

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA**

**INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS DO ENSAIO SPT COM BASE EM  
INSTRUMENTAÇÃO DINÂMICA**

**JULIANA AZOIA LUKIANTCHUKI**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia (Versão Corrigida).

ORIENTADOR: PROF. DR. EDMUNDO ROGÉRIO ESQUIVEL

SÃO CARLOS – SP

2012

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

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Atendimento ao Usuário do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

L954i Lukiantchuki, Juliana Azoia  
Interpretação de resultados do ensaio SPT com base em instrumentação dinâmica / Juliana Azoia Lukiantchuki; orientador Edmundo Rogério Esquivel. São Carlos, 2012.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia)-- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

1. Ensaio de simples reconhecimento.
2. Ensaio SPT.
3. Energia.
4. Teoria da Onda.
5. Instrumentação dinâmica.
6. Princípio de Hamilton.
7. Resistência dinâmica. I. Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **JULIANA AZOIA LUKIANTCHUKI**.

Título da Tese: "Interpretação de resultados do ensaio SPT com base em instrumentação dinâmica".

Data da defesa: 27/07/2012

### Comissão Julgadora:

### Resultado:

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

APROVADO

Prof. Dr. **Rodrigo Salgado**  
(Purdue University/USA)

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

Prof. Dr. **Antonio Belincanta**  
(Universidade Estadual de Maringá/UEM)

Aprovado

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

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:  
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

*Aos meus amados pais Mario e Maria Alice, com quem aprendi as grandes virtudes da vida. As minhas amadas irmãs, Layla, Marlice e Marieli, que são minha referência de vida e aos pequeninos Mario e Caio.... Com toda a minha gratidão por tudo o que vocês representam na minha vida.*





# AGRADECIMENTOS

---

*"You can dream, create, design and build the most wonderful place in the world.*

*But you need people to turn their dream into reality. "*

*(Walt Disney)*

A Deus, que com sua infinita bondade me permitiu chegar até aqui e realizar este sonho. Obrigada por ter colocado pessoas maravilhosas no meu caminho e que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho. A ele eu dirijo toda a minha gratidão porque dele vem tudo o que eu sou, o que tenho e o que espero.

A minha maravilhosa família, que representa a melhor parte de mim. Agradeço ao meu querido pai Mario, que sempre esteve ao meu lado apesar da sua ausência física. Obrigada por todo o amor compartilhado, pelo seu forte exemplo e toda a sua dedicação para com a nossa família. À minha querida mãe Maria Alice pelas suas inúmeras demonstrações de amor e carinho, por estar sempre presente nos momentos que eu mais precisei e sobretudo por me transmitir sempre o valor de uma boa educação. As minhas amadas irmãs Layla, Marlice e Marieli que representam a minha inesgotável fonte de amor, força e aprendizado. A convivência com vocês me preparou para a vida e me ensinou a respeitar as diferenças. E aos pequeninos, tão amados, Mario e Caio que chegaram para completar a nossa felicidade iluminando os nossos dias. Obrigada por esse carinho tão despretensioso que faz a vida ter um toque todo especial. A todos vocês minha eterna gratidão e todo o meu amor.

Ao meu estimado orientador Professor Dr. Edmundo Rogério Esquivel, que confiou na minha capacidade durante estes sete anos de trabalho em parceria. Agradeço pela amizade, por todas as grandes oportunidades concedidas, pela paciência, pelos ensinamentos transmitidos, pelo apoio nos momentos de maiores dificuldades e sobretudo por estar sempre disposto a ajudar. Muito Obrigada e minha eterna gratidão.

Ao meu supervisor canadense Professor Dr. John A. Howie por me conceder a oportunidade de realizar o meu estágio de doutorado sanduíche junto à University British Columbia em Vancouver (Canadá). Agradeço imensamente por esta grande oportunidade profissional e pessoal.

O meu eterno agradecimento e admiração ao Professor Dr. Nelson Aoki, grande exemplo de genialidade e entusiasmo. Obrigada por todas as contribuições efetivas para a realização deste trabalho, por todas as ideias compartilhadas e pelas valiosas

considerações no exame de qualificação. Foi uma grande honra ter sido sua aluna. Muito obrigada por tudo!

Ao Professor Dr. George de Paula Bernardes que não mediu esforços para contribuir com a realização deste trabalho de pesquisa. Muito obrigada pela paciência, pelos valiosos ensinamentos transmitidos, pelas grandes ideias e contribuições efetivas durante este intenso período de aprendizado. Palavras jamais transmitirão toda a minha gratidão.

Ao Professor Dr. Leopoldo Pisanelli Rodrigues de Oliveira e Professor Dr. Paulo Sergio Varoto que gentilmente abriram as portas do Laboratório de Dinâmica do Departamento de Engenharia Mecânica (EESC/USP) para que parte deste trabalho de pesquisa fosse realizado. Agradeço pela participação ativa na execução dos ensaios e interpretação dos resultados.

Ao Dr. Luiz Varela e aos técnicos Amauri e Mauri, do Departamento de Engenharia de Estruturas (EESC/USP), pela colaboração na construção da célula de carga que foi fundamental no desenvolvimento do equipamento. Muito Obrigada.

Aos técnicos do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos, em especial Oscar, Benedito, Jose Luis, Antonio e Clever por toda ajuda na realização dos ensaios de calibração, caracterização e ensaios SPT. Muito Obrigada pela colaboração e pela amizade.

Ao Professor Dr. Heraldo Luiz Giacheti que gentilmente abriu as portas do Campo Experimental da Universidade Estadual Paulista de Bauru (UNESP) permitindo a realização de grande parte dos ensaios de campo. Agradecimento especial aos técnicos Sérgio, Gustavo e Tiago que ajudaram na realização dos ensaios SPT e CPTu e a Professora Dra. Anna Silvia Palcheco Peixoto pela ajuda e pelos conselhos durante os ensaios de campo.

Ao Consórcio MRV e ao Engenheiro Danilo que forneceram o local para os ensaios de campo realizados na cidade de São Carlos (SP).

A empresa SondoBase – Geotecnia e Meio ambiente pela realização dos ensaios de sondagem SPT que garantiram o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa. Agradeço a todos os funcionários que participaram na execução dos ensaios de campo e principalmente ao Engenheiro Cláudio Rodrigues dos Santos que pacientemente nos auxiliou em todas as etapas dos ensaios.

Agradecimento especial ao Professor Dr. Antonio Belincanta que acreditou na minha capacidade e no meu potencial desde os memoráveis tempos de iniciação

científica. Obrigado por ter me concedido a oportunidade de adentrar no meio geotécnico. Toda a minha admiração ao grande professor e amigo. Muito Obrigada.

Ao Professor Dr. Rodrigo Salgado pelas suas valiosas contribuições na avaliação deste trabalho de pesquisa.

Agradecimento especial a querida Dra. Bianca de Oliveira Lobo que pacientemente respondeu a todos os meus e-mails sanando as minhas dúvidas em relação a este trabalho de pesquisa. Muito Obrigada por tudo.

A todos os professores do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos que contribuíram decisivamente para a minha formação intelectual. Em especial ao Professores Dr. José Carlos Angelo Cintra, pelo seu entusiasmo em “ensinar a ensinar” e à Professora Dra. Cristina de Hollanda Cavalcanti Tshua pelos valiosos conselhos durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos funcionários do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos em especial Neiva, Maristela, Álvaro e Herivelto, que sempre contribuíram com grande entusiasmo e alegria. Muito obrigada por tudo e sobretudo por essa amizade que torna tão especial a convivência no Departamento de Geotecnia.

Aos meus “irmãos” Francisco Anderson Ribeiro de Almeida, Cassiano Lopes Barbosa e Mayko Tanabe que sempre contribuíram de maneira muito alegre e especial. Obrigada por essa amizade tão valiosa, pelos grandes momentos de descontração e alegria e pelo apoio incondicional.

Ao grande amigo Rodrigo Sartori Jabur que esteve presente em todos os momentos dessa caminhada tornando cada um deles mais alegre e especial. Obrigada pelo apoio constante, pelos ouvidos sempre abertos, pelos bons momentos de descontração, pela ajuda com a formatação do trabalho e principalmente pela amizade.

As minhas inesquecíveis amigas Karla Wingler Rebelo, Marina Prearo Benvenuto e Giulliana Mondelli, vocês se tornaram grande amigas-irmãs durante todos esses anos que passei em São Carlos. Obrigada por todos os bons momentos, pelos conselhos, amizade e parceria.

As minhas grandes companheiras de caminhada, Rafaela Faciola, Simone Ribeiro Lopes e Wanessa Cartaxo Soares. Obrigada pela maravilhosa acolhida em nossa “salinha”, pelos momentos de descontração e principalmente pela amizade. Esses momentos fazem parte das coisas boas que eu levarei na mala.

Aos grandes amigos que através da graça divina cruzaram o meu caminho tornando esta etapa ainda mais especial. Não poderia deixar de citar: Fagner França, Marília, Dilma, Ana Elisa Silva de Abreu, Giovana Bizão Georgetti, Júlio Fialho do Nascimento, Bruno Canoza, Karina Retzlaff Camargo, Carlos Marek, Edson de Oliveira Júnior, Jefferson Lins da Silva, Roger Augusto Rodrigues, Jeselay H. Cordeiro dos Reis, Júnio Fagundes, Johnny Soares de Carvalho, Fernanda Ramos de Andrade, Simone Furegatti e Pablo Noreña. Você todos de uma forma muito particular e especial contribuíram com este trabalho de pesquisa. Muito Obrigada

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas de estudos concedidas no Brasil e durante o meu estágio no exterior (PDEE) em Vancouver, possibilitando a minha dedicação integral a esta pesquisa.

À Pró-Reitoria de Pós Graduação da Universidade de São Paulo pelo apoio financeiro que possibilitou a minha participação no XV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering em Atenas, Grécia.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro a este projeto de pesquisa (processo nº 2008/08268-4).

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro a este projeto de pesquisa (processo nº 479001/2009-0).

A Universidade Estadual de Maringá (UEM) e a Universidade de São Paulo (USP) que contribuíram para a minha formação intelectual.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho. Muito Obrigada.

*“O distraído, nela tropeçou,  
O bruto a usou como projétil  
O empreendedor, usando-a construiu,  
O campônio, cansado da lida, dela fez assento  
Para os meninos foi brinquedo  
Drummond a poetizou,  
Davi matou Golias...  
Por fim, o artista concebeu a mais bela escultura  
Em todos esses casos, a diferença não era a pedra  
Mas o homem..”.*

*(A pedra – Antonio Pereira)*



# Resumo

---

LUKIANCHUKI, J.A. **Interpretação de resultados do ensaio SPT com base em instrumentação dinâmica**. 2012. 320 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

O ensaio de simples reconhecimento do solo (SPT) é usualmente utilizado para estimar a resistência do solo, através do índice  $N_{SPT}$ , que representa a resistência à penetração dinâmica do amostrador no solo. Esse índice é usado diretamente em correlações empíricas ou semi-empíricas na determinação da capacidade de suporte e recalque das fundações. Entretanto, esse ensaio tem sido alvo de críticas devido à utilização dessas correlações empíricas, geralmente baseadas em observações práticas e sem nenhum fundamento científico. Críticas também estão relacionadas com a dispersão dos resultados, devido à utilização de diferentes tipos de equipamentos e procedimentos executivos. O índice  $N_{SPT}$  depende da parcela de energia que é efetivamente transmitida ao amostrador durante a queda do martelo. Assim, análises racionais dos resultados de ensaios SPT dependem essencialmente da estimativa da quantidade dessa energia. Por esse motivo, têm sido desenvolvidas diversas pesquisas relacionados com a energia envolvida no ensaio SPT. Este trabalho apresenta interpretações dos resultados do ensaio SPT a partir das quantidades de energia envolvidas durante a queda do martelo. Essas quantidades de energia são determinadas indiretamente, através dos sinais de força normal e aceleração durante a propagação da onda de tensão ao longo da composição de hastes. Para isso, foi desenvolvido um equipamento que inclui uma instrumentação capaz de registrar esses sinais de força normal e aceleração. Uma série de ensaios SPT foi realizada com instrumentação instalada tanto no topo como na base da composição de hastes. Esse arranjo permitiu estimar as quantidades de energia disponíveis no topo e na base da composição de hastes. Assim, foi possível determinar a eficiência dos equipamentos SPT com base na quantidade de energia que efetivamente atinge o amostrador. A partir dos sinais registrados, também foi possível determinar a resistência dinâmica mobilizada no sistema solo-amostrador. Os resultados experimentais foram comparados com resultados obtidos através de métodos teóricos, baseados no Princípio de Hamilton, para a determinação da resistência estática e dinâmica do solo. Essas análises mostraram que equações teóricas podem ser adequadas para a determinação da resistência do solo, desde que seja considerada a quantidade de energia que efetivamente atinge o amostrador. Desta forma, essas equações teóricas podem ser facilmente incorporadas na



prática de projeto de fundações, contribuindo para o desenvolvimento de métodos baseados na quantidade de energia necessária para a penetração do amostrador no solo.

Palavras-chave: Ensaio de simples reconhecimento, Ensaio SPT, energia, Teoria da Onda, instrumentação dinâmica, Princípio de Hamilton, resistência dinâmica.

# Abstract

---

LUKIANCHUKI, J.A. **Interpretation of SPT test results based on dynamic instrumentation**. 2012. 320 p. Thesis (Doctoral) – School of Engineering at Sao Carlos, Sao Paulo University, Sao Carlos, 2012.

The standard penetration test (SPT) is usually used to estimate the soil strength through the  $N_{SPT}$  index which represents the dynamic reaction force of the sampler penetration into the soil. This index is directly used in empirical or semi-empirical correlations for the determination of the bearing capacity and foundation settlements. However, this test has been criticized due to the use of these empirical correlations, often based on practical observation without any scientific basis. Criticism is also related to result dispersion due to the use of different types of equipment and execution procedures. The  $N_{SPT}$  index depends on the amount of energy that is effectively transmitted to the sampler during the hammer fall. Thus, rational analyses of the SPT test results essentially depend on the estimation of this amount of energy. For this reason, several studies related to the energy involved in SPT test have been developed. This research presents interpretations of the SPT test results from the amounts of energy involved during the hammer fall. These amounts of energy are indirectly assessed by means of normal force and acceleration signals during the stress wave propagation along the string of rods. For this reason, a device that includes instrumentation capable of registering these signals of normal force and acceleration was developed. A series of tests was performed with the instrumentation installed at the top and the bottom of the string of rods. This arrangement allowed estimating the amount of energy available at the top and bottom of the string of rods. Thus, it was possible to estimate the efficiency of the SPT equipment basing on the amount of energy that actually reaches the sampler. From the recorded signals, it was also possible to assess the dynamic reaction force mobilized in the soil-sample system. The results were compared with other results obtained by theoretical methods, based on the Hamilton's Principle, for evaluating the static and dynamic reaction force of the soil. These analyzes have shown that theoretical equations may be suitable for the determination of the soil strength, provided that the amount of energy that actually reaches the sampler be considered. Thus, these theoretical equations can be easily incorporated into the practice of foundation designs contributing to the development of methods based on the amount of energy required for the penetration of the sampler into the soil.

Keywords: Standard Penetration Test, SPT test, energy, Wave Theory, dynamic instrumentation, Hamilton's Principle, dynamic reaction force.



# Lista de Figuras

<b>Figura 2.1</b> – Equipamento de sondagem SPT .....	44
<b>Figura 2.2</b> – Amostrador do tipo Raymond bipartido (BELINCANTA et al., 2010; ABNT, 2001) .....	45
<b>Figura 2.3</b> – Amostrador do tipo Raymond bipartido .....	46
<b>Figura 2.4</b> – Equipamento de sondagem SPT .....	46
<b>Figura 2.5</b> – Sistemas de martelos recomendados pela ABNT (BELINCANTA; CINTRA, 1998).....	47
<b>Figura 2.6</b> – Energia potencial do sistema considerando o acréscimo da energia potencial do martelo e das hastes (ODEBRECHT, 2003) .....	53
<b>Figura 2.7</b> – Influência da velocidade de impacto na máxima energia potencial disponível no ensaio SPT ( modificado de HOWIE et al, 2003) .....	55
<b>Figura 2.8</b> – Energia potencial e cinética envolvida no evento do ensaio SPT (modificado de DANIEL, 2008) .....	56
<b>Figura 2.9</b> – Eficiência versus comprimento de haste (SCHMERTMANN; PALÁCIOS, 1979; AOKI; CINTRA, 2000a) .....	57
<b>Figura 2.10</b> – Esquema simplificado de propagação de ondas de tensão no SPT (modificado de BELINCANTA; FERRAZ, 2000 e SCHMERTMANN; PALÁCIOS, 1979). .....	60
<b>Figura 2.11</b> – Evolução da energia potencial, energia cinética e trabalho durante o evento do golpe do martelo (modificado de NEVES, 2004; AOKI; CINTRA, 2000b) .....	62
<b>Figura 2.12</b> – Resultado típico de um ensaio de prova de carga estática realizada sobre o amostrador SPT para areias e siltes arenosos(NEVES; 2004 modificado de AOKI; CINTRA, 2000a) .....	65
<b>Figura 2.13</b> – Resultado típico de um ensaio dinâmico realizado sobre o amostrador SPT para areias e siltes arenosos(NEVES; 2004 modificado de AOKI; CINTRA, 2000a) .....	65
<b>Figura 2.14</b> – Curvas de carga referente aos ensaios dinâmico e estático(AOKI et al., 2004) .....	66
<b>Figura 2.15</b> – Comparação entre os valores de eficiência determinados através de ensaios estático e dinâmico (NOREÑA; 2011) .....	66
<b>Figura 2.16</b> – Comparação entre os valores de força (F) e velocidade multiplicada pela impedância( $v \times Z$ ) .....	70
<b>Figura 2.17</b> – Comparação entre os valores de energia computados pelos métodos EF2 e EFV (CAVALCANTE, 2002) .....	71
<b>Figura 2.18</b> – Modelos de acelerômetros piezoelétricos (VAROTO, 2009).....	73
<b>Figura 2.19</b> – Suporte para fixação dos acelerômetros no ensaio SPT.....	74
<b>Figura 2.20</b> – Ponte de Wheastone com strain gauges duplos (ODEBRECHT, 2003) .....	75
<b>Figura 2.21</b> – Sistema de aquisição de dados portátil do tipo IPT (BELINCANTA, 1998) .....	77
<b>Figura 2.22</b> – Sistema de medida de energia desenvolvido por Odebrecht (2003) .....	77

<b>Figura 2.23</b> – Mecanismo de reação do sistema solo-amostrador (LOBO, 2008) .....	78
<b>Figura 2.24</b> – Mecanismo de reação do solo (NOREÑA; 2011 modificado de SMITH; 1960) .....	80
<b>Figura 2.25</b> – $(N_1)_{en}$ versus $\phi'$ (SCHNAID et al., 2009b) .....	83
<b>Figura 2.26</b> – Estimativa de $S_v$ para argila pré-adensada de Formação Guabirotuba (SCHNAID et al., 2009b) .....	85
<b>Figura 2.27</b> – Mecanismos de resistência à penetração mobilizados em ensaios SPT e ensaios CPT (modificado de SCHMERTMANN; 1979) .....	86
<b>Figura 2.28</b> – Variação das parcelas de resistência de ponta e atrito lateral em função da razão de atrito ( $R_f$ ) (Adaptado de SCHMERTMANN; 1979 por SOUZA; 2009) .....	87
<b>Figura 2.29</b> – Energia quasi-estática necessária à penetração do amostrador para uma eficiência de 54% determinada no topo do amostrador (NOREÑA, 2011 modificado de SCHMERTMANN, 1979) .....	89
<b>Figura 2.30</b> – Curva resistência versus penetração correspondente a um ensaio SPT (AOKI et al., 2004) .....	91
<b>Figura 2.31</b> – Comparação entre a energia cinética ( $T_A$ ) e a energia de deformação ( $V_A$ ) (AOKI et al., 2007) .....	93
<b>Figura 2.32</b> – Comparação entre a resistência estática estimada e a resistência estática obtida através de prova de carga estática (NOREÑA; 2011) .....	94
<b>Figura 3.1</b> – Esquema de propagação de uma onda longitudinal de compressão uniforme em uma composição de hastes (adaptado de BERNARDES, 1989) .....	96
<b>Figura 3.2</b> – (a) A onda leva o tempo ( $l/c$ ) para atingir a extremidade do amostrador (b) condições de contorno na extremidade da haste (adaptado de BELINCANTA, 1985) .....	105
<b>Figura 3.3</b> – Relação entre a força e o deslocamento da ponta considerando um modelo rígido-plástico (adaptado de BERNARDES, 1989) .....	108
<b>Figura 3.4</b> – Esquema de propagação da onda de tensão, em um conjunto de hastes, com variação de impedância (Adaptado de BERNARDES, 1989) .....	109
<b>Figura 3.5</b> – Esquema de propagação da onda de tensão inicial para o caso de martelo rígido e conjunto de hastes elástico (Adaptado de BERNARDES, 1989) .....	112
<b>Figura 3.6</b> – Esquema de propagação da onda de tensão inicial para um sistema martelo-coxim-haste (Adaptado de BERNARDES, 1989) .....	114
<b>Figura 3.7</b> – Esquema de propagação da onda de tensão inicial considerando coxins com diferentes rigidez (Adaptado de BERNARDES, 1989) .....	118
<b>Figura 3.8</b> – Influência da rigidez do coxim na forma da primeira onda de tensão (Adaptado de BERGLARS, 1983 apud BERNARDES, 1989) .....	119
<b>Figura 3.9</b> – Influência da rigidez do coxim na transferência de energia para a estaca durante a primeira onda de tensão (Adaptado de BERGLARS, 1983 apud BERNARDES, 1989) .....	119
<b>Figura 4.1</b> – Projeto geométrico do segmento de haste (Dimensões em mm) .....	123
<b>Figura 4.2</b> – Variação das propriedades mecânicas em função da temperatura de revenimento (modificado de ODEBRECHT, 2003) .....	124
<b>Figura 4.3</b> – Dimensões do acelerômetro modelo 350B04 (mm) .....	125

<b>Figura 4.4</b> – Registro típico de aceleração versus tempo para o segmento de haste posicionado no topo do conjunto de hastes. ....	125
<b>Figura 4.5</b> – Registro típico de aceleração versus tempo para o segmento de haste posicionado acima do amostrador. ....	126
<b>Figura 4.6</b> – Intervalo de tempo de acordo com o posicionamento da instrumentação. ....	127
<b>Figura 4.7</b> – Espectro de frequência de aceleração (instrumentação posicionada acima do amostrador). ....	128
<b>Figura 4.8</b> – Espectro de frequência de aceleração (instrumentação posicionada no topo do conjunto de hastes). ....	128
<b>Figura 4.9</b> – Dimensões do acelerômetro modelo 350M77 (mm). ....	129
<b>Figura 4.10</b> – Suportes iniciais projetados para a fixação dos acelerômetros (SP1 e SP2). ....	129
<b>Figura 4.11</b> – Nova proposta de suporte para a fixação dos acelerômetros (SP3). ....	130
<b>Figura 4.12</b> – Esquemática do ensaio com o Shaker. ....	131
<b>Figura 4.13</b> – Ensaio com o vibrômetro laser em andamento. ....	132
<b>Figura 4.14</b> – Esquema adotado para a realização dos ensaios (SP1). ....	132
<b>Figura 4.15</b> – Esquema adotado para a realização dos ensaios (SP2). ....	132
<b>Figura 4.16</b> – Resultados dos ensaios para o laser posicionado no bloco e na base do suporte SP1. ....	134
<b>Figura 4.17</b> – Resultados dos ensaios para o laser posicionado na raiz e na ponta do suporte SP1. ....	134
<b>Figura 4.18</b> – Resultados dos ensaios para o laser posicionado no bloco e na base do suporte SP2. ....	135
<b>Figura 4.19</b> – Resultados dos ensaios para o laser posicionado na raiz do suporte SP2. ....	135
<b>Figura 4.20</b> – Resultados dos ensaios para o suporte SP3. ....	136
<b>Figura 4.21</b> – Comparação entre os valores de amplitude média para os suportes ensaiados. ....	137
<b>Figura 4.22</b> – Projeto geométrico do suporte (SP3) para os acelerômetros (dimensões em mm). ....	137
<b>Figura 4.23</b> – Detalhamento da ponte de Wheastone (ODEBRECHT, 2003). ....	138
<b>Figura 4.24</b> – Esquemática das ligações dos extensômetros (ODEBRECHT, 2003). ....	138
<b>Figura 4.25</b> – Detalhamento da construção do circuito elétrico. ....	139
<b>Figura 4.26</b> – Sistema de aquisição de dados HBM, modelo MX410. ....	140
<b>Figura 4.27</b> – Exemplo de um registro típico do ensaio SPT obtido com o sistema de aquisição HBM. ..	140
<b>Figura 4.28</b> – Calibração estática da célula de carga. ....	142
<b>Figura 4.29</b> – Curva de calibração da célula de carga. ....	142
<b>Figura 4.30</b> – Curva de calibração da célula de carga. ....	143

<b>Figura 4.31</b> – Comparação entre os sinais de força para a instrumentação próxima a cabeça de bater. ....	144
<b>Figura 4.32</b> – Comparação entre os sinais de força para a instrumentação próxima a cabeça de bater. ....	145
<b>Figura 4.33</b> – Esquema de aplicação da regra dos trapézios. ....	146
<b>Figura 4.34</b> – Comparação entre os valores de deslocamento máximo determinados a partir dos sinais de aceleração e a penetração permanente medida em campo. ....	147
<b>Figura 5.1</b> – Seção geológica esquemática de São Carlos (BORTOLUCCI, 1983). ....	149
<b>Figura 5.2</b> – Distribuição granulométrica ao longo do perfil do solo do campo experimental da UNESP (modificado de AVESSANI, 2010) ....	151
<b>Figura 5.3</b> – Resultados de ensaios SPT e CPTU para o perfil do solo do campo experimental da UNESP ....	152
<b>Figura 5.4</b> - Curvas granulométricas para diferentes profundidades (Local: Loteamento residencial – São Carlos/SP).....	153
<b>Figura 5.5</b> - Resultados de ensaios SPT e CPTU para o perfil do solo do loteamento residencial de São Carlos (SP).....	154
<b>Figura 5.6</b> – Equipamento convencional utilizado nos ensaios de campo.....	155
<b>Figura 5.7</b> – Detalhes da geometria do martelo mecanizado (dimensões em cm) .....	155
<b>Figura 5.8</b> – Detalhamento do equipamento mecanizado utilizado nos ensaios de campo .....	156
<b>Figura 5.9</b> – Segmento de haste instrumentado posicionado acima do amostrador SPT .....	157
<b>Figura 5.10</b> – Segmento de haste instrumentado posicionado abaixo da cabeça de bater.....	157
<b>Figura 5.11</b> – – Segmentos de hastes instrumentados posicionados no topo e na base do conjunto de hastes.....	158
<b>Figura 5.12</b> – Sistemas de aquisição utilizados, trabalhando em conjunto.....	158
<b>Figura 5.13</b> – Colocação do tubo de PVC para a proteção da instrumentação .....	159
<b>Figura 5.14</b> – Proteção dos acelerômetros através de uma camada de borracha silicone .....	160
<b>Figura 5.15</b> – (a) linha de referência utilizada para medida da penetração permanente (b) medida da penetração permanente .....	161
<b>Figura 5.16</b> – Conexão dos sistemas de aquisição de dados com o notebook.....	162
<b>Figura 5.17</b> – Configuração dos sensores .....	162
<b>Figura 5.18</b> – Condicionador de sinal externo para sensor do tipo IEPE.....	163
<b>Figura 5.19</b> – Configuração da taxa de aquisição de dados e do sistema de <i>trigger</i> .....	163
<b>Figura 5.20</b> – Configuração do filtro passa baixa .....	164
<b>Figura 5.21</b> – Intervalo de duração completa do evento.....	165

<b>Figura 6.1</b> – Comparação entre os registros de aceleração (Equipamento convencional – Prof: 6 m)	167
<b>Figura 6.2</b> – Energia versus penetração permanente (Equipamento convencional – $L_h$ : 8.95 m)	171
<b>Figura 6.3</b> – Energia versus penetração permanente (Equipamento mecanizado – $L_h$ : 8.95 m)	171
<b>Figura 6.4</b> – Energia versus penetração permanente (Equipamento convencional – $L_h$ : 11.95 m)	172
<b>Figura 6.5</b> – Energia versus penetração permanente (Equipamento mecanizado – $L_h$ : 11.95 m)	172
<b>Figura 6.6</b> – Energia versus penetração permanente (Equipamento convencional – $L_h$ : 12.95 m)	172
<b>Figura 6.7</b> – Energia versus penetração permanente (Equipamento mecanizado – $L_h$ : 12.95 m)	173
<b>Figura 6.8</b> –Variação da energia por golpe em função da penetração acumulada ( $L_h$ : 8.95 m)	173
<b>Figura 6.9</b> –Variação da energia por golpe em função da penetração acumulada ( $L_h$ : 11.95 m)	174
<b>Figura 6.10</b> –Variação da energia por golpe em função da penetração acumulada ( $L_h$ : 12.95 m)	174
<b>Figura 6.11</b> – Energia versus penetração permanente (Equipamento convencional – $L_h$ : 6.95 m)	177
<b>Figura 6.12</b> – Energia versus penetração permanente (Equipamento mecanizado – $L_h$ : 6.95 m)	177
<b>Figura 6.13</b> – Energia versus penetração permanente (Equipamento convencional – $L_h$ : 8.95 m)	178
<b>Figura 6.14</b> – Energia versus penetração permanente (Equipamento mecanizado – $L_h$ : 8.95 m)	178
<b>Figura 6.15</b> – Energia versus penetração permanente (Equipamento convencional – $L_h$ : 10.95 m)	178
<b>Figura 6.16</b> – Energia versus penetração permanente (Equipamento mecanizado – $L_h$ : 10.95 m)	179
<b>Figura 6.17</b> –Variação da energia por golpe em função da penetração acumulada ( $L_h$ : 8.95 m)	179
<b>Figura 6.18</b> –Variação da energia por golpe em função da penetração acumulada ( $L_h$ : 9.95 m)	180
<b>Figura 6.19</b> –Variação da energia por golpe em função da penetração acumulada ( $L_h$ : 10.95 m)	180
<b>Figura 6.20</b> – Energia versus tempo para instrumentação simultânea de topo e base (comprimento de composição de haste ( $L_h$ ) de 8.95 m – Equipamento convencional)	181
<b>Figura 6.21</b> – Energia versus tempo para instrumentação simultânea de topo e base (comprimento de composição de haste ( $L_h$ ) de 8.95 m – Equipamento mecanizado)	181
<b>Figura 6.22</b> – Eficiência em função do comprimento da composição de hastes ( $L_h$ ), para o equipamento convencional	185
<b>Figura 6.23</b> – Eficiência em função do comprimento da composição de hastes ( $L_h$ ) para o equipamento mecanizado	185
<b>Figura 6.24</b> – Perda de energia em função do comprimento da composição de hastes ( $L_h$ )	187
<b>Figura 6.25</b> –Variação da eficiência $\eta_1$ em função do comprimento de hastes (Equipamento convencional)	188
<b>Figura 6.26</b> –Variação da eficiência $\eta_1$ em função do comprimento de hastes (Equipamento mecanizado)	189



<b>Figura 6.27</b> –Variação da eficiência $\eta_1$ em função do comprimento de hastes (Equipamento convencional) .....	189
<b>Figura 6.28</b> –Variação da eficiência $\eta_1$ em função do comprimento de hastes (Equipamento mecanizado).....	189
<b>Figura 6.29</b> – Energia e eficiência ( $\eta$ ) versus tempo para instrumentação simultânea de topo e base (comprimento de composição de haste ( $L_h$ ) de 6.95 m – Equipamento convencional) .....	190
<b>Figura 6.30</b> – Energia e eficiência ( $\eta$ ) versus tempo para instrumentação simultânea de topo e base (comprimento de composição de haste ( $L_h$ ) de 6.95 m – Equipamento mecanizado) .....	190
<b>Figura 6.31</b> – – Eficiência em função do comprimento da composição de hastes ( $L_h$ ), utilizando o equipamento convencional.....	194
<b>Figura 6.32</b> – Eficiência em função do comprimento da composição de hastes ( $L_h$ ), utilizando o equipamento mecanizado.....	194
<b>Figura 6.33</b> – Perda de energia em função do comprimento da composição de hastes ( $L_h$ ) .....	195
<b>Figura 6.34</b> –Variação da eficiência $\eta_1$ em função do comprimento de hastes (Equipamento convencional) .....	197
<b>Figura 6.35</b> –Variação da eficiência $\eta_1$ em função do comprimento de hastes (Equipamento mecanizado).....	197
<b>Figura 6.36</b> –Variação da eficiência $\eta_1$ em função do comprimento de hastes (Equipamento convencional) .....	198
<b>Figura 6.37</b> –Variação da eficiência $\eta_1$ em função do comprimento de hastes (Equipamento mecanizado).....	198
<b>Figura 6.38</b> – Comparação entre as curvas teóricas e experimental de transferência de energia ( $L_h= 4.95$ m e $N_{SPT} = 2.1$ ) .....	200
<b>Figura 6.39</b> – Comparação entre as curvas teórica e experimental de transferência de energia ( $L_h= 8.95$ m e $N_{SPT} = 4.5$ ) .....	200
<b>Figura 6.40</b> – Comparação entre as curvas teórica e experimental de transferência de energia ( $L_h= 12.95$ m e $N_{SPT} = 10.5$ ) .....	201
<b>Figura 6.41</b> – Comparação entre os processos de transferência de energia para os equipamentos convencional e mecanizado ( $L_h= 6.95$ m) .....	202
<b>Figura 6.42</b> – Comparação entre os processos de transferência de energia para os equipamentos convencional e mecanizado ( $L_h= 2.95$ m) .....	203
<b>Figura 6.43</b> – Comparação entre os processos de transferência de energia para os equipamentos convencional e mecanizado ( $L_h= 12.95$ m) .....	204
<b>Figura 6.44</b> – Comparação entre as curvas de força teórica e experimental para os equipamentos convencional e mecanizado ( $L_h= 2.95$ ).....	205
<b>Figura 6.45</b> – Comparação entre as curvas de força teórica e experimental para os equipamentos convencional e mecanizado ( $L_h= 6.95$ ).....	206
<b>Figura 6.46</b> – Comparação entre as curvas de força teórica e experimental para os equipamentos convencional e mecanizado ( $L_h= 12.95$ m) .....	207

<b>Figura 6.47</b> – Efeito das condições do solo para uma composição de hastes de 4.95 m: a) sinais de força medidos a 0.45 m do plano de impacto do martelo, b) sinais de velocidade multiplicada pela impedância da seção da haste AWJ; c) sinais de deslocamento calculados a partir dos sinais de velocidade; d) energia entregue ao solo.....	210
<b>Figura 6.48</b> – Efeito das condições do solo no intervalo de tempo entre os impactos.....	211
<b>Figura 6.49</b> - Efeito das condições do solo para uma composição de hastes de 8.95 m: a) sinais de força medidos a 0.45 m do plano de impacto do martelo, b) sinais de velocidade multiplicada pela impedância da seção da haste AWJ; c) sinais de deslocamento calculados a partir dos sinais de velocidade; d) energia entregue ao solo.....	213
<b>Figura 6.50</b> - Efeito das condições do solo para uma composição de hastes de 8.95 m: a) sinais de força medidos a 0.45 m do plano de impacto do martelo, b) sinais de velocidade multiplicada pela impedância da seção da haste AWJ; c) sinais de deslocamento calculados a partir dos sinais de velocidade; d) energia entregue ao solo.....	215
<b>Figura 7.1</b> – Força e deslocamento versus tempo para um registro típico monitorado em uma seção imediatamente acima do amostrador (Profundidade: 11 metros - 6º golpe).....	220
<b>Figura 7.2</b> – Força e deslocamento versus tempo para um registro típico monitorado em uma seção imediatamente acima do amostrador (Profundidade: 11 metros - 6º golpe).....	221
<b>Figura 7.3</b> - Força e deslocamento versus tempo para um registro típico monitorado em uma seção imediatamente acima do amostrador (Profundidade: 11 metros - 6º golpe).....	222
<b>Figura 7.4</b> - Força e deslocamento versus tempo para um registro típico monitorado em uma seção imediatamente acima do amostrador (Profundidade: 11 metros - 6º golpe).....	223
<b>Figura 7.5</b> – Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 2 metros – Equipamento convencional - 3º golpe).....	226
<b>Figura 7.6</b> – Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 2 metros – Equipamento mecanizado - 3º golpe).....	227
<b>Figura 7.7</b> - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 4 metros – Equipamento convencional - 2º golpe).....	227
<b>Figura 7.8</b> - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 4 metros – Equipamento mecanizado - 3º golpe).....	228
<b>Figura 7.9</b> - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 6 metros - Equipamento convencional - 4º golpe).....	228
<b>Figura 7.10</b> - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 6 metros - Equipamento mecanizado 6º golpe).....	229
<b>Figura 7.11</b> - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 8.0 metros - Equipamento convencional 7º golpe).....	229
<b>Figura 7.12</b> - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 8.0 metros - Equipamento mecanizado - 7º golpe).....	230
<b>Figura 7.13</b> - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 9 metros - Equipamento convencional 6º golpe).....	230
<b>Figura 7.14</b> - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 9 metros - Equipamento mecanizado - 7º golpe).....	231

<b>Figura 7.15</b> - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 10 metros - Equipamento convencional - 10º golpe).....	231
<b>Figura 7.16</b> - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 10 metros - Equipamento mecanizado - 10º golpe).....	232
<b>Figura 7.17</b> - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 11 metros - Equipamento convencional - 12º golpe).....	232
<b>Figura 7.18</b> - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 11 metros - Equipamento mecanizado - 11º golpe).....	233
<b>Figura 7.19</b> - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 12 metros - Equipamento convencional 6º golpe) .....	233
<b>Figura 7.20</b> - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 12 metros - Equipamento mecanizado - 8º golpe).....	234
<b>Figura 7.21</b> - Valores de resistência dinâmica do solo – São Carlos (Profundidade: 4 metros - Equipamento convencional - 4º golpe) .....	236
<b>Figura 7.22</b> - Valores de resistência dinâmica do solo – São Carlos (Profundidade: 4 metros - Equipamento mecanizado - 4º golpe) .....	237
<b>Figura 7.23</b> - Valores de resistência dinâmica do solo – São Carlos (Profundidade: 6 metros – Equipamento convencional - 8º golpe) .....	237
<b>Figura 7.24</b> - Valores de resistência dinâmica do solo – São Carlos (Profundidade: 7 metros – Equipamento mecanizado - 8º golpe) .....	238
<b>Figura 7.25</b> - Valores de resistência dinâmica do solo – São Carlos (Profundidade: 8 metros – Equipamento convencional - 14º golpe) .....	238
<b>Figura 7.26</b> - Valores de resistência dinâmica do solo – São Carlos (Profundidade: 8 metros - Equipamento mecanizado - 14º golpe) .....	239
<b>Figura 7.27</b> - Valores de resistência dinâmica do solo – São Carlos (Profundidade: 9 metros - Equipamento convencional -18º golpe) .....	239
<b>Figura 7.28</b> - Valores de resistência dinâmica do solo – São Carlos (Profundidade: 9 metros – Equipamento mecanizado - 18º golpe) .....	240
<b>Figura 7.29</b> - Valores de resistência dinâmica do solo – São Carlos (Profundidade: 10 metros - Equipamento convencional - 12º golpe) .....	240
<b>Figura 7.30</b> - Valores de resistência dinâmica do solo – São Carlos (Profundidade: 10 metros - Equipamento mecanizado - 13º golpe) .....	241
<b>Figura 7.31</b> - Comparação entre os valores teóricos de força estática ( $F$ ) e experimentais de resistência dinâmica ( $R_D$ ) (Campo Experimental de Unesp – Bauru).....	242
<b>Figura 7.32</b> - Comparação entre os valores teóricos de força estática ( $F$ ) e experimentais de resistência dinâmica ( $R_D$ ) (Loteamento residencial – São Carlos).....	243
<b>Figura 7.33</b> – Controle do comprimento da amostra do ensaio SPT indicando a condição de não embuchamento.....	243
<b>Figura 7.34</b> – Comparação entre os valores de $f_s$ do ensaio CPTU e $f_t$ do ensaio SPT.....	244

<b>Figura 7.35</b> - Comparação entre os valores teóricos de força estática ( $F$ ) e experimentais de resistência dinâmica ( $R_D$ ) mobilizados no sistema solo-amostrador (Campo Experimental da Unesp – Bauru). .....	246
<b>Figura 7.36</b> - Comparação entre os valores teóricos de força estática ( $F$ ) e experimentais de resistência dinâmica ( $R_D$ ) mobilizados no sistema solo-amostrador (Loteamento residencial em São Carlos). .....	246
<b>Figura 7.37</b> – Comparação entre os valores de $R_D$ e $R_S$ para os ensaios realizados na cidade de São Carlos (SP) e Bauru(SP). .....	248
<b>Figura 7.38</b> – Comparação entre os valores teóricos de resistência estática e os valores experimentais de resistência dinâmica (Campo Experimental da Unesp de Bauru). .....	249
<b>Figura 7.39</b> – Comparação entre os valores teóricos de resistência estática e os valores experimentais de resistência dinâmica (Loteamento residencial em São Carlos). .....	249
<b>Figura 7.40</b> – Ajuste dos valores teóricos de resistência estática utilizando a constante $C_{CE}$ (Campo experimental da UNESP). .....	250
<b>Figura 7.41</b> – Ajuste dos valores teóricos de resistência estática utilizando a correção da energia imposta ao sistema (ODEBRECHT, 2003). .....	251
<b>Figura 7.42</b> – Comparação entre os valores de $R_D$ e $F_D$ para os ensaios realizados na cidade de São Carlos (SP) e Bauru(SP). .....	257
<b>Figura 7.43</b> – Comparação entre os valores de $R_D$ e $F_d$ para os ensaios realizados na cidade de Bauru(SP). .....	257
<b>Figura 7.44</b> – Comparação entre os valores de $R_D$ e $F_d$ para os ensaios realizados na cidade de São Carlos (SP). .....	258
<b>Figura 7.45</b> – Ajuste dos valores de resistência dinâmica teóricos utilizando a correção da energia que atinge o topo do amostrador (Campo Experimental da Unesp). .....	260
<b>Figura 7.46</b> – Ajuste dos valores de resistência dinâmica teóricos utilizando a correção da energia que atinge o topo do amostrador (Loteamento residencial em São Carlos). .....	260
<b>Figura 7.47</b> – Controle de recuperação da amostra de solo após a etapa de penetração do amostrador SPT. .....	262
<b>Figura 7.48</b> – Comprimento da amostra de solo recuperada após a etapa de penetração do amostrador SPT (Pátio Base Fundações – Ribeirão Preto) .....	263
<b>Figura 7.49</b> – Relação entre o comprimento da amostra de solo recuperada ( $L_a$ ) e a penetração máxima do amostrador ( $\rho_{máx}$ ) (Pátio Base Fundações – Ribeirão Preto) .....	263
<b>Figura 7.50</b> – Comprimento da amostra de solo recuperada após a etapa de penetração do amostrador SPT (Campo experimental da UNESP – Bauru) .....	264
<b>Figura 7.51</b> – Relação entre o comprimento da amostra de solo recuperada ( $L_a$ ) e a penetração máxima do amostrador ( $\rho_{máx}$ ) (Campo experimental da UNESP – Bauru) .....	264
<b>Figura 7.52</b> – Comprimento da amostra de solo recuperada após a etapa de penetração do amostrador SPT (Loteamento residencial em São Carlos) .....	265
<b>Figura 7.53</b> – Relação entre o comprimento da amostra de solo recuperada ( $L_a$ ) e a penetração máxima do amostrador ( $\rho_{máx}$ ) (Loteamento residencial em São Carlos) .....	265
<b>Figura 7.54</b> – Variação das parcelas de resistência de atrito lateral externo e interno e resistência de ponta em função do índice $N_{SPT}$ (Equipamento convencional - Campo experimental da UNESP em Bauru) .....	267

**Figura 7.55** – Variação das parcelas de resistência de atrito lateral externo e interno e resistência de ponta em função do índice  $N_{SPT}$  (Equipamento convencional - Campo experimental da UNESP em Bauru) ..... 268

**Figura 7.56** – Variação das parcelas de resistência de atrito lateral externo e interno e resistência de ponta em função do índice  $N_{SPT}$  (Resultados dos ensaios realizados em Porto Alegre - RS) ..... 270

**Figura 7.57** – Variação das parcelas de resistência de atrito lateral externo e interno e resistência de ponta em função do índice  $N_{SPT}$  (Resultados dos ensaios realizados em Porto Alegre - RS) ..... 270

# Lista de Tabelas

<b>Tabela 2.1-</b> Influência do equipamento ensaio SPT (HVORSLEV, 1949) .....	50
<b>Tabela 2.2-</b> Tipos de acelerômetros utilizados para medidas de aceleração em ensaios SPT.....	74
<b>Tabela 2.3-</b> Variação da energia durante os intervalos de tempo ( $t_2-t_1$ ) e ( $t_3-t_2$ ) (AOKI et al., 2007) .....	91
<b>Tabela 3.1-</b> Convenção de sinais e sentido adotada para velocidades e forças. ....	104
<b>Tabela 3.2-</b> Ondas de tensão refletidas e transmitidas pela descontinuidade das hastes (Adaptado de BERNARDES; 1989) .....	110
<b>Tabela 4.1-</b> Determinação da posição das reflexões da primeira onda de compressão. ....	145
<b>Tabela 5.1-</b> Resultados dos ensaios de granulometria .....	150
<b>Tabela 5.2 -</b> Resultados dos ensaios de granulometria .....	153
<b>Tabela 6.1 –</b> Valores de energia e penetração permanente para ensaios utilizando o equipamento convencional (Campo experimental da UNESP/Bauru) .....	169
<b>Tabela 6.2 –</b> Valores de energia e penetração permanente para ensaios utilizando o equipamento mecanizado (Campo experimental da UNESP/Bauru) .....	170
<b>Tabela 6.3 –</b> Valores de energia e penetração permanente para ensaios utilizando o equipamento convencional (Loteamento residencial em São Carlos).....	175
<b>Tabela 6.4 –</b> Valores de energia e penetração permanente para ensaios utilizando o equipamento mecanizado (Loteamento residencial em São Carlos).....	176
<b>Tabela 6.5 –</b> Valores de eficiência medidos no topo e na base utilizando o equipamento convencional (Campo experimental da UNESP/Bauru) .....	183
<b>Tabela 6.6 –</b> Valores de eficiência medidos no topo e na base utilizando o equipamento mecanizado (Campo experimental da UNESP/Bauru).....	184
<b>Tabela 6.7 –</b> Valores para a eficiência referente à parcela do martelo ( $\eta_1$ ) determinados a partir da energia determinada no topo e na base da composição de hastes .....	188
<b>Tabela 6.8 –</b> Valores de eficiência medidos no topo e na base utilizando o equipamento convencional (Loteamento residencial em São Carlos).....	192
<b>Tabela 6.9 –</b> Valores de eficiência medidos no topo e na base utilizando o equipamento mecanizado (Loteamento residencial em São Carlos).....	193
<b>Tabela 6.10 –</b> Resumo dos resultados dos valores de eficiência.....	196
<b>Tabela 6.11 –</b> Valores para a eficiência referente à parcela do martelo ( $\eta_1$ ) determinados a partir da energia no topo e na base da composição de hastes .....	196
<b>Tabela 6.12 –</b> Dados dos perfis utilizados para as análises da influência das condições do solo (Prof. 4 metros) .....	208
<b>Tabela 6.13 –</b> Dados dos perfis utilizados para as análises da influência das condições do solo (Prof. 8 metros) .....	211

<b>Tabela 6.14</b> – Dados dos perfis utilizados para as análises da influência das condições do solo (Prof. 8 metros) .....	212
<b>Tabela 7.1</b> – Resumo dos resultados de resistência dinâmica experimental do solo, para o campo experimental da UNESP (Profundidade de 2 a 9 metros).....	224
<b>Tabela 7.2</b> - Resumo dos resultados de resistência dinâmica experimental do solo, para o campo experimental da UNESP (Profundidade de 10 a 12 metros) .....	225
<b>Tabela 7.3</b> - Resumo dos resultados de resistência dinâmica experimental do solo, para o loteamento residencial de São Carlos (SP) (Profundidade de 4 a 8 metros) .....	235
<b>Tabela 7.4</b> - Resumo dos resultados de resistência dinâmica experimental do solo, para o loteamento residencial de São Carlos (SP) (Profundidade de 9 e 10 metros) .....	236
<b>Tabela 7.5</b> – Valores de força estática ( $F$ ) calculados através da proposta de Schmertmann (1979) (Campo experimental da UNESP – Bauru) .....	242
<b>Tabela 7.6</b> – Valores de força estática ( $F$ ) calculados através da proposta de Schmertmann (1979) (Loteamento residencial – São Carlos) .....	242
<b>Tabela 7.7</b> – Valores de força estática ( $F$ ) calculados através da proposta de Schmertmann (1979)...	245
<b>Tabela 7.8</b> – Valores de resistência estática ( $R_s$ ) calculados através da proposta de Aoki et al., (2007) .....	247
<b>Tabela 7.9</b> – Comparação entre os valores de energia potencial do sistema determinados através da constante $C_{CE}$ e da expressão proposta por Odebrecht (2003).....	251
<b>Tabela 7.10</b> - Resumo dos resultados de resistência dinâmica teórica do solo, para o campo experimental da UNESP (Profundidade de 2 a 9 metros).....	253
<b>Tabela 7.11</b> - Resumo dos resultados de resistência dinâmica teórica do solo, para o campo experimental da UNESP (Profundidade de 10 a 12 metros) .....	254
<b>Tabela 7.12</b> - Resumo dos resultados de resistência dinâmica teórica do solo, para o loteamento residencial de São Carlos (Profundidade de 4 a 7 metros) .....	255
<b>Tabela 7.13</b> - Resumo dos resultados de resistência dinâmica teórica do solo, para o loteamento residencial de São Carlos (Profundidade de 8 a 10 metros) .....	256
<b>Tabela 7.14</b> – Comparação entre os valores de energia medidos no topo e na base do conjunto de hastes.....	259
<b>Tabela 7.15</b> – Resultados dos ensaios de granulometria .....	262
<b>Tabela 7.16</b> – Comparação entre os valores de resistência dinâmica total ( $R_D$ ) e resistência do atrito lateral externo ( $R_{l_{ext}}$ ) .....	267
<b>Tabela 7.17</b> – Comparação entre os valores de resistência total do solo ( $R_s$ ) e resistência do atrito lateral externo ( $R_{l_{ext}}$ ) e atrito lateral interno ( $R_{l_{int}}$ ) e resistência de ponta ( $R_p$ ) (Sondagem 203 - Porto Alegre)	269
<b>Tabela 7.18</b> – Comparação entre os valores de resistência total do solo ( $R_s$ ) e resistência do atrito lateral externo ( $R_{l_{ext}}$ ) e atrito lateral interno ( $R_{l_{int}}$ ) e resistência de ponta ( $R_p$ ) (Sondagem 209 - Porto Alegre)	269

# Lista de Símbolos

---

$a$ :	Área da seção transversal
$A_b$ :	Área da ponta
$A_c$ :	Área da seção transversal efetiva
$a_c$ :	Aceleração uniforme
$A_e$ :	Área da seção transversal do anel do amostrador
$a_i$ :	Aceleração em um determinado instante $i$
$A_i$ :	Área lateral interna
$A_{\mathcal{L}}$ :	Área lateral do amostrador
$A_p$ :	Área da ponta do amostrador
$A_s$ :	Área lateral externa
$c$ :	Velocidade teórica de propagação da onda ao longo da composição de hastes
$C_{CE}$ :	Constante de correção de energia
$c_M$ :	Velocidade teórica de propagação da onda no martelo
$C_N$ :	Fator de correção
$c_v$ :	Coefficiente de variação
$C_1$ :	Constante que relaciona a resistência de ponta atuante no anel do amostrador com a resistência de ponta do ensaio CPTu
$C_2$ :	Constante que relaciona atrito lateral do ensaio SPT com o atrito lateral do ensaio CPTu
$d_i$ :	Diâmetro interno do amostrador
$d_o$ :	Diâmetro externo do amostrador
$du$ :	Encurtamento elástico
$E$ :	Módulo de elasticidade do aço
$E_{amostrador}$ :	Energia que efetivamente atinge o amostrador
$E_c$ :	Energia cinética
$E_{ci}$ :	Energia cinética do martelo em um instante imediatamente antes do impacto
$E_d$ :	Energia de deformação
$E_h$ :	Energia transferida ao topo da composição de hastes
$EP_H$ :	Varição da energia potencial das hastes
$EP_i$ :	Energia potencial inicial do sistema
$EP_M$ :	Varição da energia potencial do martelo
$EP_{sistema}$ :	Energia potencial imposta durante o evento
$EP_T$ :	Energia potencial teórica do sistema ou energia nominal do SPT



$e_l$ :	Fator de eficiência
$F$ :	Força estática (SCHMERTMANN, 1979)
$F(t)$ :	Força normal das partículas
$f$ :	Atrito entre as paredes internas e externas do amostrador
$F_a$ :	Força aplicada
$f_c$ :	Atrito lateral medido no ensaio CPTU
$F_d$ :	Resistência dinâmica teórica do solo (Schnaid et al., 2009)
$F_{d,a}$ :	Força de reação do anel
$F_{d,c}$ :	Força de reação do núcleo
$F_{d,s}$ :	Força de atrito lateral do amostrador
$F_e$ :	Parcela de resistência de ponta
$F_e$ :	Força de reação estática última
$F_0$ :	Parcela de resistência devido ao atrito externo
$F_H$ :	Força atuante na composição de hastes
$F_i$ :	Força de impacto
$f_i$ :	Atrito lateral interno unitário
$F_M$ :	Força atuante no martelo
$f_s$ :	Atrito lateral externo unitário
$f_s$ :	Atrito lateral do ensaio CPTU
$F_x$ :	Força de compressão
$f_i$ :	Atrito-adesão entre a lateral do amostrador e o solo
$g$ :	Aceleração da gravidade
$h$ :	Profundidade de cravação do amostrador
$h_q$ :	Altura de queda padrão do martelo
$I$ :	Índice de rigidez reduzido do solo
$I_r$ :	Índice de rigidez
$J$ :	Damping de Smith
$K$ :	Rigidez do coxim
$K'$ :	Rigidez do sistema estaca-solo
$K_c$ :	Fator de correção da energia do método EF2
$K_m$ :	Rigidez do coxim de madeira
$K_p$ :	Rigidez do coxim de polipropileno
$K_0$ :	Coefficiente de empuxo em repouso
$K_1$ :	Fator de correção da energia do método EF2
$K_2$ :	Fator de correção da energia do método EF2

$\ell$ :	Distância da seção instrumentada até a extremidade do amostrador
$L$ :	Profundidade do ensaio
$L_a$ :	Comprimento da amostra de solo recuperada
$L_h$ :	Comprimento da composição de hastes
$m$ :	Massa do corpo considerado
$M_h$ :	Massa da haste
$M_m$ :	Massa do martelo
$n$ :	Número total dos intervalos de tempo
$N$ :	Número de golpes
$N_c$ :	Fator de capacidade de carga
$N_q$ :	Fator de capacidade de carga
$N_\gamma$ :	Fator de capacidade de carga
$(N_I)_{en}$ :	Índice NSPT obtido através da parcela de energia utilizada para a cravação do amostrador no solo
$q$ :	Tensão normal atuante no anel do amostrador
$Q$ :	Quake
$dQ$ :	Incrementos de carga
$q_c$ :	Resistência de ponta do ensaio CPTu
$q_p$ :	Resistência de ponta
$R_D$ :	Resistência dinâmica experimental oferecida pelo solo
$\Sigma R_D$ :	Somatório dos valores de resistência dinâmica para os golpes correspondentes aos últimos 0.30 m de penetração
$R_s$ :	Resistência estática no ensaio SPT (Aoki et al., 2007)
$R_v$ :	Resistência dinâmica
$S_u$ :	Resistência ao cisalhamento
$T$ :	Energia cinética total do sistema
$T_A$ :	Energia transferida ao sistema amostrador-solo
$T_{m\acute{a}x}$ :	Torque máximo
$u$ :	Deslocamento
$V$ :	Energia potencial de deformação
$v(t)$ :	Velocidade das partículas
$V_{eh}$ :	Energia potencial elástica de deformação das hastes
$V_{es}$ :	Energia potencial elástica devido a deformação do solo
$v_H$ :	Velocidade da partícula na composição de haste
$v_i$ :	Velocidade do martelo no instante do impacto
$v_M$ :	Velocidade da partícula no martelo

$v_p$ :	Velocidade de penetração
$Z$ :	Impedância da haste
$Z_M$ :	Impedância do martelo
$W$ :	Trabalho de deformação
$W'$ :	Somatório do peso submerso das hastes e do amostrador
$W_{nc}$ :	Trabalho realizado por forças não conservativas
$\alpha$ :	Coefficiente de adesão
$\gamma$ :	Peso específico do solo
$\delta$ :	Variação em um intervalo de tempo qualquer
$\varepsilon$ :	Deformação
$\eta$ :	Eficiência do ensaio SPT
$\eta_i$ :	Eficiência do impacto
$\eta_s$ :	Eficiência calculada através do trabalho realizado para a penetração do amostrador no solo
$\eta^*$ :	Eficiência do ensaio SPT redefinida por Aoki e Cintra (2000a)
$\eta_1$ :	Eficiência do martelo (ODEBRECHT, 2003)
$\eta_2$ :	Eficiência da composição de hastes (ODEBRECHT, 2003)
$\eta_3$ :	Eficiência do sistema (ODEBRECHT, 2003)
$\rho$ :	Penetração permanente do amostrador
$\rho_a$ :	Massa específica do aço
$\rho_i$ :	Deslocamento em um determinado instante $i$
$\rho_{m\acute{a}x}$ :	Penetração máxima do amostrador no solo
$\rho_s$ :	Massa específica do material
$\rho_{total}$ :	Deslocamento total registrado ao final do evento
$\sigma'_v$ :	Tensão vertical efetiva
$\sigma_x$ :	Tensão de compressão
$v'$ :	Fator de incremento de carga
$\phi'$ :	Ângulo de atrito interno

## Lista de Siglas

---

ABGE:	Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental
ABNT:	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM:	American Society for Testing and Materials
CAPES:	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CNPq:	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
EESC:	Escola de Engenharia de São Carlos
FAPESP:	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
NBR:	Norma Brasileira
SPT:	Standard Penetration Test
UNESP:	Universidade Estadual Paulista
USP:	Universidade de São Paulo



# ÍNDICE

---

<b>Capítulo 1: Considerações iniciais</b> .....	37
1.1 Introdução .....	37
1.2 Justificativa .....	39
1.3 Objetivos .....	40
1.4 Organização da tese .....	41
<b>Capítulo 2: Revisão bibliográfica</b> .....	43
2.1 Introdução .....	43
2.2 Sondagem de simples reconhecimento do solo (Ensaio SPT) .....	44
2.2.1 Medida de torque no ensaio SPT .....	48
2.3 Evolução do ensaio SPT .....	49
2.4 Energia no ensaio SPT .....	51
2.4.1 Conceito de eficiência no ensaio SPT .....	53
2.4.2 Mecanismo de transferência de energia .....	57
2.4.3 Aplicação do Princípio de Hamilton ao golpe do martelo no ensaio SPT .....	60
2.5 Determinação da energia no ensaio SPT .....	66
2.5.1 Método EF2 .....	67
2.5.2 Método EFV .....	68
2.5.3 Comparação entre os métodos EF2 e EFV .....	70
2.6 Instrumentação utilizada para determinação da energia no ensaio SPT .....	71
2.6.1 Acelerômetros .....	72
2.6.2 Medidas de força .....	74
2.6.3 Sistema de aquisição de dados .....	75
2.7 Mecanismo de interação solo-amostrador .....	77
2.7.1 Modelo desenvolvido por Lobo (2009) .....	77
2.7.2 Força dinâmica mobilizada durante a cravação do amostrador SPT (SCHNAID et al., 2009a) .....	80
2.7.3 Estática no ensaio SPT .....	85
2.7.4 Resistência estática mobilizada no sistema amostrador-solo através da aplicação do Princípio de Hamilton (AOKI et al., 2007) .....	90

<b>Capítulo 3: Teoria da onda unidimensional</b> .....	95
3.1 Considerações iniciais.....	95
3.2 Velocidade de propagação da onda e velocidade das partículas.....	96
3.3 Equação da propagação de uma onda longitudinal de tensão em um conjunto de hastes.....	99
3.4 Energia de uma onda longitudinal de tensão.....	101
3.5 Influência das condições de contorno.....	103
3.5.1 Extremidade da haste.....	104
3.5.2 Alteração de impedância na haste.....	108
3.6 Soluções analíticas para a primeira onda de tensão.....	111
3.6.1 Martelo rígido e sem coxim.....	111
3.6.2 Martelo rígido e coxim elástico.....	113
3.7 Resistência dinâmica no topo da composição de hastes.....	120
3.8 Considerações finais.....	121
<b>Capítulo 4: Desenvolvimento do equipamento</b> .....	123
4.1 Segmento de Haste.....	123
4.2 Acelerômetros.....	125
4.3 Suporte para fixação dos acelerômetros.....	129
4.3.1 Ensaio dinâmico de laboratório.....	130
4.3.2 Análise dos resultados.....	133
4.4 Célula de carga.....	137
4.5 Sistema de aquisição de dados.....	139
4.6 Calibração da célula de carga.....	141
4.7 Qualidade da instrumentação.....	143
4.7.1 Instrumentação posicionada abaixo da cabeça de bater.....	144
4.7.2 Penetração permanente do amostrador versus deslocamento máximo.....	146
4.8 Considerações finais.....	147
<b>Capítulo 5: Ensaio de campo</b> .....	149
5.1 Ensaio no Campo Experimental de Fundações da EESC/USP.....	149
5.2 Ensaio no Pátio da Base Fundação em Ribeirão Preto (SP).....	149
5.3 Ensaio no Campo Experimental de Fundações da UNESP/Bauru.....	150
5.4 Ensaio na cidade de São Carlos (SP).....	152
5.5 Procedimentos dos ensaios de campo.....	154
5.5.1 Equipamentos de sondagem.....	154
5.5.2 Posicionamento do segmento de haste instrumentado.....	156

5.5.3 Procedimentos executivos .....	159
5.6 Programa catmanEasy-AP .....	161
5.6.1 Configuração do programa catmanEasy- AP .....	161
5.7 Considerações finais.....	165
<b>Capítulo 6: Avaliação da energia no ensaio SPT .....</b>	<b>167</b>
6.1 Considerações iniciais.....	167
6.2 Energia versus penetração permanente .....	168
6.2.1 Campo Experimental da UNESP/Bauru .....	168
6.2.2 Loteamento residencial em São Carlos .....	174
6.3 Eficiência no ensaio SPT .....	180
6.3.1 Campo Experimental da UNESP/Bauru .....	180
6.3.2 Loteamento residencial de São Carlos .....	190
6.4 Comparação entre as curvas teórica e experimental de transferência de energia ....	198
6.5 Influência da rigidez do coxim no processo de transferência de energia .....	201
6.6 Comparação entre as curvas teórica e experimental de força .....	204
6.7 Influência das condições do solo na quantidade de energia do ensaio SPT .....	207
6.7.1 Composição de hastes curta .....	208
6.7.2 Composição de haste média .....	211
6.8 Considerações finais.....	216
<b>Capítulo 7: Resistência do solo no ensaio SPT.....</b>	<b>219</b>
7.1 Considerações iniciais.....	219
7.2 Resistência do solo no ensaio SPT .....	219
7.3 Apresentação dos resultados de resistência dinâmica do solo .....	223
7.3.1 Campo Experimental da UNESP de Bauru (SP) .....	223
7.3.2 Loteamento residencial em São Carlos (SP) .....	234
7.4 Valores experimentais e teóricos de resistência do sistema solo-amostrador .....	241
7.4.1 Método de Schmertmann (1979) .....	241
7.4.2    Método de Aoki et al., (2007) .....	246
7.4.3    Método de Schnaid et al., (2009) .....	252
7.5 Mecanismos de reação mobilizados durante a penetração do amostrador SPT .....	260
7.5.1 Embuchamento do solo .....	261
7.5.2 Resistência de ponta e atrito lateral externo .....	266
7.5.3 Estudo de caso: Sondagens SPT realizadas em Porto Alegre (RS) .....	268



7.6	Considerações para a prática de ensaios SPT .....	270
7.7	Considerações finais.....	272
<b>Capítulo 8: Conclusões</b>	.....	<b>275</b>
8.1	Considerações iniciais.....	275
8.2	Conclusões .....	275
8.2.1	Equipamento desenvolvido para a determinação da energia no ensaio SPT .....	275
8.2.2	Energia e eficiência no ensaio SPT .....	276
8.2.3	Resistência dinâmica mobilizada durante a penetração do amostrador SPT .....	278
8.3	Sugestões para futuras pesquisas .....	279
<b>Referências bibliográficas</b>	.....	<b>281</b>
<b>Apêndice A: Ensaios de campo</b>	.....	<b>291</b>
<b>Apêndice B: Resultados típicos dos ensaios SPT instrumentados</b>	.....	<b>297</b>
<b>Apêndice C: Resistência do solo</b>	.....	<b>353</b>
<b>Apêndice D: Roteiro para análise dos sinais</b>	.....	<b>357</b>

# Capítulo 1

## Considerações iniciais

*"Unfortunately, soils are made by nature and not by the man and the products of the nature are always complex"...* (Karl Terzaghi)

### 1.1 Introdução

O ensaio de simples reconhecimento do solo, universalmente conhecido como SPT (Standard Penetration Test), é uma das sondagens para investigação do subsolo mais utilizadas tanto no Brasil como em muitos outros países. Esse ensaio também é utilizado como medida de resistência à penetração dinâmica. No âmbito da engenharia geotécnica, principalmente na engenharia de fundações, o amplo emprego deste ensaio deve-se à sua simplicidade, robustez e facilidade de aplicação dos seus resultados.

No ensaio SPT, normatizado no Brasil pela norma NBR 6484 (2001), a resistência à penetração dinâmica é caracterizada por um índice de resistência ( $N_{SPT}$ ), que é obtido através da cravação de um amostrador padrão sob a ação da queda de um martelo, com massa de 65 kg, de uma altura de 0.75 m. O valor do índice de resistência à penetração ( $N_{SPT}$ ) corresponde ao número de golpes necessários para a cravação de 0.30 m do amostrador no solo, após uma cravação inicial de 0.15 m.

O índice  $N_{SPT}$  é usado diretamente em correlações empíricas ou semi-empíricas como um parâmetro chave para o cálculo da capacidade de suporte e recalque das fundações. No entanto, várias críticas têm sido feitas ao ensaio SPT, referentes à utilização dessas correlações empíricas, muitas das quais estão baseadas em observações práticas, sem nenhum fundamento científico. Críticas também estão relacionadas com a dispersão de resultados, principalmente provenientes da dependência do operador e também da diversidade dos equipamentos e dos procedimentos em uso.

Apesar de o ensaio ser normatizado, os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios se diferenciam na quantidade de energia efetivamente transferida ao conjunto de hastes. Assim, para um mesmo solo ensaiado, o valor do índice de resistência à penetração ( $N_{SPT}$ ) varia com o equipamento utilizado.

Por esses motivos, a partir da década de 70, as restrições impostas ao ensaio SPT motivaram o desenvolvimento de estudos voltados para a medição da parcela de energia do martelo transferida para a composição de hastes, visando à padronização do ensaio. Estudos desenvolvidos por diversos pesquisadores, incluindo Schmertmann e Palácios (1979), Schmertmann (1979), Kovacs (1979 e 1981), Belincanta (1985, e 1998), Drumright (1996), Abou-matar e Goble (1997), Youd (2008) e Lobo (2009), procuraram identificar as influências das diferenças encontradas nos equipamentos e dos diferentes tipos de solo na determinação do índice de resistência a penetração ( $N_{SPT}$ ). Estas diferenças implicam em distintas quantidades de energia transferidas à composição de hastes e conseqüentemente ocasionando muitas vezes discrepância nos resultados.

No início da década passada, a publicação do trabalho de Aoki e Cintra (2000a) motivou o desenvolvimento de pesquisas voltadas a incorporação de novos conhecimentos sobre a interpretação do ensaio SPT baseados no Princípio de Hamilton. Como o índice  $N_{SPT}$  está diretamente relacionado com a parcela de energia que é efetivamente transmitida ao amostrador durante a queda do martelo, análises racionais dos resultados de ensaios SPT dependem essencialmente da estimativa da quantidade dessa energia (AOKI; CINTRA, 2000a). Desta forma, os pesquisadores tem procurado identificar e avaliar os fatores que influenciam na parcela de energia que realmente atinge o amostrador (AOKI; CINTRA, 2000a; CAVALCANTE, 2002; ODEBRECHT, 2003 e 2005; Aoki et al., 2007 e 2004; NEVES, 2004; SCHNAID et al., 2009a; LUKIANTCHUKI et al., 2011).

A determinação da energia transferida ao amostrador pode ser realizada através de uma instrumentação composta por uma célula de carga e um par de acelerômetros instalados na haste do equipamento de sondagem. Através desta instrumentação registra-se a passagem da onda longitudinal de compressão gerada pela ação de um golpe do martelo. Integrando-se o produto da força normal pela velocidade da partícula ao longo do tempo, pode-se determinar a energia correspondente a essa onda. O valor da energia transmitida pela onda longitudinal de compressão, decorrente do golpe do martelo, é utilizado então na correção do valor do índice  $N_{SPT}$  para o valor de energia de referência internacional que corresponde a 60 % da energia teórica gerada pelo golpe do martelo  $N_{SPT60}$  (Skempton, 1986).

Desta forma, no presente trabalho de pesquisa um dos objetivos foi o desenvolvimento de um equipamento, compatível com as dimensões do ensaio SPT brasileiro, capaz de

avaliar a quantidade de energia que efetivamente é transferida ao amostrador SPT. Um outro objetivo é utilizar os resultados obtidos em interpretações racionais dos ensaios SPT.

## 1.2 Justificativa

Devido às críticas anteriormente mencionadas, é de grande importância a realização de pesquisas baseadas na quantidade de energia que efetivamente atinge o amostrador, contribuindo para o aprimoramento da interpretação dos resultados do ensaio SPT. Esse tipo de abordagem permite um melhor entendimento dos fenômenos que ocorrem durante a execução do ensaio, de tal forma que possa ser determinada racionalmente a resistência dinâmica do solo.

Diversos pesquisadores, entre os quais Odebrecht (2003), Cavalcante (2002) e Neves (2004), determinaram a energia efetivamente transferida ao amostrador SPT, obtendo grandes avanços nesse sentido. Entretanto, para o perfeito entendimento dos fenômenos que ocorrem durante o impacto do martelo, ainda existem diversos pontos que necessitam ser estudados, tais como:

- eficiência do ensaio SPT com base na proposta de Aoki e Cintra (2000a);
- influência da condição do solo no processo de transferência de energia;
- mecanismos de resistência mobilizados durante a penetração do amostrador no solo;
- embuchamento do amostrador durante a cravação; dentre outros

Além disso, na maioria dos trabalhos sobre o assunto, as medidas de energia foram realizadas na seção transversal da haste logo abaixo da cabeça de bater, e poucos na seção da haste logo acima do topo do amostrador do ensaio SPT. A determinação da energia no topo do amostrador pode ser realizada com base no Princípio de Hamilton (Aoki e Cintra, 2000a), possibilitando o entendimento das transformações de energia cinética, energia potencial e trabalho de forças não conservativas durante o evento dinâmico e permitindo uma nova interpretação do ensaio SPT.

Desta maneira, fica evidente que a continuidade dos trabalhos de interpretação de resultados do ensaio SPT com base na determinação da energia que efetivamente atinge o amostrador apresenta grande potencial para contribuir com a aplicação dos resultados do ensaio SPT.

### 1.3 Objetivos

Este trabalho de pesquisa tem como objetivo principal interpretar resultados experimentais de ensaios SPT baseados na quantidade de energia que efetivamente atinge o amostrador. Através dessa nova abordagem pretende-se alcançar um entendimento mais claro dos fenômenos que ocorrem durante a execução do ensaio, de tal forma que permita determinar experimentalmente a força de reação do solo durante a cravação do amostrador SPT. Para atingir o objetivo mencionado foi necessário:

- Desenvolver um equipamento capaz de avaliar a quantidade de energia que é transferida ao amostrador SPT. Para isso torna-se necessário a medida da energia logo acima do amostrador, conforme proposto por Aoki e Cintra (2000a).
- Verificar a qualidade dos resultados experimentais através da instrumentação previamente desenvolvida, uma vez que a confiabilidade dos resultados é fundamental para a abordagem racional do ensaio SPT.
- Realizar ensaios SPT com instrumentação simultânea no topo e na base da composição de hastes. Desta forma, com esses resultados determinou-se a eficiência do ensaio SPT de acordo com a redefinição de Aoki e Cintra (2000a) e conseqüentemente as perdas de energia que ocorrem ao longo da composição de hastes.
- Realizar ensaios de sondagem SPT, utilizando equipamentos convencionais e equipamentos mecanizados, com o objetivo de determinar a eficiência de cada um dos equipamentos.
- Determinar experimentalmente a resistência do solo através dos sinais de força e aceleração registrados em uma seção logo acima do amostrador SPT.
- Avaliar os diversos métodos teóricos desenvolvidos, para determinar a força de reação do solo durante a cravação do amostrador SPT, através da comparação com os valores experimentais de resistência do solo.
- Avaliar o mecanismo de embuchamento que ocorre no solo no momento da penetração do amostrador do ensaio SPT, quantificando a influência do tipo de solo e das suas condições.

## 1.4 Organização da tese

O presente trabalho de pesquisa está dividido em três partes distintas. A primeira, constituída pelos Capítulos 2 e 3, refere-se a uma revisão bibliográfica referente ao ensaio SPT e à teoria da onda unidimensional. No Capítulo 2 são apresentadas informações sobre o ensaio SPT, o processo de transferência de energia durante a cravação do amostrador no solo, métodos usuais para determinação da energia, aplicação do Princípio de Hamilton ao ensaio SPT e os métodos teóricos para previsão da resistência do solo mobilizada durante a cravação do amostrador. O Capítulo 3 apresenta a dedução da equação da onda, a influência das condições de contorno durante a propagação da onda de tensão e as soluções analíticas para a determinação das curvas teóricas de força e energia no ensaio SPT.

A segunda parte, que é constituída pelos Capítulos 4 e 5, refere-se ao equipamento desenvolvido neste trabalho de pesquisa, para a determinação da energia no topo do amostrador, e a avaliação da qualidade da instrumentação desenvolvida (Capítulo 4). São apresentadas informações a respeito da caracterização geológico-geotécnica dos locais onde foram realizados os ensaios SPT, equipamentos utilizados e procedimentos executivos (Capítulo 5).

A terceira parte, que é constituída pelos Capítulos 6 e 7, refere-se à apresentação e discussão dos resultados obtidos. O Capítulo 6 apresenta uma análise quantitativa da energia no ensaio SPT, baseada nos resultados dos ensaios de campo realizados em diferentes locais e utilizando diferentes equipamentos. A determinação experimental da resistência dinâmica do solo é apresentada no Capítulo 7. Posteriormente esses resultados são comparados com resultados de métodos teóricos para a determinação da resistência do solo mobilizada durante a cravação do amostrador SPT. Adicionalmente, são apresentadas análises em relação ao fenômeno do embuchamento e da contribuição das parcelas de atrito e resistência de ponta na cravação do amostrador.

Por fim, o Capítulo 8 apresenta as principais conclusões desse trabalho de pesquisa e sugestões para futuras pesquisas.



# Capítulo 2

## Revisão bibliográfica

---

### 2.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada uma breve revisão sobre um ensaio de penetração dinâmica, denominado ensaio SPT (Standard Penetration Test). Também é abordado o contexto da evolução do ensaio SPT no Brasil, em termos de energia, desde os primeiros trabalhos, até os atuais, nos quais pesquisadores buscam aprimorar o ensaio através de interpretações baseadas em análises racionais.

É dada ênfase à questão da energia no ensaio SPT, principalmente no que se refere à transferência de energia durante o golpe. O mecanismo de propagação da onda durante o golpe do martelo foi pioneiramente abordado por Schmertmann e Palácios (1979). Mais recentemente, Aoki e Cintra (2000a) aplicaram o princípio da conservação de energia durante o golpe do martelo, conseguindo assim interpretar o ensaio em termos de transformação dos diversos tipos de energia envolvidos no evento. Esses autores propõem que a interpretação do ensaio deve ser baseada na quantidade de energia que efetivamente atinge o amostrador, e a partir dessa consideração desenvolveram uma equação para a determinação da resistência estática à penetração do amostrador no solo.

Adicionalmente é abordada a questão da medição da energia no ensaio SPT, uma vez que um dos principais objetivos deste trabalho de pesquisa foi o desenvolvimento de um sistema de medição de energia adequado ao ensaio SPT brasileiro. Por fim, é abordado o mecanismo de interação solo-amostrador, retratando diversos trabalhos da literatura (SCHMERTMANN; PALÁCIOS, 1979; AOKI et al., 2007; LOBO, 2009; SCHNAID et al., 2009a) que buscaram desvendar o mecanismo de reação do solo durante a cravação do amostrador.

A apresentação de todos esses tópicos é importante para o entendimento do presente trabalho de pesquisa e conseqüentemente das análises que serão apresentadas nos próximos capítulos.



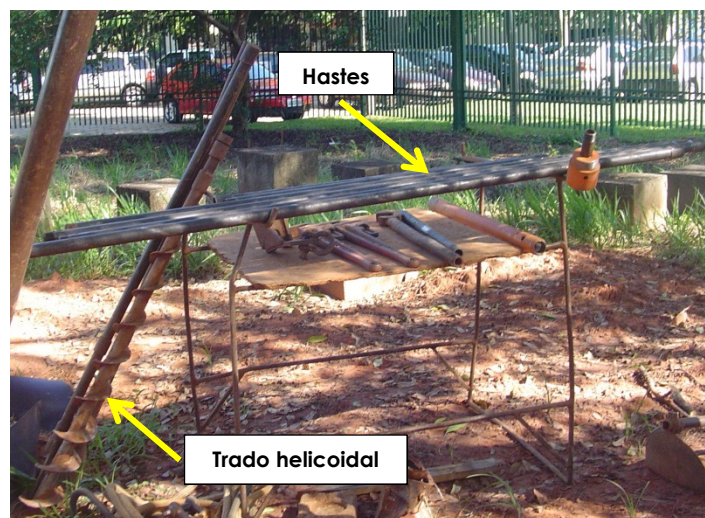
## 2.2 Sondagem de simples reconhecimento do solo (Ensaio SPT)

No Brasil, o ensaio SPT é normatizado, em termos de equipamento e procedimentos, pela NBR 6484 (ABNT, 2001). Basicamente, o equipamento necessário para a realização do ensaio SPT é composto por: (BELINCANTA et al., 2010):

- 1) *Torre de sondagem completa ou tripé de sondagem*: é formada por quatro tubos de aço, com 5 m de comprimento cada, e possuindo dispositivos para montagem das hastes e dos tubos de revestimento, assim como para o acionamento do martelo (Figura 2.1a);
- 2) *Composição para perfuração e cravação*: formada por uma composição de hastes de aço ( $D_{\text{externo}} = 33.4 \pm 2.5$  mm,  $D_{\text{interno}} = 24.3 \pm 2.5$  mm e massa linear de 3.23 kg/m), com comprimentos de 1 m ou 2 m. Essas hastes, que tem suas extremidades roscadas, são acopladas entre si por meio de luvas que são devidamente atarraxadas (Figura 2.1b);
- 3) *Tubos de revestimento*: formados por tubos de aço ( $D_{\text{externo}} = 76.1 \pm 5$  mm e  $D_{\text{interno}} = 68.8 \pm 5$  mm) com comprimentos de 1 m ou 2 m, que podem ser emendados por meio de luvas e roscas;
- 4) *Trado helicoidal*: utilizado para a abertura dos furos de sondagem. O diâmetro do trado deve ser ligeiramente inferior ao diâmetro interno do tubo de revestimento, para permitir uma folga de 5 a 7 mm. Para tubos de revestimento com 63.5 mm de diâmetro interno, o diâmetro usual do trado é de 58 mm;



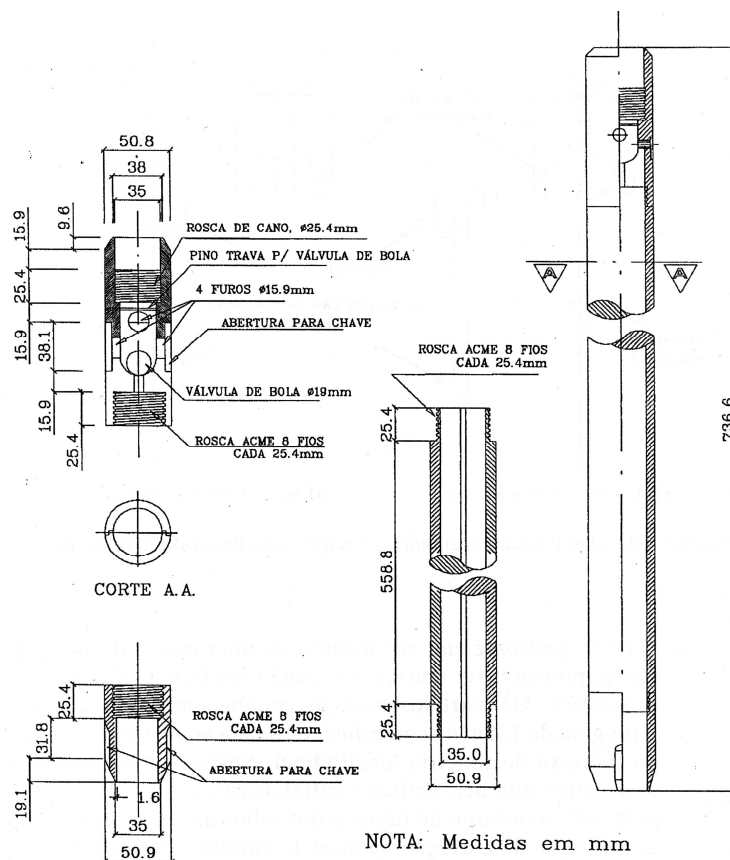
(a) Torre de sondagem completa



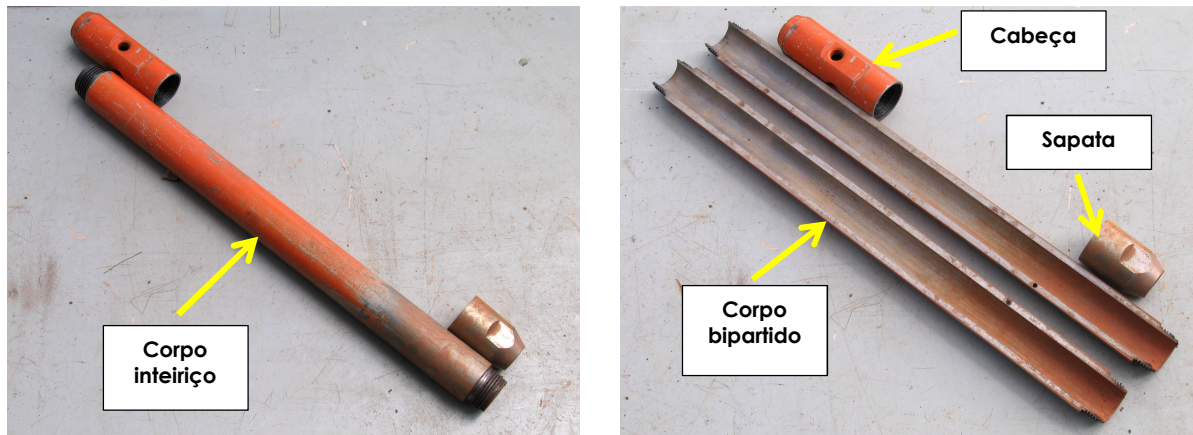
(b) Composição para perfuração/cravação e trado helicoidal

**Figura 2.1** – Equipamento de sondagem SPT

- 5) *Trépano ou peça de lavagem*: formado por uma peça de aço biselada que possui duas saídas laterais para a água. A largura da lâmina de aço deve possuir uma folga de 3 a 5 mm em relação ao diâmetro interno dos tubos de revestimento;
- 6) *Sistema de circulação de água*: é constituído de uma bomba hidráulica, uma caixa para decantação de detritos e mangueiras de engate rápido;
- 7) *Amostrador padrão tipo Raymond*: é constituído por três partes: cabeça, corpo e sapata (Figura 2.2 e Figura 2.3). O corpo do amostrador é formado por um tubo de aço bipartido, com dimensões nominais padronizadas (comprimento de 609.6 mm,  $D_{\text{externo}} = 50.8 \pm 2$  mm e  $D_{\text{interno}} = 34.9 \pm 2$  mm). A cabeça do amostrador é formada por dois orifícios laterais, para saída de água e ar, e uma válvula interna constituída por uma esfera de aço inoxidável. Esses dispositivos permitem o balanceamento e o alívio da pressão interna do amostrador, durante a entrada da amostra na fase de cravação e durante a retirada da composição de hastes. A sapata do amostrador deve ser confeccionada com aço temperado para melhor suportar os esforços ao qual é submetido.



**Figura 2.2** – Amostrador do tipo Raymond bipartido (BELINCANTA et al., 2010; ABNT, 2001)



**Figura 2.3** – Amostrador do tipo Raymond bipartido

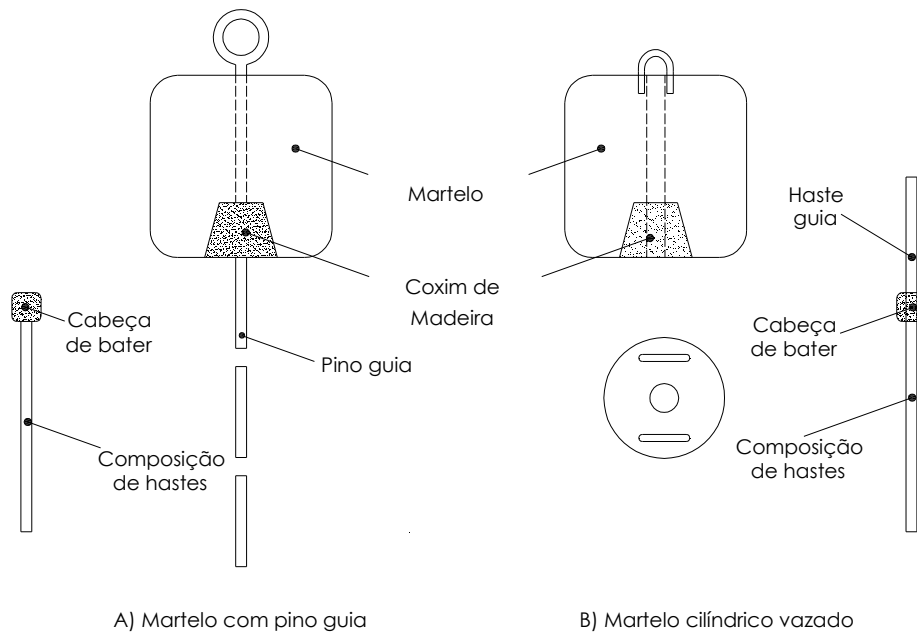
- 8) *Cabeça de bater*: constituída de um tarugo de aço com diâmetro de  $83 \pm 5$  mm, altura de  $90 \pm 5$  mm e massa nominal entre 3.5 e 4.5 kg (Figura 2.4a);
- 9) *Martelo padronizado*: constituído por uma massa de ferro de 65 kg, podendo ser maciço ou vazado e em formato cilíndrico ou prismático. Os martelos maciços possuem haste-guia ou pino-guia de 1.2 m ao longo do eixo de simetria longitudinal do martelo (Figura 2.4b). Os martelos devem possuir um coxim de madeira dura, embutido na sua face interior, com o objetivo de proteger o martelo e melhorar o contato entre as seções no instante do impacto. A Figura 2.5 apresenta os sistemas de martelo recomendados pela NBR 6484 (ABNT, 2001).



(a) Cabeça de bater

(b) Martelo cilíndrico maciço

**Figura 2.4** – Equipamento de sondagem SPT



**Figura 2.5** – Sistemas de martelos recomendados pela ABNT (BELINCANTA; CINTRA, 1998)

A sondagem SPT é executada em três etapas distintas, que são sempre repetidas para cada metro de profundidade: *perfuração*, *ensaio de penetração* e *amostragem* (CINTRA; AOKI, 2008b).

A perfuração consiste na abertura do furo onde posteriormente é inserido o amostrador. Segundo a norma brasileira NBR 6484 (ABNT, 2001), a abertura do furo é iniciada com um trado concha até o primeiro metro e com um trado helicoidal para as profundidades subsequentes. Belincanta et al. (2010), destaca que apesar da norma recomendar a utilização do trado concha para o primeiro metro, na prática, a perfuração é usualmente realizada somente com o trado helicoidal. A abertura do furo abaixo do nível d'água é realizada com o auxílio de um trépano e com circulação de água.

O ensaio de penetração é a etapa na qual é determinado o índice de resistência à penetração do solo ( $N_{SPT}$ ). Esta etapa consiste na aplicação de golpes sucessivos através do martelo de massa de 65 kg caindo em queda livre de uma altura padrão de 0.75 m e conseqüentemente causando a cravação do amostrador no solo. Os golpes são aplicados sucessivamente até que 0.45 m do amostrador tenham penetrado no solo. O índice  $N_{SPT}$  corresponde ao número de golpes necessário para cravar os últimos 0.30 m do amostrador no solo.

A amostragem é realizada após a penetração do amostrador no solo. Nesta etapa o amostrador é retirado do terreno e aberto. A seguir, a amostra de solo contida no interior do amostrador é retirada e realizada a identificação do tipo de solo. Através da amostragem são determinadas as camadas de solo (constituição e espessura) contidas ao longo do perfil do terreno.

O ensaio é finalizado de acordo com alguns critérios estabelecidos pela norma NBR 6484 (ABNT, 2001). De uma maneira geral, o ensaio é interrompido quando a penetração do amostrador no terreno, no qual está sendo realizado o ensaio, torna-se bastante difícil.

### **2.2.1 Medida de torque no ensaio SPT**

A medida do torque no ensaio SPT foi introduzida por Ranzini (1988), com o objetivo de extrair informações adicionais do ensaio, sem grandes alterações nos procedimentos executivos. Esse autor propôs estimar o atrito-adesão desenvolvido na interface solo-amostrador através da medida do torque necessário à rotação do amostrador padrão cravado no solo. O torque é aplicado no topo da composição de hastes através de um torquímetro (PEIXOTO, 2001; BELINCANTA et al., 2010). A sondagem SPT com medida de torque é denominada de sondagem SPT-T.

O torque é medido ao final da medida do índice  $N_{SPT}$ , estando o amostrador ainda cravado no solo. Preferencialmente, o torquímetro deve ser adaptado diretamente à cabeça de bater. Se o torquímetro for colocado diretamente sobre o topo da composição de hastes, o procedimento de retirada da cabeça de bater pode induzir a esforços rotacionais no amostrador, afetando a medida do torque (BELINCANTA et al., 2010). Durante a rotação da composição de haste e do amostrador é registrado o valor do torque máximo ( $T_{máx}$ ) e após a obtenção deste valor deve-se dar continuidade à rotação do amostrador por mais duas voltas completas registrando-se o valor do torque mínimo ( $T_{mín}$ ), também denominado de torque residual ( $T_{res}$ ).

Os valores de torque podem ser convertidos em valores de adesão-atrito ( $f_i$ ) estimados através da expressão proposta por Ranzini (1988 e 1994). No desenvolvimento desta equação, esse autor considera que o atrito lateral permanece constante ao longo da face lateral do amostrador e na abertura inferior. Assumindo essas hipóteses, é estabelecida uma condição de equilíbrio entre o momento aplicado, por meio do torquímetro, e o momento

resistente devido ao atrito lateral, tendo como base a profundidade de cravação do amostrador ( $h$ ). A expressão proposta por Ranzini (1994) foi modificada, resultando:

$$f_t = \frac{1000 \times T_{m\acute{a}x}}{(4.0537 h - 0.003171)} \quad (2.1)$$

onde  $f_t$  é o atrito-adesão (kPa),  $T_{m\acute{a}x}$  é o valor do torque máximo (kN.m) aplicado no topo da composição de hastes e  $h$  é a profundidade de cravação do amostrador (m).

Peixoto (2001) destaca que a medida de torque tem a vantagem de não ser alterada pelas mesmas fontes de erro que afetam o ensaio SPT (número de golpes, altura de queda, atrito das hastes, mau estado de conservação do equipamento dentre outras). Uma outra vantagem é a possibilidade de se obter um valor mais confiável da tensão cisalhante atuante no amostrador através do ensaio SPT por um custo adicional muito baixo.

### 2.3 Evolução do ensaio SPT

A evolução do ensaio SPT pode ser dividida em quatro fases, sendo que a primeira compreende o período de 1902 a 1920. A segunda fase inicia-se em 1927 e se estende até o final da década de 1940, com o lançamento do livro de Terzaghi e Peck (1948). A terceira fase inicia-se após esse período, quando foram realizadas as primeiras tentativas oficiais de normatização do ensaio. A última fase surge a partir de 1977, quando começam a surgir preocupações em relação à questão da energia transmitida ao conjunto de hastes e ao amostrador (CAVALCANTE, 2002).

A partir da década de 70, as limitações impostas pelo ensaio SPT motivaram o desenvolvimento de estudos voltados para a medição da energia, visando a padronização do ensaio. Diversos estudos desenvolvidos (SCHMERTMANN; PALÁCIOS, 1979; BELINCANTA, 1985, 1998; KOVACS, 1979, 1981; CAVALCANTE, 2002; ODEBRECHT, 2003; HOWIE et al., 2003; LOBO, 2009 dentre outros) procuraram identificar as influências que ocorrem na determinação do índice  $N_{SPT}$ . Isto porque este índice é afetado diretamente pela variação da energia transmitida ao conjunto de hastes e ao amostrador. Assim, diversos fatores relacionados aos equipamentos e procedimentos implicam em distintas energias transferidas às hastes utilizadas na cravação do amostrador SPT, ocasionando resultados discrepantes. Os fatores que influenciam na quantidade de energia transferida às hastes podem ser classificados em três grupos: natureza humana, equipamento e procedimento (CAVALCANTE, 2002).



No Brasil, a influência de diferentes fatores que afetam o índice  $N_{SPT}$  foi retratada no trabalho pioneiro de Belincanta (1998). A razão disso é que esses fatores influenciam diretamente na energia transferida durante a primeira onda de compressão incidente. Tais fatores, dentre outros, são o tipo do martelo, procedimentos executivos, uso do cabo de aço, estado da composição de hastes, utilização ou ausência do coxim de madeira e massa da cabeça de bater. Esse autor destaca ainda que as empresas de sondagem incorporam mudanças nos procedimentos de ensaios que acabam alterando o método proposto pela norma, sendo assim fundamental a avaliação e a quantificação dos fatores intervenientes no ensaio (BELINCANTA; CINTRA, 1998).

Hvorslev (1949) apresenta um estudo detalhado, no qual é discutida a influência de fatores listados na Tabela 2.1. Esses fatores intervenientes estão relacionados não apenas ao tipo do equipamento e aos procedimentos de execução, mas sobretudo às condições do solo tais como resistência, compacidade/consistência, permeabilidade, grau de saturação, sensibilidade, forma, tamanho e a distribuição dos grãos (solos granulares).

**Tabela 2.1-** Influência do equipamento ensaio SPT (HVORSLEV, 1949)

<b>Equipamento</b>	<b>Fatores Intervenientes</b>
<b>Amostrador</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Diâmetro</li> <li>● Razão de área projetada</li> <li>● Rugosidade das paredes interna e externa</li> <li>● Forma de corte da sapata</li> <li>● Folga interna e externa</li> <li>● Área e forma das aberturas de alívio</li> </ul>
<b>Martelo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Peso</li> <li>● Tipo</li> <li>● Altura de queda</li> </ul>
<b>Hastes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Tipo</li> <li>● Comprimento da composição</li> </ul>

Em relação às condições do solo, pesquisas recentes (LOBO, 2009) avaliaram, através de simulações numéricas, a influência da compacidade do solo no índice  $N_{SPT}$ . Os resultados indicaram que as condições do solo influenciam significativamente no mecanismo de transferência de energia, durante a propagação da onda na composição de hastes, mas não influenciam na quantidade total da energia computada ao final do evento. Isto significa que para perfis de solos fofos são necessários diversos ciclos de carregamento para

consumir toda a energia do sistema martelo-haste-amostrador, enquanto que para perfis mais compactos o número de ciclos diminui significativamente.

Entretanto, pode-se considerar que, no contexto brasileiro do ensaio SPT existe uma outra fase além daquelas citadas por Cavalcante (2002). Esta fase inicia-se com a publicação do trabalho de Aoki e Cintra (2000a), no qual os autores incorporam a aplicação do Princípio de Conservação de Energia (Princípio de Hamilton) na interpretação do ensaio SPT. Esses autores afirmam que para a correta interpretação do ensaio é necessário conhecer a quantidade de energia que atinge o topo do amostrador.

A abordagem proposta por Aoki e Cintra (2000a) contribuiu e continua a contribuir para o desenvolvimento e a interpretação do ensaio SPT baseado em uma análise racional (CAVALCANTE, 2002; ODEBRECHT, 2003; NEVES, 2004; ODEBRECHT et al., 2005; AOKI et al., 2007; LOBO, 2009; SCHNAID et al., 2009a; LUKIANTCHUKI et al., 2011; HAFEZ; SYAZANA, 2011; NOREÑA, 2011). Por essa razão, esse trabalho marca uma nova fase no contexto brasileiro do ensaio SPT.

## 2.4 Energia no ensaio SPT

A energia cinética do martelo, no instante do impacto, é transferida para o conjunto de hastes, de comprimento finito, através da propagação de uma onda de tensão. Esta transferência ocorre na forma de impulsos de tensão, sendo que a magnitude e a duração desses impulsos dependem da configuração do martelo, das hastes, da cabeça de bater e dos materiais que constituem os equipamentos (BELINCANTA; FERRAZ, 2000).

Quando o martelo é levantado, a energia disponibilizada ao sistema encontra-se na forma de energia potencial. Assim, considerando os padrões estabelecidos pela norma NBR 6484 (ABNT, 2001) a energia potencial teórica do sistema ou energia nominal do SPT ( $EP_T$ ) pode ser representada por:

$$EP_T = M_m \times g \times h_q = 65 \times 9.81 \times 0.75 \cong 478.2 \text{ J} \quad (2.2)$$

onde  $M_m$  é a massa do martelo padrão (kg),  $g$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ) e  $h_q$  é a altura de queda padrão do martelo (m).

Entretanto, a energia total disponibilizada ao sistema no evento do golpe do martelo não é igual à energia potencial teórica. Isto ocorre porque existe um movimento descendente do sistema amostrador-haste-cabeça de bater, devido à cravação do



amostrador no solo, ocasionando um aumento da energia disponibilizada ao sistema (ODEBRECHT, 2003; NEVES, 2004; DANIEL, 2008). Assim, para qualquer golpe que resulte em uma penetração no solo, a variação total da energia potencial do sistema será sempre maior do que sua energia potencial teórica.

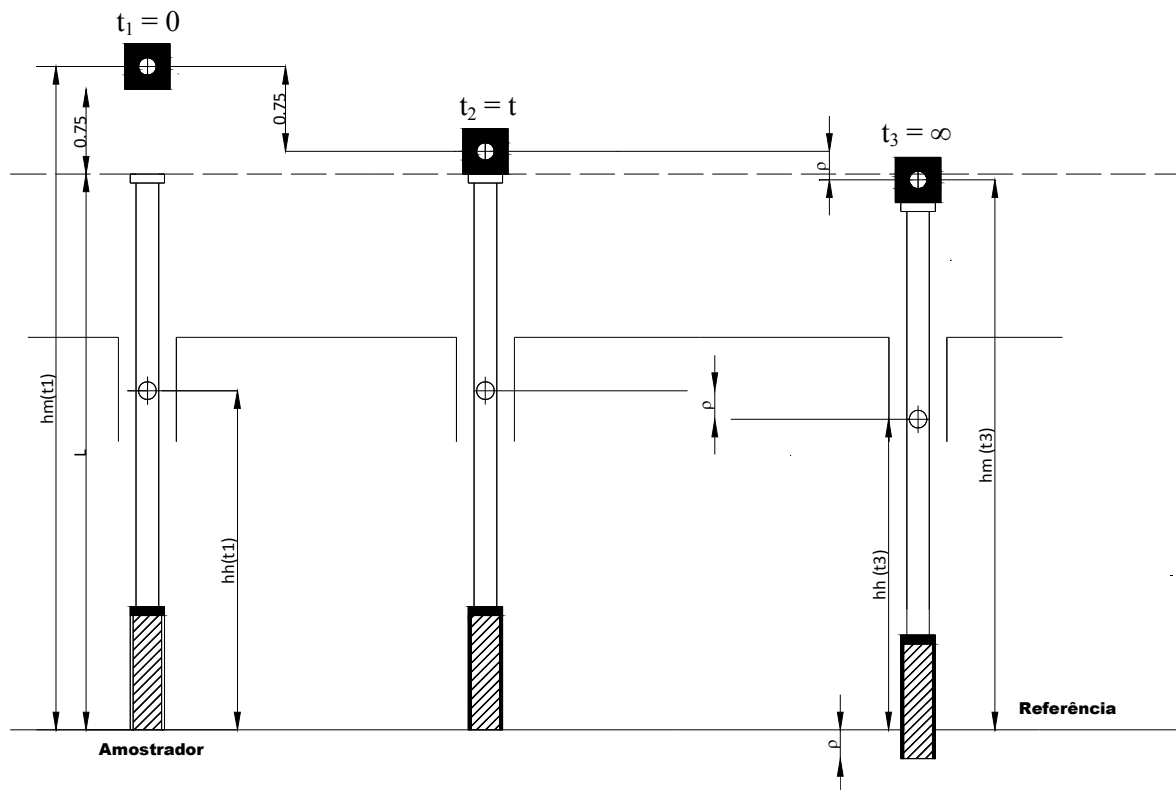
Odebrecht (2003) propôs uma correção da energia potencial imposta durante o evento, que considera um acréscimo de energia devido à penetração do amostrador no terreno (Figura 2.6). O processo de cravação do amostrador no solo devido à aplicação de um golpe pode ser representado em três estágios distintos (Figura 2.6). O primeiro instante ( $t_1 = 0$ ) representa o instante antes da liberação do martelo. A próxima etapa ( $t_2 = t$ ) corresponde ao instante antes do impacto do martelo sobre a cabeça de bater. E o instante final ( $t_3 = \infty$ ) é quando todo o processo de cravação do amostrador no solo já ocorreu. No instante final a energia potencial gravitacional do martelo e das hastes já foi consumida na cravação do amostrador no solo, devolvidas elasticamente e amortecidas dinamicamente no interior do martelo e das hastes (ODEBRECHT, 2003).

