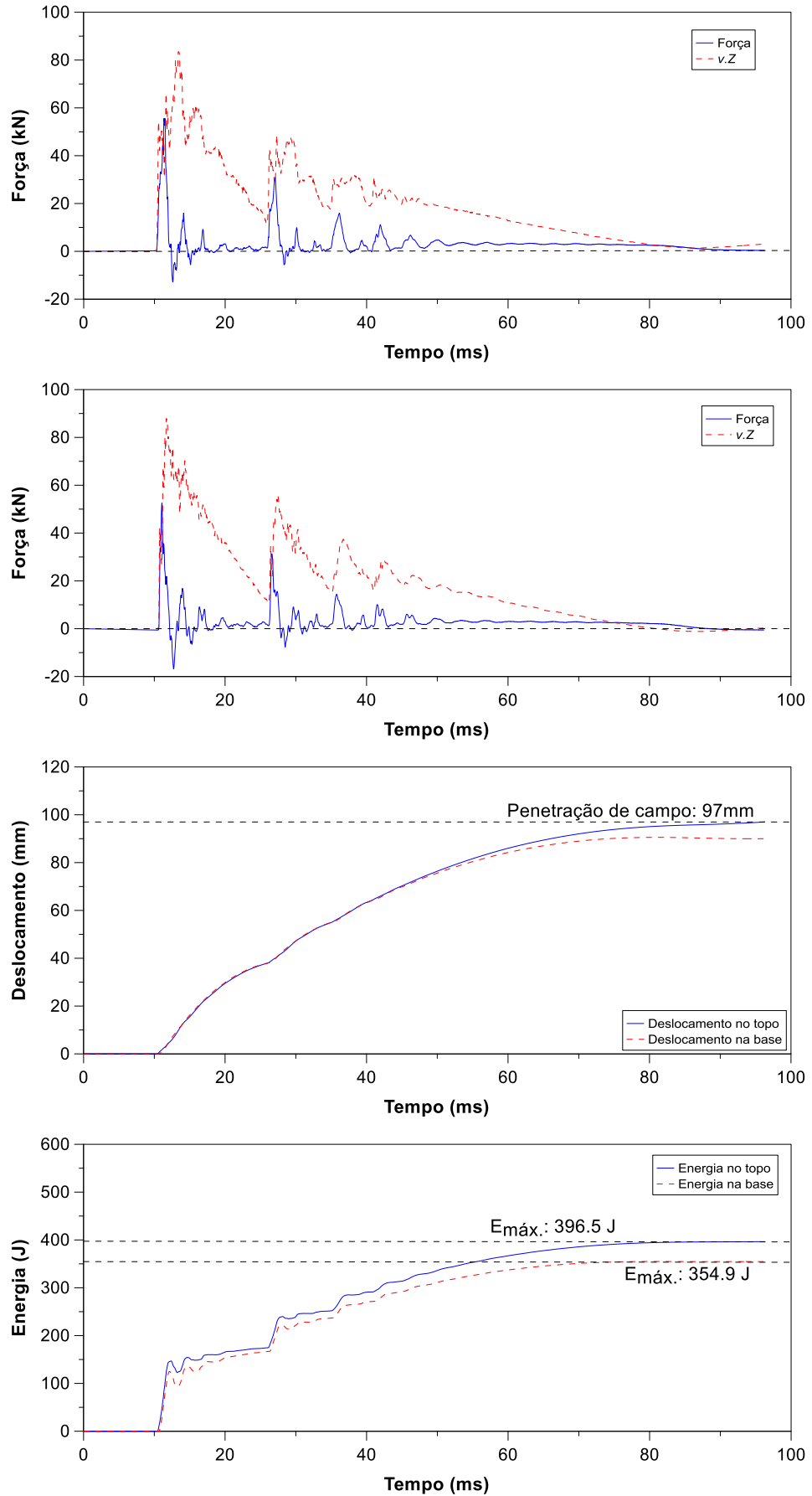


Figura C.1: Resultados ensaio SP02, equipamento convencional – Prof. 1 m – 3º golpe.

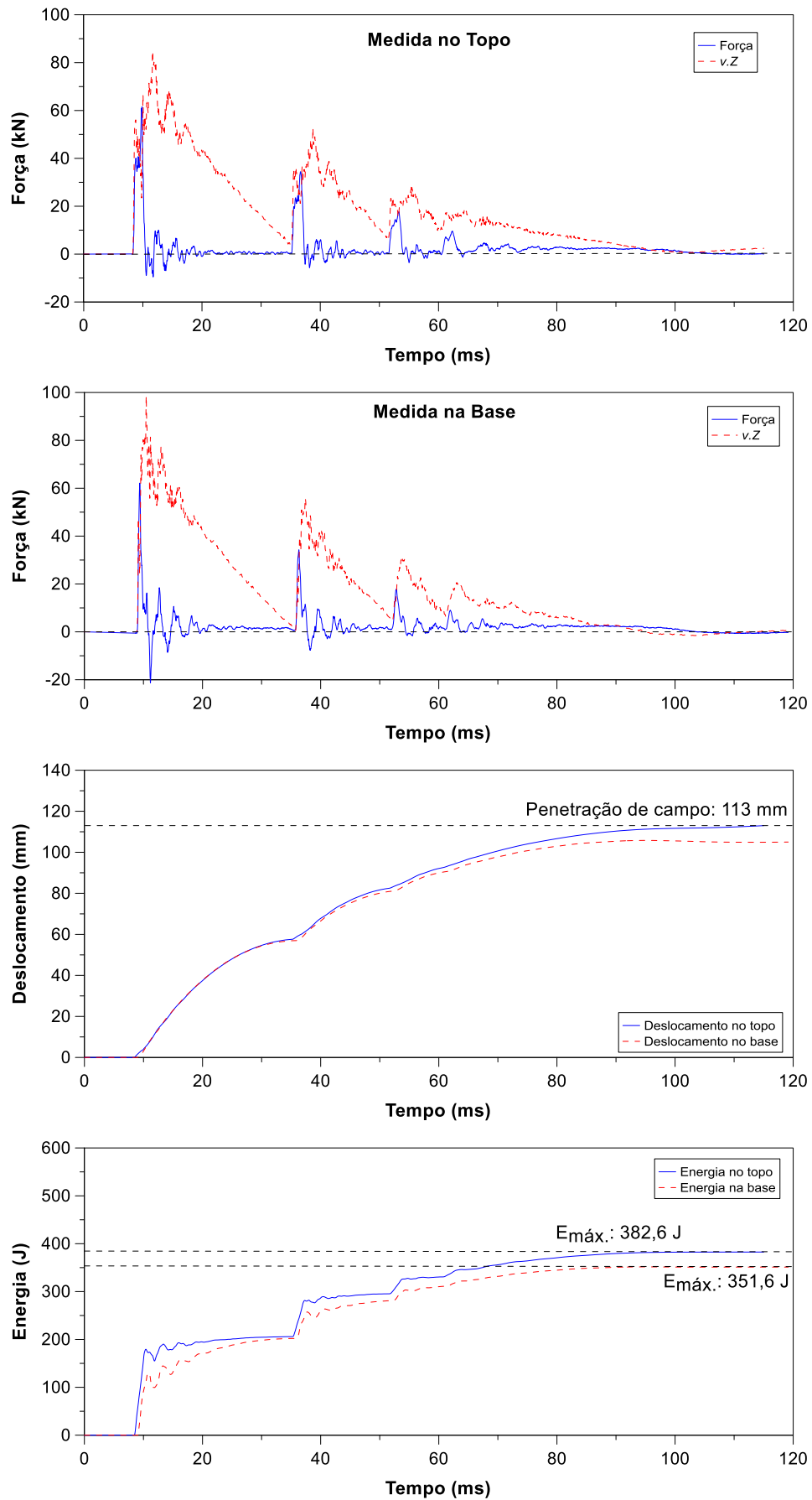


Figura C.2: Resultados ensaio SP02, equipamento convencional – Prof. 2 m – 2º golpe.

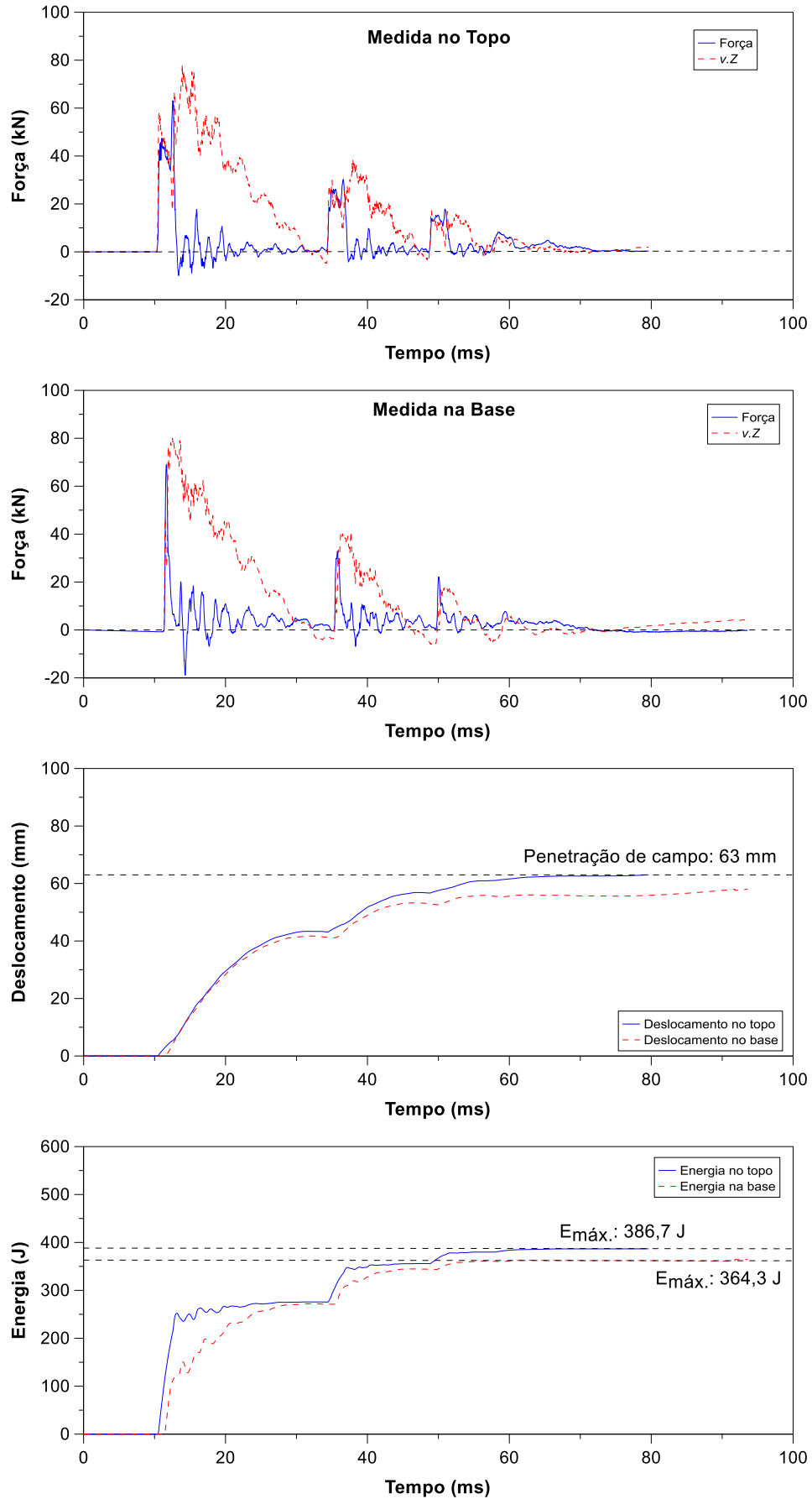


Figura C.3: Resultados ensaio SP02, equipamento convencional – Prof. 4 m – 5º golpe.