Odebrecht (2003) demonstrou que quando se considera um referencial fixo e externo ao sistema a energia potencial imposta durante o evento ( $EP_{sistema}$ ) pode ser representada por:

$$EP_{sistema} = EP_M + EP_H = EP_T + (M_m \times g \times \rho) + (M_h \times g \times \rho) \quad (2.3)$$

onde  $\rho$  é a penetração permanente do amostrador devido à aplicação de um golpe,  $M_h$  é a massa das hastes,  $EP_M$  é a variação da energia potencial do martelo e  $EP_H$  é a variação da energia potencial das hastes.

No caso de solos resistentes ( $N_{SPT} \geq 15$ ) combinados com comprimentos de composição de hastes superiores a 20 metros, a variação da energia potencial gravitacional do martelo e das hastes é muito próxima ao valor da energia potencial gravitacional teórica do martelo. Portanto, é aceitável considerar que esses valores são iguais para esses casos (ODEBRECHT, 2003). Esta diferença é mais acentuada quando se trata de solos de menor resistência onde a penetração do amostrador no solo é maior.



**Figura 2.6** – Energia potencial do sistema considerando o acréscimo da energia potencial do martelo e das hastes (ODEBRECHT, 2003)

### 2.4.1 Conceito de eficiência no ensaio SPT

A eficiência do ensaio SPT ( $\eta$ ) é usualmente definida como a relação entre a quantidade de energia transferida ao topo da composição de hastes ( $E_h$ ), no momento do primeiro impacto do martelo, e a energia potencial nominal do ensaio SPT (Equação 2.4). A energia transferida ao topo da composição de hastes ( $E_h$ ) é internacionalmente denominada de *ENTHRU*.

$$\eta = \frac{E_h}{478.2} \times 100 (\%) \quad (2.4)$$

Se não ocorresse nenhum tipo de perda de energia durante a queda do martelo, toda a energia potencial do ensaio SPT seria transformada em energia cinética ( $E_c$ ). A velocidade do martelo ( $v_i$ ), no momento do seu impacto com a cabeça de bater, seria então obtida através de:

$$EP_T = E_c \therefore (M_m \times g \times h_q) = \left( \frac{1}{2} \times M_m \times v_i^2 \right) \quad (2.5)$$

$$v_i = \sqrt{2 \times g \times h_q} \cong 3.84 \text{ m/s} \quad (2.6)$$

Décourt (1989) considerou as perdas de energia que ocorrem durante a queda do martelo através da introdução de um fator de eficiência ( $e_1$ ). Esse fator foi definido como sendo a relação entre a energia cinética do martelo ( $E_{ci}$ ), em um instante imediatamente antes do impacto entre o martelo e a cabeça de bater, e a energia nominal do SPT (Equação 2.7). O valor da energia ( $E_{ci}$ ) pode ser facilmente calculado quando se conhece o valor da velocidade de impacto do martelo ( $v_i$ ).

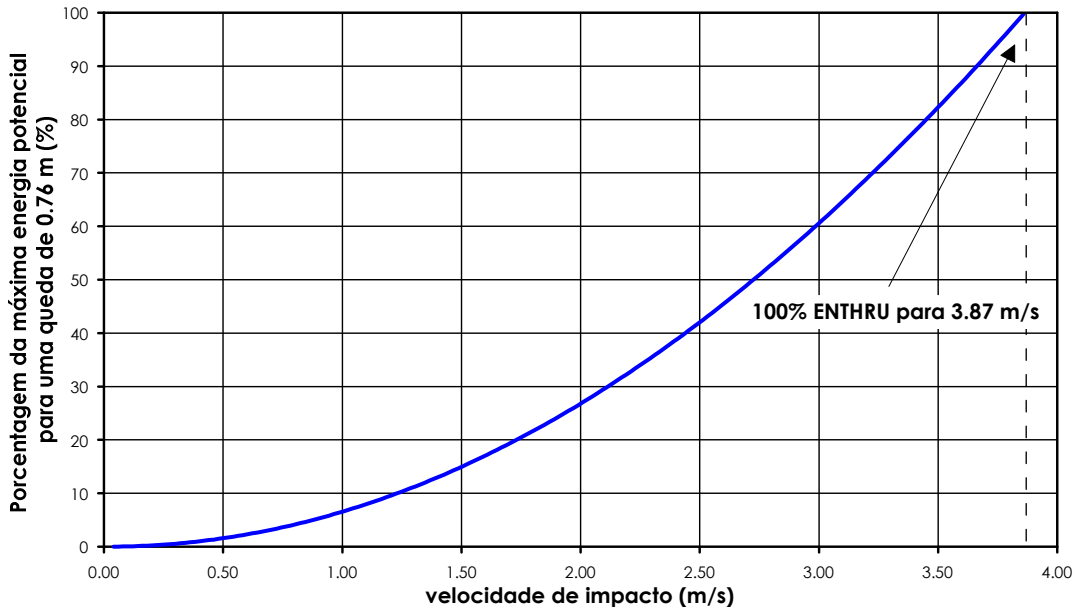
$$e_1 = \frac{E_{ci}}{EP_T} \quad (2.7)$$

Cavalcante (2002) mediu a velocidade de impacto do martelo para ensaios realizados durante o seu trabalho de pesquisa. Esse autor relata que para estes casos a velocidade obtida foi de 3.22 m/s, o que implica em um fator de eficiência de 70.5%. Kovacs e Salomone (1982) realizaram experimentos para medir a altura de queda e a velocidade de impacto do martelo utilizando-se martelos do tipo *donut* (cilíndrico vazado) e *safety*. Esses autores observaram que as perdas de energia encontravam-se entre 21% e 31% sendo que para martelos do tipo *safety* as perdas são ligeiramente superiores. Desta forma, as perdas de energia devem ser consideradas no cálculo da velocidade de impacto do martelo ( $v_i$ ) através de um fator de eficiência do impacto ( $\eta_i$ ) (Equação 2.8). O fator de eficiência ( $e_1$ ) definido por Décourt (1989) seria dado então pela Equação 2.9.

$$v_i = \sqrt{2 \times g \times h_q \times \eta_i} \quad (2.8)$$

$$\eta_i = \frac{0.5 \times M_m \times v_i^2}{478.2} \times 100 (\%) \quad (2.9)$$

Para as condições como o ensaio SPT é realizado, tanto nos Estados Unidos como no Canadá ( $M_m = 63.5 \text{ kg}$  e  $h_q = 0.76 \text{ m}$ ), Howie et al., (2003) mostraram que pequenos decréscimos na velocidade de impacto do martelo, provenientes de efeitos de atrito, podem resultar em uma redução significativa da energia cinética disponível no momento do impacto. A Figura 2.7 ilustra a influência da velocidade de impacto na quantidade máxima de energia potencial disponível para a cravação do amostrador SPT.

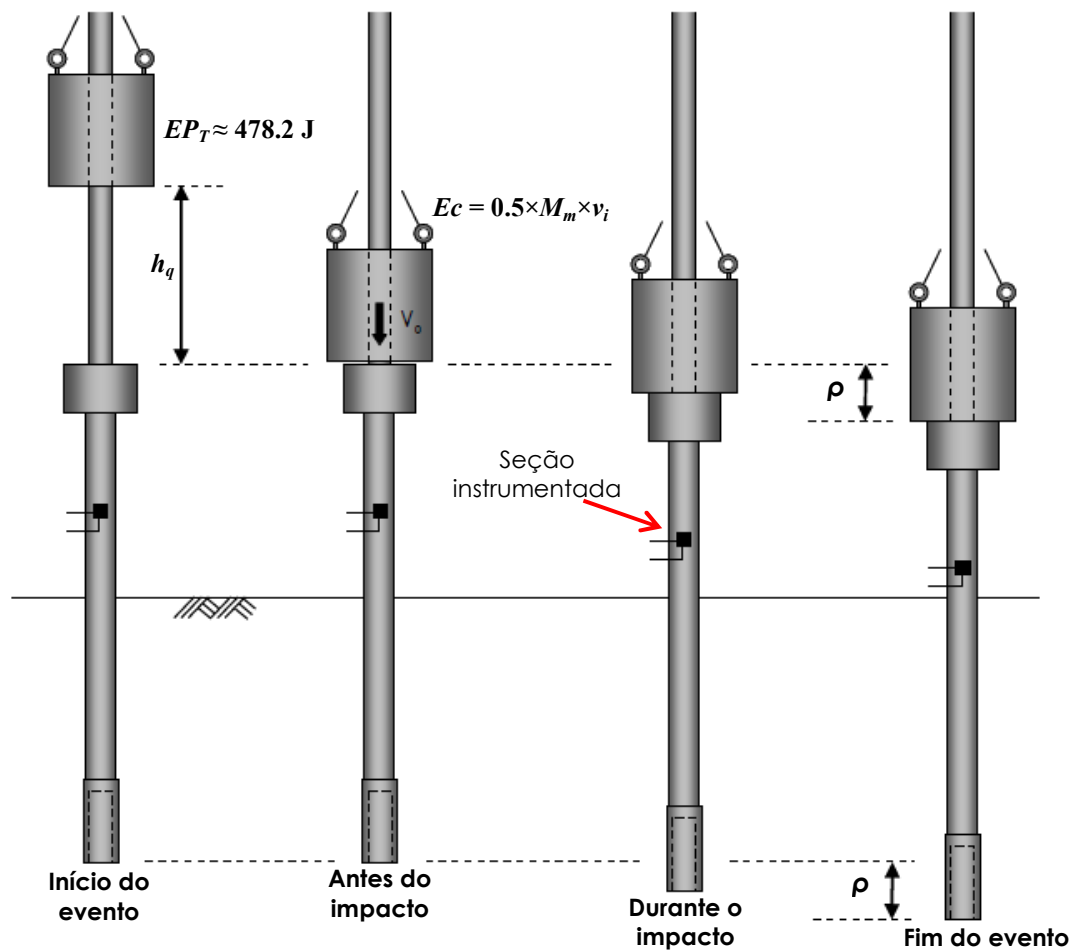


**Figura 2.7** – Influência da velocidade de impacto na máxima energia potencial disponível no ensaio SPT ( modificado de HOWIE et al, 2003)

A energia durante o evento do golpe do martelo pode ser analisada em pelo menos quatro instantes distintos: início do evento, antes do impacto do martelo, durante o impacto e ao final do evento (Figura 2.8). Antes da liberação do martelo, conforme já foi mencionado anteriormente, a energia encontra-se na forma de energia potencial (Equação 2.2). A energia em um instante imediatamente antes do impacto encontra-se na forma de energia cinética, sendo que a sua intensidade depende da velocidade do martelo no momento do impacto.

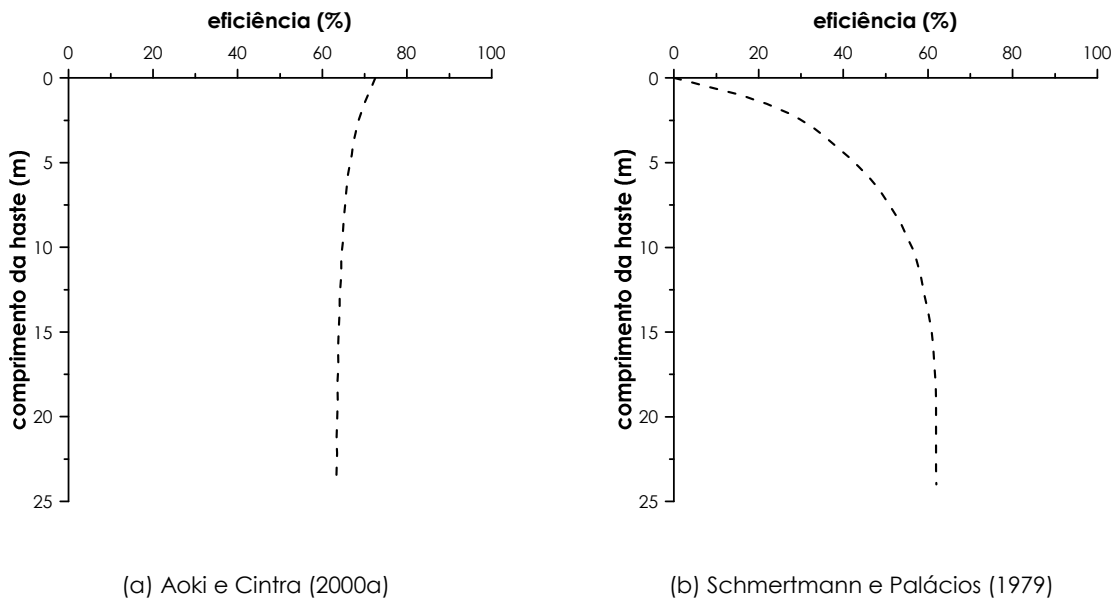
Aoki e Cintra (2000a) redefiniram a eficiência no ensaio SPT ( $\eta^*$ ) como sendo a relação entre a energia transferida ao sistema amostrador-solo, durante a propagação da onda de tensão ( $T_A$ ), e a energia nominal do ensaio SPT (Equação 2.10). Neste caso, a eficiência do ensaio SPT deve ser obtida com a instrumentação posicionada em uma seção próxima ao topo do amostrador. Esta proposta requer a determinação da quantidade energia que efetivamente chega ao amostrador, que na realidade é a energia responsável pela cravação do amostrador no solo.

$$\eta^* = \frac{T_A}{478.2} \times 100 (\%) \quad (2.10)$$



**Figura 2.8** – Energia potencial e cinética envolvida no evento do ensaio SPT (modificado de DANIEL, 2008)

Resultados teóricos obtidos por Aoki e Cintra (2000a), mostraram que os valores de eficiência de energia determinados no topo do amostrador são maiores para pequenos comprimentos de hastes. Este comportamento foi verificado para comprimentos crescentes até aproximadamente 5 m de comprimento, mantendo-se constantes para comprimentos maiores (Figura 2.9a). Resultados experimentais obtidos por Schmertmann e Palácios (1979) indicaram que para hastes curtas o valor da eficiência tende para zero enquanto que para hastes longas o valor apresenta uma tendência máxima (Figura 2.9b). Esses autores estimaram o valor da energia utilizando os registros referentes apenas à primeira onda de compressão incidente e considerando que os impactos subsequentes não apresentam influência significativa na penetração do amostrador SPT.



**Figura 2.9** – Eficiência versus comprimento de haste (SCHMERTMANN; PALÁCIOS, 1979; AOKI; CINTRA, 2000a)

Odebrecht (2003) sugere que a eficiência do ensaio SPT deve ser representada em três parcelas distintas: a eficiência do martelo ( $\eta_1$ ), a eficiência da composição de hastes ( $\eta_2$ ) e a eficiência do sistema ( $\eta_3$ ). Estes valores de eficiência quantificam as perdas de energia que ocorrem durante a cravação do amostrador no solo. Dentre outras, as perdas de energia podem ser decorrentes do mau contato e o desalinhamento entre as superfícies e as reflexões nas luvas (ODEBRECHT, 2003). Assim, a energia que efetivamente atinge o amostrador deve ser obtida considerando-se as perdas que ocorrem durante o evento (Equação 2.11).

$$E_{amostrador} = \eta_3 [\eta_1 (0.75 + \rho) \times M_m \times g + \eta_2 (M_h \times g \times \rho)] \quad (2.11)$$

## 2.4.2 Mecanismo de transferência de energia

O mecanismo de transferência de energia no ensaio SPT foi descrito detalhadamente por Belincanta e Ferraz (2000). No momento do impacto do martelo sobre a cabeça de bater ocorre a propagação de uma onda de compressão no sentido descendente da composição de hastes. Esta onda é composta por impulsos de tensão sucessivos e decrescentes na intensidade. Estes impulsos se propagam durante um intervalo de tempo

aproximadamente igual a  $2\ell/c$ , onde  $\ell$  é o comprimento da composição de hastes e  $c$  é a velocidade de propagação dos impulsos de tensão.

O martelo e a cabeça de bater permanecem em contato até o instante  $2\ell/c$ , quando começam a chegar os impulsos de tração refletidos junto ao amostrador. Segundo Schmertmann e Palácios (1979), neste momento ocorre uma perda momentânea do contato entre o martelo e a cabeça de bater, sendo que através desta separação física ocorre uma interrupção na transferência de energia. Esta interrupção ocorre até o momento que força resultante do martelo consegue se tornar superior a força resultante dos impulsos de tração, acarretando um novo contato entre o martelo e a cabeça de bater e conseqüentemente um novo impacto que transfere a energia remanescente no martelo. Lukiantchuki et al., (2011) observaram que o intervalo de tempo entre o primeiro e o segundo impactos é maior para solos com baixa resistência, quando comparado com solos mais resistentes. A energia transferida a partir dos impactos subsequentes contribui significativamente na cravação do amostrador no solo quando se considera solos com baixa resistência e com composições de hastes curtas.

O mecanismo de transferência de energia com os respectivos fenômenos de propagação, reflexão e absorção de impulsos de tensão é apresentado na Figura 2.10 (BELINCANTA; FERRAZ, 2000). Através deste esquema, observa-se que:

- 1) Inicialmente o martelo encontra-se em repouso, ou seja encontra-se levantado a uma altura ( $h_q$ ), mas ainda não foi liberado para iniciar o movimento em queda livre (Figura 2.10 a). Neste instante toda a energia disponível no sistema encontra-se na forma de energia potencial;
- 2) Durante a queda do martelo, a energia potencial armazenada no sistema é transformada em energia cinética. Com o impacto do martelo na cabeça de bater, a energia cinética, contida no martelo, começa a ser transferida ao conjunto de hastes na forma de impulsos de compressão (Figura 2.10 b). Estes impulsos se propagam no sentido descendente da composição de hastes até o instante  $2\ell/c$ ;
- 3) No instante  $\ell/c$ , os impulsos de compressão começam a alcançar o amostrador (Figura 2.10 c). Uma parte da energia contida nestes impulsos de compressão é transformada em trabalho necessário para cravar o amostrador no solo (Figura 2.10 c, Figura 2.10 d e Figura 2.10 e). A outra parte da energia fica armazenada nos

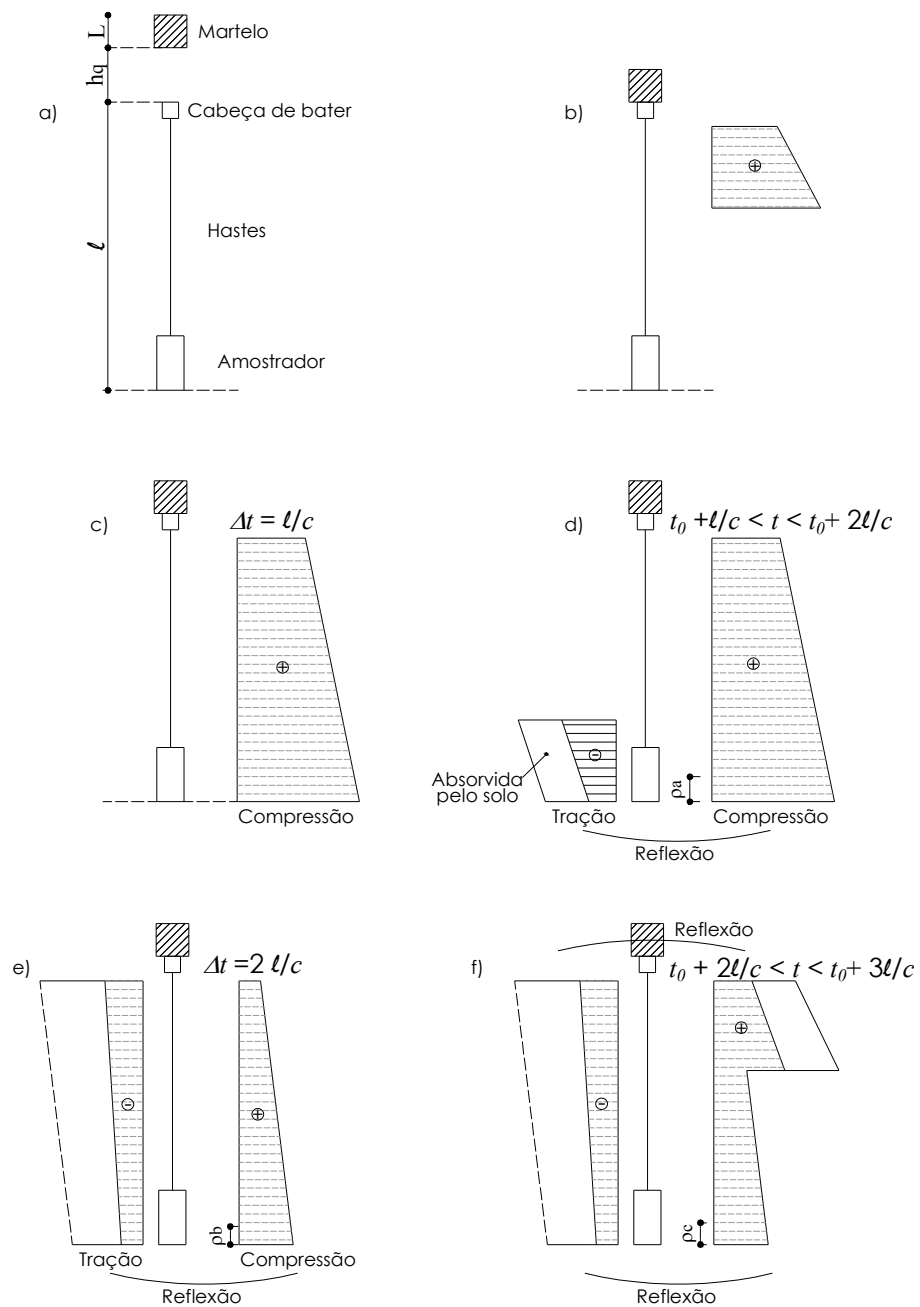
impulsos de compressão que são refletidos na forma de impulsos de tração, no sentido ascendente, em direção ao topo da composição de hastes (Figura 2.10 e);

- 4) A partir do instante  $2l/c$  (Figura 2.10 f), os impulsos de tração refletidos do amostrador chegam ao topo da composição de hastes e são refletidos transformando-se em impulsos de compressão, no sentido descendente. Ao atingirem novamente o amostrador, a partir do instante  $3l/c$ , estes novos impulsos de compressão podem ou não dar continuidade ao processo de cravação do amostrador no solo, uma vez que este fato depende da magnitude dos impulsos de tensão e da resistência oferecida pelo solo sobre o amostrador.

A separação momentânea do martelo e da cabeça de bater ocorre no instante  $2l/c$ , que corresponde ao término da primeira onda de compressão incidente. Neste instante os impulsos refletidos do amostrador atingem o topo da composição de hastes. No momento em que o martelo e a cabeça de bater entram em contato novamente novos impulsos de compressão são gerados e também se propagam através do conjunto de hastes. Esses novos impulsos continuam a transferir a energia remanescente no martelo. A partir deste instante as ondas de tensão não são mais simples, sendo compostas por uma série de impulsos ascendentes e descendentes, entre os quais se encontram aqueles refletidos na região do amostrador e na extremidade superior da composição de hastes.

Os impulsos de tensão refletidos, ascendentes e descendentes, continuam a se propagar na composição de hastes até serem consumidos no trabalho de penetração do amostrador no solo ou até a sua total dissipação em perdas. O evento do golpe do martelo se encerra quando os impulsos de tensão não apresentarem magnitude suficiente para vencer a resistência imposta pelo solo à penetração do amostrador.





**Figura 2.10** – Esquema simplificado de propagação de ondas de tensão no SPT (modificado de BELINCANTA; FERRAZ, 2000 e SCHMERTMANN; PALÁCIOS, 1979).

### 2.4.3 Aplicação do Princípio de Hamilton ao golpe do martelo no ensaio SPT

Aoki e Cintra (2000a) utilizaram o Princípio de Conservação de Energia (Princípio de Hamilton) para avaliar a evolução das quantidades das energias envolvidas no evento do golpe do martelo no ensaio SPT. O Princípio de Hamilton pode ser representado pela expressão variacional:

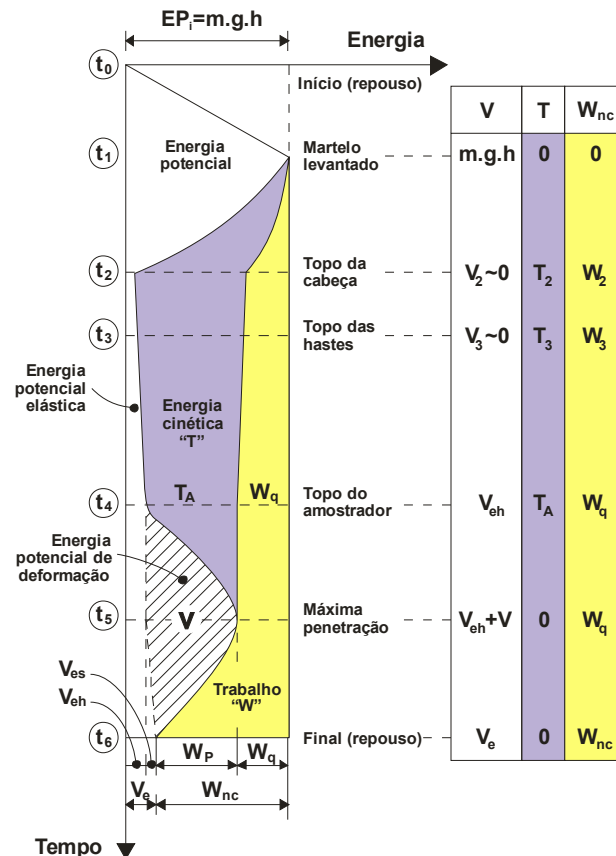
$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(T - V) dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta(W_{nc}) dt = 0 \quad (2.12)$$

onde  $T$  é a energia cinética total do sistema,  $V$  é a energia potencial do sistema,  $W_{nc}$  é o trabalho realizado por forças não conservativas. Nessa expressão,  $\delta$  representa uma variação em um intervalo de tempo qualquer ( $t_2 - t_1$ ) (CLOUGH; PENZIEN, 1975).

O Princípio de Hamilton, que se aplica a qualquer evento físico, mostra que a energia se conserva e se transforma de um tipo de energia em outro no intervalo de tempo considerado, durante um evento (CLOUGH; PENZIEN, 1975).

A transformação da energia potencial inicial do sistema ( $EP_i$ ) em energia potencial de deformação ( $V$ ), energia cinética ( $T$ ) e trabalho ( $W$ ), ao longo do evento do golpe do martelo, foi proposta por Aoki e Cintra (2000b).

O evento do golpe do martelo no ensaio SPT inicia no instante  $t_0$ , com o martelo levantado a 0.75 m da cabeça de bater, e finaliza no instante  $t_6$  quando o sistema entra em repouso novamente. A aplicação do Princípio de Hamilton ao ensaio SPT é descrita a seguir (Figura 2.11) (NEVES, 2004). As transformações de energia, esquematizadas na Figura 2.11, não consideram o acréscimo de energia potencial devido à penetração do amostrador no solo (Equação 2.3) e nem os impactos subsequentes. Assim, a interpretação correta das transformações de energia durante o ensaio SPT deve considerar esta parcela adicional de energia.



**Figura 2.11** – Evolução da energia potencial, energia cinética e trabalho durante o evento do golpe de martelo (modificado de NEVES, 2004; AOKI; CINTRA, 2000b)

- 1) No instante  $t_1$  a energia total aplicada ao sistema encontra-se na forma de energia potencial ( $EP_i$ ), que é denominada energia nominal ( $\approx 478.2$  J);
- 2) No instante  $t_2$  quando o martelo atinge a cabeça de bater a energia potencial inicial ( $EP_i$ ) se transforma em energia cinética ( $T_2$ ), energia de deformação elástica ( $V_2$ ) e trabalho realizado por forças não conservativas ( $W_2$ ). Esse trabalho se deve ao atrito na corda e na roldana do equipamento. Nesse instante, pode-se admitir que a energia de deformação elástica ( $V_2$ ) seja praticamente nula;
- 3) No intervalo de tempo ( $t_3 - t_2$ ) quando a onda de tensão percorre a cabeça de bater, as variações de trabalho de forças não conservativas, energia cinética e potencial podem ser consideradas desprezíveis;
- 4) A partir do instante  $t_3$ , a onda percorre o conjunto de hastes atingindo o topo do amostrador no instante  $t_4$ . Neste intervalo de tempo a energia cinética ( $T_3$ ) é reduzida para  $T_A$  e o trabalho realizado por forças não conservativas no sistema, que era  $W_3$  aumenta ligeiramente para  $W_q$ , em decorrência das deformações

permanentes nos encaixes entre as hastes e outras causas. Entretanto, considera-se que a variação do trabalho ( $W_q - W_3$ ) neste intervalo de tempo seja desprezível. A energia de deformação que era praticamente nula passa a ser  $V_{eh}$  devido à deformação elástica do conjunto de hastes.

No instante  $t_4$  a energia cinética  $T_A$ , que representa a parcela de energia que efetivamente atinge o amostrador SPT, corresponde ao valor de energia que Aoki e Cintra (2000a) recomendam para ser utilizado no cálculo da eficiência do ensaio SPT ( $\eta^*$ ) (Equação 2.10). O valor de  $T_A$  pode ser determinado através da instrumentação colocada em uma seção imediatamente acima do amostrador. Observa-se que quanto maior o comprimento do conjunto de hastes, menor será o valor de  $T_A$  (NEVES, 2004; CAVALCANTE, 2002).

Existem diversos fatores (tais como o comprimento e o tipo da composição de hastes, diâmetro do furo de sondagem, utilização ou não de espaçadores e luvas, e o encaixe entre hastes) que influenciam no processo de transformação da energia cinética em energia de deformação e trabalho de forças não conservativas quando a onda percorre o conjunto de hastes até atingir o amostrador.

- 5) Durante o intervalo de tempo ( $t_5 - t_4$ ) ocorre a penetração do amostrador no solo com a energia cinética ( $T_A$ ) sendo transformada em energia potencial de deformação ( $V$ );
- 6) No intervalo de tempo ( $t_6 - t_5$ ) uma pequena parcela da energia potencial de deformação ( $V$ ) se transforma em energia potencial elástica ( $V_{es}$ ), devido à deformação elástica do solo e do amostrador, e em trabalho ( $W_p$ ) realizado pelas forças resistentes não conservativas geradas durante a penetração do amostrador no solo;
- 7) No instante  $t_6$  toda a energia potencial elástica ( $V_e$ ) acumulada no conjunto de hastes ( $V_{eh}$ ) e no solo que envolve o amostrador ( $V_{es}$ ) é restituída. Desta forma, o sistema entra em repouso encerrando o evento. Neste instante  $W_{nc}$  representa o trabalho total efetuado por forças não conservativas e  $W_p$  representa a parcela do trabalho final, gerado pelas forças resistentes não conservativas, mobilizadas ao longo do amostrador durante a penetração. Em função do que foi anteriormente mencionado, as seguintes equações podem ser escritas (Figura 2.11):

$$V_e = V_{es} + V_{eh} \quad (2.13)$$

$$EP_i = V_e + W_{nc} \quad (2.14)$$

$$T_A = V = V_{es} + W_p \quad (2.15)$$

De acordo com o Princípio de Hamilton aplicado ao ensaio SPT no intervalo de tempo total do evento ( $t_6 - t_1$ ), a energia potencial disponível no sistema é transformada em trabalho efetuado por forças não conservativas e em energia potencial elástica (Equação 2.14). Desta forma, Aoki e Cintra (2000a) sugerem que a eficiência do ensaio SPT também pode ser determinada através do trabalho realizado para a penetração do amostrador no solo (Equação 2.16).

$$\eta_s = \frac{W_p}{EP_i} \quad (2.16)$$

onde  $\eta_s$  é a eficiência calculada através do trabalho realizado para a penetração do amostrador no solo.

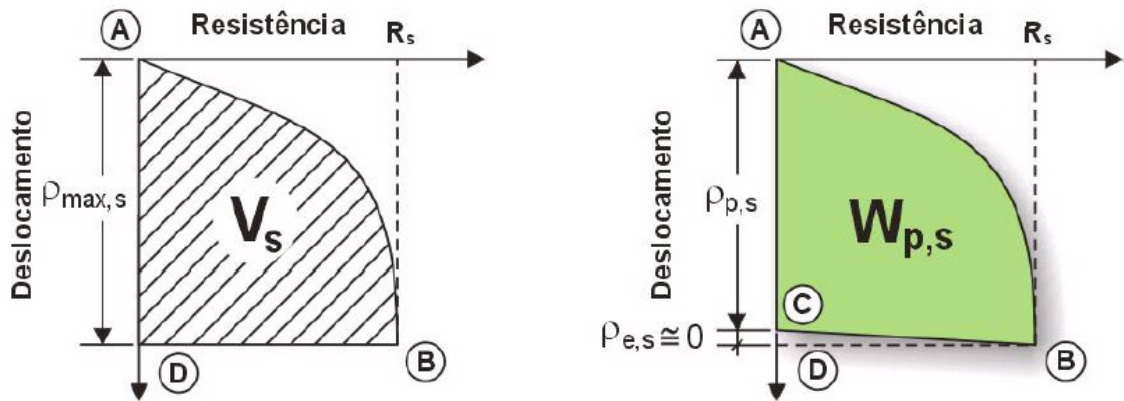
#### 2.4.3.1 Transferência de energia em ensaios dinâmicos e estáticos

A forma de aplicação de uma carga ( $Q$ ) é considerada estática quando se leva um tempo infinito para se atingir o valor  $Q$  através de incrementos infinitesimais de carga ( $dQ$ ) (AOKI; 1997). No entanto, na prática este tipo de carregamento não existe uma vez que é impossível a aplicação de uma carga em um tempo infinito.

Esta mesma carga ( $Q$ ) aplicada em um intervalo de tempo definido é considerada dinâmica. Na prática todos os carregamentos são dinâmicos, havendo alteração na velocidade de aplicação da carga. Um carregamento é considerado instantâneo quando a carga é atingida através de um único estágio de carregamento, sendo que neste caso o tempo de aplicação da carga ( $t$ ) é igual a zero (AOKI; 1997).

Neves (2004), demonstrou em seus trabalhos de pesquisa que para ensaios de provas de carga estática e dinâmica realizados em areias e siltes, a parcela de energia potencial elástica ( $V_{es}$ ) é desprezível (Figura 2.12 e Figura 2.13). Assim, para esses casos a eficiência do ensaio SPT pode ser obtida através do trabalho realizado para a penetração do amostrador

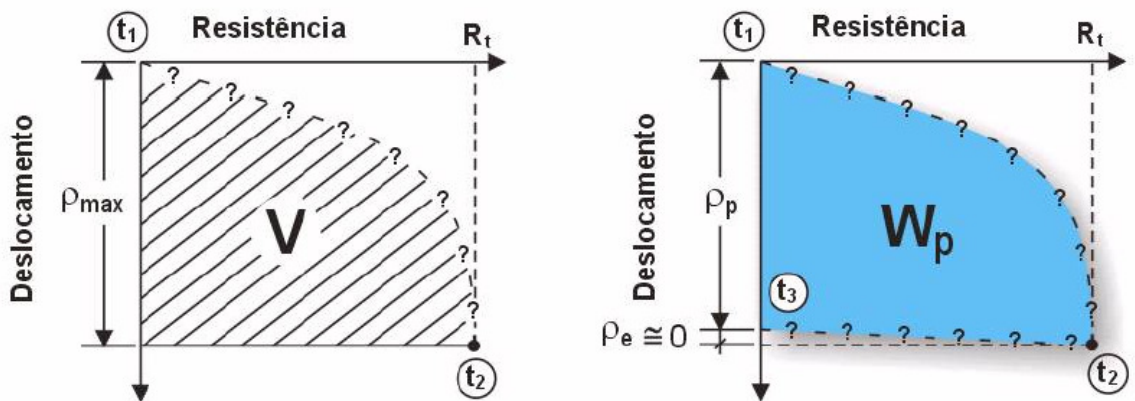
SPT (Equação 2.16). Esse trabalho é representado pela a área sob a curva carga-recalque, obtida através de ensaios de prova de cargas.



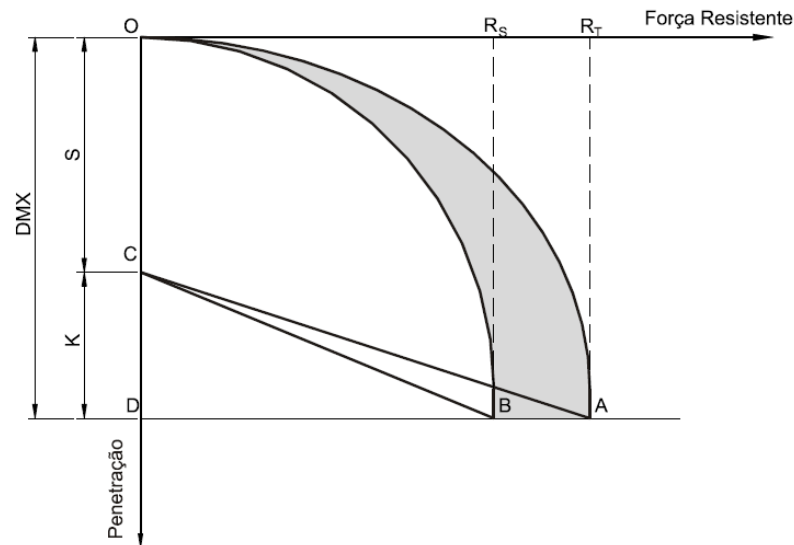
**Figura 2.12** – Resultado típico de um ensaio de prova de carga estática realizada sobre o amostrador SPT para areias e siltes arenosos (NEVES; 2004 modificado de AOKI; CINTRA, 2000a)

Aoki et al. (2004) mostraram experimentalmente que quando ocorre a penetração máxima do amostrador, a diferença das áreas sob as curvas de carga correspondentes aos ensaios dinâmicos (AO) e estático (OB) é muito pequena (Figura 2.14). Portanto, a força resistente à penetração no ensaio dinâmico ( $R_p$ ) é aproximadamente igual àquela no ensaio estático ( $R_s$ ).

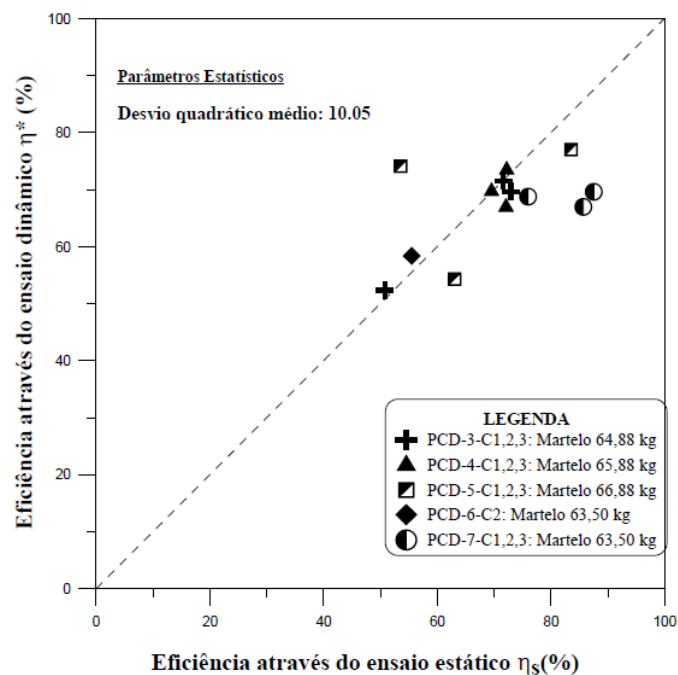
Desta forma, pode-se observar que a realização da prova de carga estática sobre o amostrador SPT pode representar com uma boa aproximação as condições do ensaio dinâmico e conseqüentemente permitir o cálculo da eficiência do ensaio ( $\eta_s$ ) através do trabalho realizado para a penetração do amostrador no solo. Trabalhos experimentais (NEVES; 2004, NOREÑA; 2011) têm mostrado a validade deste procedimento (Figura 2.15).



**Figura 2.13** – Resultado típico de um ensaio dinâmico realizado sobre o amostrador SPT para areias e siltes arenosos (NEVES; 2004 modificado de AOKI; CINTRA, 2000a)



**Figura 2.14** – Curvas de carga referente aos ensaios dinâmico e estático (AOKI et al., 2004)



**Figura 2.15** – Comparação entre os valores de eficiência determinados através de ensaios estático e dinâmico (NOREÑA; 2011)

## 2.5 Determinação da energia no ensaio SPT

A energia no ensaio SPT pode ser determinada com base na Teoria da Equação da Onda que é apresentada no Capítulo 3. De acordo com essa teoria, a energia contida em um pulso de compressão é formada por uma parcela correspondente à deformação (compressão do material) e outra parcela cinética (devido ao movimento das

partículas) (CAVALCANTE, 2002). A energia no ensaio SPT tem sido determinada pelos métodos *EFV* e *EF2*, representados pelas equações a seguir:

$$EFV = \int_0^{t=\infty} F(t) \cdot v(t) dt \quad (2.17)$$

$$EF2 = \frac{c}{E \times a} \int_0^{t=2\ell/c} F^2(t) dt \quad (2.18)$$

onde  $F(t)$  e  $v(t)$  representam a força e a velocidade das partículas, respectivamente, na seção instrumentada,  $E$  é o módulo de elasticidade do aço,  $a$  é a área a seção transversal instrumentada e  $c$  é a velocidade teórica de propagação da onda ao longo da composição de hastes.

O intervalo de tempo ( $\Delta t$ ), que define o intervalo de integração, depende do método utilizado para o cálculo da energia. O método *EF2* só é válido quando não ocorrem reflexões da onda de tensão, sendo portanto, o seu uso limitado até o instante  $2\ell/c$ , onde  $\ell$  é a distância da seção instrumentada até a extremidade do amostrador. A integração para o método *EFV* é realizada até o instante que corresponde ao máximo valor de energia, ou seja, durante todo o tempo de duração do evento.

A velocidade de propagação da onda na composição de hastes ( $c$ ) pode ser determinada a partir das características do material da haste (Equação 2.19).

$$c = \left( \frac{E}{\rho_a} \right)^{0.5} \quad (2.19)$$

onde  $E$  é o módulo de elasticidade e  $\rho_a$  é a massa específica do aço. Admitindo  $E = 206840$  MPa e  $\rho_a = 7880$  kg/m<sup>3</sup>, obtém-se  $c = 5123$  m/s.

### 2.5.1 Método EF2

A estimativa da energia transferida ao solo através do método *EF2* é feita através da integração dos sinais de força medidos através de uma célula de carga instalada na seção instrumentada. Essa energia é obtida integrando-se os sinais de força no intervalo de tempo entre zero e  $2\ell/c$ . A norma americana D4633-86 (ASTM, 1986) recomenda a utilização de alguns fatores na Equação 2.18 a fim de corrigir a energia calculada (Equação 2.20).



$$EF2 = \frac{c.K_1.K_2.K_c}{a.E} \int_0^{2\ell/c} F(t)^2 .dt \quad (2.20)$$

onde  $K_1$  é o fator de correção da energia não contabilizada pela célula de carga, no intervalo de tempo que a onda atinge o topo da composição de hastes até o instante que essa atinge o ponto onde a instrumentação está posicionada,  $K_2$  é um fator de correção teórico da energia utilizado para corrigir a interrupção de transferência da energia que ocorre em comprimentos de composição de haste menores do que 14 metros e  $K_c$  é um fator de correção da velocidade teórica de propagação da onda em relação à velocidade real de propagação da onda. O fator  $K_c$  foi introduzido baseado nas constatações de que a velocidade real é menor do que a velocidade teórica (SCHMERTMANN E PALÁCIOS, 1979).

Esse método foi utilizado em trabalhos pioneiros de determinação da energia no ensaio SPT (BELINCANTA, 1998; SCHMERTMANN; PALÁCIOS, 1979; SEED et al., 1985; SKEMPTON, 1986) devido à dificuldade de se medir a velocidade. Dessa forma, através dos diversos trabalhos experimentais desenvolvidos utilizando-se o método *EF2* foi constatado que a utilização dos fatores de correção da energia, apresentados na Equação 2.20, não apresentava resultados eficazes (ASTM; 2005 e 2010).

Trabalhos de pesquisa (SY; CAMPANELLA, 1991) mostraram que as hipóteses adotadas pelo método *EF2* não são válidas e que este método possui limitações teóricas. Esses trabalhos também destacam que mudanças na seção transversal das hastes devido à presença de luvas causam reflexões que invalidam a utilização do método. Por isso recomendam que a energia seja determinada através de medidas de força e velocidade (método *EFV*).

### 2.5.2 Método *EFV*

Este método para a determinação da quantidade de energia no ensaio SPT foi introduzido por Sy e Campanella (1991) no início da década de 90. Seu emprego tem sido consolidado através de diversas pesquisas (CAVALCANTE, 2002; ODEBRECHT, 2003; HOWIE et al., 2003; DANIEL et al., 2005; AOKI et al., 2007; LUKIANTCHUKI et al., 2011). O método *EFV* é recomendado pela norma D4633-10 (ASTM, 2010) como procedimento padrão a ser

adotado uma vez que possibilita a determinação da energia total envolvida no evento do golpe do martelo no ensaio SPT.

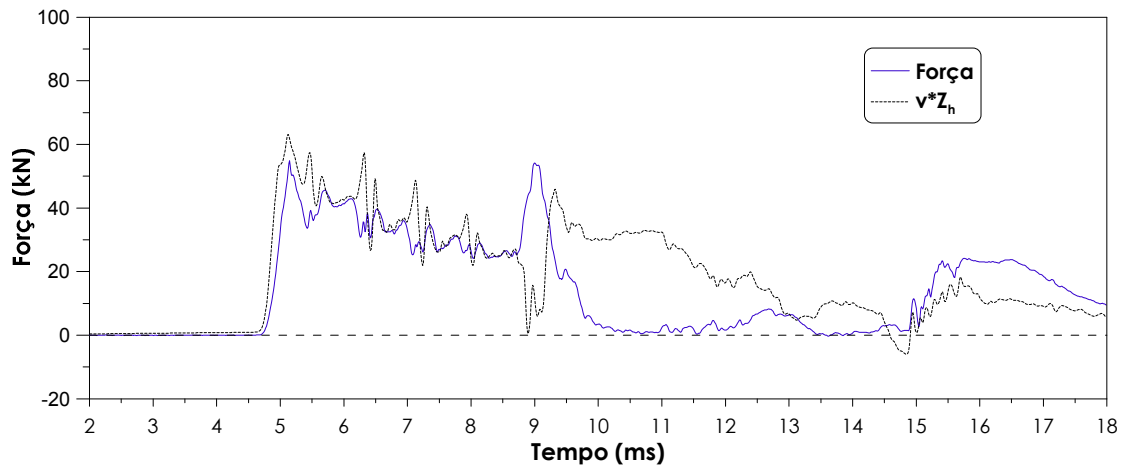
Para a determinação da energia através deste método, é necessário o emprego de uma instrumentação adicional para medir a velocidade das partículas durante a propagação da onda de tensão. Esta instrumentação consiste em um par de acelerômetros que devem ser posicionados próximo aos extensômetros (LOBO, 2009).

Os sinais de aceleração registrados são integrados no domínio do tempo, obtendo-se os sinais de velocidade correspondentes. A energia entregue ao solo é obtida através da integração do produto da força pela velocidade (Equação 2.17). Neste método o intervalo de tempo da integração deve ser suficientemente longo, para que toda a energia disponível no sistema seja transferida ou dissipada. Isto implica que os sinais de força e velocidade devem ser nulos ao final do evento. Desta forma, o intervalo de tempo sendo superior a  $2l/c$ , é possível considerar a influência de todos os impactos subsequentes que contribuem na penetração do amostrador SPT (LOBO, 2009).

Daniel (2008) destaca que o emprego do método *EFV* tem sido prejudicado pela ausência de registros de velocidade confiáveis durante o impacto aço-aço no ensaio SPT. Foram observados registros de aceleração entre 5000 e 15000 g em ensaios realizados de acordo com a prática Norte Americana. Verifica-se que a maioria dos acelerômetros comerciais não possui esta faixa de trabalho, sendo assim incompatíveis com o evento do ensaio SPT.

Observa-se então que a maior dificuldade do método *EFV* é a obtenção de registros confiáveis, sendo fundamental o controle da qualidade dos sinais registrados. Este controle pode ser realizado através da comparação entre os sinais de força medidos através dos extensômetros e os sinais de velocidade multiplicados pela impedância da célula de carga ( $Z$ ) (Equação 2.21). Durante a propagação da primeira onda de compressão os sinais de velocidade multiplicados pela impedância da célula de carga devem ser muito próximos aos sinais de força medidos nos extensômetros (Figura 2.16). Após a reflexão da primeira onda de tração ( $t > 2l/c$ ) essa proximidade deixa de existir (HOWIE et al., 2003).

$$Z = \frac{E \times a}{c} \quad (2.21)$$



**Figura 2.16** – Comparação entre os valores de força ( $F$ ) e velocidade multiplicada pela impedância ( $v \times Z$ ).

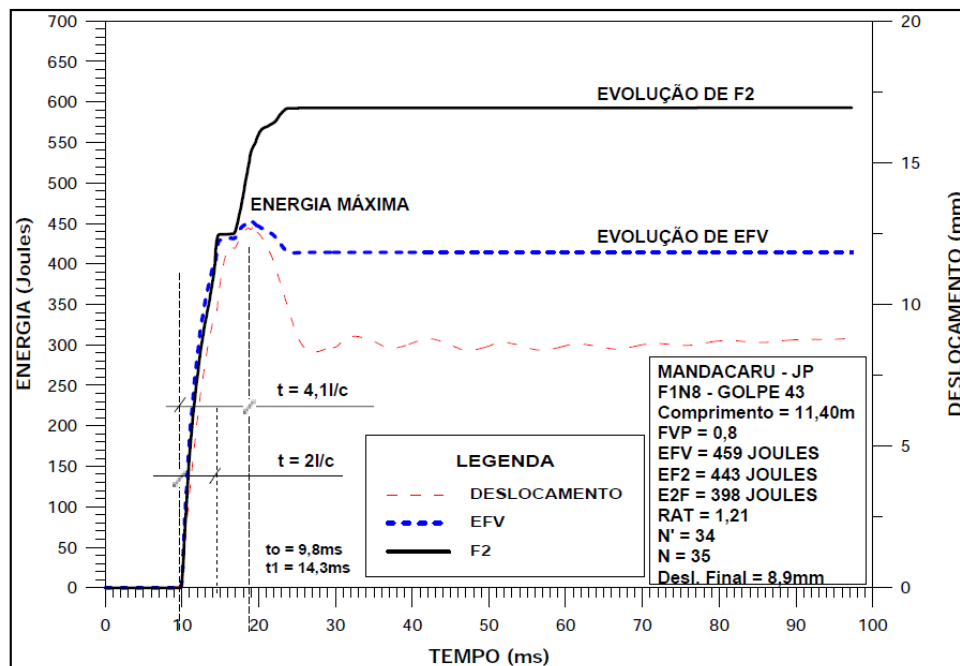
### 2.5.3 Comparação entre os métodos EF2 e EFV

Morgano e Liang (1992) constataram que a energia computada através do método EF2 aumenta com o comprimento da composição de hastes, atingindo valores máximos para comprimentos entre 12 e 15 metros. Segundo os autores, esse comportamento está associado à energia adicional transferida após o intervalo de tempo  $2 \ell/c$ .

Cavalcante (2002) observou que para comprimentos de composição hastes maiores do que 10 metros, a transferência da energia total ocorre praticamente no primeiro impacto. Nestes casos, existe pouca diferença entre os métodos EFV e EF2. No entanto, para o caso de solos resistentes, a reflexão é de compressão e a força não se anula no instante  $t = 2 \ell/c$ . Assim, a energia determinada pelo método EF2 cresce significativamente, atingindo valores muito acima dos valores reais. Em alguns casos o valor da energia apresenta-se muito maior que o valor da energia nominal do ensaio SPT. (Figura 2.17).

No caso de hastes curtas observa-se que os valores de energia obtidos através do método EFV são superiores aos valores do método EF2 (DAVIDSON et al., 1999 apud HOWIE et al., 2003). A diferença dos valores pode ser causada pelos fatores  $K_1$  e  $K_2$  sendo que na opinião deste autor o uso do fator  $K_c$  é desnecessário. Sy (1993) apud Howie et al. (2003) também conclui que não existe nenhuma base racional para a utilização do fator  $K_c$ . Esse autor recomenda que a integração deve ser realizada até o instante da chegada da onda de reflexão proveniente do amostrador. Esta forma de determinação da energia deve ser realizada sem a utilização de fatores de correção, pois representa a energia que está sendo

entregue ao conjunto de hastes e não a energia que é responsável pela cravação do amostrador no solo.



**Figura 2.17** – Comparação entre os valores de energia computados pelos métodos EF2 e EFV (CAVALCANTE, 2002)

A energia determinada através do método *EF2* não representa a energia que é efetivamente transferida ao conjunto de hastes. No caso de hastes longas e sem alterações significativas na área da seção transversal, a utilização do método *EF2* pode ser precisa na determinação da energia transferida do martelo para o conjunto de hastes. Entretanto, para as demais situações, sem medir simultaneamente valores de força e velocidade, os valores obtidos podem conduzir a erros significativos (HOWIE et al., 2003).

As medidas de energia baseadas na integração do produto de força pela velocidade, no intervalo de tempo desde o instante inicial até o instante que corresponde ao fim do evento, representam toda a energia transferida para o conjunto de hastes. Ensaio de campo têm indicado que ocorre um aumento da energia transferida com o aumento do comprimento do conjunto de hastes, embora a magnitude deste acréscimo ainda não esteja completamente definida (HOWIE et al., 2003).

## 2.6 Instrumentação utilizada para determinação da energia no ensaio SPT

A instrumentação utilizada para medidas de energia, utilizando o método *EFV*, durante o golpe do martelo no ensaio SPT é formada por uma célula de carga composta por

extensômetros (*strain-gauges*) e um par de acelerômetros instalados em um segmento de haste que pode ser posicionado em qualquer seção da composição de hastes. Segundo Belincanta (1998), a instrumentação pode ser posicionada em uma seção logo abaixo da cabeça de bater (topo da composição de hastes) ou pode ser posicionada simultaneamente no topo da composição de hastes e logo acima do amostrador.

### 2.6.1 Acelerômetros

A qualidade dos resultados obtidos através do uso do método *EFV* depende fundamentalmente da precisão dos valores de velocidade da partícula durante a transmissão da energia. A velocidade da partícula é determinada através da integração dos sinais de aceleração. Os valores de aceleração são registrados através de acelerômetros, que podem ser dos tipos piezoelétrico e piezoresistivo.

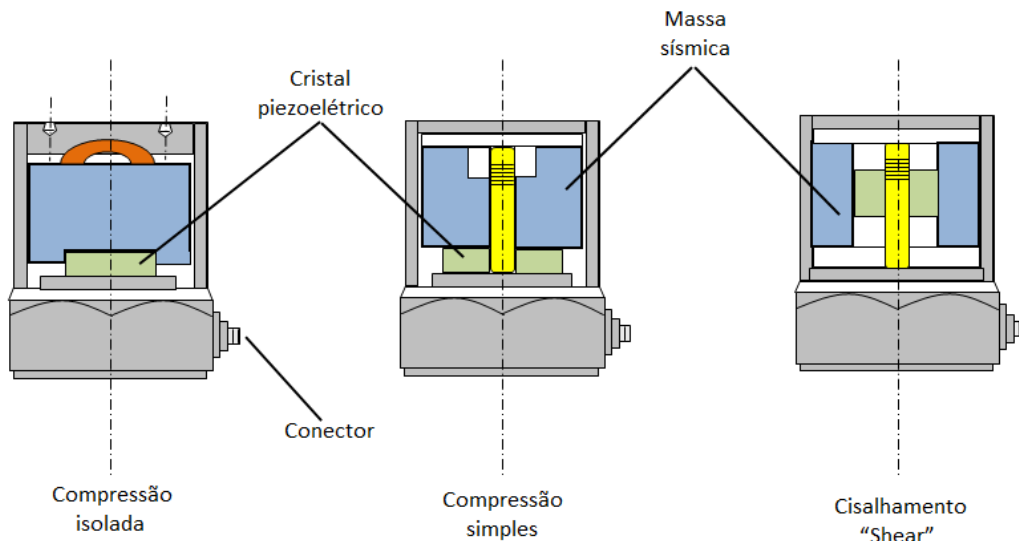
Os acelerômetros piezoresistivos possuem uma massa inercial que quando submetida a acelerações causa alterações nas tensões da estrutura interna do sensor, que é formada por extensômetros. Variações nas tensões mecânicas na estrutura, que são proporcionais às acelerações, causam alterações nas resistências elétricas dos extensômetros. Os acelerômetros piezoresistivos são aplicados em medidas de vibração de baixas frequências, choques mecânicos e medidas transientes de longa duração. Possuem alta sensibilidade (sinal de saída não precisa de amplificação) e baixo amortecimento (fase zero em baixas frequências) (MAGALHÃES, 2012)

Os acelerômetros piezoelétricos possuem uma massa inercial que quando submetida a acelerações ocasiona a compressão ou cisalhamento de um cristal piezoelétrico (Figura 2.18). A diferença de potencial gerada pelo cristal piezoelétrico é proporcional à aceleração (MAGALHÃES, 2012). Estes sensores são utilizados para medidas de vibração de média a altas frequências e medidas de elevados valores de aceleração. Podem operar sob elevadas temperaturas, mas possuem baixa sensibilidade (sinal de saída necessita de amplificação) (MAGALHÃES 2012).

A escolha de um determinado tipo de acelerômetro deve ser realizada com base em algumas características fundamentais:

- 1) A frequência de utilização deve ser inferior à frequência natural do acelerômetro.

- 2) A faixa de acelerações medidas nunca deve exceder a faixa de calibração estipulada para o dispositivo.



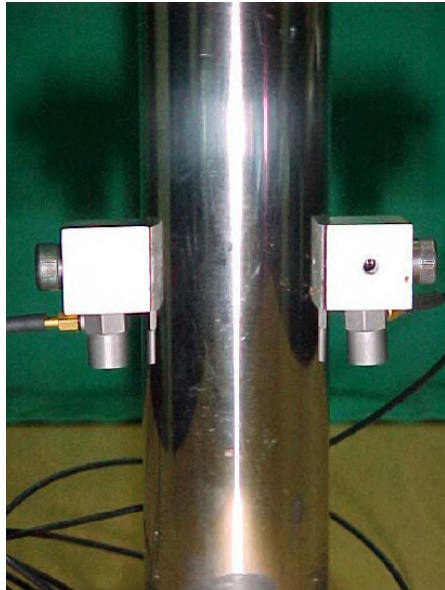
**Figura 2.18** – Modelos de acelerômetros piezoelétricos (VAROTO, 2009)

Diversos tipos de acelerômetros têm sido utilizados para a determinação da velocidade da partícula durante a propagação da onda de tensão (Tabela 2.2). Equipamentos anteriores ao *SPT Analyzer* utilizavam acelerômetros com capacidade de 5000 g. Entretanto, atualmente este sistema utiliza sensores com capacidade de 20000 g, isto porque pesquisas realizadas em ensaios SPT, segundo os padrões norte-americanos, registraram valores de aceleração superiores a 15000 g (HOWIE et al., 2003; DANIEL, 2008). No Brasil, Cavalcante (2002) e Odebrecht (2003) utilizaram sensores com capacidade máxima de 5000 g. Nenhum desses autores relatou problemas relacionados com elevados valores de aceleração.

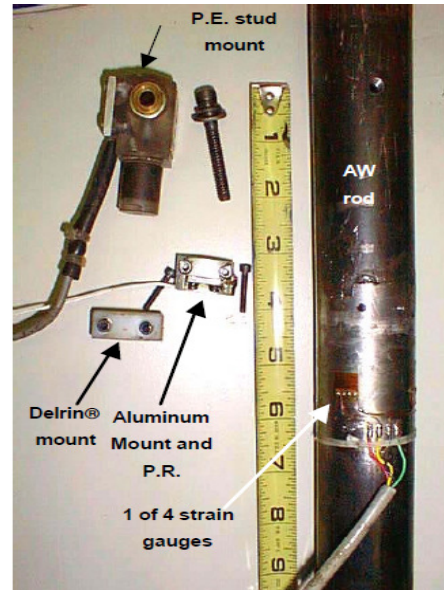
Howie et al., (2003) recomendam que os acelerômetros devem ser rigidamente montados através de suportes de alumínio, afim de representar com fidelidade a velocidade das partículas durante a propagação de onda. Qualquer flexibilidade poderá resultar em um movimento relativo entre o acelerômetro e a haste. Ensaio experimentais comparando os valores de energia para suportes rígidos e flexíveis mostraram diferenças percentuais em torno de 7%. Em alguns casos o suporte rígido apresentou energia superior ao suporte flexível e em outros casos a energia foi maior para o suporte flexível (HOWIE et al., 2003). A Figura 2.19 apresenta alguns exemplos de suporte utilizados para a fixação dos acelerômetros.

**Tabela 2.2-** Tipos de acelerômetros utilizados para medidas de aceleração em ensaios SPT

Instrumentação	Sensor	Tipo	Características	
			Aceleração (g)	Frequência (Hz)
SPT Analyzer	Não informado	Piezoresistivo	20000	4500
Odebrecht, 2003	4375S (B&K)	Piezoelétrico	5000	16500
Howie et al., (2003) – UBC	7270A (Endevco)	Piezoresistivo	20000	20000



(a) Odebrecht (2003)



(b) Howie et al. (2003)

**Figura 2.19** – Suporte para fixação dos acelerômetros no ensaio SPT

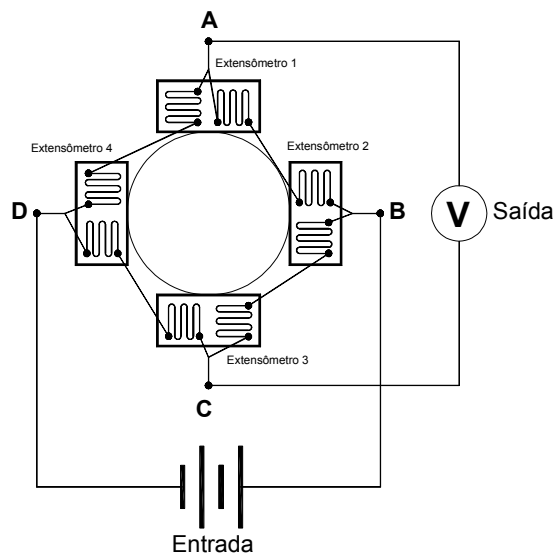
### 2.6.2 Medidas de força

Usualmente, os sinais de força são registrados utilizando-se um segmento de haste instrumentado com extensômetros (*strain-gauges*), formando uma célula de carga (BELINCANTA, 1998; CAVALCANTE, 2002; ODEBRECHT, 2003; HOWIE et al., 2003). Uma das limitações que pode ocorrer com esses sensores estáticos é sua capacidade de reproduzir adequadamente os carregamentos dinâmicos aos quais são submetidos. Adicionalmente, a ocorrência de possíveis flexões laterais também pode ser outra limitação desses sensores.

A célula de carga é constituída de strain gauges formando uma ponte de Wheastone completa. Com a finalidade de minimizar os efeitos de temperatura e flexão, os extensômetros devem ser instalados simetricamente em relação ao eixo da haste (ASTM, 2010). Odebrecht (2003) utilizou quatro extensômetros duplos (Figura 2.20) com a finalidade

de minimizar o efeito da excentricidade, que no caso do ensaio SPT pode ser considerada elevada.

A calibração das células de carga deve ser realizada com até pelo menos 70% da força máxima prevista nos ensaios SPT. A norma americana D4633-10 (ASTM, 2010) recomenda que a calibração seja realizada com medidas de força e deformação simultaneamente. Através desses valores é possível calcular a área da seção transversal efetiva ( $A_c$ ) (Equação 2.22). Caso a diferença entre as áreas calculada e medida seja superior a 5% recomenda-se que a célula de carga seja recalibrada ou que a área da seção transversal seja medida novamente. Se a diferença persistir deve-se adotar como padrão a área calculada (ASTM, 2010).



**Figura 2.20** – Ponte de Wheatstone com strain gauges duplos (ODEBRECHT, 2003)

$$A_c = \frac{F_a}{E \times \varepsilon} \quad (2.22)$$

onde  $F_a$  é a força aplicada,  $E$  é o módulo de elasticidade do aço,  $\varepsilon$  é a deformação medida quando se aplica a força.

### 2.6.3 Sistema de aquisição de dados

Os sistemas de aquisição de dados são responsáveis pelo registro, processamento e visualização dos sinais de força e velocidade. Além dos condicionadores que servem para



amplificar os sinais, esses sistemas devem possuir filtros *anti-aliasing*, sistema de *trigger* e circuito de verificação da calibração.

*Aliasing* é um fenômeno que ocorre quando a frequência dos sinais capturados apresenta componentes maiores do que a frequência de leitura do sistema de aquisição de dados (HOWIE, et al., 2003). Adicionalmente, deve-se utilizar um filtro passa-baixa (*low pass*), para permitir a passagem de baixos valores de frequência e reduzir a amplitude das frequências mais elevadas que a frequência de corte. Os filtros devem ser selecionados cuidadosamente evitando-se a perda de sinais importantes do evento.

O *trigger* é um sistema que faz com que o registro de sinais seja iniciado no mesmo instante que o evento tem início, garantindo desta forma que todos os sinais importantes sejam completamente registrados. No caso do ensaio SPT, esse sistema é de fundamental importância uma vez que o evento completo tem uma duração entre 30 a 80 milissegundos. Adicionalmente, alguns sistemas de aquisição de dado também possuem um sistema de *pré-trigger* que permite o registro de uma certa quantidade de sinais antes do início do impacto.

Os sistemas de aquisição de dados podem ser analógicos ou digitais. No caso dos sistemas analógicos, a norma americana D4633-10 (ASTM, 2010) recomenda que seja utilizado um filtro passa-baixa de pelo menos 2 kHz. A taxa de aquisição de dados deve ser de pelo menos cinco vezes o valor da frequência de corte evitando assim o fenômeno do *aliasing*. Para os sistemas digitais a frequência de corte do filtro passa-baixa deve ser de pelo menos 5 kHz, com uma taxa de aquisição de dez vezes o valor desta frequência.

Durante a fase de processamento dos dados, a *baseline* dos sinais deve ser corrigida. Essa técnica consiste em fazer com que os sinais correspondentes a uma situação de repouso assumam um determinado valor, que normalmente é adotado como sendo igual a zero (HOWIE et al., 2003). A correção do sinal pode ser realizada com base na hipótese de que a velocidade no final do evento seja igual a zero (condição de repouso).

A Figura 2.21 mostra esquematicamente o sistema de aquisição de dados utilizado no trabalho pioneiro de Belincanta (1998), para medidas de energia através do método *EF2*. A Figura 2.22 apresenta o sistema desenvolvido por Odebrecht (2003) para medidas de energia através do método *EFV*, para o ensaio SPT brasileiro.

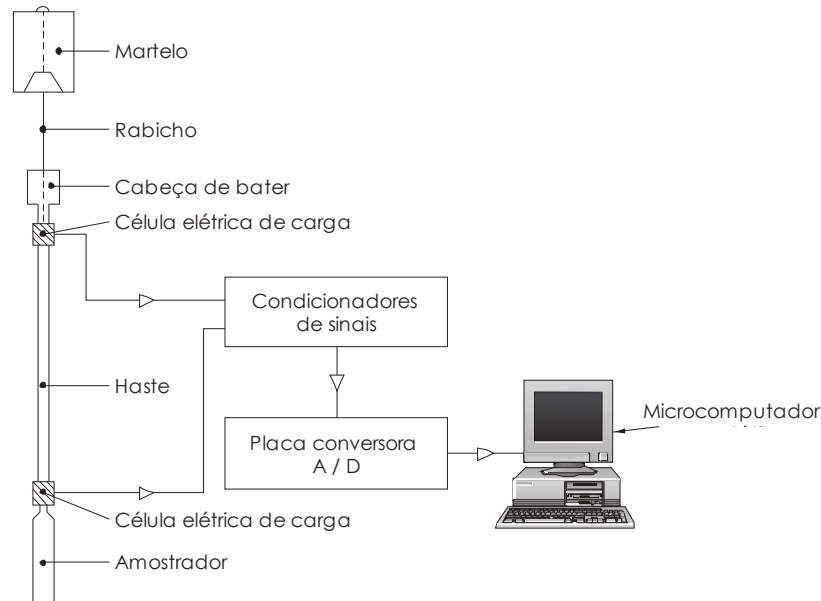


Figura 2.21 – Sistema de aquisição de dados portátil do tipo IPT (BELINCANTA, 1998)

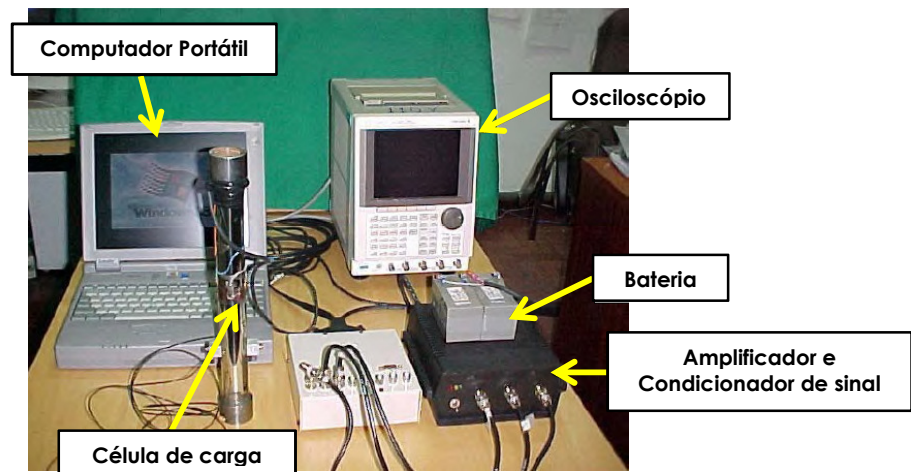


Figura 2.22 – Sistema de medida de energia desenvolvido por Odebrecht (2003)

## 2.7 Mecanismo de interação solo-amostrador

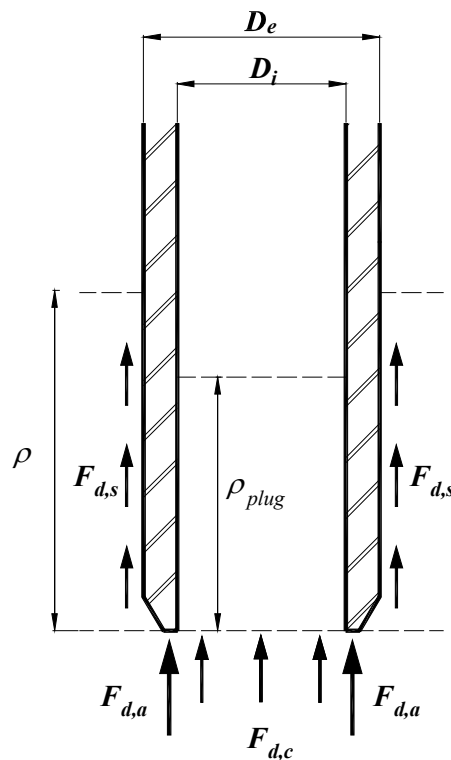
### 2.7.1 Modelo desenvolvido por Lobo (2009)

O mecanismo de interação solo-amostrador, para solos granulares, durante a propagação da onda de tensão no ensaio SPT foi estudado por Lobo (2009). Este modelo foi desenvolvido com base no modelo de Smith (1960) e na teoria de expansão de cavidades (VESIC, 1972). Segundo esse autor, o mecanismo de reação dinâmica do solo ( $F_d$ ) (Equação 2.23) pode ser representado pelo somatório entre a força de reação do anel ( $F_{d,a}$ ), a força de reação do núcleo ( $F_{d,c}$ ) e a força de atrito lateral do amostrador ( $F_{d,s}$ ).

$$F_d = F_{d,a} + F_{d,c} + F_{d,s} \quad (2.23)$$

Neste modelo de interação solo-amostrador (Figura 2.23) temos que:

- reação de ponta ( $F_{d,a}$ ): representa a reação do contato entre a seção transversal do amostrador e o solo;
- reação cisalhante ( $F_{d,s}$ ): é a reação proveniente do atrito entre o solo e a face lateral externa do amostrador; e
- reação do núcleo ( $F_{d,c}$ ): é a reação que se desenvolve na parte central do amostrador e que depende dos diferentes mecanismos de penetração do amostrador no solo. Esses mecanismos de penetração ocorrem sob duas condições distintas: ponta aberta ou embuchado



**Figura 2.23** – Mecanismo de reação do sistema solo-amostrador (LOBO, 2008)

O modelo desenvolvido por Smith (1960) considera que os mecanismos de reação do solo, considerando a interação solo-estaca, podem ser representados por um modelo elasto-visco-plástico. Durante a cravação de um elemento, a reação do solo ( $F_d$ ) pode ser

representada pela soma da sua resistência estática ( $R_s$ ) com a resistência dinâmica ( $R_v$ ) (SMITH, 1960) (Equação 2.24).

$$F_d = R_s + R_v \quad (2.24)$$

A parcela estática se caracteriza pelo comportamento elasto-plástico do solo, sendo que o solo sofre deformações elásticas até atingir a sua carga de ruptura ( $R_s$ ). Nesse instante o deslocamento do amostrador é denominado *quake* ( $Q$ ). À medida que se aumenta o nível de carregamento, o solo sofre deformações plásticas. O comportamento do solo pode ser caracterizado pela declividade da reta que representa a rigidez do sistema estaca-solo ( $K'$ ) (Equação 2.25).

$$R_s = K' \times Q \quad (2.25)$$

A parcela dinâmica é formada por uma componente viscosa e outra inercial podendo ser representada por:

$$R_v = R_s \times J \times v_p \quad (2.26)$$

onde  $J$  é o coeficiente denominado de *Damping de Smith* e  $v_p$  é a velocidade de penetração do amostrador no solo.

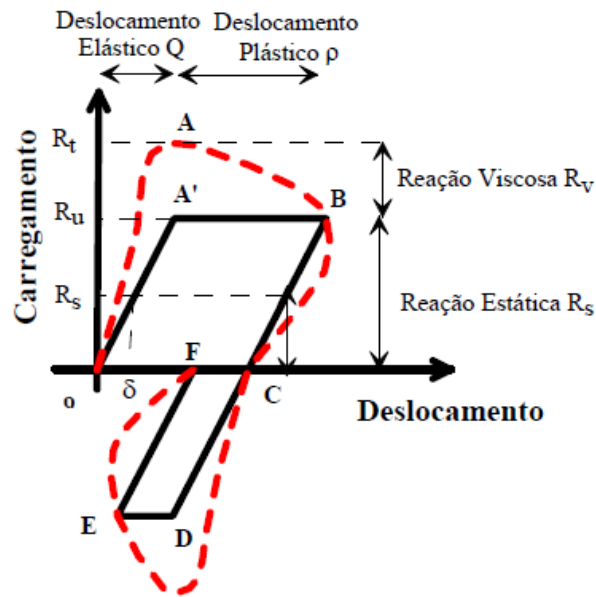
Inserindo as Equações 2.26 e 2.25 na Equação 2.24 resulta:

$$F_d = K' \times Q \times (1 + J \times v_p) \quad u > Q \quad (2.27)$$

$$F_d = K' \times u \times (1 + J \times v_p) \quad u < Q \quad (2.28)$$

onde  $u$  representa o deslocamento.

As Equações 2.27 e 2.28 representam a força de reação dinâmica mobilizada durante a cravação dinâmica de elementos no solo. O diagrama OABC (Figura 2.24) representa o modelo de carregamento e descarregamento dos mecanismos de reação do anel e de núcleo enquanto que o diagrama OABCDEF (Figura 2.24) representa o mecanismo de reação cisalhante (atrito lateral externo).



**Figura 2.24** – Mecanismo de reação do solo (NOREÑA; 2011 modificado de SMITH; 1960)

Lobo (2009) adaptou o modelo de Smith (1960), frequentemente utilizado na análise de cravabilidade de estacas, para uma abordagem adimensional. Esta abordagem modifica os parâmetros de entrada ( $F_u$ ,  $Q$  e  $J$ ) do modelo original. Neste caso os parâmetros passam a ser estimados a partir de expressões teóricas. Assim, atribui-se um caráter físico para cada parâmetro permitindo o conhecimento dos fatores determinantes no processo de penetração do amostrador no solo e conseqüentemente diminuem-se as incertezas do processo.

Adicionalmente, nesta abordagem Lobo (2009) leva em consideração a contribuição das parcelas de reação normal e cisalhante na interface solo-amostrador. Estas parcelas são modeladas e estimadas para cada estágio de penetração do amostrador. O mecanismo de penetração (ponta aberta ou parcialmente embuchado) varia em função da compactidade do solo.

### 2.7.2 Força dinâmica mobilizada durante a cravação do amostrador SPT (SCHNAID et al., 2009a)

Schnaid et al., (2009a) propuseram um método para a determinação da força dinâmica ( $F_d$ ) mobilizada durante a cravação do amostrador SPT. Os autores utilizaram como base o princípio de conservação de energia (Princípio de Hamilton) aplicado ao ensaio SPT (AOKI; CINTRA, 2000a) (Equação 2.12).

Na Equação 2.12, definindo  $t_1$  como o instante de liberação do martelo em queda livre e  $t_2$  o instante final da cravação do amostrador SPT. Considerando que neste intervalo de tempo a energia cinética já foi completamente dissipada e que todas as perdas já ocorreram, a Equação 2.12 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta V(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} \delta [W_s(t) + W_{nc}(t)] dt \quad (2.29)$$

onde  $V$  é a energia potencial do sistema,  $W_s$  é o trabalho realizado por forças atuando no sistema solo-amostrador e  $W_{nc}$  é o trabalho realizado por forças não conservativas relacionadas com outras perdas de energia

A variação da energia potencial do sistema martelo-composição de hastes é igual ao trabalho realizado por forças não conservativas (Equação 2.30). No evento do ensaio SPT, é a parcela de energia que atinge o amostrador que é responsável pela sua cravação no solo.

$$E_{amostrador} = W_s + W_{nc} \quad (2.30)$$

Assim a força dinâmica de reação do solo ( $F_d$ ) pode ser determinada com base nesta quantidade de energia (Equação 2.31 e 2.32).

$$E_{amostrador} = W_s = F_d \times \Delta\rho \quad (2.31)$$

$$F_d = \frac{E_{amostrador}}{\Delta\rho} \quad (2.32)$$

Utilizando a proposta de Odebrecht (2003) para a determinação da energia efetivamente entregue ao solo (Equação 2.11), a força dinâmica de reação do solo ( $F_d$ ) pode ser facilmente determinada utilizando apenas os valores de massa do martelo ( $M_m$ ) e do conjunto de hastes ( $M_h$ ), aceleração da gravidade ( $g$ ) e a penetração permanente do amostrador ( $\rho$ ) (Equação 2.33).

$$F_d = \frac{\eta_3 [\eta_1 (0.75 + \rho) \times M_m \times g + \eta_2 (M_h \times g \times \rho)]}{\rho} \quad (2.33)$$

### 2.7.2.1 Propriedades de solos granulares

A força de reação dinâmica do solo ( $F_d$ ) associada a métodos teóricos de previsão de capacidade de carga possibilita a estimativa direta da resistência ao cisalhamento do solo. Nesta abordagem ao invés do índice  $N_{SPT}$  utiliza-se os valores de deslocamento registrados durante o golpe do martelo (SCHNAID et al., 2009b).

Schnaid et al., (2009b) utilizaram a energia transmitida ao sistema haste-amostrador-solo combinada com as teorias de capacidade de carga e expansão de cavidades para estimar o ângulo de atrito interno ( $\phi'$ ) de areias. Nessa proposta foi utilizada a teoria da capacidade de carga que permite relacionar valores de  $\phi'$  com a força de reação necessária à cravação do amostrador no solo. A força de reação estática última ( $F_e$ ) é determinada através da teoria da capacidade de carga (Equação 2.34).

$$F_e = A_p (p' \times N_q + 0.5 \times \gamma \times d \times N_\gamma) + Al (K_s \times \gamma \times L \times \tan \delta) \quad (2.34)$$

onde  $N_q$  e  $N_\gamma$  são fatores de capacidade de carga,  $A_p$  é a área da ponta do amostrador,  $Al$  é a área lateral do amostrador,  $L$  é a profundidade do ensaio,  $K_s$  é igual a 0.8 (BROMS, 1966),  $\delta$  adotado igual a  $20^\circ$  (AAS, 1965). Em solos granulares o termo  $0.5 \times \gamma \times d \times N_\gamma$  é considerado desprezível.

O fator de capacidade de carga  $N_q$  é diretamente dependente do ângulo de atrito interno do solo ( $\phi'$ ) e pode ser determinado a partir da teoria de expansão de cavidade (VÉSIC, 1972) (Equação 2.35). Portanto, considerando que a força dinâmica ( $F_d$ ) é igual à força estática ( $F_e$ ) (HERMANSSON; GRAVARE, 1978 apud SCHNAID et al., 2009b) é possível determinar-se o ângulo de atrito interno do solo.

$$N_q = \frac{3}{3 - \sin \phi'} \times e^{\left(\frac{\pi}{2} - \phi'\right) \tan \phi'} \times \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2}\right) \times I^{\frac{4 \sin \phi'}{1 + \sin \phi'}} \quad (2.35)$$

onde  $K_0$  é o coeficiente de empuxo em repouso,  $\sigma'_v$  é a tensão vertical efetiva,  $\phi'$  é o ângulo de atrito interno do solo, expresso em termos de tensões efetivas, e  $I$  é o índice de rigidez reduzido do solo

A proposta de Schnaid et al., (2009b), para a determinação do ângulo de atrito interno do solo, baseada no ensaio SPT, considera os efeitos decorrentes da transferência de energia e da profundidade. Este método possibilita a incorporação do histórico de tensões

do solo e da compressibilidade das areias. Este procedimento é constituído dos seguintes passos:

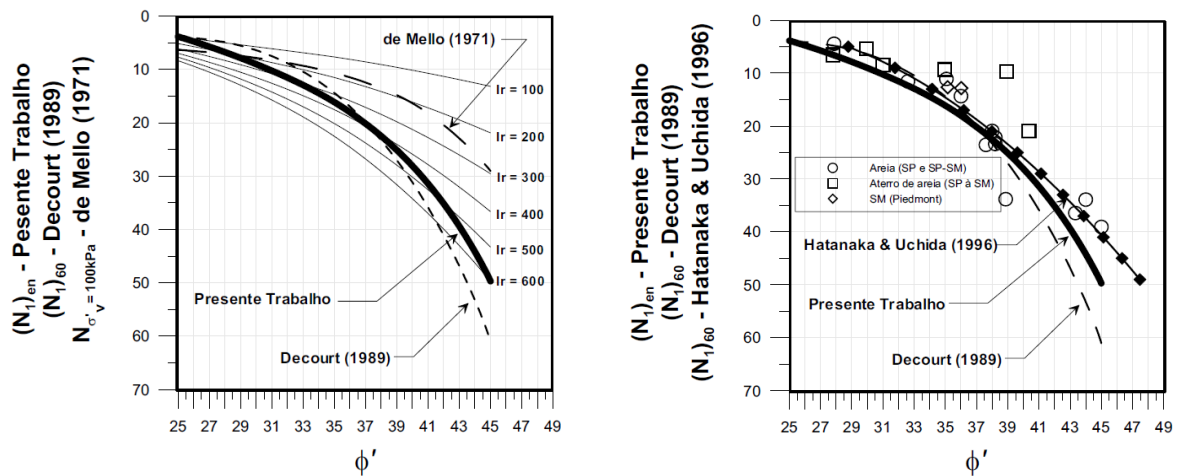
- 1) Medir a penetração do amostrador no solo ( $\rho$ );
- 2) Utilizando o valor da penetração determina-se o valor da força de reação dinâmica do solo ( $F_d$ ) através da Equação 2.33;
- 3) Admitindo que  $F_d = F_e$  determina-se o ângulo de atrito interno do solo através da Equação 2.34

Esse procedimento possibilitou o desenvolvimento de uma correlação entre o índice  $N_{SPT}$  e o ângulo de atrito interno (Figura 2.25a). O número de golpes definido como  $(N_1)_{en}$  considera a energia efetiva utilizada para a cravação do amostrador no solo (Equação 2.3) e o nível de tensão padrão (100 kPa) (Equação 2.36).

$$N_1 = C_N \times N_{SPT} \quad (2.36)$$

onde  $C_N$  é um fator de correção definido como sendo a relação do índice  $N_{SPT}$  obtido para uma dada tensão efetiva e o índice  $N_{SPT}$  obtido para uma dada tensão padrão (100 kPa) (SKEMPTON; 1986 e CLAYTON; 1993).

A Figura 2.25a mostra que a relação  $(N_1)_{en}$  e  $\phi'$  é muito sensível à variação do índice de rigidez ( $I_r$ ) para areias com ângulo de atrito elevado (SCHNAID et al., 2009b). A metodologia proposta foi validada utilizando-se resultados experimentais de Hatanaka e Uchida (1996) (Figura 2.25b)



(a) correlação para o método proposto

(b) comparação com resultados de Hatanaka e Uchida (1996)

**Figura 2.25** –  $(N_1)_{en}$  versus  $\phi'$  (SCHNAID et al., 2009b)



### 2.7.2.2 Propriedades de solos coesivos

Schnaid et al. (2009b) desenvolveu de maneira análoga um método para relacionar a força de reação dinâmica do solo ( $F_d$ ) com a resistência ao cisalhamento ( $S_u$ ) mobilizada em condições não-drenadas. Este método está baseado na teoria da capacidade de carga de estacas em argilas (Equação 2.37).

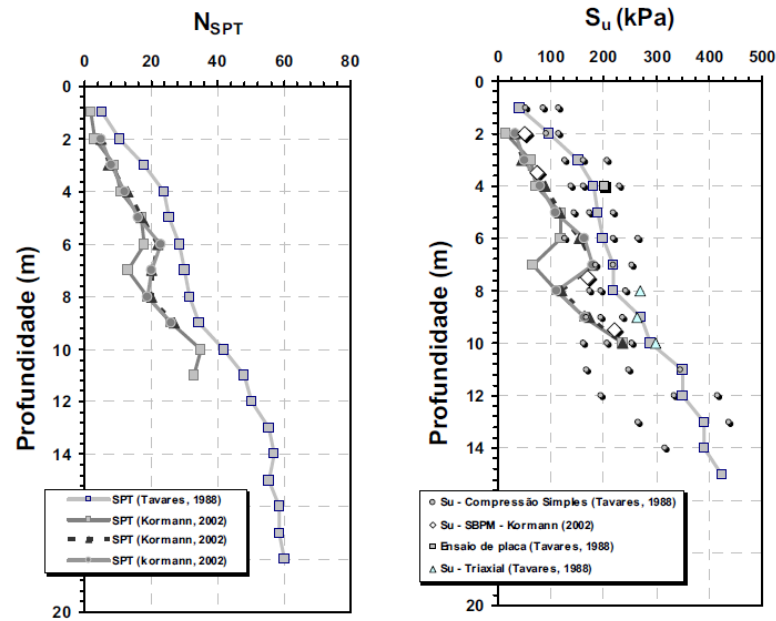
$$F_e = (N_c \times A_b \times S_u + \gamma \times L \times A_b) + (S_u \times \alpha \times Al) \quad (2.37)$$

onde  $F_e$  é a força estática,  $N_c$  coeficiente de capacidade de carga,  $Al$  é a área lateral,  $A_b$  é a área da ponta,  $\gamma$  é o peso específico do solo,  $L$  profundidade da ponta e  $\alpha$  é o coeficiente de adesão.

A relação entre a força dinâmica ( $F_d$ ) e a força estática ( $F_e$ ) é representada através de um fator de incremento de carga ( $\nu'$ ) (Equação 2.38). Adota-se 1.5 como valor representativo para este fator de carga (SCHNAID et al., 2009b). O coeficiente  $\alpha$  é função da resistência ao cisalhamento não-drenada e é obtido através de cálculo iterativo usando a Equação 2.38. A utilização desse método, em relação à determinação das áreas de ponta e lateral, deve considerar duas situações distintas: ponta aberta e ponta fechada.

$$F_d = \nu' \times F_e \therefore F_e = \left( \frac{E_{amostrador}}{\Delta \rho} \right) \times \left( \frac{1}{\nu'} \right) \quad (2.38)$$

A Figura 2.26 apresenta a comparação de valores de resistência não drenada ( $S_u$ ), obtidos através do método proposto por Schnaid et al., (2009b), e valores relatados por outros pesquisadores. Nesta solução foi adotado  $N_c$  (ou  $N_{k,SPT}$ ) igual a 30 conforme recomendação de Kormann (2002). Observa-se uma excelente correlação entre os resultados de resistência não drenada previstos pelo ensaio SPT e os resultados obtidos através dos ensaios de referência.



**Figura 2.26** – Estimativa de  $S_u$  para argila pré-adensada de Formação Guabiro tuba (SCHNAID et al., 2009b)

### 2.7.3 Estática no ensaio SPT

A resistência à penetração estática em solos arenosos e argilosos, em função do índice  $N_{SPT}$ , tem sido objeto frequente de pesquisas (DE MELLO, 1971; SCHMERTMANN, 1979; AOKI et al, 2007). Schmertamnn (1979) desenvolveu um trabalho pioneiro no equacionamento da resistência estática do ensaio SPT. Este trabalho foi desenvolvido através de comparação entre os mecanismos de resistência à penetração no ensaio SPT e no ensaio CPT (Figura 2.27).

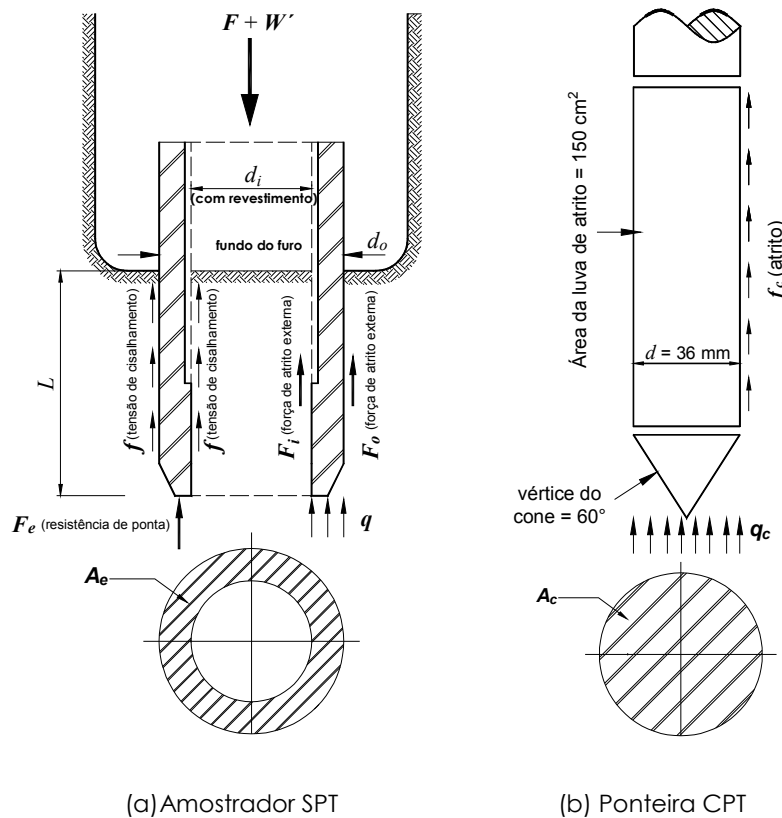
O equilíbrio de forças na direção vertical é representado pela Equação 2.39.

$$F + W' = F_e + (F_0 + F_i) \quad (2.39)$$

Nessa equação, a força externa ( $F$ ) somada ao peso submerso das hastes e do amostrador ( $W'$ ) é igual à soma da parcela de resistência de ponta ( $F_e$ ) e a parcela de resistência devido ao atrito externo ( $F_0$ ) e ao atrito interno ( $F_i$ ). Admite-se que a penetração do amostrador ocorre na condição de não embuchamento. Sendo  $f$  o atrito ou adesão média entre as paredes internas e externas do amostrador e o solo, ao longo da penetração  $L$ , a Equação 2.39 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$F + W' = q \times A_e + (d_i + d_o) \times \pi \times L \times f \quad (2.40)$$

onde  $q$  é a tensão normal atuante no anel do amostrador,  $A_e$  é a área do anel do amostrador,  $d_i$  é o diâmetro interno do amostrador,  $d_o$  é o diâmetro externo do amostrador,  $L$  é o comprimento de penetração do amostrador e  $f$  é o atrito entre as paredes internas e externas do amostrador.



**Figura 2.27** – Mecanismos de resistência à penetração mobilizados em ensaios SPT e ensaios CPT (modificado de SCHMERTMANN; 1979)

Schmertmann (1979) assumiu que o valor da tensão normal ( $q$ ) atuante no anel do amostrador SPT pode ser representado pela tensão ( $q_c$ ) atuante na ponta do cone no ensaio CPT multiplicada por uma constante  $C_1$  (Equação 2.41). Similarmente, esse autor assumiu que o atrito ( $f$ ) atuante na lateral do amostrador SPT é igual ao atrito ( $f_c$ ) lateral do ensaio CPT multiplicado por uma constante  $C_2$  (Equação 2.42).

$$q = C_1 \times q_c \quad (2.41)$$

$$f = C_2 \times f_c \quad (2.42)$$

Assim, considerando as Equações 2.41 e 2.42 e a razão de atrito ( $R_f$ ) do ensaio CPT, a Equação 2.39 pode ser reescrita conforme apresentado a seguir (Equação 2.43).

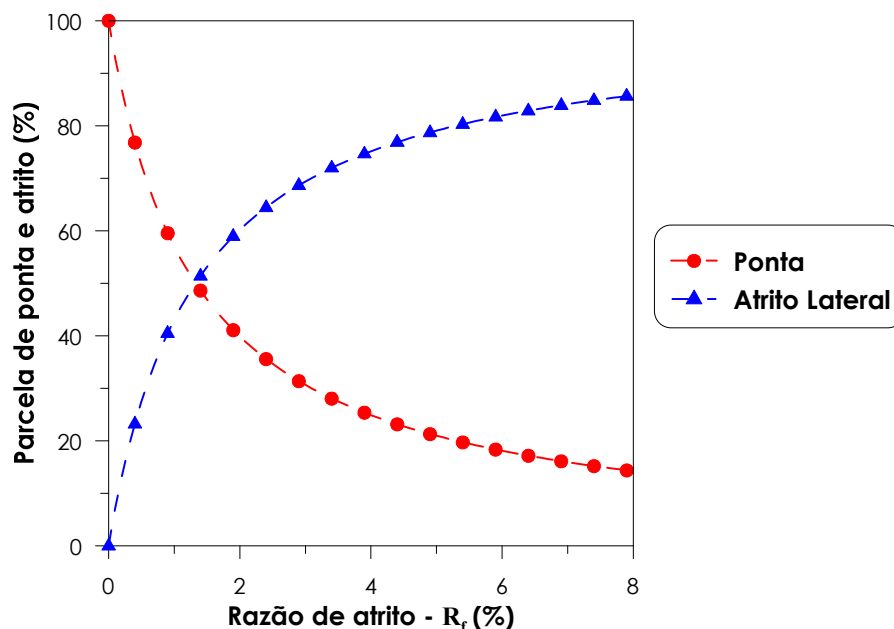
$$F + W' = [C_1 \times A_e + (d_i + d_o) \times \pi \times L \times C_2 \times R_f] \times q_c \quad (2.43)$$

Através de ensaios experimentais, Schmertmann (1979) observou que os valores médios de  $C_1$  e  $C_2$  são da ordem de 1.0 e 0.7, respectivamente, para cones mecânicos e 1.0 para cones elétricos.

### 2.7.3.1 Atrito lateral no amostrador SPT

O atrito interno e externo, mobilizados durante a penetração do amostrador no solo, desempenham um papel fundamental na determinação do índice  $N_{SPT}$ . Os valores do índice  $N_{SPT}$  quando comparados com resultados de ensaios CPT apresentam uma melhor correlação com a razão de atrito ( $R_f$ ) do que com a resistência de ponta ( $q_c$ ) (Al-AWKATI, 1969 apud SOUZA 2009).

Schmertmann (1979) quantificou as parcelas de resistência de ponta e atrito lateral para o ensaio SPT em função da razão de atrito ( $R_f$ ). Analogamente, Souza (2009) adaptou este mesmo método considerando a norma NBR 6484 (ABNT, 2001) (Figura 2.28).



**Figura 2.28** – Variação das parcelas de resistência de ponta e atrito lateral em função da razão de atrito ( $R_f$ ) (Adaptado de SCHMERTMANN; 1979 por SOUZA; 2009)

### 2.7.3.2 Influência da energia na resistência estática

Schmertmann (1979) desenvolveu um trabalho pioneiro considerando a influência da energia na resistência estática do sistema amostrador-solo. Posteriormente outros pesquisadores (AOKI et al, 2007; ODEBRECHT et al, 2005; SCHNAID et al, 2009a) também interpretaram a resistência mobilizada no sistema amostrador-solo com base em conceitos de energia.

É importante destacar que nessa proposta, Schmertmann (1979) já considerava a importância da energia potencial adicional do sistema devido ao peso submerso da composição de hastes e do amostrador. Posteriormente, Odebrecht et al., (2005) aperfeiçoaram o cálculo desta energia, levando em conta as parcelas correspondentes ao martelo e à composição de hastes.

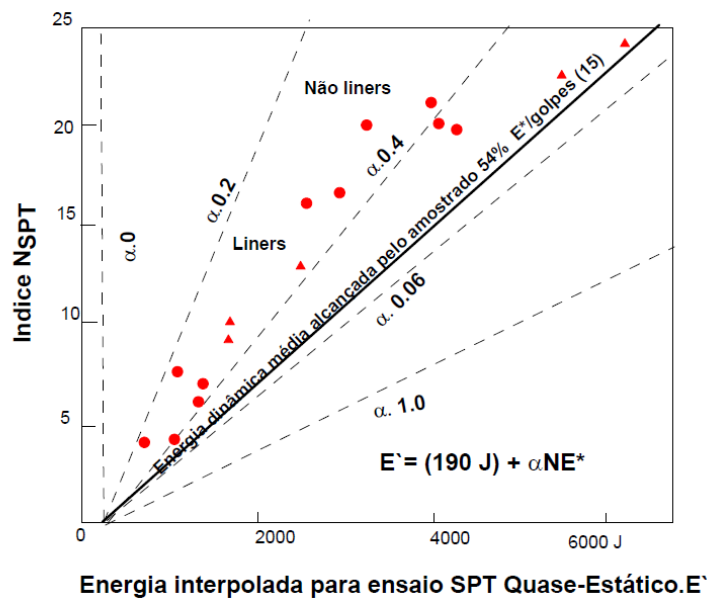
Resultados experimentais obtidos por Schmertmann (1979) indicaram que o valor do índice  $N_{SPT}$  varia proporcionalmente com a energia requerida para a penetração estática do amostrador (Figura 2.29). A energia total ( $E'$ ) disponível para a cravação do amostrador SPT é obtida através da Equação 2.44:

$$E' = M_m \times g \times h_q + \alpha \times N_{SPT} \times E^* \quad (2.44)$$

onde  $E^*$  é a energia potencial teórica do ensaio SPT e  $\alpha$  é uma constante utilizada para estimar a máxima energia transmitida ao amostrador. Schmertmann (1979) observou a partir de resultados experimentais que os valores médios de  $\alpha$  são 0.42 e 0.33 para areias e argilas, respectivamente.