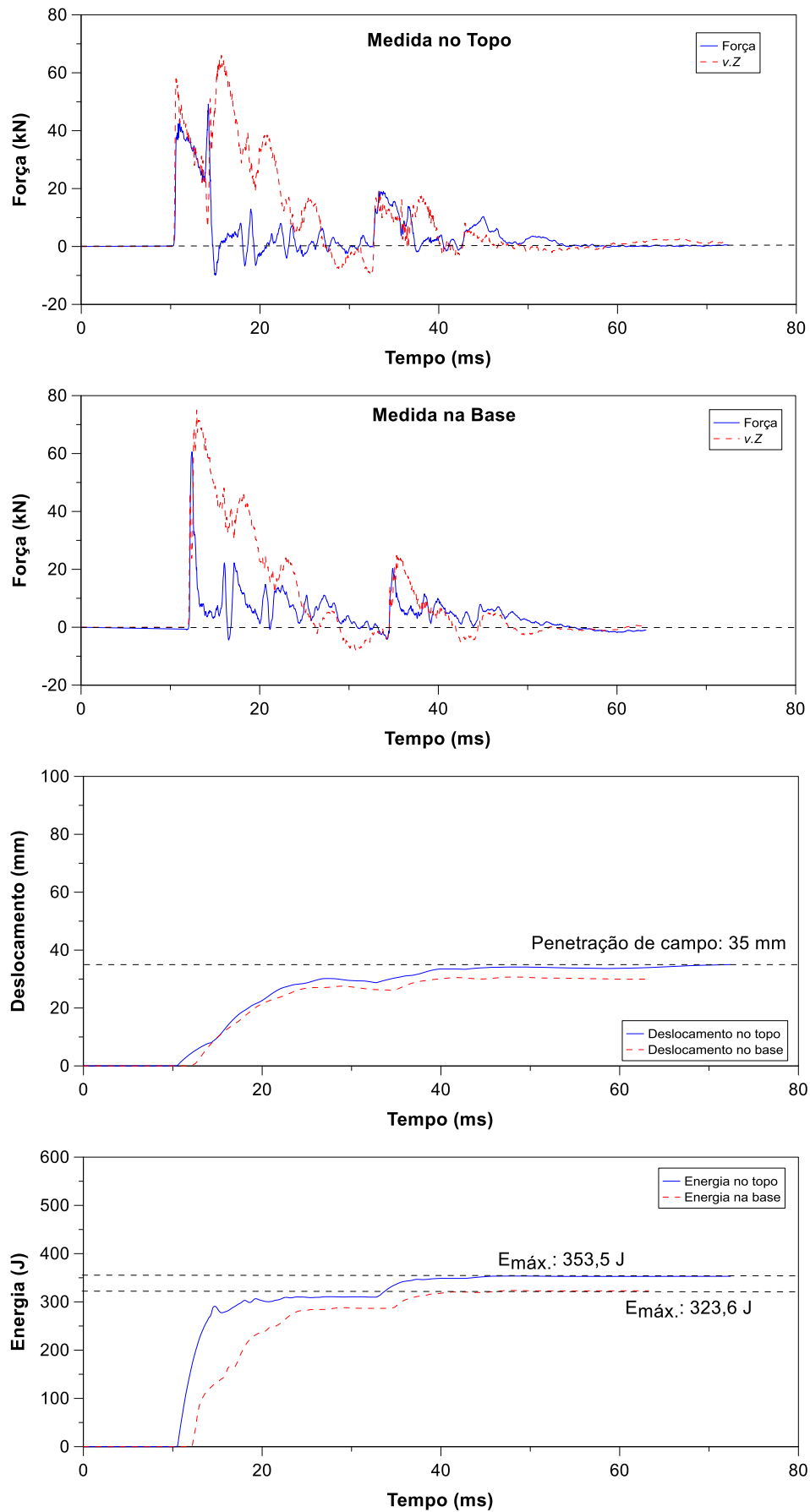


Figura C.4.: Resultados ensaio SP02, equipamento convencional – Prof. 8 m – 5º golpe.

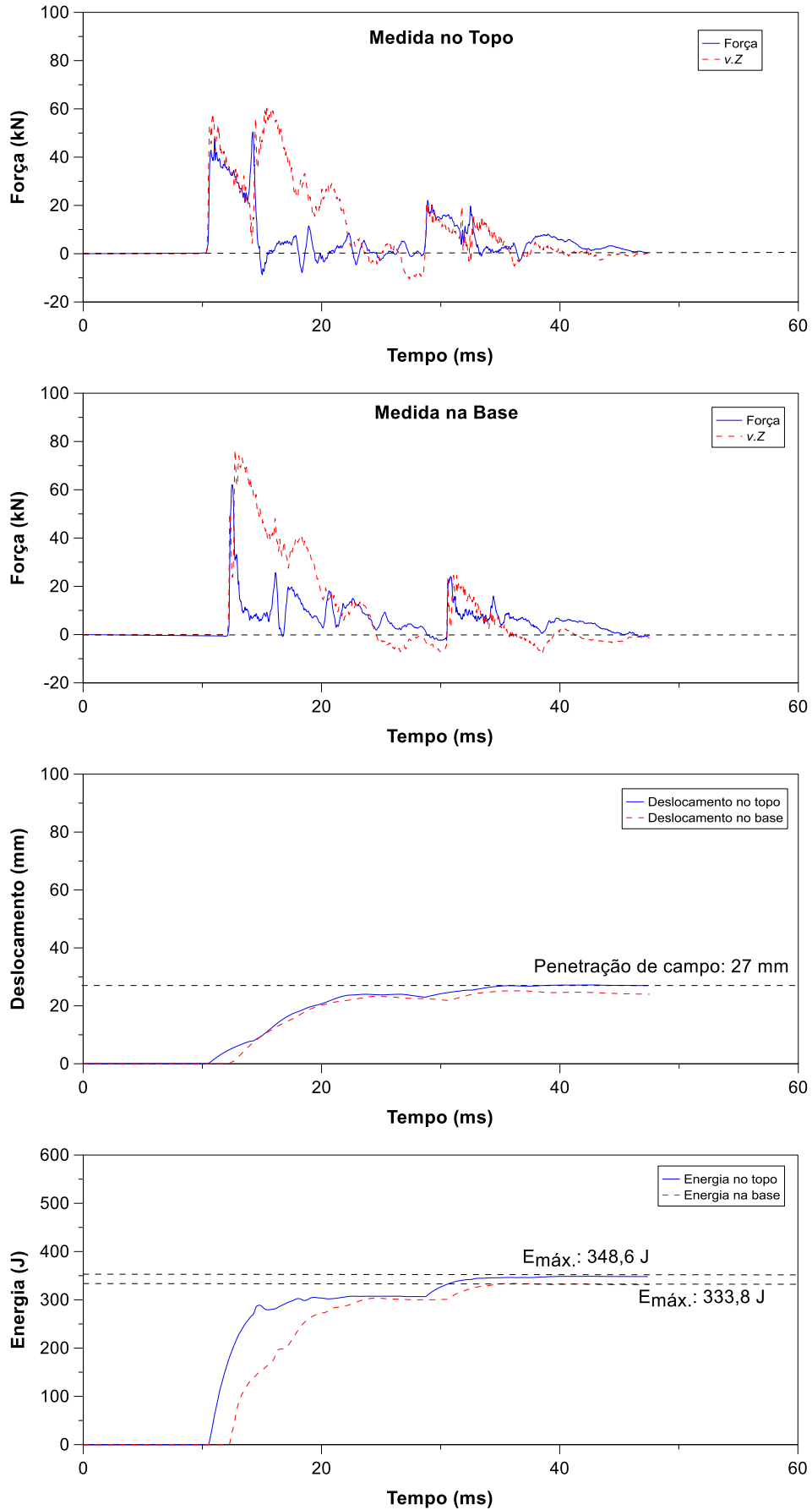


Figura C.5: Resultados ensaio SP02, equipamento convencional – Prof. 8 m – 10° golpe.

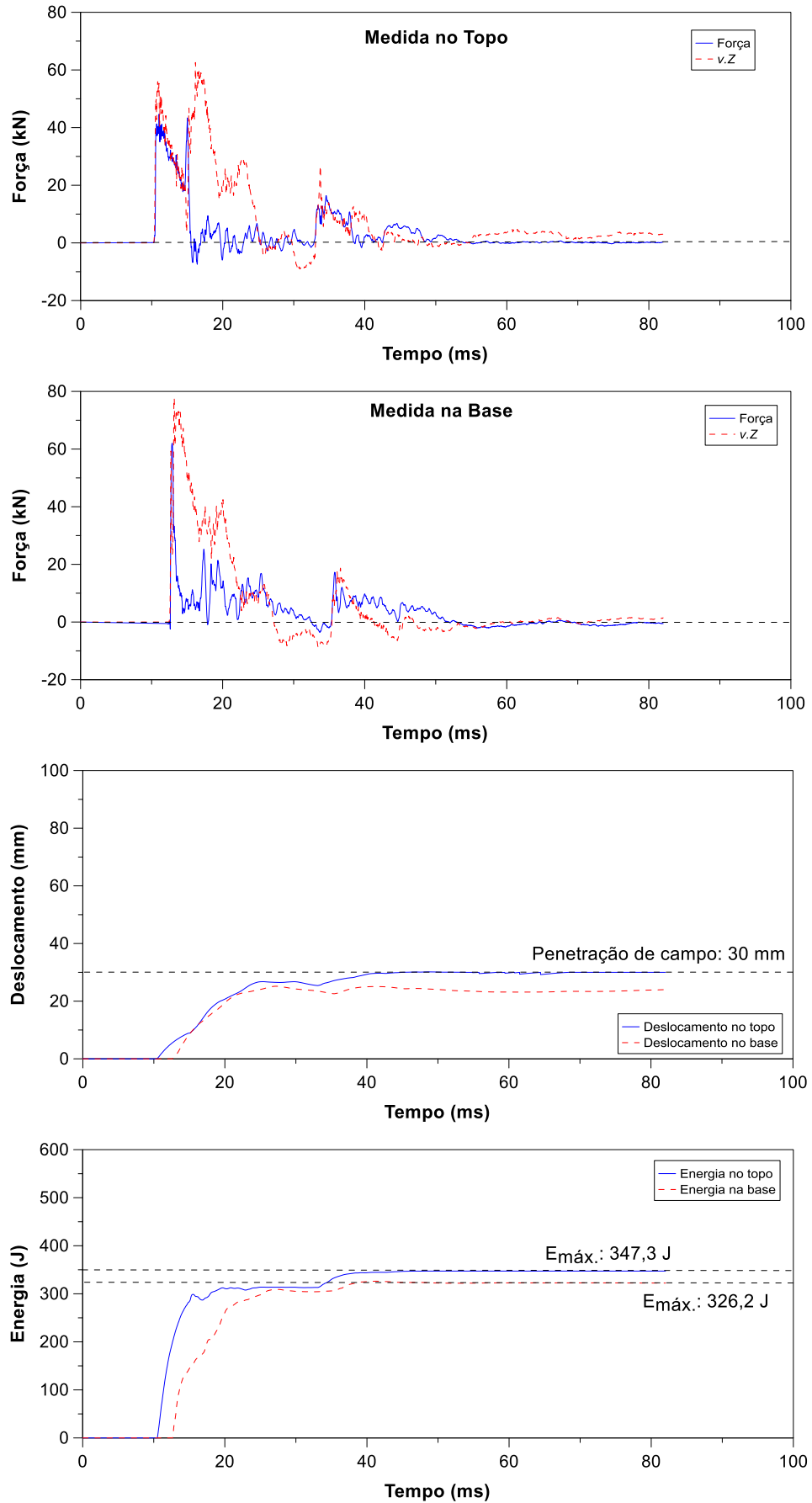


Figura C.6: Resultados ensaio SP02, equipamento convencional – Prof. 10 m – 5º golpe.

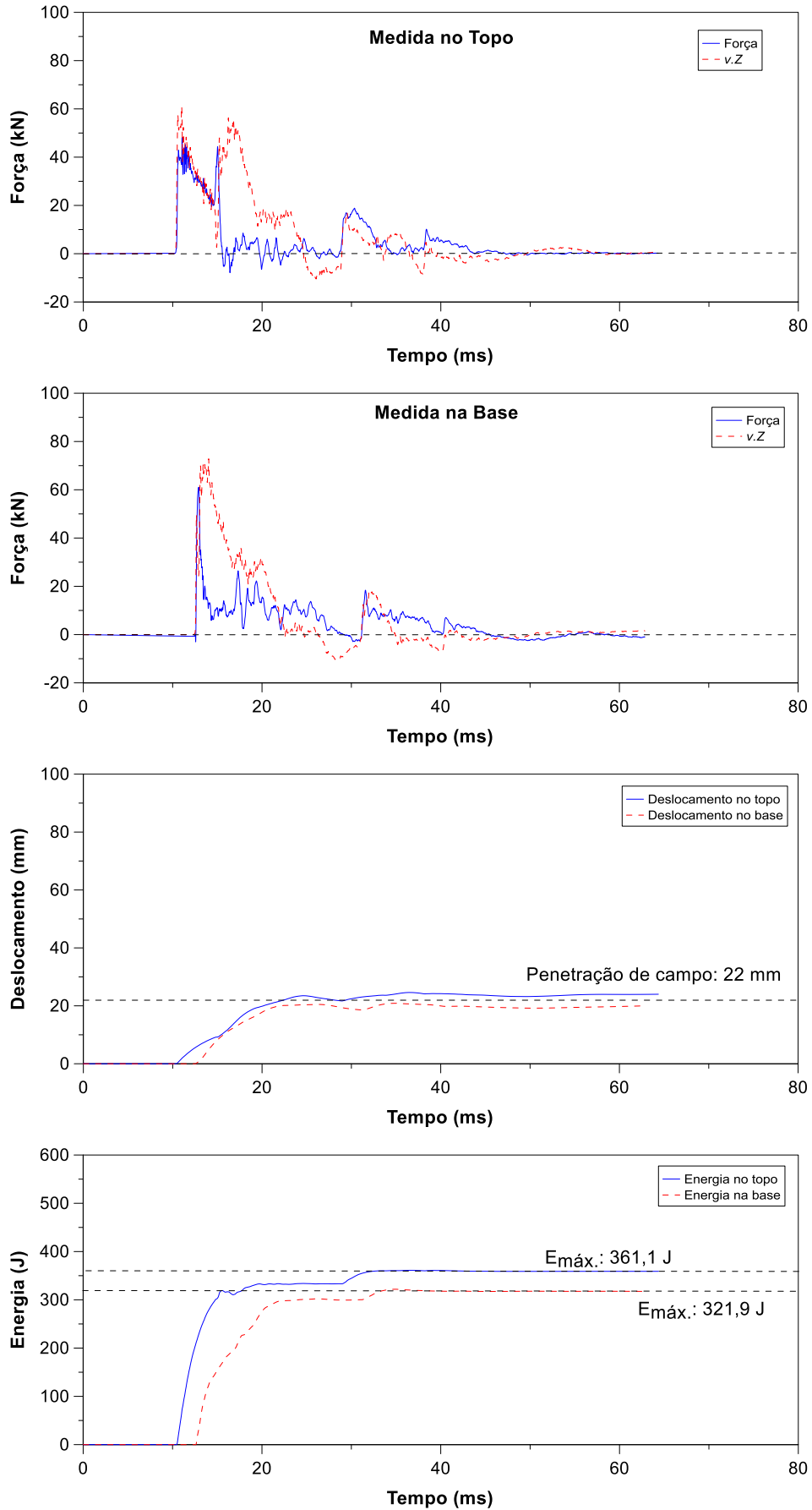


Figura C.7: Resultados ensaio SP02, equipamento convencional – Prof. 10 m – 9º golpe.