Desta forma, através da Equação 2.44 é possível determinar o valor máximo da energia que atinge o amostrador ( $E''$ ) (Equação 2.45).

$$E'' = \alpha \times N_{SPT} \times E^* = E_{amostrador} \quad (2.45)$$



**Figura 2.29** – Energia quasi-estática necessária à penetração do amostrador para uma eficiência de 54% determinada no topo do amostrador (NOREÑA, 2011 modificado de SCHMERTMANN, 1979)

Schmertmann et al. (1979) observaram através de medidas experimentais que a porcentagem de energia que atinge o amostrador é em média 54% da energia total disponível no sistema. No entanto, Cavalcante et al. (2008) em seus trabalhos experimentais constataram uma porcentagem de energia que atinge o amostrador maior (70.9%) do que aquela observado por Schmertmann et al. (1978). Os valores obtidos por Cavalcante et al. (2008) estão superestimados uma vez que os valores de índice  $N_{SPT}$  são muito baixos (5 a 11). Assim, a energia potencial disponível no sistema deve ser corrigida (ODEBRECHT et al; 2005) resultando em valores de eficiência inferiores àqueles obtidos quando se utiliza a energia potencial teórica.

Segundo Schmertmann (1979) a energia necessária à penetração dinâmica do amostrador SPT é superior à energia necessária à penetração estática. Esse autor considera que fatores, tais como perdas devidas ao deslocamento elástico do solo e a efeitos viscosos dentre outros, influenciam neste comportamento. Desta forma, Schmertmann (1979) introduziu um parâmetro  $\beta$  que representa a relação entre a parcela de resistência dinâmica e a parcela de resistência estática necessária à penetração do amostrador. Esse autor recomenda um valor médio de  $\beta$  igual a 1.64 para solos argilosos e 1.29 para solos arenosos. O valor de  $\beta$  pode ser estimado através da Equação 2.46:

$$\beta = \frac{\eta}{\alpha} \quad (2.46)$$

onde  $\eta$  representa a eficiência do ensaio SPT determinada no topo do amostrador.

A proposta de Schmertmann (1979) para o cálculo da resistência estática média ( $F$ ) no ensaio SPT foi adaptada por Noreña (2011) resultando na Equação 2.47.

$$F = \frac{\alpha \times N_{SPT} \times E^* + M_m \times g \times h_q}{\Delta\rho} \quad (2.47)$$

Esta proposta é válida para situações nas quais a penetração do amostrador ocorre na condição não embuchada. Adicionalmente esta proposta pode ser estendida para a estimativa de valores de resistência de ponta ( $q_c$ ), atrito lateral ( $f$ ) e razão de atrito ( $R_f$ ) do ensaio CPT conforme relatado por Souza (2009).

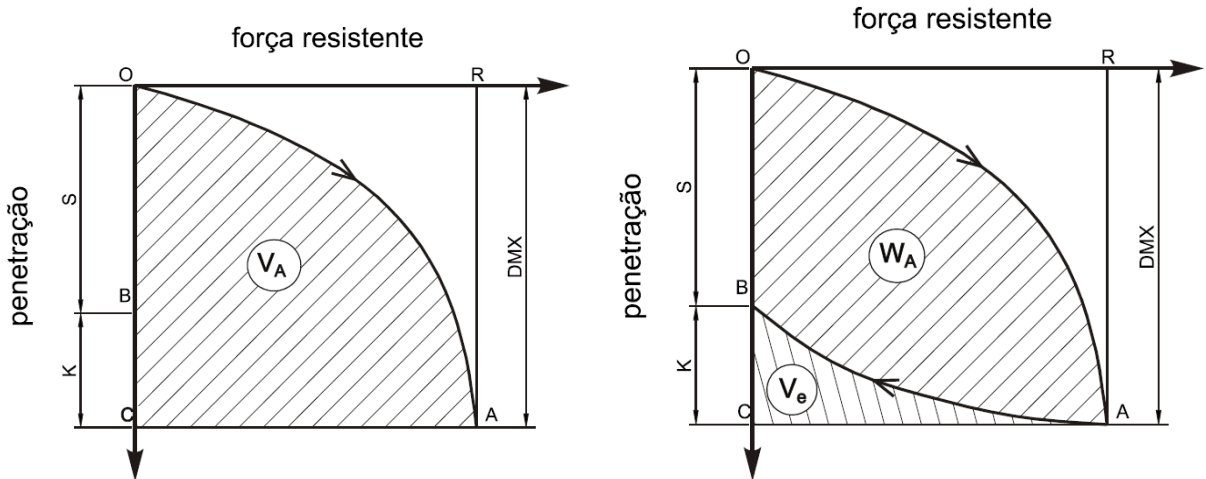
#### **2.7.4 Resistência estática mobilizada no sistema amostrador-solo através da aplicação do Princípio de Hamilton (AOKI et al., 2007)**

Aoki et al. (2007) apresentaram uma proposta para a determinação da resistência estática mobilizada no sistema amostrador-solo utilizando o Princípio de Hamilton (Equação 2.12). Essa proposta é detalhada a seguir, baseando-se nos trabalhos de Aoki et al. (2007 e 2004).

A Figura abaixo apresenta uma curva de resistência versus penetração correspondente a um ensaio SPT. No instante  $t_1$ , quando a onda de tensão atinge o amostrador, a energia cinética é igual a  $T_A$ , enquanto que a energia de deformação ( $V$ ) e o trabalho realizado por forças não conservativas ( $W_{nc}$ ) são praticamente nulos. No instante  $t_2$ , quando a penetração do amostrador atinge um valor máximo (DMX), a energia cinética se anula e a energia de deformação se iguala a  $V_A$  (Figura 2.30a).

Como no intervalo de tempo ( $t_2-t_1$ ), não houve nenhuma variação de trabalho realizado por forças não conservativas, resulta que:

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



(a) Curva correspondente a um ensaio SPT

(b)- Energia de deformação e trabalho realizado por forças não-conservativas ao final do impacto

**Figura 2.30** – Curva resistência versus penetração correspondente a um ensaio SPT (AOKI et al., 2004)

No instante  $t_3$  que corresponde ao final do impacto, a energia de deformação ( $V$ ) e o trabalho realizado por forças não-conservativas ( $W_{nc}$ ) se igualam a  $V_e$  e  $W_A$ , respectivamente (Figura 2.30b).

**Tabela 2.3-** Variação da energia durante os intervalos de tempo ( $t_2-t_1$ ) e ( $t_3-t_2$ ) (AOKI et al., 2007)

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

Aplicando-se o Princípio de Hamilton (Equação 2.12) no intervalo ( $t_3-t_2$ ), resulta que:

$$V_A = V_e + W_A \tag{2.49}$$

Este mesmo raciocínio pode ser aplicado para ensaios estáticos. Com exceção de solos resilientes, a recuperação elástica da penetração do amostrador é muito pequena quando comparada com a penetração permanente. Portanto, o trabalho das forças não conservativas é praticamente igual à energia de deformação:

$$V_A \cong W_A \tag{2.50}$$



Entretanto, o trabalho das forças não conservativa é igual ao produto da força resistente ( $R_T$ ) pela penetração permanente ( $S$ ):

$$W_A = R_T \times S \quad (2.51)$$

Conforme foi mostrado no item 2.4.3.1 (Figura 2.14) a força resistente no ensaio dinâmico ( $R_D$ ) é aproximadamente igual à força resistente no ensaio estático ( $R_S$ ). Portanto, a força resistente correspondente ao ensaio estático pode ser calculada através da seguinte equação:

$$R_S = R_T = \frac{W_A}{S} = \frac{V_A}{S} = \frac{T_A}{S} \quad (2.52)$$

Quando o amostrador é cravado para obter o índice  $N_{SPT}$ , a penetração  $S$  por golpe varia. Desse modo, pode-se calcular uma penetração média com a seguinte expressão:

$$S_m = \frac{0.3}{N_{SPT}} (m) \quad (2.53)$$

Portanto, a resistência à penetração correspondente ao índice  $N_{SPT}$  é dada por:

$$R_S = \frac{T_A}{S_m} = T_A \times \frac{N_{SPT}}{0.3} (kN) \quad (2.54)$$

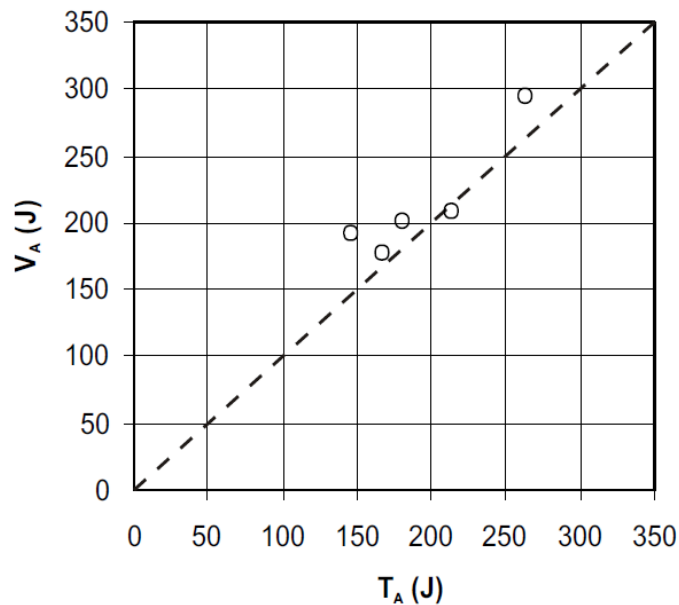
De acordo com Aoki e Cintra (2000a), a eficiência do ensaio SPT, determinada no topo do amostrador é fornecida pela Equação 2.10, resultando em:

$$R_S = \frac{\eta * 0.478 \times N_{SPT}}{0.3} (kN) \quad (2.55)$$

Desta forma, o valor de força de resistência estática mobilizada no sistema amostrador-solo pode ser determinado a partir do índice  $N_{SPT}$  quando se conhece o valor da eficiência do ensaio SPT, determinada no topo do amostrador. Assim, o índice  $N_{SPT}$  pode ser interpretado como um parâmetro com um significado físico.

Aoki et al. (2007) compararam os valores de energia cinética medidas no topo do amostrador ( $T_A$ ) com valores de energia de deformação ( $V_A$ ) determinados através de ensaios de prova de carga estática. A energia de deformação apresentou-se superior à energia cinética (Figura 2.31). Este comportamento ocorre porque o ensaio de prova de carga estática foi precedido por em ensaio de carregamento dinâmico causando uma

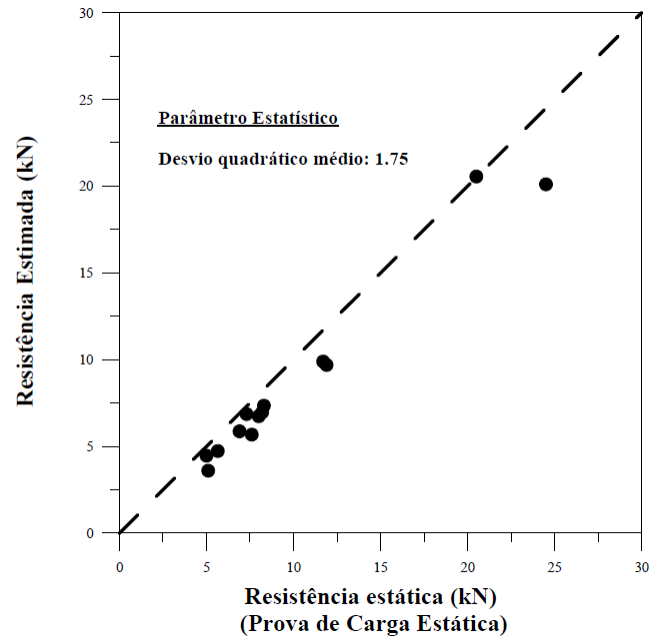
penetração adicional do amostrador no solo e conseqüentemente alterando as condições do solo no carregamento estático (AOKI et al., 2007).



**Figura 2.31** – Comparação entre a energia cinética ( $T_A$ ) e a energia de deformação ( $V_A$ ) (AOKI et al., 2007)

A validade da proposta de Aoki et al. (2007) para se determinar a resistência estática do sistema amostrador-solo tem sido comprovada através de ensaios de prova de carga estática (NOREÑA, 2011) (Figura 2.32). Os resultados indicaram que a resistência estática experimental apresentou-se ligeiramente superior aos valores de resistência estática estimados. Este comportamento ratifica os resultados observados por Aoki et al. (2007).

A princípio os autores consideram que esta diferença está associada à mudança que ocorre nas condições do solo devido ao carregamento dinâmico. Assim, considerando que resultados experimentais mostraram que a resistência dinâmica pode ser considerada igual à resistência estática (Figura 2.14) observa-se que os valores de resistência estática teóricos (Equação 2.55) podem ser comparados com a resistência dinâmica do solo ( $R_D$ ) mobilizada durante a penetração do amostrador SPT



**Figura 2.32** – Comparação entre a resistência estática estimada e a resistência estática obtida através de prova de carga estática (NOREÑA; 2011)

# Capítulo 3

## Teoria da Onda Unidimensional

### 3.1 Considerações iniciais

A introdução dos conceitos de propagação de ondas em barras, na engenharia de fundações, para o entendimento do processo de cravação de elementos no solo foi realizada por Smith (1960). Atualmente, tais conceitos têm sido também utilizados na interpretação dos fenômenos que ocorrem durante a realização de ensaios dinâmicos, como é o caso do ensaio SPT (SCHMERTMANN; PALÁCIOS, 1979; BELINCANTA 1985 e 1998; CAVALCANTE, 2002; ODEBRECHT et al, 2005; AOKI; CINTRA, 2000a; AOKI et al, 2007; HOWIE et al, 2003; e LOBO, 2009).

Neste capítulo são apresentados conceitos teóricos relacionados à propagação de ondas longitudinais de tensão em barras elásticas, que serão aplicados ao caso da composição de hastes do ensaio SPT. O desenvolvimento deste capítulo foi baseado em importantes trabalhos anteriores, dentre os quais, TIMOSHENKO; GOODIER, 1970; BELINCANTA, 1985; BERNARDES, 1989; THOMSON; DAHLEH, 1998 e ODEBRECHT, 2003.

No estudo da propagação de ondas longitudinais de tensão, aplicado ao caso de barras de comprimento finito, devem ser adotadas algumas hipóteses simplificadoras, tais como (BELINCANTA, 1985):

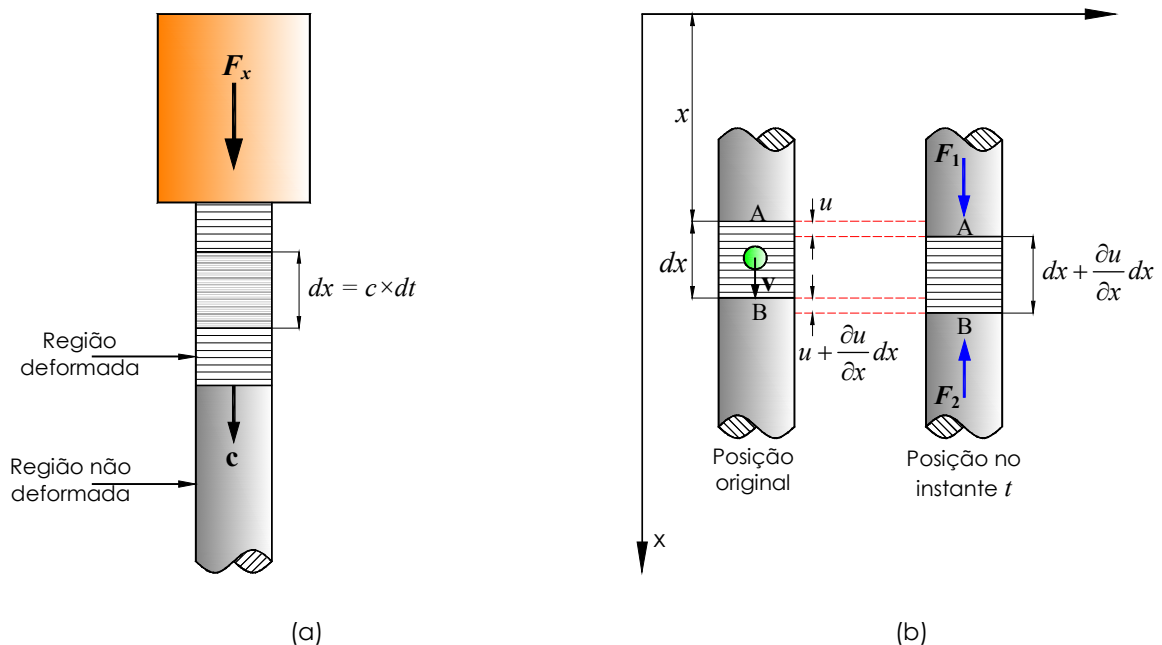
- a seção transversal da haste permanece plana durante a passagem da onda longitudinal de tensão;
- a tensão se distribui uniformemente sobre toda a seção transversal;
- o comprimento da onda longitudinal de tensão é considerado muito grande quando comparado com o diâmetro da haste;
- os movimentos transversais das partículas são considerados desprezíveis;
- as perdas de energia que ocorrem nas hastes durante a propagação da onda longitudinal de tensão são consideradas desprezíveis;
- a onda longitudinal de tensão se propaga na haste com uma velocidade constante ( $c$ ) que depende exclusivamente das características do material constituinte da haste; e

- as hastes são constituídas por material elástico linear.

### 3.2 Velocidade de propagação da onda e velocidade das partículas

A aplicação de uma força dinâmica em um corpo elástico ocasiona a formação de ondas de tensão e deformação que se irradiam e se propagam com velocidades finitas no interior desse corpo (ODEBRECHT, 2003). No caso específico do ensaio SPT, quando o martelo atinge a cabeça de bater, somente uma pequena região do material é comprimida (Figura 3.1a). Essa deformação produz uma tensão de compressão que é transmitida à seção adjacente, que por sua vez também se deforma. À medida que o evento prossegue o esforço de compressão é transmitido para zonas sucessivas, gerando uma onda de compressão que caminha ao longo da composição de hastes. Essa onda longitudinal de compressão se propaga a uma velocidade constante ( $c$ ). A força de compressão ( $F_x$ ) é transmitida de uma seção para outra a uma distância ( $dx$ ), num intervalo de tempo ( $dt$ ). Assim, tem-se:

$$dx = c \times dt \quad (3.1)$$



**Figura 3.1**– Esquema de propagação de uma onda longitudinal de compressão uniforme em uma composição de hastes (adaptado de BERNARDES, 1989).

Seja considerado então um elemento de haste, com comprimento  $dx$ , conforme mostrado na (Figura 3.1a). Na região comprimida ocorre um encurtamento elástico ( $du$ ) que coincide com o deslocamento da seção superior do elemento de haste. A deformação ( $\varepsilon$ ), correspondente a esse encurtamento elástico, devido a passagem da onda longitudinal de compressão, pode ser calculada através da Lei de Hooke:

$$\sigma_x = E \times \varepsilon \quad (3.2)$$

onde  $\sigma_x$  é a tensão de compressão, assumida positiva,  $E$  é o módulo de elasticidade do material da haste.

As partículas situadas dentro da zona comprimida estão sujeitas à uma mesma velocidade. Já as partículas situadas logo à frente da onda de propagação são aceleradas passando de uma velocidade inicial nula ( $v=0$ ) para uma velocidade final ( $v$ ). Rearranjando a Equação 3.2, determina-se a velocidade das partículas ( $v$ ).

$$\sigma_x = E \times \frac{du}{dx} \quad (3.3)$$

Substituindo a Equação 3.1 na Equação 3.3 resulta:

$$\frac{du}{dt} = \frac{\sigma_x}{E} \times c \quad \therefore v = \frac{\sigma_x}{E} \times c \quad (3.4)$$

A velocidade de propagação da onda ( $c$ ) é diferente da velocidade das partículas ( $v$ ). A primeira corresponde a velocidade que a onda se propaga no meio considerado enquanto que a segunda é a velocidade que as partículas de uma determinada seção adquirem após a passagem da onda de tensão.

Observa-se que a velocidade da partícula ( $v$ ) terá o mesmo sentido da velocidade de propagação da onda quando ocorrer a propagação de uma onda longitudinal de compressão. No caso da propagação de uma onda longitudinal de tração as velocidades terão sentidos contrários.

A velocidade de propagação da onda longitudinal ( $c$ ) pode ser obtida igualando-se o acréscimo de impulso ( $I$ ) com a quantidade de movimento ( $Q$ ). Por definição tem-se:

$$I = F_x \times dt \quad (3.5)$$

$$Q = m \times v \quad (3.6)$$

onde  $F_x$  é a força de compressão aplicada ao corpo,  $dt$  é o intervalo de tempo,  $m$  é a massa e  $v$  a velocidade, que neste caso é a própria velocidade das partículas.

Igualando as Equações 3.5 e 3.6, resulta:

$$F_x dt = m \times v \therefore \sigma_x \times a dt = v \times \rho \times a dx \quad (3.7)$$

Substituindo as Equações 3.4 e 3.1 na Equação 3.7 resulta:

$$E = \rho \times c^2 \therefore c = \sqrt{\frac{E}{\rho_s}} \quad (3.8)$$

onde  $a$  é a área da seção transversal e  $\rho_s$  é a massa específica do material.

A Equação 3.8 mostra que a velocidade de propagação de uma onda longitudinal de tensão ( $c$ ) depende exclusivamente das propriedades do meio pelo qual a onda se propaga, ou seja, do módulo de elasticidade e da massa específica do material. No entanto, a velocidade das partículas ( $v$ ) além das propriedades do meio também depende do nível de tensão que está sendo aplicado (Equação 3.4).

Através da Equação 3.4 é possível observar que no intervalo de comportamento elástico da barra, existe uma proporcionalidade entre força ( $F_x$ ) e a velocidade das partículas ( $v$ ), no momento que uma onda longitudinal de tensão se propaga ao longo da composição de hastes (Equação 3.9). Este fator de proporcionalidade, denominado *impedância* ( $Z$ ), depende do módulo de elasticidade do material, da área da seção transversal da haste e da velocidade de propagação da onda de tensão (Equação 3.10).

$$v = \frac{\sigma_x \times c}{E} = \frac{\sigma_x \times c \times a}{E \times a} = \frac{F_x \times c}{E \times a} = \frac{F_x}{Z} \quad (3.9)$$

$$Z = \frac{E \times a}{c} = c \times \rho \times a \quad (3.10)$$

Numa onda de compressão, a velocidade da partícula apresenta o mesmo sentido de propagação da onda. Já no caso de uma onda de tração, o sentido da velocidade da partícula é oposto ao sentido de propagação da onda. Isso está em acordo com a Equação 3.9, onde uma velocidade positiva corresponde a uma força positiva

(compressão), enquanto que uma velocidade negativa corresponde a uma força negativa (tração).

### 3.3 Equação da propagação de uma onda longitudinal de tensão em um conjunto de hastes

Considerando o esquema apresentado na Figura 3.1b, observa-se que devido à atuação das forças axiais, as partículas do elemento  $dx$  sofrem deslocamentos. O deslocamento que ocorre em uma determinada seção do elemento  $dx$  é uma função do seu posicionamento ( $x$ ) e do instante ( $t$ ). Assim, se  $u$  for o deslocamento na seção  $x$ ,  $u + (\partial u / \partial x) dx$  será o deslocamento na seção  $x + dx$ . No instante  $t$ , o elemento  $dx$  terá um novo comprimento, representado por  $u + (\partial u / \partial x) dx$ . Assim, determina-se a deformação ( $\varepsilon$ ) do elemento  $dx$ :

$$\varepsilon = \frac{\left( u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) - u}{dx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.11)$$

Aplicando-se a Lei de Hooke, é possível calcular as forças que atuam no elemento  $dx$ , conforme apresentado nas equações a seguir.

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (3.12)$$

$$\frac{F}{a \times E} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.13)$$

Derivando a Equação 3.13 parcialmente em relação a  $x$ , e rearranjando os termos, tem-se:

$$\frac{\partial F}{\partial x} = a \times E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (3.14)$$

As forças normais que atuam no elemento  $dx$  podem ser representadas por:

$$F_1 = E \times a \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.15)$$

$$F_2 = F_1 + \left( \frac{\partial F_1}{\partial x} \right) dx \quad (3.16)$$

Aplicando-se a Segunda Lei de Newton, tem-se:



$$F_2 - F_1 = m \times a_c \quad (3.17)$$

onde  $m$  é a massa e  $a_c$  é a aceleração uniforme do elemento infinitesimal.

Substituindo a Equação 3.16 na Equação 3.17 tem-se:

$$\frac{\partial F_1}{\partial x} dx = \rho \times adx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3.18)$$

Substituindo a Equação 3.14 na Equação 3.18 resulta:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\rho}{E} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3.19)$$

Substituindo a Equação 3.8 na Equação 3.19 tem-se:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3.20)$$

A Equação 3.20 é a equação universal que descreve o movimento das partículas durante a propagação longitudinal de uma onda de tensão no interior de uma barra, considerando a condição particular de atrito lateral nulo ao longo da barra. Esta equação tem sido aplicada por diversos autores (SCHMERTMANN; PALÁCIOS, 1979; BELINCANTA, 1985 e 1998; AOKI; CINTRA, 2000a; ODEBRECHT, 2003; CAVALCANTE, 2002; HOWIE et al, 2003; LOBO, 2009 entre outros) na interpretação do fenômeno da propagação da onda de tensão ao longo da composição de hastes do ensaio SPT proveniente do impacto do martelo.

A solução da Equação 3.20 foi proposta pela primeira vez por D'Alembert, em 1747 (BERNARDES, 1989). Através da solução apresentada, verifica-se que o deslocamento ( $u$ ) de uma partícula, situada a uma distância ( $x$ ) do topo da haste, em um determinado instante ( $t$ ) pode ser representado como a soma de duas funções (Equação 3.21). As funções  $\phi$  e  $\psi$  correspondem a ondas de tensão que se propagam com a mesma velocidade ( $c$ ), porém em direções contrárias.

$$u(x, t) = \phi(x - ct) + \psi(x + ct) \quad (3.21)$$

Como a Equação 3.20 é linear, se ele tiver duas soluções, a soma dessas soluções também será uma solução. Isso significa que o princípio da superposição é válido. Assim, se duas ondas se encontrarem a onda resultante é uma simples soma aritmética.

É importante destacar que a Equação 3.20 foi desenvolvida com a origem do referencial posicionada no topo da estaca. No entanto, quando esta solução é aplicada ao ensaio SPT, os deslocamentos que ocorrem são significativos quando comparados com o comprimento da composição de hastes, ou seja, trata-se de um problema de grandes deslocamentos. Desta forma, essa equação deveria ser reanalisada considerando a existência de um referencial móvel ao longo do evento.

A solução para este caso poderia ser o emprego das *Equações de Lagrange*, que são formadas por um sistema de equações diferenciais de movimento. O emprego desta solução possibilita a determinação das equações da trajetória do sistema, sendo necessário indicar algumas condições de contorno. Apesar dessas equações serem aplicadas para sistemas onde atuam apenas forças conservativas, Carvalho e Matos (2001) salientam que a solução pode ser generalizada incluindo o efeito de forças não conservativas.

### 3.4 Energia de uma onda longitudinal de tensão

Um impacto em uma seção qualquer de uma barra gera uma onda de tensão que se propaga com uma velocidade constante ( $c$ ) ao longo da barra. A passagem da onda em uma outra seção qualquer produz alterações na tensão e na velocidade das partículas desta seção. Num determinado instante qualquer, um segmento da barra, de comprimento finito, estará comprimido e o restante da barra estará livre de solicitações e em repouso (Figura 3.1a).

No caso específico do ensaio SPT, no instante que a onda de compressão atinge a extremidade do amostrador, dependendo das condições de contorno impostas pelo solo, essa onda é refletida na forma de uma onda de tração ou de compressão. A onda refletida se propaga na composição de hastes no sentido ascendente, dependendo a sua amplitude das condições de contorno.

A energia final de deformação armazenada por uma haste elástica submetida a um esforço de compressão pode ser determinada baseando-se nas seguintes hipóteses (BELINCANTA, 1985):

- O trabalho de deformação ( $W$ ), proveniente dos esforços internos da haste, é igual ao trabalho de deformação realizado pelas forças externas;
- Ocorrendo um acréscimo infinitesimal de força ( $dF_x$ ) o trabalho de deformação também vai ser acrescido de um incremento infinitesimal ( $dW$ );

O deslocamento elástico ( $u$ ) pode ser obtido pela Lei de Hooke:

$$u = F_x \times \frac{L}{E \times a} \quad (3.22)$$

onde  $L$  é o comprimento da barra elástica.

O acréscimo de trabalho ( $dW$ ), quando a força ( $F_x$ ) sofre um acréscimo ( $dF_x$ ), pode ser representado por:

$$dw = F_x du + dF_x du \quad (3.23)$$

onde  $du$  é o incremento infinitesimal do deslocamento. Substituindo a Equação 3.22 na Equação 3.23 e desprezando o termo de segunda ordem, resulta:

$$dw = F_x \times dF_x \times \frac{L}{E \times a} \quad (3.24)$$

Integrando a Equação 3.24, resulta:

$$\int_0^F dw = \int_0^F \frac{L}{E \times a} F_x dF_x \therefore w = \frac{a \times L \times \sigma^2}{2 \times E} \quad (3.25)$$

Utilizando esses conceitos, pode-se determinar a energia contida em uma onda longitudinal de tensão, que é composta de duas parcelas:

- A energia de deformação ( $E_d$ ) que representa a energia armazenada na deformação do elemento, sujeito aos esforços provenientes da onda longitudinal de tensão, representada por:

$$E_d = \frac{a \times \sigma_x^2 \times cdt}{2 \times E} \quad (3.26)$$

- A energia cinética das partículas ( $E_c$ ), que é a energia das partículas animadas pela passagem da onda de compressão representada por:

$$E_c = \frac{a \times \rho \times v^2 \times cdt}{2} \quad (3.27)$$

Substituindo os valores da velocidade da partícula ( $v$ ) e da velocidade de propagação de onda ( $c$ ) (Equações 3.4 e 3.8) na Equação 3.27, a energia cinética das partículas ( $E_c$ ) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$E_c = \frac{a \times \sigma^2 \times cdt}{2 \times E} \quad (3.28)$$

Assim, pode-se observar que a energia contida em uma onda longitudinal de tensão é composta pela parcela de energia de deformação ( $E_d$ ) e pela parcela de energia cinética das partículas ( $E_c$ ), que são iguais. A energia total ( $E$ ) é obtida através da integração da soma dessas duas parcelas de energia, no intervalo de tempo que compreende a onda (Equação 3.29).

$$E = \frac{a \times c}{E} \int_0^t \sigma^2 dt = \frac{c}{Ea} \int_0^t F^2(t) dt \quad (3.29)$$

A energia total também pode ser calculada em função da velocidade das partículas ( $v$ ). Substituindo na Equação 3.29 o valor da força ( $F_x$ ) e da impedância ( $Z$ ) obtidos através das Equações 3.9 e 3.10, respectivamente, resulta:

$$E = \frac{E \times a}{c} \int_0^t v^2(t) dt \quad (3.30)$$

Substituindo na Equação 3.29 apenas um dos valores da força ( $F_x$ ), a energia total pode ser obtida por:

$$E = \int_0^t F(t) \times v(t) dt \quad (3.31)$$

As Equações 3.29 e 3.31 representam os métodos *EF2* e *EFV*, respectivamente, apresentados nos itens 2.5.1 e 2.5.2. Conforme já foi abordado no Capítulo 2 essas equações são utilizadas para a determinação da energia contida em uma onda longitudinal de tensão.

### 3.5 Influência das condições de contorno

O comportamento da onda de tensão que se propaga ao longo da composição de hastes do ensaio SPT depende dos efeitos das condições de contorno do problema, tais como: alteração de seção, extremidade das hastes, resistência do solo e atrito (BELINCANTA; 1985). Assim, as condições de contorno devem ser avaliadas através da verificação das condições de equilíbrio de forças e compatibilidade das velocidades das ondas ascendente e descendente.

Para estabelecer as condições de contorno, é de fundamental importância adotar uma convenção de sinais para as grandezas de força e velocidade das partículas das ondas longitudinais de tensão (Tabela 3.1).

**Tabela 3.1-** Convenção de sinais e sentido adotada para velocidades e forças.

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

### 3.5.1 Extremidade da haste

Após o impacto do martelo sobre a cabeça de bater, a onda longitudinal de tensão se propaga ao longo da composição de hastes, atingindo o amostrador no instante  $\ell/c$  (Figura 3.2a), quando ocorre o início do seu deslocamento. Este deslocamento provoca uma reação dinâmica do solo ( $R_D$ ) (Figura 3.2b). Após o instante  $\ell/c$ , parte da onda que atingiu o amostrador é refletida enquanto que a outra parte é transmitida ao solo. As características da onda refletida e da onda transmitida dependem das condições do solo na extremidade do amostrador. São duas as condições limites (ODEBRECHT, 2003; BELINCANTA, 1985 e BERNARDES, 1989):

- Força de reação dinâmica do solo nula ( $R_D = 0$ ), ou seja, a resistência dinâmica do solo é nula, permitindo que o amostrador penetre livremente;
- Força dinâmica de reação do solo é suficientemente grande para impedir que o amostrador se desloque.

A força total de reação dinâmica do solo ( $R_D$ ) e a velocidade total ( $v_p$ ) na ponta do amostrador são obtidas através das equações de equilíbrio e compatibilidade:

$$R_D = F\downarrow + F\uparrow \quad (\text{Equilíbrio}) \quad (3.32)$$

$$v_p = v\downarrow + v\uparrow \quad (\text{Compatibilidade}) \quad (3.33)$$

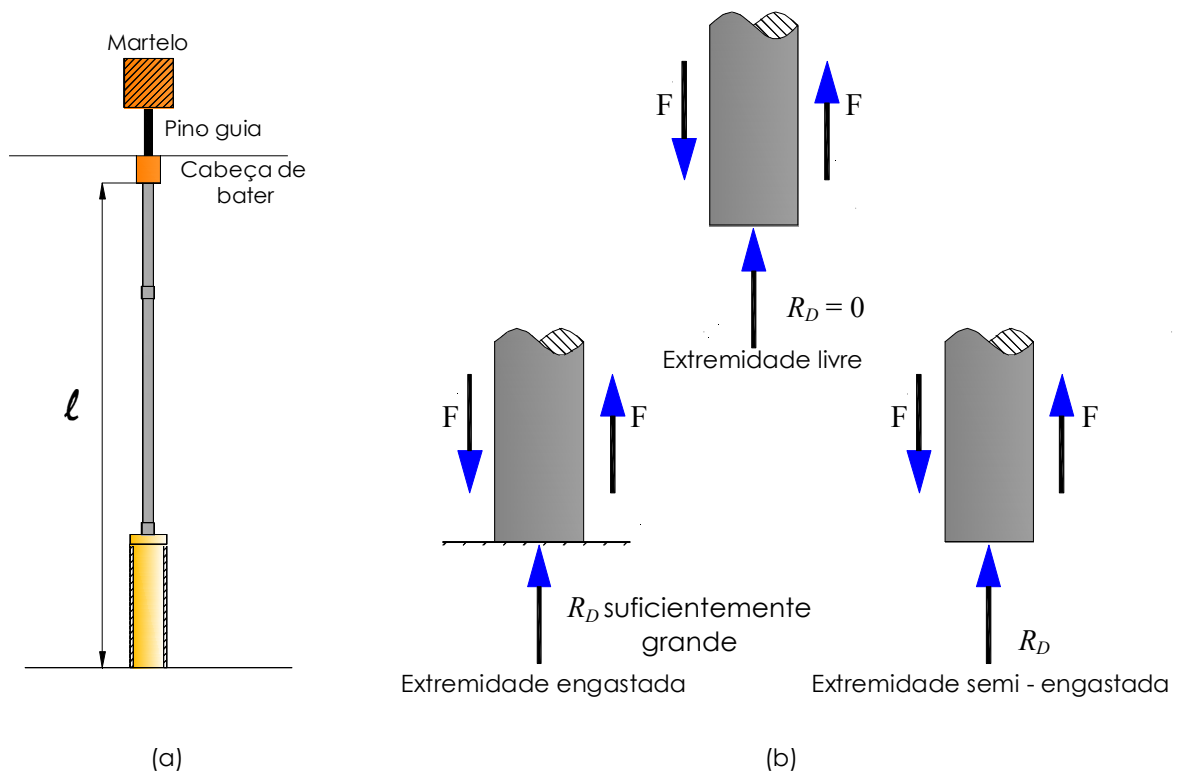
onde  $F\downarrow$  e  $v\downarrow$  são a força e a velocidade da onda incidente e  $F\uparrow$  e  $v\uparrow$  são a força e a velocidade da onda refletida.

#### 3.5.1.1 Extremidade da haste livre

A verificação da condição de extremidade livre é feita supondo que não ocorre nenhum tipo de reação à penetração do amostrador, sendo a força dinâmica do solo nula

( $R_D = 0$ ). Neste caso, observa-se que como o deslocamento da ponta do amostrador é para baixo (velocidade positiva), a onda refletida será uma onda de tração (Equação 3.34).

$$R_D = 0 \quad \therefore \quad F \uparrow = -F \downarrow \quad (3.34)$$



**Figura 3.2** – (a) A onda leva o tempo ( $l/c$ ) para atingir a extremidade do amostrador (b) condições de contorno na extremidade da haste (adaptado de BELINCANTA, 1985).

Desta forma, verifica-se que a onda longitudinal de tensão que atinge a ponta do amostrador é refletida com a mesma intensidade, porém com sinal contrário. Assim, se a onda que atinge a extremidade da haste for uma onda de compressão esta onda será refletida como uma onda de tração.

A velocidade total na ponta do amostrador é obtida considerando a compatibilidade entre as velocidades na ponta do amostrador, correspondentes às ondas incidente e refletida, respectivamente (Equação 3.33). Portanto, a velocidade total na ponta do amostrador é positiva (descendente) e a sua intensidade é duplicada (Equação 3.36). Em contrapartida, a força da onda refletida é negativa, ou seja de tração.

$$v_p = v \downarrow + v \uparrow = \frac{F \downarrow}{Z} + \left( -\frac{F \uparrow}{Z} \right) \quad (3.35)$$

Ou

$$v_p = \frac{F \downarrow}{Z} + \left( \frac{F \downarrow}{Z} \right) = \frac{2F \downarrow}{Z} = 2v \downarrow \quad (3.36)$$

### 3.5.1.2 Extremidade da haste engastada

A verificação da condição de extremidade engastada é feita supondo que a resistência dinâmica do solo é suficientemente grande, de modo que o deslocamento do amostrador seja nulo e conseqüentemente, a velocidade das partículas também seja nula (Equação 3.37).

$$v_p = 0 \quad \therefore v \uparrow = -v \downarrow \quad (3.37)$$

ou

$$-\frac{F \uparrow}{Z} = -\left( \frac{F \downarrow}{Z} \right) \quad \therefore F \uparrow = F \downarrow \quad (3.38)$$

A onda longitudinal de tensão que atinge a extremidade do conjunto de hastes engastada é refletida com a mesma intensidade e mesmo sinal (Equação 3.38). Assim, se a onda que atinge a extremidade da haste é uma onda de compressão a onda refletida também será uma onda de compressão. A força total, que é consequência do efeito de superposição das ondas longitudinais é representada por:

$$F = F \downarrow + F \uparrow = 2F \downarrow \quad (3.39)$$

Neste caso, a onda refletida é uma onda de compressão ascendente com velocidade de partícula negativa, acarretando aumento de força e diminuição da velocidade no momento que ocorre a superposição entre a onda ascendente e descendente.

### 3.5.1.3 Extremidade semi-engastada

Considerando que a resistência dinâmica ( $R_p$ ) oferecida pelo solo seja finita, constante e igual à força final na extremidade do conjunto de haste e assumindo um modelo de solo rígido-plástico, tem-se:

$$R_D = F \downarrow + F \uparrow \therefore F \uparrow = R_D - F \downarrow \quad (3.40)$$

Desta forma, admitindo-se que a onda longitudinal incidente é de compressão (descendente) a análise da Equação 3.40 permite concluir que:

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

A velocidade que determina o deslocamento da ponta do amostrador ( $v_p$ ) na extremidade das hastes pode ser calculada conforme apresentado na Equação 3.41:

$$v_p = v \downarrow + v \uparrow \therefore v_p = \frac{F \downarrow}{Z} + \left( -\frac{F \uparrow}{Z} \right) = \frac{F \downarrow}{Z} - \frac{(R_D - F \downarrow)}{Z} = \frac{(2F \downarrow - R_D)}{Z} \quad (3.41)$$

A mobilização da resistência dinâmica de ponta do solo ( $R_D$ ) depende da ocorrência de um pequeno deslocamento na ponta da composição de hastes (Odebrecht; 2003). Assim, quanto menor for a magnitude do deslocamento menor será a onda de tração gerada na ponta da composição de hastes. Desta forma, para pequenos deslocamentos a onda refletida será uma onda de compressão e para grandes deslocamentos a onda refletida será uma onda de tração.

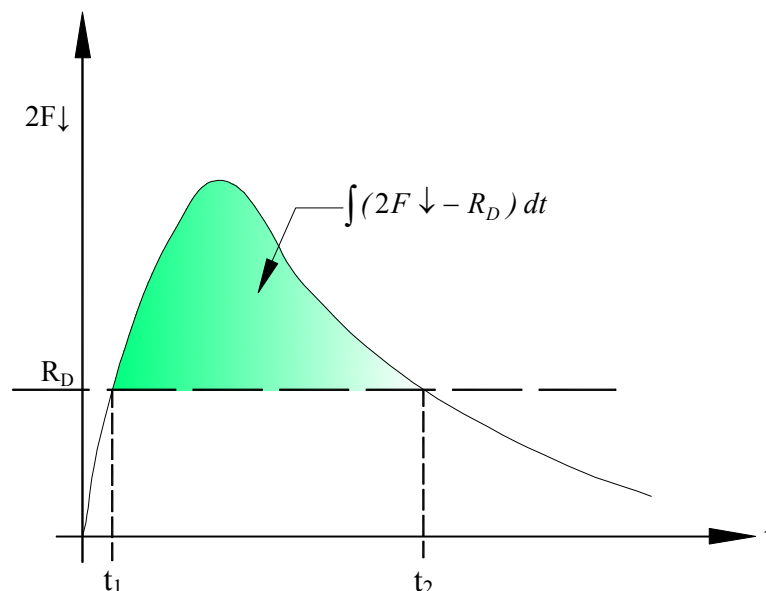
O deslocamento na ponta do amostrador ( $\rho$ ) pode ser obtido através da integração da velocidade na extremidade da composição de hastes (Equação 3.42). A Figura 3.3 apresenta a relação entre a força e o deslocamento, na extremidade da composição de hastes, considerando um modelo rígido-plástico.

$$\rho = \int_{t_1}^{t_2} v_p dt \therefore \rho = \frac{1}{Z} \int_{t_1}^{t_2} (2F \downarrow - R_D) dt \quad (3.42)$$

A Equação 3.42 mostra que o deslocamento ( $\rho$ ) ocorrerá enquanto  $2F \downarrow$  for maior que  $R_D$ , ou seja, enquanto a velocidade tiver valores positivos. No entanto, pela forma da onda de tensão inicial pode-se observar que  $F \downarrow$  diminui após o seu valor de pico e  $2F \downarrow$  se iguala a  $R_D$  no instante  $t_2$ . Neste ponto a velocidade é nula e a partir de então, o deslocamento da extremidade ( $\rho$ ) não aumenta mais (Figura 3.3). Se a força  $F \downarrow$  continuar a diminuir



gradativamente de tal forma até que  $2F_{\downarrow}$  seja menor que  $R_D$ , a velocidade e a força irão se tornar negativas. Assim, a velocidade troca de sinal e o deslocamento da extremidade decresce.



**Figura 3.3** – Relação entre a força e o deslocamento da ponta considerando um modelo rígido-plástico (adaptado de BERNARDES, 1989).

### 3.5.2 Alteração de impedância na haste

A alteração da impedância ( $Z$ ) é causada pela ocorrência de variações ao longo da área da seção transversal ( $a$ ) da composição de hastes, alteração do módulo de elasticidade ( $E$ ) do material ou alteração da velocidade de propagação da onda ( $c$ ). Essas alterações podem ocorrer na junção do conjunto de hastes com o amostrador ou nas luvas que servem de ligação entre as hastes. Considerando o esquema do ensaio SPT mostrado na Figura 3.4, supõe-se que haja uma variação na área da seção transversal da composição de hastes, na profundidade  $x$ , que corresponde à seção  $A-A$ . Assim, neste ponto, devido à alteração da área, haverá uma diferença de impedância entre a seção superior e a seção inferior.

No momento que a onda gerada devido ao impacto do martelo atingir o ponto onde ocorre a alteração de impedância, uma parte da onda inicial de compressão será transmitida ( $F_{2\downarrow}$ ,  $v_{2\downarrow}$ ) e a outra parte será refletida ( $F_{1\uparrow}$ ,  $v_{1\uparrow}$ ). Nas seções onde há uma variação de impedância ( $Z_1$  e  $Z_2$ ), as forças e as velocidades se mantêm em equilíbrio (Equação 3.43 e Equação 3.44).

$$F = F_1 \downarrow + F_1 \uparrow = F_2 \downarrow \quad (\text{Equilíbrio}) \quad (3.43)$$

$$v = v_1 \downarrow + v_1 \uparrow = v_2 \downarrow \quad (\text{Compatibilidade}) \quad (3.44)$$

Resolvendo simultaneamente as equações acima, a força e a velocidade transmitidas são dadas pelas equações a seguir:

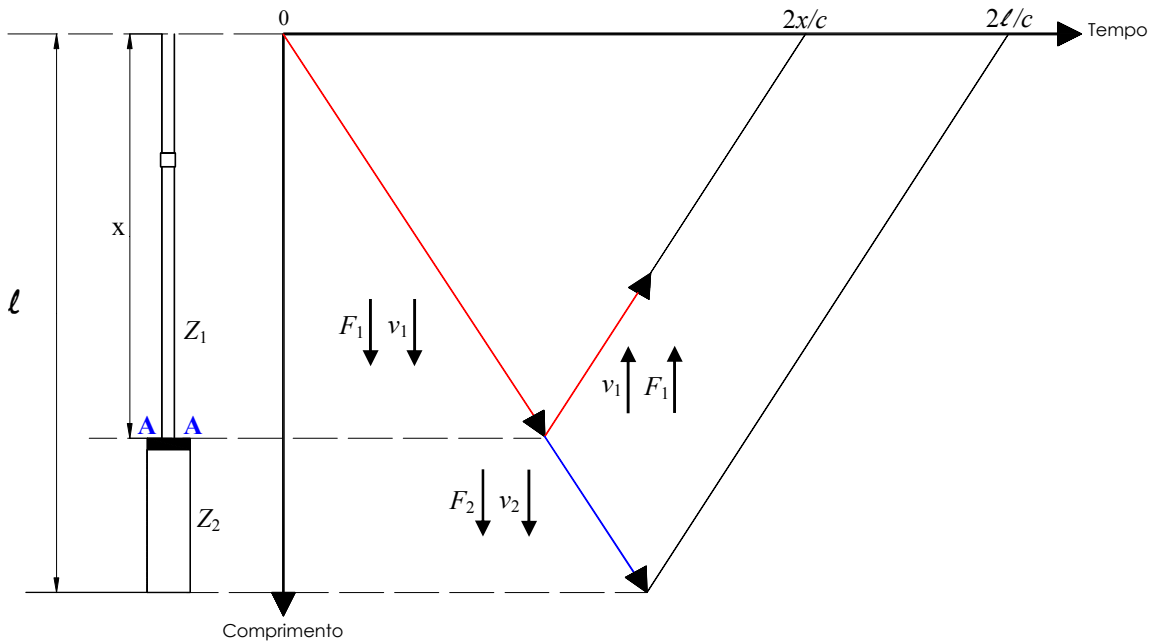
$$F_2 \downarrow = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} F_1 \downarrow \quad (3.45)$$

$$v_2 \downarrow = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} v_1 \downarrow \quad (3.46)$$

Substituindo  $F_2 \downarrow$  na Equação 3.43 e  $v_2 \downarrow$  na Equação 3.44, obtém-se a força e a velocidade refletidas:

$$F_1 \uparrow = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} F_1 \downarrow \quad (3.47)$$

$$v_1 \uparrow = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} v_1 \downarrow \quad (3.48)$$



**Figura 3.4** – Esquema de propagação da onda de tensão, em um conjunto de hastes, com variação de impedância (Adaptado de BERNARDES, 1989).

A Tabela 3.2 apresenta um resumo das ondas de tensão refletidas e transmitidas que podem ocorrer devido à descontinuidade das hastes. O comportamento de reflexão ou transmissão das ondas depende da magnitude das impedâncias ( $Z_1$  e  $Z_2$ ) (BERNARDES; 1969).

Em função das impedâncias  $Z_1$  e  $Z_2$ , podem ocorrer três situações extremas:

- $Z_1=Z_2$ , ou seja, a onda transmitida não se altera e não há onda refletida;
- $Z_1>Z_2$ , ou seja, a onda de tração refletida será sobreposta à onda inicial, ocasionando uma redução na força e um aumento da velocidade no topo da composição de hastes após o instante  $t = 2x/c$ . As variações de impedância podem estar associadas a algum tipo de falha nas luvas das hastes de sondagem;
- $Z_1<Z_2$ , ou seja, a onda de compressão refletida ocasiona uma redução na velocidade e um aumento da força no topo da composição de hastes. Alterações repentinas da área da seção transversal da composição de haste ou mesmo o embuchamento do amostrador podem ser responsáveis pelo surgimento de ondas refletidas de compressão.

**Tabela 3.2-** Ondas de tensão refletidas e transmitidas pela descontinuidade das hastes (Adaptado de BERNARDES; 1989)

	$Z_1=Z_2$	$Z_1>>Z_2$	$Z_1<<Z_2$
Onda inicial			
Onda refletida			
Onda transmitida			
$v_2 \downarrow = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} v_1 \downarrow$	$v_1 \downarrow$	$2v_1 \downarrow$	0
$F_2 \downarrow = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} F_1 \downarrow$	$F_1 \downarrow$	0	$2F_1 \downarrow$
$v_1 \uparrow = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} v_1 \downarrow$	0	$v_1 \downarrow$	$-v_1 \downarrow$
$F_1 \uparrow = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} F_1 \downarrow$	0	$-F_1 \downarrow$	$F_1 \downarrow$
Onda refletida	0	Tração	Compressão

### 3.6 Soluções analíticas para a primeira onda de tensão

A análise das soluções analíticas é muito importante para um melhor entendimento do fenômeno da propagação de uma onda de tensão. Além do mais, essas soluções são ferramentas bastante úteis para análises do comportamento real do evento do ensaio SPT, quando são consideradas condições de contorno simplificadas (BERNARDES, 1989).

As equações analíticas apresentadas nessa seção são uma adaptação ao ensaio SPT das equações apresentadas na tese de Bernardes (1989). Esse trabalho apresenta soluções analíticas que foram aplicadas ao caso de ensaios dinâmicos realizados em modelos de estacas em areia, considerando-se um modelo simplificado no qual admitiu-se que a estaca não estivesse submetida a amortecimento interno e a atrito lateral.

#### 3.6.1 Martelo rígido e sem coxim

Considerando uma composição de hastes, inicialmente em repouso, atingida diretamente por um martelo de massa rígida (Figura 3.5), com uma velocidade  $v_i$  imediatamente antes do impacto, o equilíbrio de forças no topo da composição de hastes ( $x=0$ ) para um instante  $t$  após o impacto pode ser representado por:

$$M_m \times \ddot{u}(t) + Z \times \dot{u}(t) = 0 \quad (3.49)$$

onde  $M_m$  representa a massa do martelo.

Rearranjando a Equação 3.49, resulta:

$$\ddot{u}(t) + \frac{Z}{M_m} \times \dot{u}(t) = 0 \quad (3.50)$$

Como a Equação 3.50 é uma equação diferencial homogênea de segunda ordem, a sua equação característica é dada pela (Equação 3.51) (KREYSZIG; 1988):

$$(\lambda + 0) \left( \lambda + \frac{Z}{M_m} \right) = 0 \quad (3.51)$$

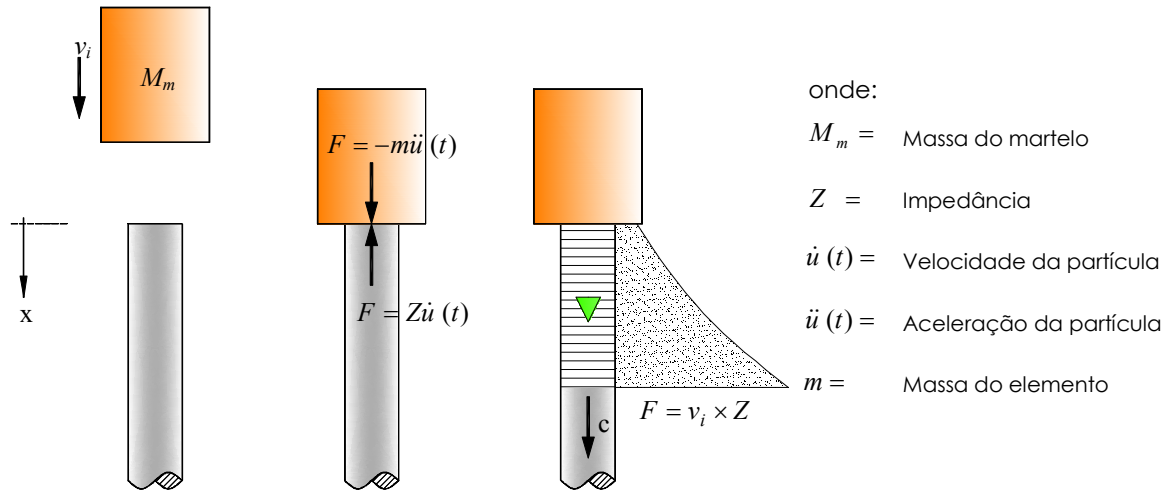
As raízes da Equação 3.51 são  $\lambda_1 = 0$  e  $\lambda_2 = -Z/M_m$ , que são reais e distintas. Desta forma, a solução da Equação 3.50 é dada por:

$$u(t) = C_1 \times e^{\lambda_1 t} + C_2 \times e^{\lambda_2 t} \quad (3.52)$$

ou seja:

$$u(t) = C_1 + C_2 \times e^{-\left(\frac{Z}{M_m}t\right)} \quad (3.53)$$

onde  $C_1$  e  $C_2$  são constantes de integração que dependem das condições de contorno.



**Figura 3.5** – Esquema de propagação da onda de tensão inicial para o caso de martelo rígido e conjunto de hastes elástico (Adaptado de BERNARDES, 1989).

As condições de contorno podem ser estabelecidas sabendo-se que no instante do impacto, o deslocamento do conjunto de hastes é nulo e a velocidade do martelo é  $v_i$ .

1) Para  $u(0) = 0$  tem-se:

$$C_1 = -C_2 \quad (3.54)$$

2) Para  $\dot{u}(0) = v_i$  tem-se:

$$C_2 = -\frac{v_i \times M_m}{Z} \quad (3.55)$$

Substituindo os valores de  $C_1$  e  $C_2$  na Equação 3.52, resulta:

$$u(t) = \frac{v_i \times M_m}{Z} \left[ 1 - e^{-\left(\frac{Z}{M_m}t\right)} \right] \quad (3.56)$$

A Equação 3.56 descreve o deslocamento no topo da composição de hastes, ou seja, para  $x = 0$ . A equação geral do deslocamento é uma função de  $x$  e  $t$ , sendo que o tempo  $t$  deve ser combinado com  $x$ , usando o argumento  $(t-x/c)$ .

$$u(x,t) = \frac{v_i \times M_m}{Z} \left[ 1 - e^{-\frac{Z}{M_m}(t - \frac{x}{c})} \right] \quad (3.57)$$

A força de impacto ( $F_i$ ) é representada por:

$$F_i(x,t) = Z \times \dot{u}(x,t) \quad (3.58)$$

Derivando a Equação 3.57 e substituindo na Equação 3.58, resulta:

$$F_i(x,t) = Z \times v_i \times e^{-\frac{Z}{M_m}(t - \frac{x}{c})} \quad (3.59)$$

A energia transferida para a composição de haste, calculada através da Equação 3.31, é representada por:

$$E(x,t) = Z \times v_i^2 \int_0^t e^{-\frac{2Z}{M_m}(t - \frac{x}{c})} dt \quad (3.60)$$

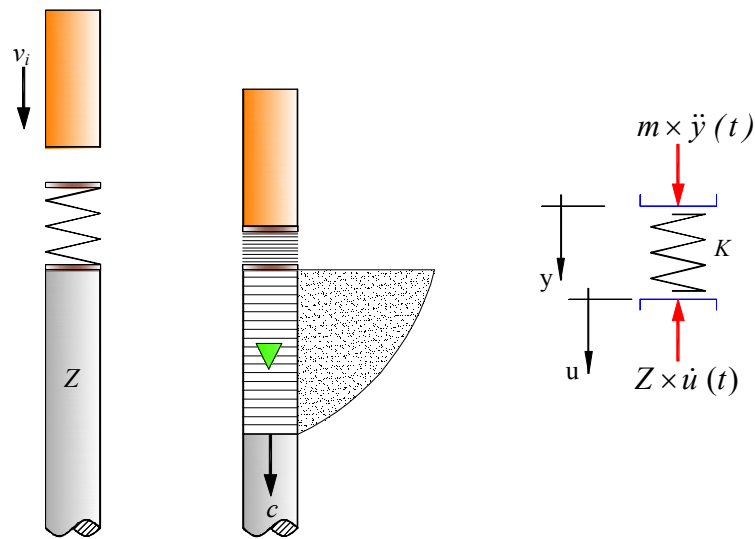
Integrando a Equação 3.60 resulta então a expressão para o cálculo da energia:

$$E(x,t) = \frac{1}{2} \times v_i^2 \times M_m \left[ 1 - e^{-\frac{2Z}{M_m}(t - \frac{x}{c})} \right] \quad (3.61)$$

### 3.6.2 Martelo rígido e coxim elástico

No ensaio SPT brasileiro, a norma NBR 6484 (ABNT, 2001) recomenda a utilização de um coxim de madeira, posicionado na parte interna do martelo. O objetivo desse coxim é reduzir a amplitude da força de impacto, evitando danos no equipamento.

Nesse caso, o ensaio pode ser esquematizado por um martelo rígido atingindo um coxim elástico e aplicando uma força no topo da composição de hastes (Figura 3.6). O deslocamento ( $y$ ) do martelo e o deslocamento ( $u$ ) do topo das hastes define o encurtamento ( $y-u$ ) do coxim em um instante qualquer.



**Figura 3.6** – Esquema de propagação da onda de tensão inicial para um sistema martelo-coxim-haste (Adaptado de BERNARDES, 1989).

As equações diferenciais a seguir representam o equilíbrio do sistema martelo-coxim-haste, quando o peso do martelo é desprezado.

$$M_m \times \ddot{y} + K \times (y - u) = 0 \quad (3.62)$$

$$Z \times \dot{u} - K \times (y - u) = 0 \quad (3.63)$$

onde  $K$  representa a rigidez do coxim

Fazendo  $\beta^2 = K/M_m$  e  $\alpha = K/(2Z)$  e substituindo nas Equações 3.62 e 3.63, resulta:

$$\ddot{y} + \beta^2 y - \beta^2 u = 0 \quad (3.64)$$

$$\dot{u} - 2\alpha \times y + 2\alpha \times u = 0 \quad (3.65)$$

Isolando  $y$  na Equação 3.65 e calculando-se suas derivadas de primeira e segunda ordem, resulta:

$$y = u + \frac{\dot{u}}{2\alpha} \quad (3.66)$$

$$\dot{y} = \dot{u} + \frac{\ddot{u}}{2\alpha} \quad (3.67)$$

$$\ddot{y} = \ddot{u} + \frac{\ddot{u}}{2\alpha} \quad (3.68)$$

Substituindo as Equações 3.66 e 3.68 na Equação 3.64, resulta:

$$\ddot{u} + 2\alpha\dot{u} + \beta^2 u = 0 \quad (3.69)$$

A Equação 3.69 possui duas soluções distintas que variam em função da rigidez do coxim.

### 3.6.2.1 Cxim com baixa rigidez ( $\beta^2 > \alpha^2$ e $K < 4Z^2/M_m$ )

Para resolver a Equação 3.69, inicialmente determina-se a sua equação característica, substituindo-se  $u$  por  $\lambda$ :

$$\lambda^3 + 2\alpha\lambda^2 + \beta^2\lambda = 0 \quad (3.70)$$

Como para este caso  $\beta^2 > \alpha^2$ , a Equação 3.70 tem como solução duas raízes complexas, de modo que a solução da equação geral (Equação 3.69) é dada por:

$$u(t) = C_1 + e^{-\alpha t} (C_2 \sin \omega t + C_3 \cos \omega t) = 0 \quad (3.71)$$

onde  $\omega = \sqrt{(\beta^2 - \alpha^2)}$  e  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  são constantes de integração.

Derivando a Equação 3.71 obtém-se:

$$\dot{u}(t) = e^{-\alpha t} [-\alpha(C_2 \sin \omega t + C_3 \cos \omega t) + \omega(C_2 \cos \omega t - C_3 \sin \omega t)] \quad (3.72)$$

A solução da Equação 3.72 depende da imposição de condições de contorno. Assim, no instante inicial a velocidade da partícula, na composição de haste, é igual a zero. Substituindo  $\dot{u}(0) = 0$  na Equação 3.72, resulta:

$$C_2 = \frac{\alpha \times C_3}{\omega} \quad (3.73)$$

Substituindo  $C_2$  na Equação 3.72, resulta:



$$\dot{u}(t) = \frac{\beta^2}{\omega} \times e^{-\alpha t} \times C_3 \sin(\omega t) \quad (3.74)$$

Derivando novamente:

$$\ddot{u}(t) = \frac{\beta^2}{\omega} \times e^{-\alpha t} \times C_3 (-\alpha \sin(\omega t) + \omega \cos(\omega t)) \quad (3.75)$$

Substituindo as Equações 3.74 e 3.75 na Equação 3.67, resulta:

$$\dot{y}(t) = \frac{\beta^2}{2\alpha\omega} \times e^{-\alpha t} \times C_3 (\alpha \sin(\omega t) + \omega \cos(\omega t)) \quad (3.76)$$

Como no instante inicial a velocidade do martelo é igual a  $v_i$ , ou seja,  $\dot{y}(0) = v_i$ , resulta:

$$C_3 = \frac{2\alpha v_i}{\beta^2} \quad (3.77)$$

Introduzindo o valor de  $C_3$  na Equação 3.75, e sabendo que  $\alpha = K/(2Z)$ , resulta:

$$\dot{u}(t) = \frac{2\alpha v_i}{\omega} \times e^{-\alpha t} \times \sin(\omega t) \quad (3.78)$$

$$\dot{u}(t) = \frac{K \times v_i}{\omega \times Z} \times e^{-\alpha t} \times \sin(\omega t) \quad (3.79)$$

Sendo a força de impacto  $F_i = Z \times \dot{u}(t)$ , resulta:

$$F_i = \frac{K \times v_i}{\omega} \times e^{-\alpha t} \times \sin(\omega t) \quad (3.80)$$

A equação do deslocamento (Equação 3.82) pode ser obtida através da integração da Equação 3.79:

$$u(t) = \int_0^t \dot{u}(t) dt \therefore \int_0^t \frac{K \times v_i}{\omega \times Z} \times e^{-\alpha t} \times \sin(\omega t) dt \quad (3.81)$$

$$u(t) = \frac{K \times v_i}{Z} \times \frac{1}{\alpha^2 + \omega^2} \left[ 1 - \frac{e^{-\alpha t}}{\omega} (\alpha \sin(\omega t) + \omega \cos(\omega t)) \right] \quad (3.82)$$

Substituindo  $u(t)$  e  $F(t)$  na Equação 3.31, obtém-se a expressão que fornece a energia transferida para a composição de hastes, quando se utiliza um coxim de baixa rigidez (Equações 3.83 e 3.84).

$$E(t) = \int_0^t F(t) \times \dot{u}(t) dt = \frac{1}{Z} \times \left( \frac{K \times v_i}{\omega} \right)^2 \int_0^t e^{-2\alpha t} \times \sin^2(\omega t) dt \quad (3.83)$$

ou

$$E(t) = \frac{1}{Z} \times \left( \frac{K \times v_i}{\omega} \right)^2 \left\{ \frac{\omega^2}{4\alpha \times (\alpha^2 + \omega^2)} \left[ 1 - \frac{e^{-\alpha t}}{\omega} (\alpha \sin(2\omega t) + \omega \cos(2\omega t)) \right] - \frac{1}{2\alpha} e^{-2\alpha t} \sin^2(\omega t) \right\} \quad (3.84)$$

A força de impacto (Equação 3.80) atinge o seu valor máximo quando  $dF/dt = 0$ , ou seja, quando a derivada segunda do deslocamento for igual a zero,  $\ddot{u}(0) = 0$ . Assim, resulta:

$$\alpha \sin(\omega t) = \omega \cos(\omega t) \therefore t = \frac{1}{\omega} \times \arctan \frac{\omega}{\alpha} \quad (3.85)$$

A Equação 3.80 é uma senoide, ou seja, a força pode assumir valores positivos (compressão) e negativos (tração). Neste sistema não existe ligação entre o conjunto martelo-coxim-haste, de modo que a transmissão da força é interrompida no instante em que surge uma força de tração que ocorre no instante dado pela Equação 3.85. Essa equação só é válida no intervalo de tempo variando de  $t = 0$  a  $t = \pi/\omega$  (Figura 3.7).

$$\sin(\omega t) = 0 \therefore t = \frac{\pi}{\omega} \quad (3.86)$$

### 3.6.2.2 Coxim rígido ( $\beta^2 < \alpha^2$ e $K > 4Z^2/M_m$ )

A solução para este caso pode ser encontrada de maneira análoga ao primeiro caso. Desta forma, as equações que fornecem o deslocamento  $u(t)$  e a força de impacto  $F(t)$  no topo da composição de hastes são as seguintes:

$$u(t) = \frac{v_i \times k}{Z} \times \frac{1}{(\omega^2 - \alpha^2)} \left[ \frac{e^{-\alpha t}}{\omega} (\omega \cosh(\omega t) + \alpha \sinh(\omega t)) - 1 \right] \quad (3.87)$$

$$F(t) = \frac{v_i \times k}{\omega} \times e^{-\alpha t} \times \sinh(\omega t) \quad (3.88)$$

onde  $\omega = \sqrt{(\alpha^2 - \beta^2)}$

A energia transferida para o conjunto de hastes pode ser obtida utilizando os valores de força e velocidade (Equação 3.31) ou utilizando apenas o valor da força (Equação 3.88).

$$E(t) = \int_0^t F(t) \times \dot{u}(t) dt = \frac{1}{Z} \int_0^t F^2(t) dt \quad (3.89)$$

Substituindo  $u(t)$  e  $F(t)$  na Equação 3.89, obtém-se a expressão que fornece a energia transferida para a composição de hastes, quando se utiliza um coxim rígido (Equações 3.90 e 3.91).

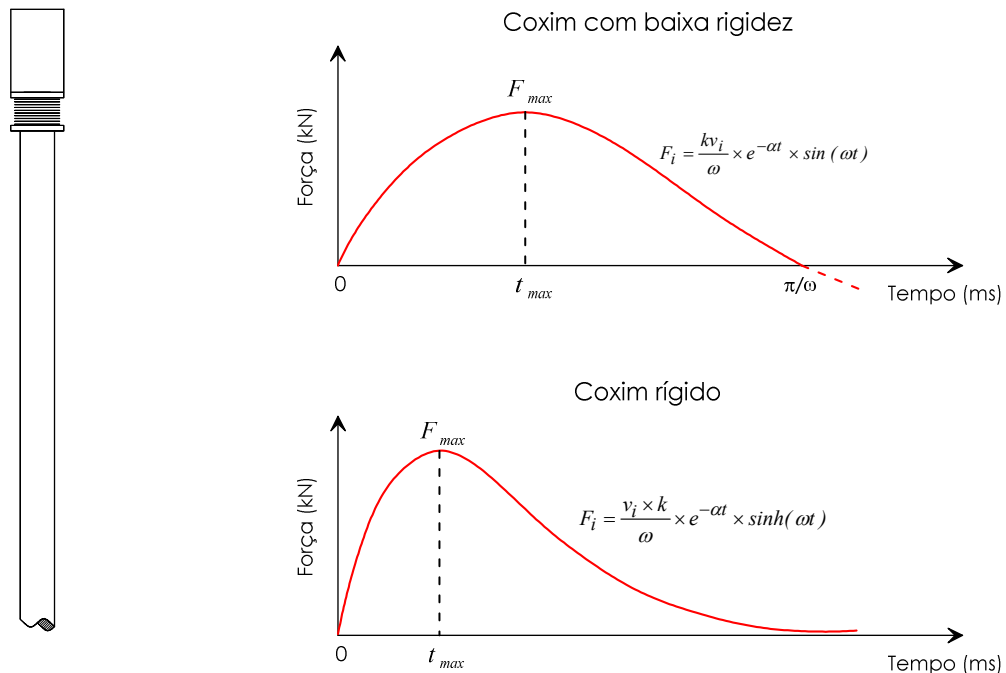
$$E(t) = \frac{1}{Z} \times \left( \frac{k \times v_i}{\omega} \right)^2 \int_0^t e^{-2\alpha t} \times \sinh^2(\alpha t) dt \quad (3.90)$$

Ou

$$E(t) = \frac{1}{Z} \left( \frac{k \times v_i}{\omega} \right)^2 \left\{ \frac{\omega^2}{4\alpha(\alpha^2 - \omega^2)} + \frac{\omega e^{-2\alpha t}}{8\alpha} \left[ \frac{e^{2\alpha t}}{(-\alpha + \omega)} - \frac{e^{-2\alpha t}}{(-\alpha - \omega)} \right] - \frac{e^{-2\alpha t}}{2\alpha} \times \sinh^2(\alpha t) \right\} \quad (3.91)$$

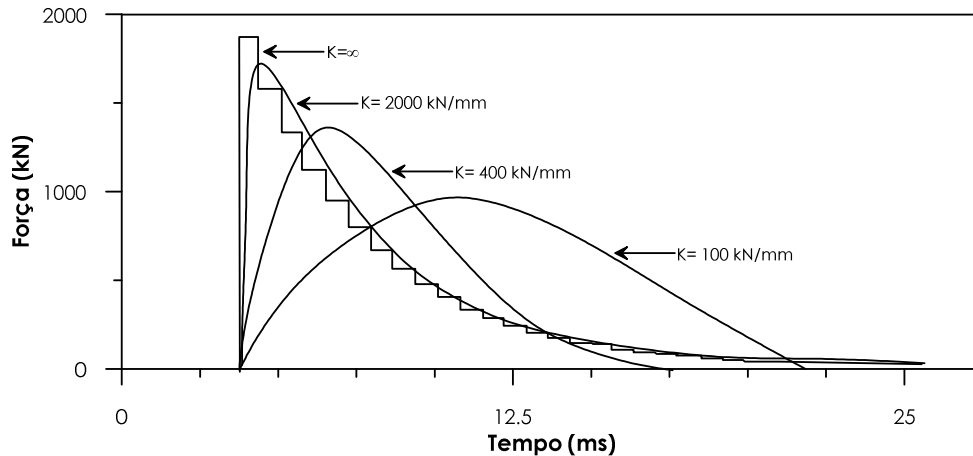
A Equação 3.88 atinge o seu valor máximo no ponto onde  $dF/dt = 0$ , ou seja, quando a derivada segunda do deslocamento for igual a zero,  $\ddot{u}(0) = 0$  (Equação 3.92). No caso do coxim rígido o comprimento teórico da onda de tensão inicial é infinitamente grande uma vez que a força de impacto ( $F_i$ ) não se anula para nenhum instante de tempo (Figura 3.7).

$$t = \frac{1}{\omega} \times \tanh^{-1} \left( \frac{\omega}{\alpha} \right) \quad \left| \frac{\omega}{\alpha} \right| < 1 \quad (3.92)$$



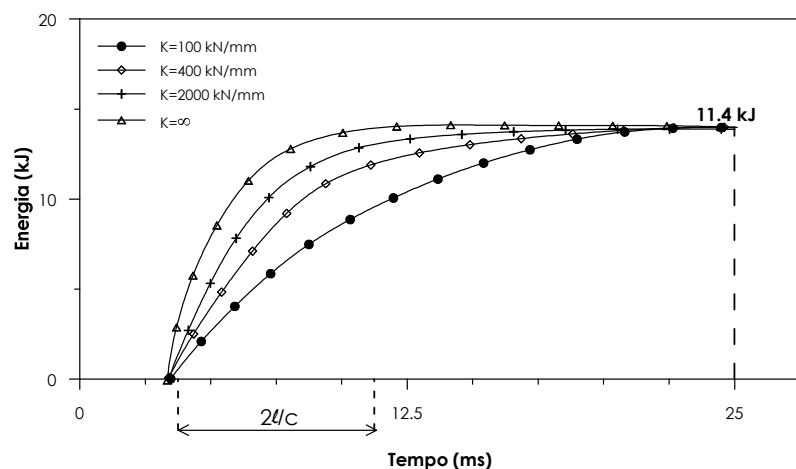
**Figura 3.7** – Esquema de propagação da onda de tensão inicial considerando coxins com diferentes rigidez (Adaptado de BERNARDES, 1989).

Berglars (1983; apud Bernardes, 1989) avaliou as características da primeira onda de tensão que se propaga em uma estaca. Esse autor utilizou as equações teóricas, mostradas anteriormente, para a determinação da energia transmitida para a estaca considerando coxins com diferentes valores de rigidez. Observou-se que a rigidez do coxim influencia diretamente na forma da primeira onda de tensão teórica em termos de força e energia (Figura 3.8 e Figura 3.9)



**Figura 3.8** – Influência da rigidez do coxim na forma da primeira onda de tensão (Adaptado de BERGLARS, 1983 apud BERNARDES, 1989).

Os resultados indicam que apesar da energia total entregue ao sistema ser a mesma o mecanismo de transferência de energia varia de acordo com a rigidez do coxim (Figura 3.9). Quanto maior a rigidez do coxim menor será o tempo necessário para que a energia total seja entregue ao sistema, em alguns casos a transferência total ocorre antes da reflexão da primeira onda de tensão ( $t=2l/c$ ).



**Figura 3.9** – Influência da rigidez do coxim na transferência de energia para a estaca durante a primeira onda de tensão (Adaptado de BERGLARS, 1983 apud BERNARDES, 1989).

### 3.7 Resistência dinâmica no topo da composição de hastes

A interpretação dos sinais de força e velocidade durante a propagação da onda de tensão realizada no topo do amostrador fornece resultados mais realísticos em relação ao comportamento do solo. No entanto, o posicionamento da instrumentação próximo ao amostrador é bastante crítico, uma vez que requer cuidados especiais a fim de evitar possíveis danos ao equipamento. Assim, Jansz et al., (1976; apud Bernardes, 1989) desenvolveram um procedimento para interpretar os sinais quando a instrumentação encontra-se posicionada no topo da estaca. Nesse procedimento, que é aplicável apenas para estacas com seção transversal constante, a força e a velocidade totais são fornecidas pelas equações de uma onda (Equações 3.93 e 3.94).

$$F(x,t) = F \downarrow (x,t) + F \uparrow (x,t) \quad (3.93)$$

$$v(x,t) = \frac{F \downarrow (x,t) - F \uparrow (x,t)}{Z} \quad (3.94)$$

Rearranjando as Equações 3.93 e 3.94 obtém-se as equações da onda descendente (wave down) e da onda ascendente (wave up), conforme mostrado a seguir:

$$F \downarrow (x,t) = \frac{1}{2} [F(x,t) + vZ_H(x,t)] \quad (\text{wave down}) \quad (3.95)$$

$$F \uparrow (x,t) = \frac{1}{2} [F(x,t) - vZ(x,t)] \quad (\text{wave up}) \quad (3.96)$$

Pesquisadores (BERNARDES, 1989; BREDEBERG, 1982 e RAUSCHE et al, 1985) mostraram que a resistência dinâmica do solo ( $R_{ult}$ ) pode ser determinada através de sinais de força e velocidade registrados no topo da estaca (Equação 3.97). Nesta solução, por simplificação, as forças de amortecimento foram desprezadas.

$$R_{ult} = \frac{1}{2} \left[ F(t) + F\left(t + 2\frac{\ell}{c}\right) \right] + \frac{Z}{2} \left[ v(t) - v\left(t + 2\frac{\ell}{c}\right) \right] \quad (3.97)$$

Rausche et al. (1982) demonstraram que se forem consideradas as forças de amortecimento ( $J$ ) e assumindo-se que a resistência dinâmica seja uma função linear da velocidade na extremidade da estaca, a resistência estática máxima ( $R_s$ ) pode ser representada pela seguinte equação:

$$R_s = \frac{1}{2}(1-J)[F(t)+Zv(t)] + \frac{1}{2}(1+J)\left[F\left(t+2\frac{\ell}{c}\right) - Zv\left(t+2\frac{\ell}{c}\right)\right] \quad (3.98)$$

A Equação 3.98 representa o método Case, que é utilizado para a estimativa da capacidade de carga em estacas.

Abou-matar et al. (1996) utilizaram medidas de força e velocidade, obtidas através de instrumentação dinâmica no ensaio SPT, para desenvolver um método para a determinação de constantes do solo. Os autores observaram uma boa concordância entre os parâmetros obtidos para os ensaios estáticos e dinâmicos

### 3.8 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos de propagação de ondas de tensão aplicados ao caso da composição de hastes do ensaio SPT. A Equação 3.20, que descreve o movimento da propagação longitudinal de uma onda de tensão ao longo de uma barra, apesar de ser usualmente empregada no ensaio SPT, não representa com fidelidade as reais condições do evento. Esta equação deveria ser reformulada para considerar um referencial móvel que se atualiza ao longo do evento. Neste sentido o sistema de coordenadas lagrangeanas representa uma solução adequada, uma vez que permite determinar as equações de trajetória do movimento.

Foram apresentadas a dedução das equações para o cálculo da energia contida em uma onda de tensão assim como a influência das condições de contorno (extremidade da haste e impedância) na propagação da onda de tensão. Adicionalmente, foram mostradas soluções analíticas para a primeira onda de tensão, considerando as situações de martelo e haste com impedância iguais e diferentes e com coxim de baixa rigidez e rígido. Estas soluções foram propostas por Bernardes (1989) com base em trabalhos desenvolvidos por Bredenberg (1982).

Esses conceitos são de fundamental importância para o entendimento da propagação de ondas em barras de tensão e conseqüentemente no mecanismo de transferência de energia para o solo. As análises que serão apresentadas em capítulos posteriores foram desenvolvidas com base nos conceitos teóricos apresentados nos Capítulos 2 e 3 desse trabalho.

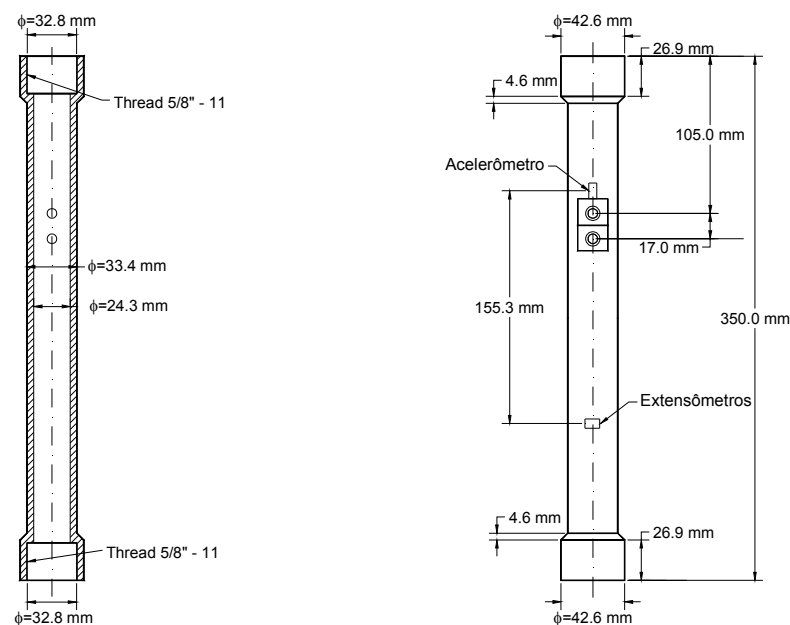


# Capítulo 4

## Desenvolvimento do equipamento

### 4.1 Segmento de Haste

O segmento de haste instrumentado deve apresentar como característica principal a mesma impedância mecânica da haste utilizada no ensaio SPT, evitando assim a reflexão de ondas indesejadas. Desta forma, o segmento de haste utilizado para a instalação dos acelerômetros e dos extensômetros elétricos (*strain gauges*) foi construído com os mesmos diâmetros nominais, interno e externo, da haste de sondagem padronizada pela NBR 6484 (ABNT, 2001) (Figura 4.1). O segmento de haste instrumentado foi projetado seguindo o trabalho desenvolvido por Odebrecht (2003). Neste segmento de haste foram projetadas duas luvas utilizadas para a fixação das hastes de sondagem.



(a)- Dimensão do segmento de haste

(b)- Posicionamento dos sensores

**Figura 4.1** – Projeto geométrico do segmento de haste (Dimensões em mm).

O aço utilizado para a confecção do segmento de haste deve suportar a tensão gerada na haste devido à aplicação do golpe do martelo, mantendo suas propriedades iniciais mesmo após o uso intenso. Belincanta (1998) constatou que as células de carga confeccionadas utilizando a própria haste do ensaio SPT (ABNT, 2001) apresentaram alterações significativas na constante de calibração após a realização de vários ensaios de

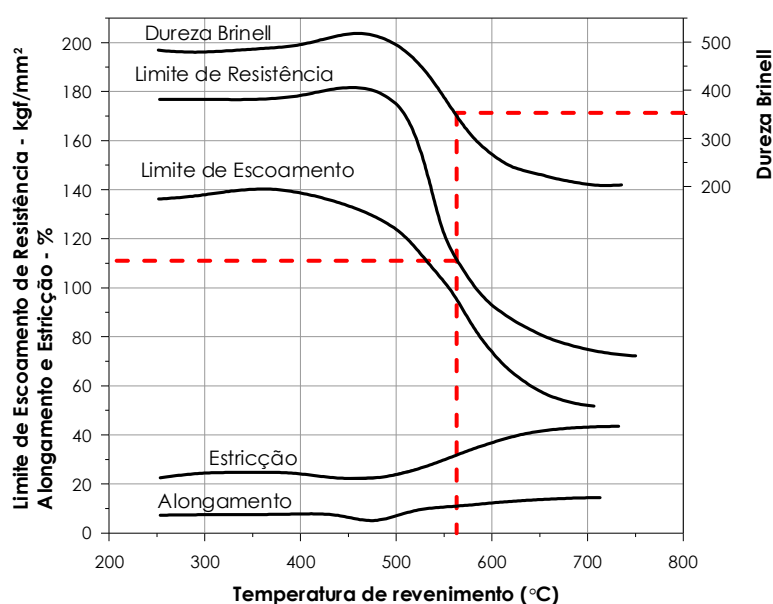


campo. Assim, torna-se necessária a utilização de um aço de resistência mais elevada e conseqüentemente a obtenção de células de carga mais robustas.

O segmento de haste foi construído utilizando o aço inoxidável martensítico (VC – 150), que possui na sua composição 0.35 % de carbono e 13 % de cromo. Esse material é fornecido com limite de resistência à tração de 640 MPa e limite de escoamento de 345 MPa (ODEBRECHT, 2003).

Após o processo de usinagem o segmento de haste recebeu um tratamento térmico para melhorar suas características de resistência. Esse tratamento térmico foi realizado em duas etapas: têmpera e revenimento. O processo de têmpera é indicado para materiais que possuem na sua constituição a porcentagem de carbono igual ou superior a 0.4 %. O seu principal objetivo é aumentar a dureza e conseqüentemente aumentar a fragilidade. A fragilidade do material temperado é reduzida através do processo de revenimento. Esse processo consiste em aquecer a peça temperada até uma determinada temperatura resfriando-a em seguida. A temperatura de revenimento pode ser determinada através de tabelas específicas para cada tipo de aço.

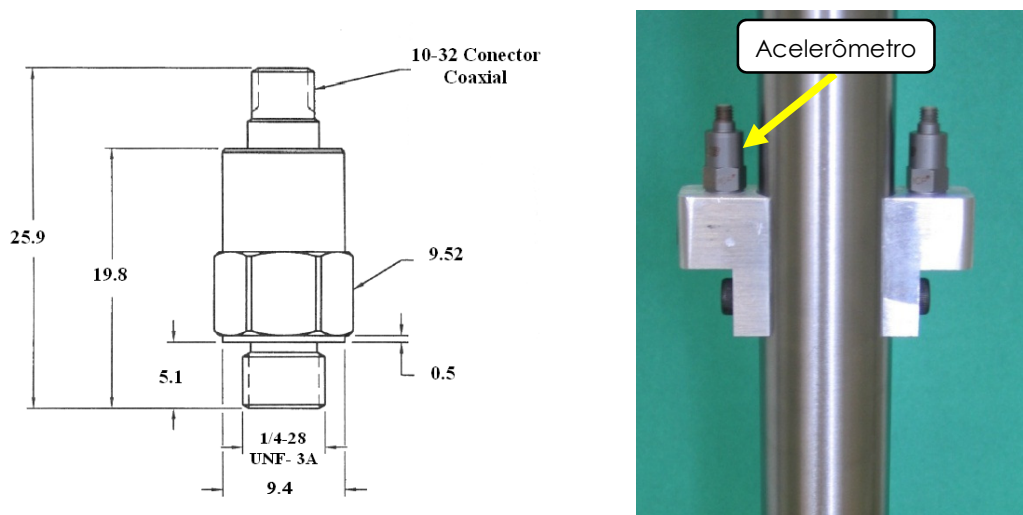
Nesse trabalho a temperatura de revenimento foi determinada em função das características mecânicas desejadas. O segmento de haste foi revenido à temperatura de 560°C, obtendo-se uma resistência de aproximadamente 1084 MPa (110 kgf/mm<sup>2</sup>) e uma dureza de 350 Brinnell. A Figura 4.2 indica a variação das propriedades mecânicas do aço em função da temperatura de revenimento.



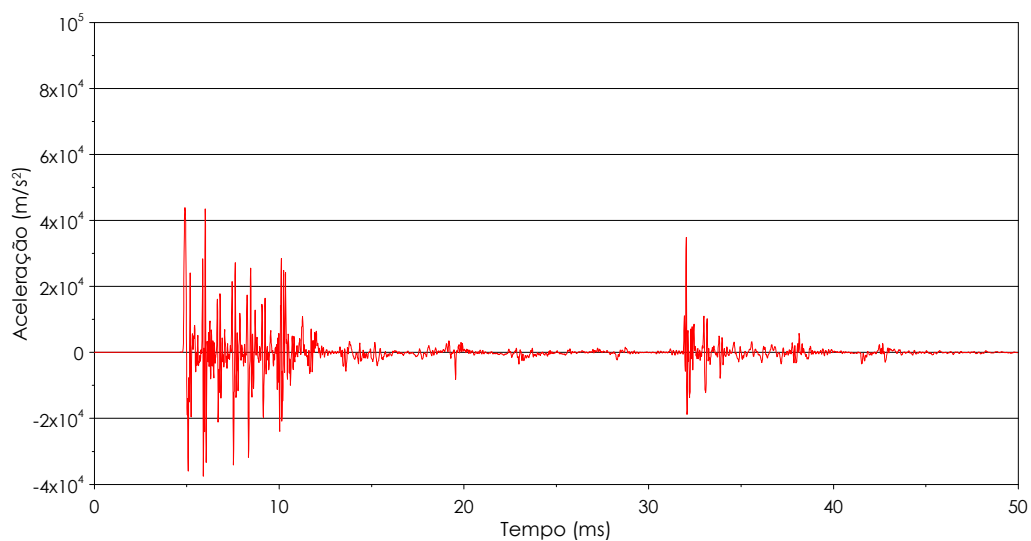
**Figura 4.2** – Variação das propriedades mecânicas em função da temperatura de revenimento (modificado de ODEBRECHT, 2003).

## 4.2 Acelerômetros

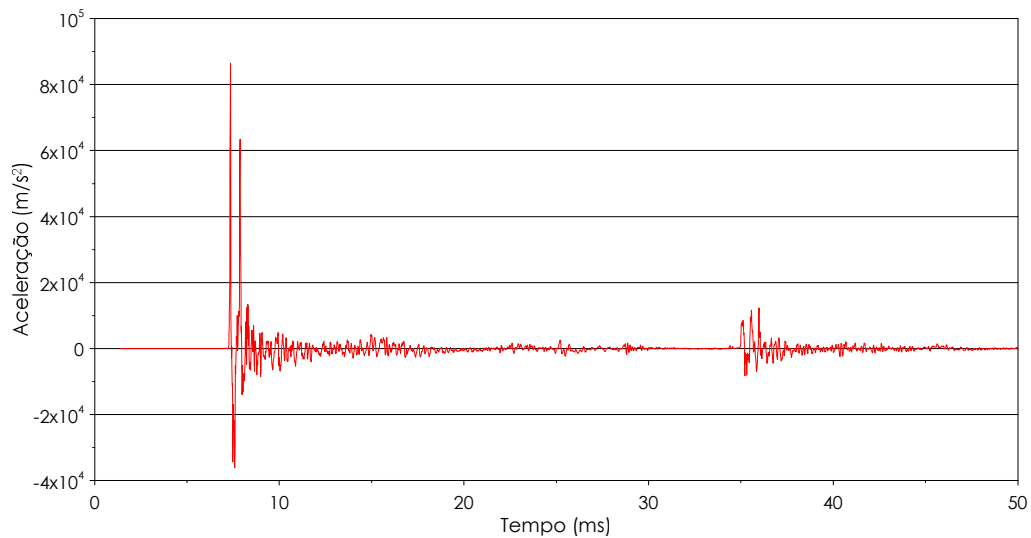
Inicialmente foram adquiridos acelerômetros do tipo piezoelétrico, da marca PCB Piezotronics, modelo 350B04 (Figura 4.3). Esse acelerômetro, que é capaz de medir acelerações de até 5000 g ( $\approx 49000 \text{ m/s}^2$ ) é indicado para trabalhar numa faixa de frequência situada entre 0.4 a 10000 Hz. No entanto, comparando-se os sinais de aceleração registrados no topo do conjunto de hastes e em uma seção logo acima do amostrador (Figura 4.4 e Figura 4.5) constatou-se a necessidade da utilização de um acelerômetro com uma faixa de utilização superior a 5000 g para registros de aceleração acima do amostrador.



**Figura 4.3** – Dimensões do acelerômetro modelo 350B04 (mm).



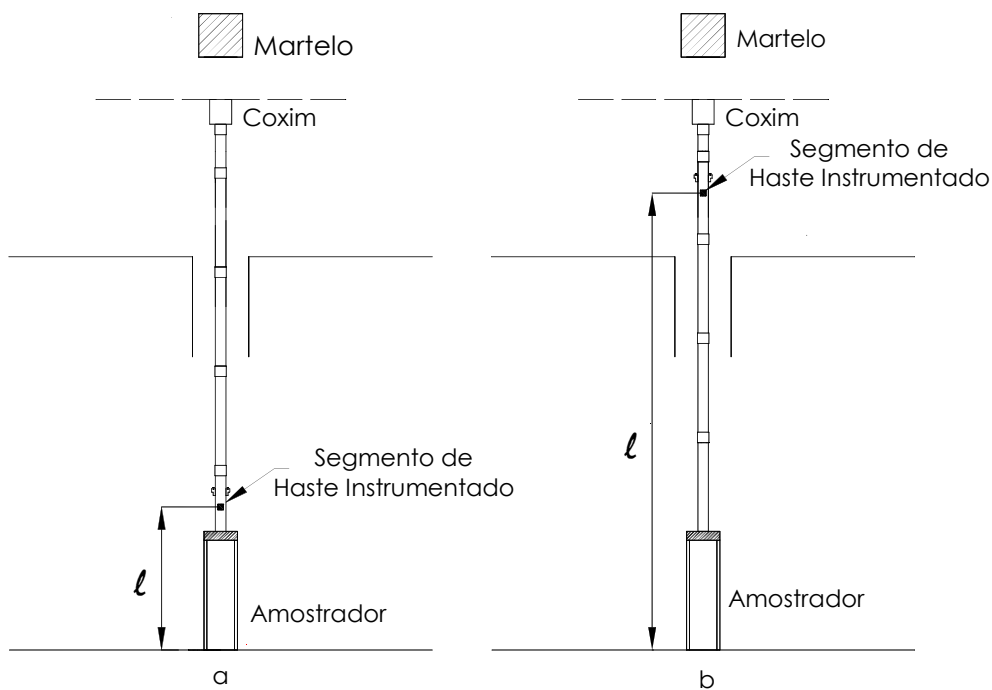
**Figura 4.4** – Registro típico de aceleração versus tempo para o segmento de haste posicionado no topo do conjunto de hastes.



**Figura 4.5** – Registro típico de aceleração versus tempo para o segmento de haste posicionado acima do amostrador.

Como a resistência do solo é relativamente baixa, no caso do ensaio SPT, pode-se considerar que a extremidade da haste encontra-se livre (resistência de ponta nula) ocorrendo o seu deslocamento. Esse deslocamento da extremidade gera uma reflexão na forma de uma onda de tração. Quando a instrumentação encontra-se próxima ao amostrador (Figura 4.6a) o tempo entre a chegada da onda de compressão e a reflexão da onda de tração é bastante curto. Desta forma, a onda refletida alcança o impulso gerado no topo da composição de hastes, quanto este ainda possui uma intensidade elevada, ocasionando valores de aceleração que superam a capacidade máxima útil dos acelerômetros (5000 g).

Quando a instrumentação está posicionada abaixo da cabeça de bater (Figura 4.6b), o tempo entre a chegada da onda de compressão e a reflexão da onda de tração aumenta. Assim, a onda refletida alcança o impulso gerado no topo da composição de hastes quando este já possui uma intensidade menor e conseqüentemente os registros de aceleração apresentam-se inferiores à capacidade máxima útil do acelerômetro.

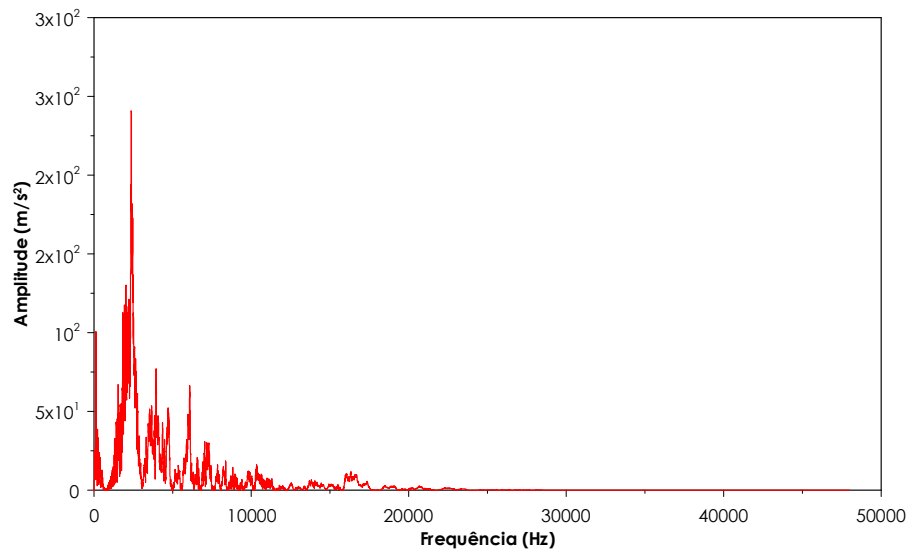


**Figura 4.6** – Intervalo de tempo de acordo com o posicionamento da instrumentação.

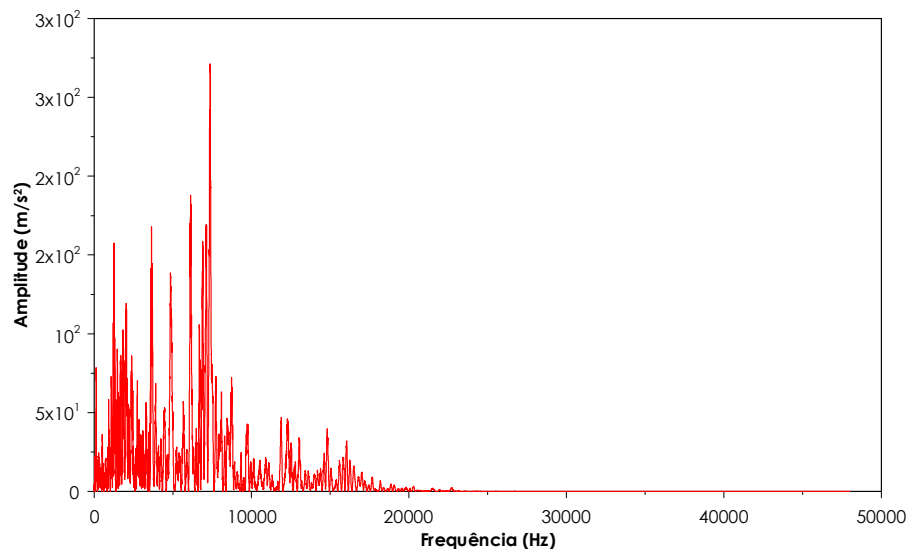
Em termos práticos, pode-se considerar que os sinais de vibração são constituídos por uma combinação de inúmeras senóides com diferentes frequências. Essas frequências não podem ser observadas analisando as respostas de amplitude no domínio do tempo. Assim, utiliza-se a técnica de análise no domínio da frequência através da construção de um espectrograma de frequência, ou seja, um histograma que relaciona a amplitude (nível) do sinal com sua respectiva frequência. Através desta análise é possível descobrir a causa de uma vibração indesejada.

A amplitude da vibração pode ser quantificada de diversas maneiras, tais como: nível pico a pico, nível de pico, nível médio e o nível quadrático médio ou valor eficaz (RMS- *Root Mean Square*). Neste trabalho, o cálculo da amplitude da vibração foi realizado através do método RMS que indica a média da energia contida no movimento vibratório indicando o potencial destrutivo da vibração.

Os sinais de aceleração plotados no espectro de frequência (Figura 4.7 e Figura 4.8) mostraram que frequências até cerca de 15000 Hz apresentam importância significativa no golpe do martelo. Assim, observa-se que o acelerômetro 350B04 não atende os requisitos referentes a frequência para o caso da instrumentação posicionada na base da composição de hastes.



**Figura 4.7** – Espectro de frequência de aceleração (instrumentação posicionada acima do amostrador).



**Figura 4.8** – Espectro de frequência de aceleração (instrumentação posicionada no topo do conjunto de hastes).

Essas análises permitiram concluir que a instrumentação localizada próxima ao amostrador, para o ensaio SPT normatizado pela NBR 6484 (ABNT, 2001), necessita de acelerômetros com uma faixa de utilização máxima que permita leituras de aceleração próximas a 10000 g e que trabalhem em uma faixa de frequência de pelo menos 15000 Hz. Desta forma foram adquiridos novos acelerômetros do tipo piezoelétrico, da marca PCB Piezotronics, modelo 350M77 (Figura 4.9). Este sensor é capaz de medir acelerações até 20000 g ( $\approx 196200 \text{ m/s}^2$ ) e é indicado para trabalhar numa faixa de frequência situada entre 1 a 15000 Hz. Esse novo acelerômetro mostrou-se adequado para

medidas de aceleração tanto em seções localizadas no topo da composição de hastes como em seções imediatamente acima do amostrador.

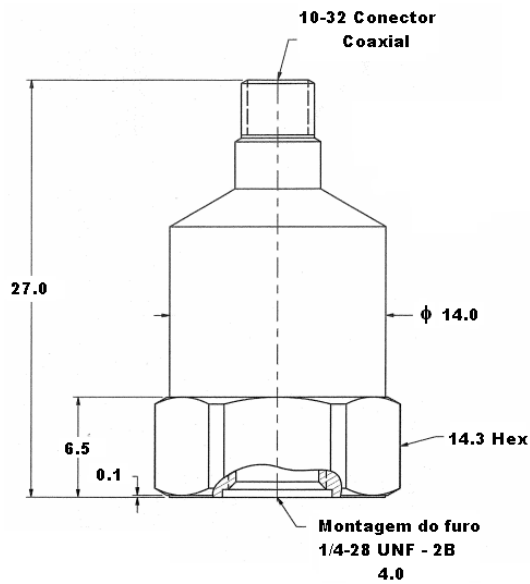
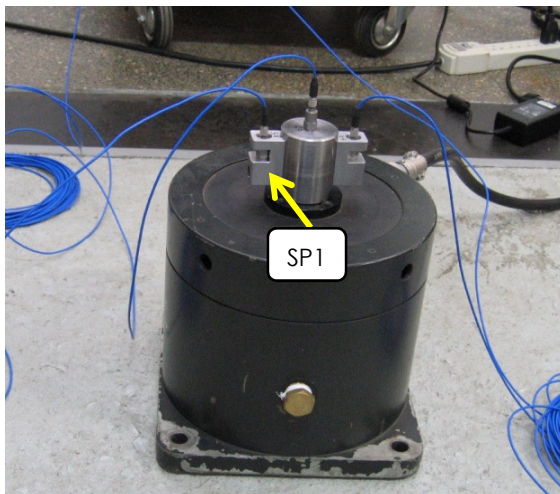


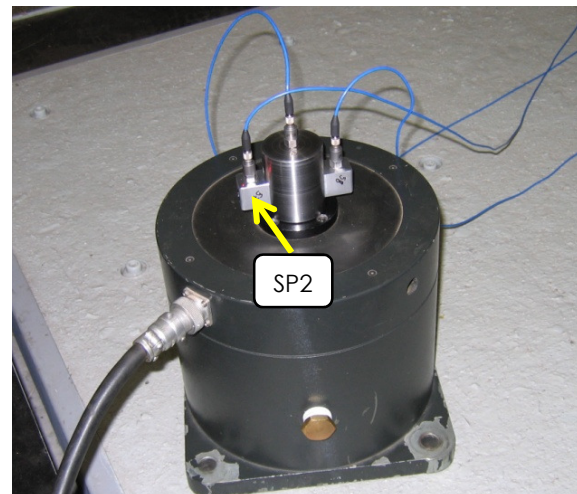
Figura 4.9 – Dimensões do acelerômetro modelo 350M77 (mm).