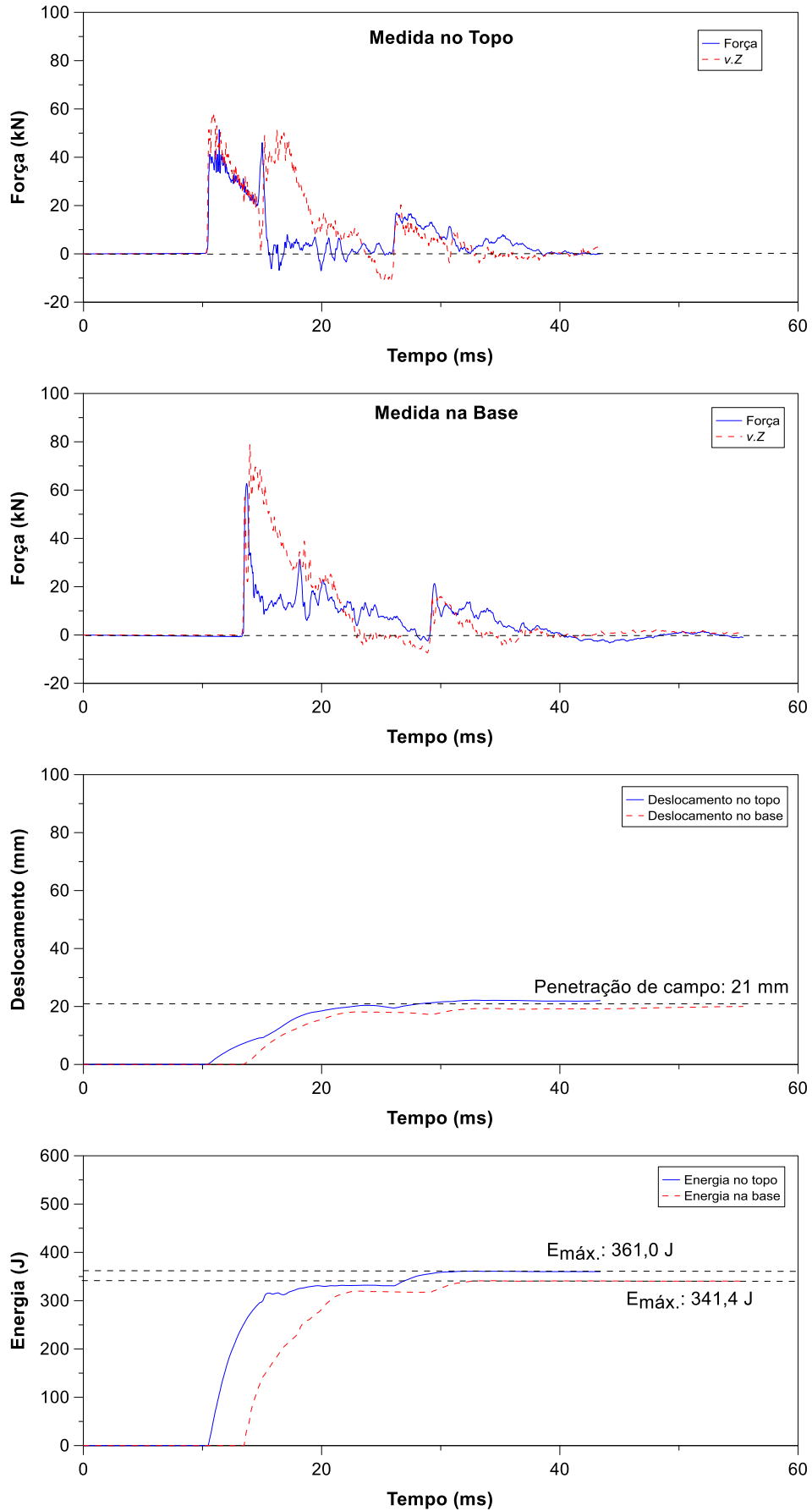


Figura C.8: Resultados ensaio SP02, equipamento convencional – Prof. 10 m – 14º golpe.

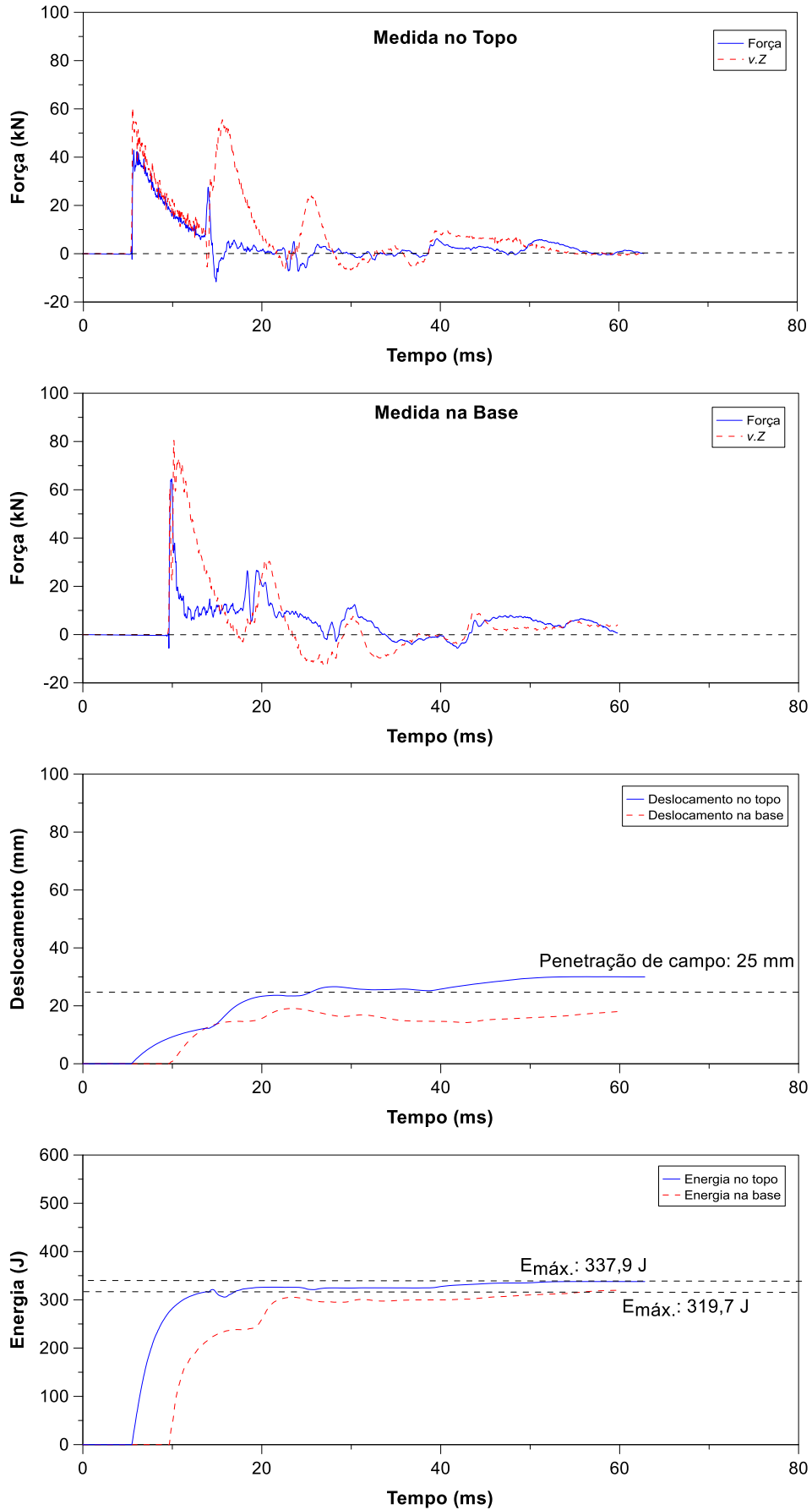


Figura C.9: Resultados ensaio SP02, equipamento convencional – Prof. 20 m – 6º golpe.

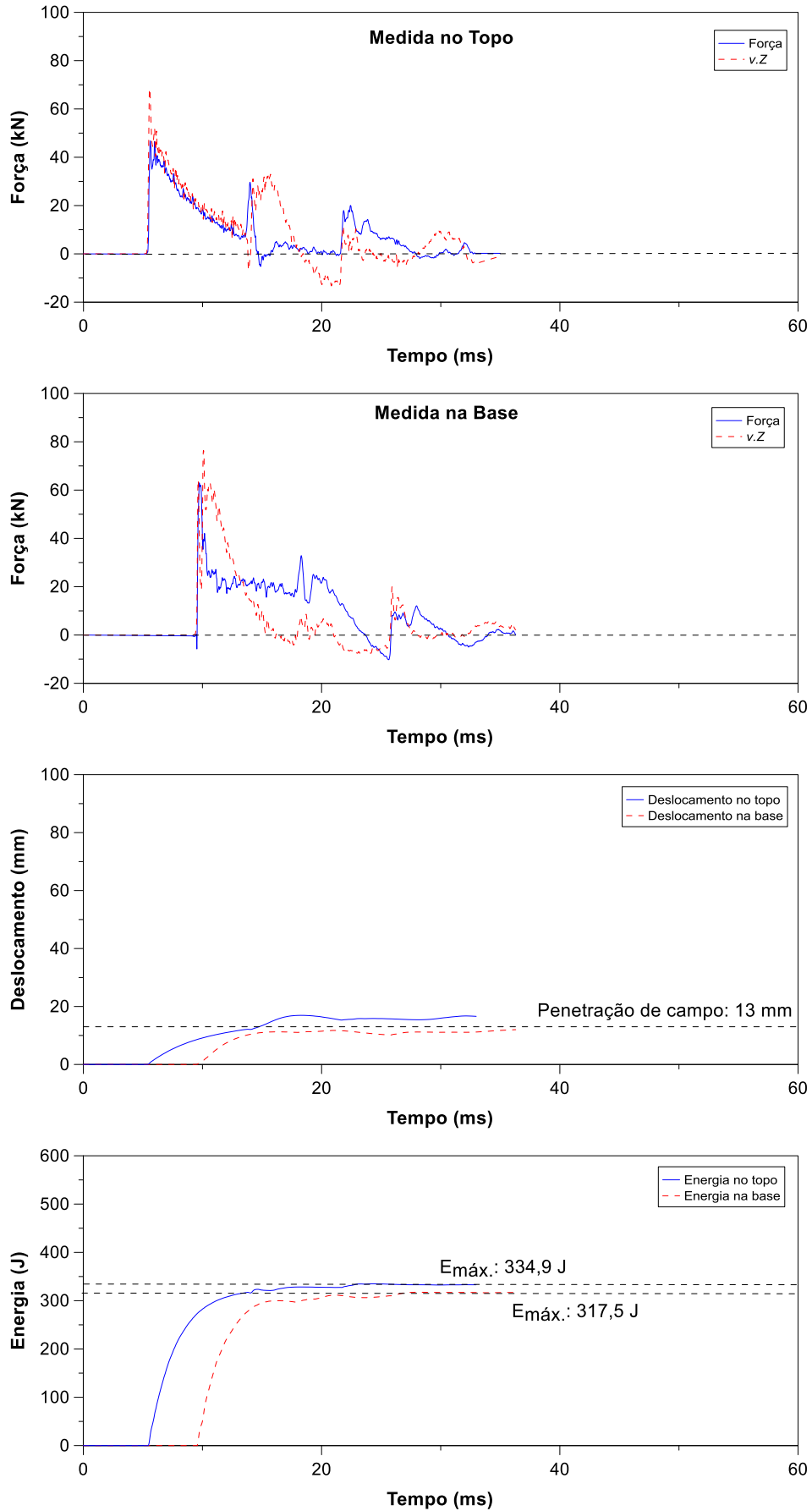


Figura C.10: Resultados ensaio SP02, equipamento convencional – Prof. 20 m – 18° golpe.

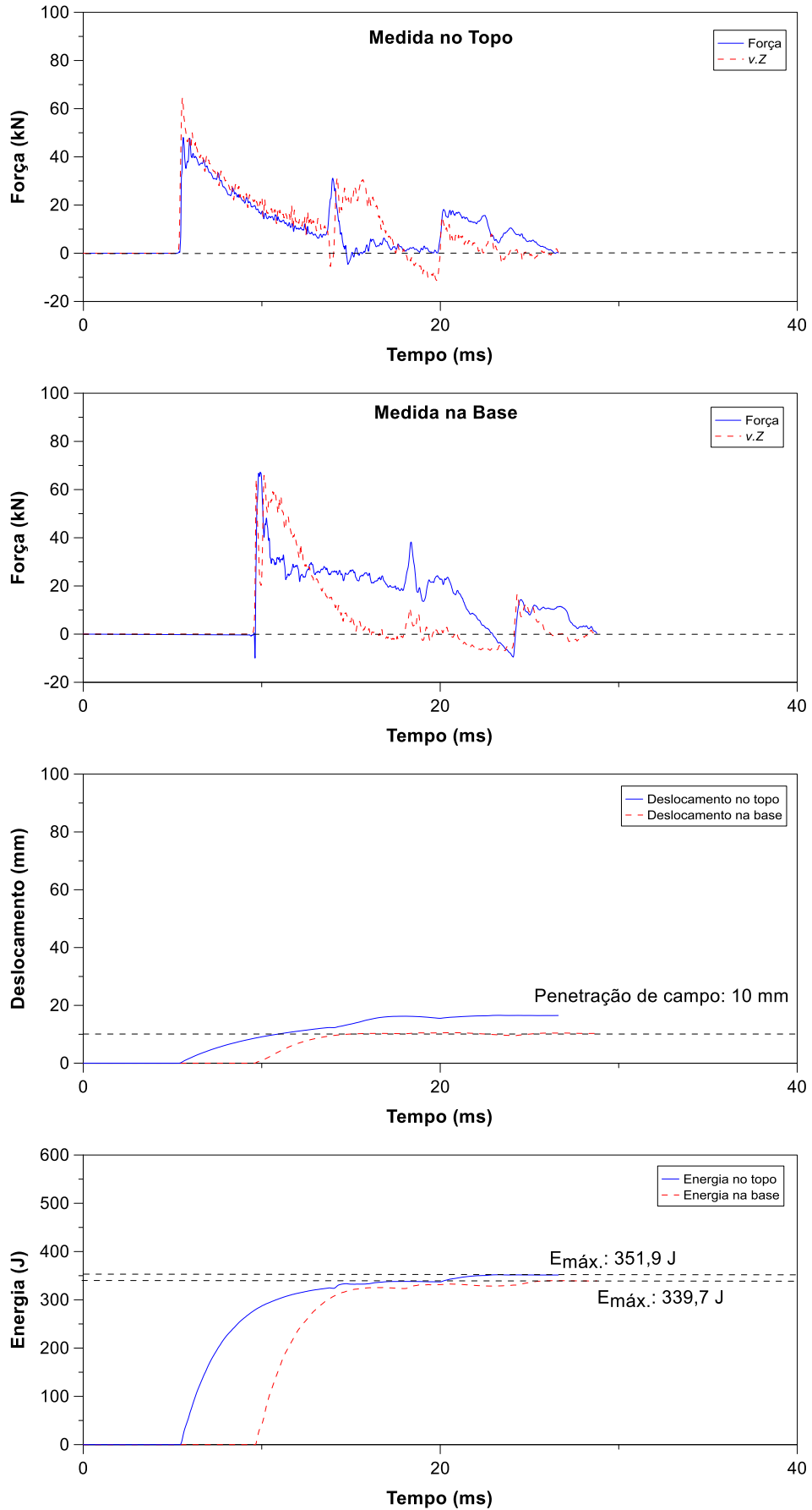


Figura C.11: Resultados ensaio SP02, equipamento convencional – Prof. 20 m – 25° golpe.

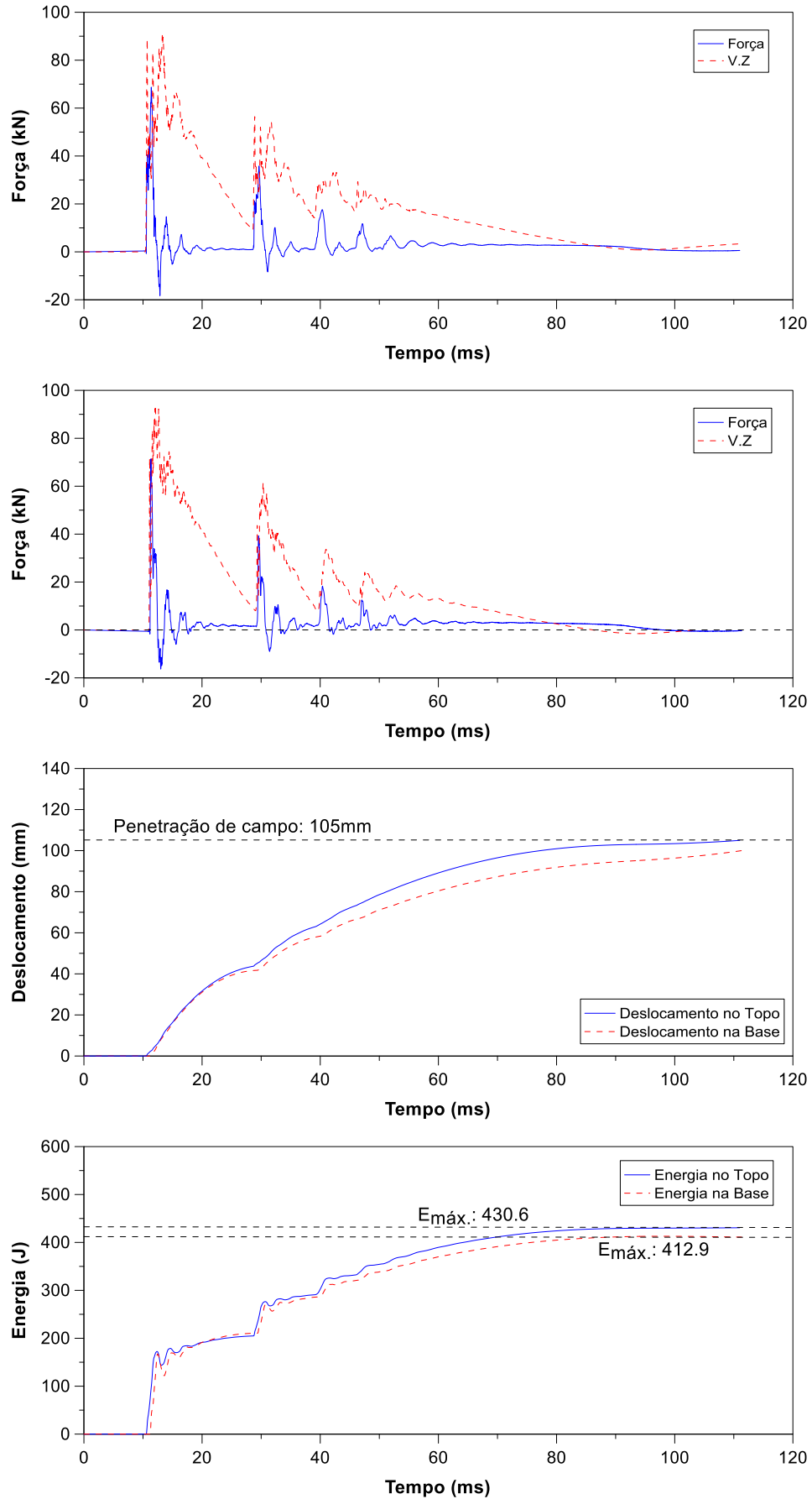


Figura C.12: Resultados ensaio SP03, equipamento convencional – Prof. 1 m – 5º golpe.

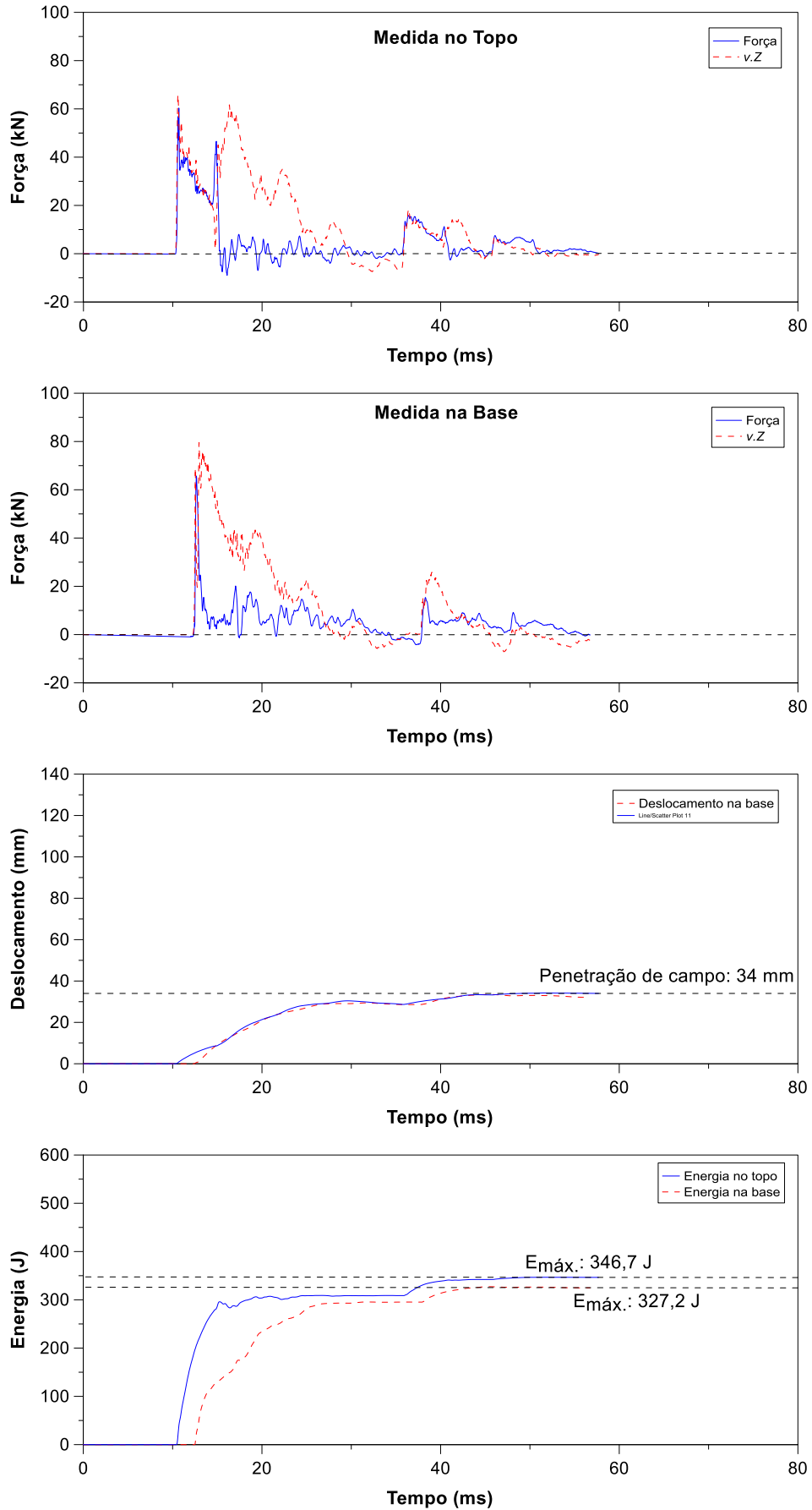


Figura C.13: Resultados ensaio SP03, equipamento convencional – Prof. 10 m – 5° golpe.