### 4.3 Suporte para fixação dos acelerômetros

Inicialmente foram projetados suportes (SP1) para a fixação dos acelerômetros visando à proteção mecânica dos sensores. Neste projeto os suportes eram dotados de uma aba superior (Figura 4.10a).



(a)



(b)

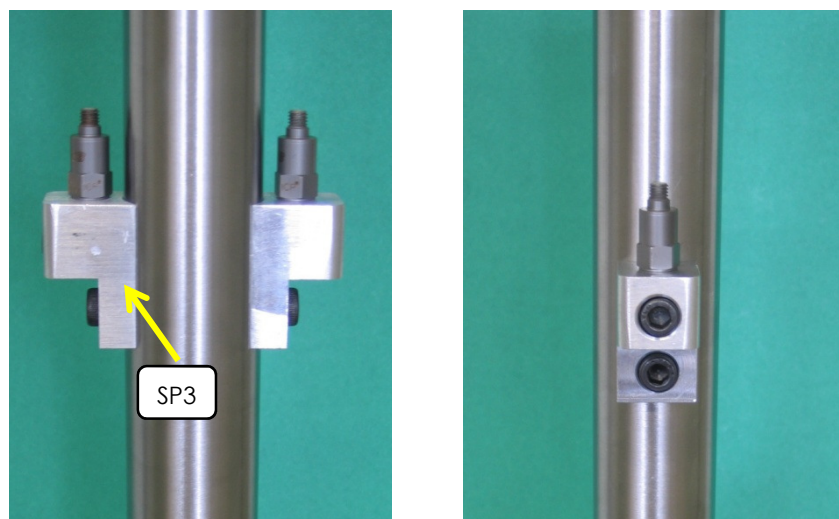
Figura 4.10 – Suportes iniciais projetados para a fixação dos acelerômetros (SP1 e SP2).

No entanto, ensaios dinâmicos de laboratório mostraram que a aba superior induzia vibrações adicionais que acarretavam interferência nas leituras dos sinais. Esses resultados,

que serão apresentados posteriormente, mostraram que esse modelo de suporte não se apresentava adequado para serem utilizados nos ensaios SPT.

Desta forma, o projeto inicial do suporte foi alterado com a eliminação da aba superior (SP2) (Figura 4.10b). Neste caso, durante os ensaios de campo, a proteção dos acelerômetros pode ser feita através da aplicação de uma espessa camada de borracha de silicone envolvendo totalmente os acelerômetros.

Adicionalmente, foi desenvolvido um terceiro modelo de suporte (SP3) alterando-se a geometria do suporte SP2 com o intuito de aumentar a rigidez da peça (Figura 4.11). Esse novo suporte também foi testado em laboratório e posteriormente comparado com os resultados dos ensaios de laboratório dos demais suportes (SP1 e SP2). Através dessas análises comparativas foi determinado qual desses modelos de suporte apresentava-se mais adequado para ser utilizado nos ensaios de SPT realizados em campo.



**Figura 4.11** – Nova proposta de suporte para a fixação dos acelerômetros (SP3).

#### **4.3.1 Ensaios dinâmicos de laboratório.**

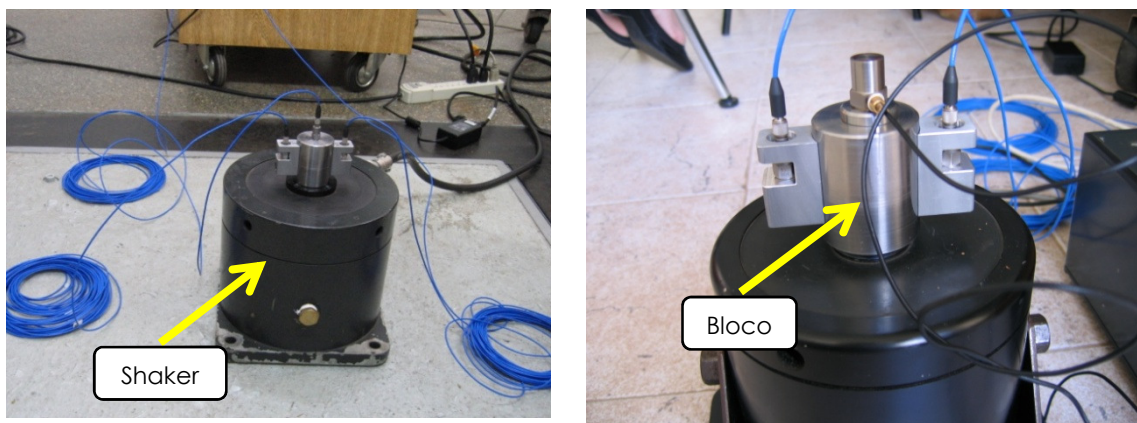
Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Dinâmica do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos. Contou-se com o auxílio de um excitador eletrodinâmico (*shaker*) da marca B&K, modelo 4809 e um *vibrômetro laser* da marca Polytec, modelo CLV 1000. O *shaker* é um dispositivo que permite excitar um sistema, com amplitude e frequência controladas, determinando assim as características dinâmicas desse sistema. O excitador eletrodinâmico funciona de maneira inversa ao transdutor eletrodinâmico. No momento que a corrente elétrica passa pelo enrolamento, imerso em



um campo magnético, será gerada uma força, proporcional a corrente elétrica e a intensidade de fluxo magnético, causando a aceleração da base do excitador.

O *vibrômetro laser* é um instrumento capaz de medir as vibrações que ocorrem em um determinado corpo, sem a necessidade de contato com a superfície onde está ocorrendo a vibração. O feixe do *laser* é direcionado para a superfície de interesse medindo-se a amplitude e a frequência da vibração através do deslocamento *Doppler* da frequência do raio laser. A saída do *vibrômetro laser* é uma tensão contínua diretamente proporcional à componente de velocidade do alvo na direção do feixe do laser.

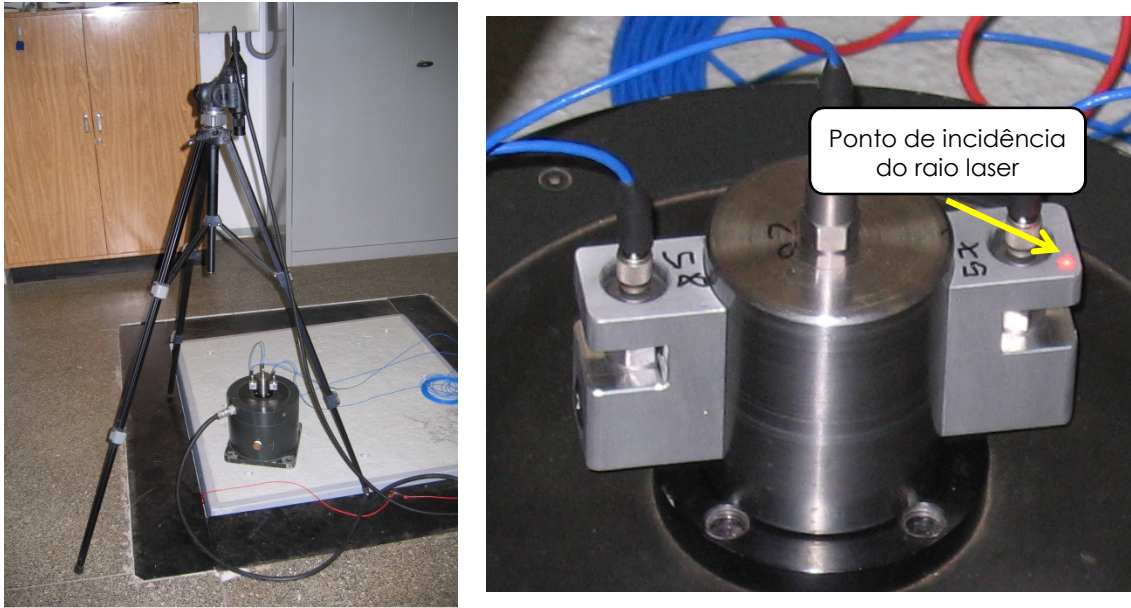
Inicialmente, o principal objetivo desses ensaios foi verificar se os sinais obtidos em cada um dos acelerômetros eram semelhantes entre si e também se esses sinais podiam ser considerados representativos do sinal que estava chegando à haste. Para isso foi construído um bloco cilíndrico, com diâmetro idêntico ao da haste do ensaio SPT e altura de 55 mm. Esse bloco foi fixado ao *shaker* para que o sistema fosse excitado representando as condições de campo. Foram instalados três acelerômetros ao bloco cilíndrico, sendo que dois desses foram posicionados lateralmente no suporte e o outro centralizado no topo do bloco (Figura 4.12).



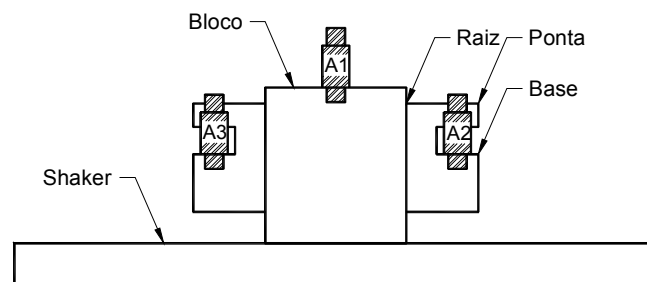
**Figura 4.12** – Esquemática do ensaio com o Shaker.

A seguir o *shaker* foi acionado para provocar vibrações no sistema montado. Posteriormente o *vibrômetro laser* (Figura 4.13) foi posicionado apontando para quatro diferentes partes do sistema, denominadas de: base, bloco, raiz e ponta (Figura 4.14 e Figura 4.15). Para cada posição apontada pelo raio laser foram realizadas leituras dos sinais provenientes dos acelerômetros e do *vibrômetro laser*.

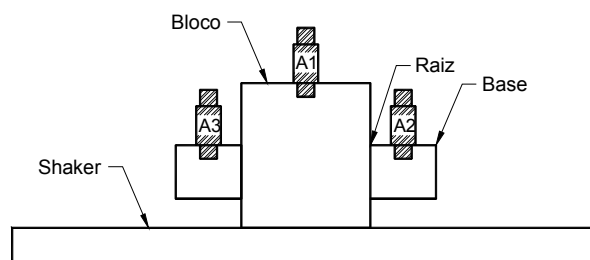




**Figura 4.13** – Ensaio com o vibrômetro laser em andamento.



**Figura 4.14** – Esquema adotado para a realização dos ensaios (SP1).



**Figura 4.15** – Esquema adotado para a realização dos ensaios (SP2).

Ensaio adicionais foram realizados com o novo projeto de suporte para os acelerômetros (SP3). Nesse ensaio, além da fixação por meio de parafusos, o suporte foi colado no bloco utilizando-se um produto a base de etil-cianoacrilato. Os ensaios foram realizados utilizando-se apenas o *shaker*, uma vez que não foi constatada a necessidade de investigações específicas devido à inexistência de vibrações adicionais.

### 4.3.2 Análise dos resultados

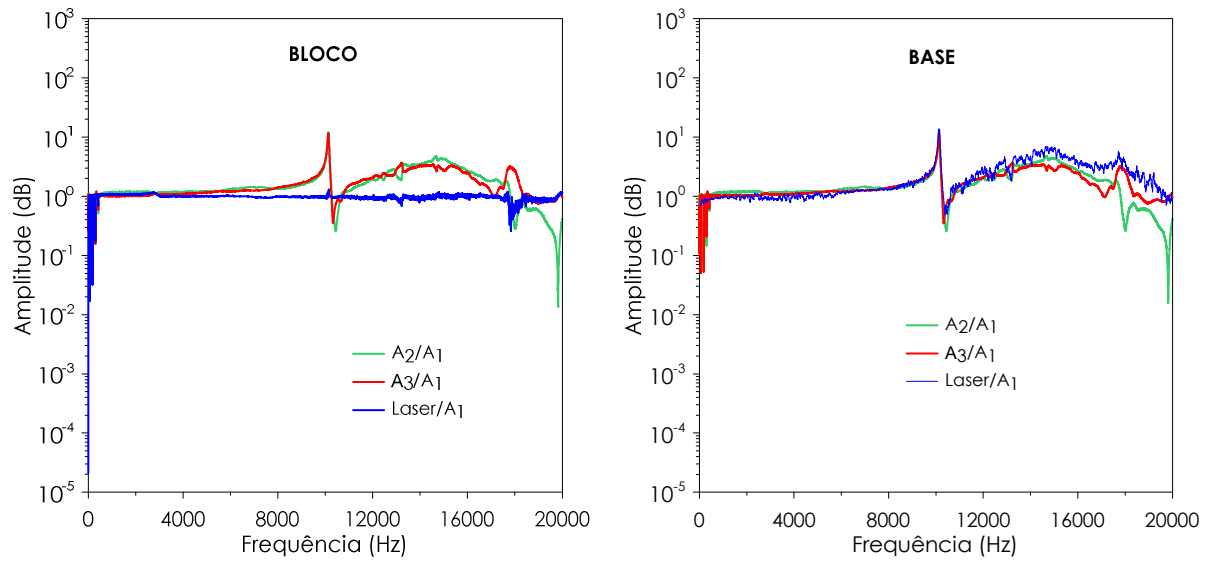
Os resultados dos ensaios realizados com o *shaker* e com o *vibrômetro laser* foram interpretados utilizando-se os valores de transmissibilidade ( $T$ ). A transmissibilidade é definida como sendo uma relação entre duas grandezas de mesma natureza. Neste trabalho, a transmissibilidade foi obtida em termos de aceleração. O objetivo principal desses ensaios foi verificar se os sinais registrados pelos acelerômetros laterais eram equivalentes aos sinais que chegavam até o bloco. Convencionou-se como referência o acelerômetro posicionado no topo do bloco cilíndrico (A1). Assim, a transmissibilidade foi obtida através da relação entre as leituras dos acelerômetros laterais (A2 e A3) e a leitura do *vibrômetro laser* com o acelerômetro posicionado no topo (A1). Como o *vibrômetro laser* fornece valores de velocidade, esses valores foram convertidos para valores de aceleração a fim de se determinar a transmissibilidade referente ao laser. Essa transformação foi realizada utilizando-se a expressão a seguir:

$$T = \frac{(\text{Velocidade laser}) \times 2\pi \times f}{\text{Aceleração (A1)}} \quad (4.1)$$

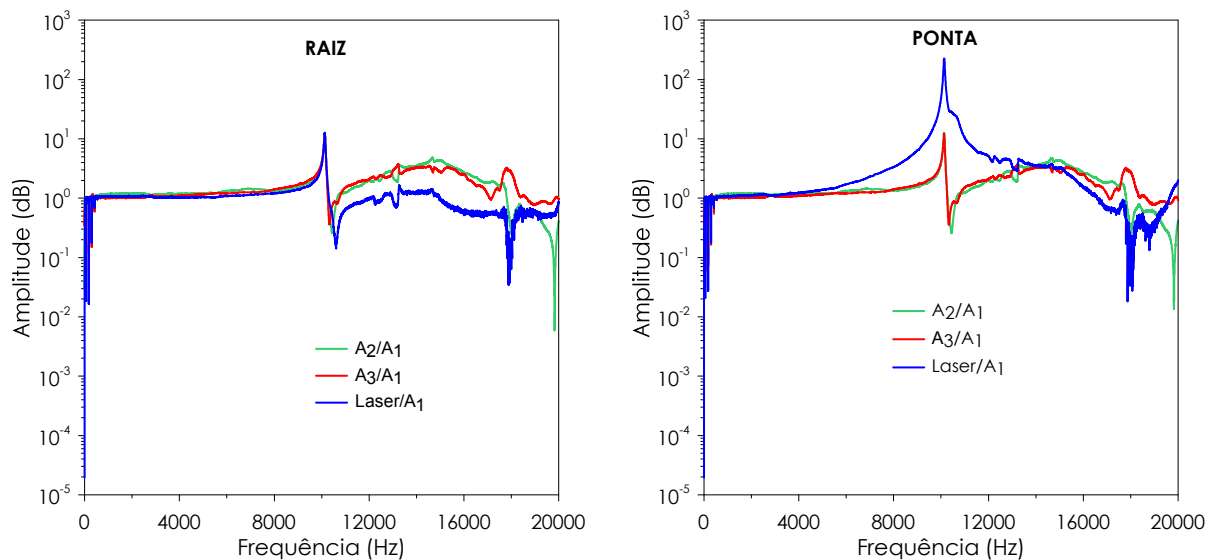
onde  $f$  é a frequência (Hz)

Quando a transmissibilidade é próxima a 1, significa que os sinais registrados, tanto nos acelerômetros laterais quanto no ponto onde o *vibrômetro laser* está apontado, são praticamente idênticos ao sinal registrado no topo do bloco cilíndrico.

Comparando-se os resultados obtidos, para o suporte SP1, (Figura 4.16 e Figura 4.17) verificou-se que quando o raio laser estava apontado para o bloco, a transmissibilidade referente ao *vibrômetro laser* era bastante próxima a 1, até uma frequência de 18000 Hz. Isto significava que os sinais obtidos pelo acelerômetro A1 representavam as acelerações do bloco. Desta forma, quanto mais próximo as relações (leitura A2)/(leitura A1) e (leitura A3)/(leitura A1) estivessem da relação (leitura do *vibrômetro laser*)/(leitura A1) melhor seria a representatividade dos sinais obtidos com os acelerômetros laterais em relação ao bloco. Em todos os resultados obtidos para o suporte SP1 verificou-se a ocorrência de ressonância e anti-ressonância para uma frequência próxima a 9000 Hz.



**Figura 4.16** – Resultados dos ensaios para o laser posicionado no bloco e na base do suporte SP1.

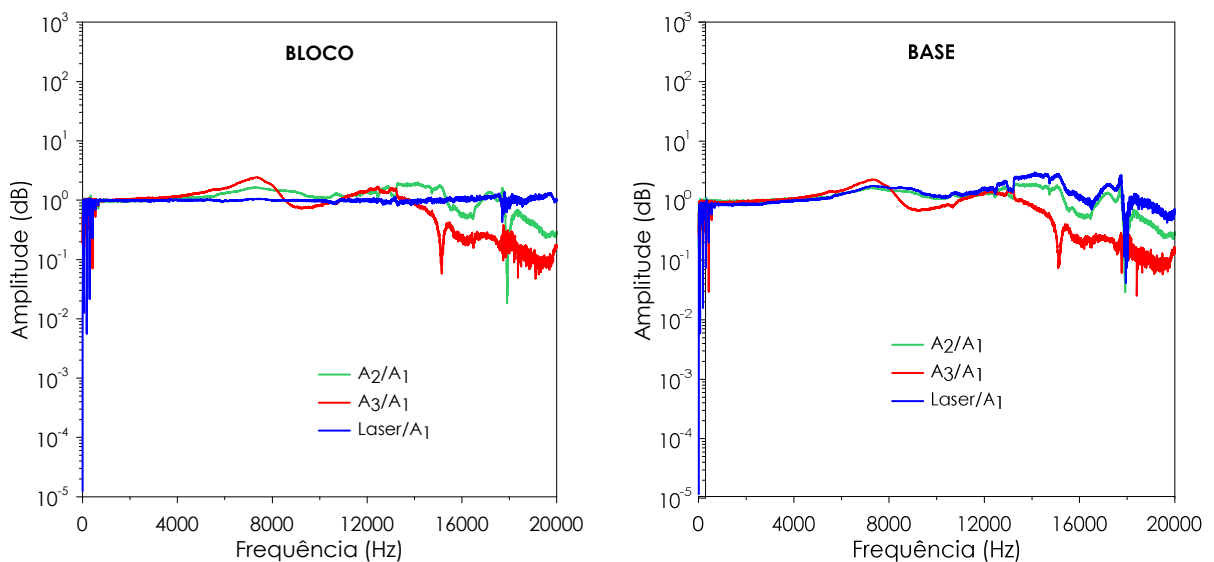


**Figura 4.17** – Resultados dos ensaios para o laser posicionado na raiz e na ponta do suporte SP1.

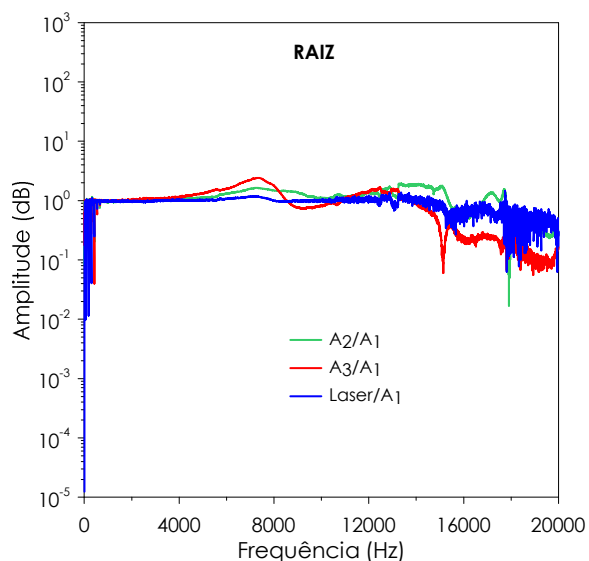
Observou-se ainda que quando o ensaio era realizado com o raio laser posicionado na ponta, a amplitude correspondente à ressonância ocorria com um valor maior. Isso significava que a aba superior do suporte poderia provocar alterações nas leituras dos acelerômetros, e portanto reduzindo a faixa de frequência de leituras confiáveis. Devido a essa limitação foi executado um novo projeto de suporte dos acelerômetros (SP2) e repetidos os mesmos ensaios a fim de verificar se com a eliminação da aba seria possível aumentar a faixa de frequências com leituras confiáveis.

Nos gráficos a seguir (Figura 4.18 e Figura 4.19) são apresentados os resultados dos ensaios realizados para o suporte SP2. A análise dos gráficos permite verificar que com a

utilização desse suporte, os efeitos de ressonância e anti-ressonância são amortecidos e ocorrem com menores amplitudes. No entanto, verificou-se que esses efeitos ocorreram para frequências próximas a 7000 Hz, enquanto que para o suporte SP1, os efeitos de ressonância ocorreram para frequências próximas a 9000 Hz. Entretanto, devido ao amortecimento dos efeitos de ressonância com a utilização do novo suporte, pode-se obter leituras para valores de frequência até 12000 Hz com uma pequena faixa de variação na amplitude ( $\pm 2$  dB), enquanto que para o suporte SP1, a variação na amplitude apresentava-se cinco vezes mais elevada ( $\pm 10$  dB) para esta mesma faixa de frequências. Por esses motivos, o projeto do suporte SP2 mostrou-se mais adequado do que o suporte SP1 para ser utilizado durante a realização dos ensaios de campo.

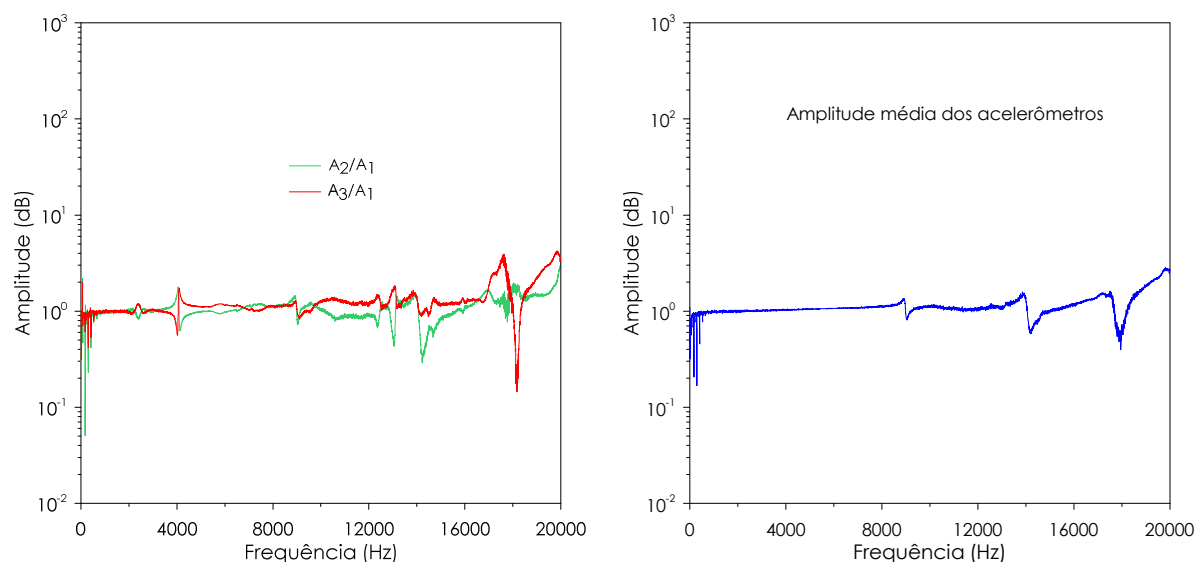


**Figura 4.18** – Resultados dos ensaios para o laser posicionado no bloco e na base do suporte SP2.



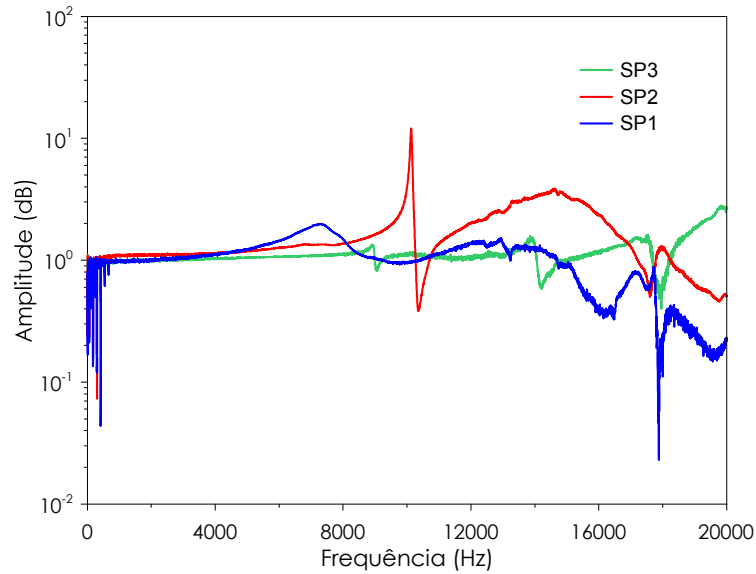
**Figura 4.19** – Resultados dos ensaios para o laser posicionado na raiz do suporte SP2.

Adicionalmente foram realizados ensaios com o suporte SP3 utilizando-se apenas o *shaker*. No caso deste suporte, devido à inexistência de vibrações adicionais no sistema não foi necessário a utilização do *vibrômetro laser*. Os resultados obtidos são apresentados a seguir (Figura 4.20). A análise inicial do gráfico permitiu visualizar a ocorrência de efeitos de vibrações em sentidos contrários entre os acelerômetros laterais. Como a amplitude de tais vibrações são muito próximas foi considerada a amplitude média entre os sinais registrados. Através dos valores médios constatou-se a ocorrência de uma transmissibilidade praticamente constante e igual a 1 até uma frequência próxima a 9500 Hz, observando-se a partir deste ponto o aparecimento de efeitos de ressonância e anti-ressonância com uma faixa de variação de amplitude bastante pequena ( $\pm 0.02$  dB).

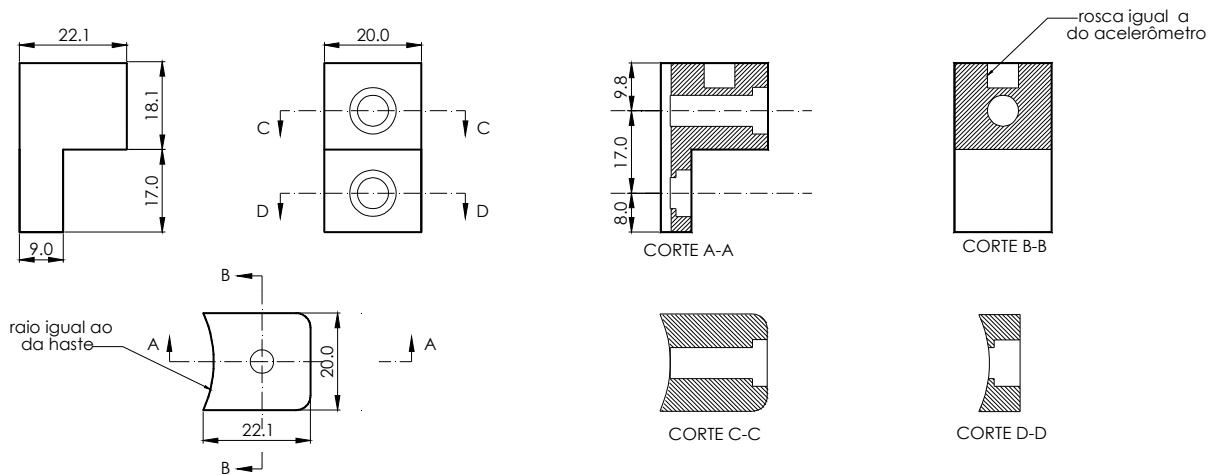


**Figura 4.20** – Resultados dos ensaios para o suporte SP3.

Para efeito comparativo calculou-se a amplitude média entre os acelerômetros para os suportes SP1, SP2 e SP3 (Figura 4.21). A análise dos gráficos indica que o suporte SP3 é o que apresenta melhor comportamento em relação à influência dos efeitos de ressonância e anti-ressonância. Este suporte permite a realização de leituras até uma faixa de frequência de 14000 Hz com pequenas faixas de variação na amplitude. Por esses motivos este suporte foi adotado para os ensaios realizados em campo. A Figura 4.22 apresenta o projeto geométrico do suporte SP3



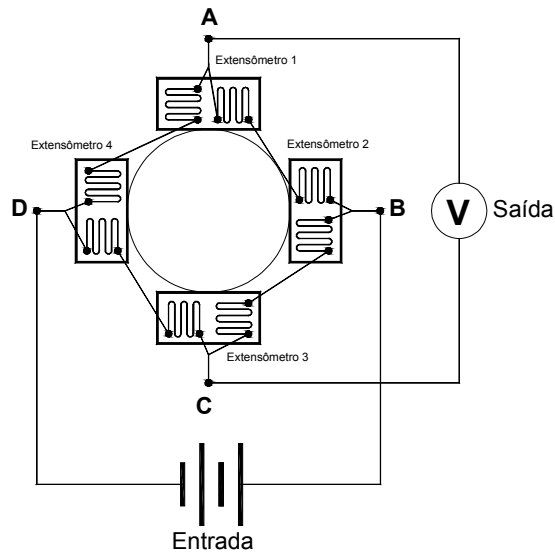
**Figura 4.21** – Comparação entre os valores de amplitude média para os suportes ensaiados.



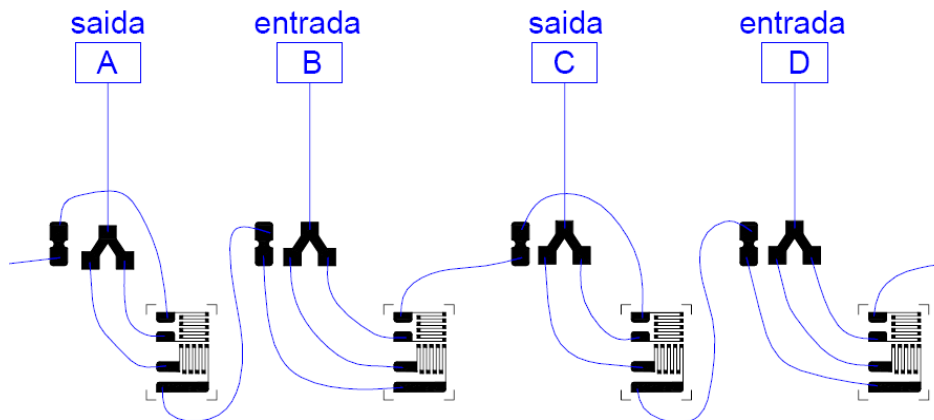
**Figura 4.22** – Projeto geométrico do suporte (SP3) para os acelerômetros (dimensões em mm).

#### 4.4 Célula de carga

A célula de carga é constituída por uma ponte de Wheastone completa, tendo sido desenvolvida de maneira similar a proposta de Odebrecht (2003). Foram utilizados extensômetros do tipo PA-06-125TG-350-LEN, fabricados pela Excel Engenharia de Sensores Ltda. Esses extensômetros, que são do tipo duplo (longitudinal e transversal), foram instalados no segmento de haste de forma a ficarem diametralmente opostos. A utilização de extensômetros duplos tem como objetivo minimizar efeitos de temperatura e flexão. Na Figura 4.23 é apresentado o detalhamento da ponte de Wheastone e na Figura 4.24 o esquema de ligação dos extensômetros.



**Figura 4.23** – Detalhamento da ponte de Wheatstone (ODEBRECHT, 2003).



**Figura 4.24** – Esquematização das ligações dos extensômetros (ODEBRECHT, 2003).

A colagem dos extensômetros foi realizada de acordo com as especificações do fornecedor. No caso do preparo da superfície do segmento de haste foi necessário o jateamento com areia da superfície do aço (Figura 4.25) para que os extensômetros fossem perfeitamente colados e o circuito elétrico (Figura 4.25) funcionasse de maneira adequada.

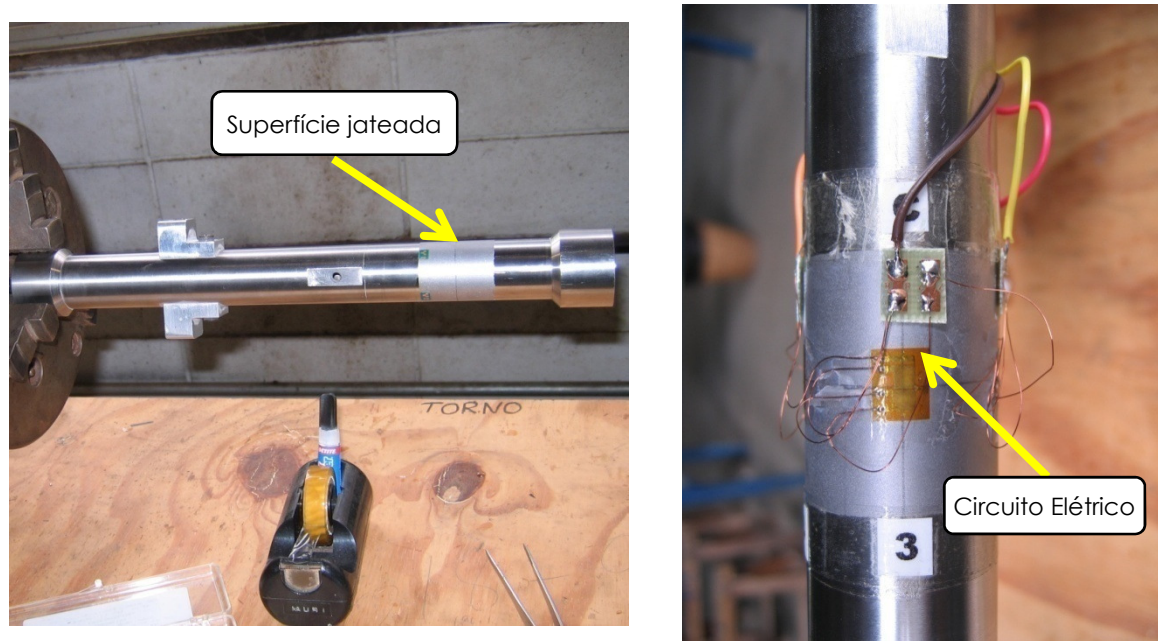


Figura 4.25 – Detalhamento da construção do circuito elétrico.

#### 4.5 Sistema de aquisição de dados

A velocidade teórica de propagação da onda na haste de sondagem é de aproximadamente 5120 m/s (Sancio e Bray, 2005). Dependendo do comprimento da composição de haste o tempo necessário para que o evento ocorra completamente pode variar entre 40 a 100 milissegundos. Assim, para que a curva dos sinais obtidos tenha uma definição aceitável, o sistema de aquisição de dados deve ter uma taxa de amostragem adequada. A ASTM (2010) recomenda taxas de amostragem entre 10 kHz a 25 kHz para sistemas analógicos e taxas de amostragem entre 50 kHz e 250 kHz para sistemas digitais. Essas taxas de amostragem variam em função do valor estabelecido para o filtro passa-baixa.

Para esse trabalho de pesquisa foram adquiridos dois sistemas de aquisição de dados da marca HBM, modelo MX-410 (Figura 4.26). Esse sistema de aquisição de dados portátil, que possui quatro canais, é indicado para analisar eventos dinâmicos, possibilitando a leitura de dados com taxa de amostragem de até 96 kHz por canal com resolução de 24 bits. Este sistema de aquisição de dados trabalha com faixas de excitação entre 5 - 24 V (DC). No caso dos acelerômetros é necessário utilizar um condicionador de sinal do tipo IEPE (Figura 4.26) para amplificar esses sinais durante a aquisição de dados. Os registros de tensão



elétrica da célula de carga e dos acelerômetros são convertidos para valores de força em kN e aceleração em  $m/s^2$ , através da utilização de curvas de calibração.

O sistema HBM MX-410 vem acompanhando do software *catmanEasy* que permite o processamento e o registro gráfico dos dados (Figura 4.27), além de permitir o tratamento dos sinais após o processamento dos dados.

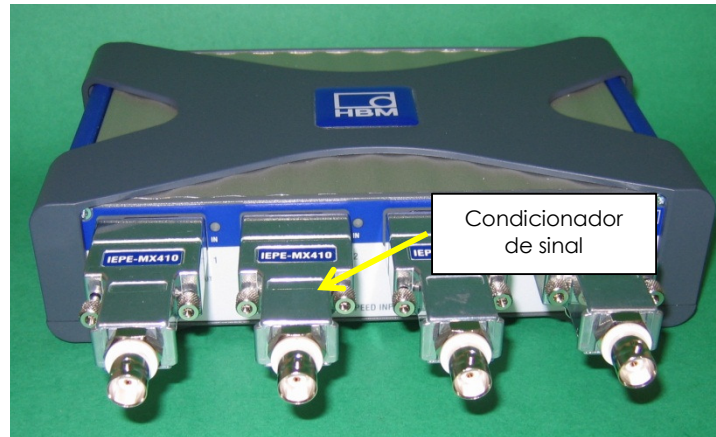


Figura 4.26 – Sistema de aquisição de dados HBM, modelo MX410.

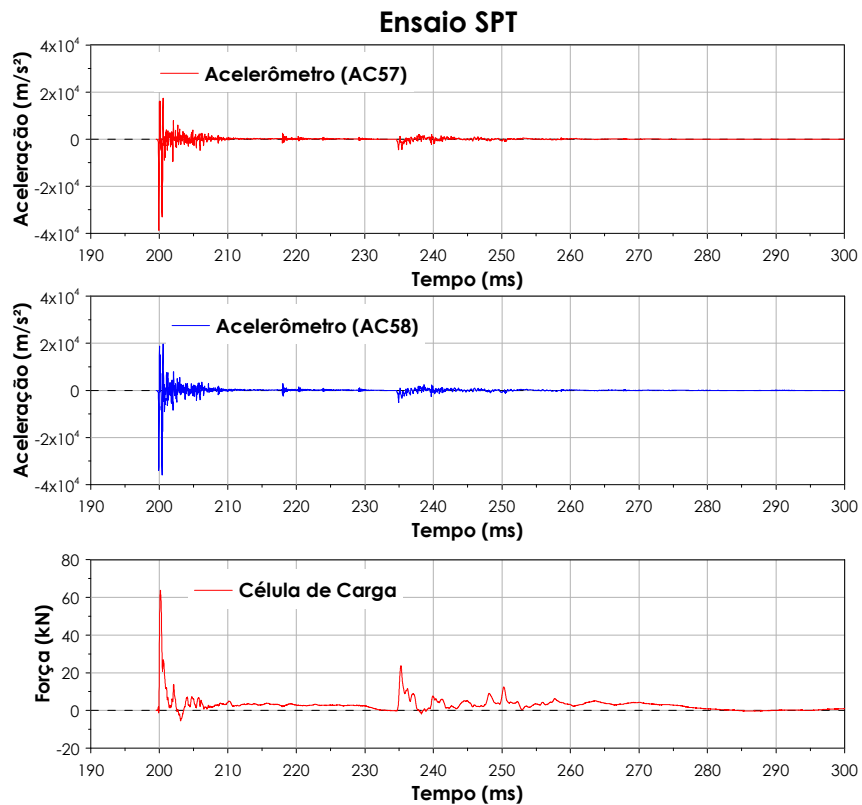


Figura 4.27 – Exemplo de um registro típico do ensaio SPT obtido com o sistema de aquisição HBM.

#### 4.6 Calibração da célula de carga

A célula de carga foi calibrada estaticamente utilizando-se uma prensa modelo MTS 815 Rock Mechanics System (Figura 4.28), disponível no Laboratório de Mecânica das Rochas da Escola de Engenharia de São Carlos. Para a calibração foi utilizada uma célula de carga previamente aferida, com capacidade de 100 kN.

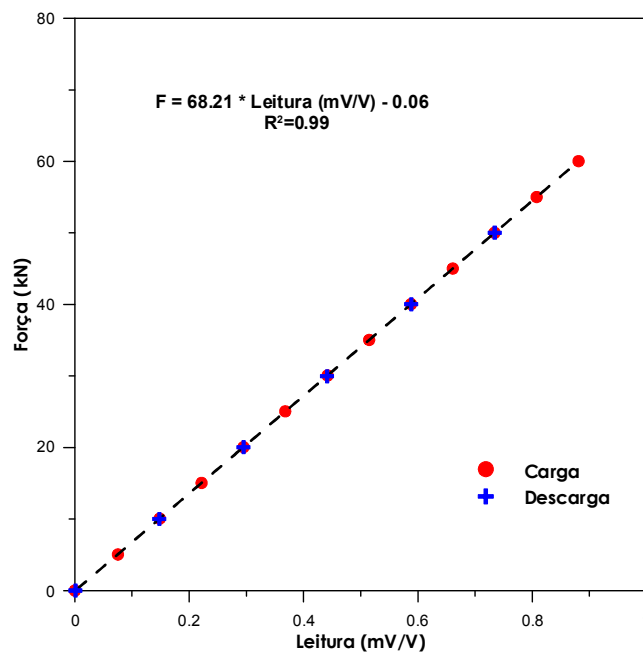
O ensaio foi conduzido aplicando-se incrementos de carga de 5 kN até a carga máxima de 60 kN e incrementos de descarga de 10 kN até zerar a carga. A aplicação dos incrementos de carga/descarga foi controlada através do próprio sistema de controle da prensa. Além disso, utilizou-se o sistema de aquisição de dados da marca HBM modelo MX 410 e o software *catmanEasy*. Este software permite utilizar um sensor já cadastrado com as características da célula de carga (ponte completa) possibilitando relacionar a leitura da carga que foi aplicada pela prensa com uma leitura de voltagem em milivolts/volts (mV/V) registrada pelo sistema de aquisição HBM. Posteriormente, com as leituras efetuadas foi criado um novo sensor no sistema utilizando-se uma equação de calibração que correlaciona carga em kN e voltagem em mV/V.

As leituras obtidas com a célula de carga mostraram-se bastante próximas dos valores de carga indicado pela célula de carga de referência. O valor máximo de divergência entre as leituras foi de 0.82%.

O ensaio de calibração foi repetido três vezes verificando-se a elevada repetibilidade dos valores obtidos. Adotou-se como equação de calibração (Figura 4.29) padrão aquela obtida através dos valores médios das três leituras efetuadas.



**Figura 4.28** – Calibração estática da célula de carga.



**Figura 4.29** – Curva de calibração da célula de carga.

Após a primeira etapa dos ensaios de campo foram observados valores de força superiores a 100 kN. Desta forma como a ASTM (2010) recomenda a calibração de células em carga com pelo menos 70 % da força máxima prevista, foi realizada novamente a calibração em laboratório. O ensaio foi conduzido aplicando-se incrementos de carga de 10 kN até a carga máxima de 220 kN e incrementos de descarga de 20 kN até zerar a carga máxima. A nova equação (Figura 4.30) obtida apresentou-se bastante similar a equação obtida anteriormente.

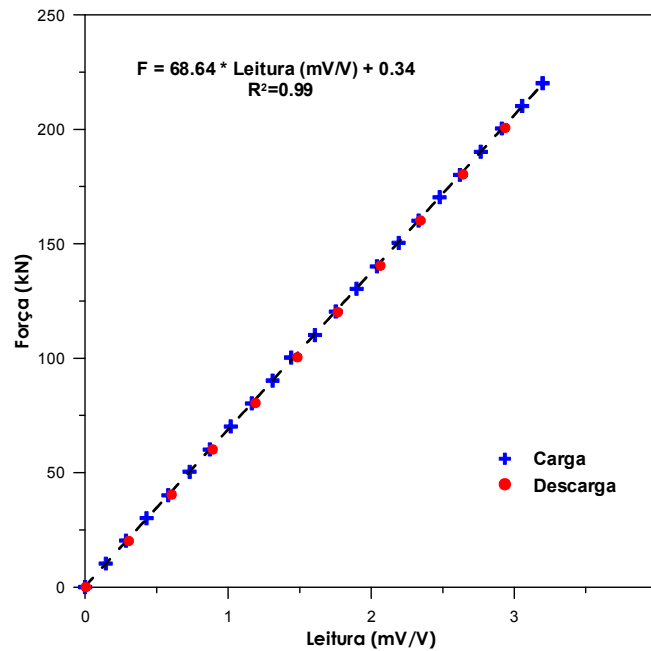


Figura 4.30 – Curva de calibração da célula de carga.

#### 4.7 Qualidade da instrumentação

Como a seção transversal da haste é constante e a propagação da onda é unidirecional, então existe uma proporcionalidade entre os sinais de força ( $F$ ) e velocidade ( $v$ ) (Equação 4.2), conforme discutido no item 3.2 do Capítulo 3.

$$F = \frac{a \times E}{c} \times v \therefore F = Z \times v \quad (4.2)$$

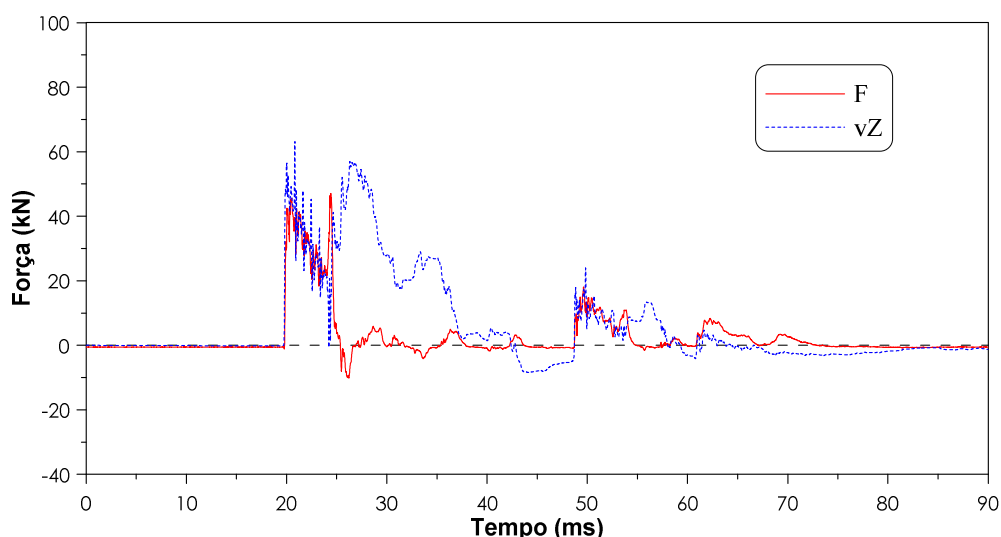
onde  $a$  é a área da seção transversal da haste ( $410 \text{ mm}^2$ ),  $E$  é o módulo de elasticidade do aço ( $2.10 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ ),  $c$  é a velocidade teórica de propagação da onda ( $5120 \text{ m/s}$ ) e  $Z$  é a impedância da haste ( $16.81 \text{ kN}\cdot\text{s/m}$ ).

Os sinais de velocidade multiplicados pela impedância da haste ( $Z$ ) fornecem uma grandeza com unidade de força (Equação 4.2) que é utilizada no controle da qualidade da instrumentação. Durante o intervalo de tempo igual a  $2\ell/c$ , quando ocorre a propagação da primeira onda de compressão, esses valores devem ser iguais aos sinais de força medidos através da célula de carga. Após a reflexão da primeira onda esses valores deixam de ser iguais. Assim, a qualidade da instrumentação desenvolvida neste trabalho de pesquisa foi verificada através da comparação entre os valores de força obtidos através dos sinais de velocidade ( $v$ ) e da célula de carga ( $F$ ).

#### 4.7.1 Instrumentação posicionada abaixo da cabeça de bater

O intervalo de tempo entre a chegada da onda de compressão e a reflexão da primeira onda de tração ( $2l/c$ ), quando a instrumentação é posicionada abaixo da cabeça de bater depende do comprimento da composição haste (Figura 4.6b). Quanto maior é comprimento da composição de haste maior é esse intervalo de tempo. Consequentemente maior é o intervalo de tempo que os sinais de velocidade ( $v$ ) multiplicados pela impedância da haste ( $Z$ ) devem ser iguais aos sinais de força ( $F$ ) medidos através da célula de carga.

A Figura 4.31 ilustra um exemplo de comparação dos sinais de força e velocidade multiplicada pela impedância da haste, correspondentes a um registro típico do ensaio SPT. A proporcionalidade entre estes sinais deve ser avaliada dentro do intervalo de tempo correspondente à reflexão da primeira onda (Figura 4.32b).

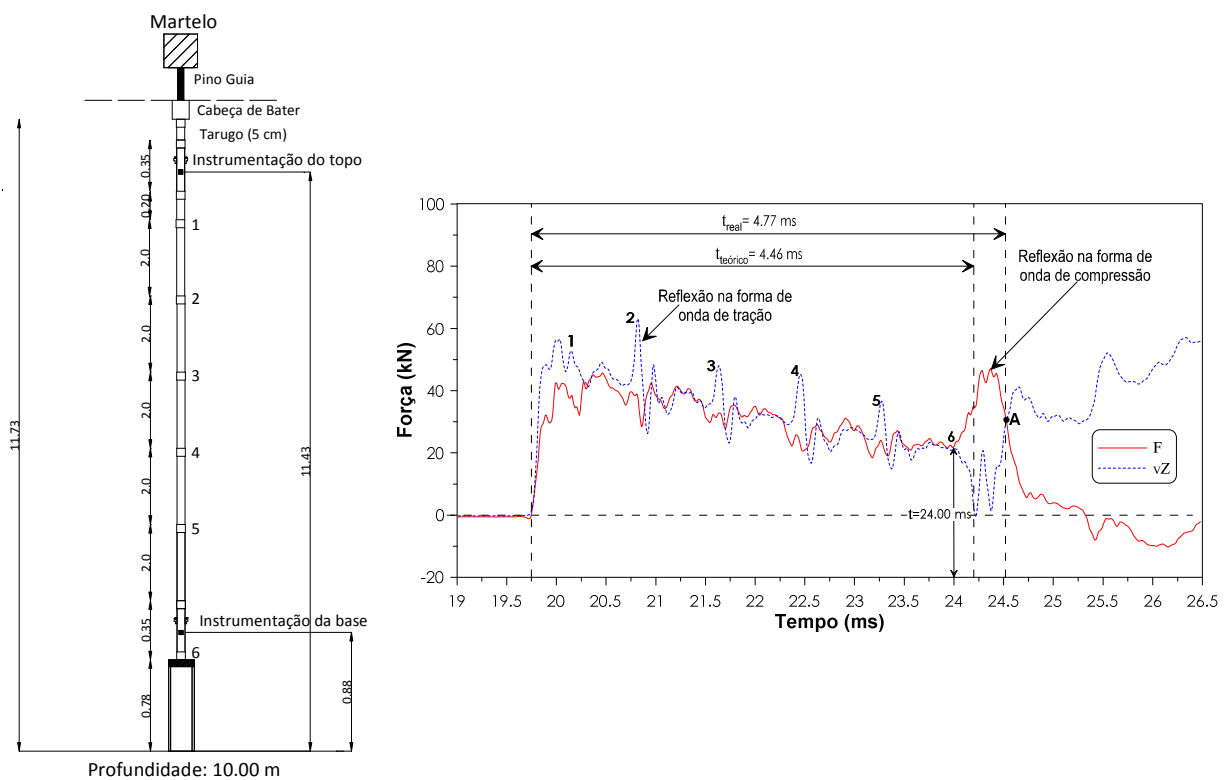


**Figura 4.31** – Comparação entre os sinais de força para a instrumentação próxima a cabeça de bater.

A comparação entre os sinais de força indicam a ocorrência de reflexões na forma de ondas de tração em diversos pontos do gráfico (Figura 4.32b). Esse tipo de reflexão pode estar associado à ocorrência de folgas nesses pontos ou ainda devido à diminuição dos valores de impedância. Nesse caso, constatou-se que os pontos onde ocorreram as reflexões eram coincidentes com o posicionamento das luvas utilizadas para conectar as hastes (Figura 4.32a). Essa verificação foi realizada utilizando os valores de velocidades teórico e real de propagação da onda. A velocidade real (Equação 4.3) foi obtida considerando o intervalo de tempo desde o início do evento até o ponto A (Figura

4.32b). Para esse caso verificou-se que as reflexões de tração coincidem com os pontos onde as luvas estavam posicionadas (Tabela 4.1). No ponto 6 (24 ms) ocorreu uma reflexão na forma de onda de compressão, devido à utilização de uma peça maciça sextavada com impedância superior a impedância da haste do ensaio SPT, conforme já havia sido mencionado no item 4.7.1.

$$c_{real} = \frac{2 \times \ell}{t} = \frac{2 \times 11.43}{0.0048} \rightarrow c_{real} = 4763 \text{ m/s} \tag{4.3}$$



(a) Esquema do ensaio (dimensões em m)

(b) Comparação entre os sinais de força

Figura 4.32 – Comparação entre os sinais de força para a instrumentação próxima a cabeça de bater.

Tabela 4.1- Determinação da posição das reflexões da primeira onda de compressão.

Ponto	Tipo de reflexão	t <sub>inicial</sub> (ms)	t <sub>final</sub> (ms)	Δt (ms)	ℓ* (m)	ℓ (m)
1	Tração	19.75	20.1	0.35	0.83	0.90
2	Tração	19.75	20.75	1.0	2.38	2.56
3	Tração	19.75	21.50	1.75	4.17	4.48
4	Tração	19.75	22.30	2.55	6.07	6.53
5	Tração	19.75	23.10	3.35	7.98	8.57
6	Compressão	19.75	24.00	4.25	10.12	10.88

Nota: ℓ\* e ℓ foram calculados utilizando-se as velocidades real e teórica, respectivamente, da propagação da onda de tensão.

#### 4.7.2 Penetração permanente do amostrador versus deslocamento máximo

O controle da penetração permanente do amostrador para cada golpe do martelo é de fundamental importância para a verificação da qualidade da instrumentação desenvolvida. O sinal de aceleração obtido através dos acelerômetros deve ser integrado no intervalo de tempo do evento, fornecendo assim os valores de velocidade das partículas animadas pela passagem da onda de tensão. A integração dos sinais de aceleração foi realizada através da regra de Simpson ou regra dos trapézios (Figura 4.33). Nesse procedimento, os intervalos de tempo ( $\Delta t$ ) considerados são constantes e iguais ao inverso da taxa de frequência da aquisição dos dados (1/96000 s). A velocidade num determinado instante é igual à soma das áreas dos trapézios até esse instante (Equação 4.4).

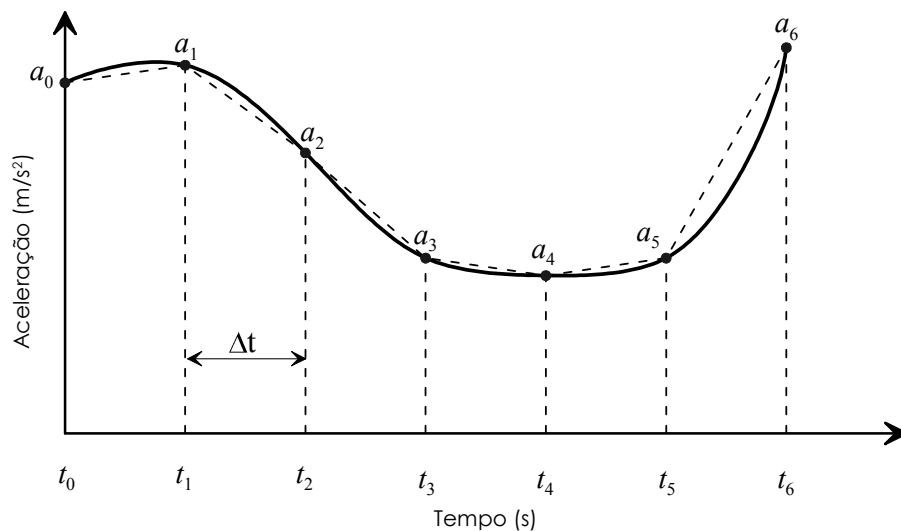


Figura 4.33 – Esquema de aplicação da regra dos trapézios.

$$v_i = \sum_{i=1}^n \frac{(a_{i-1} + a_i)}{2} \times (t_i - t_{i-1}) \quad (4.4)$$

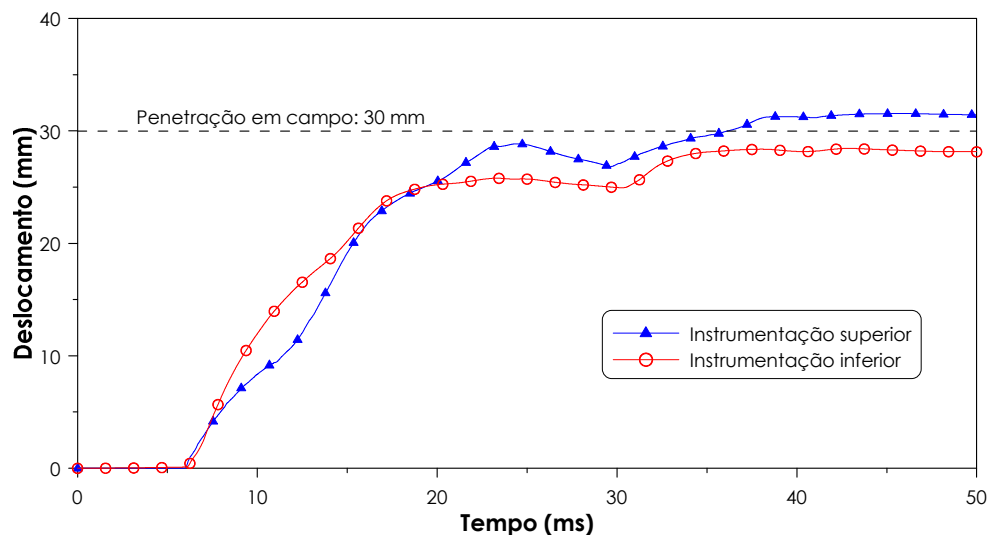
onde  $v_i$  é a velocidade,  $a_i$  é a aceleração em um determinado instante  $t_i$  e  $n$  é o número total dos intervalos de tempo. Nessa integração numérica, admite-se que no instante inicial a velocidade é igual a zero.

Em seguida, os valores de velocidade são integrados, seguindo o mesmo procedimento, obtendo assim os valores de deslocamento (Equação 4.5). O deslocamento máximo obtido através da integração dos sinais de velocidade deve ser compatível com a penetração permanente registrada em campo.

$$\rho_i = \sum_{i=1}^n \frac{(v_{i-1} + v_i)}{2} \times (t_i - t_{i-1}) \quad (4.5)$$

onde  $\rho_i$  é o deslocamento e  $v_i$  é a velocidade em um determinado instante  $t_i$ . Na solução dessa equação admite-se que no instante inicial o deslocamento é igual a zero.

As integrações dos sinais de aceleração, tanto para o topo como para a base da composição de hastes, resultaram em valores de deslocamento máximo bastante próximos aos valores medidos de penetração permanente do amostrador. A Figura 4.34 mostra a boa qualidade dos sinais registrados pela instrumentação desenvolvida.



**Figura 4.34** – Comparação entre os valores de deslocamento máximo determinados a partir dos sinais de aceleração e a penetração permanente medida em campo.

## 4.8 Considerações finais

Nesse capítulo foram apresentadas as etapas realizadas para o desenvolvimento do equipamento utilizado, para a determinação da energia no topo e na base da composição de hastes do ensaio SPT. Ensaio de campo indicaram a necessidade da utilização de acelerômetros com uma faixa de utilização até 10000 g e frequências até 15000 Hz, quando a instrumentação estiver próxima ao amostrador. Esse fato ocorre porque quando a instrumentação encontra-se próxima ao amostrador o tempo entre a chegada e a reflexão da onda é bastante curto. Assim, somado ao efeito da duplicação da velocidade na ponta do amostrador os valores de aceleração registrados superam 8000 g.

Os sinais registrados permitiram verificar a qualidade da instrumentação no que se refere à proporcionalidade entre os valores de força e velocidade multiplicada pela impedância



da haste. No entanto, a utilização de um adaptador entre a haste instrumentada e o amostrador gerou o aparecimento de uma reflexão na forma de onda de compressão. Pesquisas futuras poderão aperfeiçoar o equipamento eliminando essa reflexão indesejada. A qualidade da instrumentação também foi verificada através da comparação entre os valores de deslocamento máximo, calculados a partir de sinais de aceleração, e a penetração permanente do amostrador medida em campo. Em geral, os valores apresentaram-se bastante próximos entre si, tanto para a instrumentação no topo como na base da composição de hastes.

Dessa forma, o equipamento desenvolvido nesse trabalho de pesquisa tem se mostrado bastante adequado para a determinação da energia no ensaio SPT. Os sinais registrados indicam uma elevada confiabilidade dos resultados permitindo análises mais detalhadas dos processos de transferência de energia durante o golpe do martelo. Nos capítulos posteriores são apresentados os resultados dos ensaios de campo e as análises desses resultados.

# Capítulo 5

## Ensaaios de campo

### 5.1 Ensaaios no Campo Experimental de Fundações da EESC/USP

A primeira campanha dos ensaios de sondagem SPT foi realizada no Campo Experimental de Fundações localizado na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Nessa campanha foram realizados cinco furos de sondagem durante um período de chuvas intensas (março de 2010). Esse conjunto de ensaios permitiu verificar as deficiências do equipamento previamente construído e conseqüentemente aprimorá-lo para ensaios futuros.

O Campo Experimental de Fundações está situado em uma região cujo perfil geológico-geotécnico pode ser considerado representativo da região centro-oeste do estado de São Paulo (Figura 5.1) (CINTRA et al., 1991).

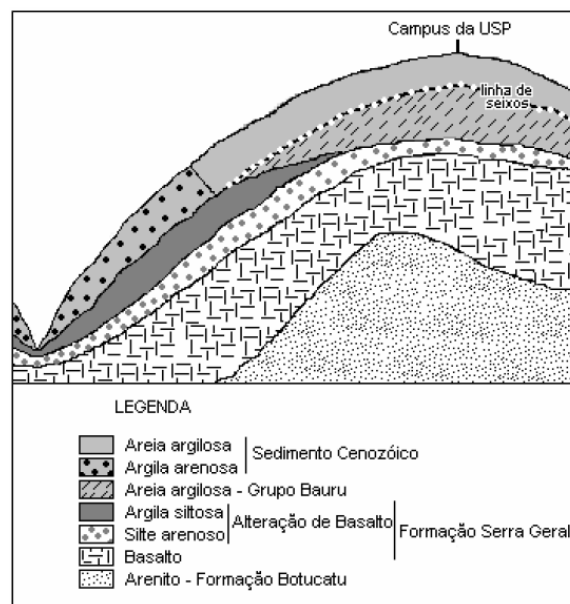


Figura 5.1 – Seção geológica esquemática de São Carlos (BORTOLUCCI, 1983).

### 5.2 Ensaaios no Pátio da Base Fundação em Ribeirão Preto (SP)

A segunda e a terceira campanha dos ensaios de sondagem SPT foram realizadas no pátio da empresa Base Fundações, localizada na cidade de Ribeirão Preto (SP). Nestas

campanhas foram realizados seis furos de sondagem durante o período de abril e julho de 2010.

A Tabela 5.1 apresenta os resultados dos ensaios de granulometria para profundidades variando de 1 a 10 m. Os resultados mostram que até 4 metros de profundidade, o perfil é formado por camadas de argila areno-siltosa e de 8 a 10 metros por camadas de solo argila silto-arenosa.

**Tabela 5.1-** Resultados dos ensaios de granulometria

<b>Fração Granulométrica</b>	<b>1.0 m</b>	<b>2.5 m</b>	<b>4.0 m</b>	<b>8.0 m</b>	<b>9.0 m</b>	<b>10.0 m</b>
Argila (%)	50	50	48	48	56	58
Silte (%)	15	15	17	32	27	33
Areia fina (%)	20	20	22	13	13	6
Areia média (%)	15	15	13	7	4	3
Areia grossa (%)	--	--	--	--	--	--

### 5.3 Ensaios no Campo Experimental de Fundações da UNESP/Bauru

A quarta campanha dos ensaios de sondagem SPT foi realizada no Campo Experimental de Fundações localizado na Universidade Estadual Paulista (UNESP) na cidade de Bauru (SP). Nesta campanha foram realizados dois furos de sondagem SPT e um ensaio CPTU durante o período de abril de 2011. A locação dos ensaios realizados encontra-se no Apêndice A deste trabalho.

A região da cidade de Bauru (SP) está localizada no Planalto Arenítico-Basáltico do Estado de São Paulo (Planalto Ocidental), pertencente à Bacia Sedimentar do Paraná. Geologicamente, a região é formada por rochas do Grupo Bauru (Cretáceo Superior), que recobre as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral (CAVALCANTI et al., 2006).

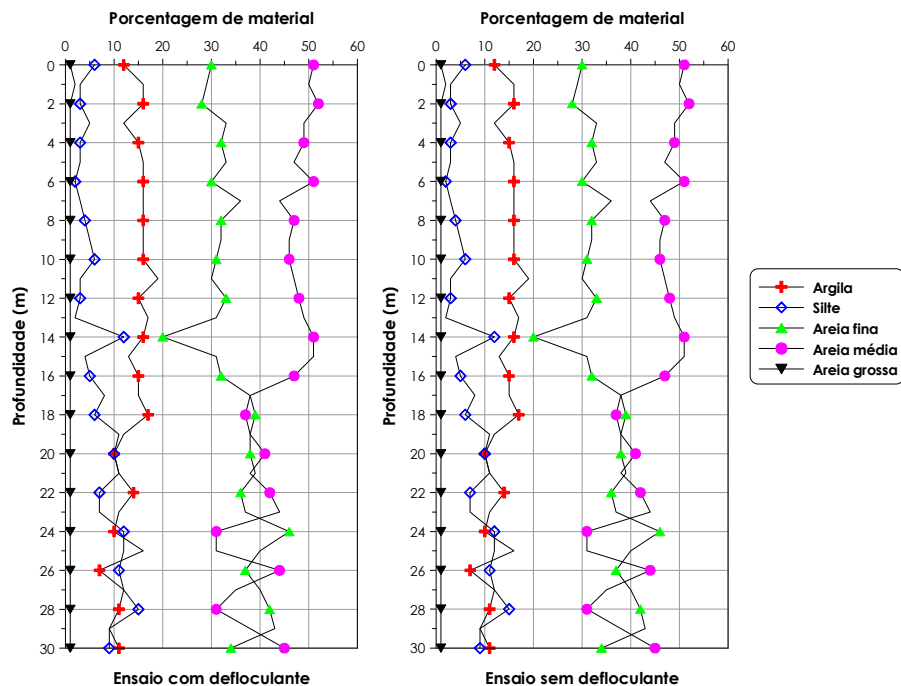
No campo experimental da UNESP predominam rochas sedimentares da Formação Marília. Assim, o perfil deste local apresenta características de rochas sedimentares, tais como alternância de camadas e transformações desses materiais através de processos de pedogênese e morfogênese (CAVALCANTI et al., 2006).

Segundo Giacheti (2006), o perfil geotécnico do campo experimental da UNESP é formado por uma camada de areia fina pouco argilosa, de coloração avermelhada e não saturada até 20 metros. A classificação unificada desta camada é um solo do tipo SM-SC. A classificação MCT indica que o solo possui comportamento laterítico (classificação LA') até

a profundidade de 13 metros e comportamento não laterítico (classificação NA') a partir desta profundidade. A Figura 5.2 apresenta a distribuição granulométrica ao longo do perfil do solo do campo experimental da UNESP. Observa-se que até 16 metros o solo pode ser classificado como uma areia média argilosa e a partir desta profundidade o solo é classificado como uma areia fina a média argilosa.

Outra característica importante deste perfil refere-se à variabilidade horizontal do comportamento do solo. Essa variabilidade pode ser verificada através de análises de resultados de ensaios CPT, conforme mostrado por De Mio (2005).

Os resultados dos ensaios SPT e CPTu utilizados para caracterizar o perfil estudado são apresentados na Figura 5.3. Observa-se que o perfil estratigráfico do solo, para baixas profundidades, é bastante semelhante ao perfil do campo experimental da EESC/USP, caracterizando-se como um material com baixa resistência, não saturado e colapsível. Os ensaios foram conduzidos até 30 metros de profundidade e o nível d'água não foi encontrado.



**Figura 5.2** – Distribuição granulométrica ao longo do perfil do solo do campo experimental da UNESP (modificado de AVESSANI, 2010)

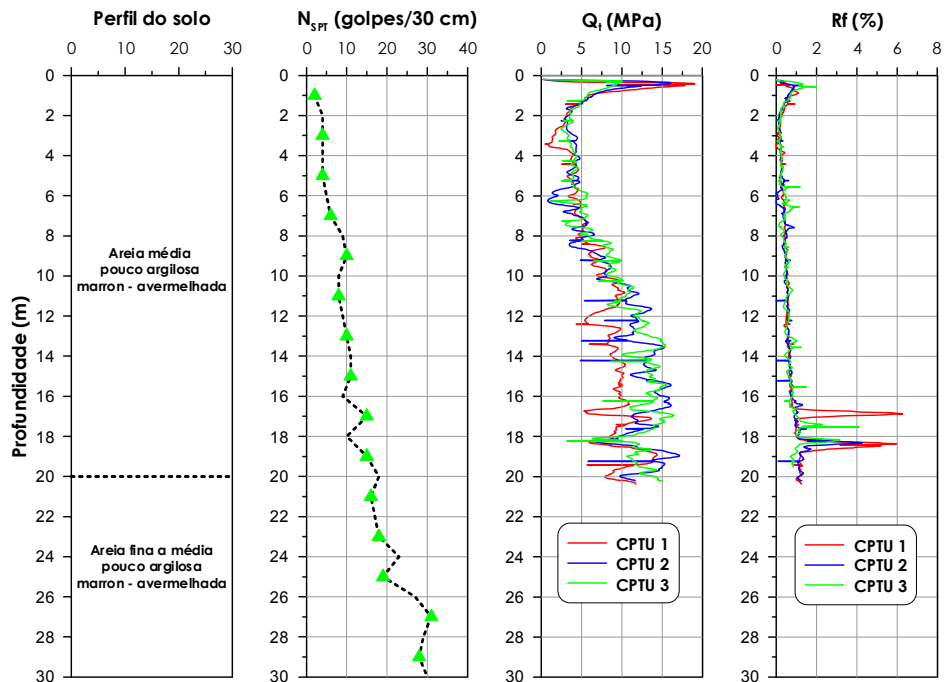


Figura 5.3 – Resultados de ensaios SPT e CPTU para o perfil do solo do campo experimental da UNESP

#### 5.4 Ensaios na cidade de São Carlos (SP)

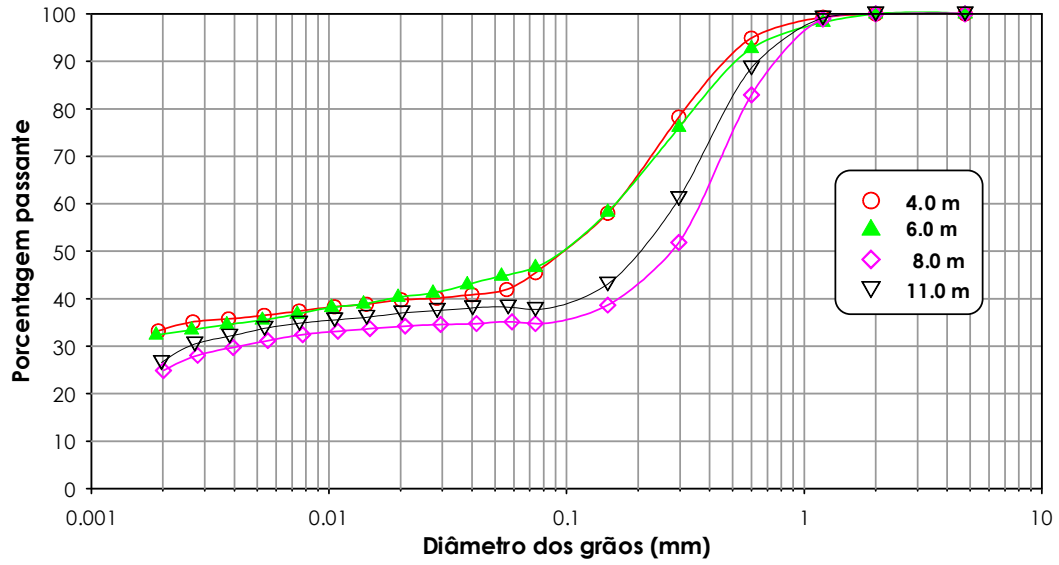
A última campanha dos ensaios de sondagem SPT foi realizada na área de implantação de um loteamento residencial localizado na Avenida Bruno Ruggiero Filho na cidade de São Carlos (SP). Nesta campanha foram realizados três furos de sondagem SPT e dois ensaios CPTU, durante o mês de maio de 2011. A locação dos ensaios realizados encontra-se no Apêndice A deste trabalho

O perfil geotécnico da área onde foram realizados os ensaios é formado por uma camada superficial de uma areia fina pouco argilosa que se estende até a profundidade de 7 metros. Essa camada caracteriza-se como um material pouco compacto, poroso, colapsível e com índice  $N_{SPT}$  variando entre 1 e 7. Abaixo dessa camada encontra-se a linha de seixos que separa a camada de solo residual de arenito da camada superficial.

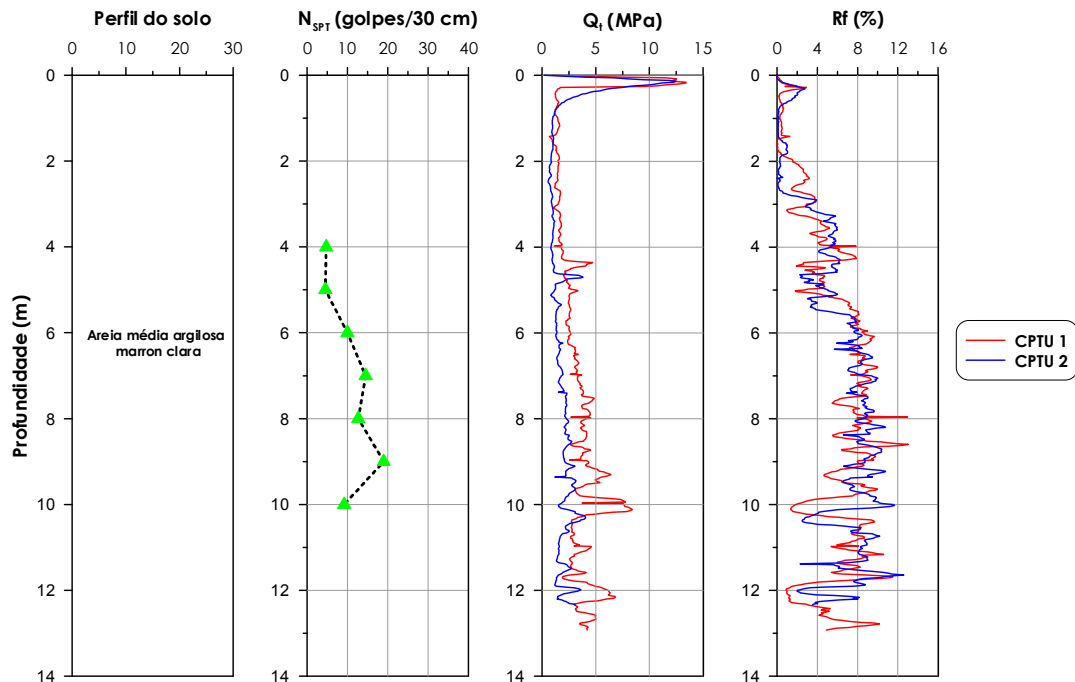
Durante a realização dos ensaios SPT foram coletadas amostras deformadas das camadas de solo onde foram determinados os índices  $N_{SPT}$  e as determinações das quantidades de energia. A caracterização geotécnica das camadas de solo foi realizada com base nos resultados de laboratório das amostras deformadas. A Tabela 5.2 e a Figura 5.4 apresentam os resultados dos ensaios de granulometria para profundidades variando de 4 a 11 m. Os resultados mostram que até 11 metros de profundidade o perfil é formado por camadas de solo de areia média argilosa, sendo que até 6 metros de profundidade a fração argilosa é maior.

**Tabela 5.2** - Resultados dos ensaios de granulometria

Fração Granulométrica	4.0 m	6.0 m	8.0 m	11.0 m
Argila (%)	33	33	25	27
Silte (%)	9	12	10	12
Areia fina (%)	25	21	8	10
Areia média (%)	29	28	39	40
Areia grossa (%)	4	6	18	11

**Figura 5.4** - Curvas granulométricas para diferentes profundidades (Local: Loteamento residencial – São Carlos/SP).

A Figura 5.5 apresenta os resultados dos ensaios SPT e CPTu para o perfil do solo do loteamento residencial da cidade de São Carlos. Os ensaios foram interrompidos em 11 metros devido à presença do nível d'água nesta profundidade. Para utilizar a instrumentação abaixo do nível d'água é necessário desenvolver um sistema de impermeabilização do equipamento. Desta forma, neste trabalho de pesquisa a profundidade limite para a realização dos ensaios foi limitada pela presença do nível d'água.



**Figura 5.5** - Resultados de ensaios SPT e CPTU para o perfil do solo do loteamento residencial de São Carlos (SP).

## 5.5 Procedimentos dos ensaios de campo

Os ensaios SPT foram realizados de acordo com os procedimentos recomendados pela ABNT (2001) e ABGE (1999). Neste trabalho de pesquisa foram utilizados um equipamento convencional e um equipamento mecanizado. A seguir serão apresentadas as características de cada um desses equipamentos.

### 5.5.1 Equipamentos de sondagem

#### 5.5.1.1 Equipamento convencional

Para a realização dos ensaios com o equipamento convencional (Figura 5.6), a maioria dos seus componentes, tais como martelo, composição de hastes, cabeça de bater, amostrador e corda foram adquiridos novos. Todos esses componentes foram verificados e mostraram-se de acordo com as recomendações da ABNT (2001).

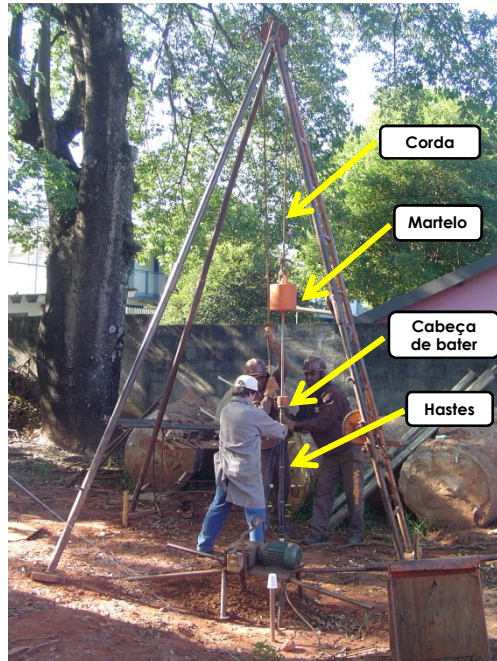


Figura 5.6 – Equipamento convencional utilizado nos ensaios de campo

### 5.5.1.2 Equipamento mecanizado

Em relação aos ensaios realizados com equipamento mecanizado foram utilizados os mesmos componentes do equipamento convencional, com exceção do martelo e do seu sistema automático de levantamento e queda. Esse martelo possui uma massa inferior (61.75 kg) ao valor recomendado pela ABNT (2001), além de possuir internamente um coxim de polipropileno. A Figura 5.7 apresenta a geometria do martelo mecanizado e do coxim de polipropileno.

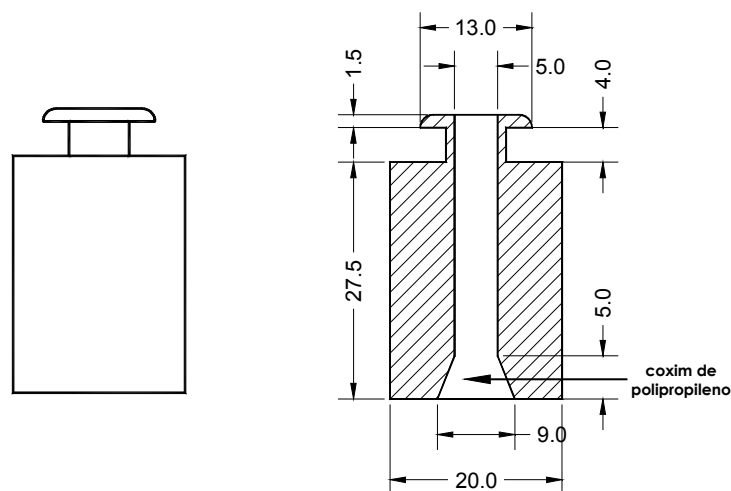


Figura 5.7 – Detalhes da geometria do martelo mecanizado (dimensões em cm)



O sistema de levantamento e queda do martelo é realizado de forma automática (Figura 5.8a). Um gatilho possibilita a queda automática do martelo no instante que a altura de queda padrão de 0.75 m é atingida (Figura 5.8b).



(a) Sistema de levantamento do martelo



(b) Martelo com sistema de gatilho

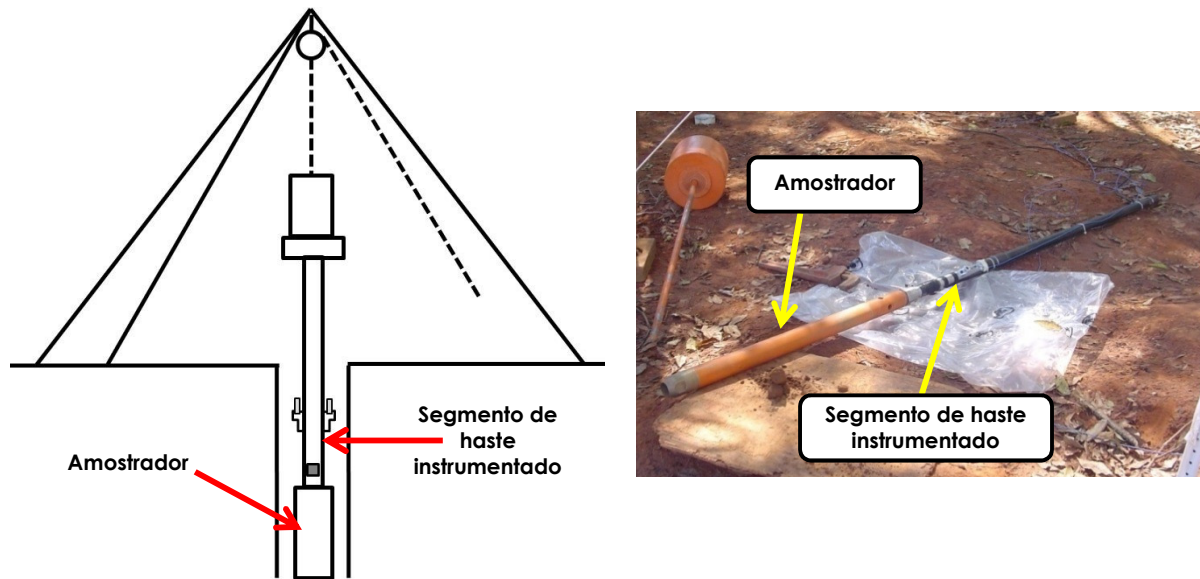
**Figura 5.8** – Detalhamento do equipamento mecanizado utilizado nos ensaios de campo

### 5.5.2 Posicionamento do segmento de haste instrumentado

A energia transferida ao conjunto de hastes é medida através de valores de aceleração e força normal, registrados durante o impacto do martelo (HOWIE et al., 2003; ODEBRECHT, 2005; BELINCANTA, 1998; CAVALCANTE, 2002). Nos métodos convencionais, os valores de aceleração e força são medidos abaixo da cabeça de bater posicionando-se a instrumentação no topo do conjunto de hastes.

Entretanto, de acordo com a nova definição de eficiência do ensaio SPT proposta por Aoki e Cintra (2000a), no cálculo da eficiência do ensaio deve-se considerar a energia que efetivamente atinge o amostrador ao invés da energia que atinge o topo do conjunto de hastes. Por esta razão a instrumentação também deve ser posicionada imediatamente acima do amostrador SPT. Neste trabalho de pesquisa adotou-se como procedimento usual a determinação da energia que efetivamente atinge o amostrador, ou seja, um segmento de haste instrumentado foi posicionado em uma seção logo acima do amostrador (Figura 5.9

O desenvolvimento de um sistema de avaliação da energia no topo do amostrador necessitou de um estudo detalhado no que se refere aos tipos de acelerômetros que devem ser utilizados, conforme apresentado no item 4.2. Assim, os ensaios cujos resultados foram analisados em detalhes neste trabalho, foram realizados com instrumentações posicionadas logo acima do amostrador (Figura 5.9) e logo abaixo da cabeça de bater (Figura 5.10).



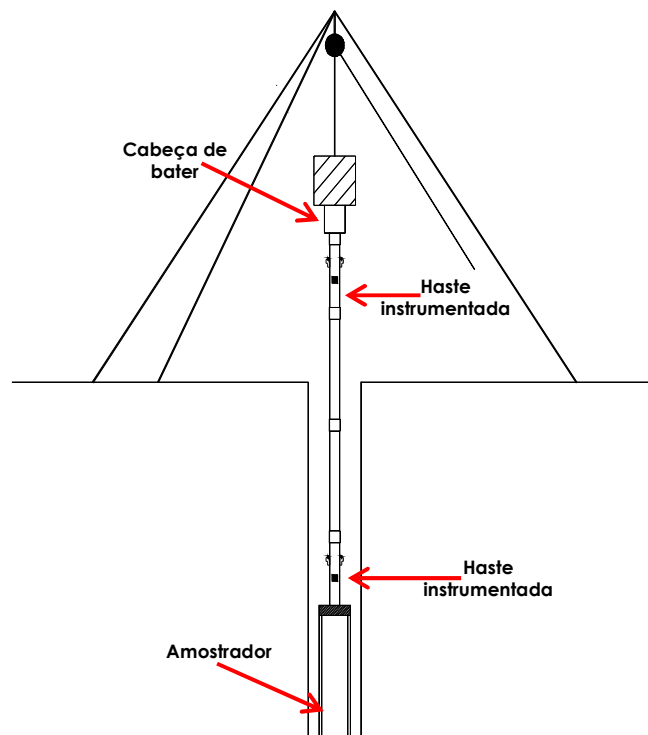
**Figura 5.9** – Segmento de haste instrumentado posicionado acima do amostrador SPT



**Figura 5.10** – Segmento de haste instrumentado posicionado abaixo da cabeça de bater

Assim, para realizar os ensaios, foi necessário construir dois segmentos de haste instrumentados. Além disso, para que fosse possível a utilização simultânea desses dois

segmentos de haste instrumentados, foi necessário adquirir um novo sistema de aquisição de dados HBM (modelo MX410). Esses sistemas de aquisição de dados podem ser conectados entre si, trabalhando como se fosse um único, porém com o dobro de canais. Isto possibilitou a realização de ensaios com dois pontos de medidas simultâneos (Figura 5.11), ou seja, foram realizados ensaios com a instrumentação posicionada no topo do amostrador e abaixo da cabeça da bater para um mesmo impacto. A Figura 5.12 mostra os sistemas de aquisição de dados trabalhando simultaneamente



**Figura 5.11** – Segmentos de hastes instrumentados posicionados no topo e na base do conjunto de hastes.



**Figura 5.12** – Sistemas de aquisição utilizados, trabalhando em conjunto



### 5.5.3 Procedimentos executivos

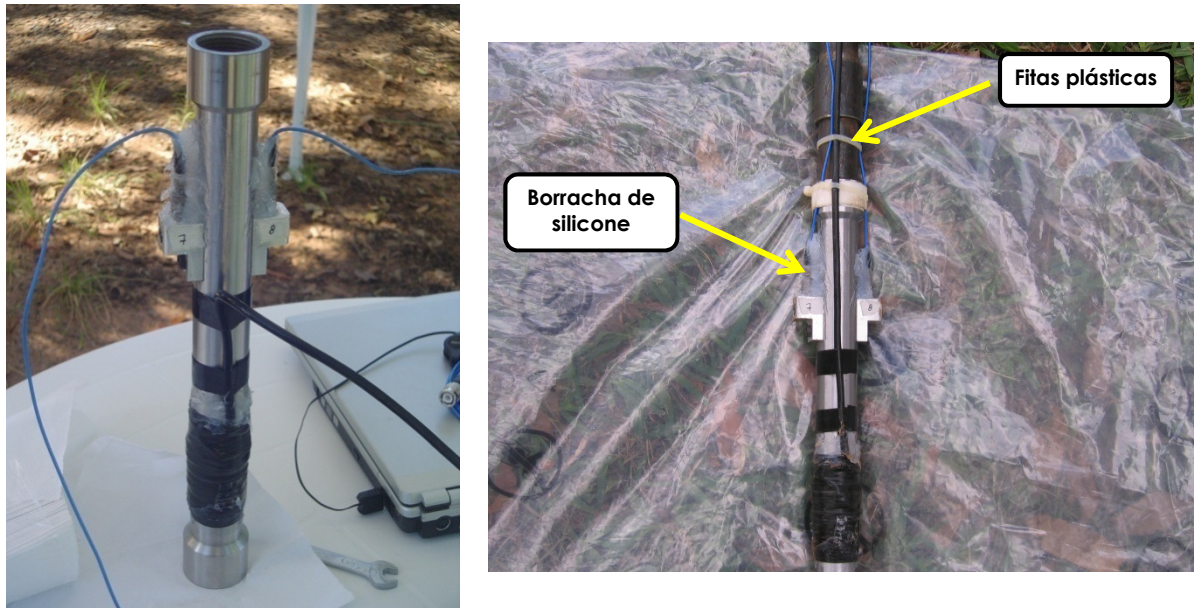
#### 5.5.3.1 Proteção da instrumentação

O posicionamento da instrumentação dentro do furo de sondagem exige mais precauções quando comparado com o posicionamento no topo do conjunto de hastes. Assim, os ensaios de campo foram realizados tomando-se cuidados especiais visando a proteção da instrumentação localizada na parte inferior do conjunto de hastes. Primeiramente, a abertura do furo de sondagem foi feita com diâmetro de 100 mm, por ser necessário um espaço maior para a colocação do segmento de haste juntamente com os cabos. Além disso, o furo de sondagem foi revestido com tubos de PVC (Figura 5.13) a cada metro a fim de proteger a instrumentação contra o fechamento do furo de sondagem.



**Figura 5.13** – Colocação do tubo de PVC para a proteção da instrumentação

Os acelerômetros receberam uma proteção adicional com a colocação de uma espessa camada de borracha silicone (Figura 5.14), envolvendo-os totalmente. Os cabos dos acelerômetros e das células de carga foram fixados na composição de hastes utilizando-se fitas plásticas (Figura 5.14).



**Figura 5.14** – Proteção dos acelerômetros através de uma camada de borracha silicone

### 5.5.3.2 Controle da penetração permanente do amostrador

A importância do controle da penetração permanente do amostrador, para cada golpe do martelo, na verificação da qualidade da instrumentação foi apresentada e discutida no item 4.7.2. Desta forma, para medir a penetração do amostrador no solo foi utilizada como referência uma linha de nylon presa a dois piquetes cravados, próximo a cada furo de sondagem (Figura 5.15a). Antes do início do ensaio penetrométrico, para cada metro de profundidade, foi feita na composição de hastes uma marca de referência coincidente com a altura da linha de nylon. A partir deste ponto foram marcados três intervalos de 0.15 m para o controle da penetração permanente do amostrador para cada golpe (Figura 5.15b).



**Figura 5.15** – (a) linha de referência utilizada para medida da penetração permanente (b) medida da penetração permanente

## 5.6 Programa *catmanEasy-AP*

O programa *catmanEasy-AP* (versão 3.0), além de ser utilizado para o registro dos dados dos ensaios de campo, permite o tratamento dos sinais após o processamento dos dados. Esse programa, que é fácil de ser configurado, permite a escolha da taxa de aquisição de dados além de permitir a ativação de um sistema de *trigger* e a frequência de corte do filtro passa-baixa.

### 5.6.1 Configuração do programa *catmanEasy- AP*

Inicialmente os sistemas de aquisição de dados devem ser acoplados de forma a permitir que trabalhem em conjunto. Assim, esse conjunto funciona como se fosse um sistema único com oito canais ao invés de quatro mais quatro canais. O esquema de conexão dos sistemas de aquisição de dados com o notebook é apresentado na Figura 5.16.

Para a aquisição de dados, utilizado o programa *catmanEasy- AP*, inicialmente deve ser criado um projeto, para que os sensores sejam devidamente configurados (Figura 5.17). A configuração dos sensores é realizada através da criação de sensores virtuais, um para cada sensor real. Foram criados então seis novos sensores, correspondentes a quatro



acelerômetros e duas células de carga. Para os acelerômetros piezoelétricos, a opção escolhida foi o sensor tipo *IEPE* uma vez que esses possuem eletrônica interna. Em relação à célula de carga optou-se pelo sensor do tipo ponte completa (*full bridge*).

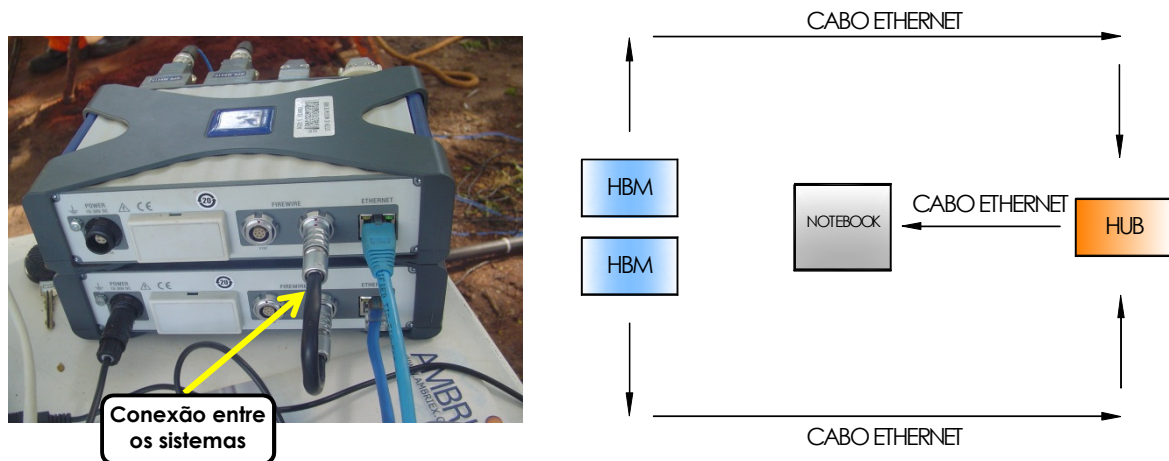


Figura 5.16 – Conexão dos sistemas de aquisição de dados com o notebook

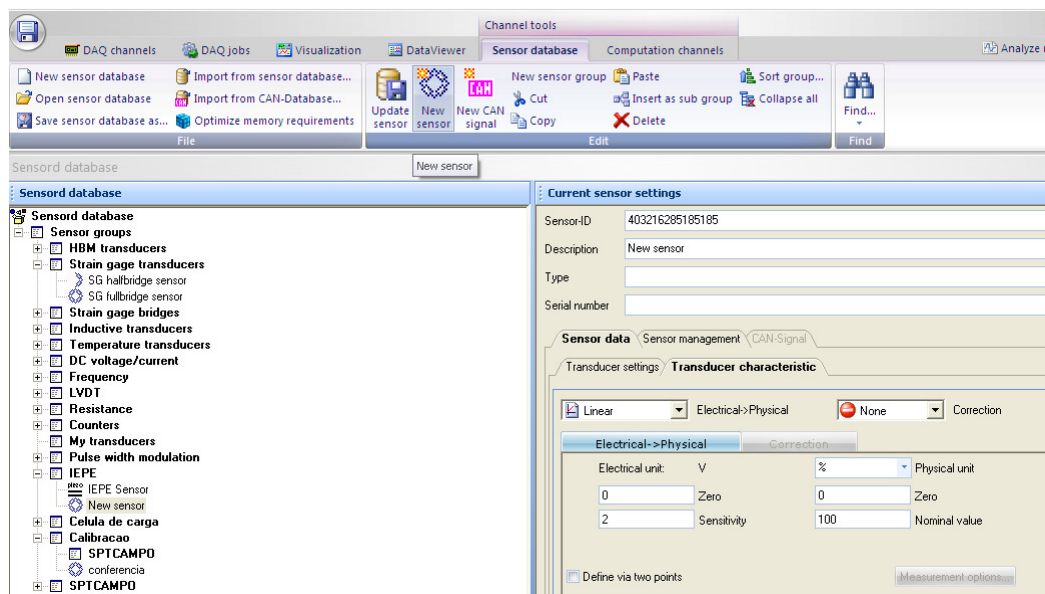
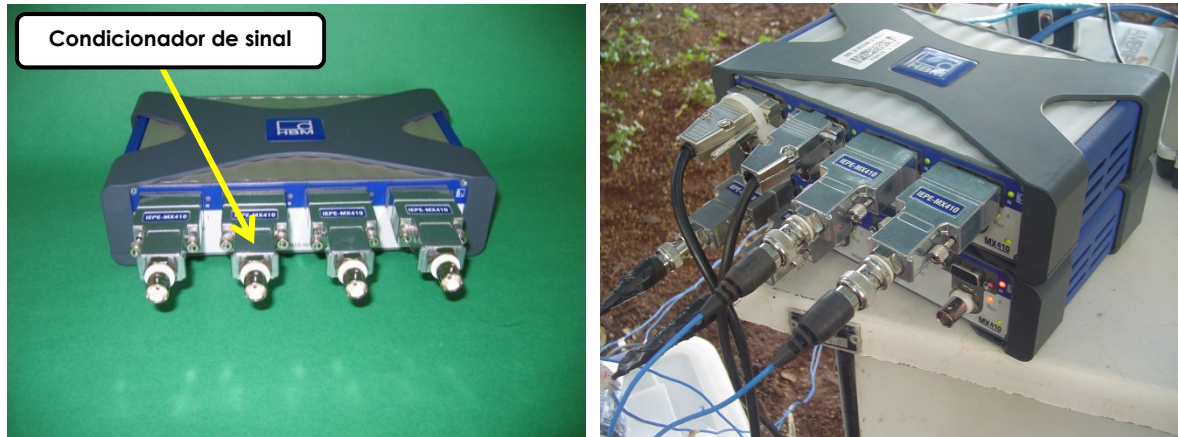


Figura 5.17 – Configuração dos sensores

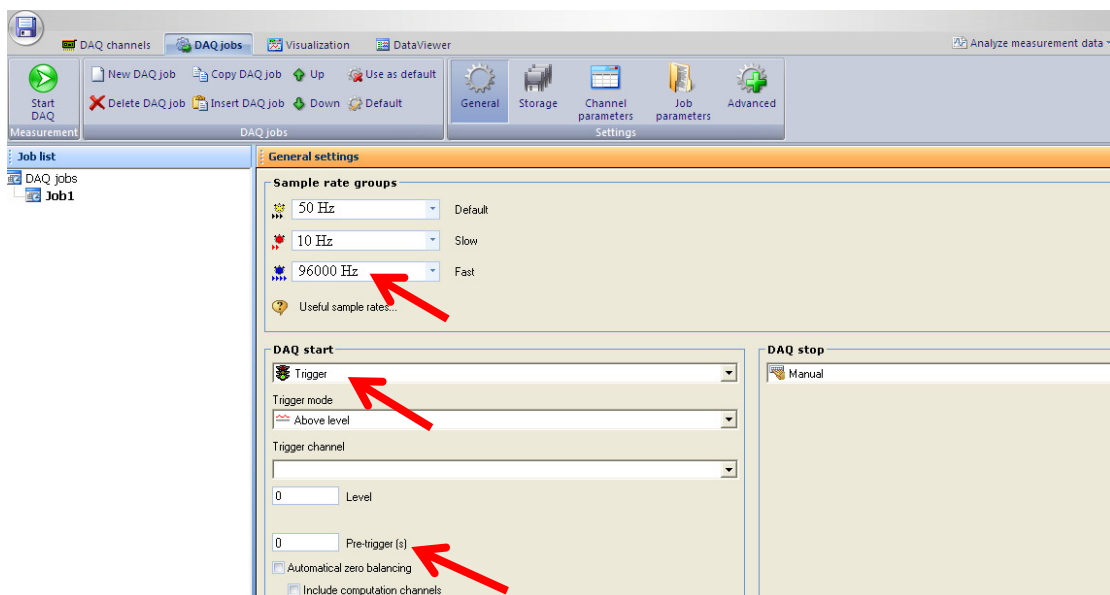
A configuração dos acelerômetros foi feita através da carta de calibração fornecida pelo fabricante, utilizando os valores fornecidos em  $\text{mV}/\text{ms}^{-2}$ . Em relação à célula de carga foi utilizada a equação de calibração ( $\text{mV}/\text{kN}$ ) obtida em laboratório (item 4.6). Após a configuração, os sensores devem ser arrastados para os seus respectivos canais. No caso

dos acelerômetros, é necessário utilizar condicionadores de sinais externos (Figura 5.18), específicos para sensores *IEPE*.



**Figura 5.18** – Condicionador de sinal externo para sensor do tipo *IEPE*

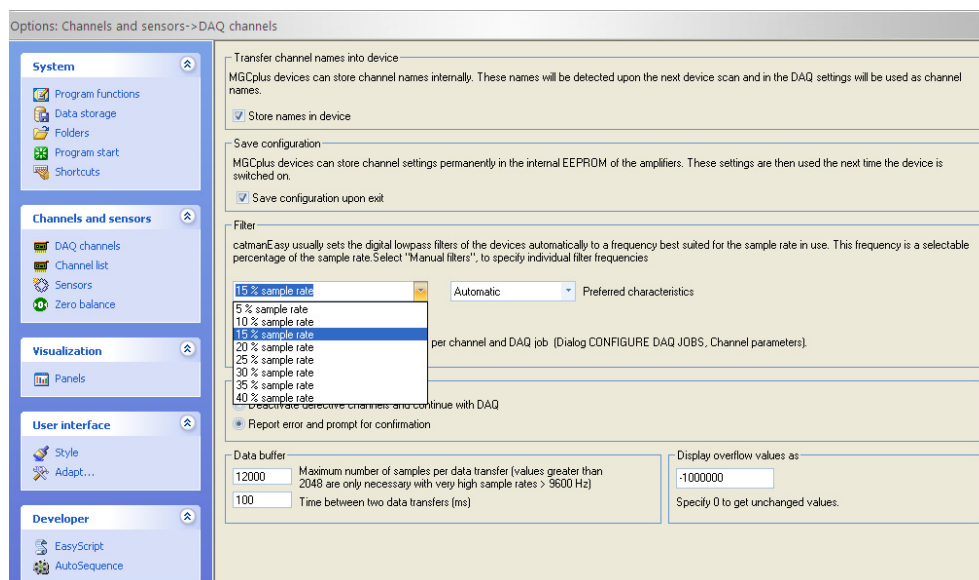
Após a configuração dos sensores foi selecionada a taxa de aquisição de dados (96 kHz) e a programação do sistema de *trigger*, conforme mostra a Figura 5.19. O programa *catmanEasy- AP* possui um sistema de *pré-trigger* que possibilita a gravação de uma certa quantidade de dados antes do *trigger* ser disparado. Desta forma fica garantida a gravação de todos os dados correspondentes ao evento completo.



**Figura 5.19** – Configuração da taxa de aquisição de dados e do sistema de *trigger*



Durante os ensaios de campo foi programada a utilização de um filtro passa baixa (*anti-aliasing*), seguindo as recomendações da ASTM (2010). Essa norma recomenda que o filtro passa baixa deve ser de pelo menos 5 kHz. Neste projeto estabeleceu-se uma frequência de corte de 15% da taxa de aquisição dos sinais (Figura 5.20), ou seja 14.4 kHz.



**Figura 5.20** – Configuração do filtro passa baixa

Os sinais coletados podem ser visualizados em tempo real, durante o impacto. Os arquivos são salvos imediatamente após o término do registro dos dados através do comando *data saving* no formato *catman standard format*. Após o fim do evento, os arquivos podem ser tratados através do módulo de análise dos dados. Nesse módulo existem diversas ferramentas e facilidades, incluindo o tratamento dos sinais através de um módulo matemático, que permite o cálculo de integrais e derivadas. Além disso, os sinais podem ser filtrados novamente, caso haja necessidade, e também podem ser analisados no domínio da frequência.

Devido à elevada taxa de aquisição de dados foi necessário reduzir o número de registros dos arquivos para a utilização do programa *Microsoft Office Excel*. Esse programa possui um número limitado de dados que podem ser processados. Assim, os arquivos foram cortados dentro do intervalo de interesse, desprezando os pontos que se encontravam antes do início e após o final do evento (Figura 5.21). Desta forma, o arquivo reduzido foi exportado em formato ASCII para programa *Microsoft Office Excel*, para posterior tratamento dos dados. As planilhas geradas através desse programa possibilitaram a geração dos gráficos utilizando o programa *Grapher* (versão 9.0).

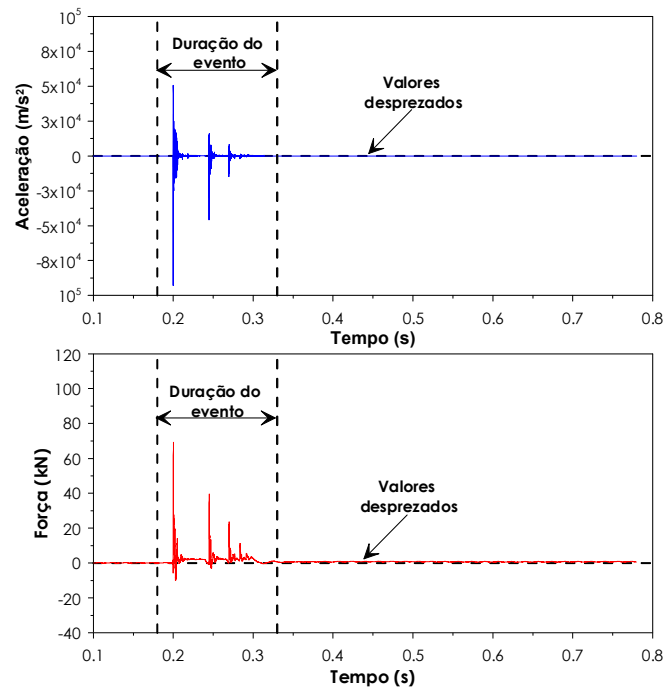


Figura 5.21 – Intervalo de duração completa do evento

## 5.7 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentadas informações referentes à caracterização geológico-geotécnica dos campos experimentais estudados, aos procedimentos adotados para a execução dos ensaios de sondagem SPT e à aquisição dos registros de campo. O objetivo principal deste capítulo foi disponibilizar informações relevantes em relação aos principais procedimentos realizados, de maneira que este trabalho experimental possa ser entendido e reproduzido.

O procedimento básico adotado nos ensaios experimentais foi a determinação da energia responsável pela cravação do amostrador SPT, ou seja, a instrumentação foi posicionada acima do amostrador. Ensaios adicionais realizados com dois pontos de instrumentação simultâneos possibilitaram um avanço na interpretação dos mecanismos de transferência e perda de energia ao longo do evento. Esses resultados serão apresentados e discutidos nos próximos capítulos.

Por fim, apresentou-se os procedimentos para a utilização do programa *catmanEasy* na aquisição dos sinais de força e aceleração. Esse programa tem-se mostrado uma ferramenta bastante útil, versátil e de fácil utilização. Os procedimentos de cálculo foram realizados com o auxílio de programas consagrados, tais como *Microsoft Office Excel* e

*Grapher*. A rotina de cálculo utilizada, apesar de ter sido eficaz ainda pode ser aperfeiçoada, com a criação de um procedimento para seleção automática dos dados referentes à duração do evento.

# Capítulo 6

## Avaliação da energia no ensaio SPT

### 6.1 Considerações iniciais

Neste capítulo são discutidas análises realizadas com os sinais de força e aceleração, registrados durante o golpe do martelo. O objetivo maior é determinar as quantidades de energia, através do Método *EFV*, envolvidas no ensaio SPT. De uma maneira geral, os sinais de aceleração registrados pelo par de acelerômetros apresentaram-se muito próximos, possibilitando adotar como procedimento padrão os valores médios de aceleração (Figura 6.1). Os gráficos típicos dos sinais utilizados na determinação das quantidades de energia podem ser vistos no Apêndice B.

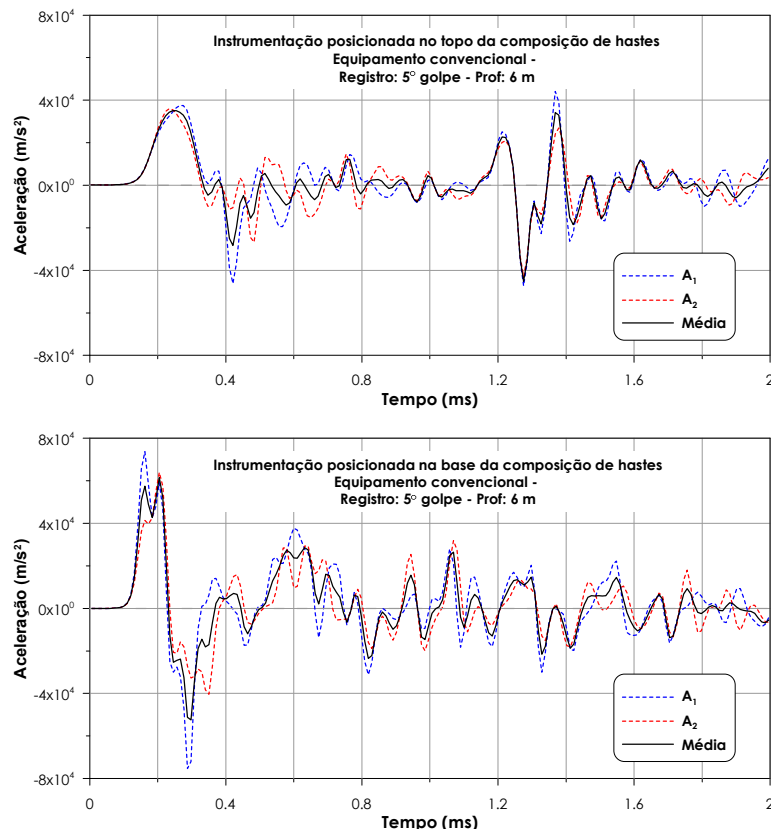


Figura 6.1 – Comparação entre os registros de aceleração (Equipamento convencional – Prof: 6 m)

A quantidade de energia que atinge o topo e a base da composição de hastes foi determinada para os golpes correspondentes aos últimos 0.3 m de penetração do amostrador SPT. Com esses valores de energia foram determinados os valores de eficiência

de topo (logo abaixo da cabeça de bater) e eficiência de base (logo acima do amostrador). A medida simultânea dos registros possibilitou quantificar as perdas de energia que ocorrem ao longo do comprimento da composição de hastes para cada um dos equipamentos utilizados.

São apresentadas análises comparativas entre as curvas de energia e força teórica e experimental. Essas análises permitiram entender melhor o processo de transferência de energia, quantificar a importância dos impactos secundários na cravação do amostrador SPT, assim como avaliar a influência da rigidez dos coxins na transferência de energia. Por último, é apresentada uma análise da influência da compactidade e/ou consistência do solo no processo de transferência de energia para composições de haste curta e média.

## **6.2 Energia versus penetração permanente**

### **6.2.1 Campo Experimental da UNESP/Bauru**

A Tabela 6.1 e a Tabela 6.2 apresentam um resumo dos resultados obtidos no Campo Experimental da UNESP/Bauru. Esses resultados correspondem aos dois equipamentos utilizados nos ensaios de campo, ou seja, equipamento convencional e equipamento mecanizado. Para cada golpe de martelo, foram determinados os valores de energia de topo e base da composição de hastes, através do Método EFV, bem como os valores de energia potencial do sistema ( $EP_{sistema}$ ) e energia potencial do martelo ( $EP_M$ ) (Equação 2.3). Os valores de energia foram avaliados em função da penetração permanente do amostrador ( $\rho$ ) correspondente a cada golpe do martelo. Nessas tabelas também são mostrados os valores das penetrações acumuladas

A partir dos resultados foram plotadas as curvas de energia em função da penetração permanente (Figura 6.2 a Figura 6.7). A energia potencial do martelo e das hastes diminui com o aumento do comprimento da composição de hastes devido à diminuição da penetração permanente do amostrador. Os resultados indicam que a energia potencial real do sistema é pelo menos 5% superior ao valor da energia potencial teórica para todos os casos analisados. Desta forma, a correção proposta por Odebrecht (2003) é de fundamental importância para a determinação correta do valor da eficiência do ensaio.

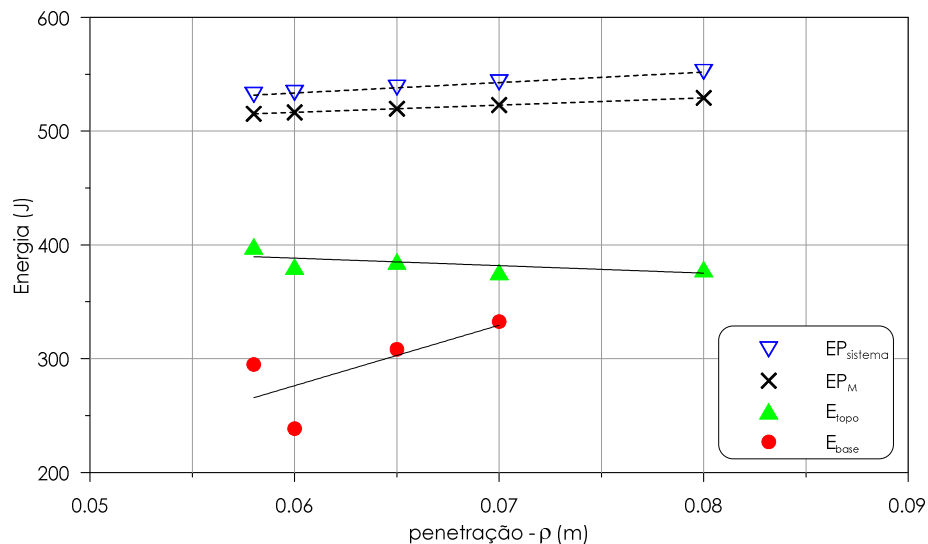
**Tabela 6.1** – Valores de energia e penetração permanente para ensaios utilizando o equipamento convencional (Campo experimental da UNESP/Bauru)

Prof.(m)	$\rho$ (m)	$\rho_{acumulada}$ (m)	Golpe nº	$L_n$ (m)	$E_{topo}$ (J)	$E_{base}$ (J)	$EP_{sistema}$ (J)	$EP_M$ (J)
2.0	0.190	0.355	2	2.95	447.5	243.8	617.1	599.3
	0.175	0.530	3		404.4	283.1	606.2	589.8
4.0	0.180	0.390	2	4.95	386.1	-	621.6	593.0
	0.140	0.530	3		401.9	-	589.5	567.5
6.0	0.087	0.240	3	6.95	407.3	255.0	552.9	533.7
	0.070	0.310	4		385.1	247.7	538.3	522.8
	0.080	0.390	5		408.4	-	546.9	529.2
	0.082	0.472	6		412.2	349.5	548.6	530.5
8.0	0.058	0.230	5	8.95	398.7	294.9	531.7	515.2
	0.065	0.295	6		385.5	308.2	538.1	519.6
	0.080	0.375	7		378.8	-	551.9	529.2
	0.060	0.435	8		380.9	238.5	533.5	516.5
	0.070	0.505	9		376.2	332.6	542.7	522.8
9.0	0.060	0.250	4	9.95	372.0	266.4	535.4	516.5
	0.052	0.302	5		389.7	-	527.8	511.4
	0.054	0.356	6		393.7	316.3	529.7	512.6
	0.041	0.397	7		378.9	294.9	517.3	504.3
	0.043	0.440	8		386.6	-	519.2	505.6
	0.045	0.485	9		382.1	-	521.1	506.9
10.0	0.035	0.190	6	10.95	385.7	345.7	512.7	500.5
	0.045	0.370	10		359.9	287.0	522.5	506.9
	0.075	0.480	12		391.3	309.9	552.1	526.0
11.0	0.030	0.200	6	11.95	358.5	293.9	508.7	497.3
	0.030	0.230	7		344.9	240.4	508.7	497.3
	0.035	0.265	8		390.7	261.4	513.8	500.5
	0.030	0.330	10		391.1	223.8	508.7	497.3
	0.030	0.360	11		368.9	-	508.7	497.3
	0.030	0.390	12		371.6	207.8	508.7	497.3
	0.030	0.420	13		365.8	247.2	508.7	497.3
	0.033	0.453	14		361.4	-	511.8	499.2
12.0	0.027	0.202	6	12.95	359.1	-	506.5	495.4
	0.038	0.275	8		359.0	236.6	518.1	502.4
	0.027	0.302	9		373.8	314.1	506.5	495.4
	0.030	0.370	11		379.6	323.5	509.7	497.3
	0.035	0.405	12		386.9	303.3	514.9	500.5
	0.037	0.442	13		374.3	247.7	517.0	501.8
	0.033	0.475	14		377.9	308.9	512.8	499.3

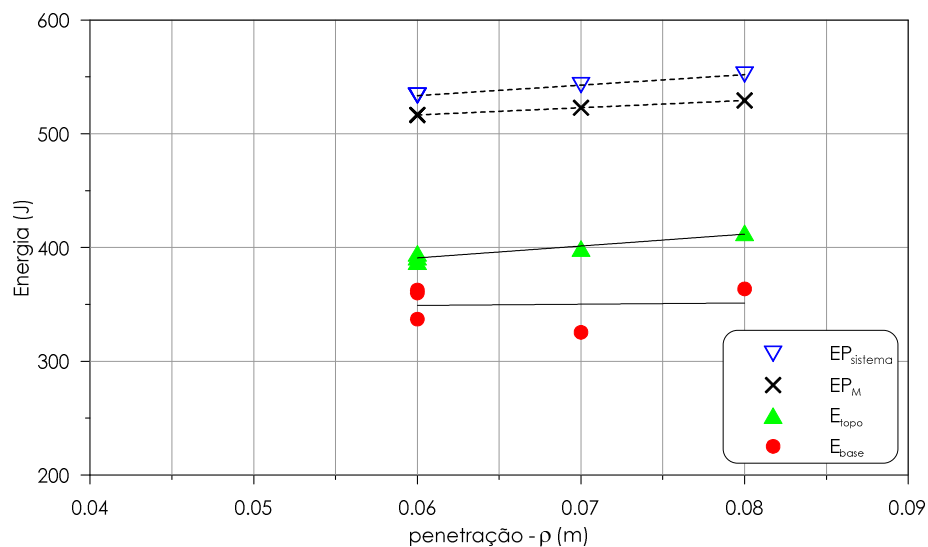
**Tabela 6.2** – Valores de energia e penetração permanente para ensaios utilizando o equipamento mecanizado (Campo experimental da UNESP/Bauru)

Prof.(m)	$\rho$ (m)	$\rho_{acumulada}$ (m)	Golpe nº	$L_n$ (m)	$E_{topo}$ (J)	$E_{base}$ (J)	$EP_{sistema}$ (J)	$EP_M$ (J)
2.0	0.180	0.300	2	2.95	431.8	-	609.8	593.0
	0.160	0.460	3		408.4	382.8	595.2	580.3
Prof.(m)	$\rho$ (m)	$\rho_{acumulada}$ (m)	Golpe nº	$L_n$ (m)	$E_{topo}$ (J)	$E_{base}$ (J)	$EP_{sistema}$ (J)	$EP_M$ (J)
4.0	0.115	0.310	3	4.95	369.9	-	569.6	551.6
	0.170	0.480	4		-	356.9	613.3	586.6
Prof.(m)	$\rho$ (m)	$\rho_{acumulada}$ (m)	Golpe nº	$L_n$ (m)	$E_{topo}$ (J)	$E_{base}$ (J)	$EP_{sistema}$ (J)	$EP_M$ (J)
6.0	0.080	0.350	4	6.95	399.3	369.1	546.9	529.3
	0.070	0.490	6		423.9	-	538.3	522.9
Prof.(m)	$\rho$ (m)	$\rho_{acumulada}$ (m)	Golpe nº	$L_n$ (m)	$E_{topo}$ (J)	$E_{base}$ (J)	$EP_{sistema}$ (J)	$EP_M$ (J)
8.0	0.060	0.230	4	8.95	391.4	362.6	533.5	516.5
	0.080	0.310	5		412.9	363.6	551.9	529.3
	0.060	0.370	6		387.4	337.0	533.5	516.5
	0.060	0.430	7		394.9	360.0	533.5	516.5
	0.070	0.500	8		399.0	325.4	542.7	522.9
Prof.(m)	$\rho$ (m)	$\rho_{acumulada}$ (m)	Golpe nº	$L_n$ (m)	$E_{topo}$ (J)	$E_{base}$ (J)	$EP_{sistema}$ (J)	$EP_M$ (J)
9.0	0.045	0.195	4	9.95	394.6	297.4	521.1	506.9
	0.045	0.240	5		393.5	316.4	521.1	506.9
	0.055	0.295	6		383.4	316.9	530.7	513.3
	0.045	0.340	7		378.4	313.1	521.1	506.9
	0.050	0.390	8		370.2	282.3	525.9	510.1
	0.050	0.440	9		383.3	278.0	525.9	510.1
	0.050	0.490	10		383.9	265.9	525.9	510.1
Prof.(m)	$\rho$ (m)	$\rho_{acumulada}$ (m)	Golpe nº	$L_n$ (m)	$E_{topo}$ (J)	$E_{base}$ (J)	$EP_{sistema}$ (J)	$EP_M$ (J)
10.0	0.040	0.200	5	10.95	394.2	278.1	517.6	503.7
	0.040	0.240	6		378.7	243.2	517.6	503.7
	0.030	0.270	7		383.2	285.5	507.8	497.4
	0.040	0.310	8		368.1	-	517.6	503.7
	0.035	0.345	9		384.0	274.4	512.7	500.6
	0.040	0.385	10		380.4	264.9	517.6	503.7
	0.025	0.410	11		369.8	267.5	502.9	494.2
	0.045	0.455	12		385.9	323.8	522.5	506.9
Prof.(m)	$\rho$ (m)	$\rho_{acumulada}$ (m)	Golpe nº	$L_n$ (m)	$E_{topo}$ (J)	$E_{base}$ (J)	$EP_{sistema}$ (J)	$EP_M$ (J)
11.0	0.025	0.180	6	11.95	365.5	264.2	503.6	494.2
	0.030	0.210	7		359.7	285.6	508.7	497.4
	0.025	0.235	8		346.7	244.8	503.6	494.2
	0.025	0.260	9		351.0	-	503.6	494.2
	0.030	0.290	10		364.2	236.2	508.7	497.4
	0.025	0.315	11		360.7	253.1	503.6	494.2
	0.030	0.345	12		359.9	255.4	508.7	497.4
	0.030	0.375	13		368.3	280.5	508.7	497.4
	0.027	0.402	14		350.0	234.8	505.7	495.5
	0.028	0.430	15		351.8	242.3	506.7	496.1
	0.030	0.460	16		371.9	271.1	508.7	497.4
Prof.(m)	$\rho$ (m)	$\rho_{acumulada}$ (m)	Golpe nº	$L_n$ (m)	$E_{topo}$ (J)	$E_{base}$ (J)	$EP_{sistema}$ (J)	$EP_M$ (J)
12.0	0.030	0.215	6	12.95	382.7	286.9	509.7	497.4
	0.025	0.240	7		371.4	246.7	504.4	494.2
	0.025	0.265	8		367.1	237.6	504.4	494.2
	0.033	0.298	9		383.2	258.4	512.8	499.3
	0.025	0.323	10		372.6	235.7	504.4	494.2
	0.027	0.350	11		366.9	232.3	506.5	495.5
	0.025	0.405	13		361.4	230.6	504.4	494.2
	0.025	0.430	14		377.0	329.4	504.4	494.2
	0.035	0.465	15		367.03	226.2	514.9	500.6

Observa-se que para alguns casos com o mesmo valor de penetração permanente as quantidades de energia de topo e de base são bastante distintas, independente do tipo de equipamento utilizado (Figura 6.3 a Figura 6.7). Essas diferentes quantidades de energia envolvidas no mecanismo de penetração do amostrador no solo ocorrem devido às características intrínsecas do ensaio SPT (flambagem de hastes, excentricidade do golpe e outras fontes de perdas de energia). O controle de recuperação das amostras, após a penetração do amostrador no solo, indicou que para esse tipo de solo quase não ocorreu penetração com o amostrador embuchado. Desta forma, pode-se considerar que não ocorreram variações na quantidade de energia associadas a alterações no mecanismo de penetração do amostrador.



**Figura 6.2** – Energia versus penetração permanente (Equipamento convencional –  $L_h$ : 8.95 m)



**Figura 6.3** – Energia versus penetração permanente (Equipamento mecanizado –  $L_h$ : 8.95 m)



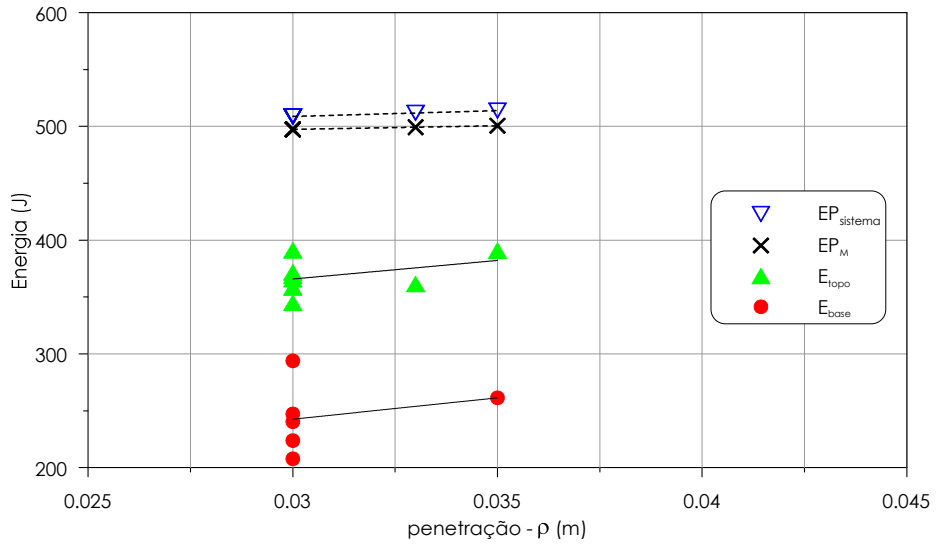


Figura 6.4 – Energia versus penetração permanente (Equipamento convencional –  $L_h$ : 11.95 m)

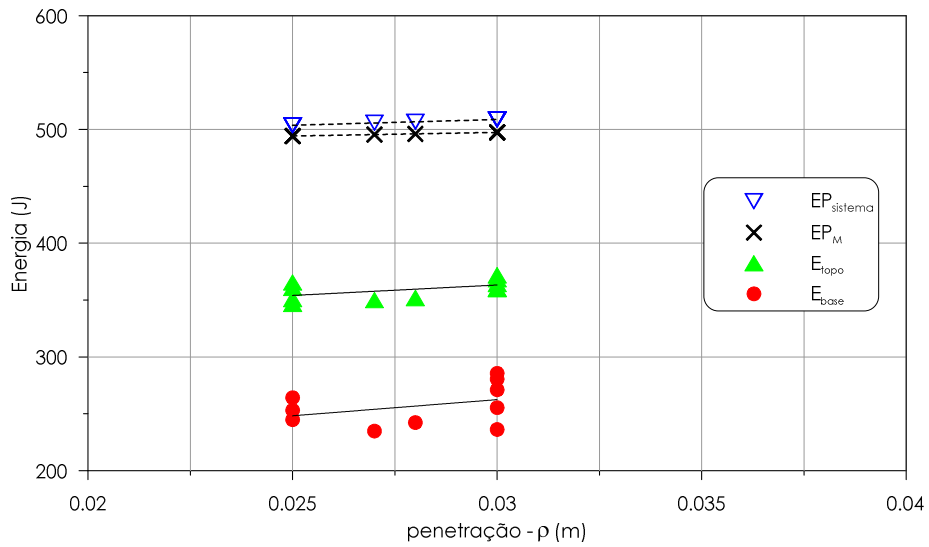


Figura 6.5 – Energia versus penetração permanente (Equipamento mecanizado –  $L_h$ : 11.95 m)

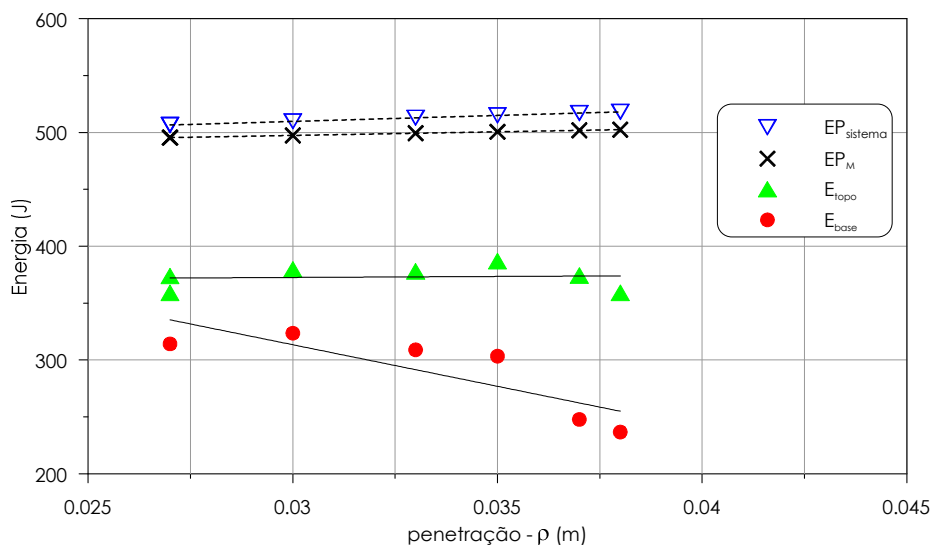
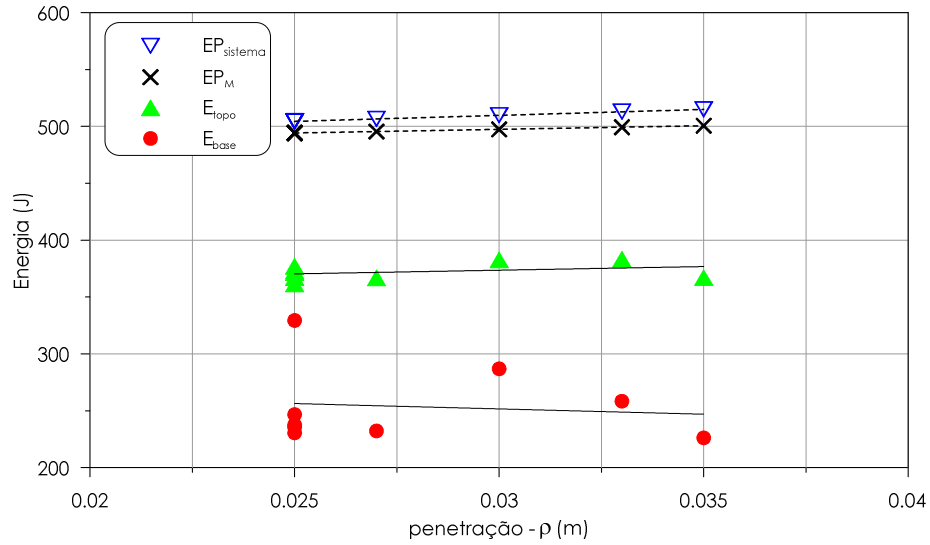
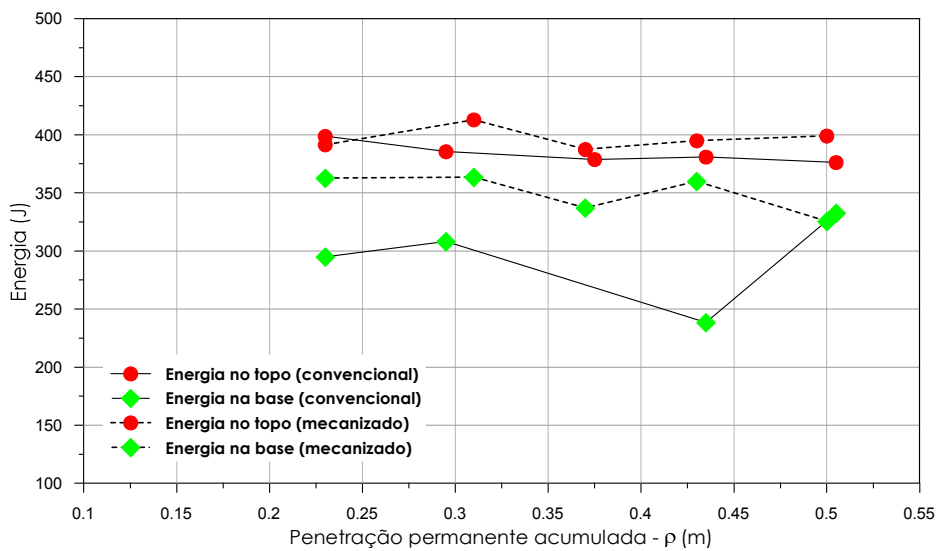


Figura 6.6 – Energia versus penetração permanente (Equipamento convencional –  $L_h$ : 12.95 m)

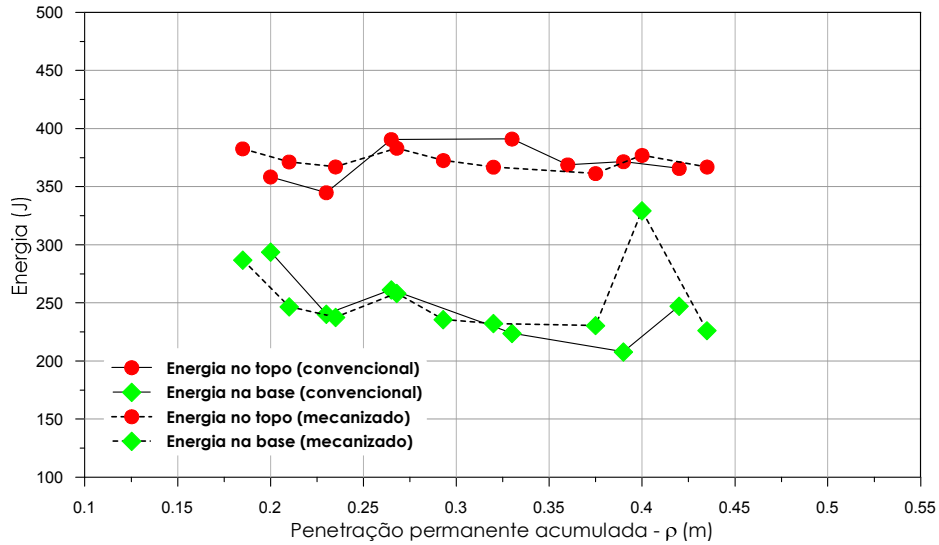


**Figura 6.7** – Energia versus penetração permanente (Equipamento mecanizado –  $L_h$ : 12.95 m)

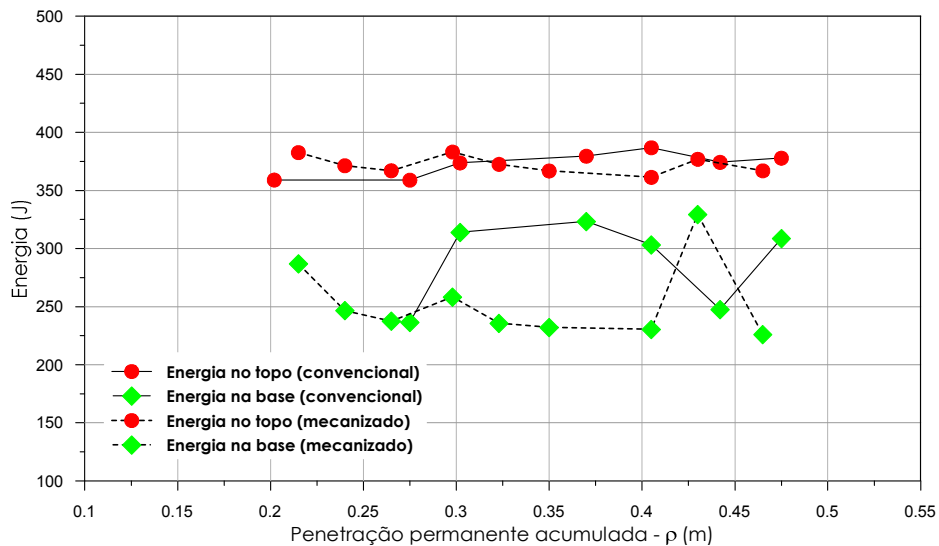
A Figura 6.8 a Figura 6.10 mostram gráficos dos valores de energia em função da penetração permanente acumulada do amostrador no solo. Esses gráficos indicam que ao longo da penetração do amostrador no solo a variabilidade da energia determinada no topo é inferior a da energia determinada na base da composição de hastes.



**Figura 6.8** –Variação da energia por golpe em função da penetração acumulada ( $L_h$ : 8.95 m)



**Figura 6.9** –Variação da energia por golpe em função da penetração acumulada ( $L_h$ : 11.95 m)



**Figura 6.10** –Variação da energia por golpe em função da penetração acumulada ( $L_h$ : 12.95 m)

## 6.2.2 Loteamento residencial em São Carlos

Da mesma forma que no item anterior, a Tabela 6.3 e a Tabela 6.4 apresentam um resumo dos resultados obtidos no loteamento residencial em São Carlos. Essas tabelas mostram os valores de energia de topo e base da composição de hastes, variação da energia potencial do sistema ( $EP_{sistema}$ ) e do martelo ( $EP_M$ ) e a penetração correspondente a cada golpe ( $\rho$ ), bem os valores das penetrações acumuladas.

**Tabela 6.3** – Valores de energia e penetração permanente para ensaios utilizando o equipamento convencional (Loteamento residencial em São Carlos)

Prof.(m)	$\rho$ (m)	$\rho_{acumulada}$ (m)	Golpe nº	$L_R$ (m)	$E_{topo}$ (J)	$E_{base}$ (J)	$EP_{sistema}$ (J)	$EP_M$ (J)		
4.0	0.070	0.245	3	4.95	377.9	346.7	533.9	522.9		
	0.070	0.315	4		378.2	304.1	533.9	522.9		
	0.058	0.430	6		377.1	302.1	524.3	515.2		
	0.060	0.490	7		409.8	352.5	525.9	516.5		
Prof.(m)	$\rho$ (m)	$\rho_{acumulada}$ (m)	Golpe nº	$L_R$ (m)	$E_{topo}$ (J)	$E_{base}$ (J)	$EP_{sistema}$ (J)	$EP_M$ (J)		
6.0	0.040	0.205	4	6.95	371.0	317.2	512.6	503.7		
	0.040	0.245	5		377.3	251.1	512.6	503.7		
	0.030	0.275	6		331.8	-	504.0	497.4		
	0.030	0.305	7		361.6	-	504.0	497.4		
	0.025	0.330	8		343.4	274.3	499.7	494.2		
	0.030	0.360	9		340.6	284.2	504.0	497.4		
	0.022	0.405	11		360.5	291.0	497.1	492.3		
	0.025	0.430	12		351.6	256.0	499.7	494.2		
0.025	0.455	13	343.6	258.3	499.7	494.2				
Prof.(m)	$\rho$ (m)	$\rho_{acumulada}$ (m)	Golpe nº	$L_R$ (m)	$E_{topo}$ (J)	$E_{base}$ (J)	$EP_{sistema}$ (J)	$EP_M$ (J)		
8.0	0.028	0.193	4	8.95	369.7	252.0	504.0	496.1		
	0.027	0.220	5		374.7	245.8	503.1	495.5		
	0.030	0.250	6		382.1	267.9	505.9	497.4		
	0.028	0.278	7		365.9	-	504.0	496.1		
	0.027	0.305	8		366.0	241.0	503.1	495.5		
	0.023	0.328	9		359.7	-	499.4	492.9		
	0.024	0.352	10		351.8	288.9	500.4	493.5		
	0.023	0.375	11		398.3	-	499.4	492.9		
	0.020	0.395	12		417.6	325.7	496.7	491.0		
	0.015	0.410	13		394.7	314.7	492.1	487.8		
	0.020	0.430	14		362.0	231.7	496.7	491.0		
	0.025	0.455	15		387.9	285.2	501.3	494.2		
	Prof.(m)	$\rho$ (m)	$\rho_{acumulada}$ (m)		Golpe nº	$L_R$ (m)	$E_{topo}$ (J)	$E_{base}$ (J)	$EP_{sistema}$ (J)	$EP_M$ (J)
	9.0	0.020	0.182		6	9.95	355.1	304.6	497.3	491.0
		0.021	0.203		7		364.2	300.2	498.3	491.6
0.022		0.225	8	368.0	278.2		499.2	492.3		
0.019		0.244	9	375.2	289.0		496.3	490.4		
0.016		0.260	10	371.5	290.3		493.5	488.4		
0.020		0.280	11	379.2	305.1		497.3	491.0		
0.018		0.298	12	346.0	287.4		495.4	489.7		
0.009		0.307	13	362.7	300.8		486.8	484.0		
0.018		0.325	14	362.8	293.0		495.4	489.7		
0.014		0.339	15	370.9	282.8		491.6	487.2		
0.013		0.352	16	371.1	305.0		490.6	486.5		
0.012		0.364	17	355.1	270.6		489.7	485.9		
0.016		0.380	18	379.5	286.1		493.5	488.4		
0.013		0.393	19	392.1	302.4		490.6	486.5		
0.008		0.401	20	378.5	-		485.9	483.3		
0.016		0.417	21	374.6	277.6		493.5	488.4		
0.013	0.430	22	379.3	274.6	490.6	486.5				
0.010	0.440	23	386.9	278.4	487.8	484.6				
0.010	0.450	24	395.3	288.1	487.8	484.6				
Prof.(m)	$\rho$ (m)	$\rho_{acumulada}$ (m)	Golpe nº	$L_R$ (m)	$E_{topo}$ (J)	$E_{base}$ (J)	$EP_{sistema}$ (J)	$EP_M$ (J)		
10.0	0.032	0.189	4	10.95	377.7	303.9	509.7	498.6		
	0.039	0.228	5		384.3	282.5	516.6	503.1		
	0.032	0.260	6		368.0	326.4	509.7	498.6		
	0.038	0.298	7		377.2	303.8	515.7	502.5		
	0.024	0.322	8		356.7	295.6	501.9	493.5		
	0.032	0.354	9		373.9	292.0	509.7	498.6		
	0.033	0.387	10		365.3	288.5	510.7	499.3		
	0.030	0.417	11		359.1	-	507.8	497.4		
0.031	0.448	12	366.4	235.4	508.8	498.00				

**Tabela 6.4** – Valores de energia e penetração permanente para ensaios utilizando o equipamento mecanizado (Loteamento residencial em São Carlos)

Prof.(m)	$\rho$ (m)	$\rho_{acumulada}$ (m)	Golpe nº	$L_h$ (m)	$E_{topo}$ (J)	$E_{base}$ (J)	$EP_{sistema}$ (J)	$EP_M$ (J)		
4.0	0.072	0.167	2	4.95	391.6	315.8	535.4	524.1		
	0.067	0.234	3		366.2	327.9	531.5	521.0		
	0.066	0.300	4		391.8	354.5	530.7	520.3		
	0.070	0.370	5		377.2	339.3	533.9	522.9		
	0.055	0.425	6		370.0	337.1	521.9	513.3		
Prof.(m)	$\rho$ (m)	$\rho_{acumulada}$ (m)	Golpe nº	$L_h$ (m)	$E_{topo}$ (J)	$E_{base}$ (J)	$EP_{sistema}$ (J)	$EP_M$ (J)		
7.0	0.031	0.169	4	7.95	370.5	318.0	505.8	498.0		
	0.028	0.197	5		363.3	299.6	503.1	496.1		
	0.028	0.225	6		363.3	318.0	503.1	496.1		
	0.025	0.250	7		372.1	314.4	500.5	494.2		
	0.022	0.271	8		374.7	290.5	497.8	492.3		
	0.024	0.296	9		367.2	304.2	499.6	493.5		
8.0	0.021	0.338	11	8.95	365.8	289.7	496.9	491.6		
	0.038	0.168	4		357.1	276.5	513.2	502.5		
	0.027	0.223	6		361.2	270.1	503.1	495.5		
	0.028	0.278	8		371.5	301.6	504.0	496.1		
	0.030	0.330	10		366.5	263.7	505.9	497.4		
9.0	0.019	0.371	12	9.95	352.0	305.3	495.7	490.4		
	0.024	0.395	13		396.7	264.8	500.4	493.5		
	0.019	0.414	14		372.3	272.7	495.7	490.4		
	0.017	0.450	16		399.2	326.9	493.9	489.1		
	0.023	0.190	6		362.3	251.9	500.2	492.9		
	0.018	0.230	8		386.5	304.4	495.4	489.7		
	0.019	0.249	9		382.9	290.5	496.3	490.4		
10.0	0.017	0.266	10	10.95	391.1	285.3	494.4	489.1		
	0.018	0.300	12		379.4	278.6	495.4	489.7		
	0.014	0.314	13		384.3	258.5	491.6	487.2		
	0.016	0.330	14		384.6	262.3	493.5	488.4		
	0.015	0.359	16		377.1	274.1	492.5	487.8		
	0.013	0.385	18		385.1	267.4	490.6	486.5		
	0.012	0.412	20		384.7	290.6	489.7	485.9		
	0.013	0.425	21		399.3	280.6	490.6	486.5		
	0.015	0.440	22		386.9	311.5	492.5	487.8		
	0.013	0.453	23		389.2	269.9	490.6	486.5		
	Prof.(m)	$\rho$ (m)	$\rho_{acumulada}$ (m)		Golpe nº	$L_h$ (m)	$E_{topo}$ (J)	$E_{base}$ (J)	$EP_{sistema}$ (J)	$EP_M$ (J)
	10.0	0.033	0.213		5	10.95	403.0	302.8	510.7	499.3
		0.028	0.272		7		401.0	281.4	505.8	496.1
0.026		0.328	9	391.0	268.3		503.8	494.8		
0.029		0.357	10	393.8	286.4		506.8	496.7		
0.027		0.384	11	383.1	282.9		504.8	495.5		
0.031		0.443	13	406.7	264.1		508.8	498.0		
0.029		0.472	14	396.4	260.3		506.8	496.7		

Com esses resultados foram plotadas as curvas de energia no topo e na base da composição de hastes, energia potencial do sistema e da energia potencial do martelo em função da penetração permanente do amostrador ( $\rho$ ) (Figura 6.11 e Figura 6.16). A energia potencial do martelo diminui ligeiramente com o aumento do comprimento da composição de hastes. Este comportamento está associado à diminuição da penetração do amostrador no solo, ou seja, ao aumento da sua resistência. A energia potencial das hastes representa

uma parcela inferior a 5% da energia total do sistema, podendo ser considerada desprezível para esses casos.

Para os golpes registrados nas profundidades de 8 e 9 metros, a energia potencial do sistema apresenta-se menor do que 5% do valor da energia potencial teórica (478.2 J). Desta forma, para esses casos, não há necessidade de ser considerada a correção proposta por Odebrecht (2003) na determinação do valor da eficiência do ensaio.

Novamente foram observados, para ambos os equipamentos, que alguns golpes com valores de penetração permanente iguais resultaram em quantidades de energia no topo e na base bastante distintas (Figura 6.11 e Figura 6.16).

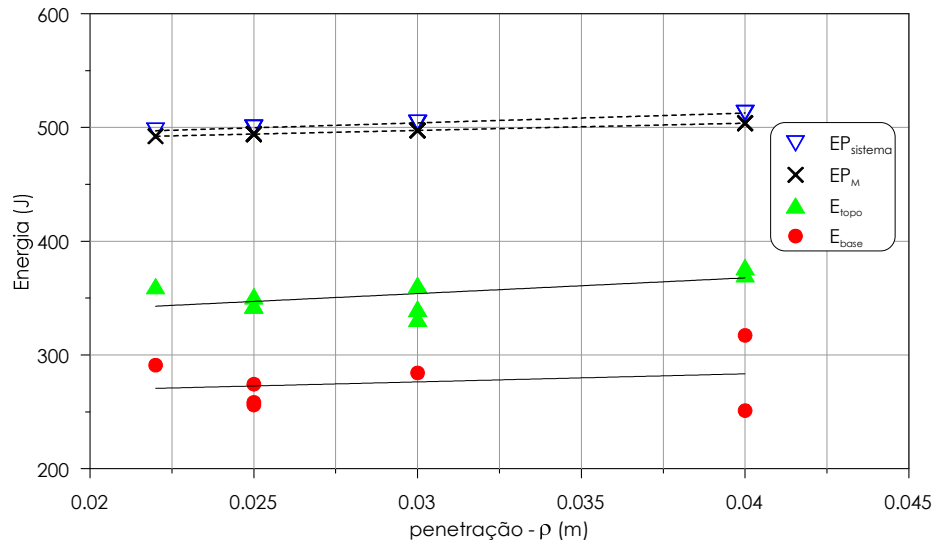


Figura 6.11 – Energia versus penetração permanente (Equipamento convencional –  $L_h$ : 6.95 m)

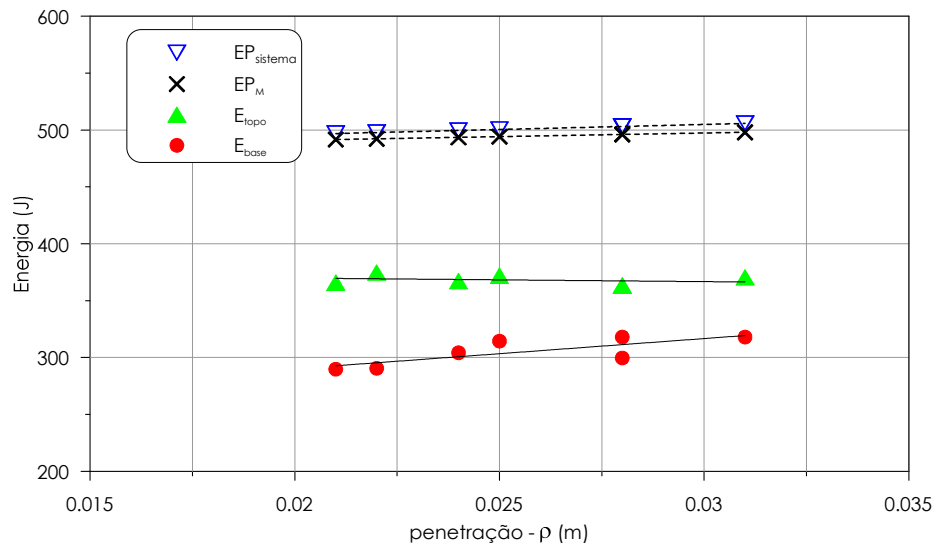


Figura 6.12 – Energia versus penetração permanente (Equipamento mecanizado –  $L_h$ : 6.95 m)

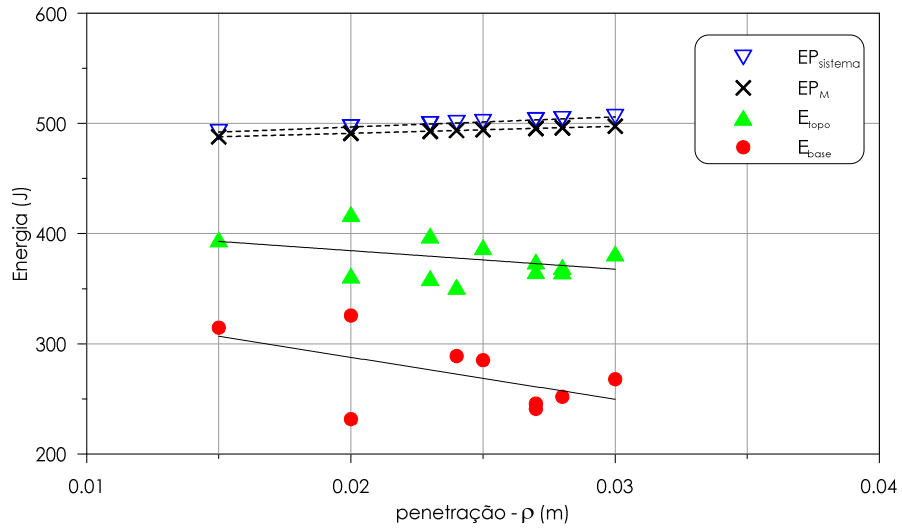


Figura 6.13 – Energia versus penetração permanente (Equipamento convencional –  $L_h$ : 8.95 m)

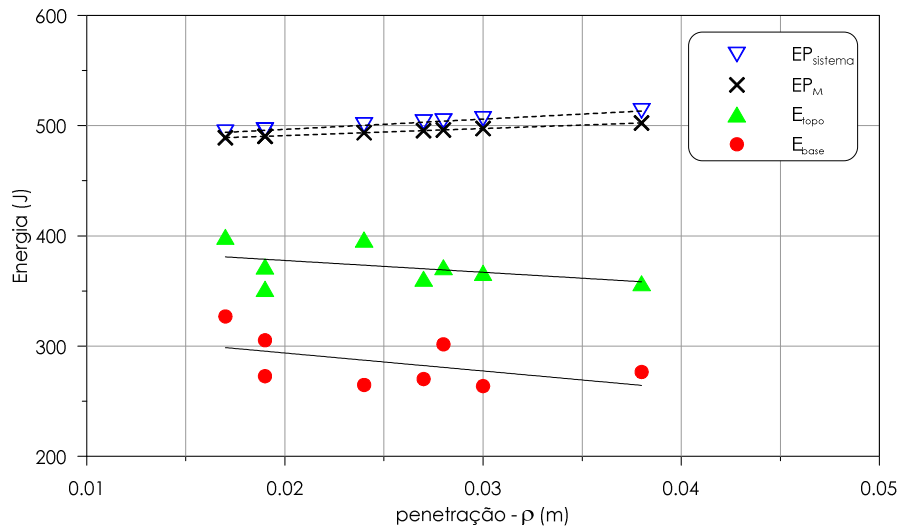


Figura 6.14 – Energia versus penetração permanente (Equipamento mecanizado –  $L_h$ : 8.95 m)

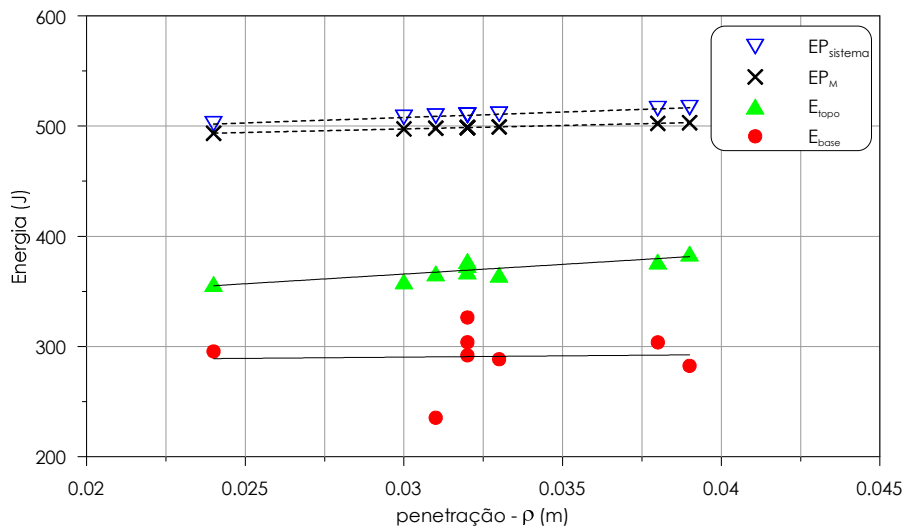
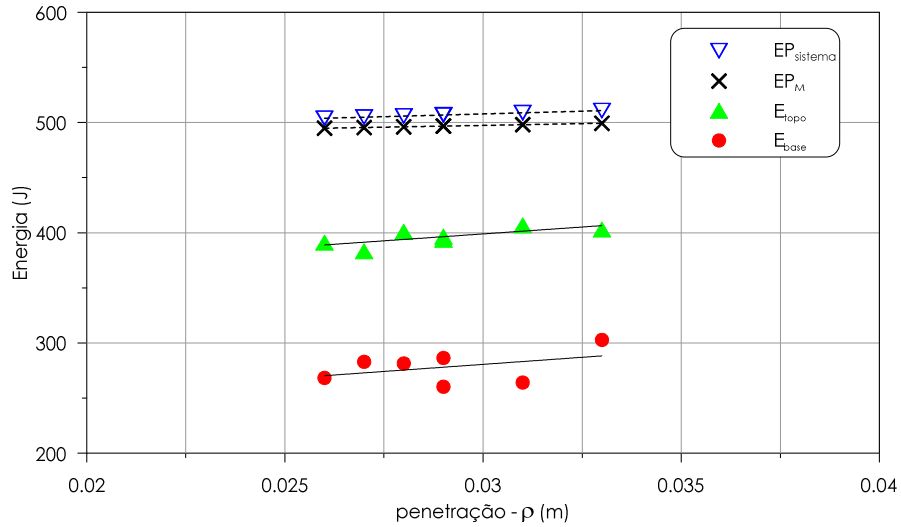
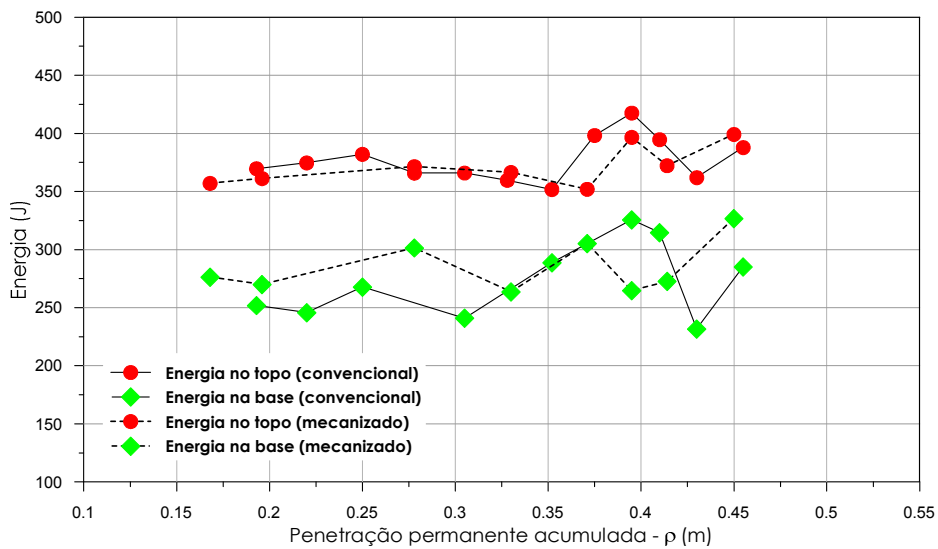


Figura 6.15 – Energia versus penetração permanente (Equipamento convencional –  $L_h$ : 10.95 m)



**Figura 6.16** – Energia versus penetração permanente (Equipamento mecanizado –  $L_h$ : 10.95 m)

Os valores de energia por golpe foram plotadas em função da penetração permanente acumulada do amostrador no solo (Figura 6.17 a Figura 6.19). Os resultados indicam que com a penetração do amostrador ocorre uma grande variabilidade dos valores de energia. De uma maneira geral, essa variabilidade apresenta-se mais acentuada quando os valores de energia são determinados na base da composição de hastes e utilizando o equipamento convencional. A comparação entre os registros dos sinais de aceleração, no início do evento, indicou que para o equipamento mecanizado os sinais apresentaram-se mais coincidentes do que para o equipamento convencional. Conseqüentemente, esse equipamento apresenta uma excentricidade maior do golpe do que o equipamento mecanizado. Todos esses fatores intrínsecos do ensaio SPT podem influenciar diretamente na quantidade de energia envolvida no mecanismo de penetração do amostrador no solo.



**Figura 6.17** –Variação da energia por golpe em função da penetração acumulada ( $L_h$ : 8.95 m)



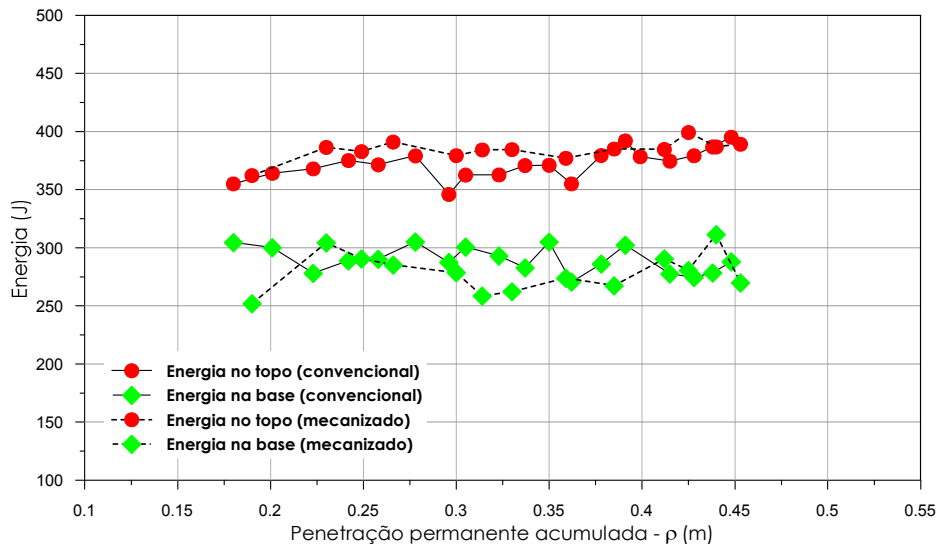


Figura 6.18 –Variação da energia por golpe em função da penetração acumulada ( $L_h$ : 9.95 m)

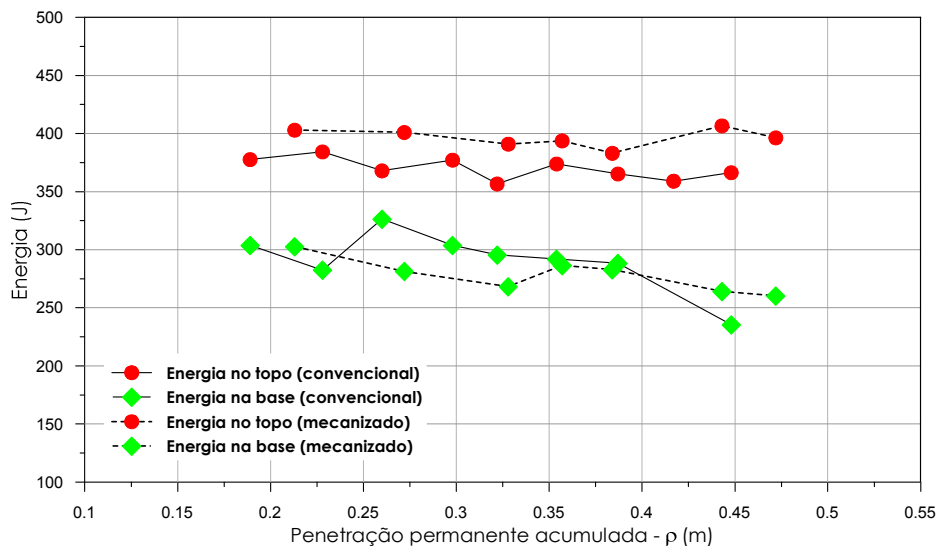


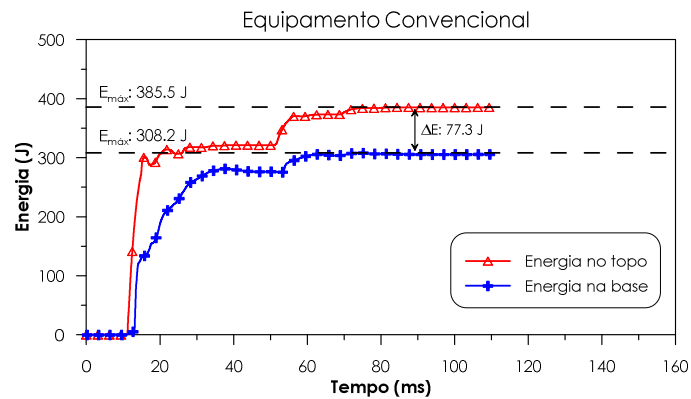
Figura 6.19 –Variação da energia por golpe em função da penetração acumulada ( $L_h$ : 10.95 m)

### 6.3 Eficiência no ensaio SPT

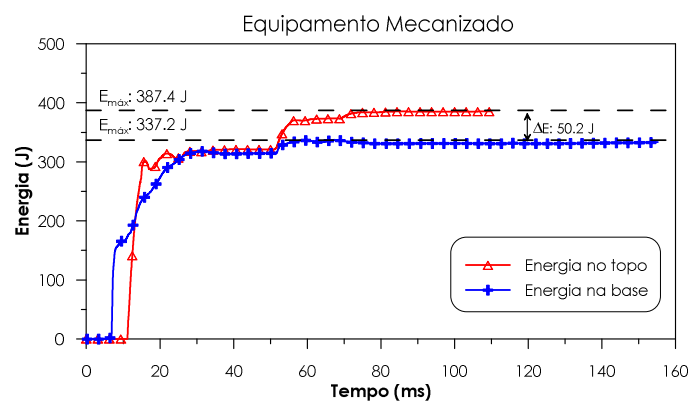
#### 6.3.1 Campo Experimental da UNESP/Bauru

A eficiência ( $\eta$ ) do ensaio SPT foi obtida através da relação entre a energia determinada utilizando a instrumentação e a energia potencial do sistema ( $EP_{sistema}$ ) (Equação 2.3). Resultados experimentais mostraram que de uma maneira geral a perda de energia entre o topo e a base da composição de hastes, quando se utiliza o equipamento mecanizado é menor do que quando se utiliza o equipamento convencional (Figura 6.20 e Figura 6.21). Este fato pode estar associado à flambagem causada por uma pequena excentricidade que ocorre em alguns golpes no ensaio convencional. Além disso, o

processo de liberação do martelo também pode acarretar um movimento da haste em direção às paredes do furo, com conseqüente perda de energia.



**Figura 6.20** – Energia versus tempo para instrumentação simultânea de topo e base (comprimento de composição de haste ( $L_h$ ) de 8.95 m – Equipamento convencional)



**Figura 6.21** – Energia versus tempo para instrumentação simultânea de topo e base (comprimento de composição de haste ( $L_h$ ) de 8.95 m – Equipamento mecanizado)

A Tabela 6.5 e a Tabela 6.6 apresentam um resumo dos valores de eficiência determinados a partir de ensaios realizados no campo experimental da Unesp de Bauru, utilizando os equipamentos convencional e mecanizado.

Dados coletados indicam que para as camadas mais superficiais, que apresentam baixa resistência à penetração, a determinação da eficiência no topo do amostrador torna-se bastante difícil. Em alguns casos, devido a problemas nos sinais dos acelerômetros, os valores tiveram que ser descartados. Os baixos valores de eficiência na base (39.5% e 46.7%) (Tabela 6.5), obtidos utilizando-se o equipamento convencional podem estar associados à elevada excentricidade do golpe devido ao acionamento manual do martelo. À medida que o

comprimento da composição de hastes e o índice  $N_{SPT}$  são aumentados, os valores de eficiência tendem a se tornarem menos discrepantes.

No caso do ensaio mecanizado (Tabela 6.6), os valores de eficiência na base, determinados para as camadas superficiais, não apresentaram os mesmos problemas do ensaio convencional. Os sinais dos acelerômetros apresentaram-se mais consistentes, indicando uma qualidade superior em relação à excentricidade do golpe e conseqüentemente resultando em uma menor perda de energia.

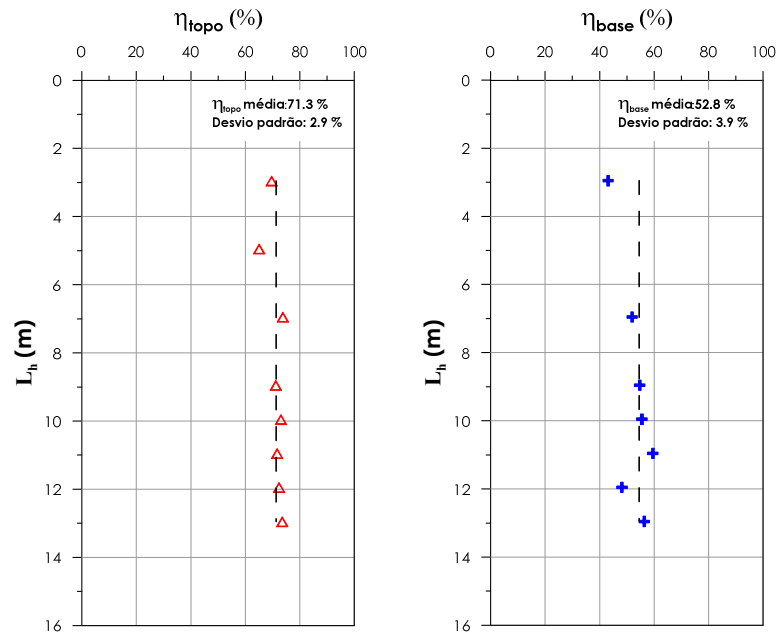
Foi observado que os valores de eficiência determinados no topo da composição de hastes, tanto para o equipamento convencional como para o mecanizado apresentaram-se muito próximos, ao longo de todo perfil. Os resultados indicaram que a eficiência no topo da composição de hastes apresentou-se praticamente constante e independente do comprimento da composição de hastes (Figura 6.22 e Figura 6.23). Esse comportamento torna-se mais evidente com o aumento do índice  $N_{SPT}$  do solo. Para o equipamento convencional, o valor médio e o desvio padrão da eficiência no topo foram de 71.3% e 2.9%, respectivamente, resultando um coeficiente de variação de 4.8%. Para o equipamento mecanizado o valor médio e o desvio padrão da eficiência no topo foram de 72% e 3.4%, respectivamente, resultando um coeficiente de variação de 4.7%. Como os resultados mostram uma pequena variabilidade nos valores de eficiência no topo, torna-se possível adotar um valor médio de eficiência ao longo de todo perfil analisado. Além do mais, foi observado que não existem diferenças significativas nos valores de eficiência no topo quando considerando diferentes equipamentos.

**Tabela 6.5** – Valores de eficiência medidos no topo e na base utilizando o equipamento convencional (Campo experimental da UNESP/Bauru)

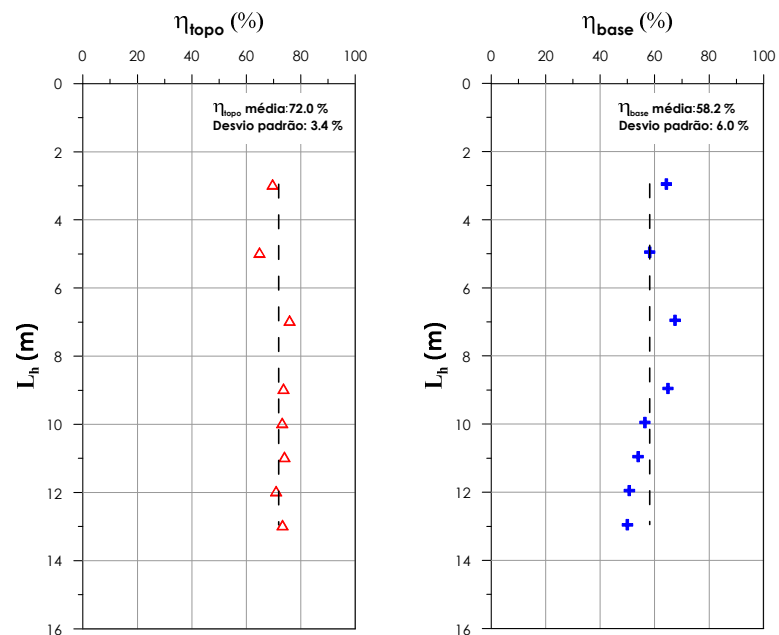
Prof.(m)	N <sub>SPT</sub>	Golpe n°	L <sub>h</sub> (m)	E <sub>topo</sub> (J)	η <sub>topo</sub> (%)	E <sub>base</sub> (J)	η <sub>base</sub> (%)
2.0	1.6	2	2.95	447.5	72.5	243.8	39.5
		3		404.4	66.7	283.1	46.7
Valores médios:				425.95	69.6	263.5	43.1
Prof.(m)	N <sub>SPT</sub>	Golpe n°	L <sub>h</sub> (m)	E <sub>topo</sub> (J)	η <sub>topo</sub> (%)	E <sub>base</sub> (J)	η <sub>base</sub> (%)
4.0	1.9	2	4.95	386.1	62.1	-	-
		3		401.9	68.2	-	-
Valores médios:				394.0	65.1	-	-
Prof.(m)	N <sub>SPT</sub>	Golpe n°	L <sub>h</sub> (m)	E <sub>topo</sub> (J)	η <sub>topo</sub> (%)	E <sub>base</sub> (J)	η <sub>base</sub> (%)
6.0	3.8	3	6.95	407.3	73.7	255.0	46.1
		4		385.1	71.5	247.7	46.0
		5		408.4	74.7	-	-
		6		412.2	75.1	349.5	63.7
Valores médios:				403.3	73.8	284.1	51.9
Prof.(m)	N <sub>SPT</sub>	Golpe n°	L <sub>h</sub> (m)	E <sub>topo</sub> (J)	η <sub>topo</sub> (%)	E <sub>base</sub> (J)	η <sub>base</sub> (%)
8.0	4.5	5	8.95	398.7	75.0	294.9	55.5
		6		385.5	71.6	308.2	57.3
		7		378.8	68.6	-	-
		8		380.9	71.4	238.5	44.7
		9		376.2	69.3	332.6	61.3
Valores médios:				384.0	71.2	293.6	54.7
Prof.(m)	N <sub>SPT</sub>	Golpe n°	L <sub>h</sub> (m)	E <sub>topo</sub> (J)	η <sub>topo</sub> (%)	E <sub>base</sub> (J)	η <sub>base</sub> (%)
9.0	6.1	4	9.95	372.0	69.5	266.4	49.8
		5		389.7	73.8	-	-
		6		393.7	74.3	316.3	59.7
		7		378.9	73.2	294.9	57.0
		8		386.6	74.5	-	-
		9		382.1	73.3	-	-
Valores médios:				383.8	73.1	292.5	55.5
Prof.(m)	N <sub>SPT</sub>	Golpe n°	L <sub>h</sub> (m)	E <sub>topo</sub> (J)	η <sub>topo</sub> (%)	E <sub>base</sub> (J)	η <sub>base</sub> (%)
10.0	6.5	6	10.95	385.7	75.2	345.7	67.4
		10		359.9	68.9	287.0	54.9
		12		391.3	70.9	309.9	56.1
Valores médios:				379.0	71.7	314.2	59.5
Prof.(m)	N <sub>SPT</sub>	Golpe n°	L <sub>h</sub> (m)	E <sub>topo</sub> (J)	η <sub>topo</sub> (%)	E <sub>base</sub> (J)	η <sub>base</sub> (%)
11.0	9.6	6	11.95	358.5	70.5	293.9	57.8
		7		344.9	67.8	240.4	47.3
		8		390.7	76.0	261.4	50.9
		10		391.1	76.9	223.8	44.0
		11		368.9	72.5	-	-
		12		371.6	73.0	207.8	40.8
		13		365.8	71.9	247.2	48.6
		14		361.4	70.6	-	-
Valores médios:				369.1	72.4	245.8	48.2
Prof.(m)	N <sub>SPT</sub>	Golpe n°	L <sub>h</sub> (m)	E <sub>topo</sub> (J)	η <sub>topo</sub> (%)	E <sub>base</sub> (J)	η <sub>base</sub> (%)
12.0	9.0	6	12.95	359.1	70.9	-	-
		8		359.0	69.3	236.6	45.7
		9		373.8	73.8	314.1	62.0
		11		379.6	74.5	323.5	63.5
		12		386.9	75.1	303.3	58.9
		13		374.3	74.4	247.7	47.9
		14		377.9	76.7	308.9	60.2
Valores médios:				372.9	73.5	289.0	56.4

**Tabela 6.6** – Valores de eficiência medidos no topo e na base utilizando o equipamento mecanizado (Campo experimental da UNESP/Bauru)

Prof.(m)	N <sub>SPT</sub>	Golpe nº	L <sub>h</sub> (m)	E <sub>topo</sub> (J)	η <sub>topo</sub> (%)	E <sub>base</sub> (J)	η <sub>base</sub> (%)
2.0	1.8	2	2.95	431.8	70.8	-	-
		3		408.4	68.6	382.8	64.3
Valores médios:				420.1	69.7	382.8	64.3
Prof.(m)	N <sub>SPT</sub>	Golpe nº	L <sub>h</sub> (m)	E <sub>topo</sub> (J)	η <sub>topo</sub> (%)	E <sub>base</sub> (J)	η <sub>base</sub> (%)
4.0	2.1	3	4.95	369.9	64.9	-	-
		4		-	-	365.9	58.2
Valores médios:				369.9	64.9	365.9	58.2
Prof.(m)	N <sub>SPT</sub>	Golpe nº	L <sub>h</sub> (m)	E <sub>topo</sub> (J)	η <sub>topo</sub> (%)	E <sub>base</sub> (J)	η <sub>base</sub> (%)
6.0	4.0	4	6.95	399.3	73.0	369.1	67.5
		6		423.9	78.8	-	-
Valores médios:				411.6	75.9	369.1	67.5
Prof.(m)	N <sub>SPT</sub>	Golpe nº	L <sub>h</sub> (m)	E <sub>topo</sub> (J)	η <sub>topo</sub> (%)	E <sub>base</sub> (J)	η <sub>base</sub> (%)
8.0	4.5	4	8.95	391.4	73.4	362.6	68.0
		5		412.9	74.8	363.6	65.9
		6		387.4	72.6	337.0	63.2
		7		394.9	74.0	360.0	67.5
		8		399.0	73.5	325.4	60.0
Valores médios:				397.1	73.7	349.7	64.9
Prof.(m)	N <sub>SPT</sub>	Golpe nº	L <sub>h</sub> (m)	E <sub>topo</sub> (J)	η <sub>topo</sub> (%)	E <sub>base</sub> (J)	η <sub>base</sub> (%)
9.0	6.2	4	9.95	394.6	75.7	297.4	57.1
		5		393.5	75.5	316.4	60.7
		6		383.4	72.3	316.9	59.8
		7		378.4	72.6	313.1	60.1
		8		370.2	70.4	282.3	53.7
		9		383.3	72.9	278.0	52.9
10	383.9	73.0	265.9	50.6			
Valores médios:				383.9	73.2	295.7	56.4
Prof.(m)	N <sub>SPT</sub>	Golpe nº	L <sub>h</sub> (m)	E <sub>topo</sub> (J)	η <sub>topo</sub> (%)	E <sub>base</sub> (J)	η <sub>base</sub> (%)
10.0	8.1	5	10.95	394.2	76.2	278.1	53.8
		6		378.7	73.2	243.2	47.0
		7		383.2	75.5	285.5	56.3
		8		368.1	71.2	-	-
		9		384.0	74.9	274.4	53.5
		10		380.4	73.5	269.4	51.2
		11		369.8	73.5	267.5	53.2
12	385.9	73.9	323.8	62.0			
Valores médios:				380.5	74.0	276.8	53.9
Prof.(m)	N <sub>SPT</sub>	Golpe nº	L <sub>h</sub> (m)	E <sub>topo</sub> (J)	η <sub>topo</sub> (%)	E <sub>base</sub> (J)	η <sub>base</sub> (%)
11.0	10.8	6	11.95	365.5	72.6	264.2	52.5
		7		359.7	70.7	285.6	56.1
		8		346.7	68.8	244.8	48.6
		9		351.0	69.7	-	-
		10		364.2	71.6	236.2	46.4
		11		360.7	71.6	253.1	50.2
		12		359.9	70.7	255.4	50.2
		13		368.3	72.4	280.5	55.1
		14		350.0	69.2	234.8	46.4
15	351.8	69.4	242.3	47.8			
16	371.9	73.1	271.1	53.3			
Valores médios:				359.1	70.9	256.8	50.7
Prof.(m)	N <sub>SPT</sub>	Golpe nº	L <sub>h</sub> (m)	E <sub>topo</sub> (J)	η <sub>topo</sub> (%)	E <sub>base</sub> (J)	η <sub>base</sub> (%)
12.0	10.5	6	12.95	382.7	75.1	286.9	56.3
		7		371.4	73.6	246.7	48.9
		8		367.1	72.8	237.6	47.1
		9		383.2	74.7	258.4	50.4
		10		372.6	73.9	235.7	46.7
		11		366.9	72.4	232.3	45.9
		13		361.4	71.6	230.6	45.7
14	377.0	74.7	329.4	65.3			
15	367.0	71.3	226.2	43.9			
Valores médios:				372.1	73.3	253.8	50.0



**Figura 6.22** – Eficiência em função do comprimento da composição de hastes ( $L_h$ ), para o equipamento convencional.



**Figura 6.23** – Eficiência em função do comprimento da composição de hastes ( $L_h$ ) para o equipamento mecanizado.

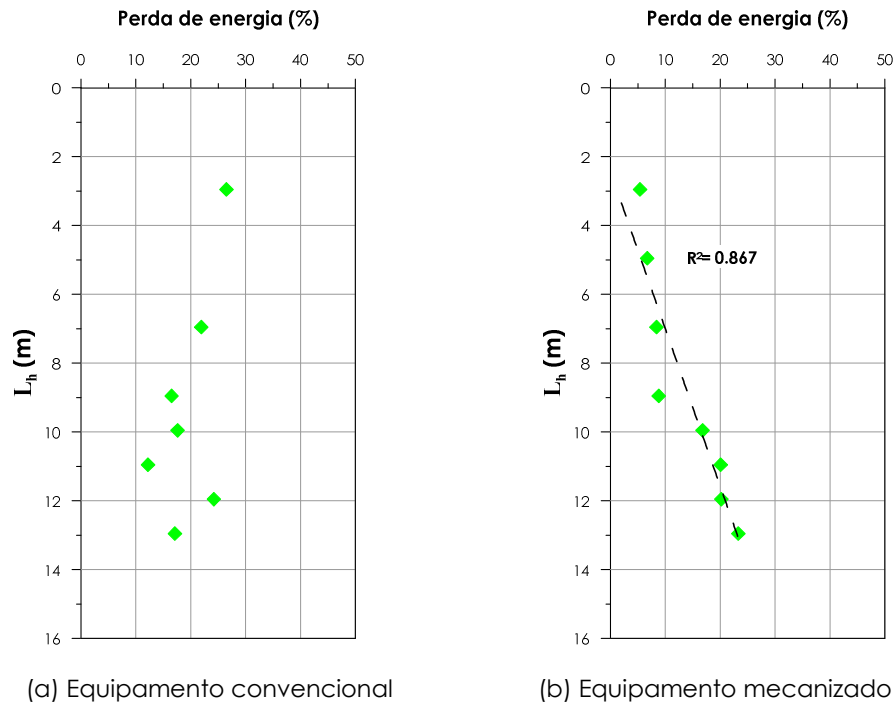
No caso da instrumentação posicionada na base da composição de haste, observou-se um valor médio de eficiência de 52.8% com desvio padrão de 3.9%, para o equipamento convencional, e um valor médio de eficiência de 58.2% com desvio padrão de 6.0% para o equipamento mecanizado. Os coeficientes de variação para os equipamentos convencional e mecanizado foram 7.4% e 10.3%, respectivamente. Esses valores mostram

que a variabilidade da energia que atinge o amostrador é maior do que a da energia que atinge o topo da composição de hastes.

Cavalcante et al., (2008) instrumentaram simultaneamente o topo e a base da composição de hastes. Esses autores obtiveram valores médios de eficiência de 80.5% e 70.9% para o topo e a base, respectivamente. Entretanto, deve-se observar que esses valores de eficiência foram determinados utilizando a energia potencial teórica (478.2 J), resultando em valores superiores àqueles obtidos quando se utiliza a energia potencial do sistema.

Através dos valores de eficiência determinados no topo e na base da composição de hastes foram quantificadas as perdas de energia que ocorrem ao longo do perfil analisado. Os resultados para o equipamento convencional indicaram que as perdas de energia com o aumento do comprimento da composição de haste não apresentaram uma tendência de variação definida (Figura 6.24a), atingindo um valor médio de perda de energia de 19.4%, com uma variabilidade bastante acentuada. Cavalcante et al., (2008) observaram essa mesma dispersão em seus resultados experimentais. Esses autores quantificaram um valor médio de perda de energia (13%) para comprimentos máximos de composição de hastes de 10 m.

Os resultados referentes ao equipamento mecanizado mostraram que a perda de energia aumenta linearmente com o comprimento da composição de hastes (Figura 6.24b). Esse mesmo comportamento foi observado por outros pesquisadores em trabalhos experimentais (ODEBRECHT, 2003; JOHNSEN; JAGELLO, 2007). A diferença de comportamento da perda de energia em função do comprimento da composição de haste, para os equipamentos utilizados, se deve ao valor da eficiência determinado na base da composição de haste. Enquanto que para o equipamento mecanizado esse valor de eficiência diminui com o aumento da composição de hastes, para o equipamento convencional esta mesma tendência não é observada. Conforme já foi discutido anteriormente, esta variação que ocorre para o equipamento convencional pode estar diretamente associada à elevada excentricidade do golpe aplicado causada pela liberação manual do martelo.



**Figura 6.24** – Perda de energia em função do comprimento da composição de hastes ( $L_h$ )

### 6.3.1.1 Eficiência ( $\eta_1$ ) determinada a partir dos valores experimentais

A relação entre os valores da energia determinada através do método *EFV* e a energia potencial do martelo representa a eficiência referente à parcela do martelo ( $\eta_1$ ) (Equação 6.1) (ODEBRECHT, 2003). A Tabela 6.7 mostra os valores da eficiência  $\eta_1$  determinados para a instrumentação posicionada no topo e na base da composição de hastes.

$$\eta_1 = \frac{\int_0^{\infty} F(t) \times v(t) dt}{EP_M} \quad (6.1)$$

Odebrecht (2003) obteve um valor médio de eficiência ( $\eta_1$ ) para energia determinada no topo igual a 0.764 com desvio padrão de 0.036 e coeficiente de variação de 4.7%. Nesta pesquisa, as análises indicaram um valor de eficiência média no topo muito próximo àquele observado por Odebrecht (2003). Os resultados obtidos a partir dos valores de energia determinados no topo mostraram que a variabilidade para ambos os equipamentos é pequena, indicando que pode ser adotado um valor médio para representar a eficiência do martelo (Tabela 6.7, Figura 6.25 e Figura 6.26).



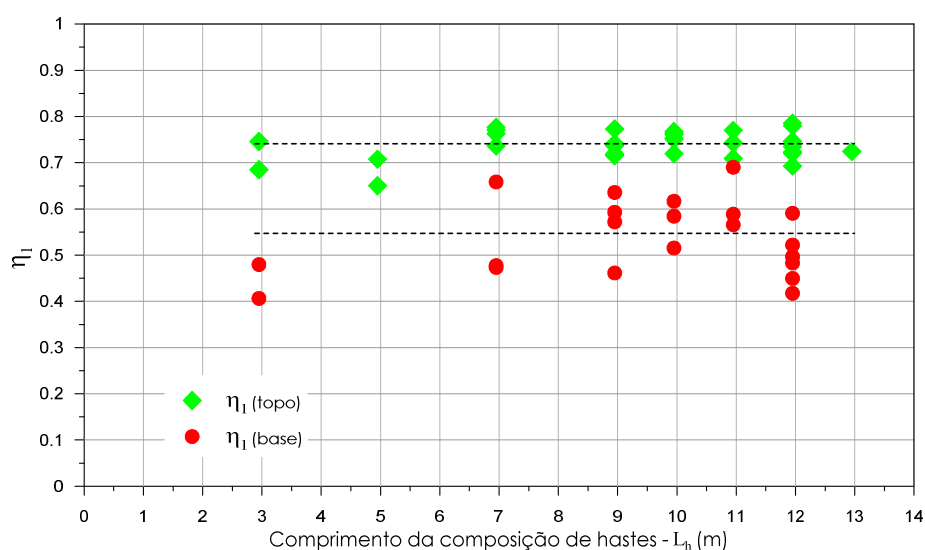
**Tabela 6.7** – Valores para a eficiência referente à parcela do martelo ( $\eta_1$ ) determinados a partir da energia determinada no topo e na base da composição de hastes

Equipamento convencional		Equipamento mecanizado	
$\eta_1$ (topo)	$\eta_1$ (base)	$\eta_1$ (topo)	$\eta_1$ (base)
0.741	0.547	0.745	0.562
Desvio padrão	Desvio padrão	Desvio padrão	Desvio padrão
0.029	0.080	0.025	0.073
cv (%)	cv (%)	cv (%)	cv (%)
3.96	14.60	3.40	13.03

onde cv é o coeficiente de variação

Entretanto, o mesmo não é verdadeiro quando a eficiência do martelo é calculada a partir da energia determinada na base da composição de hastes (Tabela 6.7, Figura 6.25 e Figura 6.26). Os resultados mostram uma elevada dispersão dos pontos, indicando que a correção do valor de eficiência do martelo na base, para comprimentos de composição de haste curta (até cerca de 13 m) não varia em função do comprimento da composição de haste. Odebrecht (2003) realizou ensaios com comprimentos de composição de hastes até 35.80 m, e propôs uma correção na parcela de energia do martelo que atinge o amostrador, através dos coeficientes  $\eta_1$  e  $\eta_3$  (Equação 2.11). O coeficiente  $\eta_3$  representa a eficiência do sistema e é calculado em função do comprimento da composição de hastes ( $\eta_3=1-0.0042\ell$ ).

Mesmo corrigindo os valores de eficiência do martelo com o coeficiente  $\eta_3$ , a dispersão mantém-se elevada (Figura 6.27 e Figura 6.28), ratificando as evidências de que para comprimentos de composição de hastes até 13 m, o comprimento da composição não é o principal fator que causa a elevada variabilidade dos valores determinados na base da composição de hastes.



**Figura 6.25** –Variação da eficiência  $\eta_1$  em função do comprimento de hastes (Equipamento convencional)

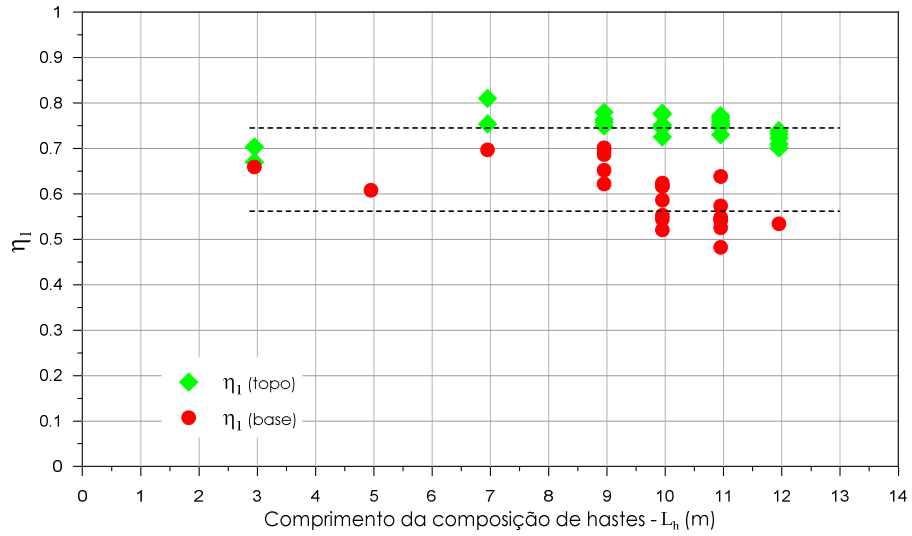


Figura 6.26 –Variação da eficiência  $\eta_i$  em função do comprimento de hastes (Equipamento mecanizado)

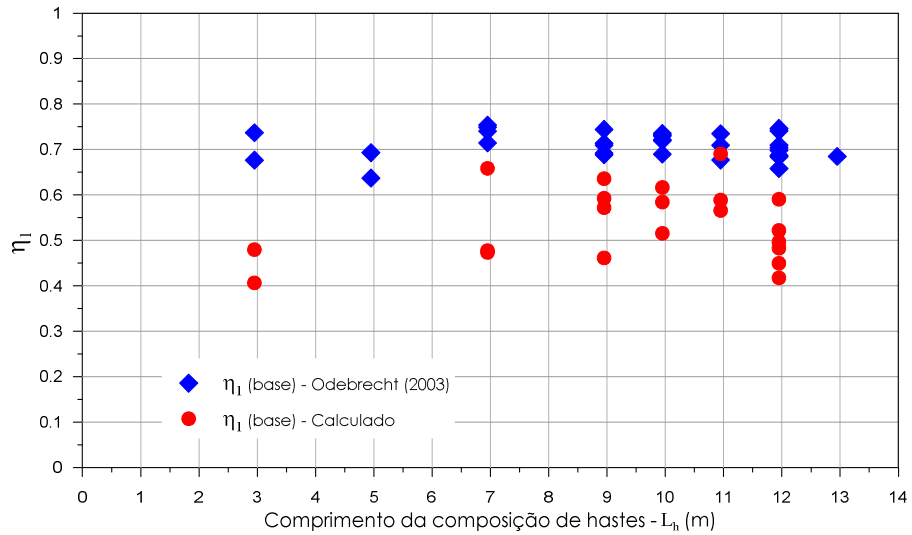


Figura 6.27 –Variação da eficiência  $\eta_i$  em função do comprimento de hastes (Equipamento convencional)

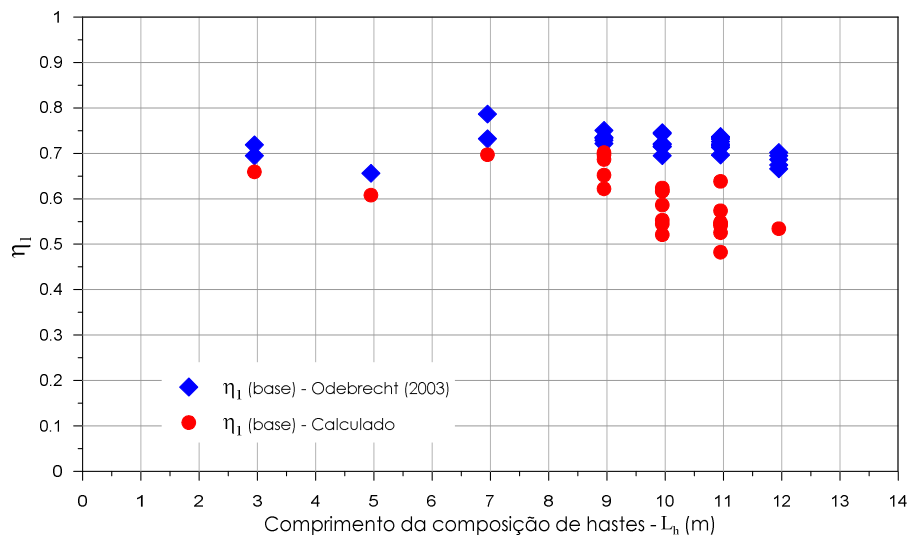
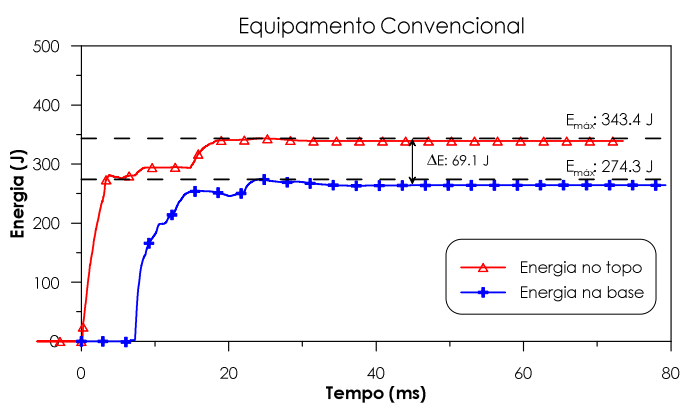


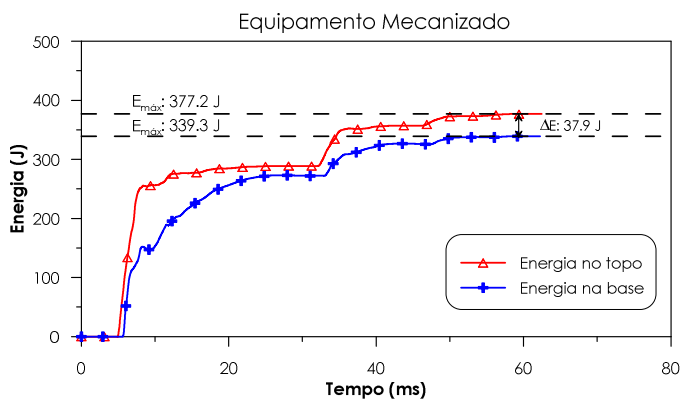
Figura 6.28 –Variação da eficiência  $\eta_i$  em função do comprimento de hastes (Equipamento mecanizado)

### 6.3.2 Loteamento residencial de São Carlos

As mesmas análises anteriores são apresentadas para os ensaios realizados no loteamento residencial da cidade de São Carlos. A Figura 6.29 e a Figura 6.30 apresentam os valores de energia determinados no topo e na base da composição de hastes para os equipamentos convencional e mecanizado. Em geral, as perdas de energia que ocorreram ao longo da composição de hastes apresentaram-se inferior para o equipamento mecanizado. Foram observados os mesmos comportamentos que aqueles observados com os resultados apresentados anteriormente para o campo experimental da Unesp (Bauru).



**Figura 6.29** – Energia e eficiência ( $\eta$ ) versus tempo para instrumentação simultânea de topo e base (comprimento de composição de haste ( $L_{ii}$ ) de 6,95 m – Equipamento convencional)



**Figura 6.30** – Energia e eficiência ( $\eta$ ) versus tempo para instrumentação simultânea de topo e base (comprimento de composição de haste ( $L_{ii}$ ) de 6,95 m – Equipamento mecanizado)

A Tabela 6.8 e a Tabela 6.9 apresentam um resumo dos resultados para os valores de eficiência determinados a partir de ensaios realizados no loteamento residencial na cidade de São Carlos, utilizando os equipamentos convencional e mecanizado.

Foi observado que os valores de eficiência no topo apresentaram-se uniformes ao longo de todo o perfil analisado. Esses resultados ratificam a proposta de se adotar um valor médio

de eficiência para representar a eficiência do ensaio SPT ao longo do perfil estratigráfico. Os valores de eficiência determinados na base da composição de hastes apresentaram uma dispersão menor, entre as diferentes camadas, do que aquela determinada para os valores de eficiência referentes ao campo experimental de Unesp de Bauru. Esse comportamento pode estar relacionado com os valores dos índices  $N_{SPT}$  que se apresentam superiores em São Carlos. É consenso entre os pesquisadores que a determinação da energia em solos com baixos índices  $N_{SPT}$  apresenta grandes dificuldades e muitas vezes acarretam incertezas nos resultados obtidos.