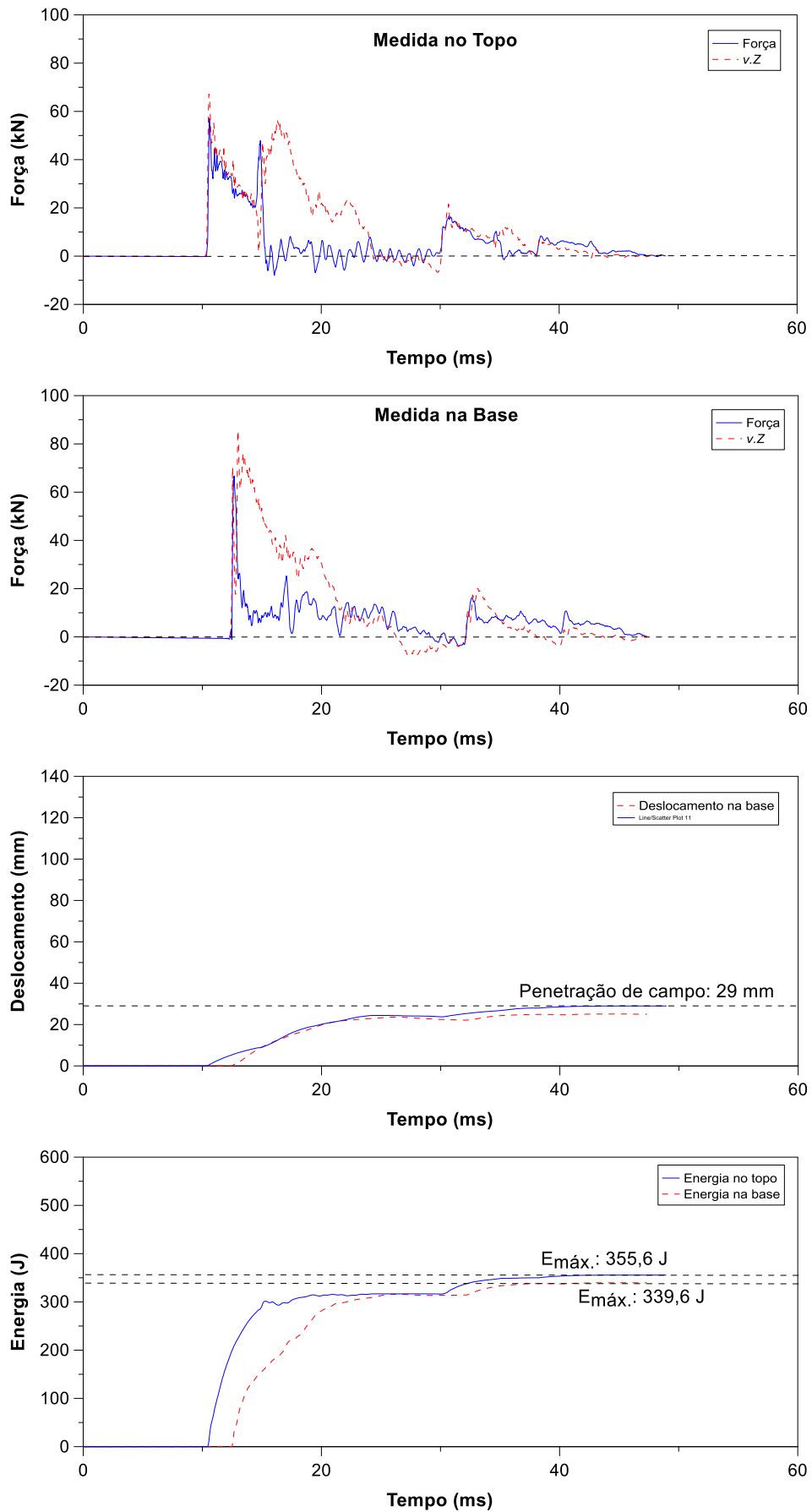


Figura C.14: Resultados ensaio SP03, equipamento convencional – Prof. 10 m – 9° golpe.

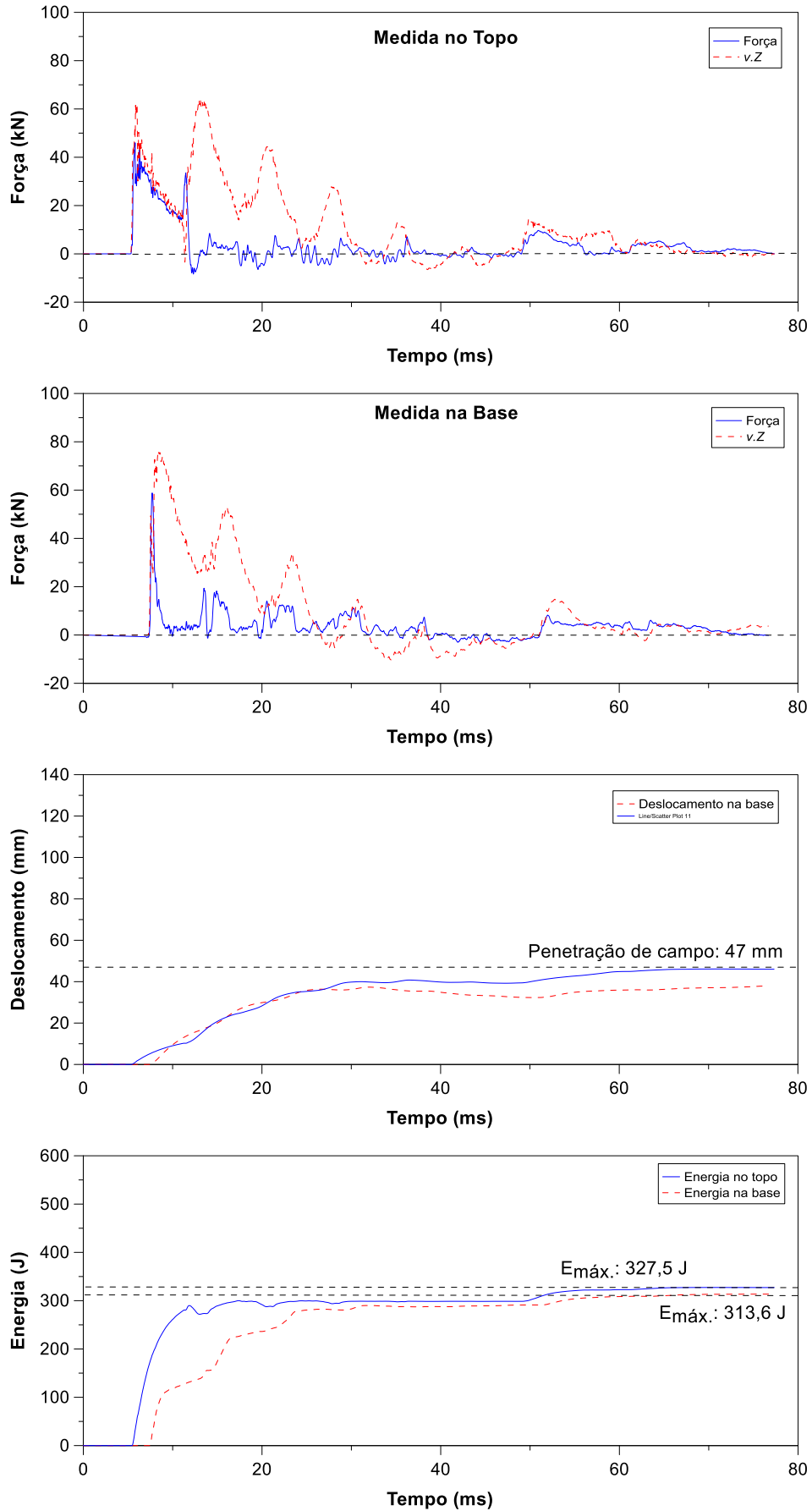


Figura C.15: Resultados ensaio SP03, equipamento convencional – Prof. 14 m – 3º golpe.

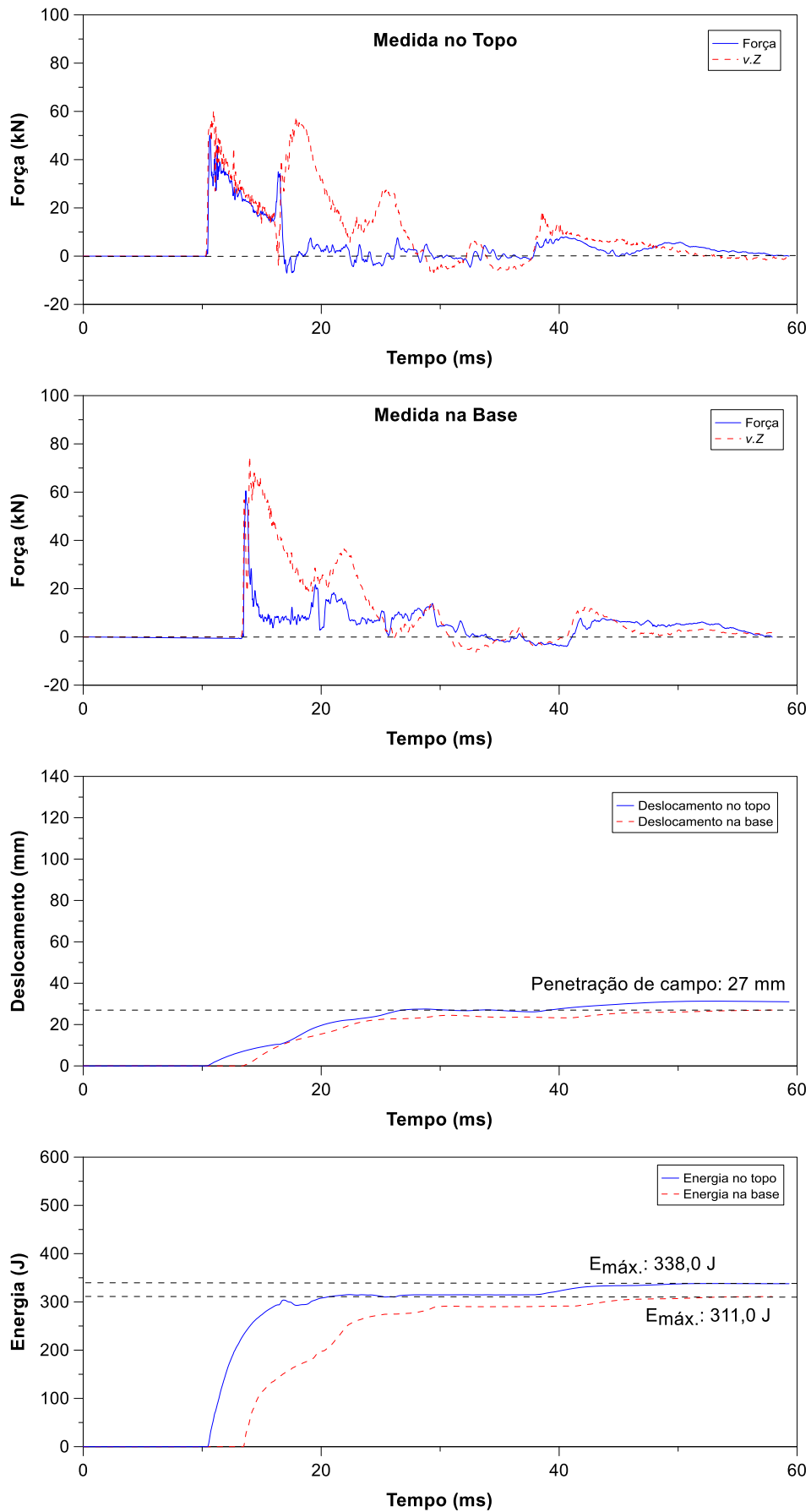


Figura C.16: Resultados ensaio SP03, equipamento convencional – Prof. 14 m – 7º golpe.

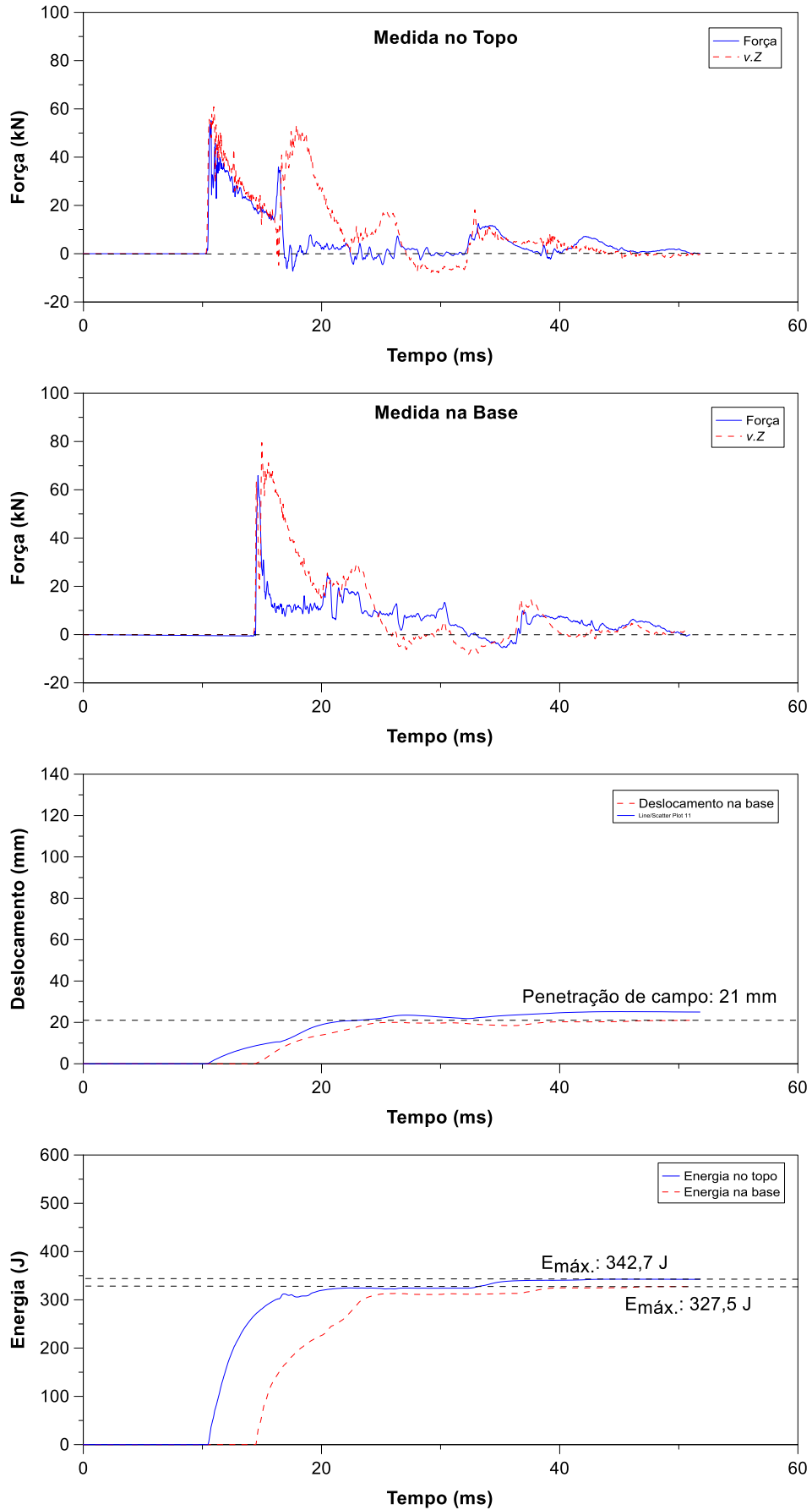


Figura C.17: Resultados ensaio SP03, equipamento convencional – Prof. 14 m – 12° golpe.