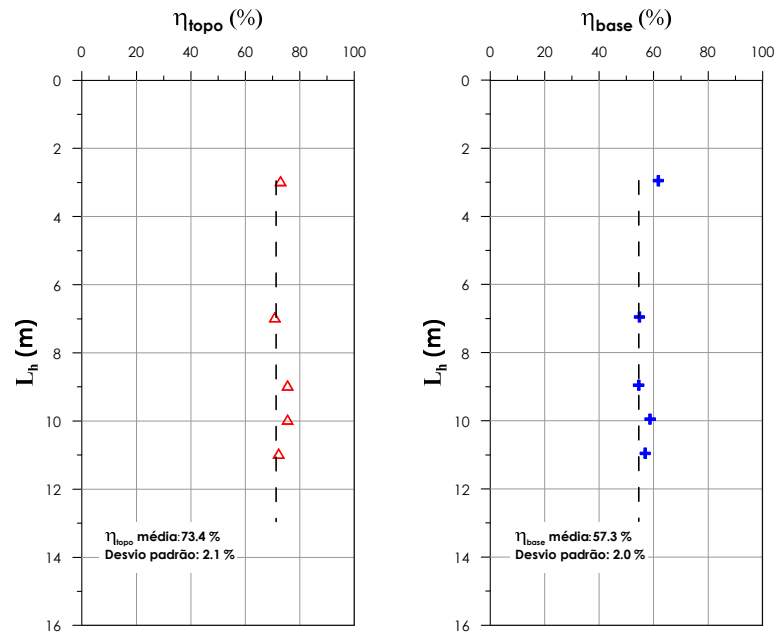
Os valores de eficiência determinados no topo, para ambos os equipamentos, mostraram que não ocorreu influência significativa do comprimento da composição de hastes, confirmando o comportamento dos resultados obtidos em Bauru, (Figura 6.31 e Figura 6.32). Observou-se ainda que os valores médios de eficiência no topo foram 73.4% e 75.1% para os equipamentos convencional e mecanizado, respectivamente. Esses resultados indicaram que não ocorreram grandes divergências entre os valores de eficiência determinados com diferentes equipamentos. Esses resultados também foram similares aos resultados obtidos nos ensaios de campo realizados em Bauru (Figura 6.22 e Figura 6.23).

**Tabela 6.8** – Valores de eficiência medidos no topo e na base utilizando o equipamento convencional (Loteamento residencial em São Carlos)

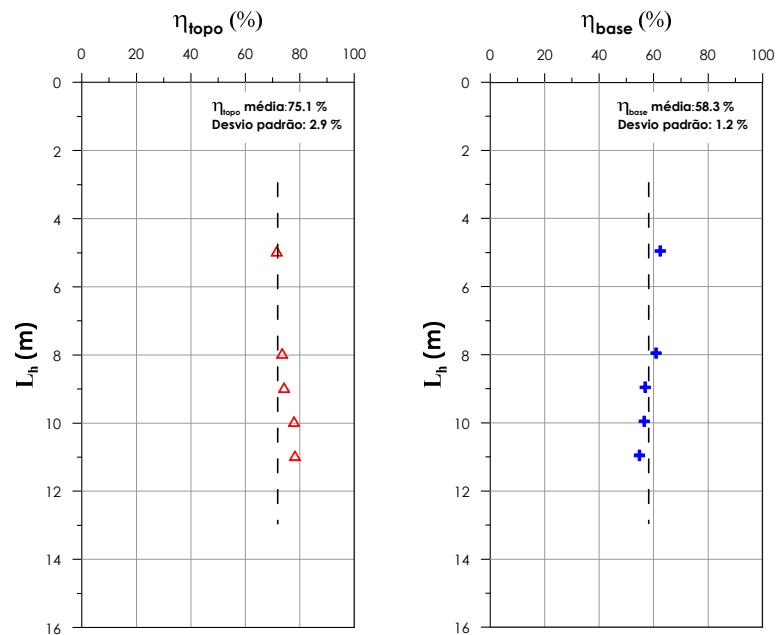
Prof.(m)	N <sub>SPT</sub>	Golpe nº	L <sub>h</sub> (m)	E <sub>topo</sub> (J)	η <sub>topo</sub> (%)	E <sub>base</sub> (J)	η <sub>base</sub> (%)			
4.0	4.6	3	4.95	377.9	70.8	346.7	65.0			
		4		378.2	70.9	304.1	57.0			
		6		377.1	71.9	302.1	57.6			
		7		409.8	77.9	352.5	67.0			
<b>Valores médios:</b>				385.8	72.9	326.4	61.7			
Prof.(m)	N <sub>SPT</sub>	Golpe nº	L <sub>h</sub> (m)	E <sub>topo</sub> (J)	η <sub>topo</sub> (%)	E <sub>base</sub> (J)	η <sub>base</sub> (%)			
6.0	10.3	4	6.95	371.0	72.4	317.2	61.9			
		5		377.3	73.6	251.1	49.0			
		6		331.8	65.8	-	-			
		7		361.6	71.7	-	-			
		8		343.4	68.7	274.3	54.9			
		9		340.6	73.0	284.2	56.4			
		11		360.5	72.5	291.0	58.5			
		12		351.6	70.4	256.0	51.2			
		13		343.6	68.8	258.3	51.7			
<b>Valores médios:</b>				353.5	70.8	276.0	54.8			
Prof.(m)	N <sub>SPT</sub>	Golpe nº	L <sub>h</sub> (m)	E <sub>topo</sub> (J)	η <sub>topo</sub> (%)	E <sub>base</sub> (J)	η <sub>base</sub> (%)			
8.0	12.4	4	8.95	369.7	73.4	252.0	50.0			
		5		374.7	74.5	245.8	48.9			
		6		382.1	75.5	267.9	53.0			
		7		365.9	72.6	-	-			
		8		366.0	72.7	241.0	47.9			
		9		359.7	72.0	-	-			
		10		351.8	70.3	288.9	57.7			
		11		398.3	79.8	-	-			
		12		417.6	84.1	325.7	65.6			
		13		394.7	80.2	314.7	63.9			
		14		362.0	72.9	231.7	46.7			
		15		387.9	77.4	285.2	56.9			
		<b>Valores médios:</b>				377.5	75.5	272.5	54.5	
		Prof.(m)		N <sub>SPT</sub>	Golpe nº	L <sub>h</sub> (m)	E <sub>topo</sub> (J)	η <sub>topo</sub> (%)	E <sub>base</sub> (J)	η <sub>base</sub> (%)
9.0	19.2	6	9.95	355.1	71.4	304.6	61.0			
		7		364.2	73.1	300.2	60.3			
		8		368.0	73.7	278.2	55.9			
		9		375.2	75.6	289.0	58.2			
		10		371.5	75.3	290.3	58.8			
		11		379.2	76.3	305.1	61.3			
		12		346.0	69.8	287.4	58.0			
		13		362.7	74.5	300.8	61.8			
		14		362.8	73.2	293.0	59.1			
		15		370.9	75.4	282.8	57.5			
		16		371.1	75.6	305.0	62.1			
		17		355.1	72.5	270.6	55.2			
		18		379.5	76.9	286.1	58.0			
		19		392.1	79.9	302.4	61.6			
		20		378.5	77.9	-	-			
		21		374.6	75.9	277.6	56.2			
		22		379.3	77.3	274.6	56.0			
23	386.9	79.3	278.4	57.1						
24	395.3	81.0	288.1	59.1						
<b>Valores médios:</b>				372.0	75.5	289.7	58.7			
Prof.(m)	N <sub>SPT</sub>	Golpe nº	L <sub>h</sub> (m)	E <sub>topo</sub> (J)	η <sub>topo</sub> (%)	E <sub>base</sub> (J)	η <sub>base</sub> (%)			
10.0	9.4	4	10.95	377.7	74.1	303.9	59.6			
		5		384.3	74.4	282.5	54.7			
		6		368.0	72.2	326.4	64.0			
		7		377.2	73.1	303.8	58.9			
		8		356.7	71.0	295.6	58.9			
		9		373.9	73.3	292.0	57.2			
		10		365.3	71.5	288.5	56.5			
		11		359.1	70.7	-	-			
		12		366.4	72.0	235.4	46.2			
		13		355.5	70.4	284.5	56.3			
		<b>Valores médios:</b>				368.4	72.3	290.3	56.9	

**Tabela 6.9** – Valores de eficiência medidos no topo e na base utilizando o equipamento mecanizado (Loteamento residencial em São Carlos)

Prof.(m)	N <sub>SPT</sub>	Golpe n°	L <sub>h</sub> (m)	E <sub>topo</sub> (J)	η <sub>topo</sub> (%)	E <sub>base</sub> (J)	η <sub>base</sub> (%)
4.0	5.2	2	4.95	391.6	73.1	315.8	59.0
		3		366.2	68.9	327.9	61.7
		4		391.8	73.8	354.5	66.8
		5		377.2	70.6	339.3	66.6
		6		370.0	70.9	337.1	64.6
<b>Valores médios:</b>				379.4	71.5	334.9	63.7
Prof.(m)	N <sub>SPT</sub>	Golpe n°	L <sub>h</sub> (m)	E <sub>topo</sub> (J)	η <sub>topo</sub> (%)	E <sub>base</sub> (J)	η <sub>base</sub> (%)
7.0	8.0	4	7.95	370.5	73.3	318.0	62.9
		5		363.3	72.2	299.6	59.6
		6		363.3	72.1	318.0	63.2
		7		372.1	74.3	314.4	62.8
		8		374.7	75.3	290.5	58.4
		9		367.2	73.5	304.2	60.9
<b>Valores médios:</b>				368.1	73.5	304.9	60.9
Prof.(m)	N <sub>SPT</sub>	Golpe n°	L <sub>h</sub> (m)	E <sub>topo</sub> (J)	η <sub>topo</sub> (%)	E <sub>base</sub> (J)	η <sub>base</sub> (%)
8.0	12.8	4	8.95	357.1	69.6	276.5	53.9
		6		361.2	71.8	270.1	53.7
		8		371.5	73.7	301.6	59.8
		10		366.5	72.5	263.7	52.2
		12		352.0	71.0	305.3	61.6
		13		396.7	79.3	264.8	52.9
		14		372.3	75.1	272.7	55.0
<b>Valores médios:</b>				372.1	74.2	285.2	56.9
Prof.(m)	N <sub>SPT</sub>	Golpe n°	L <sub>h</sub> (m)	E <sub>topo</sub> (J)	η <sub>topo</sub> (%)	E <sub>base</sub> (J)	η <sub>base</sub> (%)
9.0	18.2	6	9.95	362.3	72.4	251.9	50.3
		8		386.5	78.0	304.4	61.4
		9		382.9	77.1	290.5	58.5
		10		391.1	79.1	285.3	57.7
		12		379.4	76.6	278.6	56.2
		13		384.3	78.2	258.5	52.6
		14		384.6	77.9	262.3	53.1
		16		377.1	76.6	274.1	55.7
		18		385.1	78.5	267.4	54.5
		20		384.7	78.6	290.6	59.4
		21		399.3	81.4	280.6	57.2
<b>Valores médios:</b>				384.1	77.9	278.9	56.5
Prof.(m)	N <sub>SPT</sub>	Golpe n°	L <sub>h</sub> (m)	E <sub>topo</sub> (J)	η <sub>topo</sub> (%)	E <sub>base</sub> (J)	η <sub>base</sub> (%)
10.0	9.8	5	10.95	403.0	78.9	302.8	59.2
		7		401.0	79.3	281.4	55.6
		9		391.0	77.6	268.3	53.2
		10		393.8	77.7	286.4	56.5
		11		383.1	75.9	282.9	56.0
		13		406.7	79.9	264.1	51.9
<b>Valores médios:</b>				396.4	78.2	278.0	54.8



**Figura 6.31** – Eficiência em função do comprimento da composição de hastes ( $L_h$ ), utilizando o equipamento convencional.

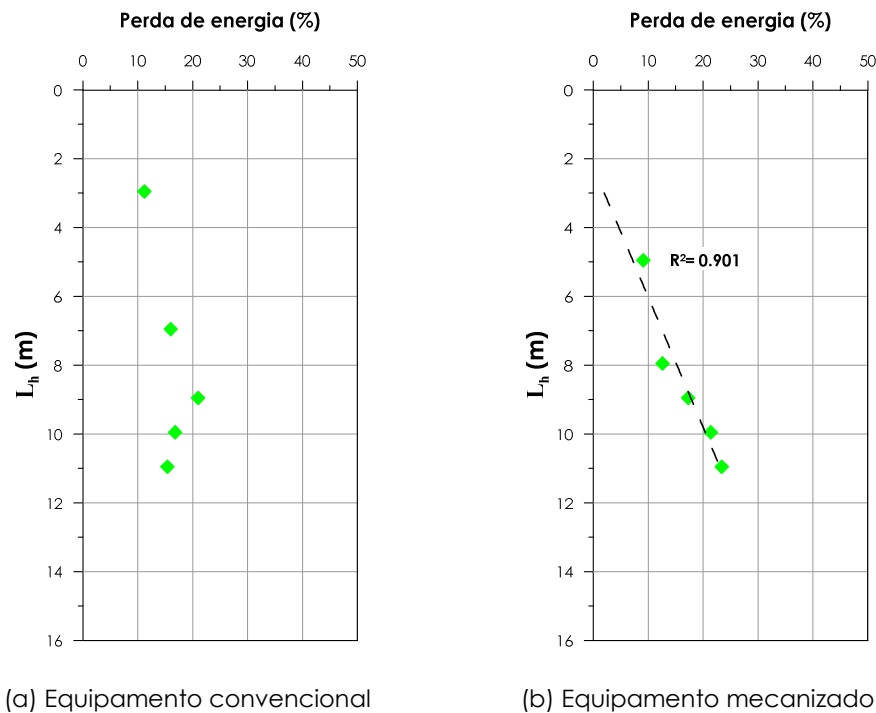


**Figura 6.32** – Eficiência em função do comprimento da composição de hastes ( $L_h$ ), utilizando o equipamento mecanizado.

Os desvios padrão para os equipamentos convencional e mecanizado foram de 2.1% e 2.9%, respectivamente. Esses valores resultaram em coeficientes de variação 2.8%, para o equipamento convencional, e 3.9% para o equipamento mecanizado. Os resultados indicaram que ocorreu uma pequena variabilidade na determinação da energia no topo da composição de hastes.

No caso da instrumentação posicionada no topo do amostrador, observou-se um valor médio de eficiência de 57.3% com desvio padrão de 2.0%, para o equipamento convencional, e um valor médio de eficiência de 58.3% com desvio padrão de 1.2% para o equipamento mecanizado. Os coeficientes de variação para os equipamentos convencional e mecanizado foram 3.4 e 2.1%, respectivamente. Neste caso, a variabilidade apresentou-se inferior aos resultados de Bauru. Assim, para este perfil estratigráfico observa-se que para os valores de eficiência da base da composição de hastes também é possível adotar um valor médio de eficiência.

Os resultados para ambos os equipamentos indicaram um valor médio de perda de energia em torno de 16.4 % para comprimentos máximos de composição de hastes de 10.95 m. Para o equipamento convencional a perda de energia em função do comprimento da composição de haste não apresentou uma tendência definida de variação (Figura 6.33a). Os resultados para o equipamento mecanizado indicaram que a perda de energia aumenta linearmente com o comprimento da composição de hastes (Figura 6.33b). Esta mesma tendência foi observada nos resultados dos ensaios de campo de Bauru.



**Figura 6.33** – Perda de energia em função do comprimento da composição de hastes ( $L_h$ )

A Tabela 6.10 apresenta um resumo geral dos valores médios de eficiência, determinados no topo e na base da composição de hastes, considerando os diferentes



tipos de equipamento e locais dos ensaios. Os valores apresentados nesta tabela permitem concluir que as eficiências médias no topo e na base da composição de hastes foram de 73% e 57%, respectivamente. Esses resultados são utilizados em análises para a determinação da resistência dinâmica e estática do solo que são apresentadas no Capítulo 7.

**Tabela 6.10** – Resumo dos resultados dos valores de eficiência

Equipamento convencional						Equipamento mecanizado					
Campo experimental da Unesp						Campo experimental da Unesp					
$\eta_{topo}$ (%)	<i>sd</i> (%)	<i>cv</i> (%)	$\eta_{base}$ (%)	<i>sd</i> (%)	<i>cv</i> (%)	$\eta_{topo}$ (%)	<i>sd</i> (%)	<i>cv</i> (%)	$\eta_{base}$ (%)	<i>sd</i> (%)	<i>cv</i> (%)
71.3	2.9	4.0	52.7	3.9	7.4	72.0	3.4	4.7	58.2	6.0	10.3
Loteamento residencial em São Carlos						Loteamento residencial em São Carlos					
$\eta_{topo}$ (%)	<i>sd</i> (%)	<i>cv</i> (%)	$\eta_{base}$ (%)	<i>sd</i> (%)	<i>cv</i> (%)	$\eta_{topo}$ (%)	<i>sd</i> (%)	<i>cv</i> (%)	$\eta_{base}$ (%)	<i>sd</i> (%)	<i>cv</i> (%)
73.4	2.1	2.8	57.3	2.0	3.4	75.1	2.9	3.9	58.3	1.2	2.1

### 6.3.2.1 Eficiência ( $\eta_i$ ) determinada a partir dos valores experimentais

Os valores da eficiência  $\eta_i$  (Equação 6.1) foram determinados para a instrumentação posicionada no topo e na base da composição de hastes (Tabela 6.11).

**Tabela 6.11** – Valores para a eficiência referente à parcela do martelo ( $\eta_i$ ) determinados a partir da energia no topo e na base da composição de hastes

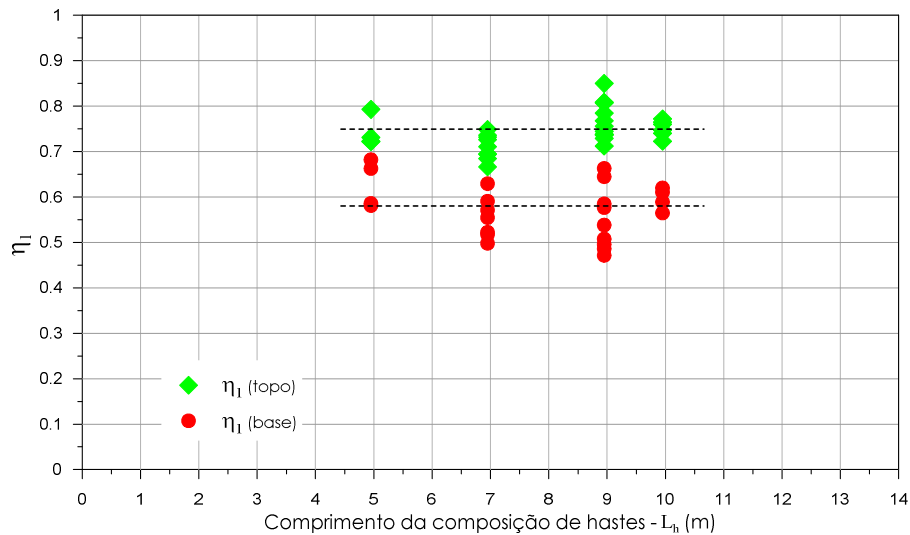
Equipamento convencional		Equipamento mecanizado	
$\eta_i$ (topo)	$\eta_i$ (base)	$\eta_i$ (topo)	$\eta_i$ (base)
0.749	0.580	0.767	0.587
Desvio padrão	Desvio padrão	Desvio padrão	Desvio padrão
0.035	0.050	0.033	0.044
<i>cv</i> (%)	<i>cv</i> (%)	<i>cv</i> (%)	<i>cv</i> (%)
4.67	8.57	4.32	7.53

onde *cv* é o coeficiente de variação

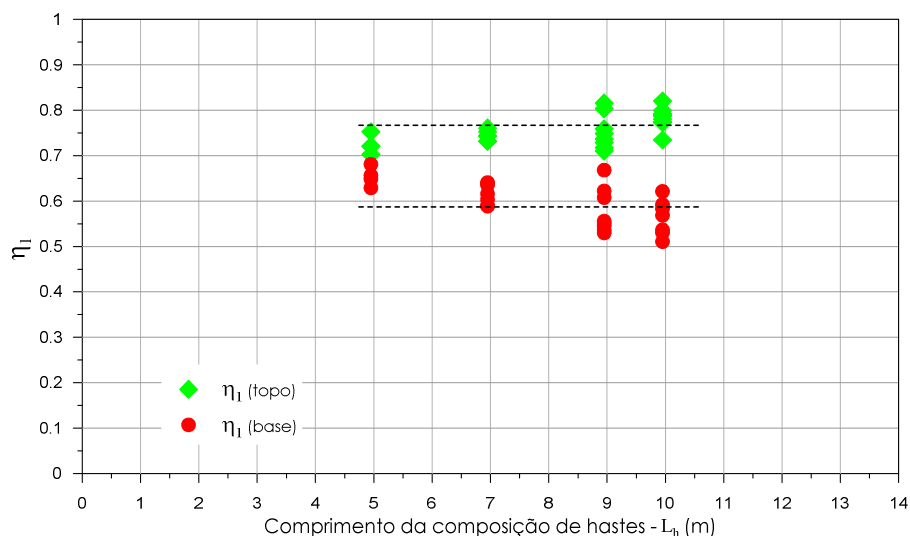
Novamente foi observado que o valor médio de eficiência do martelo ( $\eta_i$ ) no topo para os equipamentos convencional e mecanizado apresentou-se muito próximo ao valor recomendado por Odebrecht (2003). Apesar da variabilidade dos resultados obtidos para a energia determinada na base da composição de hastes, observa-se que os valores médios e os coeficientes de variação apresentam-se muito próximos (Tabela 6.7 e Tabela 6.11) para os dois equipamentos. Assim, comparando-se os resultados do Campo Experimental da

Unesp de Bauru e do loteamento residencial de São Carlos recomenda-se valores de eficiência ( $\eta_1$ ) 0.751 e 0.569 para o topo e a base, respectivamente.

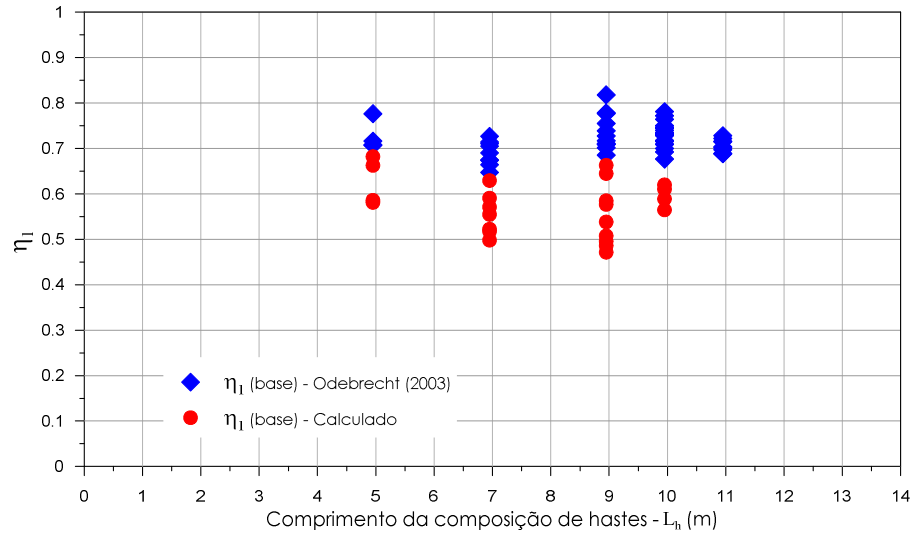
As figuras a seguir (Figura 6.34 e Figura 6.35) mostram a variação da eficiência do martelo ( $\eta_1$ ) no topo e na base em função do comprimento da composição de hastes. Os gráficos mostram que as eficiências do martelo no topo e na base apresentam o mesmo comportamento, não indicando uma tendência de variação da eficiência ( $\eta_1$ ) na base em função do comprimento da composição. Assim, conforme já foi mostrado no item 6.3.1.1 a introdução de um fator de eficiência do sistema ( $\eta_3$ ) (ODEBRECHT, 2003) para corrigir a parcela de energia do martelo que atinge o amostrador não se mostra eficaz para os resultados experimentais dos ensaios desta pesquisa (Figura 6.36 e Figura 6.37).



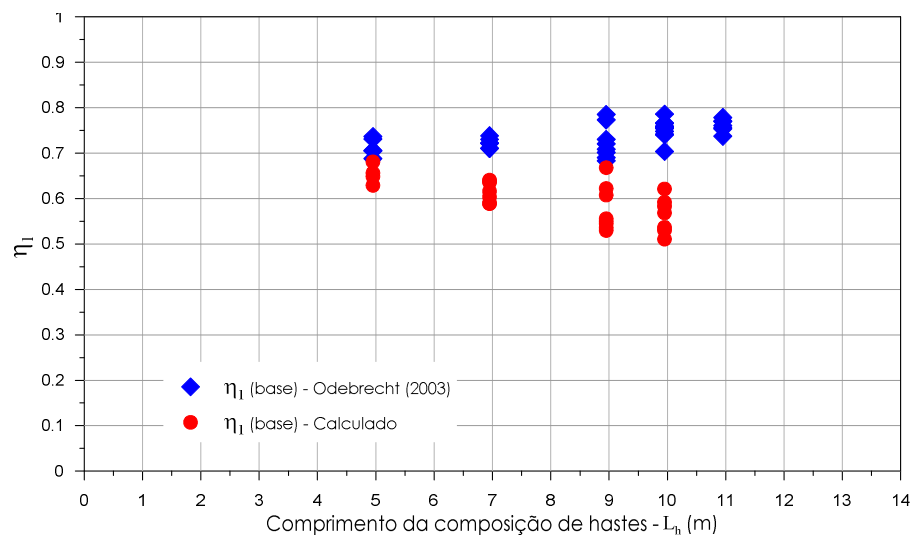
**Figura 6.34** –Variação da eficiência  $\eta_1$  em função do comprimento de hastes (Equipamento convencional)



**Figura 6.35** –Variação da eficiência  $\eta_1$  em função do comprimento de hastes (Equipamento mecanizado)



**Figura 6.36** –Variação da eficiência  $\eta_i$  em função do comprimento de hastes (Equipamento convencional)



**Figura 6.37** –Variação da eficiência  $\eta_i$  em função do comprimento de hastes (Equipamento mecanizado)

#### 6.4 Comparação entre as curvas teórica e experimental de transferência de energia

A transferência de energia no ensaio SPT pode ser representada através de uma expressão curva teórica (Equação 3.91), considerando a existência de um coxim rígido no momento do impacto. A curva teórica pode ser traçada considerando os valores de rigidez do coxim ( $K$ ), a velocidade inicial de impacto do martelo ( $v_i$ ), a impedância da haste ( $Z$ ) e a massa do martelo ( $M_m$ ).

A rigidez do coxim foi obtida através de um processo iterativo, utilizando a Equação 3.92 e os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$ . Nessa equação o instante  $t$ , obtido da curva de força experimental,

é representado pelo intervalo de tempo entre o início da mobilização da força e o seu ponto máximo (Figura 3.7). A velocidade de impacto ( $v_i$ ) foi determinada através da Equação 2.6, introduzindo nesta equação o valor da eficiência de topo ( $\eta_{topo}$ ) determinado através dos resultados experimentais (Equação 6.2). Nesta equação considerou-se o acréscimo da penetração permanente do amostrador na altura de queda padrão do martelo ( $h_q$ ).

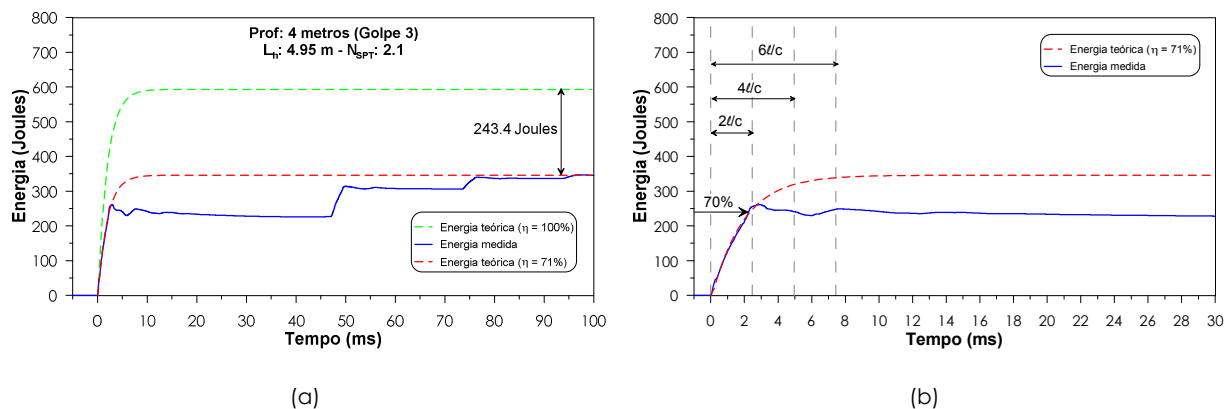
$$v_i = \sqrt{2 \times g \times h_q \times \eta_{topo}} \quad (6.2)$$

Nesse cálculo adotou-se o módulo de elasticidade do aço ( $E$ ) igual a  $2.10 \times 10^8$  kN/m<sup>2</sup> e a velocidade de propagação da onda ( $c$ ) igual a 5120 m/s. A área da seção transversal ( $a$ ) da haste foi considerada igual a  $4.1 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>. A impedância ( $Z$ ) da haste foi determinada através da Equação 2.22, resultando:

$$Z = \frac{E \times a}{c} = \frac{(2.1 \times 10^8) \times (4.1 \times 10^{-4})}{5120} = 16.8 \frac{kN}{m/s} \quad (6.3)$$

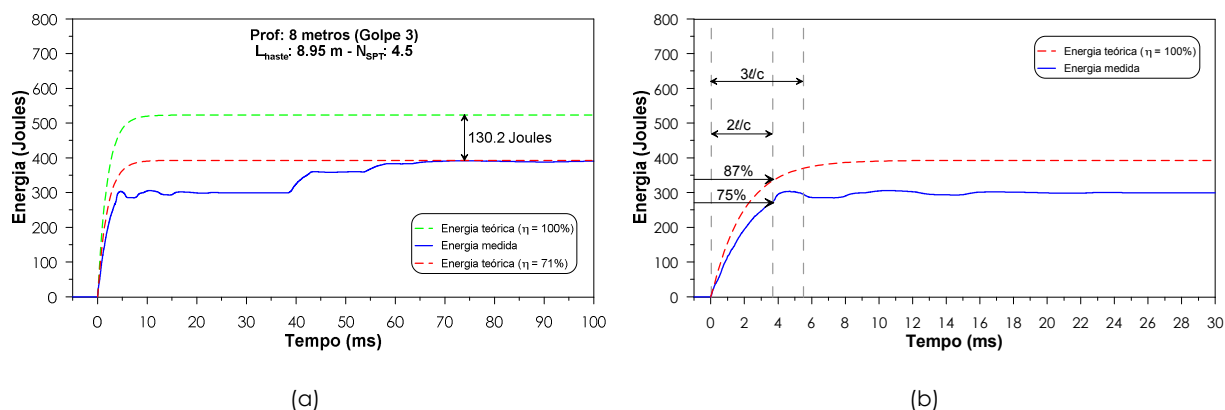
A Figura 6.38 apresenta a comparação entre as curvas teórica e experimental para um golpe, com uma composição de hastes com comprimento de 5.73 m. A curva teórica com eficiência de 100 % ( $\eta=100\%$ ) (Figura 6.38a) representa a energia total imposta durante o evento, onde parte dessa energia é consumida até o instante do impacto do martelo. A energia disponível no topo da composição de hastes é representada pela curva teórica com eficiência experimentalmente determinada de 71% ( $\eta=71\%$ ) (Figura 6.38a).

A comparação entre as curvas teórica e experimental mostra que a principal diferença que ocorre entre as curvas é o processo de transferência da energia. As curvas são idênticas até o instante correspondente a  $2l/c$  (2.5 ms), correspondendo à transferência de aproximadamente 70% da energia total do sistema (Figura 6.38b). A partir desse instante, a energia determinada experimentalmente é inferior à curva de energia teórica. Isto ocorre devido à chegada das primeiras ondas de reflexão, no topo da composição de hastes, que interrompem a transferência de energia. A transferência da energia só é retomada a partir do instante que ocorrem os impactos secundários (Figura 6.38a), que nesse caso correspondem a 47 ms e 73 ms. A energia total é transferida ao sistema até o instante correspondente a 76 ms.



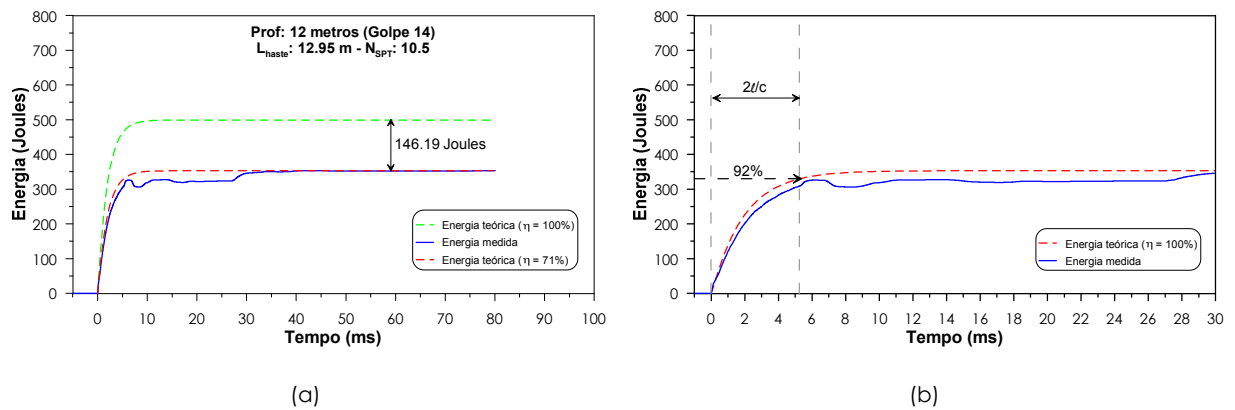
**Figura 6.38** – Comparação entre as curvas teóricas e experimental de transferência de energia ( $L_h = 4.95$  m e  $N_{SPT} = 2.1$ )

Quando o comprimento da composição de hastes (Figura 6.39) é aumentado para 8.95 m, observa-se que a transferência da energia total ocorre em um intervalo de tempo inferior (65 ms) (Figura 6.39a) ao intervalo de tempo necessário para o exemplo apresentado na Figura 6.38. Isso ocorre porque o martelo e a composição de hastes permanecem em contato mais tempo e conseqüentemente a transferência de energia é maior até a chegada da primeira onda de reflexão (Figura 6.39b).



**Figura 6.39** – Comparação entre as curvas teóricas e experimental de transferência de energia ( $L_h = 8.95$  m e  $N_{SPT} = 4.5$ )

A transferência da energia para uma composição de hastes com comprimento de 12.95 m, em um intervalo de tempo correspondente a  $2l/c$  (5.2 ms) é cerca de 92% (Figura 6.40b) da energia total disponível no sistema. Observa-se nesse caso que as curvas teórica e experimental apresentam um comportamento bastante similar (Figura 6.40a). Assim, quanto maior o comprimento da composição de hastes maior será a proximidade entre o processo de transferência de energia entre curvas teórica e experimental.



**Figura 6.40** – Comparação entre as curvas teórica e experimental de transferência de energia ( $L_h = 12.95 \text{ m}$  e  $N_{\text{SPT}} = 10.5$ )

### 6.5 Influência da rigidez do coxim no processo de transferência de energia

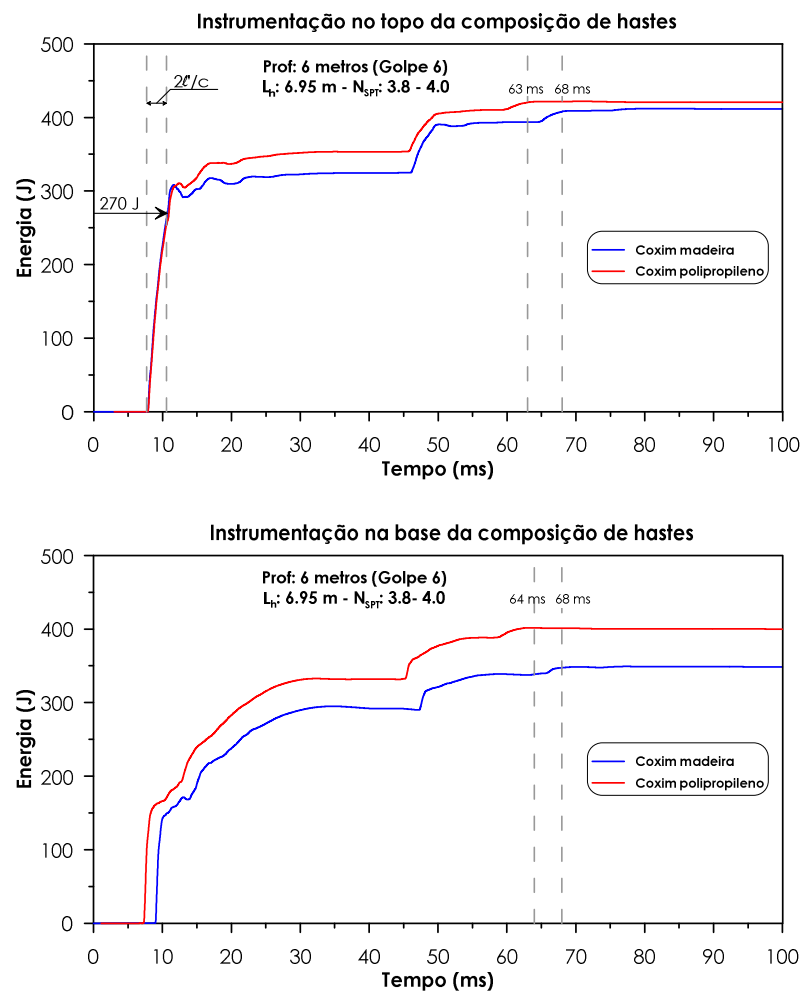
A transferência da energia durante a propagação da onda de tensão também depende da rigidez ( $K$ ) do coxim utilizado, conforme mostrado na Figura 3.9. Assim, quanto maior a rigidez do coxim mais rápido ocorre à transferência da energia disponível no sistema. Nesse trabalho de pesquisa foram utilizados dois equipamentos distintos com diferentes coxins e consequentemente diferentes valores de rigidez.

Além da configuração geométrica diferente, os coxins também diferem em relação ao módulo de elasticidade, uma vez que são constituídos por materiais diferentes. O coxim do equipamento convencional é constituído por madeira do tipo peroba rosa (ABNT, 2001) que possui um módulo de elasticidade à compressão ( $E$ ) de 11739 MPa. O coxim do equipamento mecanizado é constituído por polipropileno possuindo um módulo de elasticidade ( $E$ ) de 1030 MPa. A Figura 2.5 e a Figura 5.7 mostram que as áreas das seções transversais desses coxins variam com a suas alturas e que o coxim de polipropileno possui uma altura superior (0.33 m) a do coxim de madeira (0.10 m).

Uma análise comparativa preliminar entre os dois coxins mostra que o de madeira possui uma rigidez superior ao de polipropileno, uma vez que a rigidez é diretamente proporcional ao módulo de elasticidade ( $E$ ) e a área da seção transversal ( $a$ ) e inversamente proporcional à altura ( $h$ ) (Equação 6.4). Entretanto, a quantificação correta dessa diferença deve ser realizada considerando a variação da área da seção transversal e as tensões de confinamento atuantes no coxim.

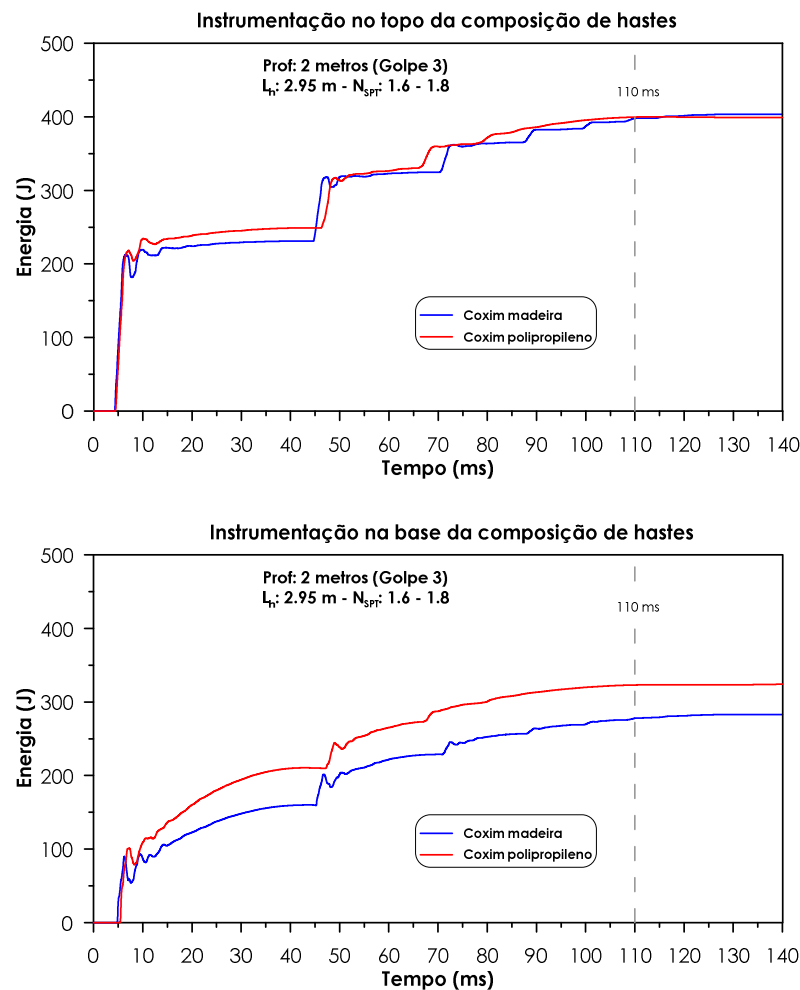
$$K = \frac{E \times a}{h} \quad (6.4)$$

A Figura 6.41 apresenta uma comparação entre os processos de transferência de energia para dois sinais registrados à mesma profundidade com equipamentos diferentes. Os resultados indicam que tanto para a instrumentação posicionada no topo como na base da composição de haste, as diferenças no processo de transferência de energia não são significativas. O coxim de polipropileno indica uma transferência de energia ligeiramente superior (5 ms) ao coxim de madeira. No entanto esses valores não podem ser considerados significativos. A transferência da energia total, para ambos os coxins, ocorre praticamente durante o mesmo intervalo de tempo, observando que para esses casos as diferenças entre os valores de rigidez não influenciam no processo de transferência de energia.



**Figura 6.41** – Comparação entre os processos de transferência de energia para os equipamentos convencional e mecanizado ( $L_h = 6.95$  m)

A Figura 6.42 apresenta as curvas de transferência de energia para dois sinais registrados a 2 metros de profundidade, utilizando os equipamentos convencional e mecanizado, ratificando o comportamento observado em outros registros (Figura 6.41). A transferência da energia total ocorre 105 ms após o impacto do martelo, independentemente do tipo de equipamento. Foi observado que a transferência total de energia ocorre praticamente ao mesmo tempo tanto para a instrumentação posicionada no topo quanto na base da composição de hastes. Esse fato se justifica pelo fato do comprimento da composição de haste ser muito curto.

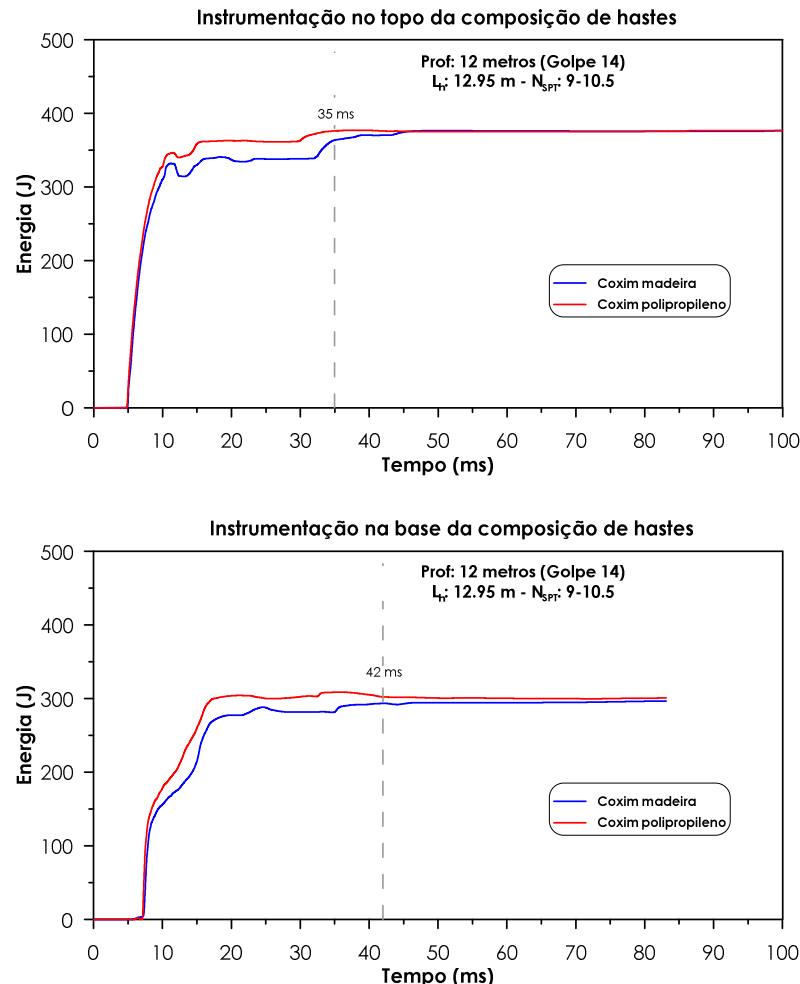


**Figura 6.42** – Comparação entre os processos de transferência de energia para os equipamentos convencional e mecanizado ( $L_h = 2.95$  m)

A Figura 6.43 apresenta sinais registrados a 12 metros de profundidade, onde também é possível observar que não existem diferenças significativas no processo de transferência de energia para ambos coxins. Entretanto, a transferência total de energia para o sinal registrado na base da composição de hastes ocorre cerca de 7 ms após a transferência de energia no topo. Esse fato ocorre porque o comprimento da composição de hastes é maior



do que nos outros casos analisados (Figura 6.41 e Figura 6.42), ficando mais evidente que a transferência de energia no topo se encerra antes da transferência de energia na base da composição de hastes.



**Figura 6.43** – Comparação entre os processos de transferência de energia para os equipamentos convencional e mecanizado ( $L_h = 12.95$  m)

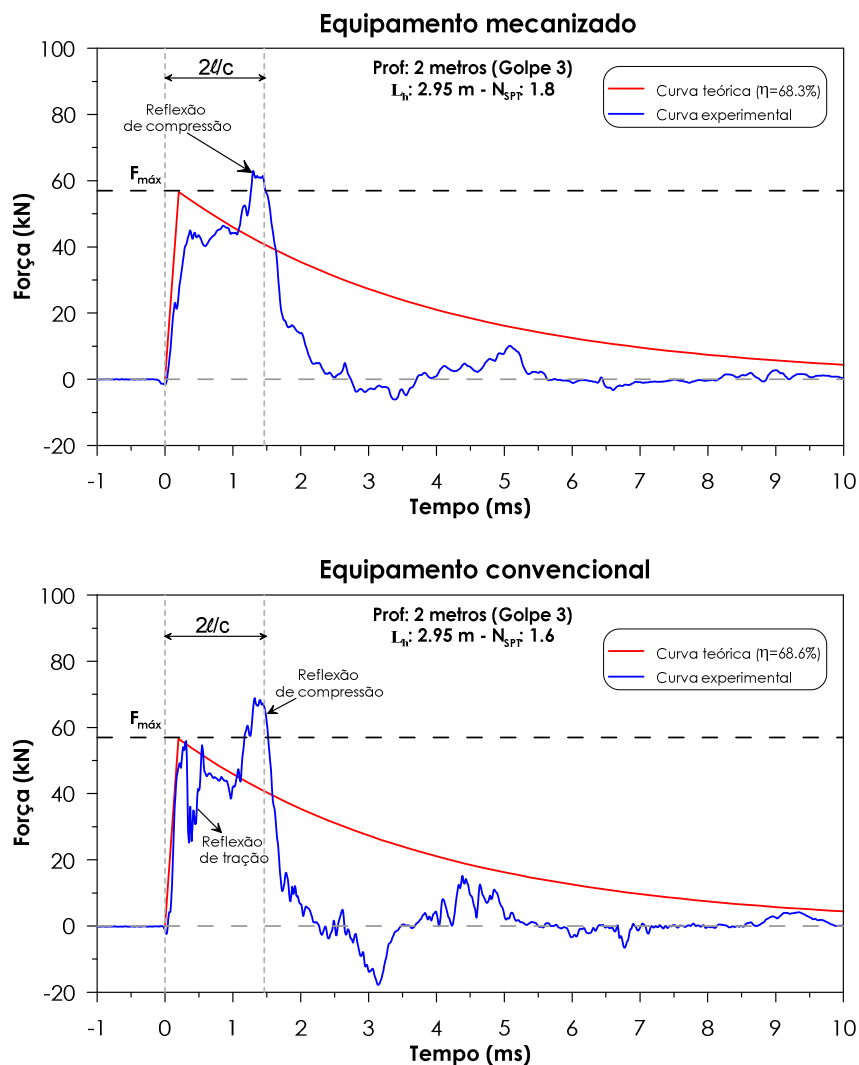
## 6.6 Comparação entre as curvas teórica e experimental de força

A força que surge durante a propagação da onda no ensaio SPT pode ser representada através de uma curva teórica (Equação 3.88), que considera a existência de um coxim rígido. A curva teórica é determinada em função dos valores de rigidez do coxim (de madeira ( $K_m$ ) ou de polipropileno ( $K_p$ ), velocidade inicial de impacto do martelo ( $v_i$ ), impedância da haste ( $Z$ ) e massa do martelo ( $M_m$ ). As rigidezes dos coxins e a velocidade de impacto foram obtidas no item 6.5.

Nas figuras a seguir (Figura 6.44 a Figura 6.46) são comparadas as curvas de força teórica e experimental, obtidas utilizando os equipamentos convencional e mecanizado. O

processo iterativo, para a determinação da rigidez dos coxins, indicou que o coxim de madeira apresenta uma rigidez superior a do coxim de polipropileno, conforme já era previsto através da comparação entre as dimensões geométricas e os valores do módulo de elasticidade.

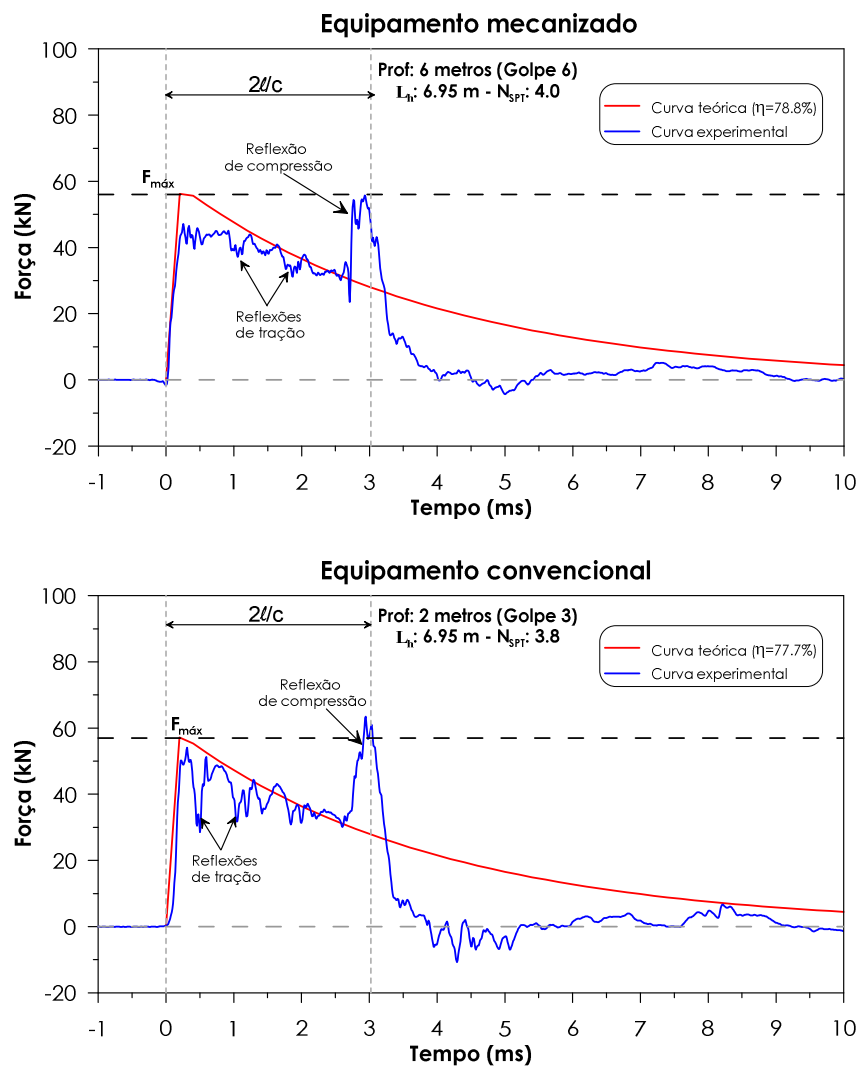
As curvas teóricas apresentaram valores de pico superiores aos valores das curvas experimentais (Figura 6.44 a Figura 6.46), sendo que para alguns casos os valores de pico teóricos foram bastante próximos aos valores de pico experimentais. Apesar das diferenças entre os valores de pico, a utilização da Equação 3.88 pode ser bastante útil para a estimativa da força máxima que ocorre no início do evento até o instante  $2l/c$ .



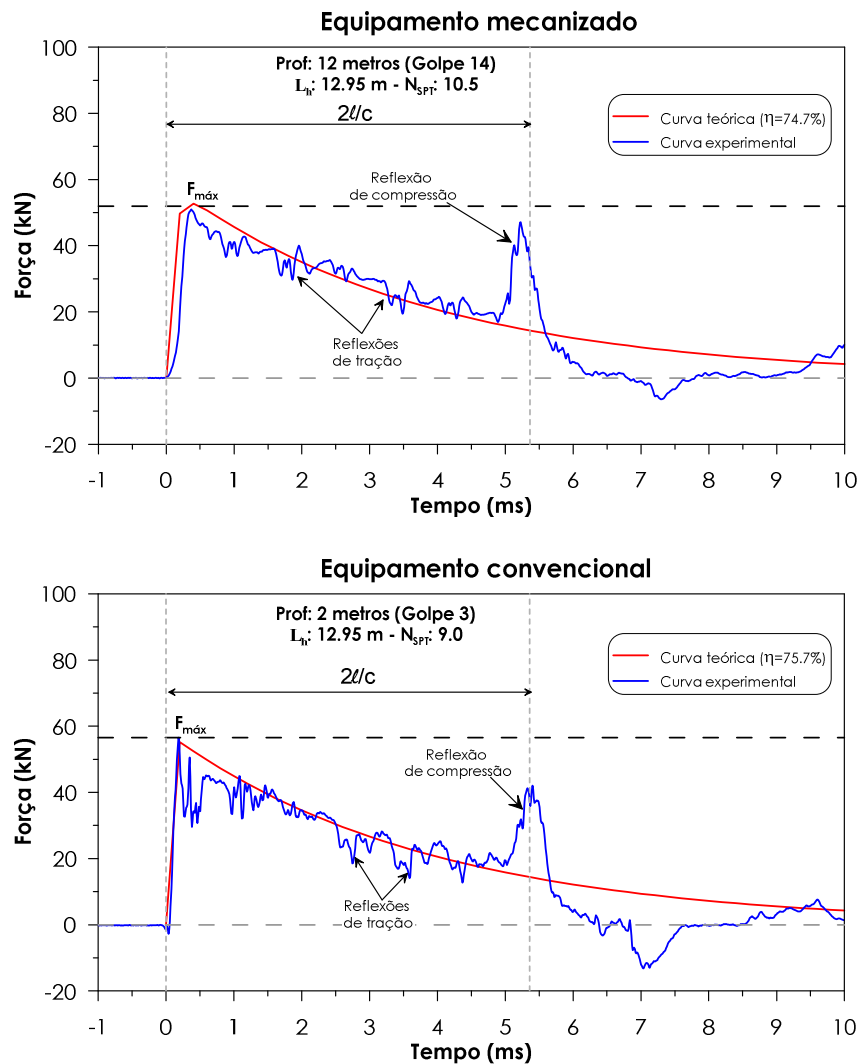
**Figura 6.44** – Comparação entre as curvas de força teórica e experimental para os equipamentos convencional e mecanizado ( $L_i = 2.95$ )

Para os dois equipamentos utilizados foi observada a presença de uma onda de reflexão de compressão causada pela presença de uma peça de conexão maciça posicionada entre o segmento de haste instrumentado e o amostrador (item 4.7.1.4.7.1). Também foram observadas ondas de reflexão de tração provavelmente ocasionadas pelo mal ajuste entre as luvas da composição de hastes.

O formato das curvas teórica e experimental (Figura 6.44 a Figura 6.46) indica que a transferência da força máxima ocorre no mesmo instante. Entretanto, essa análise deve ser realizada utilizando os valores de rigidez determinados através de análises que considerem a variação da área da seção transversal e as tensões atuantes devido ao confinamento do coxim dentro do martelo.



**Figura 6.45** – Comparação entre as curvas de força teórica e experimental para os equipamentos convencional e mecanizado ( $L_h = 6.95$ )



**Figura 6.46** – Comparação entre as curvas de força teórica e experimental para os equipamentos convencional e mecanizado ( $L_{hi}= 12.95$  m)

## 6.7 Influência das condições do solo na quantidade de energia do ensaio SPT

Existem diversos estudos relacionados à influência das condições do solo na quantidade de energia necessária para cravação do amostrador no solo (HVORSLEV, 1949; LOBO, 2009; BOSSCHER; SHOWERS, 1987). Em alguns casos os procedimentos executivos podem causar alterações nas condições do solo e conseqüentemente influenciar na quantidade de energia necessária para cravar o amostrador. As condições do solo podem ser consideradas como os fatores mais difíceis de serem quantificados no processo de transferência de energia. Este fato decorre da existência de subfatores relacionados às condições do solo, tais como: resistência ao cisalhamento, compacidade relativa ou consistência, permeabilidade, grau de saturação, forma, tamanho e distribuição dos grãos (no caso de solos granulares).

A seguir são apresentadas análises da influência da compactidade e/ou consistência do solo na quantidade de energia utilizada para a cravação do amostrador no solo. Para efeito de comparação foram utilizados os sinais de força e velocidade, assim como a influência destes sinais na quantidade de energia final transmitida ao solo. Os dados dos perfis analisados são apresentados na forma de tabela e os sinais são comparados através de gráficos.

### 6.7.1 Composição de hastes curta

A Tabela 6.12 apresenta as características de dois ensaios realizados em locais diferentes. Nestes ensaios foram utilizados o mesmo equipamento, os mesmos procedimentos executivos e uma composição de hastes curta (4.95 m), variando apenas a condição de compactidade das camadas ensaiadas. Nesta primeira análise foram comparados os resultados de um ensaio realizado no campo experimental da Unesp na cidade de Bauru (Solo A) com os resultados de um ensaio realizado no loteamento residencial na cidade de São Carlos (Solo B). Os solos ensaiados podem ser diferenciados basicamente através do índice de resistência à penetração, sendo o Solo A uma areia fofa e o Solo B uma areia pouco compacta (ABNT, 2001).

**Tabela 6.12** – Dados dos perfis utilizados para as análises da influência das condições do solo (Prof. 4 metros)

Identificação	Classificação do solo	N <sub>SPT</sub>	L <sub>h</sub> (m)	Equipamento	Instrumentação
Solo A	Areia fina pouco siltosa fofa	1.9	4.95	Martelo tipo pino guia (sistema de queda manual)	Posicionada no topo do conjunto de hastes
Solo B	Areia média argilosa pouco compacta	4.6	4.95		

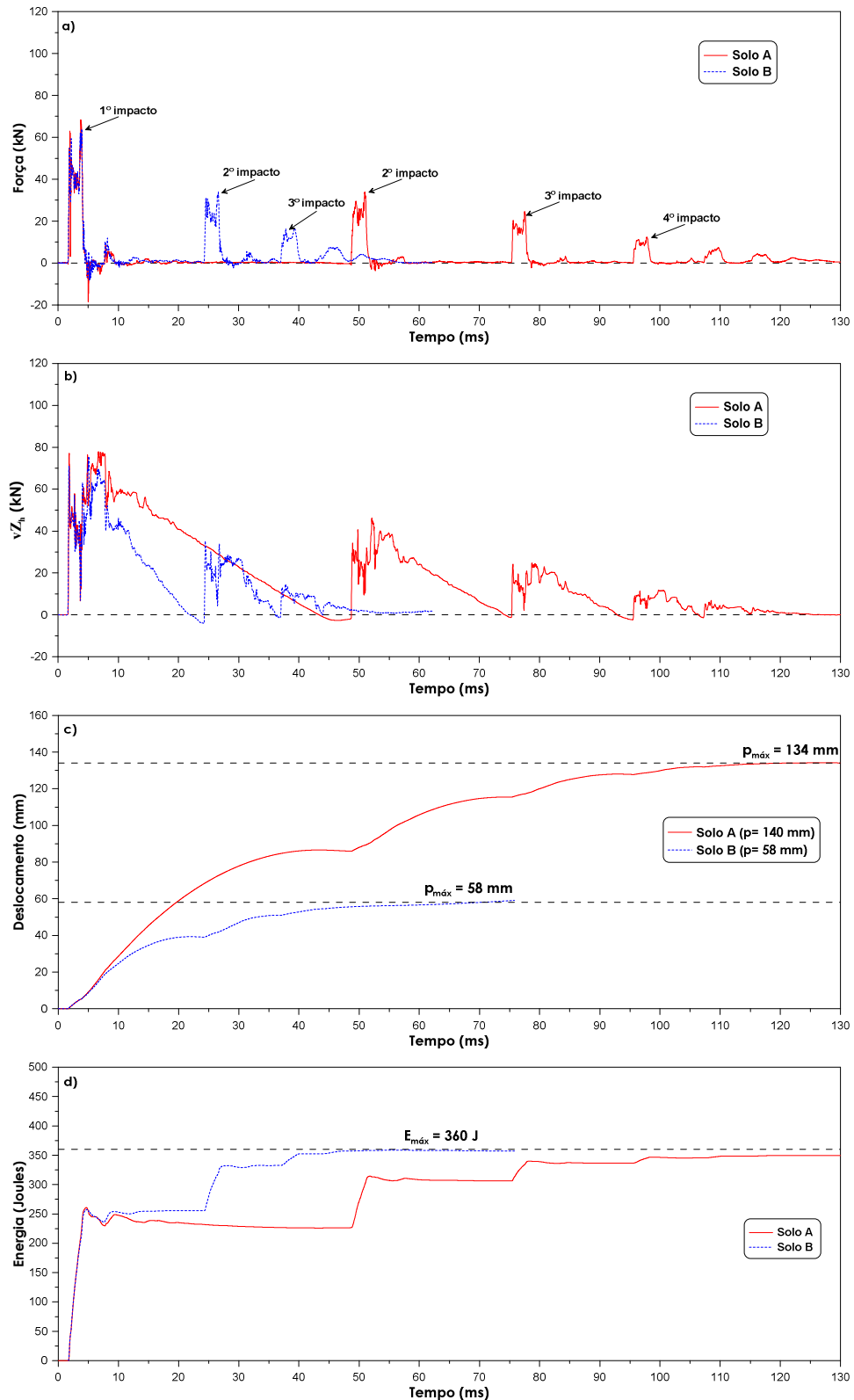
A Figura 6.47 mostra os efeitos da compactidade do solo nos sinais de força, velocidade multiplicada pela impedância da haste, deslocamento e energia entregue ao solo. A influência da compactidade do solo pode ser observada através dos diversos impactos que ocorrem ao longo de todo o evento. O Solo A apresentou maior número de impactos subsequentes do que o Solo B. Esse fato confirma que para o caso de solos pouco resistentes, as ondas refletidas são de grande intensidade e conseqüentemente retornam ao sistema com energia suficiente para causar penetrações adicionais do amostrador (Figura 6.47c) devido aos impactos subsequentes (LOBO, 2009). Assim, de maneira geral percebe-se

que quanto menor a resistência do solo maior será o número de impactos subsequentes necessários para consumir toda a energia disponível no sistema martelo-haste-amostrador.

A energia total entregue ao solo é praticamente a mesma para o solo A e o solo B, sendo que desta forma a quantidade de energia independente das condições de compactação dos solos analisados. Essa observação contradiz o trabalho teórico de Bosscher e Showers (1987), onde esses autores consideram que a resistência do solo influencia no valor da onda de tensão ocasionando diferentes valores de energia entregue ao solo. Entretanto, os resultados apresentados por Bosscher e Showers (1987) são questionáveis uma vez que a energia foi determinada através do método *EF2*. Como esse método só permite a determinação da energia até o intervalo de tempo correspondente a  $2l/c$ , considera-se que os resultados obtidos pelos autores são inferiores aos valores reais.

Adicionalmente, observou-se que no intervalo de tempo entre o final do primeiro impacto e o início do segundo impacto, a força permanece constante e igual à zero. Esta tendência também foi observada para os demais impactos (Figura 6.48). Este comportamento não foi relatado em trabalhos de pesquisas que utilizaram programas para simular o evento do golpe do martelo durante o ensaio SPT (LOBO, 2009; BOSSCHER; SHOWERS, 1987).

Além disso, o intervalo de tempo entre o primeiro e o segundo impacto é maior do que o intervalo de tempo entre o segundo e o terceiro impacto e assim sucessivamente (Figura 6.48). Desta forma, esse intervalo de tempo vai decrescendo conforme o amostrador vai sendo cravado no solo. Este fato mostra o efeito que a onda refletida acarreta na propagação da onda de tensão. Para solos com baixa resistência, a intensidade da onda refletida (onda de tração) pelo amostrador é maior do que a intensidade da onda refletida no caso de solos com maior resistência. A onda refletida de tração causa a separação entre o plano de impacto e o martelo, interrompendo momentaneamente a transferência de energia. No início da penetração o material encontra-se solto na ponta do amostrador devido aos procedimentos executivos de abertura do furo. À medida que ocorre a penetração do amostrador o material vai se tornando mais resistente. Consequentemente, a intensidade da onda refletida e o intervalo de tempo entre os impactos são diminuídos.



**Figura 6.47** – Efeito das condições do solo para uma composição de hastes de 4.95 m: a) sinais de força medidos a 0.45 m do plano de impacto do martelo, b) sinais de velocidade multiplicada pela impedância da seção da haste AWJ; c) sinais de deslocamento calculados a partir dos sinais de velocidade; d) energia entregue ao solo.

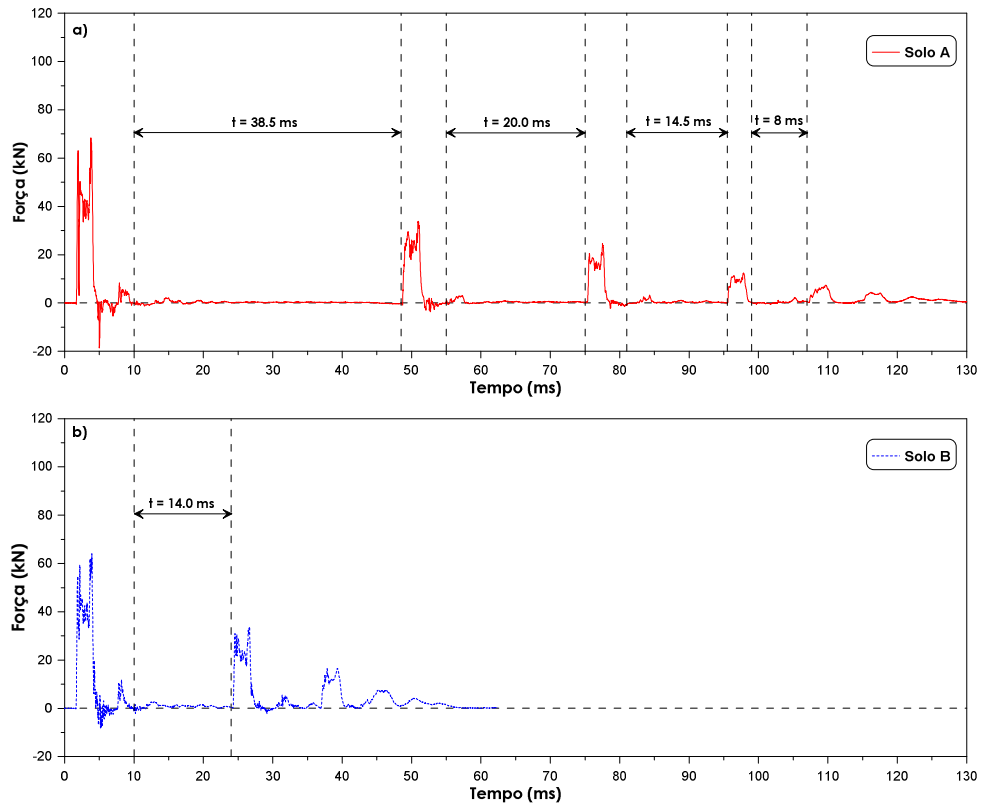


Figura 6.48 – Efeito das condições do solo no intervalo de tempo entre os impactos

### 6.7.2 Composição de haste média

A Tabela 6.13 apresenta as características de dois ensaios realizados em locais diferentes com a instrumentação posicionada no topo do conjunto de hastes. Nesta análise foram comparados os resultados de um ensaio realizado no campo experimental da Unesp na cidade de Bauru (Solo C) com os resultados de um ensaio realizado na cidade de São Carlos (Solo D). Os solos ensaiados apresentam diferentes valores de índice de resistência à penetração, sendo o Solo C uma areia pouco compacta e o solo D uma areia medianamente compacta (ABNT, 2001). Neste caso, foi utilizada uma composição de hastes de comprimento médio (8.95 m).

Tabela 6.13 – Dados dos perfis utilizados para as análises da influência das condições do solo (Prof. 8 metros)

Identificação	Classificação do solo	$N_{SPT}$	$L_h$ (m)	Equipamento	Instrumentação
Solo C	Areia fina pouco siltosa, pouco compacta	4.5	8.95	Martelo tipo pino guia (sistema de queda manual)	Posicionada no topo do conjunto de hastes
Solo D	Areia média argilosa, medianamente compacta	12.4	8.95		



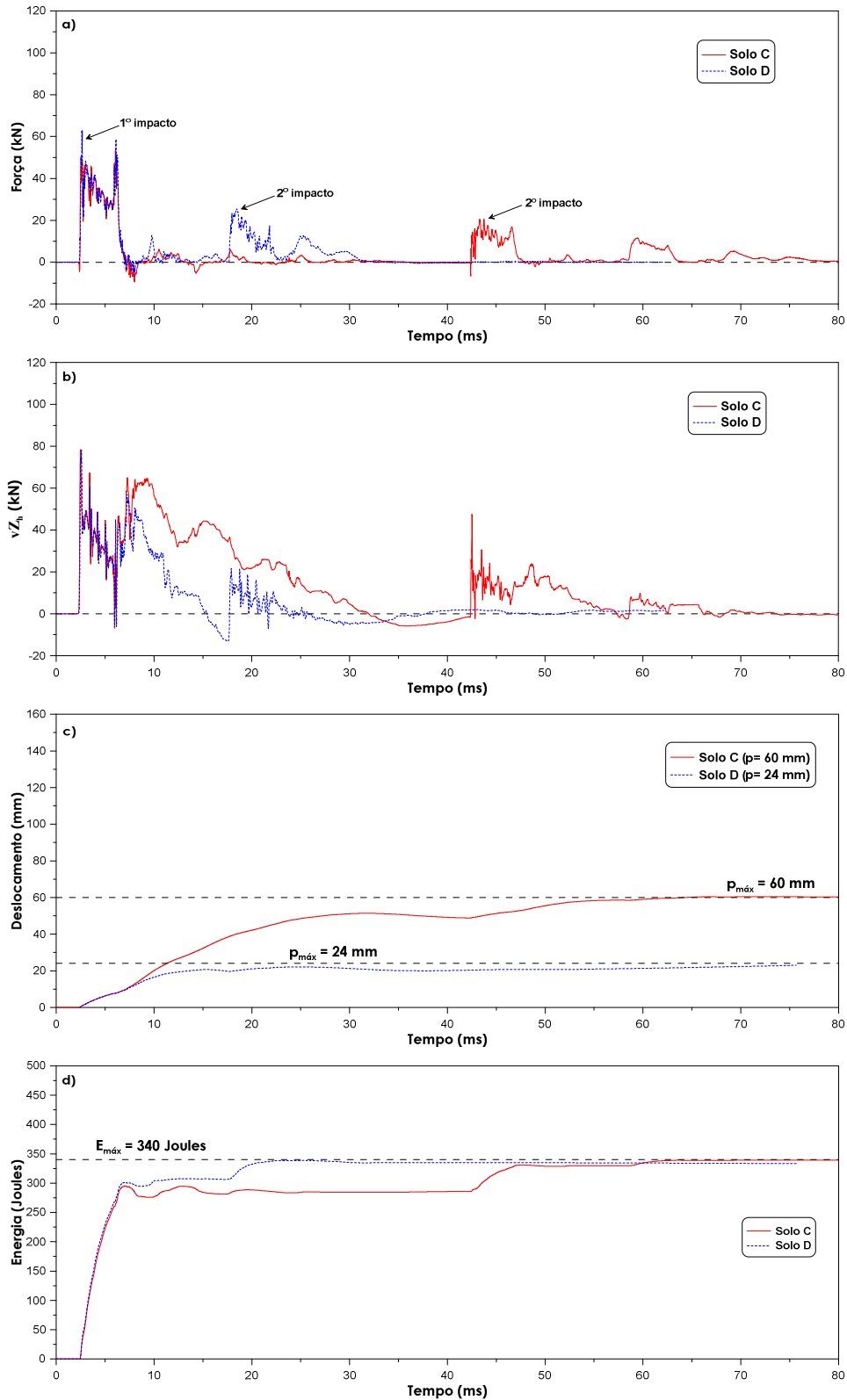
A Figura 6.49 mostra, para esse caso, os efeitos da compactidade do solo nos sinais de força, velocidade multiplicada pela impedância da haste, deslocamento e energia entregue ao solo. As curvas apresentadas mostram visivelmente a ocorrência de dois impactos até o fim do evento. Observa-se que para o Solo C e para o Solo D, no primeiro impacto 87% e 91%, respectivamente, da energia total é entregue ao solo (Figura 6.49d). A penetração total do amostrador (Figura 6.49c) para o Solo D praticamente independe do impacto secundário. A energia total entregue ao solo é praticamente a mesma tanto para o Solo C como para o Solo D, significando que a quantidade de energia independente das condições de resistência dos solos analisados.

Comparando o Solo C apresentado neste item, com o Solo B apresentado no item 6.7.1, observa-se que apesar destes solos apresentarem condições de compactidade bastante semelhantes, os processos de transferência de energia observados são diferentes. Essa diferença está associada ao comprimento da composição de hastes utilizado nos ensaios. No caso do Solo B, devido ao comprimento de composição de haste ser menor, a onda de tensão retorna em vários ciclos importantes para a transferência de energia, e conseqüentemente para a penetração do amostrador no solo. A quantidade de energia no topo da composição de hastes é praticamente a mesma para os dois solos ( $\cong 340$  Joules).

A Tabela 6.14 apresenta as características de dois ensaios realizados em locais diferentes com a instrumentação posicionada na base do conjunto de hastes. Foram comparados dois solos arenosos ensaiados na cidade de Bauru (Solo E) e o outro solo ensaiado na cidade de São Carlos (Solo F).

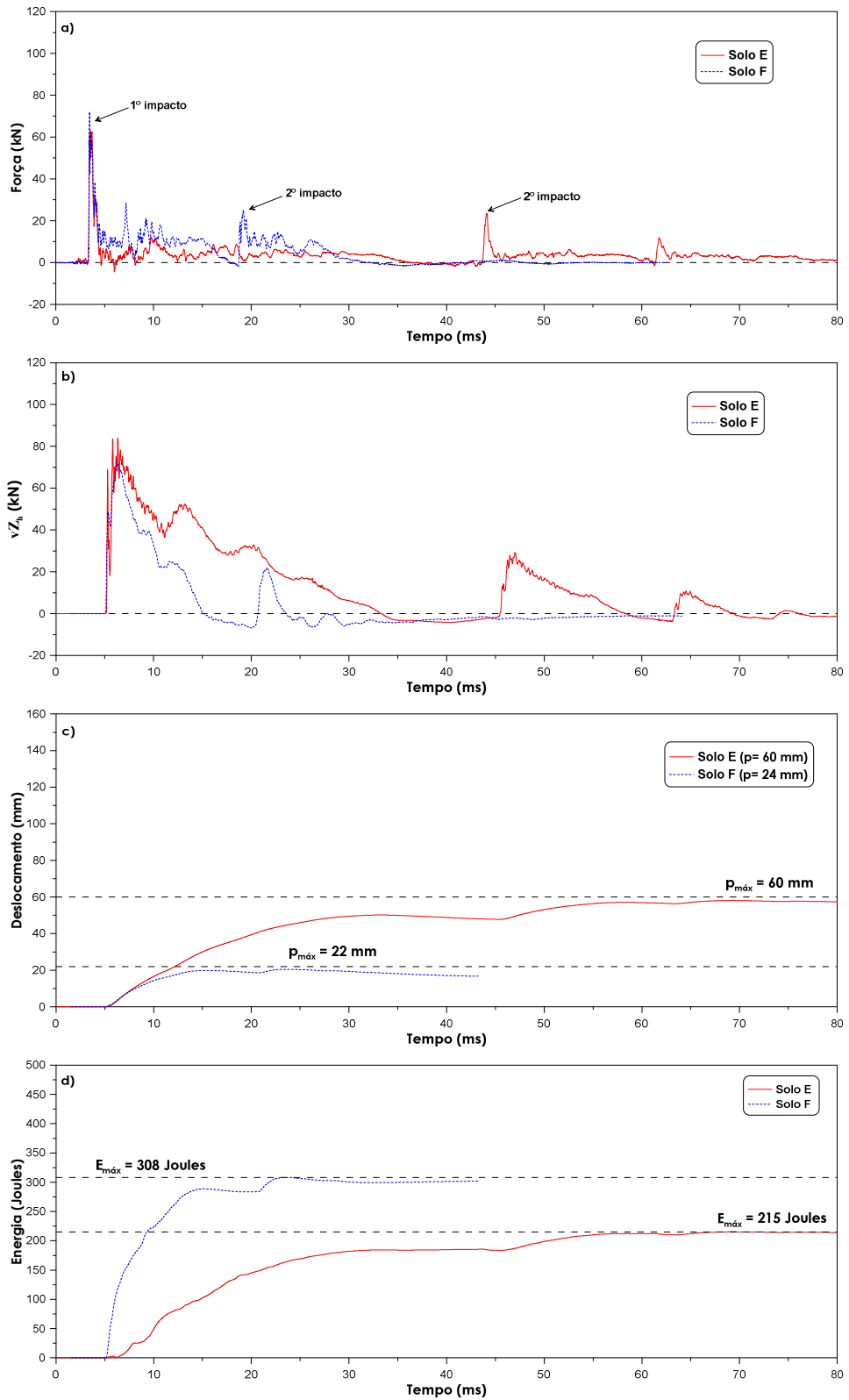
**Tabela 6.14** – Dados dos perfis utilizados para as análises da influência das condições do solo (Prof. 8 metros)

Identificação	Classificação do solo	N <sub>SPT</sub>	L <sub>h</sub> (m)	Equipamento	Instrumentação
Solo E	Areia fina pouco siltosa pouco compacta	4.5	8.95	Martelo tipo pino guia (sistema de queda manual)	Posicionada na base do conjunto de hastes
Solo F	Areia média argilosa medianamente compacta	12.4	8.95		



**Figura 6.49** - Efeito das condições do solo para uma composição de hastes de 8.95 m: a) sinais de força medidos a 0.45 m do plano de impacto do martelo, b) sinais de velocidade multiplicada pela impedância da seção da haste AWJ; c) sinais de deslocamento calculados a partir dos sinais de velocidade; d) energia entregue ao solo.

A Figura 6.50 mostra, para esse caso, os efeitos da compacidade do solo nos sinais de força, velocidade multiplicada pela impedância da haste, deslocamento e energia entregue ao solo com a instrumentação posicionada na base da composição de hastes. Observou-se a mesma tendência em relação aos impactos subsequentes, em relação ao caso da instrumentação posicionada no topo do conjunto de hastes. Assim, quanto menor for a resistência do solo maior será o número de impactos subsequentes e maior será o intervalo de tempo necessário para que estes impactos ocorram. No entanto, constatou-se que o valor máximo de energia correspondente ao Solo *E* apresentou-se cerca de 30% inferior ao valor correspondente ao Solo *F*. Os resultados mostraram que a quantidade de energia que atinge o amostrador é menor para solos com índice  $N_{SPT}$  menores. Assim, a perda de energia é mais acentuada para solos onde a intensidade da onda de reflexão é maior, uma vez que nestes casos, como são necessários mais ciclos para a transferência de energia, a energia se dissipa ao longo do processo de transferência.



**Figura 6.50** - Efeito das condições do solo para uma composição de hastes de 8.95 m: a) sinais de força medidos a 0.45 m do plano de impacto do martelo, b) sinais de velocidade multiplicada pela impedância da seção da haste AWJ; c) sinais de deslocamento calculados a partir dos sinais de velocidade; d) energia entregue ao solo.

## 6.8 Considerações finais

Neste capítulo foi apresentada uma análise quantitativa da variabilidade dos valores de energia determinados através do método *EFV*. Foram apresentados resultados de ensaios de campo realizados no Campo Experimental da Unesp de Bauru (SP) e em um loteamento residencial localizado na cidade de São Carlos (SP). Nestes ensaios foram utilizados equipamentos com diferentes mecanismos de levantamento e queda do martelo assim como coxins com diferentes valores de rigidez. Os resultados indicaram que:

- A correção da energia total imposta no sistema, proposta por Odebrecht (2003), tem importância fundamental na determinação do valor da correta eficiência do ensaio SPT;

- Os dados referentes à maior parte dos golpes nos ensaios SPT, mostraram que a quantidade de energia que efetivamente atinge o amostrador apresenta uma variabilidade maior do que quando a energia é determinada no topo da composição de hastes. Esta variabilidade, em alguns casos, apresenta-se superior quando se utiliza o equipamento convencional. Desta forma, conclui-se que a variação das quantidades de energia envolvidas no mecanismo de penetração do amostrador no solo ocorre devido a características intrínsecas do ensaio SPT (sistema de levantamento e queda do martelo, flambagem das hastes, excentricidade do golpe e outras fontes de perdas de energia).

- Para comprimentos de composição de hastes variando entre 2.95 m e 12.95 m foi observado que a parcela da energia do martelo que atinge o amostrador pode ser determinada utilizando um coeficiente de eficiência do martelo ( $\eta_1$ ), que é constante e independente do comprimento da composição de hastes. De acordo com os resultados desta pesquisa, os valores do coeficiente de eficiência do martelo ( $\eta_1$ ) são 0.751 e 0.569 para o topo e a base da composição de hastes, respectivamente. O valor do coeficiente de eficiência ( $\eta_1$ ) na base do amostrador deve ser utilizado preferencialmente para solos onde o valor do índice  $N_{SPT}$  é maior ou igual a 5, uma vez que a variabilidade dos resultados é menor para esses casos.

- Apesar das diferenças no mecanismo de levantamento e liberação dos martelos e da variabilidade dos resultados, os valores médios de eficiência para o topo indicaram que essas diferenças não são significativas. Adicionalmente, observou-se que os valores de eficiência no topo da composição apresentaram-se praticamente constantes e independentes do comprimento da composição de hastes.

- Através dos valores de energia determinados no topo e na base da composição de hastes foram quantificadas as perdas de energia que ocorrem ao longo do comprimento da composição de hastes. Os resultados, para os dois locais ensaiados, indicaram que para o equipamento convencional, a perda de energia não apresentou uma tendência de variação bem definida em função do comprimento da composição de hastes. Entretanto, no caso do equipamento mecanizado, os resultados indicaram que a perda de energia varia linearmente com o comprimento da composição de hastes.

- Os resultados experimentais obtidos nesta pesquisa indicaram valores de eficiência médios de 73% e 57% no topo e na base da composição de hastes, respectivamente.

- A comparação entre as curvas de energia teórica e experimental mostrou que a principal diferença que ocorre entre as curvas é o processo de transferência de energia. Os resultados também mostraram que quanto maior o comprimento da composição de hastes maior é a quantidade de energia transferida até o instante da primeira onda de reflexão e conseqüentemente maior é a semelhança entre as curvas;

- Apesar dos equipamentos utilizados apresentarem coxins com diferentes valores de rigidez, os resultados experimentais indicaram que este fator não influenciou significativamente no processo de transferência de energia;

- Comparando os resultados experimentais para camadas com diferentes compacidades, observou-se que quanto menor a compacidade maior será o número de impactos subsequentes necessários para completar a penetração do amostrador no solo. Os resultados indicaram que no caso da energia no topo da composição de hastes, a compacidade influencia apenas na duração do evento, sendo que a energia final é a mesma independente da condição do solo;

- Entretanto, esta mesma análise indicou que para camadas de solo com diferentes compacidades, a quantidade de energia na base da composição de hastes apresentou-se menor para solos com menor compacidade. No caso de solos com compacidade menor são necessários mais ciclos para a transferência de energia e conseqüentemente a dissipação da energia ao longo do evento torna-se maior.



# Capítulo 7

## Resistência do solo no ensaio SPT

### 7.1 Considerações iniciais

A determinação da resistência oferecida pelo solo durante a cravação do amostrador também deveria ser um dos objetivos do ensaio SPT. Isto porque, o índice de resistência à penetração ( $N_{SPT}$ ) do solo, determinado através desse ensaio não pode ser caracterizado como um valor real de resistência oferecida pelo solo. Schnaid et al. (2009) demonstraram que a força dinâmica de reação do solo, mobilizada durante a cravação do amostrador SPT, pode ser utilizada para estimar parâmetros de resistência do solo (ângulo de atrito do solo e resistência não drenada) com uma boa aproximação.

Neste sentido, este capítulo apresenta como principal abordagem a determinação do perfil de resistência do solo obtido através da medida da força normal em uma seção posicionada logo acima do amostrador. Posteriormente, os valores de resistência experimentais do solo são comparados com propostas teóricas utilizadas para o cálculo da resistência dinâmica e estática do solo durante o ensaio SPT. São utilizadas como base comparativa as propostas desenvolvidas por Schmertmann (1979), Aoki et al., (2007) e Schnaid et al., (2009).

### 7.2 Resistência do solo no ensaio SPT

O desenvolvimento deste capítulo está baseado no estudo da influência das condições de contorno durante a propagação da onda de tensão apresentado no item 3.5 do Capítulo 3. Para as condições das camadas de solo onde foram realizados os ensaios SPT foi considerado que a condição de contorno apresentada entre o solo e o amostrador é similar à condição da extremidade de uma haste semi-engastada. Assim, considera-se que a resistência dinâmica ( $R_D$ ) oferecida pelo solo é igual à força final na extremidade do conjunto de hastes (Equação 7.1).

$$R_D = F \downarrow + F \uparrow \quad (7.1)$$

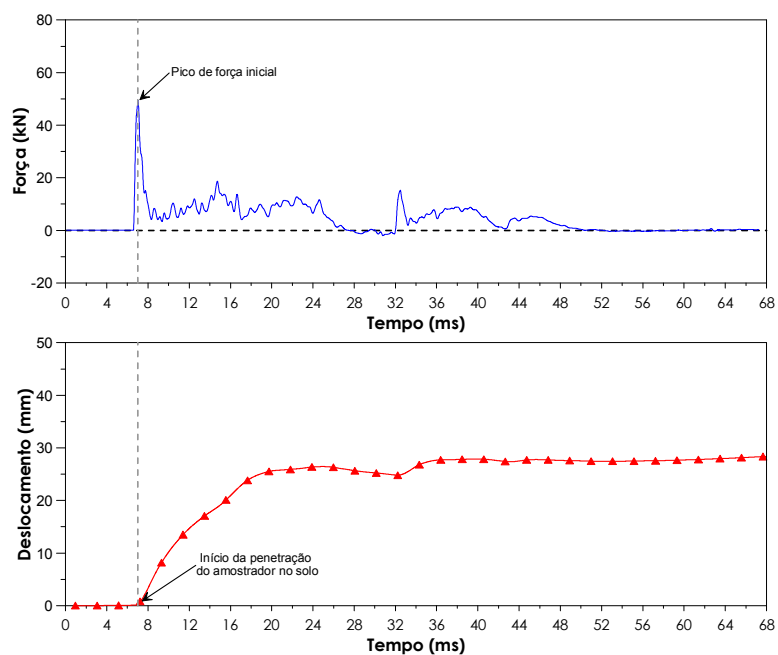
Desta forma, a resistência dinâmica oferecida pelo solo pode ser obtida através da medida direta dos valores de força, em uma seção instrumentada logo acima do



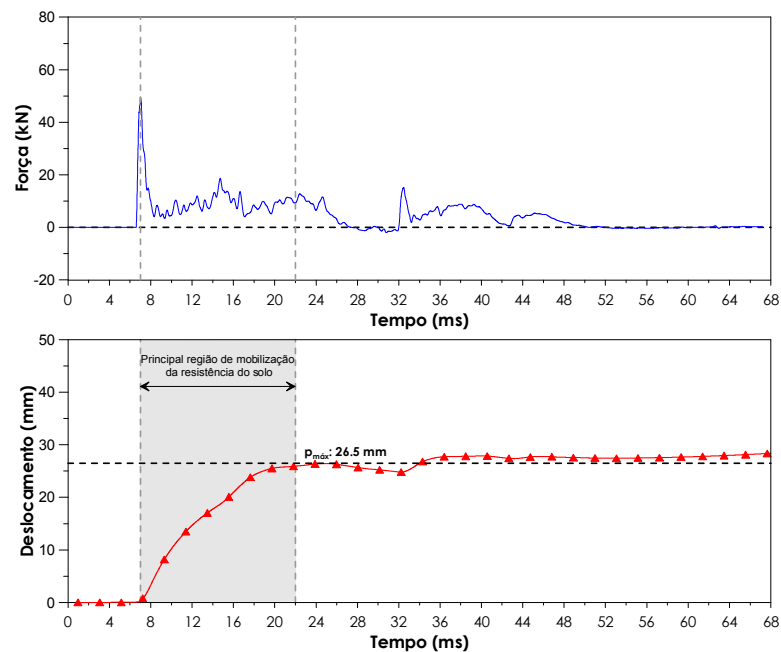
amostrador SPT, onde a célula de carga registra os valores de força devido às ondas ascendentes e descendentes que ocorrem próximas à camada de solo.

O método utilizado para o cálculo da resistência dinâmica do solo, adotado neste trabalho de pesquisa, é ilustrado através de um golpe típico do ensaio SPT. Foi utilizado como exemplo o registro dos sinais de um golpe executado a uma profundidade de 11 metros onde o índice  $N_{SPT}$  era de aproximadamente 11 golpes. Assim, pode-se considerar que o caso de extremidade semi-engastada pode ser aplicado para os valores encontrados, uma vez que a resistência oferecida pelo solo não é caracterizada como resistência nula ou infinita.

A Figura 7.1 indica que o pico inicial da força é responsável apenas para iniciar a penetração do amostrador no solo, ou seja, para tirar o amostrador do estado de repouso. Neste caso considera-se que uma parte da energia que é entregue ao conjunto de hastes é utilizada para promover o início do deslocamento do amostrador no solo. A partir do início do movimento, o amostrador penetra continuamente no solo até atingir o equilíbrio e entrar novamente em repouso (Figura 7.2), antes de ocorrer o segundo impacto. Neste instante, para este primeiro impacto, observa-se que o deslocamento máximo ( $\rho_{máx}$ ) obtido foi de aproximadamente 26.5 mm, ou seja, aproximadamente 94% do deslocamento total registrado no final do evento ( $\rho_{total}$ : 28.3 mm) (Figura 7.3).



**Figura 7.1** – Força e deslocamento versus tempo para um registro típico monitorado em uma seção imediatamente acima do amostrador (Profundidade: 11 metros - 6º golpe)



**Figura 7.2** – Força e deslocamento versus tempo para um registro típico monitorado em uma seção imediatamente acima do amostrador (Profundidade: 11 metros - 6º golpe)

Após a ocorrência do segundo impacto ( $t = 32 \text{ ms}$ ) (Figura 7.3), o amostrador reinicia a sua penetração no solo atingindo um valor máximo e encerrando o evento. Neste estágio a resistência dinâmica do solo continua a ser mobilizada, porém com uma intensidade inferior à da resistência mobilizada durante o primeiro impacto. Este comportamento é coerente com o evento físico uma vez que a força máxima no primeiro impacto (50 kN) é superior à força máxima no segundo impacto (16 kN).

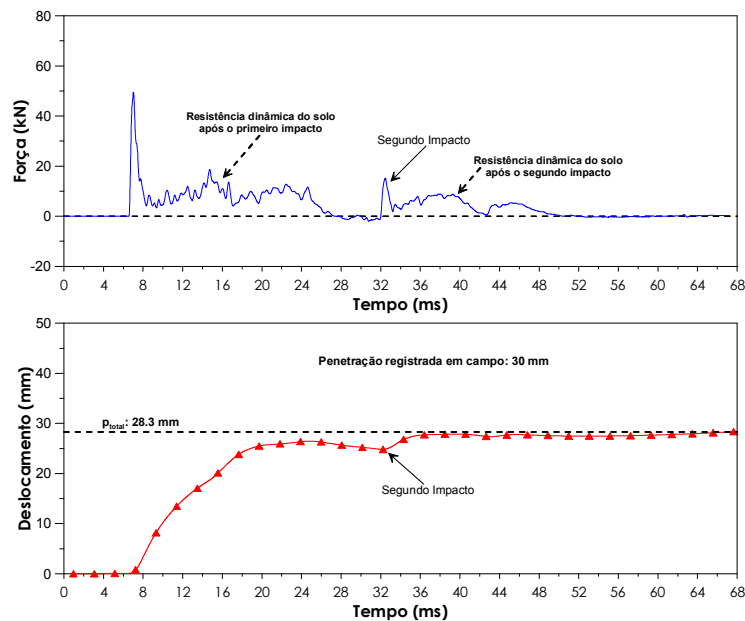
A resistência dinâmica do solo, representada pelas tensões de cisalhamento no contato solo-amostrador, varia em cada ponto ao longo da superfície externa e interna do amostrador para cada incremento de penetração. Além disso, as tensões na base do amostrador também variam para cada incremento de penetração. No entanto, simplificada, neste trabalho de pesquisa considerou-se que a resistência dinâmica do solo ( $R_D$ ) pode ser representada pelo valor médio da resultante das tensões atuantes durante o intervalo de tempo quando ocorre a penetração do amostrador. Assim, o valor de  $R_D$ , para um determinado golpe, corresponde ao valor médio entre os valores médios da resultante no primeiro impacto (8.90 kN) e no segundo impacto (8.30 kN) (Figura 7.4). Neste caso, a resistência dinâmica do solo, para este golpe, foi considerada igual a 8.60 kN. No cálculo do valor de  $R_D$  foram considerados apenas os valores de força dentro do intervalo

de mobilização do solo, ou seja, o intervalo de tempo quando ocorre a penetração do amostrador.

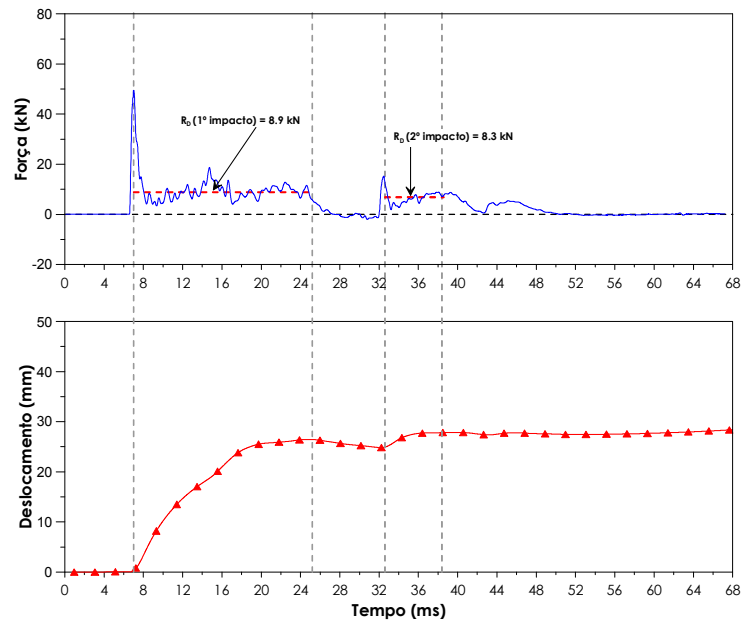
Este procedimento de cálculo foi repetido para todos os golpes no intervalo de penetração dos últimos 0.3 m do amostrador. A resistência dinâmica da profundidade nominal ( $R_D$ ) é representada através da média dos valores de resistência dinâmica (Equação 7.2):

$$R_D = \frac{\sum R_{D,i}}{N} \quad (7.2)$$

onde  $\sum R_{D,i}$  é o somatório dos valores de resistência dinâmica para os golpes correspondentes aos últimos 0.3 m de penetração do amostrador e  $N$  é o número de golpes. A resistência dinâmica do solo também pode ser obtida através da relação entre o valor de energia no topo do amostrador e do deslocamento permanente do amostrador SPT, conforme a proposta de Aoki e Cintra (2000) e Schnaid et al. (2009).



**Figura 7.3** - Força e deslocamento versus tempo para um registro típico monitorado em uma seção imediatamente acima do amostrador (Profundidade: 11 metros - 6º golpe)



**Figura 7.4** - Força e deslocamento versus tempo para um registro típico monitorado em uma seção imediatamente acima do amostrador (Profundidade: 11 metros - 6º golpe)

### 7.3 Apresentação dos resultados de resistência dinâmica do solo

#### 7.3.1 Campo Experimental da UNESP de Bauru (SP)

A seguir são apresentados os resultados e as análises referentes aos valores de resistência dinâmica do solo determinados através dos registros de força. Os ensaios foram realizados no Campo Experimental da Universidade Estadual Paulista (UNESP) na cidade de Bauru (SP). A resistência dinâmica foi determinada para o perfil estudado com profundidades variando entre 2 a 12 metros, conforme apresentado nas tabelas abaixo (Tabela 7.1 e Tabela 7.2).

**Tabela 7.1** – Resumo dos resultados de resistência dinâmica experimental do solo, para o campo experimental da UNESP (Profundidade de 2 a 9 metros)

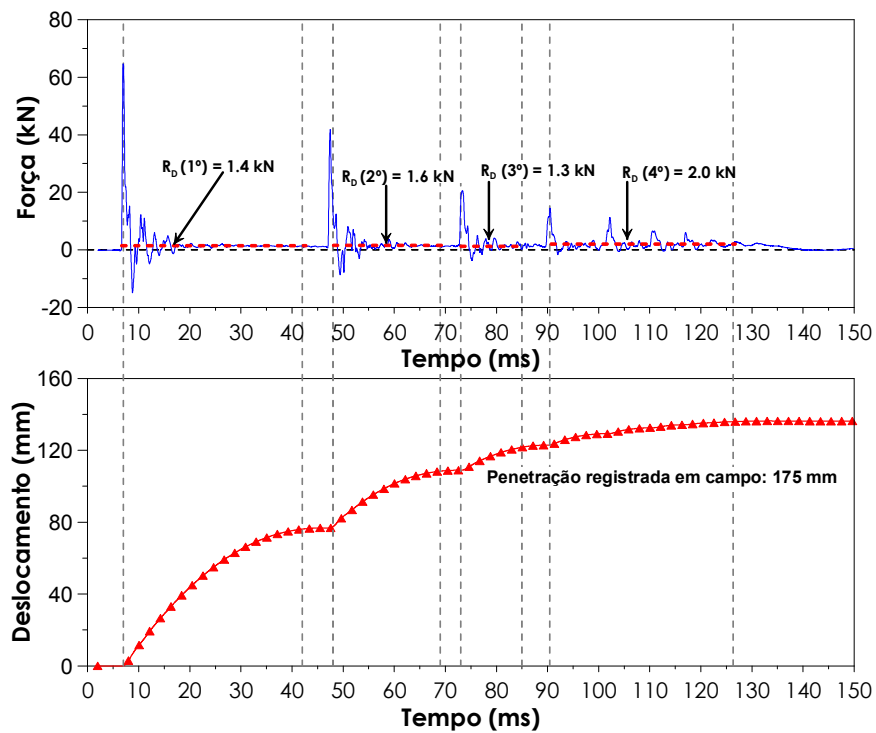
Tipo de Equipamento		Convencional			Mecanizado		
Profundidade (m)	$L_h$ (m)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$R_D$ (kN)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$R_D$ (kN)
2.0	2.95	2	0.190	1.8	2	0.180	1.5
		3	0.175	1.6	3	0.160	2.2
$R_D$ (kN)				<b>1.7</b>	<b>1.9</b>		
Profundidade (m)	$L_h$ (m)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$R_D$ (kN)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$R_D$ (kN)
4.0	4.95	2	0.180	1.9	3	0.115	2.3
		3	0.140	2.6	4	0.170	2.0
$R_D$ (kN)				<b>2.3</b>	<b>2.2</b>		
Profundidade (m)	$L_h$ (m)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$R_D$ (kN)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$R_D$ (kN)
6.0	6.95	3	0.087	4.5	3	0.080	4.3
		4	0.070	4.0	4	0.080	4.6
		5	0.080	4.0	5	0.070	4.1
		6	0.082	4.4	6	0.070	4.3
$R_D$ (kN)				<b>4.2</b>	<b>4.3</b>		
Profundidade (m)	$L_h$ (m)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$R_D$ (kN)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$R_D$ (kN)
8.0	8.95	5	0.058	5.1	4	0.060	4.4
		6	0.065	4.8	5	0.080	4.5
		7	0.080	4.8	6	0.060	4.8
		8	0.060	5.3	7	0.060	4.8
		9	0.070	5.0	8	0.070	4.5
$R_D$ (kN)				<b>5.0</b>	<b>4.6</b>		
Profundidade (m)	$L_h$ (m)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$R_D$ (kN)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$R_D$ (kN)
9.0	9.95	4	0.060	5.6	4	0.045	5.5
		5	0.052	5.9	5	0.045	5.9
		6	0.054	5.8	6	0.055	6.3
		7	0.041	5.5	7	0.045	6.6
		8	0.043	5.8	8	0.050	6.4
		9	0.045	6.2	9	0.050	5.9
$R_D$ (kN)				<b>5.8</b>	<b>6.1</b>		

**Tabela 7.2** - Resumo dos resultados de resistência dinâmica experimental do solo, para o campo experimental da UNESP (Profundidade de 10 a 12 metros)

Tipo de Equipamento		Convencional			Mecanizado		
Profundidade (m)	$L_h$ (m)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$R_D$ (kN)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$R_D$ (kN)
10.0	10.95	6	0.035	6.5	5	0.040	6.7
		8	0.040	6.8	6	0.040	7.1
		9	0.060	6.4	7	0.030	7.0
		10	0.045	6.4	8	0.040	6.9
		-	-	-	9	0.035	7.3
		-	-	-	10	0.040	6.9
		-	-	-	11	0.025	7.3
		-	-	-	12	0.045	7.3
<b><math>R_D</math> (kN)</b>				<b>6.5</b>	<b>7.1</b>		
Profundidade (m)	$L_h$ (m)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$R_D$ (kN)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$R_D$ (kN)
11.0	11.95	6	0.030	8.3	6	0.025	9.6
		7	0.030	8.0	7	0.030	9.6
		8	0.035	8.4	8	0.025	9.9
		10	0.030	8.6	9	0.025	10.1
		11	0.030	8.6	10	0.030	10.6
		12	0.030	9.1	11	0.025	9.3
		13	0.030	9.1	12	0.030	10.1
		14	0.033	9.2	13	0.030	10.6
		-	-	-	14	0.027	10.5
		-	-	-	15	0.028	10.7
<b><math>R_D</math> (kN)</b>				<b>8.7</b>	<b>10.1</b>		
Profundidade (m)	$L_h$ (m)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$R_D$ (kN)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$R_D$ (kN)
12.0	12.95	6	0.027	8.9	6	0.030	9.6
		8	0.038	8.6	7	0.025	9.7
		9	0.027	8.9	8	0.025	10.0
		10	0.035	8.8	9	0.033	10.2
		11	0.030	8.8	10	0.025	10.5
		12	0.035	9.0	11	0.027	10.7
		13	0.037	8.9	12	0.030	10.4
		14	0.033	8.5	13	0.025	10.9
-	-	-	14	0.025	10.5		
-	-	-	15	0.035	10.7		
<b><math>R_D</math> (kN)</b>				<b>8.8</b>	<b>10.3</b>		

O cálculo da resistência dinâmica do solo foi realizado utilizando apenas os golpes que apresentaram sinais de aceleração e força consistentes com os valores calculados de energia e deslocamento. Desta maneira, os sinais utilizados representam com fidelidade os reais resultados da resistência dinâmica do solo nas condições ensaiadas.

As figuras a seguir (Figura 7.5 a Figura 7.20) correspondem a sinais típicos de força e deslocamento registrados utilizando o equipamento convencional e o equipamento mecanizado, para profundidades variando de 2 a 12 metros. Comparando os sinais registrados, observa-se que quanto maior a penetração permanente do amostrador maior é o intervalo de mobilização da resistência dinâmica do solo. Desta forma, a determinação correta da resistência dinâmica do solo deve levar em consideração a influência dos impactos subsequentes. O erro dos resultados obtidos foi avaliado em relação aos valores médios, apresentando um comportamento satisfatório. Os resultados gráficos são apresentados no Apêndice C.



**Figura 7.5** – Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 2 metros – Equipamento convencional - 3º golpe)

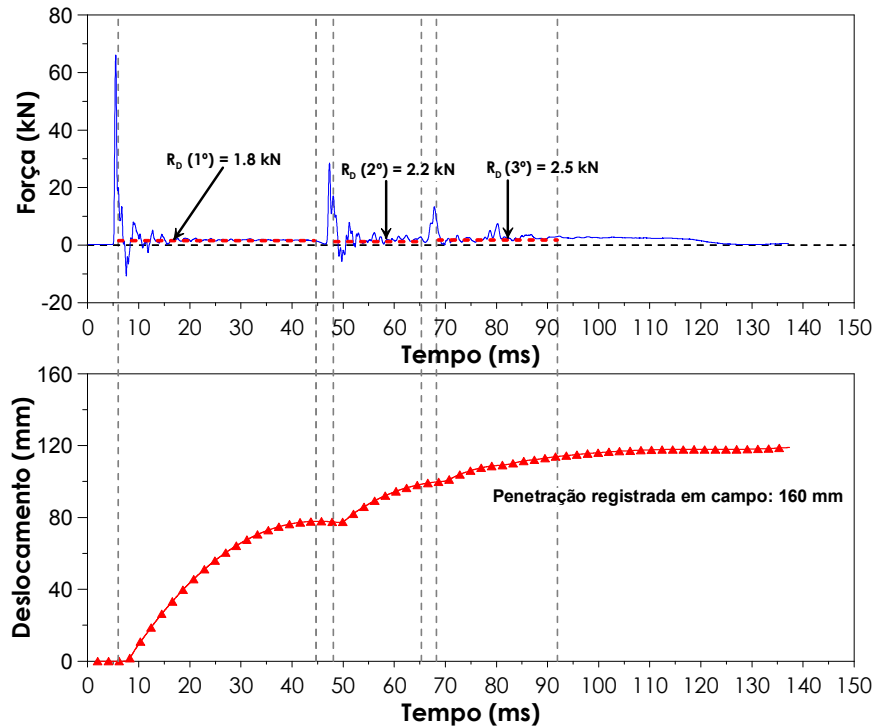


Figura 7.6 – Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 2 metros – Equipamento mecanizado - 3º golpe)

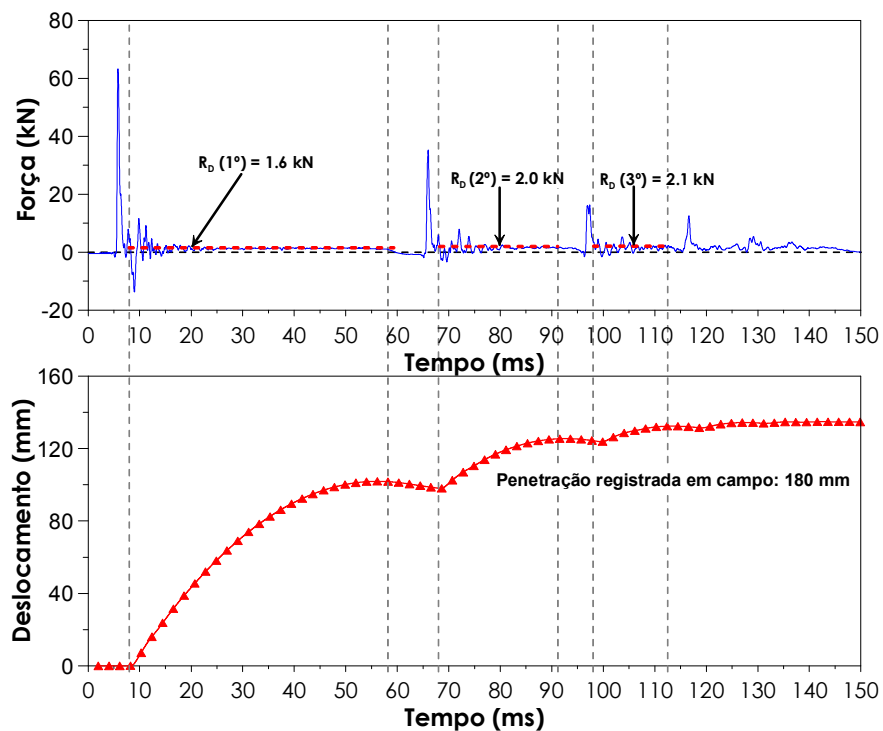
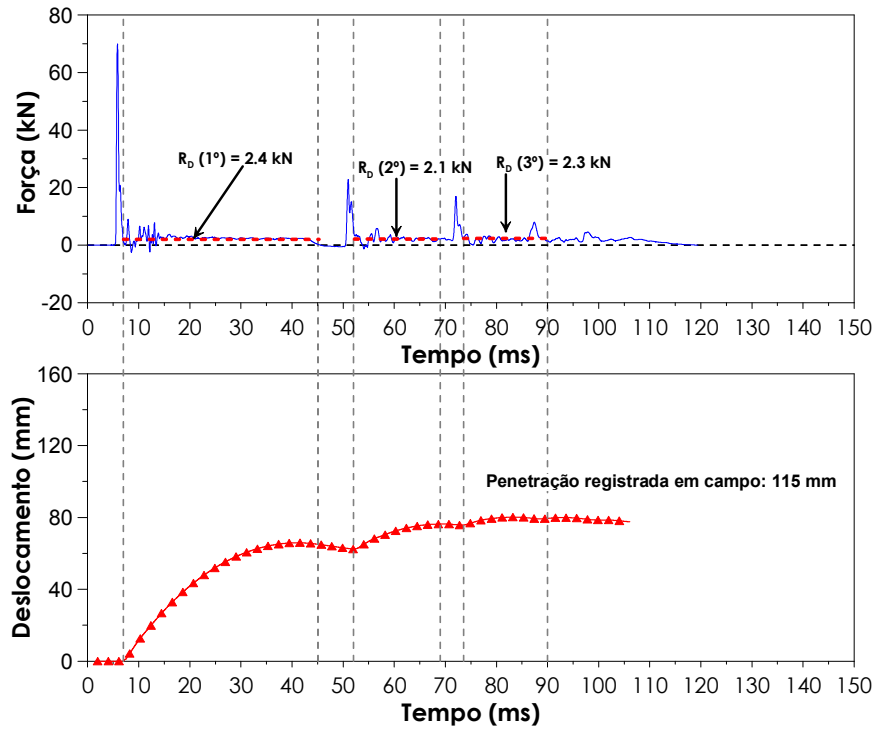
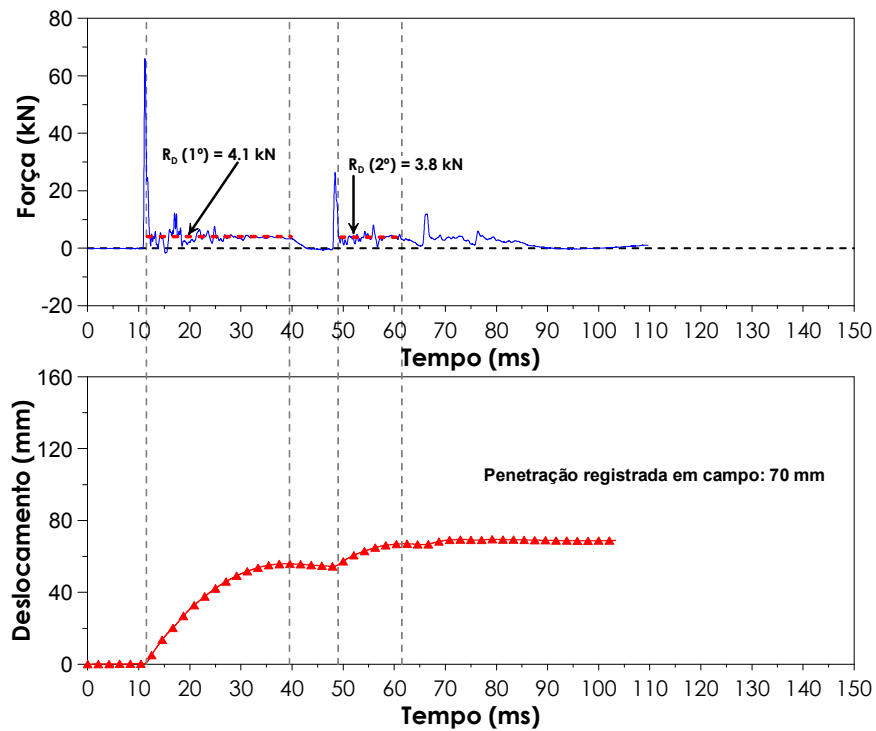


Figura 7.7 - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 4 metros – Equipamento convencional - 2º golpe)

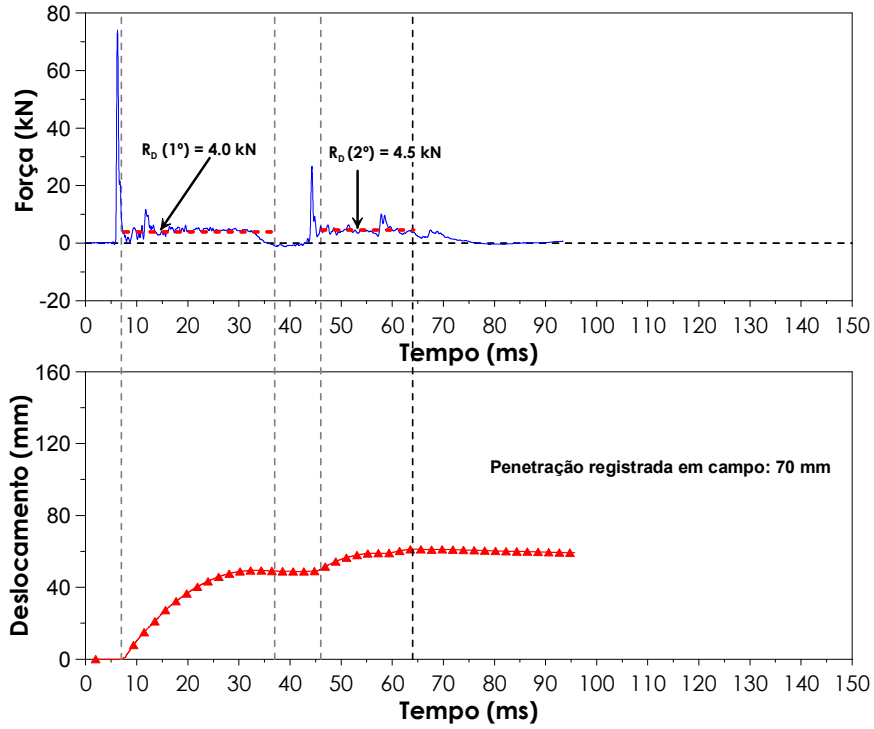




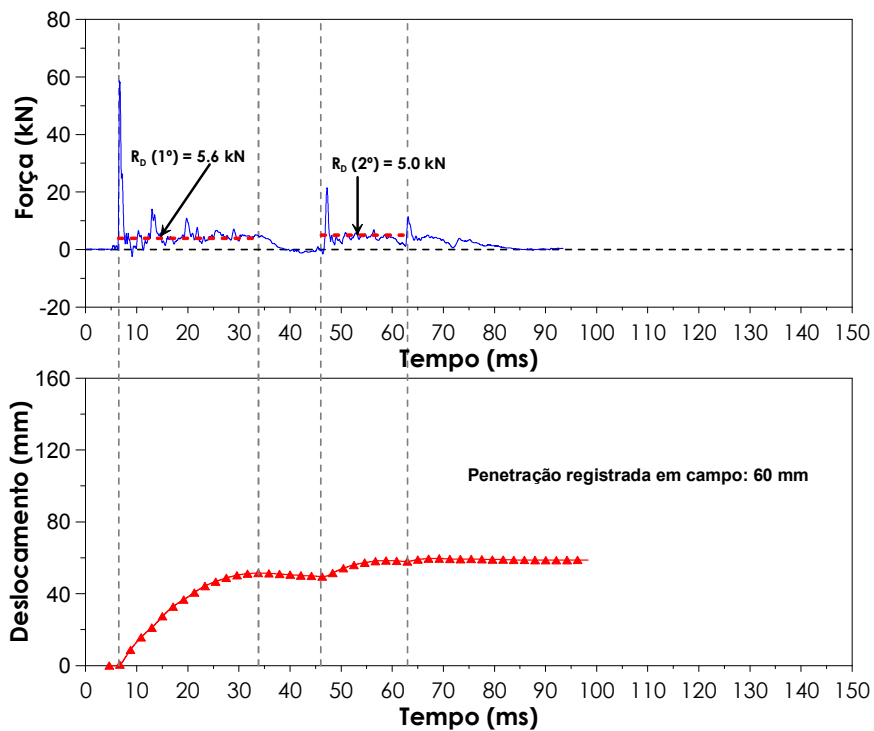
**Figura 7.8** - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 4 metros – Equipamento mecanizado - 3º golpe)



**Figura 7.9** - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 6 metros - Equipamento convencional - 4º golpe)



**Figura 7.10** - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 6 metros - Equipamento mecanizado 6º golpe)



**Figura 7.11** - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 8.0 metros - Equipamento convencional 7º golpe)

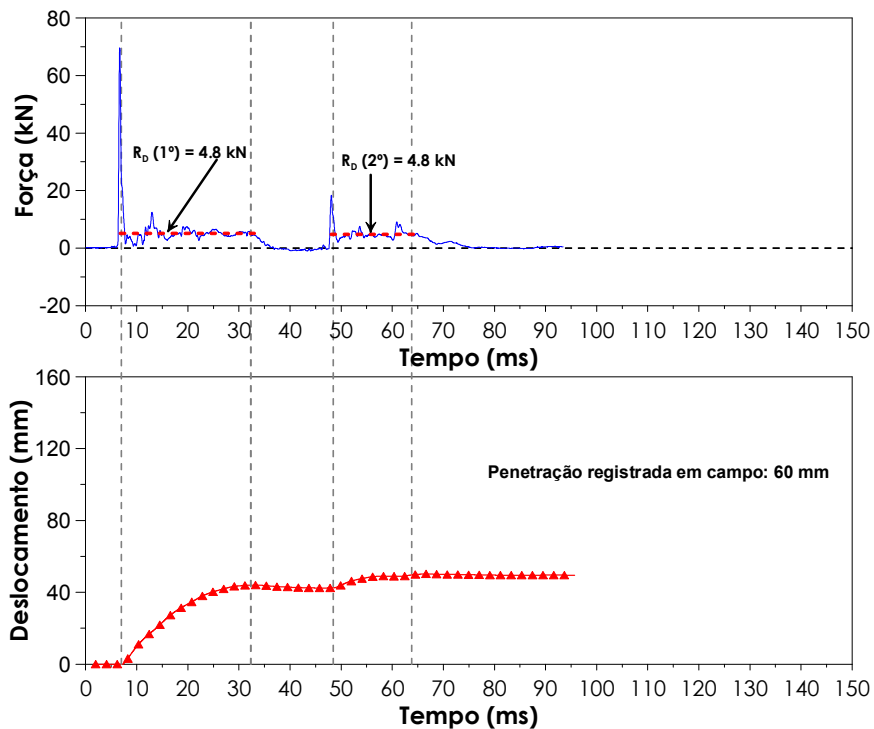


Figura 7.12 - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 8.0 metros - Equipamento mecanizado - 7° golpe)

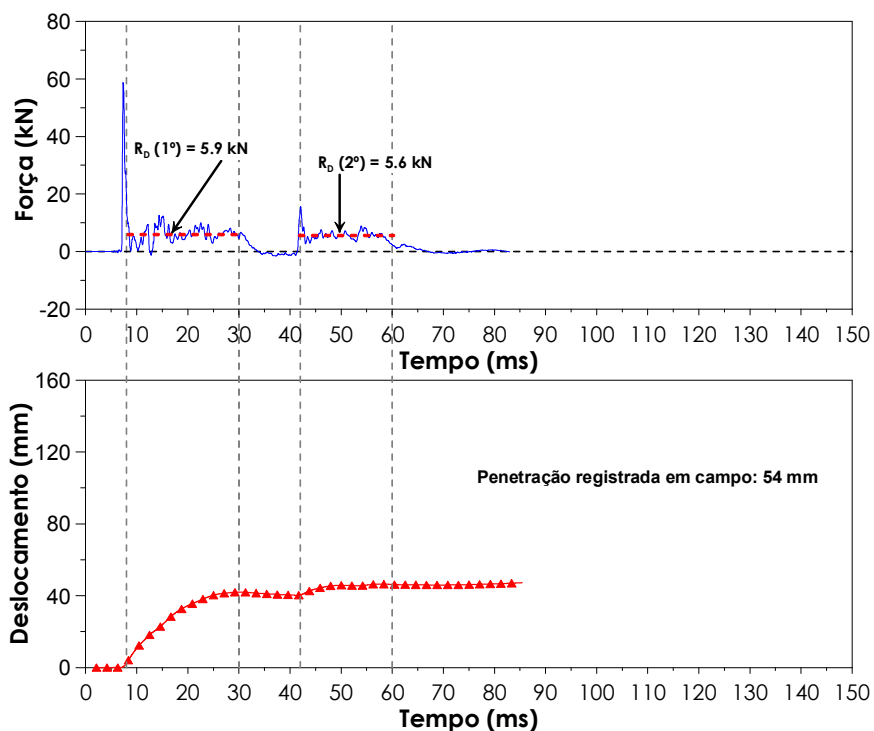
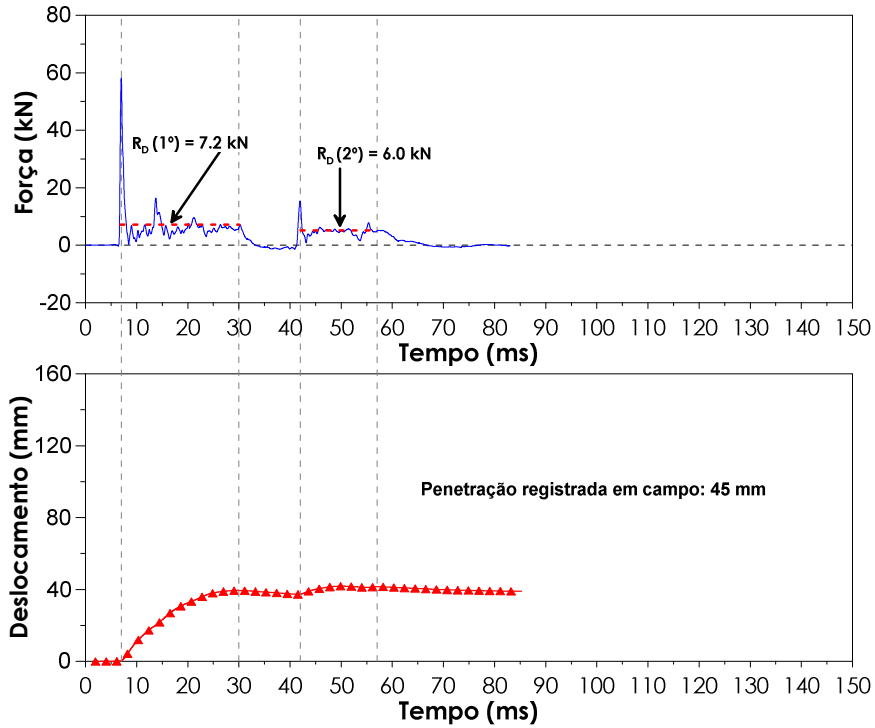
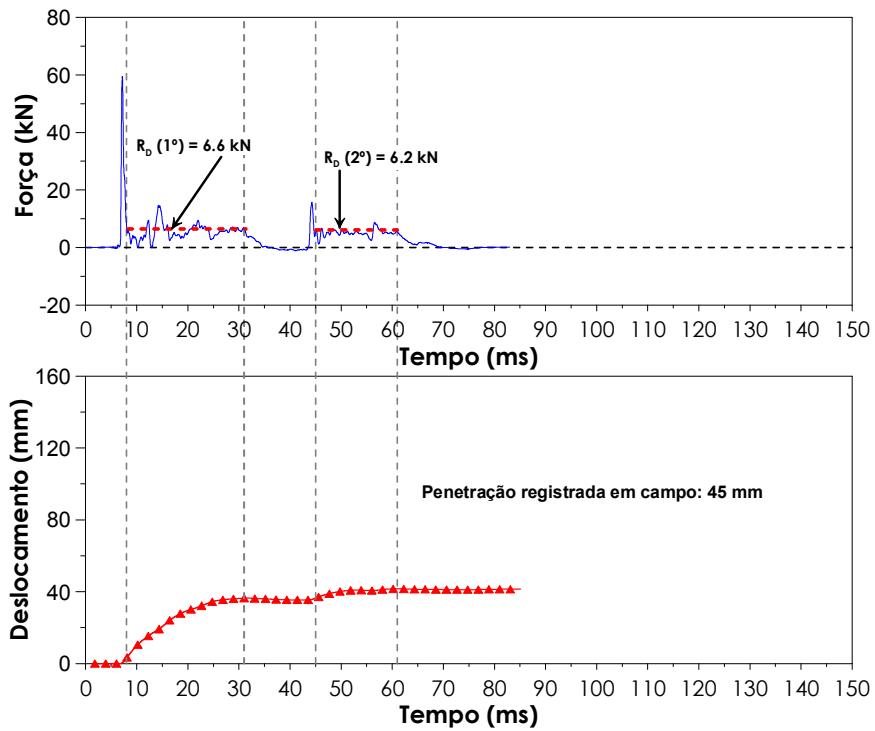


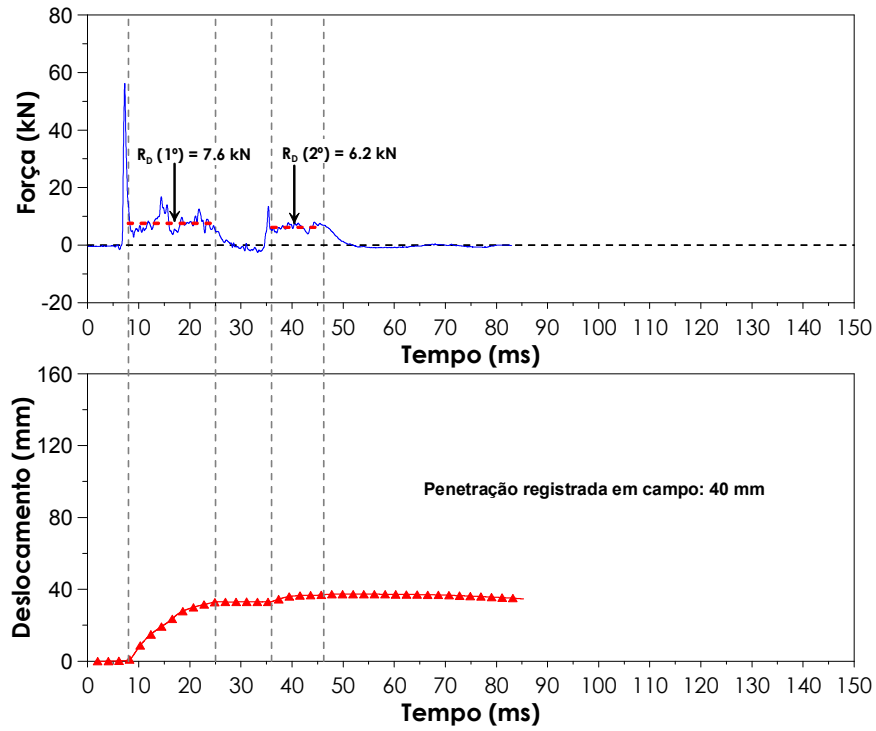
Figura 7.13 - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 9 metros - Equipamento convencional 6° golpe)



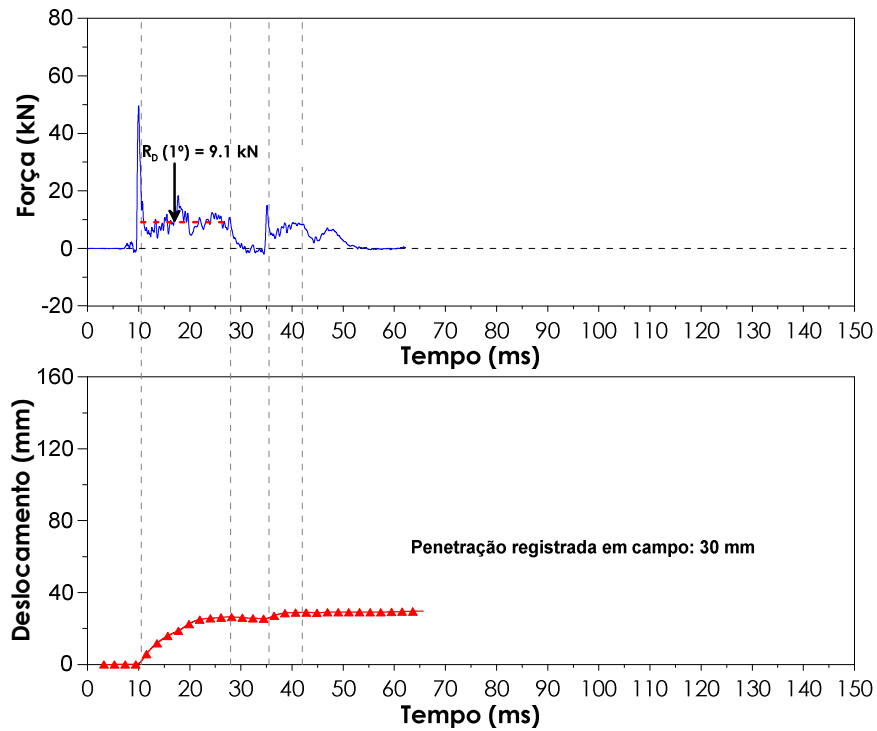
**Figura 7.14** - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 9 metros - Equipamento mecanizado - 7° golpe)



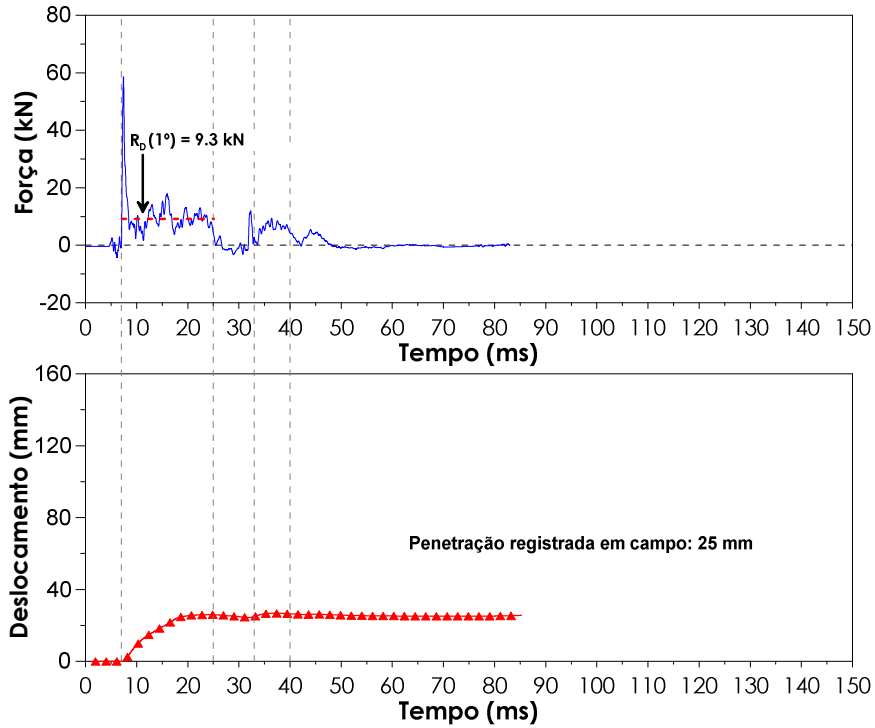
**Figura 7.15** - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 10 metros - Equipamento convencional - 10° golpe)



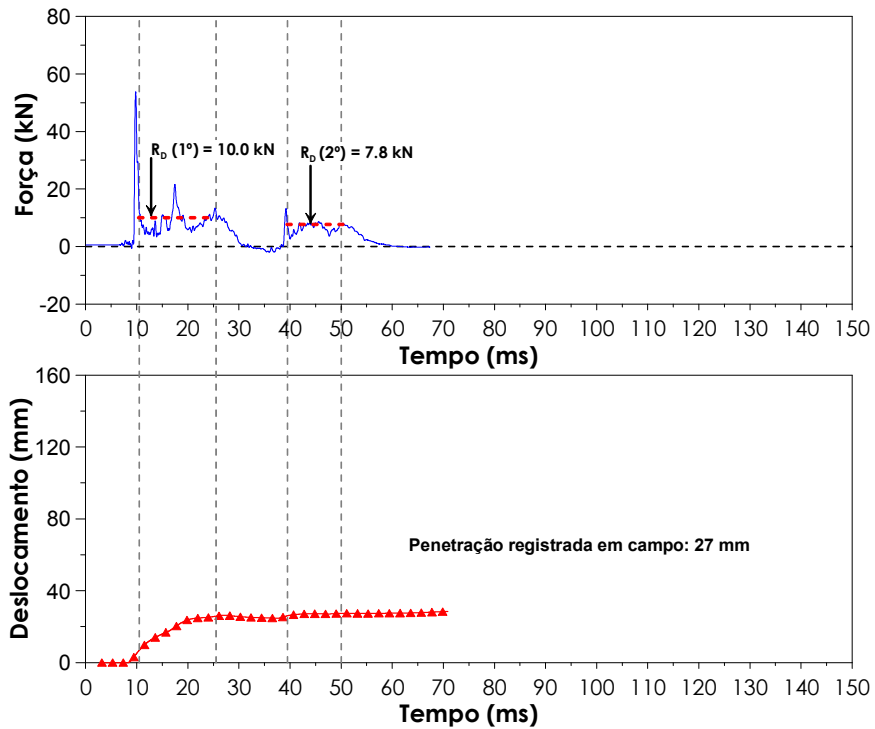
**Figura 7.16** - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 10 metros - Equipamento mecanizado - 10° golpe)



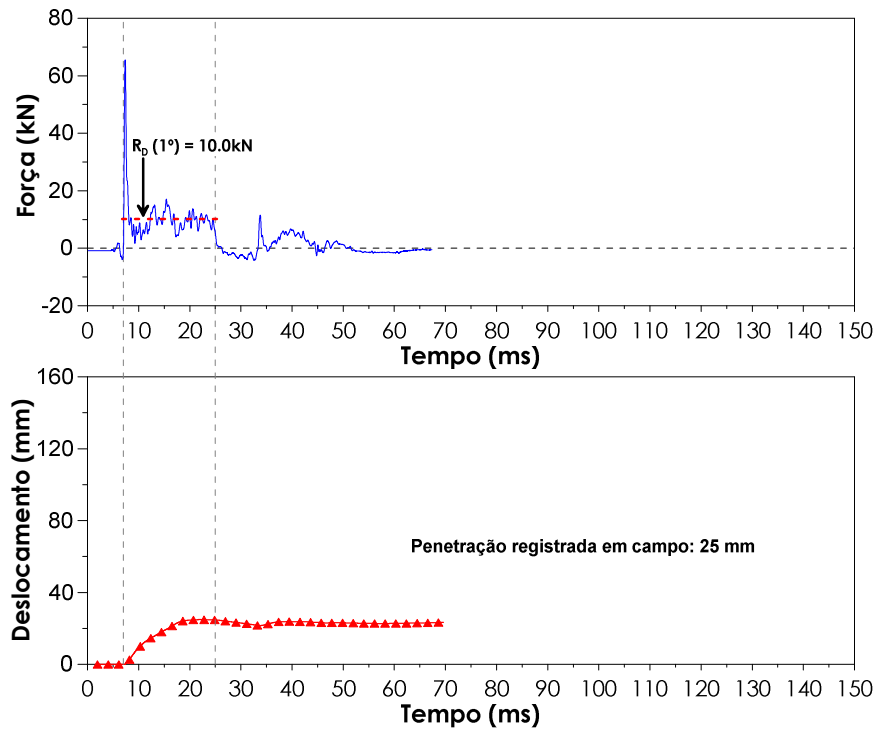
**Figura 7.17** - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 11 metros - Equipamento convencional - 12° golpe)



**Figura 7.18** - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 11 metros - Equipamento mecanizado - 11º golpe)



**Figura 7.19** - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 12 metros - Equipamento convencional 6º golpe)



**Figura 7.20** - Valores de resistência dinâmica do solo - UNESP (Profundidade: 12 metros - Equipamento mecanizado - 8° golpe)

### 7.3.2 Loteamento residencial em São Carlos (SP)

A Tabela 7.3 e a Tabela 7.4 apresentam os valores de resistência dinâmica do solo determinados através dos ensaios de campo realizados no loteamento residencial em São Carlos (SP). A resistência dinâmica foi determinada para o perfil estudado com profundidades variando entre 4 a 10 metros.

As figuras a seguir (Figura 7.21 e Figura 7.30) apresentam sinais típicos de força e deslocamento registrados utilizando o equipamento convencional e o equipamento mecanizado. Estes sinais correspondem a profundidades variando entre 4 a 10 metros.

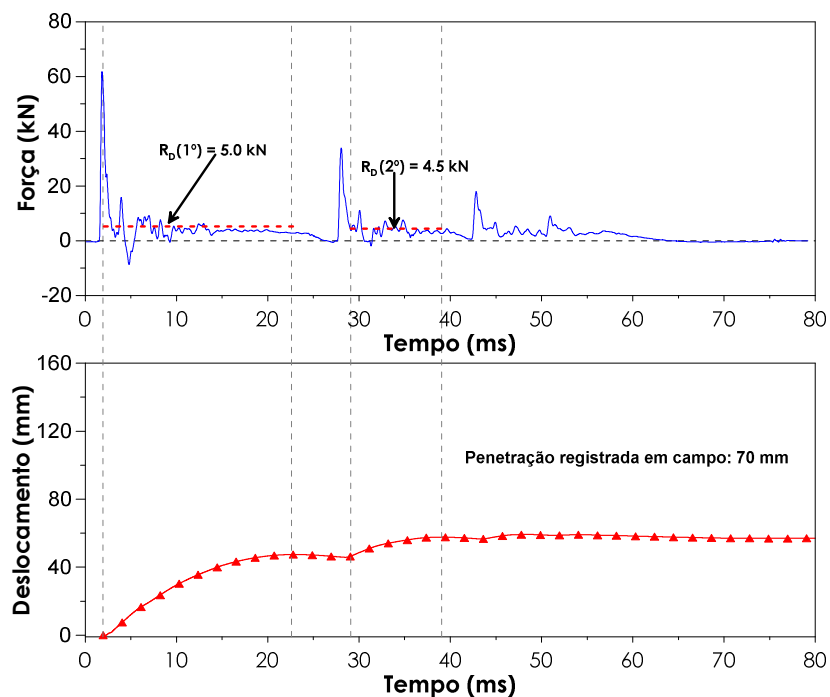
**Tabela 7.3** - Resumo dos resultados de resistência dinâmica experimental do solo, para o loteamento residencial de São Carlos (SP) (Profundidade de 4 a 8 metros)

Tipo de Equipamento		Convencional			Mecanizado		
Profundidade (m)	$L_h$ (m)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$R_D$ (kN)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$R_D$ (kN)
4.0	4.95	3	0.07	4.4	3	0.08	3.2
		4	0.07	4.8	4	0.07	3.6
		6	0.06	4.9	5	0.06	4.0
		7	0.06	6.2	6	0.06	4.7
<b><math>R_D</math> (kN)</b>		<b>5.1</b>			<b>3.9</b>		
Profundidade (m)	$L_h$ (m)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$R_D$ (kN)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$R_D$ (kN)
6.0	6.95	4	0.04	7.5	-	-	-
		6	0.03	7.9	-	-	-
		7	0.03	8.6	-	-	-
		8	0.03	9.9	-	-	-
		9	0.03	9.6	-	-	-
		10	0.02	9.2	-	-	-
		11	0.02	9.5	-	-	-
		12	0.03	9.8	-	-	-
<b><math>R_D</math> (kN)</b>		<b>9.1</b>					
Profundidade (m)	$L_h$ (m)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$R_D$ (kN)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$R_D$ (kN)
7.0	7.95	-	-	-	4	0.04	7.0
		-	-	-	5	0.04	6.5
		-	-	-	7	0.04	7.8
		-	-	-	8	0.04	7.6
		-	-	-	9	0.04	7.7
		-	-	-	11	0.03	7.9
<b><math>R_D</math> (kN)</b>					<b>7.4</b>		
Profundidade (m)	$L_h$ (m)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$R_D$ (kN)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$R_D$ (kN)
8.0	8.95	4	0.03	9.8	4	0.04	9.8
		5	0.03	9.8	6	0.03	10.6
		7	0.03	10.8	8	0.03	10.6
		8	0.03	10.9	10	0.03	11.1
		10	0.02	11.2	12	0.02	11.0
		11	0.02	11.2	13	0.02	11.2
		12	0.02	12.7	14	0.02	10.7
		14	0.02	12.9	16	0.02	10.7
<b><math>R_D</math> (kN)</b>		<b>11.5</b>			<b>10.7</b>		



**Tabela 7.4** - Resumo dos resultados de resistência dinâmica experimental do solo, para o loteamento residencial de São Carlos (SP) (Profundidade de 9 e 10 metros)

Tipo de Equipamento		Convencional			Mecanizado				
Profundidade (m)	$L_h$ (m)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$R_D$ (kN)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$R_D$ (kN)		
9.0	9.95	8	0.02	13.4	6	0.02	12.6		
		10	0.02	14.5	8	0.02	14.8		
		12	0.02	15.9	9	0.02	15.2		
		13	0.01	16.5	10	0.02	15.8		
		14	0.02	17.1	12	0.02	16.8		
		16	0.01	17.8	13	0.01	17.2		
		17	0.01	17.7	14	0.02	17.4		
		18	0.02	18.5	16	0.02	17.3		
		19	0.01	18.5	18	0.01	17.4		
		20	0.01	18.8	20	0.01	17.9		
		21	0.02	18.3	21	0.01	17.3		
		22	0.01	18.5	22	0.02	17.5		
		23	0.01	18.6	23	0.01	17.6		
		24	0.01	18.8	-	-	-	-	
<b><math>R_D</math> (kN)</b>			<b>17.4</b>		<b>16.5</b>				
10.0	10.95	4	0.03	7.9	5	0.03	8.3		
		5	0.04	8.1	7	0.03	8.5		
		6	0.03	8.4	9	0.03	8.4		
		7	0.04	7.9	10	0.03	9.4		
		8	0.02	8.1	11	0.03	9.5		
		9	0.03	7.9	13	0.03	9.9		
		10	0.03	7.9	14	0.03	9.4		
		11	0.03	8.4	-	-	-		
		12	0.03	9.0	-	-	-		
		13	0.03	9.7	-	-	-		
		<b><math>R_D</math> (kN)</b>			<b>8.3</b>		<b>9.1</b>		

**Figura 7.21** - Valores de resistência dinâmica do solo – São Carlos (Profundidade: 4 metros - Equipamento convencional - 4º golpe)

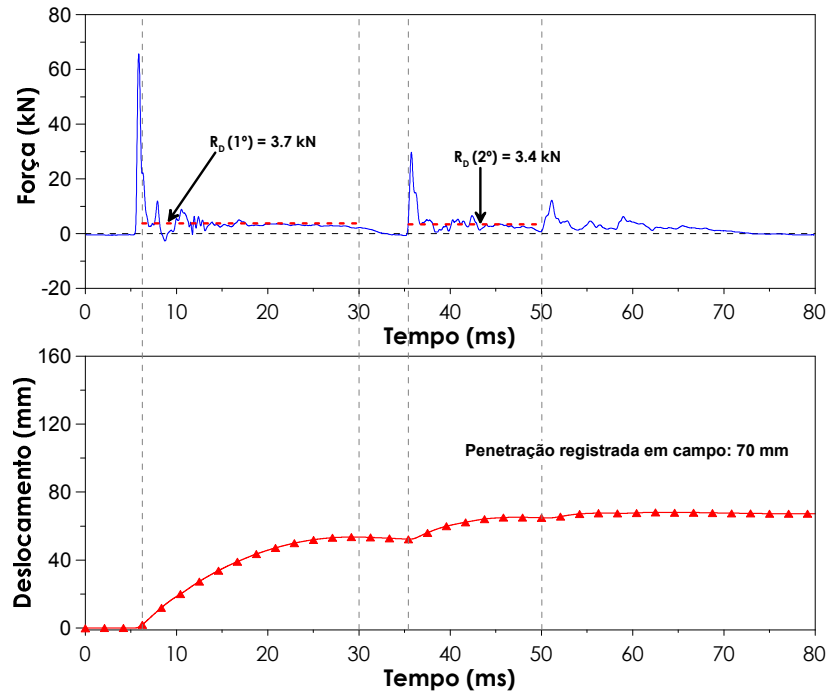


Figura 7.22 - Valores de resistência dinâmica do solo – São Carlos (Profundidade: 4 metros - Equipamento mecanizado - 4º golpe)

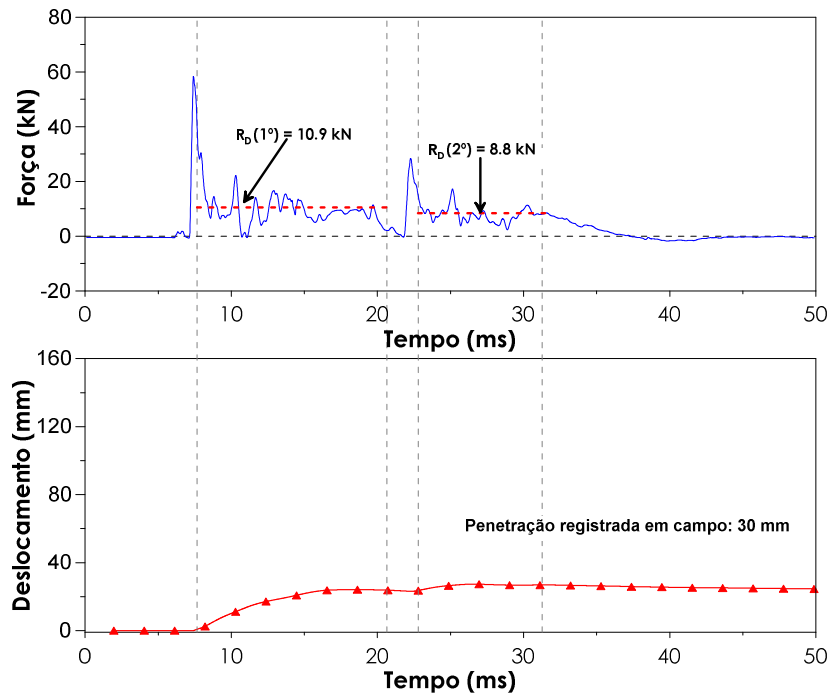
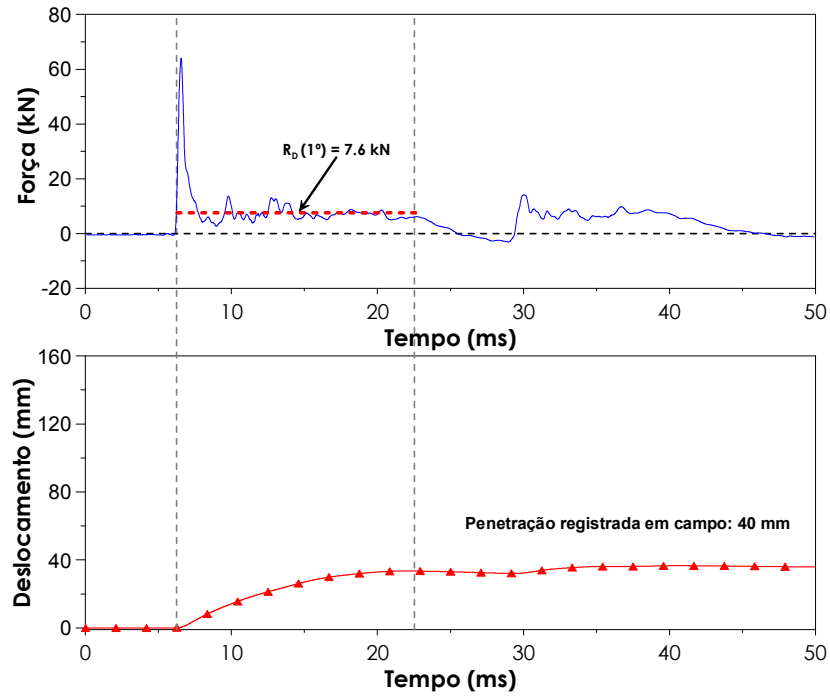
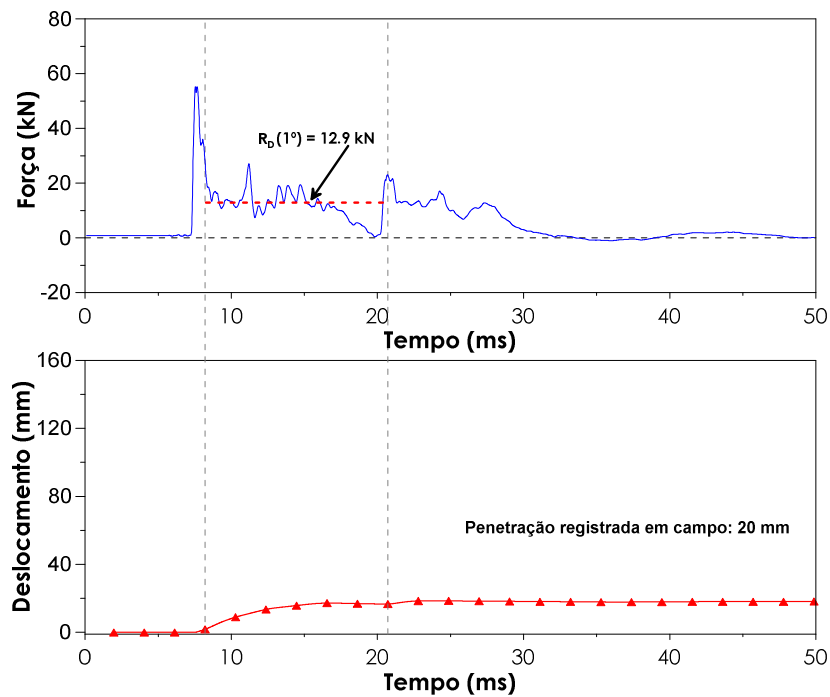


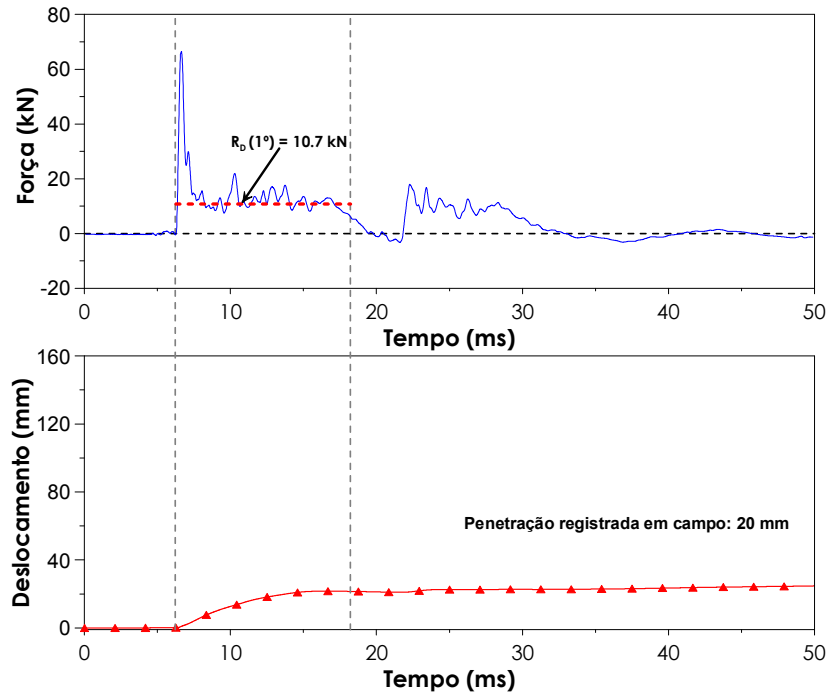
Figura 7.23 - Valores de resistência dinâmica do solo – São Carlos (Profundidade: 6 metros - Equipamento convencional - 8º golpe)



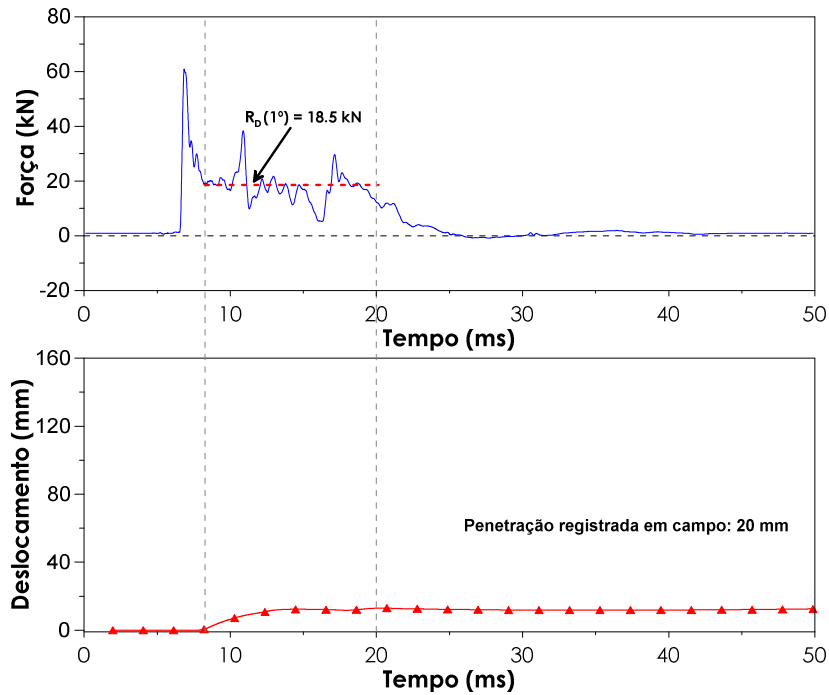
**Figura 7.24** - Valores de resistência dinâmica do solo – São Carlos (Profundidade: 7 metros – Equipamento mecanizado - 8º golpe)



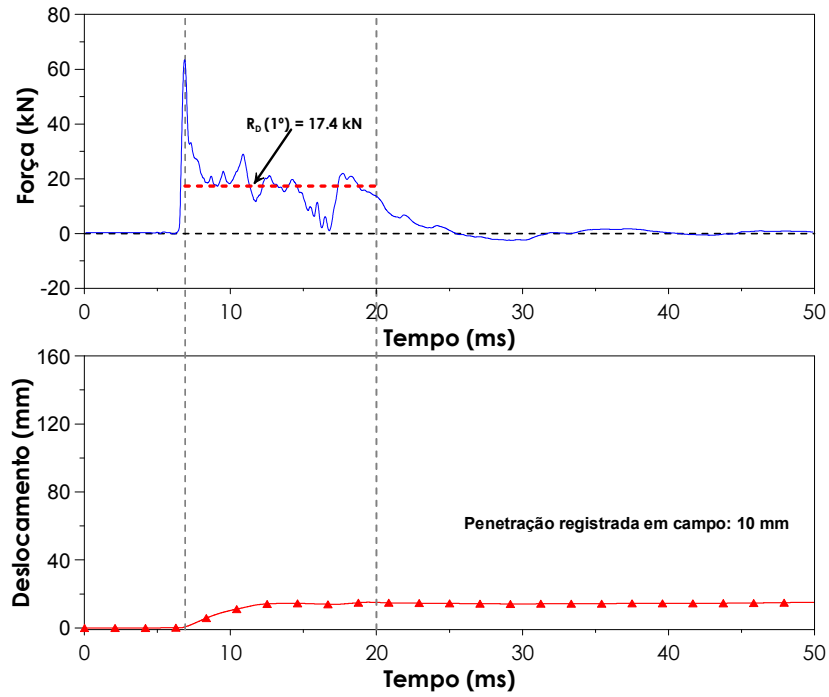
**Figura 7.25** - Valores de resistência dinâmica do solo – São Carlos (Profundidade: 8 metros – Equipamento convencional - 14º golpe)



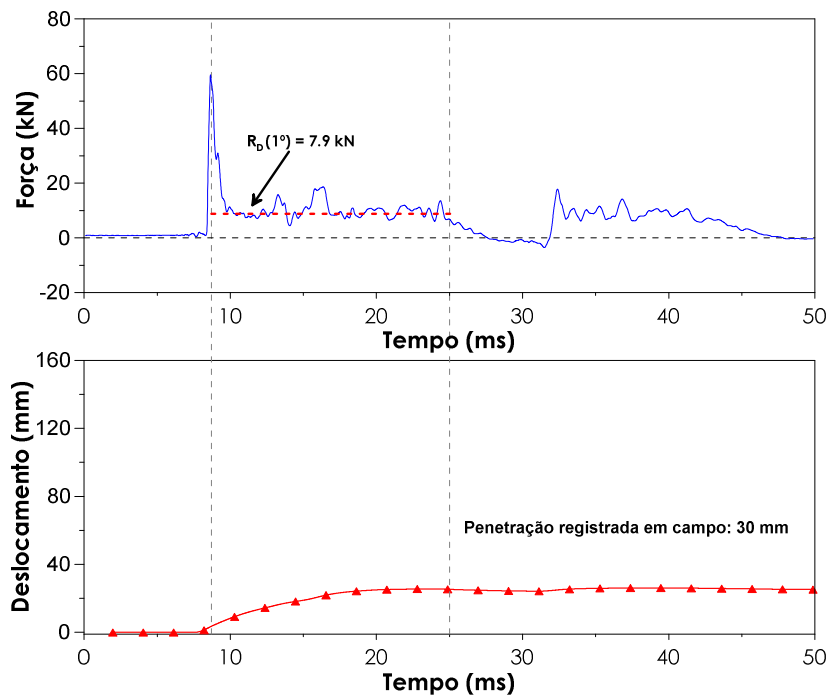
**Figura 7.26** - Valores de resistência dinâmica do solo – São Carlos (Profundidade: 8 metros - Equipamento mecanizado - 14° golpe)



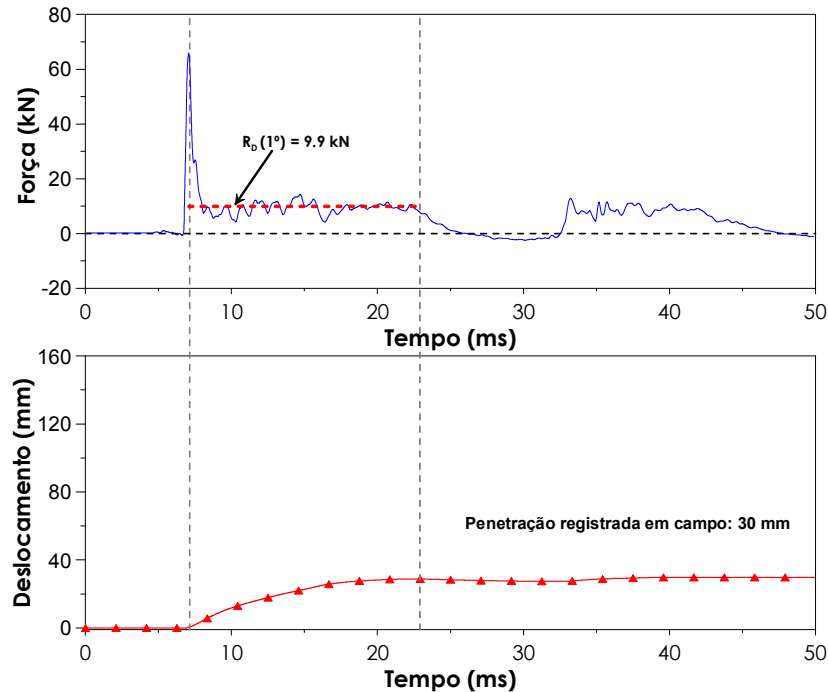
**Figura 7.27** - Valores de resistência dinâmica do solo – São Carlos (Profundidade: 9 metros - Equipamento convencional - 18° golpe)



**Figura 7.28** - Valores de resistência dinâmica do solo – São Carlos (Profundidade: 9 metros – Equipamento mecanizado - 18° golpe)



**Figura 7.29** - Valores de resistência dinâmica do solo – São Carlos (Profundidade: 10 metros – Equipamento convencional - 12° golpe)



**Figura 7.30** - Valores de resistência dinâmica do solo – São Carlos (Profundidade: 10 metros - Equipamento mecanizado - 13° golpe)

## 7.4 Valores experimentais e teóricos de resistência do sistema solo-amostrador

### 7.4.1 Método de Schmertmann (1979)

O método para o cálculo da força estática ( $F$ ) no sistema solo-amostrador, desenvolvido por Schmertmann (1979) (Equação 2.40), baseia-se no equilíbrio de forças verticais ao longo do amostrador SPT. No presente trabalho de pesquisa, a força  $W'$  foi considerada como sendo o somatório do peso submerso das hastes, do amostrador e do martelo, uma vez que após o fim do evento o martelo permanece em repouso sobre o conjunto de hastes. Inicialmente foram adotadas as constantes  $C_1$  e  $C_2$  igual a 1.0, conforme proposto por Schmertmann (1979). Os valores de  $q_c$  e  $f_s$  foram obtidos através dos resultados dos ensaios CPTu realizados no Campo Experimental da Unesp, conforme apresentado no item 5.3.

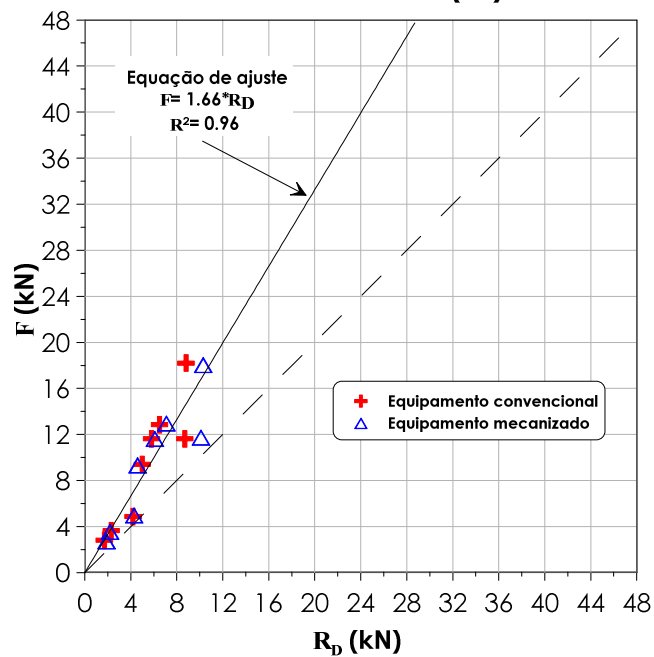
A Tabela 7.5 e a Tabela 7.6 apresentam um resumo dos resultados utilizados para o cálculo da força estática ( $F$ ) ao longo do perfil estudado. Os valores teóricos das forças estáticas apresentaram-se superiores aos valores experimentais de resistência dinâmica, observando-se que esta diferença é mais pronunciada para os ensaios realizados em São Carlos, onde os valores do índice  $N_{SPT}$  e do atrito lateral ( $f_s$ ) são superiores (Figura 7.31 e Figura 7.32).

**Tabela 7.5** – Valores de força estática ( $F$ ) calculados através da proposta de Schmertmann (1979) (Campo experimental da UNESP – Bauru)

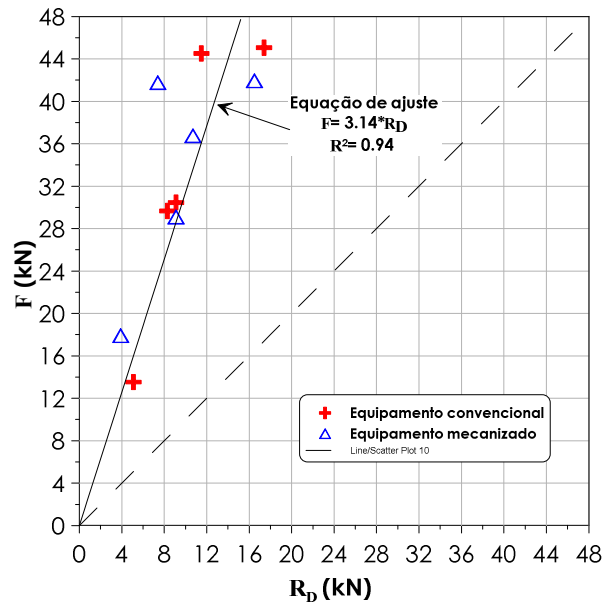
Campo Experimental UNESP (Bauru – SP)											
Equipamento Convencional						Equipamento Mecanizado					
Prof. (m)	$q_c$ (KPa)	$f_s$ (kPa)	$W'$ (kN)	$L$ (m)	$F$ (kN)	Prof. (m)	$q_c$ (KPa)	$f_s$ (kPa)	$W'$ (kN)	$L$ (m)	$F$ (kN)
2.0	2709	5	0.80	0.53	2.8	2.0	2709	5	0.80	0.46	2.7
4.0	3252	7	0.87	0.53	3.7	4.0	3252	7	0.87	0.48	3.6
6.0	2814	22	0.93	0.47	4.9	6.0	2814	22	0.93	0.49	5.0
7.9	6185	28	0.99	0.51	9.4	7.9	6185	28	0.99	0.50	9.3
9.0	6901	40	1.03	0.49	11.6	9.0	6901	40	1.03	0.49	11.6
10.0	7781	43	1.06	0.48	12.9	10.0	7781	43	1.06	0.46	13.0
11.0	7230	41	1.09	0.45	11.6	11.0	7230	41	1.09	0.46	11.7
12.0	10384	64	1.12	0.48	18.2	12.0	10384	64	1.12	0.47	18.0

**Tabela 7.6** – Valores de força estática ( $F$ ) calculados através da proposta de Schmertmann (1979) (Loteamento residencial – São Carlos)

Loteamento residencial (São Carlos – SP)											
Equipamento Convencional						Equipamento Mecanizado					
Prof. (m)	$q_c$ (KPa)	$f_s$ (kPa)	$W'$ (kN)	$L$ (m)	$F$ (kN)	$q_c$ (KPa)	$f_s$ (kPa)	$W'$ (kN)	$L$ (m)	$F$ (kN)	$F$ (kN)
4.0	1687	96	0.87	0.49	13.5	4.0	2875	127	0.87	0.46	17.9
6.0	2797	229	0.93	0.46	30.5	7.0	3684	313	0.96	0.46	41.8
8.0	3741	335	0.99	0.46	44.5	8.0	3976	276	0.99	0.45	36.8
9.0	4006	344	1.03	0.45	45.1	9.0	5503	305	1.03	0.45	42.0
10.0	3922	204	1.06	0.48	29.6	10.0	3922	204	1.06	0.47	29.1



**Figura 7.31** - Comparação entre os valores teóricos de força estática ( $F$ ) e experimentais de resistência dinâmica ( $R_D$ ) (Campo Experimental de Unesp – Bauru)



**Figura 7.32** - Comparação entre os valores teóricos de força estática ( $F$ ) e experimentais de resistência dinâmica ( $R_D$ ) (Loteamento residencial – São Carlos)

O método desenvolvido por Schmertmann (1979) considera que não ocorre o embuchamento do solo durante a penetração do amostrador. Por isso, a sua utilização deverá ser realizada apenas quando for verificada esta condição (SOUZA, 2009). Nos ensaios cujos resultados foram utilizados para estas análises constatou-se a não ocorrência de embuchamento em cerca de 90% dos casos (Figura 7.33), validando a utilização desta metodologia no perfil de solo estudado.



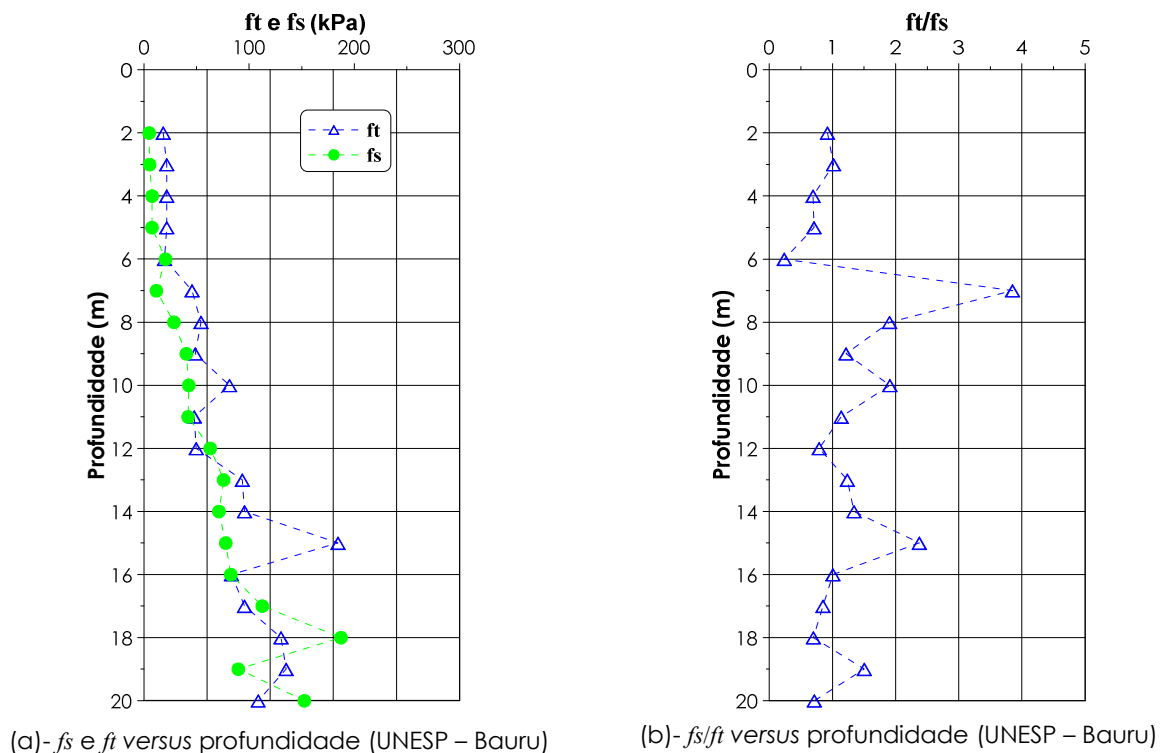
(a)- Campo experimental da UNESP (Bauru-SP)

(b)- Loteamento residencial (São Carlos – SP)

**Figura 7.33** – Controle do comprimento da amostra do ensaio SPT indicando a condição de não embuchamento.



As constantes  $C_1$  e  $C_2$  influenciam diretamente nos valores de força estática, calculados através da Equação 2.40. Por isso é fundamental a calibração destas constantes para o solo estudado. O valor de  $C_2$  é determinado a partir da comparação entre as tensões, devido ao atrito lateral, que ocorrem no ensaio SPT e no ensaio CPTu. Assim, o valor desta constante foi avaliado através da comparação entre o atrito medido no ensaio CPTu ( $f_s$ ) e o atrito lateral ( $f_t$ ), determinado através da medida de torque no ensaio SPT (Figura 7.34a). Essas medidas podem ser consideradas estáticas, embora o torque seja medido após um carregamento dinâmico (PEIXOTO, 2001).



**Figura 7.34** – Comparação entre os valores de  $f_s$  do ensaio CPTu e  $f_t$  do ensaio SPT.

A relação entre os valores de  $f_s$  e  $f_t$  indicou que a variabilidade ao longo do perfil é bastante acentuada, sendo que o coeficiente de variação obtido foi de aproximadamente 64% (Figura 7.34b). Esses resultados indicam a dificuldade de ser estabelecida uma relação constante entre os valores de tensões laterais desenvolvidas durante o ensaio CPTu e o ensaio SPT. Peixoto (2001) observou que para o solo típico da região de Bauru os valores de  $f_s$  e  $f_t$  apresentam-se bastante dispersos, não sendo possível definir um padrão de comportamento para esta camada de solo arenoso. Este comportamento é similar aos resultados obtidos neste trabalho de pesquisa, destacando-se que de uma maneira geral os valores de  $f_s$  são predominantemente superiores aos valores de  $f_t$  (Figura 7.34a).

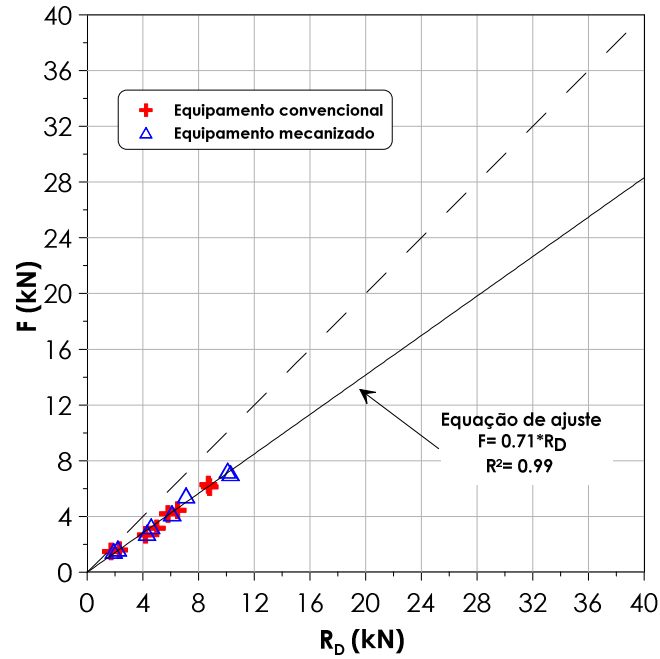
Os resultados apresentados permitem constatar que o emprego do método proposto por Schmertmann (1979), para os solos típicos do interior de São Paulo, não foi adequado. Esse método necessita de um estudo mais aprofundado em relação à determinação das constantes de comparação entre os ensaios SPT e CPTu. Isso porque os solos típicos dessa região apresentam um comportamento diferenciado sendo caracterizados como solos porosos, colapsíveis e em alguns casos não saturado.

Adicionalmente, utilizou-se a equação proposta por Schmertmann (1979) que considera a parcela de energia que atinge o amostrador (Equação 2.47) para a determinação da força estática do ensaio SPT (Tabela 7.7). De maneira geral, os valores de força estática apresentaram-se bastante inferiores aos valores de resistência dinâmica (Figura 7.35 e Figura 7.36), observando-se diferenças próximas a 50%. Entretanto, para os solos típicos ensaiados, relatos de outros trabalhos de pesquisa indicam que os valores de força estática e dinâmica podem ser considerados iguais, ou seja, os efeitos da viscosidade podem ser desprezados para o caso de areias (AOKI, et al., 2004). A explicação para este fato é que os efeitos de amolgamento e acúmulo de poro-pressão reduzem a resistência de materiais colapsíveis (BERNARDES, 1989).

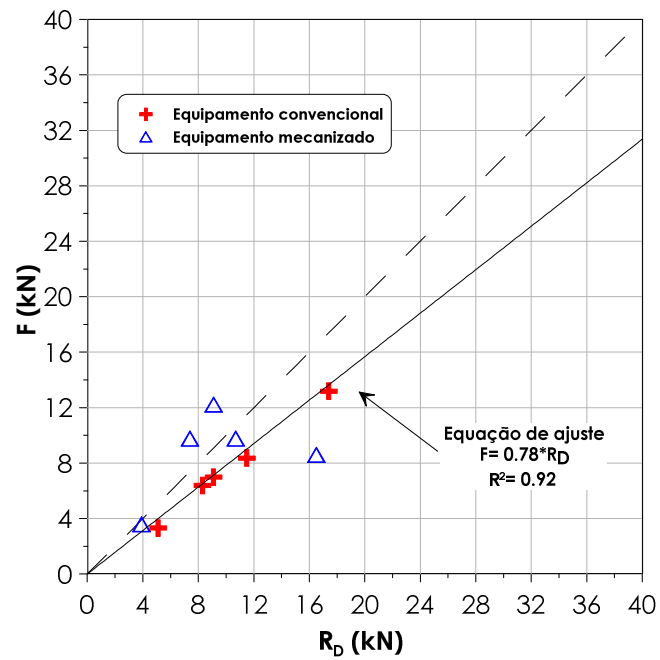
Desta forma, para os solos típicos do interior de São Paulo, constata-se a dificuldade de aplicação da proposta de Schmertmann (1979) utilizando os coeficientes originais ( $\beta$  e  $\alpha$ ) sugeridos por esse autor. Resultados do presente trabalho indicam que para esses materiais tais coeficientes deveriam ser modificados com base na determinação da quantidade de energia que atinge o amostrador e considerando que as parcelas de força estática e dinâmica são equivalentes entre si.

**Tabela 7.7** – Valores de força estática ( $F$ ) calculados através da proposta de Schmertmann (1979)

Campo Experimental UNESP (Bauru – SP)						Loteamento residencial (São Carlos – SP)					
Ensaio Convencional			Ensaio Mecanizado			Ensaio Convencional			Ensaio Mecanizado		
Prof. (m)	F (kN)	R <sub>D</sub> (kN)	Prof. (m)	F (kN)	R <sub>D</sub> (kN)	Prof. (m)	F (kN)	R <sub>D</sub> (kN)	Prof. (m)	F (kN)	R <sub>D</sub> (kN)
2.0	1.5	1.7	2.0	1.5	1.9	-	-	-	-	-	-
4.0	1.6	2.3	4.0	1.7	2.2	4.0	3.3	5.1	4.0	3.6	3.9
6.0	2.7	4.2	6.0	2.8	4.3	6.0	7.0	9.1	-	-	-
7.9	3.2	5.0	7.9	3.3	4.6	-	-	-	7.0	9.8	7.4
9.0	4.2	5.8	9.0	4.2	6.1	8.0	8.4	11.5	8.0	9.8	10.7
10.0	4.5	6.5	10.0	5.5	7.1	9.0	13.2	17.4	9.0	8.6	16.5
11.0	6.3	8.7	11.0	7.3	10.1	10.0	6.4	8.3	10.0	12.2	9.1
12.0	6.1	8.8	12.0	7.1	10.3	-	-	-	-	-	-



**Figura 7.35** - Comparação entre os valores teóricos de força estática ( $F$ ) e experimentais de resistência dinâmica ( $R_D$ ) mobilizados no sistema solo-amostrador (Campo Experimental da Unesp – Bauru).



**Figura 7.36** - Comparação entre os valores teóricos de força estática ( $F$ ) e experimentais de resistência dinâmica ( $R_D$ ) mobilizados no sistema solo-amostrador (Loteamento residencial em São Carlos).

#### 7.4.2 Método de Aoki et al., (2007)

Aoki et al., (2007) estudaram a resistência estática no ensaio SPT ( $R_s$ ) (Equação 2.55) baseando-se no Princípio de Conservação de Energia (Princípio de Hamilton) e considerando que o valor da eficiência do ensaio SPT deve ser determinado no topo do

amostrador. Ensaio de campo realizados neste trabalho de pesquisa indicaram valores médios de eficiência no topo do amostrador ( $\eta$ ) de 57%, sem grandes variações com o aumento do comprimento de hastes ou a utilização de equipamentos distintos.

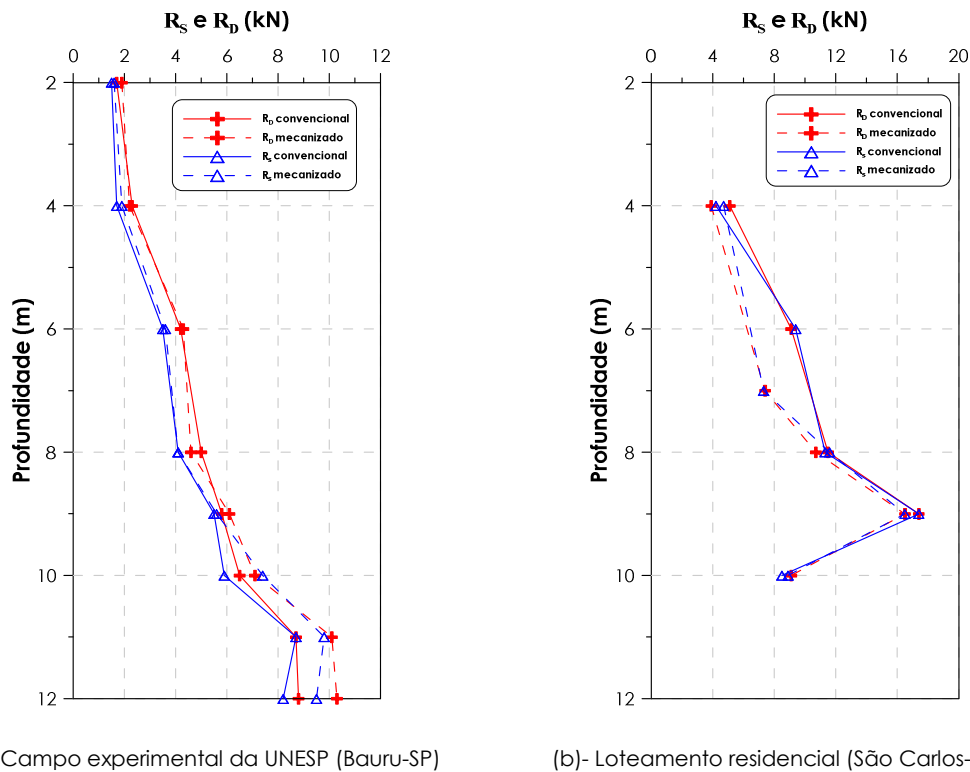
A Tabela 7.8 apresenta um resumo dos resultados de resistência estática teórica ao longo dos perfis estudados. Esses valores teóricos foram comparados com os valores experimentais de resistência dinâmica (Figura 7.37) tendo sido observado que os valores experimentais são ligeiramente superiores aos valores teóricos. Este comportamento já foi relatado por Bernardes (1989), sugerindo que para areias siltosas a resistência dinâmica apresenta-se entre 5 a 15% superior ao valor da resistência estática. Em materiais com predominância de partículas finas (siltes e argilas), esta faixa de variação é de 15 a 110%. No caso deste trabalho de pesquisa, os ensaios foram realizados em camadas de areia pouco argilosa, tendo sido observado que para baixas profundidades e baixos valores de índice  $N_{SPT}$ , a resistência dinâmica é até 35% maior que o valor da resistência estática. No entanto para camadas com índice  $N_{SPT}$  superiores a 5 esses valores foram bastante similares.

**Tabela 7.8** – Valores de resistência estática ( $R_s$ ) calculados através da proposta de Aoki et al., (2007)

Prof. (m)	$\eta$ (%)	Campo experimental da UNESP (Bauru – SP)				Prof. (m)	$\eta$ (%)	Loteamento residencial (São Carlos – SP)			
		Convencional		Mecanizado				Convencional		Mecanizado	
		$N_{SPT}$	$R_s$ (kN)	$N_{SPT}$	$R_s$ (kN)			$N_{SPT}$	$R_s$ (kN)	$N_{SPT}$	$R_s$ (kN)
2.0	57	1.6	1.5	1.8	1.6	-	-	-	-	-	-
4.0	57	1.9	1.7	2.1	1.9	4.0	57	4.6	4.2	5.2	4.7
6.0	57	3.8	3.5	4.0	3.6	6.0	57	10.3	9.4	-	-
8.0	57	4.5	4.1	4.5	4.1	7.0	57	-	-	8.0	7.3
9.0	57	6.1	5.5	6.2	5.6	8.0	57	12.4	11.3	12.8	11.6
10.0	57	6.5	5.9	8.1	7.4	9.0	57	19.2	17.4	18.2	16.5
11.0	57	9.6	8.7	10.8	9.8	10.0	57	9.4	8.5	9.8	8.9
12.0	57	9.0	8.2	10.5	9.5	-	-	-	-	-	-

A proposta de Aoki et al., (2007) considera que a resistência total, oferecida pelo sistema amostrador-solo durante o evento dinâmico, é igual a resistência estática ( $R_D=R_S$ ), pois essas forças resistentes são forças não conservativas. Sabe-se que a resistência dinâmica depende da viscosidade e da inércia. O efeito de viscosidade depende do teor de umidade do solo, ou seja, quanto maior o teor de umidade maior é a influência desta parcela na resistência dinâmica. Além disso a radiação de energia também exerce uma influência na parcela de resistência dinâmica. No caso dos perfis estudados, as camadas de solos encontravam-se acima do nível d'água e conseqüentemente na condição não saturada. Assim, a

simplificação proposta por Aoki et al., (2007), referente à condição de igualdade entre as resistências dinâmica e estática, é perfeitamente aplicável aos casos estudados no presente trabalho.



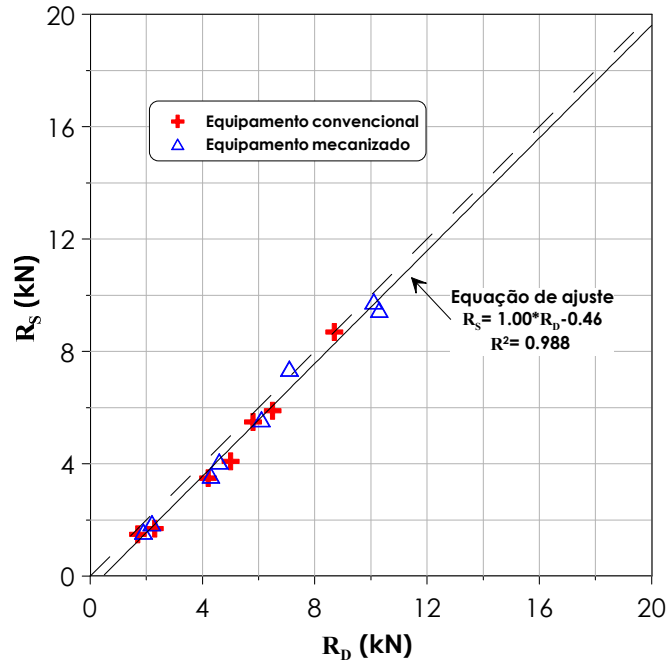
**Figura 7.37** – Comparação entre os valores de  $R_d$  e  $R_s$  para os ensaios realizados na cidade de São Carlos (SP) e Bauru(SP).

A comparação entre os valores experimentais de resistência dinâmica e teóricos de resistência estática (Figura 7.38 e Figura 7.39) indicaram que os resultados dos ensaios realizados na cidade de São Carlos apresentaram-se mais próximos dos valores teóricos de resistência estática do que os resultados dos ensaios realizados na cidade de Bauru. Desta forma, os resultados do Campo Experimental da Unesp de Bauru foram ajustados através da introdução de uma constante, denominada  $C_{CE}$  (constante de correção de energia), na expressão proposta por Aoki et al., (2007) (Equação 7.3).

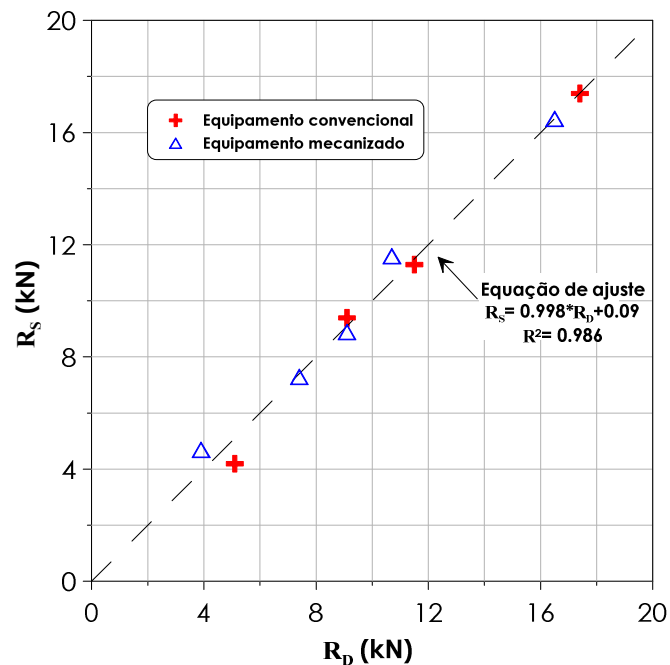
$$R_S = \left( \frac{0.478 \times \eta \times N_{SPT}}{0.30} \right) + C_{CE} \text{ (kN)} \quad (7.3)$$

O valor da constante  $C_{CE}$  determinada para os ensaios de Bauru foi de 0.46 (Figura 7.40) e para os ensaios de São Carlos foi considerada desprezível (Figura 7.39). Essa constante tem como finalidade corrigir a energia potencial gravitacional do sistema, uma vez que na expressão proposta por Aoki et al., (2007) é utilizada a energia potencial gravitacional teórica ( $\approx 478.24$  Joules). Assim, como os valores dos índices  $N_{SPT}$  para São Carlos são mais

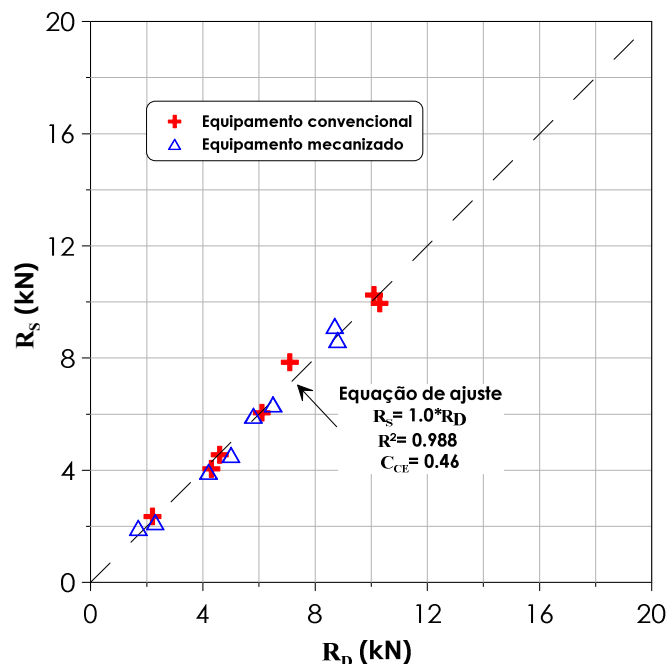
elevados, os acréscimos da energia potencial, devido à penetração permanente do amostrador, são menores.



**Figura 7.38** – Comparação entre os valores teóricos de resistência estática e os valores experimentais de resistência dinâmica (Campo Experimental da Unesp de Bauru).



**Figura 7.39** – Comparação entre os valores teóricos de resistência estática e os valores experimentais de resistência dinâmica (Loteamento residencial em São Carlos).



**Figura 7.40** – Ajuste dos valores teóricos de resistência estática utilizando a constante  $C_{CE}$  (Campo experimental da UNESP).

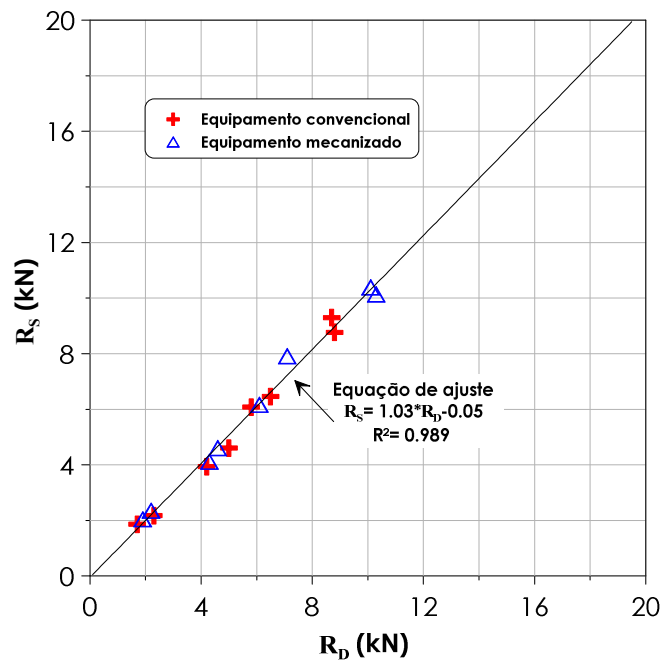
Utilizando o valor da constante  $C_{CE}$ , obtido através do ajuste das retas, foi calculado o valor correspondente ao acréscimo da energia potencial gravitacional teórica ( $\Delta E$ ) e o valor da energia potencial total do sistema ( $E_T$ ) (Tabela 7.9). Esses valores foram então comparados com os valores da energia potencial imposta durante o evento ( $EP_{sistema}$ ), de acordo com a proposta de Odebrecht (2003) (Equação 2.3). Observou-se que a diferença entre os valores é de no máximo 5%, sendo que na maioria dos casos esta diferença não ultrapassou 2% (Tabela 7.9).

Os resultados apresentados mostram que a equação de correção da energia total imposta ao sistema, proposta por Odebrecht (2003), é adequada para o cálculo da energia potencial gravitacional utilizada na equação de Aoki et al., (2007), conforme mostrado na Figura 7.41. Esta correção deve ser utilizada preferencialmente quando os valores dos índices  $N_{SPT}$  forem muito baixos. No caso específico dos ensaios realizados em São Carlos, onde os índices  $N_{SPT}$  variaram entre 4 e 19, não foi constatada a necessidade de corrigir o valor da energia potencial gravitacional.

**Tabela 7.9** – Comparação entre os valores de energia potencial do sistema determinados através da constante  $C_{CE}$  e da expressão proposta por Odebrecht (2003).

Campo Experimental da UNESP (Bauru/SP)					
Equipamento Convencional					
Prof (m)	N <sub>SPT</sub>	$\Delta E$ (J)	$E_T$ (J)	$EP_{sistema}$ (J)	$EP_{sistema} / E_T$
2.0	1.6	166.7	644.9	615.7	0.95
4.0	1.9	120.3	598.5	603.8	1.00
6.0	3.8	70.5	548.7	545.9	0.99
8.0	4.5	55.3	533.5	539.7	1.01
9.0	6.1	36.2	514.4	525.1	1.02
10.0	6.5	37.0	515.2	523.7	1.02
11.0	9.6	24.2	502.4	510.1	1.02
12.0	9.0	28.4	506.6	513.1	1.01
Equipamento Mecanizado					
Prof (m)	N <sub>SPT</sub>	$\Delta E$ (J)	$E_T$ (J)	$EP_{sistema}$ (J)	$EP_{sistema} / E_T$
2.0	1.8	124.3	602.5	600.3	1.00
4.0	2.1	113.5	591.7	591.9	1.00
6.0	4.0	56.2	534.4	542.6	1.02
8.0	4.5	55.3	533.5	540.0	1.01
9.0	6.2	36.4	514.6	524.0	1.02
10.0	8.1	32.7	510.9	514.7	1.02
11.0	10.8	22.0	500.2	506.7	1.01
12.0	10.5	21.2	499.4	508.6	1.02

**Nota:**  $\Delta E$  = acréscimo da energia potencial gravitacional teórica,  $E$  = soma da energia potencial gravitacional teórica com o acréscimo de energia e  $EP_{sistema}$  = energia potencial do sistema (Equação 2.3).



**Figura 7.41** – Ajuste dos valores teóricos de resistência estática utilizando a correção da energia imposta ao sistema (ODEBRECHT, 2003).



De uma maneira geral, independente da correção da energia imposta ao sistema, o método apresentado por Aoki et al., (2007) é bastante adequado para a determinação da resistência estática no sistema solo-amostrador. O método é simples e fácil de ser incorporado na prática de projetos de fundações, uma vez que depende apenas do valor do índice  $N_{SPT}$  e da energia determinada no topo do amostrador SPT. Entretanto, é de fundamental importância utilizar um valor correto de eficiência no topo do amostrador e um índice  $N_{SPT}$  determinado através de ensaios criteriosamente executados (BELINCANTA et al., 2010).

#### **7.4.3 Método de Schnaid et al., (2009)**

Os valores de resistência dinâmica teórica do solo também foram estimados utilizando a equação de força dinâmica do solo ( $F_d$ ) (Equação 2.33), proposta por Schnaid et al., (2009). Inicialmente, foram adotados para os coeficientes  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  e  $\eta_3$  os valores 0.764, 1 e  $(1-0.0042\ell)$ , respectivamente, onde  $\ell$  é o comprimento da composição de hastes (Odebrecht et al., 2004). Os resultados dos valores teóricos de resistência dinâmica do solo, para os locais onde foram realizados os ensaios são apresentados nas tabelas a seguir (Tabela 7.10 a Tabela 7.13).

Os valores teóricos de resistência dinâmica do solo são inversamente proporcionais à penetração permanente do amostrador no solo. Se o trabalho realizado para a penetração do amostrador for o mesmo para dois solos com valores de resistência diferentes, então quanto menor for o deslocamento maior deverá ser a força necessária para a penetração. A equação utilizada para o cálculo de  $F_d$  se mostrou bastante sensível à variação da força para pequenos valores de deslocamento. Os resultados experimentais apresentaram essa mesma tendência, ou seja, de uma maneira geral, a força dinâmica aumentou com a diminuição da penetração total do amostrador no solo. Esta mesma tendência foi observada, para a resistência estática do solo, em trabalhos experimentais de Schmertmann (1979).

**Tabela 7.10** - Resumo dos resultados de resistência dinâmica teórica do solo, para o campo experimental da UNESP (Profundidade de 2 a 9 metros)

Tipo de Equipamento		Convencional			Mecanizado		
Profundidade (m)	$L_h$ (m)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$F_d$ (kN)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$F_d$ (kN)
2.0	2.95	2	0.190	2.5	2	0.180	2.6
		3	0.175	2.6	3	0.160	2.8
$F_d$ (kN)				<b>2.6</b>	<b>2.7</b>		
Profundidade (m)	$L_h$ (m)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$F_d$ (kN)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$F_d$ (kN)
4.0	4.95	2	0.180	2.6	3	0.115	3.7
		3	0.140	3.2	4	0.170	2.7
$F_d$ (kN)				<b>2.9</b>	<b>3.2</b>		
Profundidade (m)	$L_h$ (m)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$F_d$ (kN)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$F_d$ (kN)
6.0	6.95	3	0.087	4.8	3	0.080	5.1
		4	0.070	5.8	4	0.080	5.1
		5	0.080	5.1	5	0.070	5.8
		6	0.082	5.0	6	0.070	5.8
$F_d$ (kN)				<b>5.2</b>	<b>5.5</b>		
Profundidade (m)	$L_h$ (m)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$F_d$ (kN)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$F_d$ (kN)
8.0	8.95	5	0.058	6.8	4	0.060	6.6
		6	0.065	6.2	5	0.080	5.1
		7	0.080	5.1	6	0.060	6.6
		8	0.060	6.6	7	0.060	6.6
		9	0.070	5.8	8	0.070	5.8
$F_d$ (kN)				<b>6.1</b>	<b>6.1</b>		
Profundidade (m)	$L_h$ (m)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$F_d$ (kN)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$F_d$ (kN)
9.0	9.95	4	0.060	6.6	4	0.045	8.5
		5	0.052	7.5	5	0.045	8.5
		6	0.054	7.3	6	0.055	7.1
		7	0.041	9.3	7	0.045	8.5
		8	0.043	8.9	8	0.050	7.8
$F_d$ (kN)				<b>8.0</b>	<b>8.0</b>		

Ao contrário do que foi observado para os valores de resistência estática ( $R_s$ ), apresentados no item 7.4.2, os valores teóricos de resistência dinâmica ( $F_d$ ) apresentaram-se superiores aos valores experimentais (Figura 7.42). Esses resultados indicam que a Equação 2.33 proposta por Schnaid et al., (2009) superestima o valor da força dinâmica de reação do solo. Essa equação foi desenvolvida com base na quantidade de energia que efetivamente atinge o amostrador. Visando obter essa energia, foram adotados os coeficientes  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  e  $\eta_3$  a fim de quantificar as perdas que ocorrem ao longo do sistema solo-amostrador. Odebrecht et al., (2004) recomendam que os valores adotados para os coeficientes  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  e  $\eta_3$  devam ser calibrados a fim de representar adequadamente as condições regionais. Assim, através dos resultados obtidos foram realizadas análises para

possibilitar a aplicação da Equação 2.33 no cálculo da força dinâmica de reação do solo, para os locais onde foram realizados os ensaios SPT.