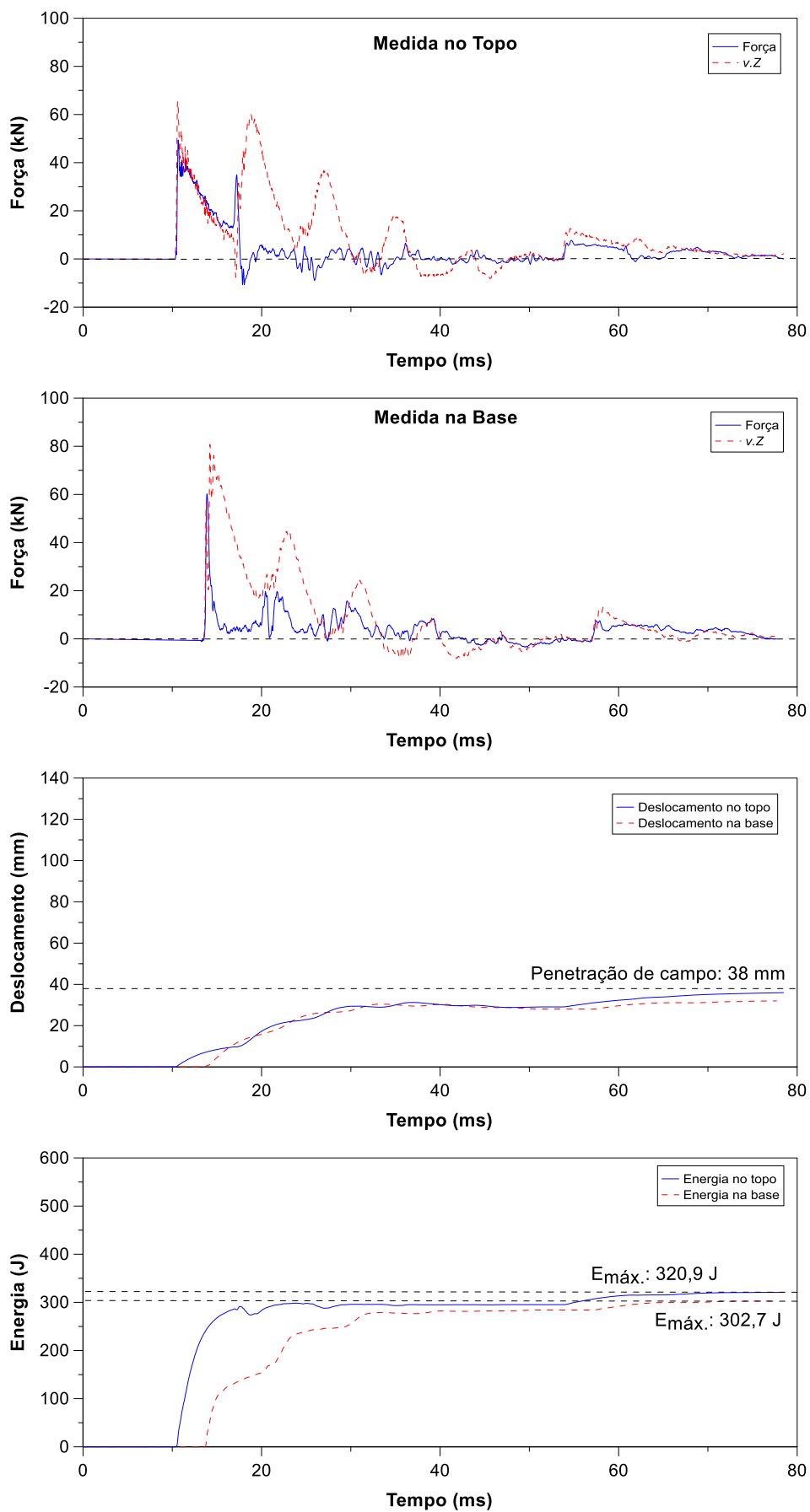


Figura C.18: Resultados ensaio SP03, equipamento convencional – Prof.16 m – 5° golpe.

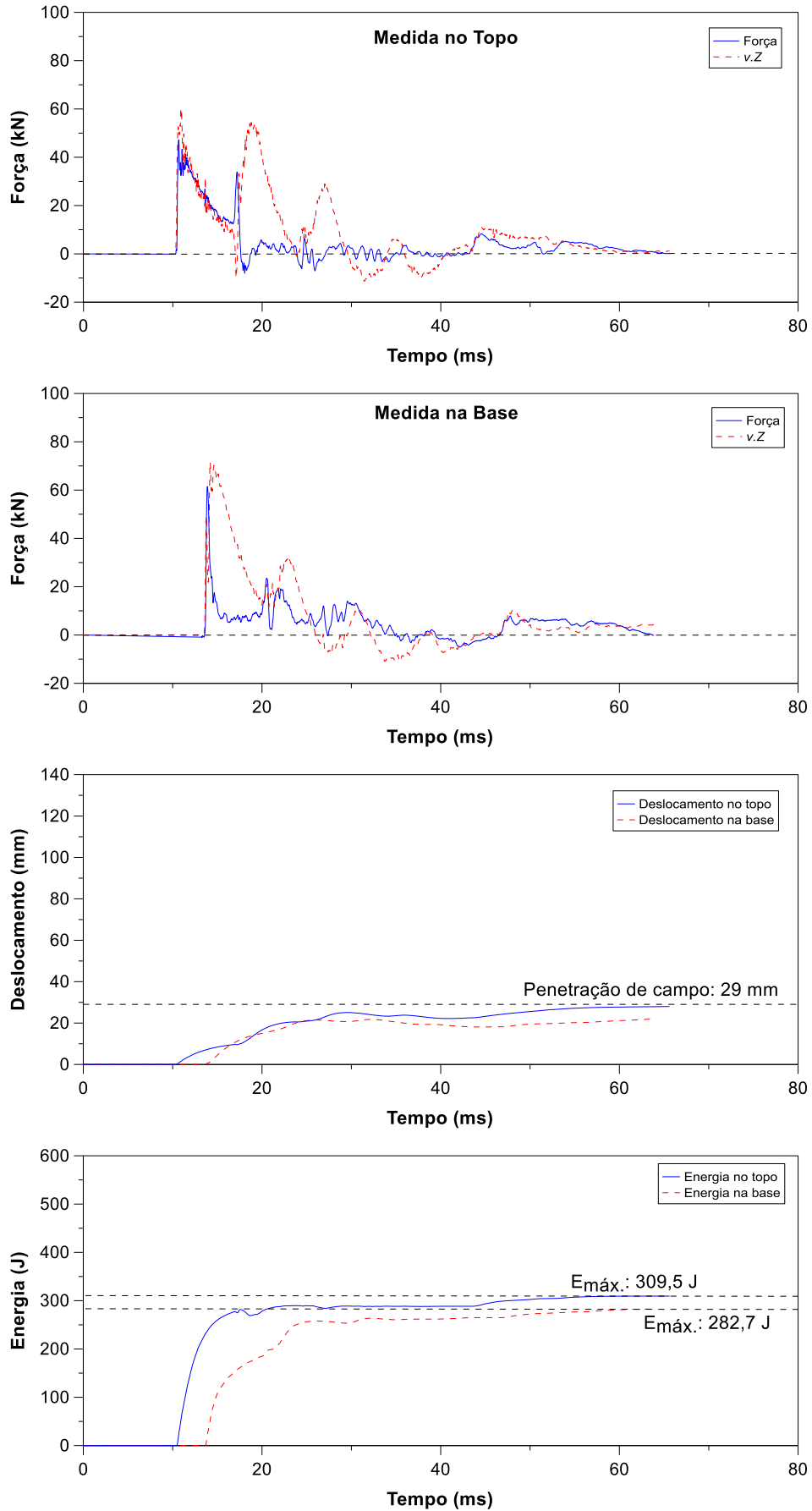


Figura C.19: Resultados ensaio SP03, equipamento convencional – Prof. 16 m – 8º golpe.

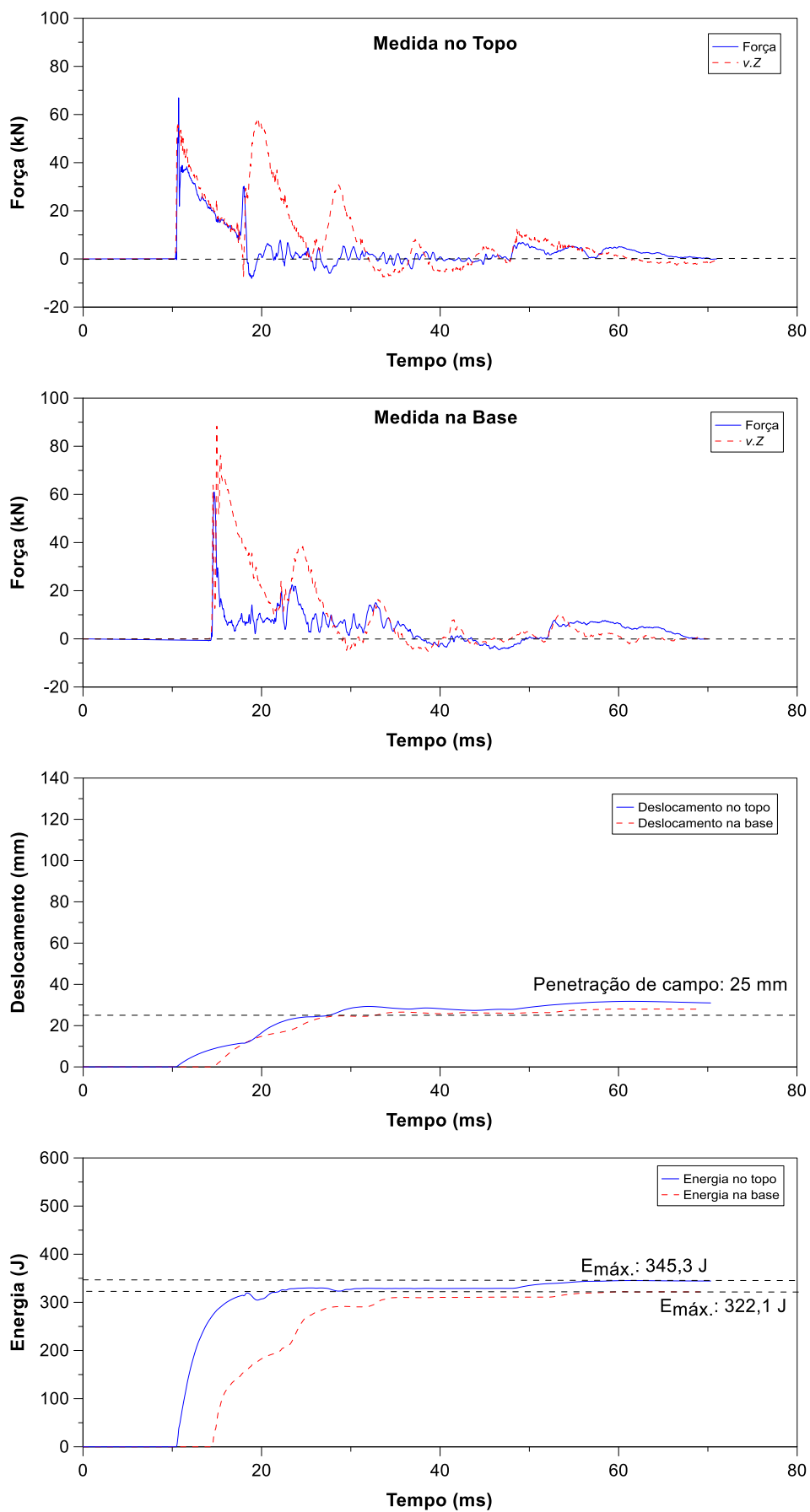


Figura C.20: Resultados ensaio SP03, equipamento convencional – Prof. 18 m – 6° golpe.

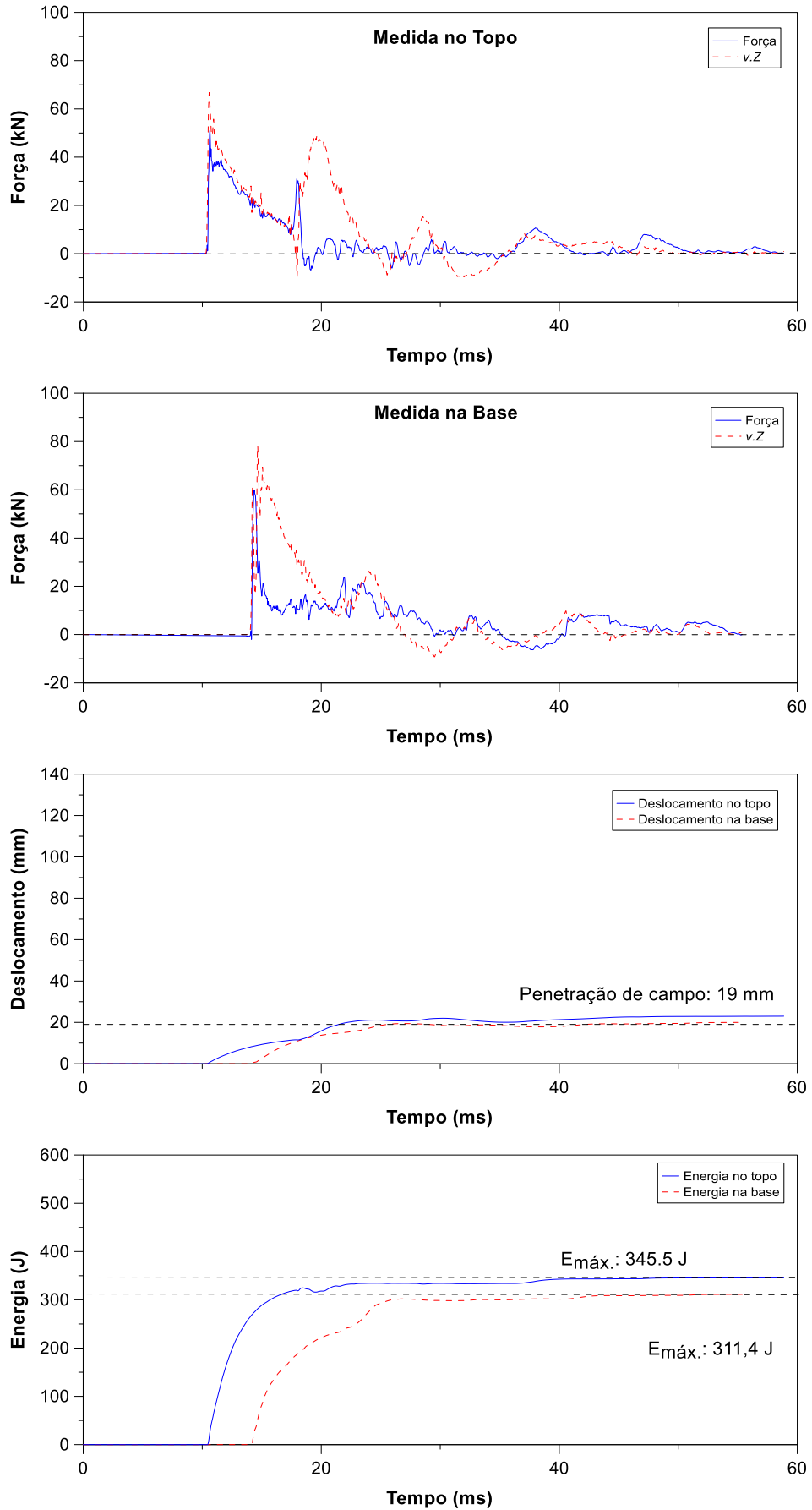


Figura C.21: Resultados ensaio SP03, equipamento convencional – Prof. 18 m – 10° golpe.

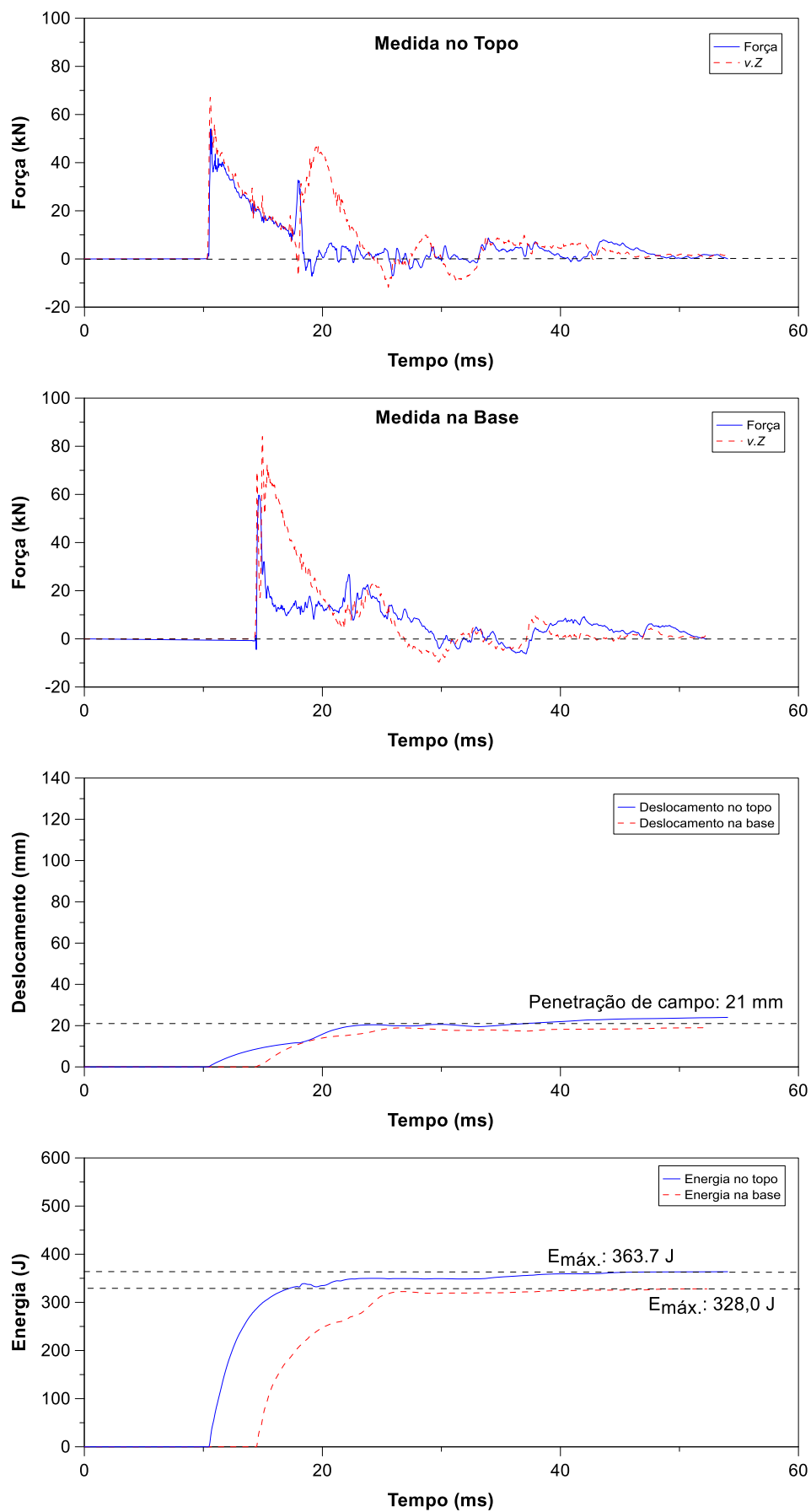


Figura C.22: Resultados ensaio SP03, equipamento convencional – Prof. 18 m – 13° golpe.

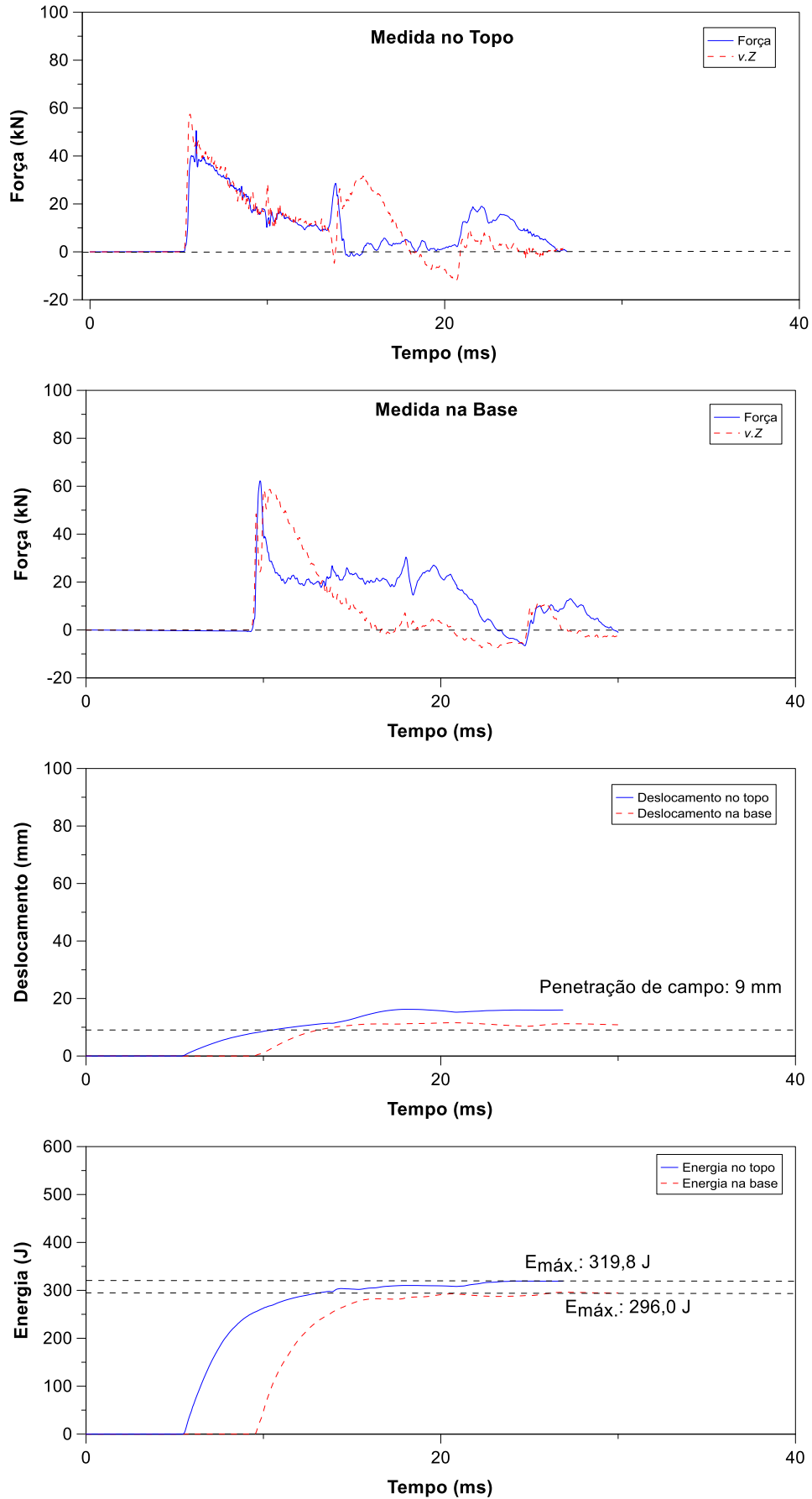


Figura C.23: Resultados ensaio SP03, equipamento convencional – Prof. 20 m – 14° golpe.

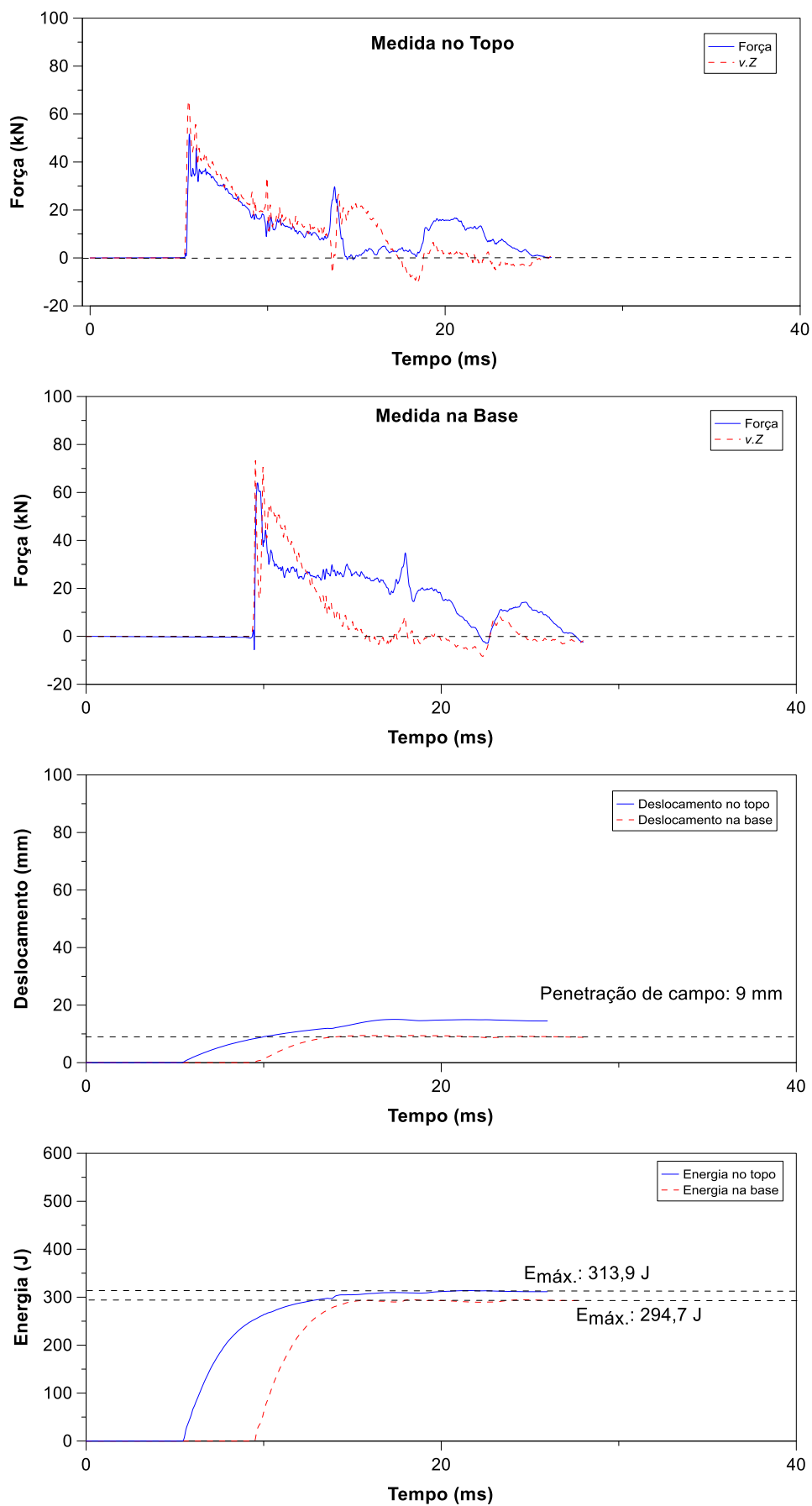


Figura C.24: Resultados ensaio SP03, equipamento convencional – Prof. 20 m – 23° golpe.

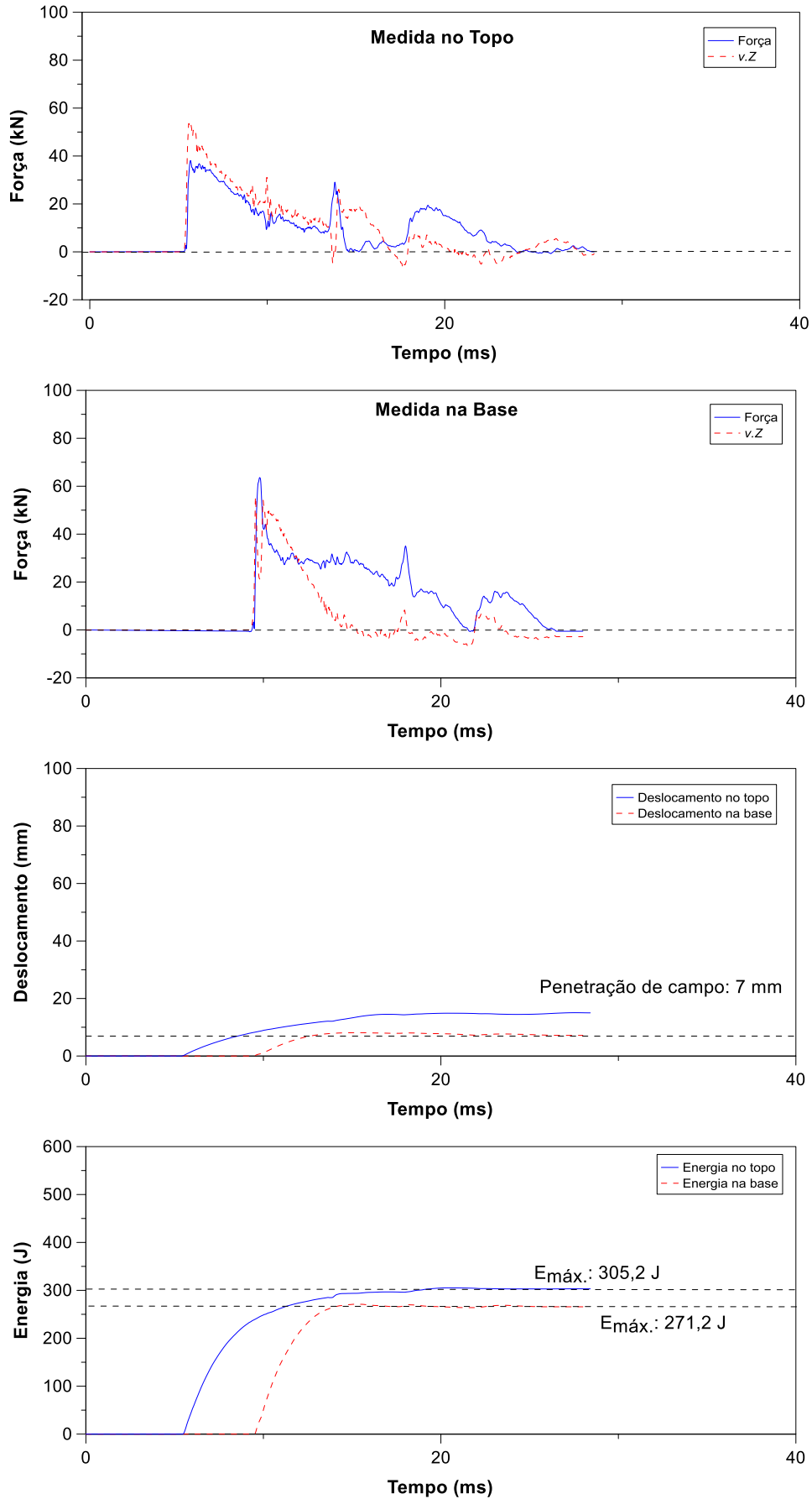


Figura C.25: Resultados ensaio SP03, equipamento convencional – Prof. 20 m – 27° golpe.

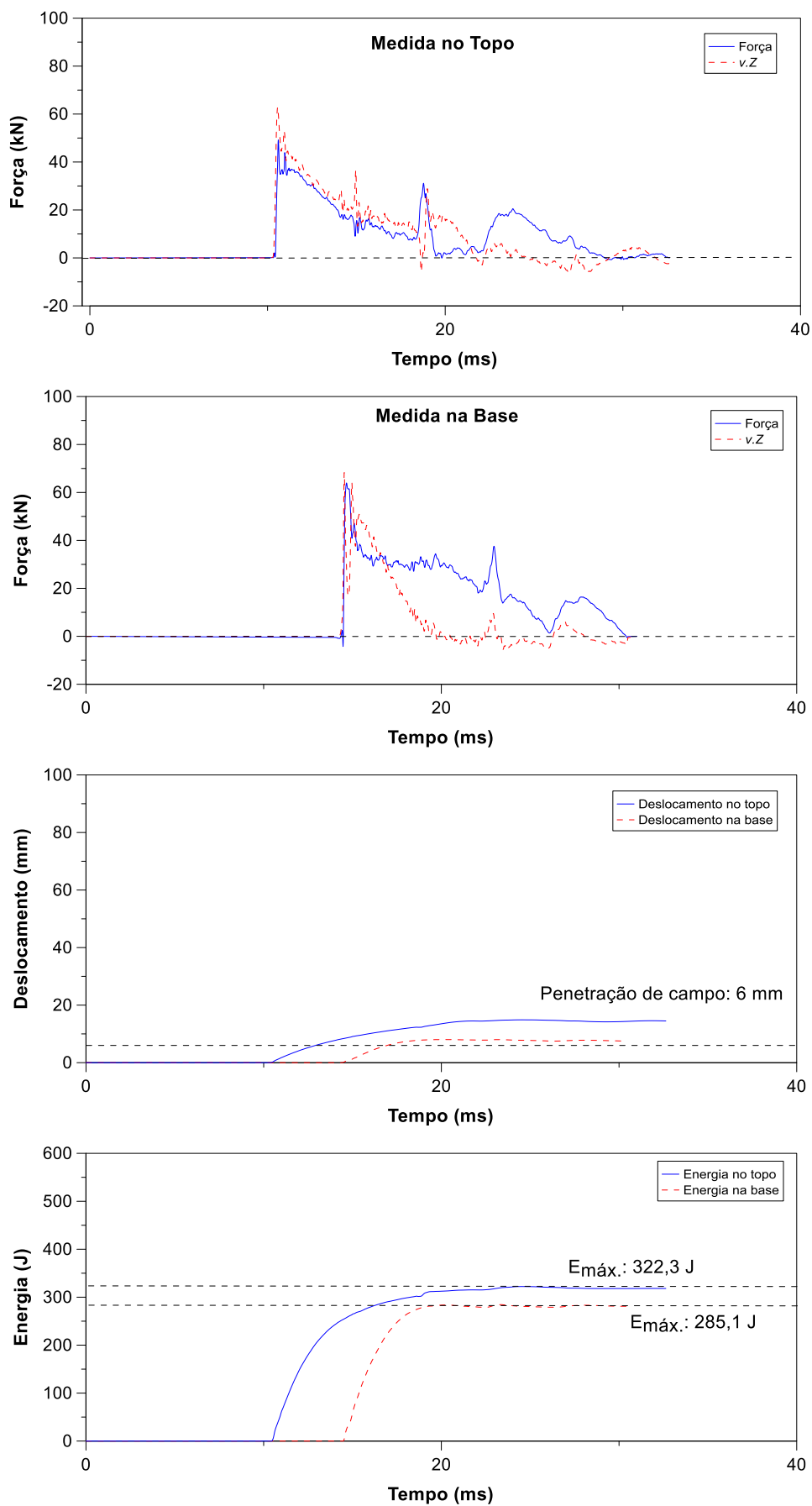


Figura C.26: Resultados ensaio SP03, equipamento convencional – Prof. 20 m – 32° golpe.

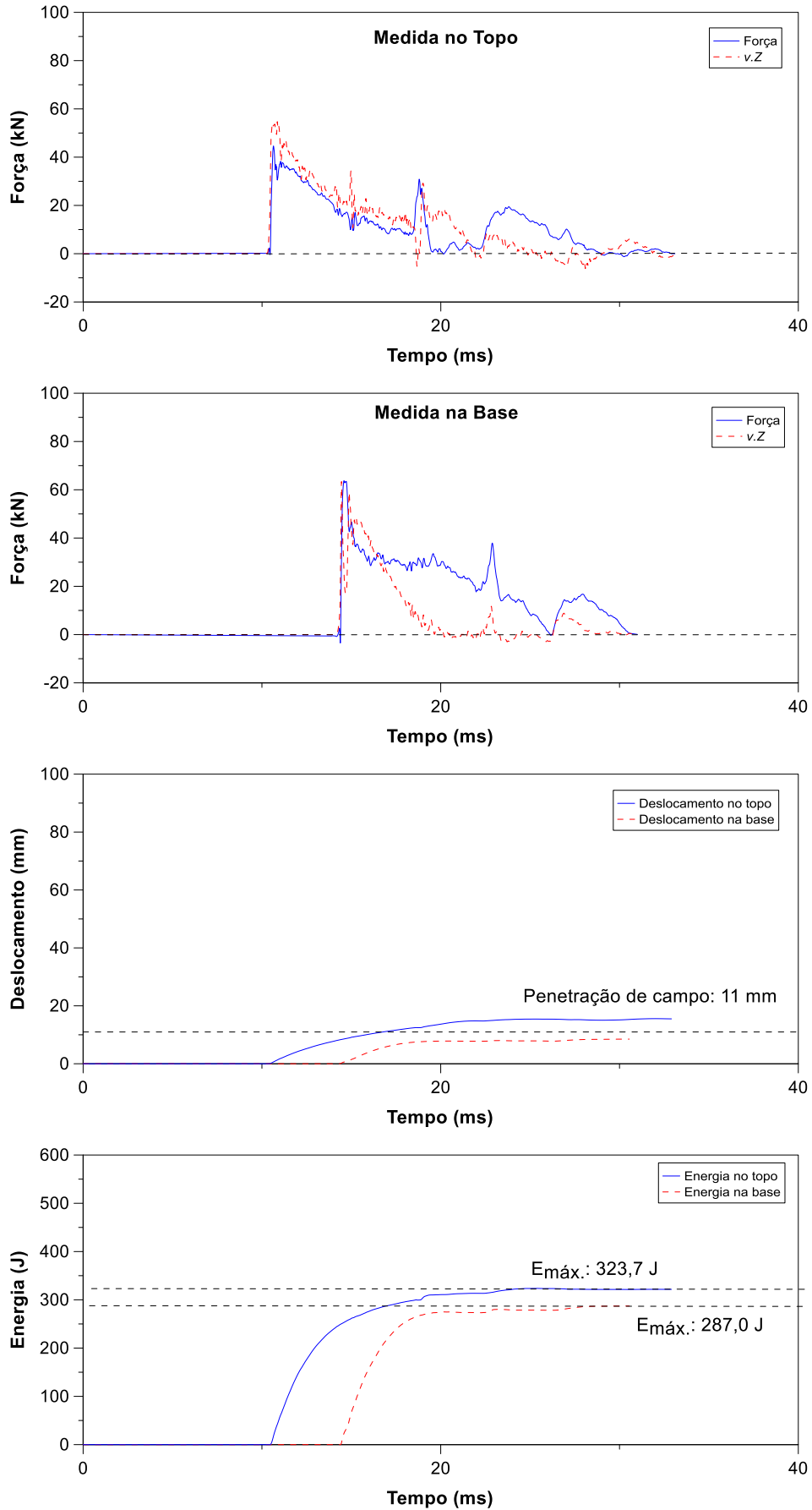


Figura C.27: Resultados ensaio SP03, equipamento convencional – Prof. 20 m – 36° golpe.