**Tabela 7.11** - Resumo dos resultados de resistência dinâmica teórica do solo, para o campo experimental da UNESP (Profundidade de 10 a 12 metros)

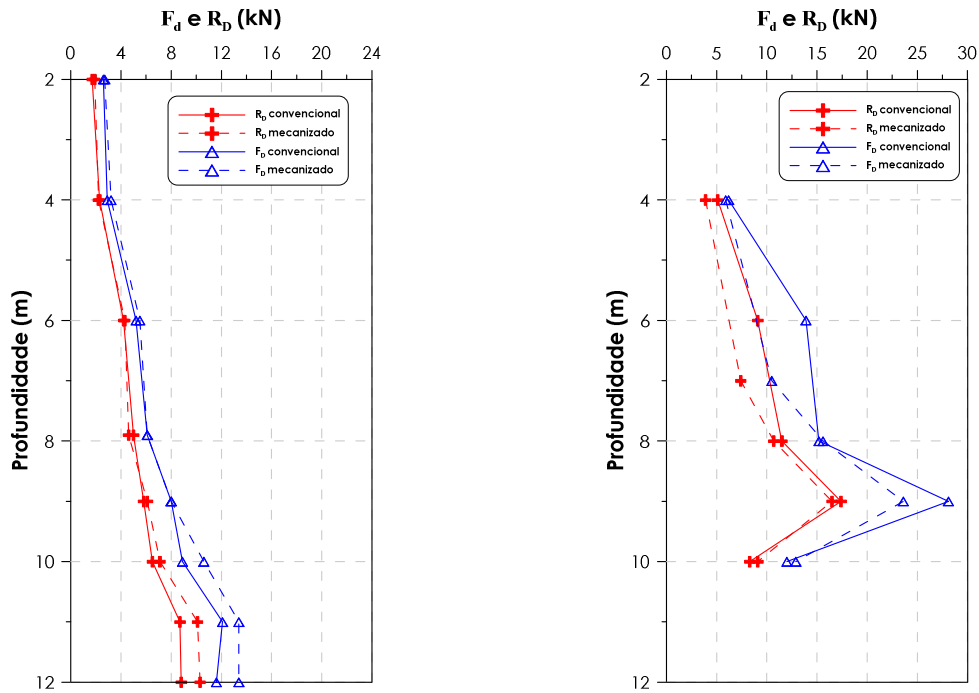
Tipo de Equipamento		Convencional			Mecanizado		
Profundidade (m)	$L_h$ (m)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$F_d$ (kN)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$F_d$ (kN)
10.0	10.95	6	0.035	10.8	5	0.040	9.5
		8	0.040	9.5	6	0.040	9.5
		9	0.060	6.6	7	0.030	12.4
		10	0.045	8.5	8	0.040	9.5
		-	-	-	9	0.035	10.8
		-	-	-	10	0.040	9.5
		-	-	-	11	0.025	14.7
		-	-	-	12	0.045	8.5
<b><math>F_d</math> (kN)</b>				<b>8.9</b>	<b>10.6</b>		
Profundidade (m)	$L_h$ (m)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$F_d$ (kN)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$F_d$ (kN)
11.0	11.95	6	0.030	12.4	6	0.025	14.7
		7	0.030	12.4	7	0.030	12.4
		8	0.035	10.7	8	0.025	14.7
		10	0.030	12.4	9	0.025	14.7
		11	0.030	12.4	10	0.030	12.4
		12	0.030	12.4	11	0.025	14.7
		13	0.030	12.4	12	0.030	12.4
		14	0.033	11.3	13	0.030	12.4
		-	-	-	14	0.027	13.7
		-	-	-	15	0.028	13.2
-	-	-	16	0.030	12.4		
<b><math>F_d</math> (kN)</b>				<b>12.1</b>	<b>13.4</b>		
Profundidade (m)	$L_h$ (m)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$F_d$ (kN)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$F_d$ (kN)
12.0	12.95	6	0.027	13.6	6	0.030	12.4
		8	0.038	9.9	7	0.025	14.7
		9	0.027	13.7	8	0.025	14.7
		10	0.035	10.7	9	0.033	11.3
		11	0.030	12.4	10	0.025	14.7
		12	0.035	10.7	11	0.027	13.6
		13	0.037	10.2	12	0.030	12.4
		14	0.033	11.3	13	0.025	14.7
		-	-	-	14	0.025	14.7
		-	-	-	15	0.035	10.7
<b><math>F_d</math> (kN)</b>				<b>11.6</b>	<b>13.4</b>		

**Tabela 7.12** - Resumo dos resultados de resistência dinâmica teórica do solo, para o loteamento residencial de São Carlos (Profundidade de 4 a 7 metros)

Tipo de Equipamento		Convencional			Mecanizado		
Profundidade (m)	$L_h$ (m)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$F_d$ (kN)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$F_d$ (kN)
4.0	4.95	3	0.070	5.7	3	0.083	4.9
		4	0.070	5.7	4	0.068	5.9
		6	0.058	6.8	6	0.063	6.3
		7	0.060	6.6	7	0.060	6.6
$F_d$ (kN)		6.2			5.9		
6.0	6.95	4	0.040	9.6	-	-	-
		6	0.030	12.5	-	-	-
		7	0.030	12.5	-	-	-
		8	0.025	14.9	-	-	-
		9	0.030	12.5	-	-	-
		10	0.023	16.1	-	-	-
		11	0.022	16.8	-	-	-
		12	0.025	14.9	-	-	-
		13	0.025	14.9	-	-	-
$F_d$ (kN)		13.9					
7.0	7.95	-	-	-	4	0.038	10.0
		-	-	-	5	0.041	9.3
		-	-	-	7	0.037	10.3
		-	-	-	8	0.037	10.3
		-	-	-	9	0.035	10.8
		-	-	-	11	0.031	12.1
$F_d$ (kN)					10.5		

**Tabela 7.13** - Resumo dos resultados de resistência dinâmica teórica do solo, para o loteamento residencial de São Carlos (Profundidade de 8 a 10 metros)

Tipo de Equipamento		Convencional			Mecanizado		
Profundidade (m)	$L_h$ (m)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$F_d$ (kN)	Golpe nº	$\rho$ (m)	$F_d$ (kN)
8.0	8.95	4	0.028	13.3	4	0.038	10.0
		5	0.027	13.8	6	0.027	13.8
		7	0.028	13.3	8	0.028	13.3
		8	0.027	13.8	10	0.030	12.5
		10	0.024	15.4	12	0.019	19.2
		11	0.023	16.0	13	0.024	15.4
		12	0.020	18.3	14	0.019	19.2
		14	0.020	18.3	16	0.017	21.4
		15	0.025	14.8	-	-	-
$F_d$ (kN)		<b>15.2</b>			<b>15.6</b>		
9.0	9.95	8	0.022	16.7	6	0.023	16.0
		10	0.016	22.7	8	0.018	20.2
		12	0.018	20.2	9	0.019	19.2
		13	0.009	39.7	10	0.017	21.4
		14	0.018	20.2	12	0.018	20.2
		16	0.013	27.7	13	0.014	25.8
		17	0.012	29.9	14	0.016	22.7
		18	0.016	22.7	16	0.015	24.1
		19	0.013	27.7	18	0.013	27.7
		20	0.008	44.5	20	0.012	29.9
		21	0.016	22.7	21	0.013	27.7
		22	0.013	27.7	22	0.015	24.1
		23	0.010	35.8	23	0.013	27.7
		24	0.010	35.8	-	-	-
		$F_d$ (kN)		<b>28.1</b>			<b>23.6</b>
10.0	10.95	4	0.032	11.7	5	0.033	11.4
		5	0.039	9.7	7	0.028	13.2
		6	0.032	11.7	9	0.026	14.2
		7	0.038	10.0	10	0.029	12.8
		8	0.024	15.3	11	0.027	13.7
		9	0.032	11.7	13	0.031	12.0
		10	0.033	11.4	14	0.029	12.8
		11	0.030	12.4	-	-	-
		12	0.031	12.0	-	-	-
		13	0.027	13.7	-	-	-
$F_d$ (kN)		<b>12.0</b>			<b>12.9</b>		

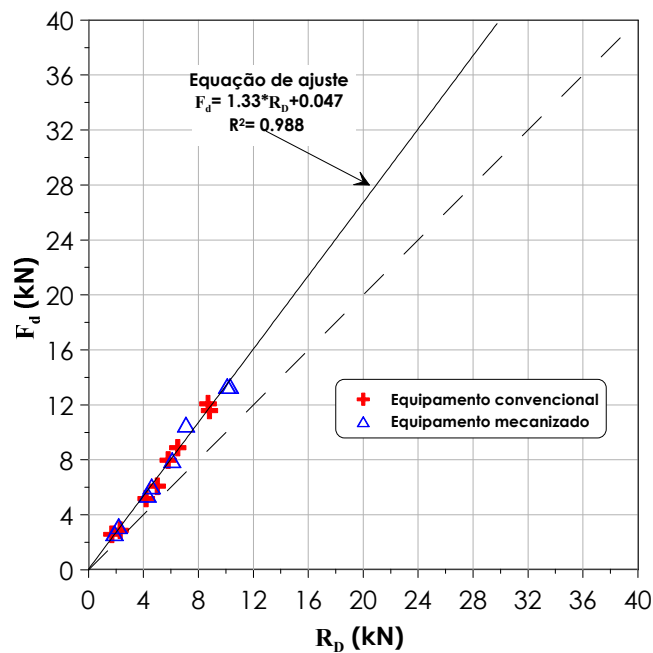


(a)- Campo experimental da UNESP (Bauru-SP)

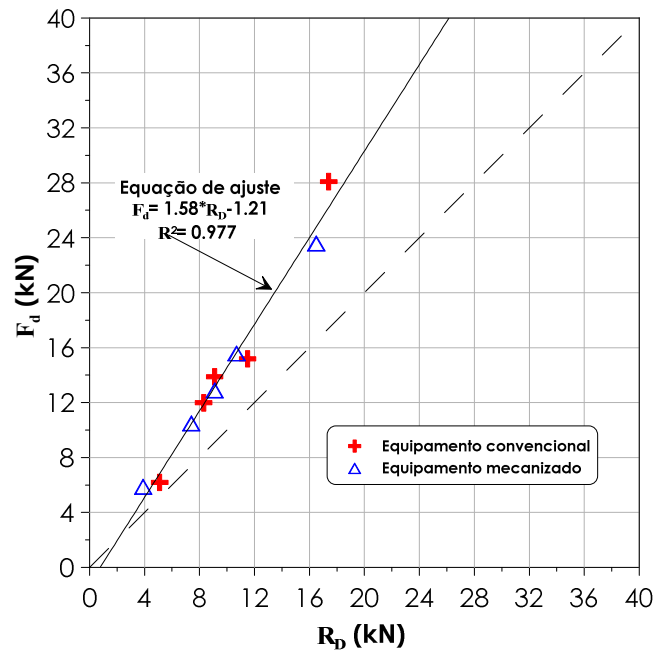
(b)- Loteamento residencial (São Carlos-SP)

**Figura 7.42** – Comparação entre os valores de R<sub>D</sub> e F<sub>d</sub> para os ensaios realizados na cidade de São Carlos (SP) e Bauru (SP).

A comparação entre os valores teóricos e experimentais de resistência dinâmica do solo mostraram que a discrepância entre os resultados aumenta com o aumento da resistência do solo (Figura 7.43 e Figura 7.44). Esse comportamento está associado com a grande sensibilidade dos valores de força com diminuição da penetração do amostrador no solo.



**Figura 7.43** – Comparação entre os valores de R<sub>D</sub> e F<sub>d</sub> para os ensaios realizados na cidade de Bauru (SP).



**Figura 7.44** – Comparação entre os valores de  $R_D$  e  $F_d$  para os ensaios realizados na cidade de São Carlos (SP).

A exatidão dos valores de resistência dinâmica do solo, determinados com a equação teórica proposta por Schnaid et al., (2009), depende fundamentalmente da quantidade de energia que atinge o amostrador. Desta forma, conclui-se que a quantidade de energia que atinge o amostrador, calculada através da Equação 2.11, não representou com fidelidade as reais condições ensaiadas em campo. Os valores obtidos apresentaram-se similares aos valores de energia determinados no topo do conjunto de hastes. Assim, com o objetivo de converter a quantidade de energia no topo da composição de haste para a quantidade de energia que atinge o amostrador, foram comparados esses valores através de resultados experimentais. Através desta comparação é possível quantificar as perdas de energia que ocorrem ao longo do comprimento de haste. A Tabela 7.14 apresenta um resumo dos resultados da quantidade de energia medida no topo ( $E_{topo}$ ) e da energia medida na base ( $E_{base}$ ).

A correção dos valores teóricos de resistência dinâmica ( $F_d$ ) foi realizada utilizando um fator de multiplicação, obtido através da relação entre a energia no topo e na base da composição de hastes (Tabela 7.14), que representa a perda de energia ao longo do comprimento da composição de haste. Apesar dos resultados indicarem algumas discrepâncias entre os valores medidos experimentalmente, foram adotados os valores

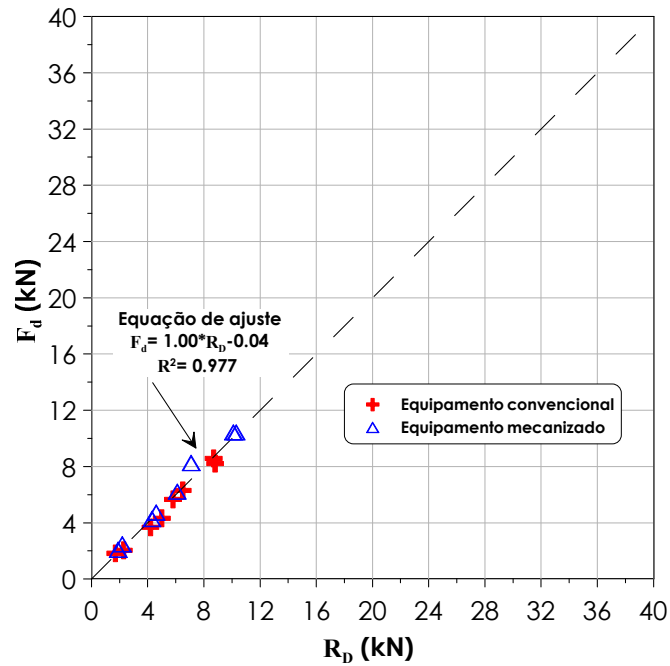
médios das relações  $E_{base}/E_{topo}$ . Assim, foram adotados os valores 0.71 e 0.78, para os equipamentos convencional e mecanizado, respectivamente.

**Tabela 7.14** – Comparação entre os valores de energia medidos no topo e na base do conjunto de hastes.

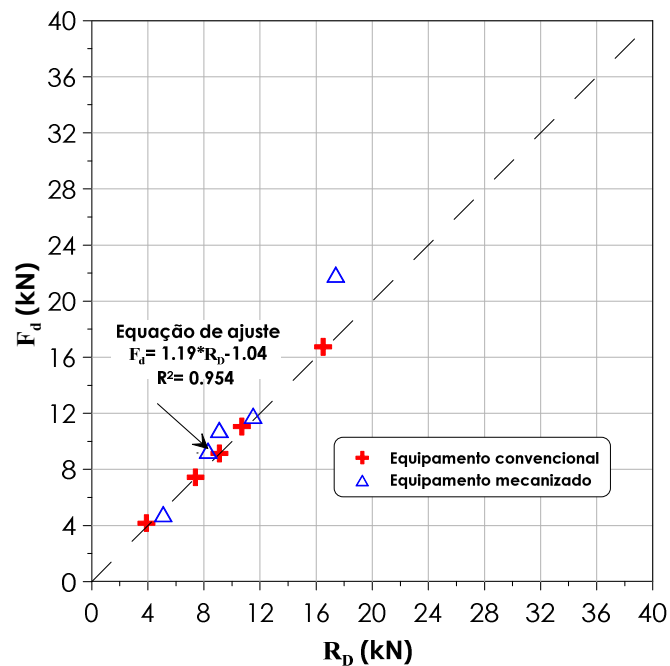
Profundidade (m)	Equipamento Convencional			Equipamento Mecanizado		
	$E_{topo}$ (J)	$E_{base}$ (J)	$E_{base}/E_{topo}$	$E_{topo}$ (J)	$E_{base}$ (J)	$E_{base}/E_{topo}$
2.0	463.15	261.96	0.57	420.12	331.61	0.79
6.0	407.08	284.03	0.70	418.62	369.07	0.88
8.9	399.04	293.55	0.74	397.11	349.74	0.88
9.0	385.96	292.55	0.76	383.56	292.65	0.76
10.0	378.96	314.16	0.83	379.91	276.32	0.73
11.0	369.10	229.04	0.62	359.55	256.80	0.71
12.0	372.92	289.03	0.78	373.63	253.75	0.68
Valor médio $E_{base}/E_{topo}$ :			0.71	Valor médio $E_{base}/E_{topo}$ :		0.78

Os valores de resistência dinâmica teóricos corrigidos mostram que com a introdução do fator de correção na quantidade de energia que atinge o topo do amostrador, a discrepância entre os resultados experimentais e teóricos diminui significativamente, (Figura 7.45 e Figura 7.46) principalmente para os resultados dos ensaios realizados em São Carlos (Figura 7.46). Essa análise reforça a importância do conhecimento da quantidade de energia que efetivamente atinge o amostrador. Esse dado é fundamental para garantir a adequabilidade das equações teóricas no cálculo da resistência dinâmica do solo.





**Figura 7.45** – Ajuste dos valores de resistência dinâmica teóricos utilizando a correção da energia que atinge o topo do amostrador (Campo Experimental da Unesp).



**Figura 7.46** – Ajuste dos valores de resistência dinâmica teóricos utilizando a correção da energia que atinge o topo do amostrador (Loteamento residencial em São Carlos).

## 7.5 Mecanismos de reação mobilizados durante a penetração do amostrador SPT

A penetração do amostrador SPT no solo pode mobilizar diferentes mecanismos de reação do sistema solo-amostrador. Esses mecanismos dependem fundamentalmente da ocorrência ou não do fenômeno do embuchamento. Quando o solo penetra no interior do

amostrador durante o processo de cravação, a resistência total mobilizada pelo solo é formada por parcelas de atrito lateral interno, atrito lateral externo e resistência de ponta, que se desenvolve ao longo da área da seção transversal do anel. Quando a penetração do solo no interior do amostrador fica impossibilitada, ocorre o embuchamento. Nesta condição, a resultante do atrito lateral interno é igual à resistência de ponta mobilizada. A ocorrência do embuchamento está relacionada ao desenvolvimento de forças relacionadas à força inercial da bucha, resultante do atrito interno e resistência de ponta desenvolvida logo abaixo da bucha. Assim, a resistência dinâmica do solo durante a cravação do amostrador pode ser representada por (SOUZA, 2009):

$$R_D = f_s \times A_s + f_i \times A_i + q_p \times A \quad (\text{Não embuchado}) \quad (7.4)$$

$$R_D = f_s \times A_s + q_p \times A_p \quad (\text{Embuchado}) \quad (7.5)$$

onde  $f_s$  = atrito lateral externo unitário,  $A_s$  = área lateral externa,  $f_i$  = atrito lateral interno unitário,  $A_i$  = área lateral interna,  $q_p$  = resistência de ponta,  $A_e$  = área da seção transversal do anel do amostrador e  $A_p$  = área de ponta total.

### 7.5.1 Embuchamento do solo

O controle da ocorrência do embuchamento do solo durante a penetração do amostrador SPT foi realizado medindo-se o comprimento da amostra, imediatamente após a etapa de penetração do amostrador no solo. Essa simples prática pode ser facilmente incorporada aos procedimentos do ensaio SPT, facilitando a interpretação dos resultados no que refere aos mecanismos de mobilização da resistência do solo.

A ocorrência do embuchamento depende do tipo e da densidade do solo e da proximidade de interface de solos com diferentes densidades, entre outros fatores. Neste trabalho foi analisada apenas a influência do tipo de solo na ocorrência do embuchamento.

Os resultados do controle de recuperação das amostras indicaram que de uma maneira geral, para os solos predominantemente arenosos, o comprimento da amostra é maior ou igual à penetração máxima do amostrador no solo (Figura 7.47a). No caso dos solos argilosos o comprimento da amostra apresentou-se inferior à penetração máxima do amostrador para todos os casos analisados (Figura 7.47b).



(a) Penetração do amostrador sem a ocorrência do embuchamento (Areia média pouco argilosa) Campo Experimental da UNESP de Bauru.



(b) Penetração do amostrador com a ocorrência do embuchamento (Argila areno-siltosa) – Pátio da Sondobase/Ribeirão Preto (SP)

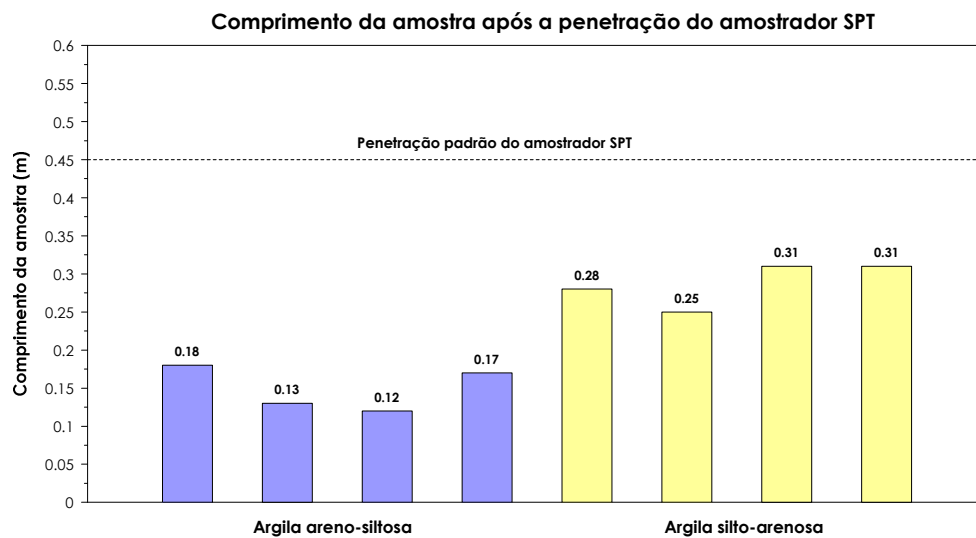
**Figura 7.47** – Controle de recuperação da amostra de solo após a etapa de penetração do amostrador SPT.

Adicionalmente aos ensaios realizados nas cidades de Bauru e São Carlos, também foram realizados alguns ensaios SPT complementares na cidade de Ribeirão Preto, mais precisamente no pátio da empresa Base Fundações. Nesse local foram realizados seis furos de sondagem durante o período de abril e julho de 2010. A Tabela 7.15 apresenta os resultados dos ensaios de granulometria para profundidades variando de 1 a 10 m. Os resultados mostram que até 4 metros de profundidade, o perfil é formado por camadas de argila areno-siltosa e de 8 a 10 metros por camadas de solo argila silto-arenosa.

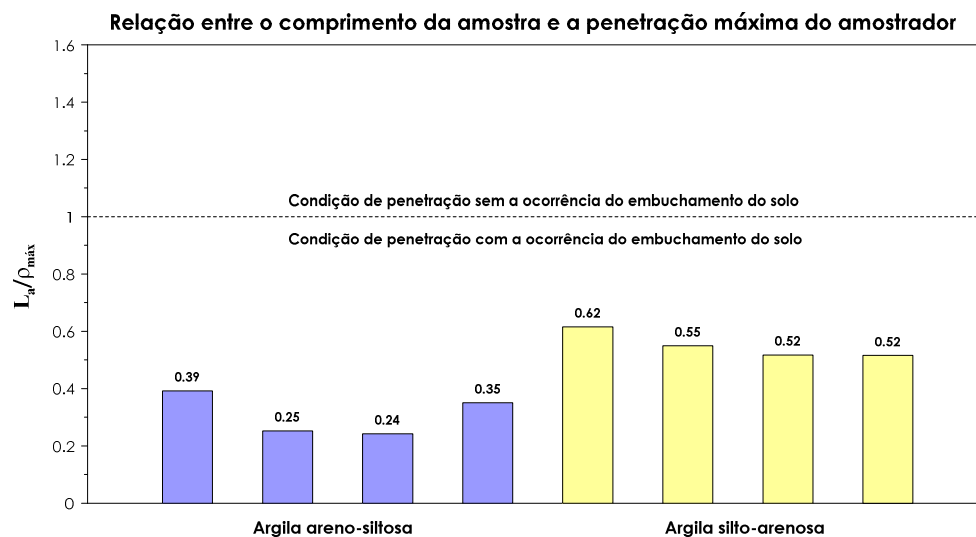
**Tabela 7.15** – Resultados dos ensaios de granulometria

Fração Granulométrica	1.0 m	2.5 m	4.0 m	8.0 m	9.0 m	10.0 m
Argila (%)	50	50	48	48	56	58
Silte (%)	15	15	17	32	27	33
Areia fina (%)	20	20	22	13	13	6
Areia média (%)	15	15	13	7	4	3
Areia grossa (%)	--	--	--	--	--	--

No presente trabalho são apresentados somente os resultados referentes a recuperação de amostras, que estão mostrados na Figura 7.48 e a Figura 7.49. Esses resultados indicaram que a recuperação da amostra para as camadas de argila areno-siltosa foi menor do que para as camadas de argila silto-arenosa (Figura 7.48). Em todos os casos analisados a relação entre o comprimento da amostra de solo recuperada ( $L_a$ ) e a penetração máxima do amostrador ( $\rho_{máx}$ ) apresentou-se inferior a 1, o que permite concluir que parte da penetração do amostrador no solo ocorreu sob a condição embuchada (Figura 7.49).



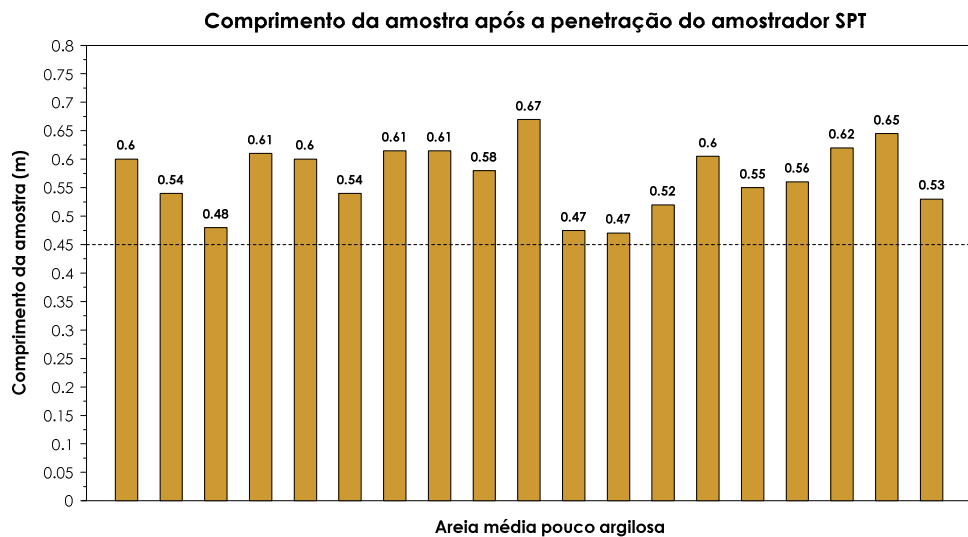
**Figura 7.48** – Comprimento da amostra de solo recuperada após a etapa de penetração do amostrador SPT (Pátio Base Fundações – Ribeirão Preto)



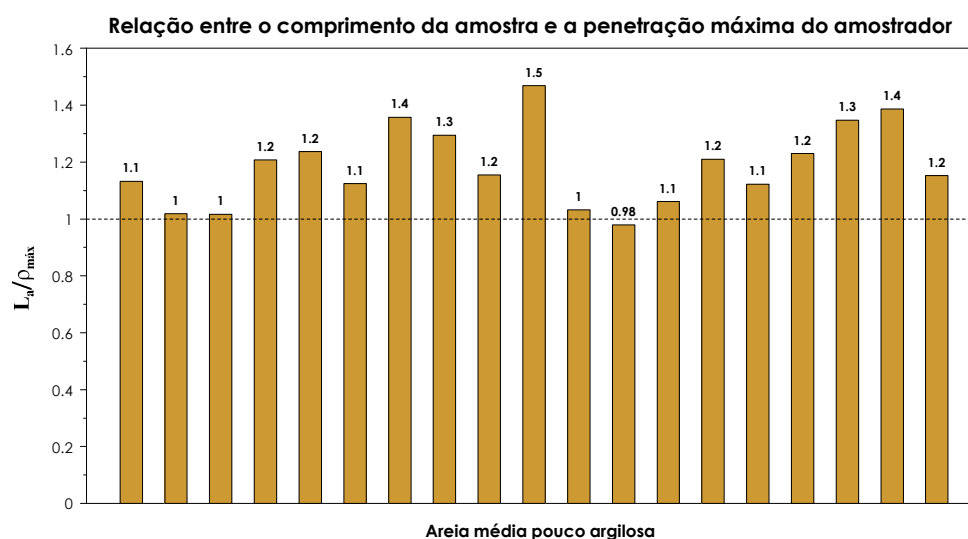
**Figura 7.49** – Relação entre o comprimento da amostra de solo recuperada ( $L_a$ ) e a penetração máxima do amostrador ( $\rho_{máx}$ ) (Pátio Base Fundações – Ribeirão Preto)

Os resultados dos ensaios realizados na Unesp em Bauru (Figura 7.50 e Figura 7.51) indicaram que a recuperação da amostra foi superior aos valores registrados nos ensaios de

Ribeirão Preto. Foi observado que, para a grande maioria dos resultados, a relação entre o comprimento da amostra de solo recuperada ( $L_a$ ) e a penetração máxima do amostrador ( $\rho_{máx}$ ) apresentou-se superior a 1, ou seja, não ocorrendo embuchamento durante a penetração do amostrador no solo (Figura 7.51). O fato do comprimento da amostra recuperada ter se apresentado superior à penetração máxima do amostrador pode ser explicado através da condição das camadas de solo ensaiadas. Como o material que compõe o perfil estratigráfico é formado por camadas de areia fofa a medianamente compacta, parte desse fica solto no fundo do furo e começa a preencher o amostrador antes mesmo do início da penetração deste no solo.

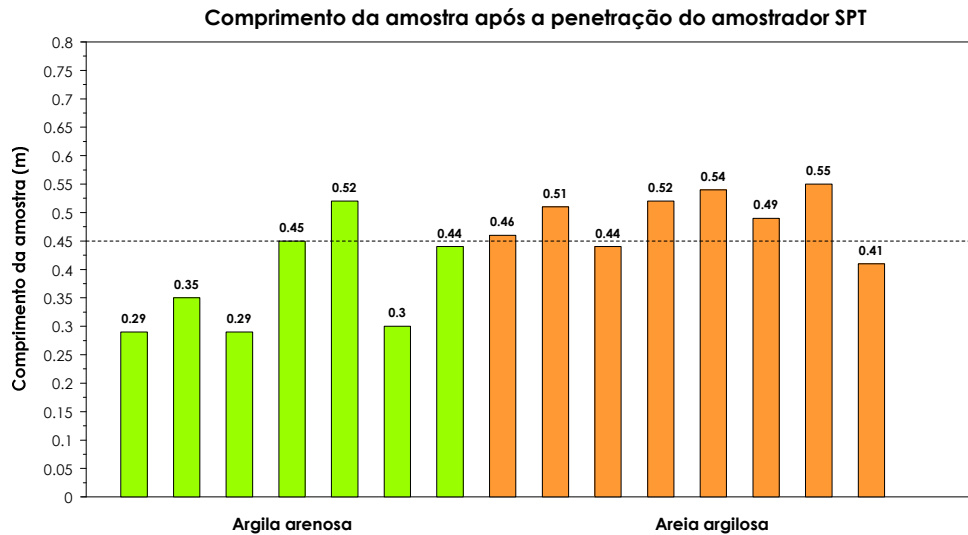


**Figura 7.50** – Comprimento da amostra de solo recuperada após a etapa de penetração do amostrador SPT (Campo experimental da UNESP – Bauru)

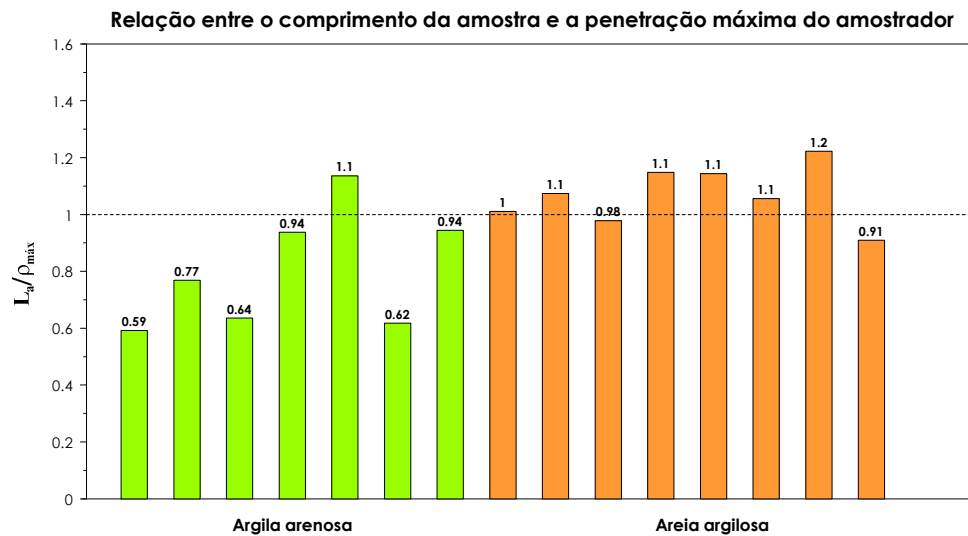


**Figura 7.51** – Relação entre o comprimento da amostra de solo recuperada ( $L_a$ ) e a penetração máxima do amostrador ( $\rho_{máx}$ ) (Campo experimental da UNESP – Bauru)

A Figura 7.52 e a Figura 7.53 apresentam os resultados dos ensaios realizados na cidade de São Carlos. O perfil estratigráfico é formado basicamente por camadas de argila arenosa (até 7 metros de profundidade) e areia argilosa (8 a 10 metros de profundidade).



**Figura 7.52** – Comprimento da amostra de solo recuperada após a etapa de penetração do amostrador SPT (Loteamento residencial em São Carlos)



**Figura 7.53** – Relação entre o comprimento da amostra de solo recuperada ( $L_a$ ) e a penetração máxima do amostrador ( $\rho_{m\acute{a}x}$ ) (Loteamento residencial em São Carlos)

Os resultados desses ensaios confirmam a ocorrência de embuchamento em camadas formadas predominantemente por argila e a não ocorrência de embuchamento para o caso das camadas arenosas. A Figura 7.52 mostra que de uma maneira geral, para as camadas de argila arenosa o comprimento de recuperação das amostras foi inferior a 0.45 m. Foi observada apenas uma camada onde não ocorreu o embuchamento,

possivelmente por ser um material de transição. Nesse local, as relações entre o comprimento da amostra e a penetração máxima foi maior do que as relações obtidas com os ensaios realizados em Ribeirão Preto (Figura 7.49 e Figura 7.53). A causa provável é que esse material apresenta um teor de argila superior ao do material ensaiado em São Carlos.

Em relação às camadas de areia argilosa foi observado que as relações entre o comprimento de recuperação da amostra e a penetração máxima apresentaram-se inferiores aos valores obtidos com os ensaios realizados em Bauru (Figura 7.51 e Figura 7.53). Isso ocorre porque esse material apresenta um teor de areia superior ao do material ensaiado em São Carlos.

Desta forma, as análises apresentadas neste trabalho indicam que a probabilidade de ocorrência da condição embuchada é maior para o caso de solos com pequena resistência de ponta, ou seja, argilas e siltes. De uma maneira geral observou-se que para o caso de solos arenosos e areias argilosas a condição embuchada não ocorre. Este mesmo comportamento também foi relatado por De Ruiter e Beringen (1979).

### **7.5.2 Resistência de ponta e atrito lateral externo**

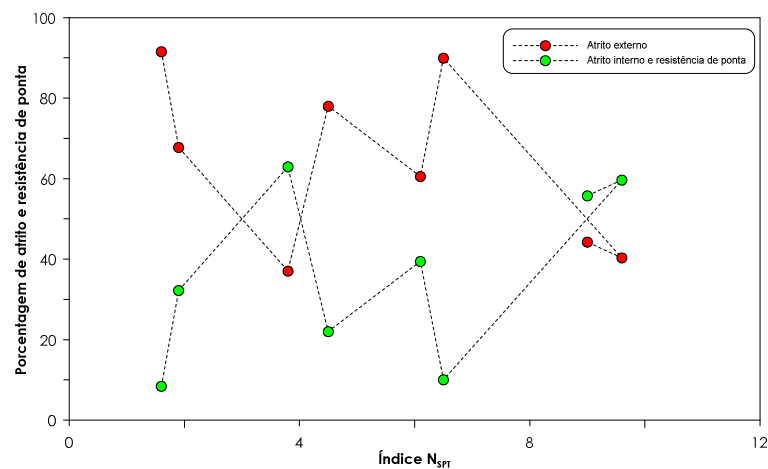
As parcelas de resistência de ponta e atrito lateral externo foram estimadas, para os ensaios realizados em Bauru, utilizando-se os valores da adesão-atrito ( $f_i$ ) medidos através do ensaio de torque no ensaio SPT-T (Tabela 7.16). De uma maneira geral, os resultados para as camadas com baixos índices  $N_{SPT}$  indicaram que a parcela de resistência do atrito lateral externo é maior do que a soma das parcelas de resistência de ponta e atrito lateral interno (Tabela 7.16). Esse fato indica que para esses casos a penetração do amostrador SPT mobilizou o atrito lateral externo. À medida que o índice  $N_{SPT}$  aumenta diminui a parcela do atrito lateral externo e aumenta a soma das parcelas do atrito lateral interno e da resistência de ponta (Figura 7.54 e Figura 7.55).

**Tabela 7.16** – Comparação entre os valores de resistência dinâmica total ( $R_D$ ) e resistência do atrito lateral externo ( $R_{L_{ext}}$ )

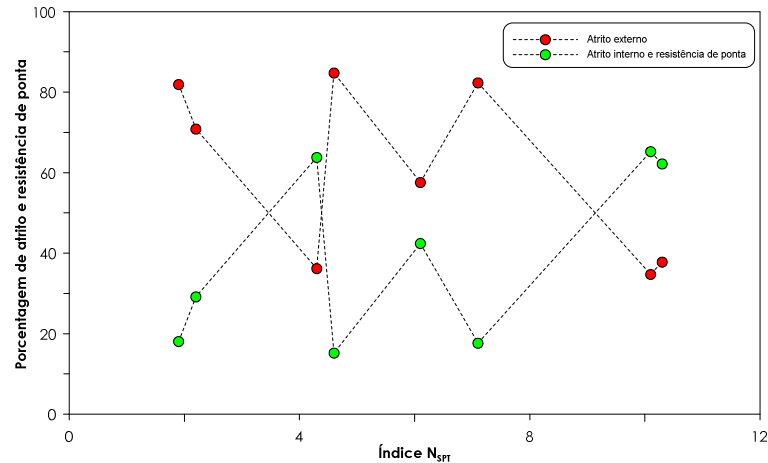
Prof. (m)	Convencional	Mecanizado	$f_i$ (kPa)	h (m)	$Al$ (m <sup>2</sup> )	$R_{L_{ext}}$ (kN)	Convencional	Mecanizado
	$R_D$ (kN)	$R_D$ (kN)					$R_p + R_{L_{int}}$ (kN)	$R_p + R_{L_{int}}$ (kN)
2.0	1.7	1.9	18.4	0.53	0.0846	1.6	0.1	0.3
4.0	2.3	2.2	21.7	0.45	0.0718	1.6	0.7	0.6
6.0	4.2	4.3	19.5	0.50	0.0798	1.6	2.6	2.7
8.0	5.0	4.6	54.3	0.45	0.0718	3.9	1.1	0.7
9.0	5.8	6.1	48.9	0.45	0.0718	3.5	2.3	2.6
10.0	6.5	7.1	81.4	0.45	0.0718	5.8	0.7	1.3
11.0	8.7	10.1	47.8	0.46	0.0734	3.5	5.2	6.6
12.0	8.8	10.3	49.8	0.49	0.0782	3.9	4.9	6.4

h = altura de penetração do amostrador no solo e  $Al$  = área lateral externa.

Schmertmann (1979) apresentou um ábaco onde as parcelas de resistência de atrito lateral e ponta mobilizadas no ensaio SPT variam em função da razão de atrito ( $R_f$ ) obtida através do ensaio CPTu. No caso do Campo Experimental da Unesp, a razão de atrito até 12 metros é inferior a 1% (Figura 5.3). De acordo com o ábaco da Figura 2.28, a esse valor de  $R_f$  corresponde uma parcela máxima de atrito de 30%. Os valores apresentados nesta análise (Figura 7.54e Figura 7.55) não concordam com a estimativa proposta por Schmertmann (1979), indicando que a compacidade do solo também influencia nas parcelas de atrito e ponta durante a penetração do amostrador SPT. Entretanto, esse comportamento deve ser melhor pesquisado através da realização de ensaios complementares com diferentes tipos de solos. Também deve ser avaliada a adequabilidade do ensaio de torque para estimar a resistência de atrito lateral externo mobilizado no ensaio SPT.

**Figura 7.54** – Variação das parcelas de resistência de atrito lateral externo e interno e resistência de ponta em função do índice  $N_{SPT}$  (Equipamento convencional - Campo experimental da UNESP em Bauru)





**Figura 7.55** – Variação das parcelas de resistência de atrito lateral externo e interno e resistência de ponta em função do índice  $N_{SPT}$  (Equipamento convencional - Campo experimental da UNESP em Bauru)

### 7.5.3 Estudo de caso: Sondagens SPT realizadas em Porto Alegre (RS)

A seguir é apresentado um estudo de caso utilizando os resultados de ensaios SPT realizados na cidade de Porto Alegre (RS). Os ensaios foram conduzidos com controle de recuperação das amostras ( $L_a$ ) e medidas de torque após a penetração do amostrador no solo. A resistência estática total foi determinada através da equação proposta por Aoki et al., 2007 (Equação 2.55), uma vez que esta equação apresentou uma excelente concordância com os valores experimentais. O nível de eficiência no topo do amostrador foi adotado igual a 57%, conforme indicado pelos resultados experimentais.

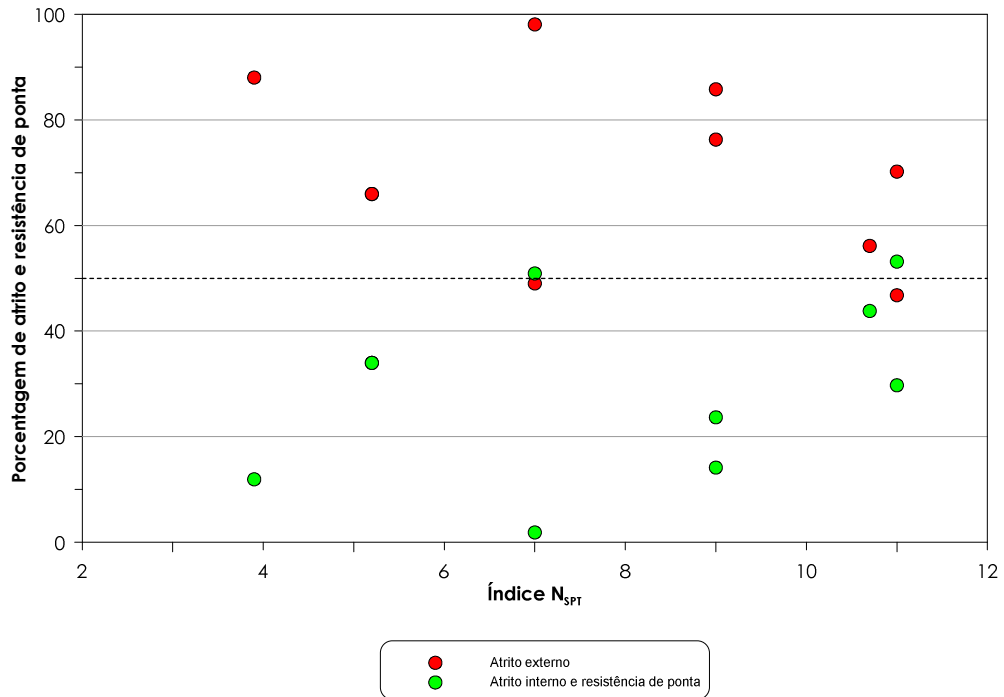
A Tabela 7.17 e a Tabela 7.18 apresentam os valores de resistência total do solo ( $R_s$ ), resistência de atrito lateral externo ( $R_{L_{ext}}$ ) e interno ( $R_{L_{int}}$ ) e resistência de ponta ( $R_p$ ). Os resultados mostram que para camadas com valores de índice  $N_{SPT}$  até 12, a maior parte da resistência estática é proveniente da resistência de atrito lateral desenvolvida no contato entre o solo e o amostrador (Figura 7.56). Para índices  $N_{SPT}$  superiores a 12 a soma das parcelas das resistências de atrito lateral interno e ponta passam a influenciar na penetração do amostrador no solo (Figura 7.57). Esse comportamento deve ser melhor investigado através de ensaios complementares considerando além da compactidade e/ou consistência a influência do tipo de solo nas parcelas de resistência de ponta e atrito lateral externo e interno.

**Tabela 7.17** – Comparação entre os valores de resistência total do solo ( $R_s$ ) e resistência do atrito lateral externo ( $R_{l_{ext}}$ ) e atrito lateral interno ( $R_{l_{int}}$ ) e resistência de ponta ( $R_p$ ) (Sondagem 203 - Porto Alegre)

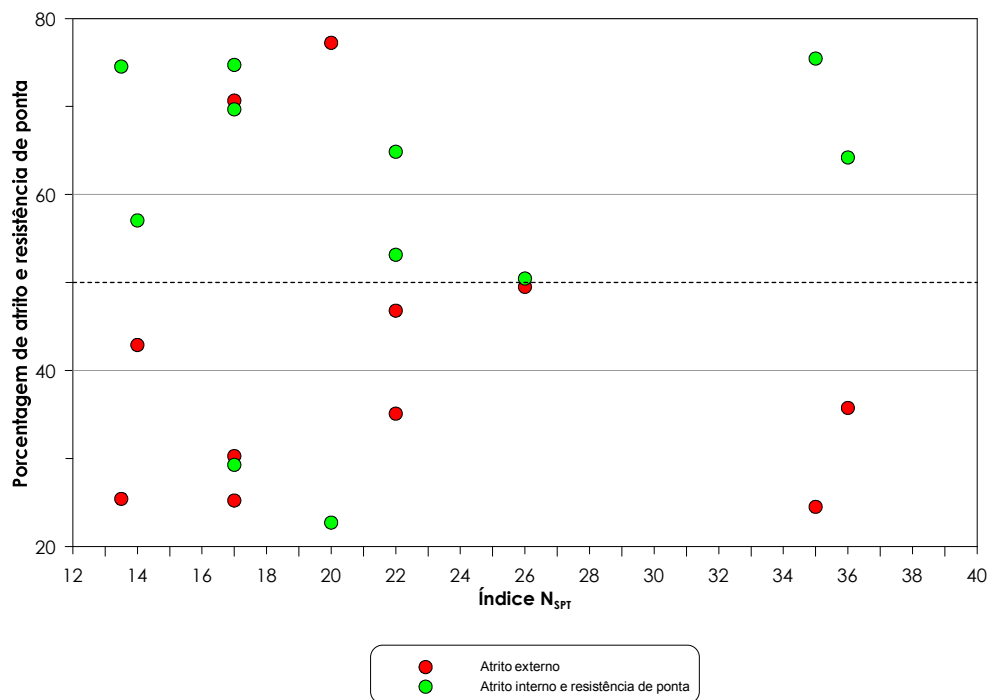
SONDAGEM 203									
Prof. (m)	Classificação	$L_a$ (m)	T (kgf.cm)	$N_{SPT}$	$\rho_{m\acute{a}x}$ (m)	$R_s$ (kN)	$A_l$ (m <sup>2</sup> )	$R_{l_{ext}}$ (kN)	$R_p + R_{l_{int}}$ (kN)
3.0	Argila arenosa	0.47	1400	10.7	0.45	9.7	0.0718	5.5	4.2
4.0	Argila arenosa	0.45	1800	9.0	0.46	8.2	0.0734	7.0	1.2
5.0	Areia argilosa	0.35	1200	11.0	0.46	10.0	0.0734	4.7	5.3
7.0	Areia pouco argilosa	0.59	1400	14.0	0.45	12.7	0.0718	5.5	7.2
9.0	Areia pouco argilosa	0.36	800	13.5	0.45	12.3	0.0718	3.2	9.1
13.0	Argila arenosa	0.53	800	5.2	0.48	4.7	0.0766	3.1	1.6
20.0	Argila arenosa	0.63	800	3.9	0.45	3.5	0.0718	3.1	0.4
21.0	Argila arenosa	0.63	800	5.2	0.48	4.7	0.0766	3.1	1.6
24.0	Areia média a grossa	0.54	2000	35.0	0.45	31.8	0.0718	7.8	24.0
25.0	Areia média a grossa	0.56	3000	36.0	0.45	32.7	0.0718	11.7	21.0
32.0	Argila siltosa	0.43	3000	26.0	0.45	23.6	0.0718	11.7	11.9

**Tabela 7.18** – Comparação entre os valores de resistência total do solo ( $R_s$ ) e resistência do atrito lateral externo ( $R_{l_{ext}}$ ) e atrito lateral interno ( $R_{l_{int}}$ ) e resistência de ponta ( $R_p$ ) (Sondagem 209 - Porto Alegre)

SONDAGEM 209									
Prof. (m)	Classificação	$L_a$ (m)	T (kgf.cm)	$N_{SPT}$	$\rho_{m\acute{a}x}$ (m)	$R_s$ (kN)	$A_l$ (m <sup>2</sup> )	$R_{l_{ext}}$ (kN)	$R_p + R_{l_{int}}$ (kN)
5.0	Argila arenosa	0.47	1600	7.0	0.45	6.4	0.0718	6.2	0.2
6.0	Argila arenosa	0.50	1600	9.0	0.45	8.2	0.0718	6.2	2.0
8.0	Argila arenosa pouco siltosa	0.55	1800	11	0.45	10.0	0.0718	7.0	3.0
10.0	Areia fina pouco argilosa	0.52	2400	22.0	0.45	20.0	0.0718	9.4	10.6
14.0	Areia fina pouco argilosa	0.48	1800	22.0	0.45	20.0	0.0718	7.0	13.0
17.0	Areia de granulação variada	0.55	1000	17.0	0.45	15.4	0.0718	3.9	11.5
18.0	Areia de granulação variada	0.50	1200	17.0	0.45	15.4	0.0718	4.7	10.7
25.0	Argila silto-arenosa	0.47	800	7.0	0.45	6.4	0.0718	3.1	3.3
29.0	Argila silto-arenosa	0.51	3600	20.0	0.45	18.2	0.0718	14.0	4.2
32.0	Argila silto-arenosa	0.47	2800	17.0	0.45	15.4	0.0718	10.9	4.5



**Figura 7.56** – Variação das parcelas de resistência de atrito lateral externo e interno e resistência de ponta em função do índice  $N_{SPT}$  (Resultados dos ensaios realizados em Porto Alegre - RS)



**Figura 7.57** – Variação das parcelas de resistência de atrito lateral externo e interno e resistência de ponta em função do índice  $N_{SPT}$  (Resultados dos ensaios realizados em Porto Alegre - RS)

## 7.6 Considerações para a prática de ensaios SPT

Uma das grandes limitações do emprego do ensaio SPT refere-se à variabilidade do índice  $N_{SPT}$  e conseqüentemente as incertezas provenientes desses resultados. Pesquisas

recentes têm procurado incorporar interpretações baseadas em análises racionais dos ensaios dinâmicos. Essas análises foram desenvolvidas com base em ensaios executados com a utilização de um sistema de instrumentação dinâmica. Essas interpretações têm representado um grande avanço na redução das incertezas associadas ao ensaio SPT. No entanto, a confiabilidade dos resultados depende de algumas modificações nos procedimentos de execução do ensaio SPT. Desta forma são apresentadas algumas sugestões práticas, com o objetivo de aumentar a confiabilidade dos resultados dos ensaios SPT a serem utilizados na concepção de projetos geotécnicos.

#### **(a) Tipo de equipamento**

Diversos tipos de equipamentos são utilizados na execução de ensaios SPT, incluindo martelos com diferentes massas e sistemas de levantamento e queda. Assim, recomenda-se que a utilização de equipamentos não padronizados pela norma NBR 6484 (ABNT, 2001) deva ser precedida de ensaios preliminares para a determinação do nível de eficiência do equipamento. A altura de queda exerce elevada influência na determinação do índice  $N_{SPT}$  e por isso deve ser padronizada e mantida constante conforme recomendações da NBR 6484 (ABNT, 2001).

Os martelos com sistema de levantamento e queda automáticos apresentam menor variabilidade dos resultados e conseqüentemente maior confiabilidade dos resultados. O uso desses equipamentos deve-se tornar rotineiro na prática de execução do ensaio SPT.

#### **(b) Eficiência no ensaio SPT**

Os resultados experimentais demonstraram que os valores de eficiência no ensaio SPT não apresentaram grande variação. Desta forma, os níveis de eficiência podem ser aferidos em apenas um furo de ensaio para uma determinada campanha. Esses resultados podem ser utilizados como referência para o desenvolvimento de projetos geotécnicos desde que os procedimentos executivos, equipamentos e equipe de sondagem sejam mantidos constantes.

Adicionalmente, a interpretação racional dos ensaios SPT depende da determinação da eficiência aferida no topo do amostrador. Considerando a dificuldade do posicionamento da instrumentação logo acima do amostrador recomenda-se que os níveis de energia determinados no topo da composição de hastes devam ser convertidos para o topo do amostrador. Nesta conversão deve-se considerar um fator de perda de energia devido ao comprimento da composição de hastes, fenômenos de flambagem das hastes, excentricidade do golpe do martelo e outros fatores.

### **(c) Procedimentos executivos**

Durante a execução dos ensaios SPT recomenda-se a realização de medidas do comprimento de recuperação das amostras. Essas medidas complementares possibilitam quantificar a ocorrência ou não do embuchamento e conseqüentemente interpretar o mecanismo de mobilização de reação do solo.

### **(d) Apresentação dos resultados**

No boletim de sondagem é fundamental que conste informações a respeito do tipo de equipamento, massa do martelo, características da composição de hastes e os níveis de eficiência de um ensaio de referência. Esse conjunto de informações possibilita a obtenção de resultados mais confiáveis.

## **7.7 Considerações finais**

Neste capítulo foi apresentada a determinação da resistência dinâmica do solo a partir dos sinais de força registrados na base da composição de hastes durante a cravação do amostrador SPT. Esses resultados experimentais foram comparados com diferentes propostas teóricas (SCHMERTMANN, 1979; AOKI et al., 2007; SCHNAID et al., 2009) utilizadas para o cálculo da resistência dinâmica e estática do solo, mobilizadas durante o ensaio SPT. As principais considerações dessas análises foram:

- Na determinação da resistência dinâmica experimental do solo, quanto maior for a penetração permanente do amostrador maior será o intervalo de mobilização da resistência dinâmica do solo, sendo que a consideração dos impactos subsequentes são de fundamental importância.
- Os valores de resistência estática, determinados através do método proposto por Schmertmann (1979), apresentaram-se muito superiores aos valores experimentais de resistência dinâmica. Esta diferença torna-se ainda mais pronunciada com o aumento do índice  $N_{SPT}$  e do atrito lateral determinado através do ensaio CPTu. Desta forma, observa-se que este método não apresentou aplicação satisfatória para os solos estudados.
- Os valores teóricos de resistência estática do solo determinados através da equação proposta por Aoki et al., (2007) mostraram-se muito próximos aos valores experimentais de resistência dinâmica. No caso de solos com baixos valores de índice  $N_{SPT}$  recomenda-se a correção da energia potencial imposta no sistema através da proposta de Odebrecht (2003).
- O método proposto por Aoki et al., (2007) apresentou-se bastante adequado para a determinação da resistência estática no sistema solo-amostrador. Esse método possui uma

aplicação bastante simplificada e de fácil incorporação na prática de projetos de fundações, uma vez que depende apenas da determinação do índice  $N_{SPT}$  e da quantidade de energia no topo do amostrador.

- Os valores teóricos de força dinâmica do solo, estimados através do método proposto por Schnaid et al., (2009), apresentaram-se superiores aos valores experimentais, superestimando a força de reação dinâmica do solo. Nessa análise foram utilizados os valores dos coeficientes de correção ( $\eta_1$ ,  $\eta_2$  e  $\eta_3$ ) propostos por Odebrecht et al., (2004). Esse método pode ser facilmente ajustado quando se conhece a relação entre a energia no topo e na base da composição de hastes.

- Os métodos teóricos propostos por Aoki et al., (2007) e Schnaid et al., (2009) apresentaram excelentes resultados quando se utiliza a quantidade de energia determinada no topo do amostrador. Foi observado em ambos os métodos uma grande sensibilidade em relação aos valores de energia utilizados, sendo que a eficiência no topo do amostrador pode ser considerada como um parâmetro fundamental na adequabilidade desses métodos teóricos.

- Em relação aos mecanismos de reação mobilizados durante a penetração do amostrador no solo, resultados experimentais mostraram que a ocorrência do embuchamento ocorre com maior frequência em camadas de solo constituídas por argilas e siltes. No caso de solos arenosos e areias argilosas foi observado que a probabilidade de ocorrência do embuchamento do solo é baixa.

- Estimativas realizadas utilizando valores de torque no ensaio SPT-T mostraram que para solos com baixos valores de índice  $N_{SPT}$ , a penetração do amostrador mobiliza quase que exclusivamente a resistência de atrito lateral externo. À medida que os valores dos índices  $N_{SPT}$  aumentam, a soma das parcelas de resistência de atrito lateral interno e resistência de ponta passam a ser mais significativas. Esse comportamento precisa ser melhor investigado através de resultados experimentais complementares. Também deve ser avaliada a adequabilidade do ensaio de torque para estimar a resistência de atrito lateral externo mobilizado no ensaio SPT.



# Capítulo 8

## Conclusões

---

### 8.1 Considerações iniciais

Neste trabalho de pesquisa foram apresentados resultados experimentais obtidos através de ensaios SPT realizados em solos típicos do interior de São Paulo (SP). Nesses ensaios foram registrados sinais de força e aceleração, durante o impacto do martelo e cravação do amostrador no solo. Esses registros possibilitaram a determinação da quantidade de energia que atinge o topo e a base da composição de hastes. Com base nesses resultados experimentais, foi realizada uma análise quantitativa da energia envolvida no ensaio SPT. Posteriormente, os registros de força no topo do amostrador possibilitaram a determinação do perfil de resistência dinâmica do solo. As diversas análises apresentadas nesse trabalho de pesquisa produziram informações relevantes que irão contribuir com aplicações práticas na interpretação dos resultados dos ensaios SPT. A seguir são apresentadas as principais conclusões desse trabalho de pesquisa.

### 8.2 Conclusões

#### 8.2.1 Equipamento desenvolvido para a determinação da energia no ensaio SPT

A determinação da energia no ensaio SPT, através do método *EFV*, depende essencialmente da utilização de acelerômetros adequados para determinar os sinais de velocidade das partículas. Convencionalmente, os ensaios experimentais são realizados posicionando a instrumentação abaixo da cabeça de bater, e determinando-se a quantidade de energia disponível no topo da composição de hastes. Nesse trabalho de pesquisa a instrumentação também foi posicionada no topo do amostrador, permitindo determinar a quantidade de energia que é responsável pela cravação do amostrador no solo. Resultados de ensaios de campo indicaram que para isso é necessária uma instrumentação específica, uma vez que os valores de aceleração registrados no topo do amostrador são muito mais elevados que aqueles valores registrados no topo da composição de haste. Isso ocorre porque o intervalo de tempo entre a chegada da primeira onda de compressão e a sua reflexão, na forma de onda de tração, é muito curto



quando comparado com o intervalo de tempo quando a instrumentação está no topo da composição. A superposição do efeito das ondas aumenta os valores de aceleração e consequentemente essas leituras superam a faixa de utilização desses sensores. Resultados experimentais desse trabalho indicaram que acelerômetros com uma faixa de utilização próxima a 10000 g e 15000 Hz têm possibilitado a obtenção de sinais confiáveis.

Análises dos registros dos sinais de força e aceleração indicaram que o equipamento desenvolvido nesse trabalho de pesquisa é capaz de determinar corretamente os valores de energia. Os valores de deslocamento máximo, calculados através dos sinais de aceleração, foram próximos aos valores de penetração permanente registrados em campo. Desta forma, os sinais de força e aceleração obtidos através dos ensaios de campo, indicaram uma elevada confiabilidade dos resultados e permitiram o desenvolvimento de análises mais detalhadas em relação ao processo de transferência de energia durante o golpe do martelo.

### **8.2.2 Energia e eficiência no ensaio SPT**

Os resultados experimentais apresentados nesse trabalho de pesquisa permitiram analisar quantitativamente a variabilidade dos valores de energia através do método *EFV*. Os ensaios foram realizados com controle rigoroso dos procedimentos executivos recomendados pela norma brasileira (ABNT, 2001). Entretanto foram utilizados equipamentos com diferentes mecanismos de levantamento e queda do martelo e coxins com diferentes valores de rigidez.

Os resultados indicaram que a energia no topo da composição de hastes não apresentou uma grande variabilidade (3% a 5%) atingindo um valor médio de eficiência de 73%. Essas constatações indicam que apesar da utilização de equipamentos distintos, daqueles recomendados pela NBR 6484 (ABNT, 2001), o controle do procedimento executivo permitiu a obtenção de resultados confiáveis. Desta forma, a qualidade dos resultados dos ensaios e o controle da variabilidade dos resultados dependem de uma equipe de execução e supervisão qualificada.

Em relação aos valores de energia determinados na base da composição de hastes, a variabilidade dos resultados apresentou-se mais acentuada (2% a 10%) atingindo um valor médio de eficiência de 57%. Essa variabilidade torna-se mais pronunciada quando se utiliza

o sistema de levantamento e liberação do martelo manual. Isso porque esse sistema ocasiona uma excentricidade maior no golpe que conseqüentemente influencia na quantidade de energia que atinge o topo do amostrador.

As análises apresentadas indicaram que a determinação da eficiência no ensaio SPT depende fundamentalmente da correção da energia total imposta no sistema, conforme proposto por Odebrecht (2003). Para comprimentos de composição de hastes variando entre 2.95 m e 12.95 m foi observado que a eficiência do martelo ( $\eta_1$ ) pode ser admitida como um valor constante que independe com comprimento da composição de hastes. Os resultados experimentais desse trabalho indicam valores de 0.751 e 0.569 para o topo e a base da composição de hastes, respectivamente. Recomenda-se que esses valores, principalmente na base da composição de hastes, devem ser utilizados preferencialmente para solos onde o valor do índice  $N_{SPT}$  é maior ou igual a 5, uma vez que a variabilidade dos resultados é menor para esses casos.

A eficiência avaliada para comprimentos de composição de hastes entre 2.95 m e 12.95 m apresentou-se praticamente constante e independente do comprimento da composição. As perdas de energia para o equipamento mecanizado variaram linearmente com o comprimento da composição de hastes. Entretanto, essa mesma tendência não foi observada para o equipamento convencional.

#### **8.2.2.1 Influência da compacidade do solo na energia transferida.**

Os resultados experimentais para camadas com diferentes condições de compacidade indicaram que quanto menor a compacidade do solo maior é o número de impactos subsequentes necessários para completar a transferência da energia para o sistema. No caso da energia no topo da composição de hastes, a compacidade influencia apenas na duração do evento, sendo que a energia final é a mesma independente da condição do solo.

Entretanto, a quantidade de energia na base da composição de hastes apresentou-se menor para solos com menor compacidade. Isso porque no caso de solos com compacidade menor são necessários mais ciclos para a transferência de energia e conseqüentemente a dissipação da energia ao longo do evento torna-se maior.

Adicionalmente, observou-se que a compacidade do solo influencia no intervalo de tempo entre os impactos subsequentes. Quanto menor a compacidade do solo maior é a

intensidade da onda refletida e conseqüentemente maior será o intervalo de tempo entre os impactos subsequentes. Isso ocorre porque ondas refletidas com grande intensidade aumentam o intervalo de tempo que o martelo fica separado da cabeça de bater. À medida que o solo penetra no amostrador tornando mais resistentes esses intervalos de tempo diminuem.

### **8.2.3 Resistência dinâmica mobilizada durante a penetração do amostrador SPT**

A resistência dinâmica mobilizada durante a penetração do amostrador no solo foi determinada experimentalmente através dos registros de força no topo do amostrador. Os resultados foram comparados com métodos teóricos (AOKI et al., 2007; SCHNAID et al., 2009a) desenvolvidos com base no Princípio de Conservação de Energia. Os resultados indicaram que ambos os métodos fornecem resultados confiáveis desde que se utilize o valor de eficiência do ensaio SPT determinado no topo do amostrador.

O método proposto por Aoki et al., (2007) apresentou-se bastante adequado para a determinação da resistência estática mobilizada no sistema solo-amostrador. Isso porque esse método depende apenas da determinação do índice  $N_{SPT}$  e da quantidade de energia no topo do amostrador. Por ser simples a sua aplicação, esse método pode ser de fácil incorporação na prática de projetos de fundação.

O método proposto por Schnaid et al., (2009a) forneceu valores de resistência dinâmica do solo superiores aos valores determinados experimentalmente. Isso porque, para os casos analisados, foi observado que a energia calculada através desse método forneceu valores similares à energia determinada no topo e não na base da composição de hastes. Desta forma, os resultados foram ajustados através de um fator de multiplicação que quantifica as perdas de energia que ocorrem ao longo da composição de hastes. Os resultados obtidos foram muito próximos aos valores experimentais.

A utilização das equações teóricas propostas por Aoki et al., (2007) e Schnaid et al., (2009a) forneceram excelentes resultados quando se utiliza a quantidade de energia que atinge o amostrador. Esse fato mostra a importância da quantidade de energia que efetivamente atinge o amostrador como parâmetro fundamental na determinação da resistência do solo durante a penetração do amostrador.

### 8.2.3.1 Mecanismos de reação mobilizados no ensaio SPT

A mobilização das resistências de ponta e atrito lateral oferecida pelo solo durante a cravação do amostrador SPT depende da ocorrência do embuchamento. Esta verificação poder ser facilmente incorporada à prática de execução do ensaio SPT através do controle de recuperação da amostra. Essa informação possibilita a interpretação da resistência total oferecida pelo solo e conseqüentemente permite o desenvolvimento de métodos racionais para a estimativa da capacidade de carga dos solos.

Resultados experimentais mostraram que a ocorrência do embuchamento ocorre com maior frequência em camadas de solo constituídas por argilas e siltes. No caso de solos arenosos e areias argilosas foi observado que a probabilidade de ocorrência do embuchamento do solo é baixa. Os valores das medidas de torque no ensaio SPT permitiram estimar a parcela de atrito lateral externo mobilizado durante a penetração do amostrador. Esses resultados indicaram que para solos com baixos valores de índice  $N_{SPT}$ , a penetração do amostrador mobiliza essencialmente a resistência de atrito lateral externo. À medida que os valores dos índices  $N_{SPT}$  aumentam, as parcelas de resistência de atrito lateral interno e resistência de ponta passam a contribuir com a resistência do solo.

## 8.3 Sugestões para futuras pesquisas

Através desse trabalho de pesquisa foi observado que a interpretação dos resultados, fornecidos pelo ensaio SPT, baseada na quantidade de energia que efetivamente atinge o amostrador pode dar uma grande contribuição para o desenvolvimento da área de projetos de fundações.

Apresentam-se a seguir, algumas sugestões para a realização de trabalhos futuros:

- 1) Aperfeiçoar o equipamento desenvolvido neste trabalho de pesquisa em relação à peça utilizada para conectar o amostrador e o segmento de haste instrumentado. Essa peça maciça apresenta uma impedância muito elevada quando comparada com a impedância da haste normatizada pela NBR (6484). Esse fato, apesar de não influenciar significativamente nos valores de energia, ocasiona o aparecimento de uma onda de compressão nos sinais registrados. Adicionalmente, os ensaios experimentais devem ser realizados utilizando cabos com maiores

comprimentos para permitir análises para maiores comprimentos de composição de hastes.

- 2) Avaliar através de ensaios experimentais os mecanismos de reação do solo mobilizados durante a penetração do amostrador. Essa quantificação deve ser realizada com base na compactidade e/ou consistência e no tipo do material.
- 3) Verificar através de ensaios experimentais a validade da utilização das medidas de torque no ensaio SPT para estimar o atrito lateral externo desenvolvido entre o amostrador e o solo.
- 4) Realizar ensaios experimentais em solos com diferentes comportamentos a fim de quantificar os mecanismos de reação estática e dinâmica do solo. Essas análises poderão ser incorporadas no método proposto por Aoki et al., (2007) possibilitando o seu emprego para casos onde as resistências estática e dinâmica são diferentes.
- 5) Desenvolver um novo método para o cálculo da capacidade de carga em projetos de fundações baseado na determinação da quantidade de energia que efetivamente atinge o amostrador. O método proposto por Aoki et al., (2007) pode ser utilizado na determinação da resistência total do solo em casos onde as parcelas de resistência estática e dinâmica são equivalentes.

## Referências bibliográficas

AAS, G. A study of the effect of vane shape and rate of strain in the measured values of in situ shear strength of clays. In: PROCEEDINGS, INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 6., 1965, Montreal, V.1, P.141-145.

ABOU-MATAR, H., GOBLE, G. G. SPT dynamic analysis and measurements. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 123, n. 10, p. 921 - 928, 1997.

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

AI- AWKATI, Z. **A study of the cone Penetration test in insensitive cohesive soils**. Msc thesis, Florida University. 1969.

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.

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. **D4633-05**: standard test method for energy measurement for dynamic penetrometers. West Conshohocken, PA, United States. 2005. 7p.

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

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

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

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.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA (ABGE). **Manual de Sondagens**. Boletim n. 3, 4ª edição. 1999. 73 p. São Paulo.

AVESSANI, F. P.B. **Integração de diferentes técnicas para investigação geotécnica e geoambiental de solos tropicais**. 2009. Relatório científico final. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Bauru. 48 p.

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. **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; CINTRA, J. C. A. Fatores intervenientes em variantes do método ABNT para a execução do SPT. **Solos e Rochas**, v. 21, n. 3, Dez. 1998.

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

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

BERGLAS, B. **Forspand fallriksfjaderdyna. resultat av stotvagsteoretiska studier, datorsimulering, modell-och fullskaleprovning**. 1983. Swedish Pile Commission, report 72, SGI, Stockholm.

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

BORTOLUCCI, A.A. **Caracterização geológico-geotécnica da região urbana de São Carlos (SP)**. 1983. 67 p. Dissertação de mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP.

BREDENBERG, H. **Dynamic test loading of point bearing piles**. 1982. Thesis of Doctor of Engineering. Royal Institute of Technology, Stockholm.

BROMS, B.B. **Methods of calculating the ultimate bearing capacity of piles: a summary Sols-Solils**, v.5, n.18-19, p.21-32, 1966.

BOSSCHER, P.J; SHOWERS, D.R. Effect of soil type on Standard Penetration Test input energy. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, v. 113, n.4, p. 385-389, abril 1987.

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

BUTLER, J.J. **Analysis of energy measurement methods of SPT driving system**. 1997. Master of Science Thesis in Civil Engineering, Utah State University, Logan, U.T.

CARVALHO, M. I. B; MATOS, A. C. C. **Mecânica Lagrangeana: Introdução à mecânica clássica**. 2001. Licenciatura em Engenharia Electrotécnica e de Computadores – Faculdade de Engenharia de Universidade do Porto. Disponível em: <[http://paginas.fe.up.pt/~mines/publicacoes\\_pedagogicas/apontamentos/IMC\\_Lagrange.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~mines/publicacoes_pedagogicas/apontamentos/IMC_Lagrange.pdf)>. Acesso em 10 abr. 2012.



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

CAVALCANTE, E. H; DANZIGER, B. R; DANZIGER, F. A. B. On the energy reaching the sampler during SPT. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE APPLICATION OF STRESS WAVE THEORY TO PILES, 8., 2008, Lisboa, v. 1, P.737-742.

CAVALCANTE, et al. Campos experimentais brasileiros. **Geotecnia: Revista Luso-Brasileira de Geotecnia**, n. 111, p.99-205, novembro 2007.

CINTRA, J.C.A., CARVALHO, D., GIACHETTI, H.L., BORTOLUCCI, A.A., ALBIERO, J.H. Campo experimental de fundações em São Carlos. In: II SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS, 1991, São Paulo, anais ABMS/ABEF, v. 1, P.96-105.

CINTRA, J.C.A; AOKI, N. **Projeto de fundações em solos colapsíveis**. São Carlos, Serviço Gráfico da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2009. 99p.

CINTRA, J.C.A; AOKI, N. 2008. **SGS 5817-Engenharia de Fundações (Notas de aula): Investigação do subsolo**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

CLAYTON, C.R.I. **The standard penetration test (SPT) methods and use**. 1993. CIRIA Report, University of Surrey, 129 p.

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

DANIEL, C.R. **Energy transfer and grain size effects during the standard penetration test (SPT) and large penetration test (LPT)**. 2008. 329p. Ph.D. Dissertation, University of British Columbia, Vancouver, B.C.

DANIEL, C.R.; HOWIE, J.A.; JACKSON, R.S.; WALKER, B. Review of standard penetration test short rod corrections. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering Engineering - ASCE**, v. 131, n.4, p. 489-497, Abr. 2005.

DAVIDSON, J.L.; MAULTSBY; SPOOR. **Standard penetration test energy calibrations**. A Report to the Florida Department of Transportation, contract n ° BB261, 1999.

DÉCOURT, L. The standard penetration test – state of the art. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 12., 1989, Rio de Janeiro, v. 4.

DE MELLO, V.F.B. The standard penetration test. In: PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 4., 1971, Porto Rico, v. 1, P. 1-87.

DE MIO, G. **Condicionantes geológicas na interpretação de ensaios de piezocone para identificação estratigráfica na investigação geotécnica e geoambiental**. Tese (Doutorado em Geotecnia)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2005, 354p.

DE RUITER, J.; BERINGEN, F. L. Pile foundations for large North sea structures. **Marine Geotechnology**, v. 3, n.3, p. 267-314, 1979.

DRUMRIGHT, E. E. Influence of hammer type on SPT results. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 122, n. 7, p. 598 - 599, 1996.

GIACHETI, H.L., ROHM, S.A., NOGUEIRA, J.B., CINTRA, J. C. A. Propriedades geotécnicas do sedimento cenozóico. IN: FERREIRA, A. A., NEGRO JUNIOR, A., ALBIERO, J. H., CINTRA, J. C. A. orgs. **Solos do interior de São Paulo**.1993, São Paulo, ABMS, USP/SC. CAP 6, p. 143 – 175.

GIACHETI, H.L., DE MIO, G., DOURADO, J.C., FILHO, W.M. Comparação entre resultados de ensaios sísmicos Down-Hole e Cross-Hole no campo experimental da Unesp de Bauru. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2006, Curitiba, anais COBRAMSEG.

HERMANSSON, GRAVARE. Static Bearing capacity of piles from dynamic measurements. Sartryck ur Vag och vattenbyggn. p. 8-9, 1978.

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.

HATANAKA, M.; UCHIDA, A. Empirical correlation between penetration resistance and effective friction of sandy soil. **Soils and Foundation**, v. 36, n. 4, p. 1-9, 1996.

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

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.

JANSZ, J. W; VOITUS VAN HAMME, G. E. J. S. L; GERRITSE, A; BOMER, H. Controlled pile driving above and under water with a hydraulic hammer. In: OFFSHORE TECHNICAL CONFERENCE, 8, PAPER 2477. 1976, DALLAS, P. 593.

JOHNSEN, L. F; JAGELLO, J. J. Discussion of energy efficiency for standard penetration test by Edgar Odebrecht, Fernando Schnaid, Marcelo Maia Rocha and George de Paula Bernardes. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering Engineering - ASCE**, v. 133, n.4, p. 486-487, Abr. 2007.

KORMANN, A. **Comportamento geomecânico da Formação Guabirotuba: estudos de campo e laboratório**. 2002. 429p. Tese (Doutorado em Geotecnia)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

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.

KOVACS, W.D. Results and interpretation of SPT practice study. **Technical Note on Geotechnical Testing Journal**, ASTM, v.4, n.3, p. 126-129, 1981.

KOVACS, W.D; SALOMONE, L. A. SPT hammer energy measurement. **Journal of Geotechnical Engineering Division**, Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 108 (GT4): 599-620, 1982.

KREYSZIG, E. **Advanced engineering mathematics**. 6ª edição. United States: John Wiley & Sons, Inc., 1988. p. 294.

LOBO, B.O.; SCHNAID, F.; ROCHA, M.M. Simulação numérica de ensaios de penetração dinâmica. In: IV CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE GEOTECNIA, 2008, Lisboa.

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

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

MAGALHÃES, D. V. **Extensometria e sensores de aceleração**. 2012. SEM0539 – Instrumentação e sistemas de medidas. Engenharia mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos. Disponível em: <[http://www.mecatronica.eesc.usp.br/wiki/upload/c/ca/SEM0539\\_AulaLab3.pdf](http://www.mecatronica.eesc.usp.br/wiki/upload/c/ca/SEM0539_AulaLab3.pdf)>. Acesso em 19 mar. 2012.

MORGANO, C.M.; LIANG, R.Y. Energy transfer in SPT – rod length effect. In: PROCEEDINGS, INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE APPLICATION OF STRESS-WAVE THEORY TO PILES, 4., 1992, Balkema, P.121-127.

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

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

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

ODEBRECHT, E; SCHNAID, F; ROCHA, M.M; BERNARDES, G.P. Transferência de energia no ensaio SPT: efeito do comprimento de hastes e da magnitude dos deslocamentos. **Solos e Rochas- Revista Latino-Americana de Geotecnia**, ABMS, São Paulo, v. 27, n. 1, p. 69-82, 2004.

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

PALACIOS, A. **The theory and measurement of energy transfer during standard penetration test sampling**. 1977. Doctoral Thesis in Philosophy, University of Florida. Florida.

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.

RANDOLPH, M. F., WROTH, C. P. Analysis of deformation of vertically loaded piles. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, v. 104, n. GT12, p. 1465 - 1488, 1978.

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

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

RAUSCHE, F; GOBLE, G. G; LIKINS, G. E. Dynamic determination of pile capacity. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 3, n.3, p. 367, Mar. 1985

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

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

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

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

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.

SOUZA, J. M. S. **A influência da compactidade das areias nas correlações entre os ensaios de cone e o SPT**. 2009. Dissertação de mestrado- Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Rio de Janeiro- RJ. 240 p.

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

SY, A. **Energy measurements and correlations of the standard penetration test (SPT) and becker penetration test (BPT)**. 1993. 199p. Ph. D. Dissertation (Department of Civil Engineering), University of British Columbia, Vancouver, 1993.

TERZAGHI, K; PECK, R. B. **Soil exploration**. 1ª edição, Chapter 7. New York: John Willey & Sons, Inc. 1948.

THOMSON, W. T; DAHLEH, M. D. **Theory of vibration with applications**. 5ª edição. New Jersey: Prentice Hall, 1998. p. 524.

TIMOSHENKO, G.; GODIER, J. N. **Teoria da elasticidade**. 3ª edição, Rio de Janeiro. Editora Guanabara Dois S.A. 1980. 545p.

VAROTO, S. P. 2009. **Vibrações mecânica: teoria e prática – características dos sensores**. Notas de aula. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

VÉŠIC, 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.

YOUD, T.L; BATHOLOMEW, H.W; STEIDL, J.H. SPT hammer energy ratio versus drop height. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, p. 397-400, Mar. 2008.

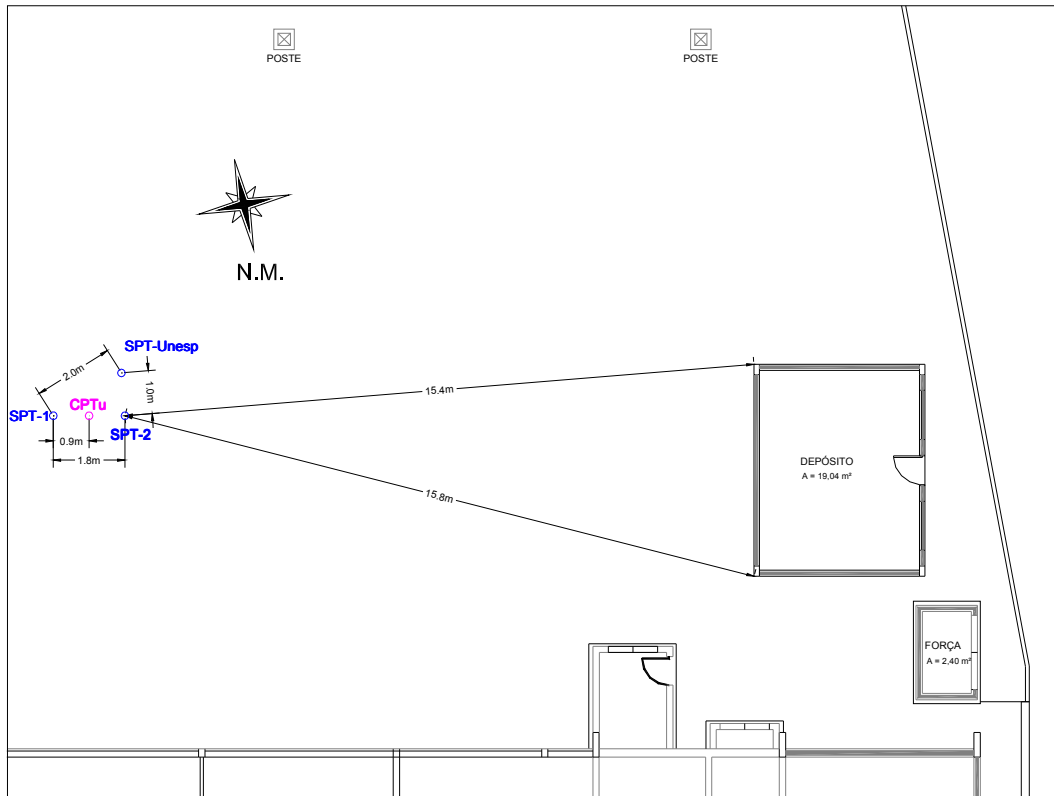
# **Apêndice A**

## **Ensaio de campo**

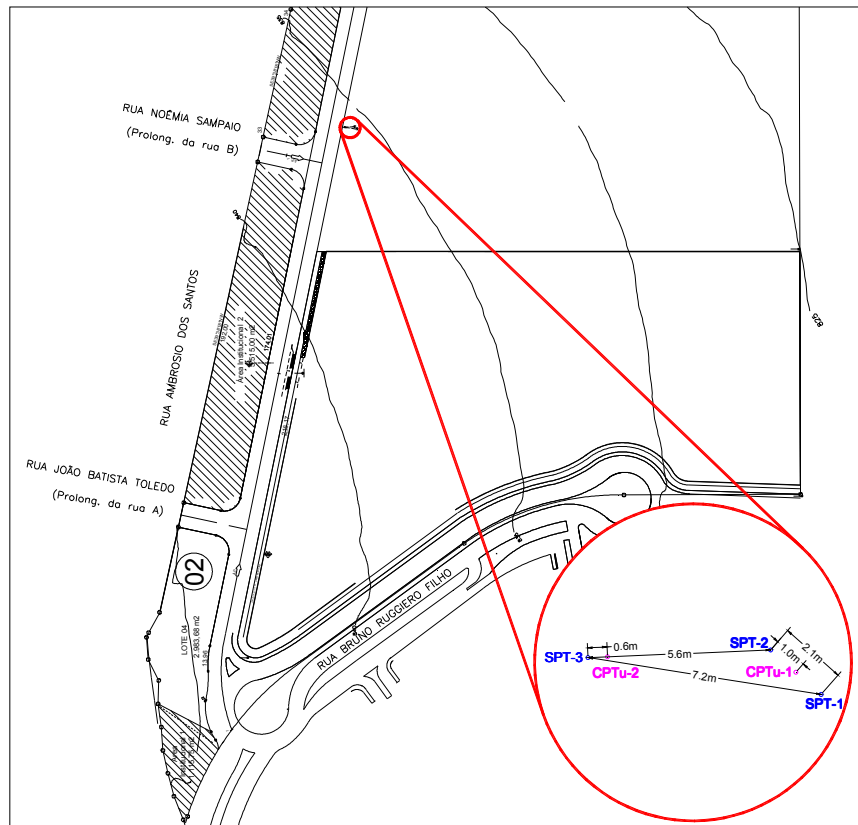
---



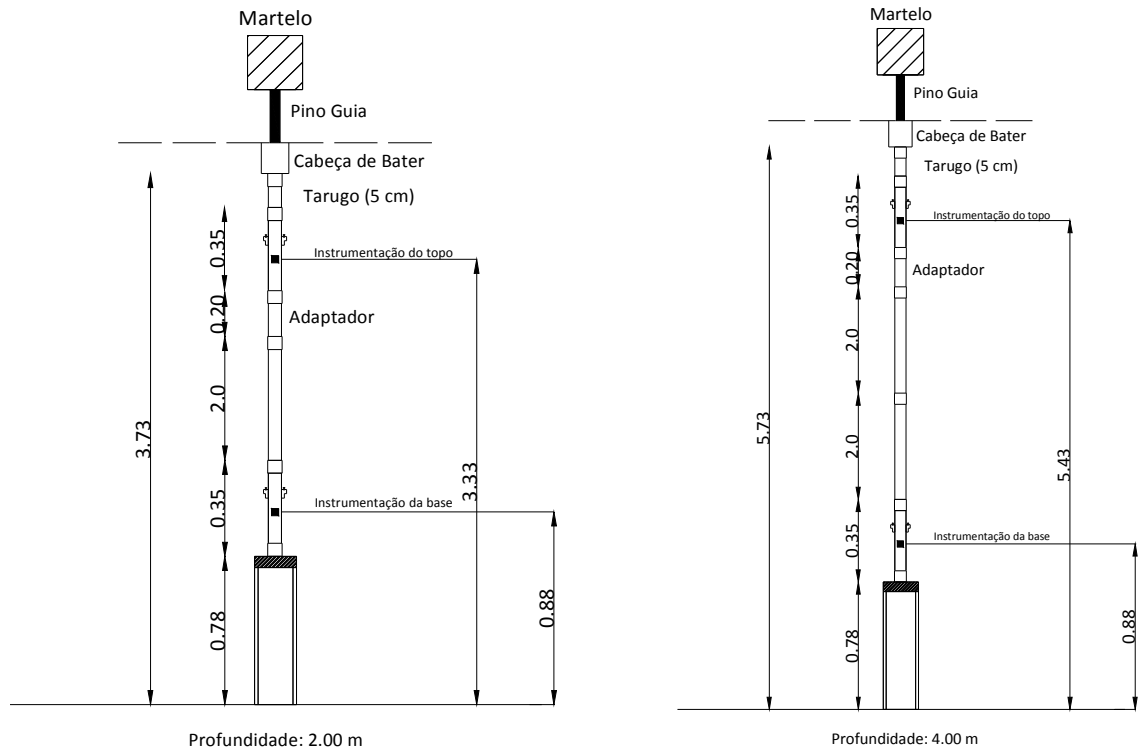




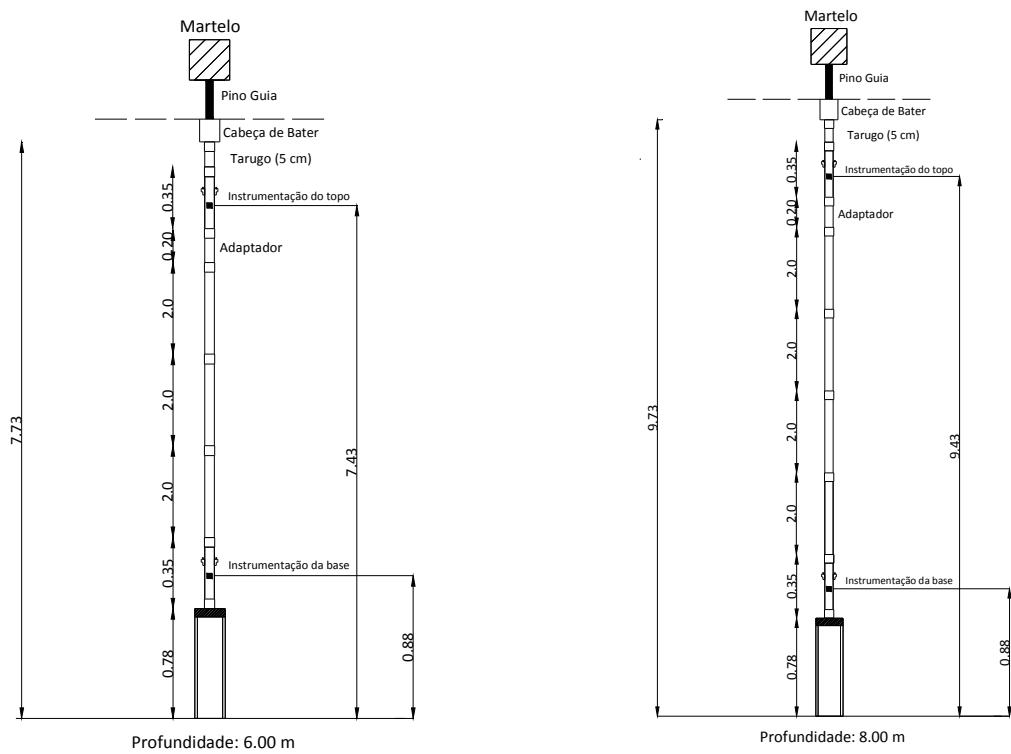
**Figura B.1-** Locação dos ensaios SPT e CPTu realizados no Campo Experimental da UNESP de Bauru (SP)



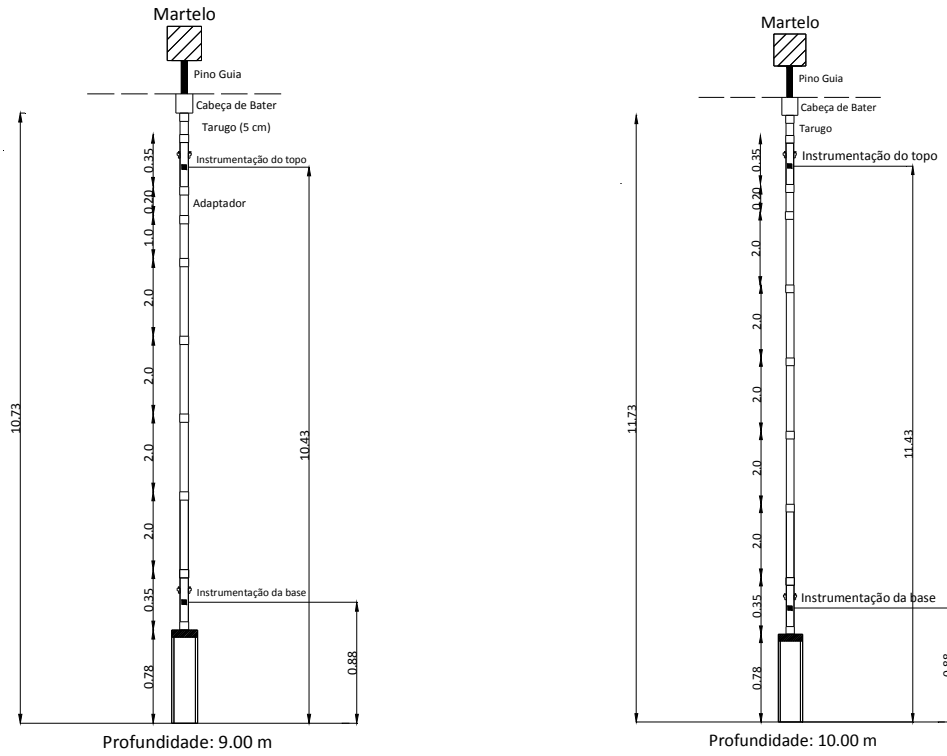
**Figura B.2-** Locação dos ensaios SPT e CPTu realizados no Loteamento residencial em São Carlos (SP)



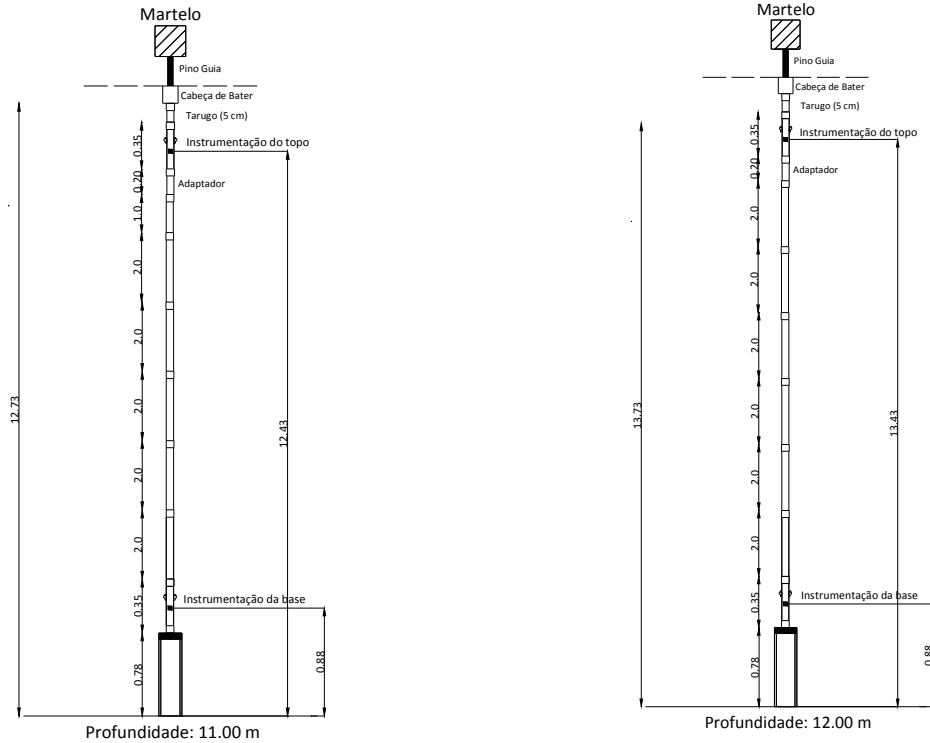
**Figura B.3-** Esquema do posicionamento da instrumentação durante os ensaios de campo (Profundidade: 2 e 4 metros)



**Figura B.4-** Esquema do posicionamento da instrumentação durante os ensaios de campo (Profundidade: 6 e 8 metros)



**Figura B.5-** Esquema do posicionamento da instrumentação durante os ensaios de campo (Profundidade: 9 e 10 metros)



**Figura B.6-** Esquema do posicionamento da instrumentação durante os ensaios de campo (Profundidade: 11 e 12 metros)

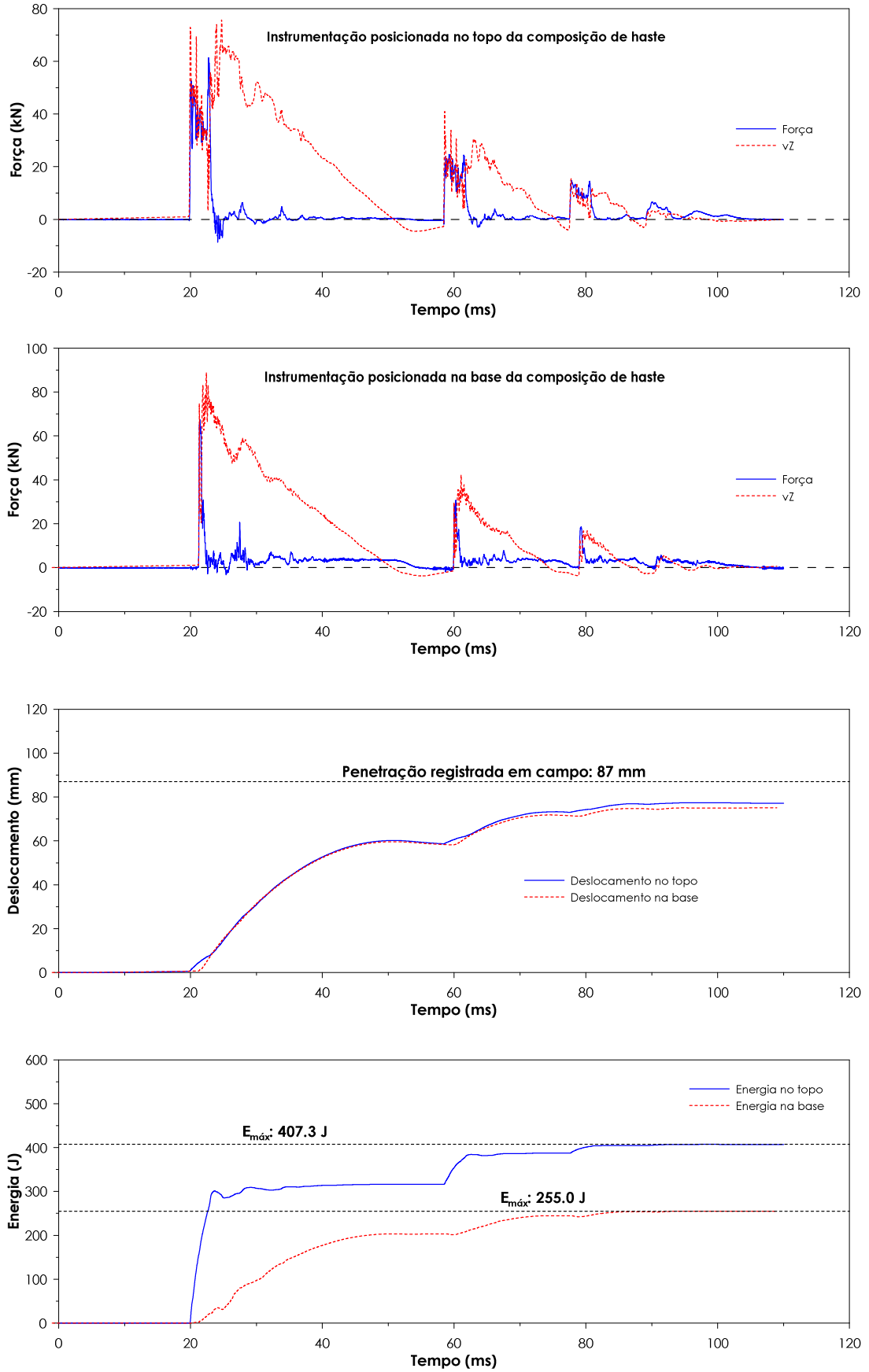


# **Apêndice B**

## **Resultados típicos dos ensaios SPT instrumentados**

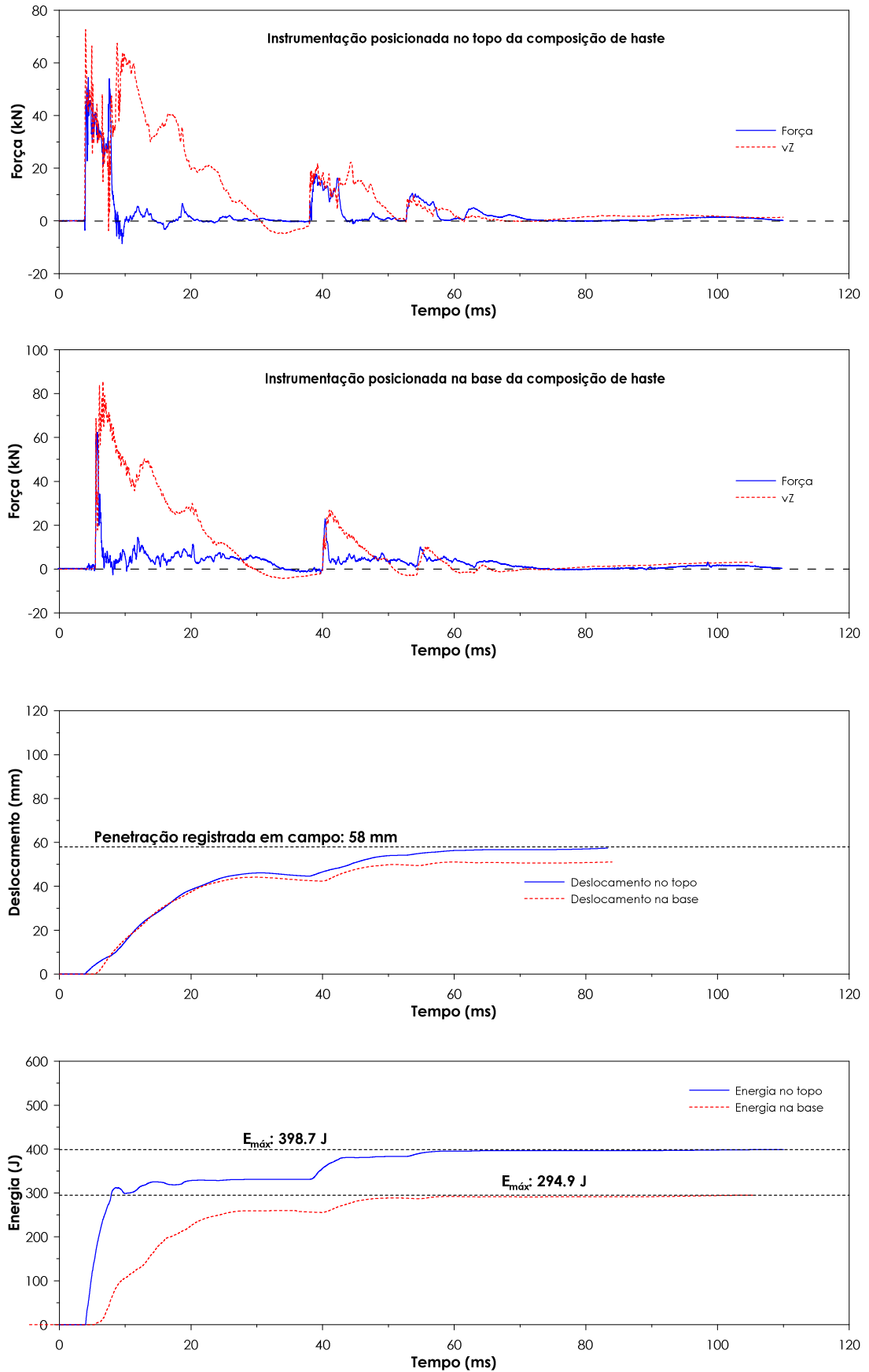
---



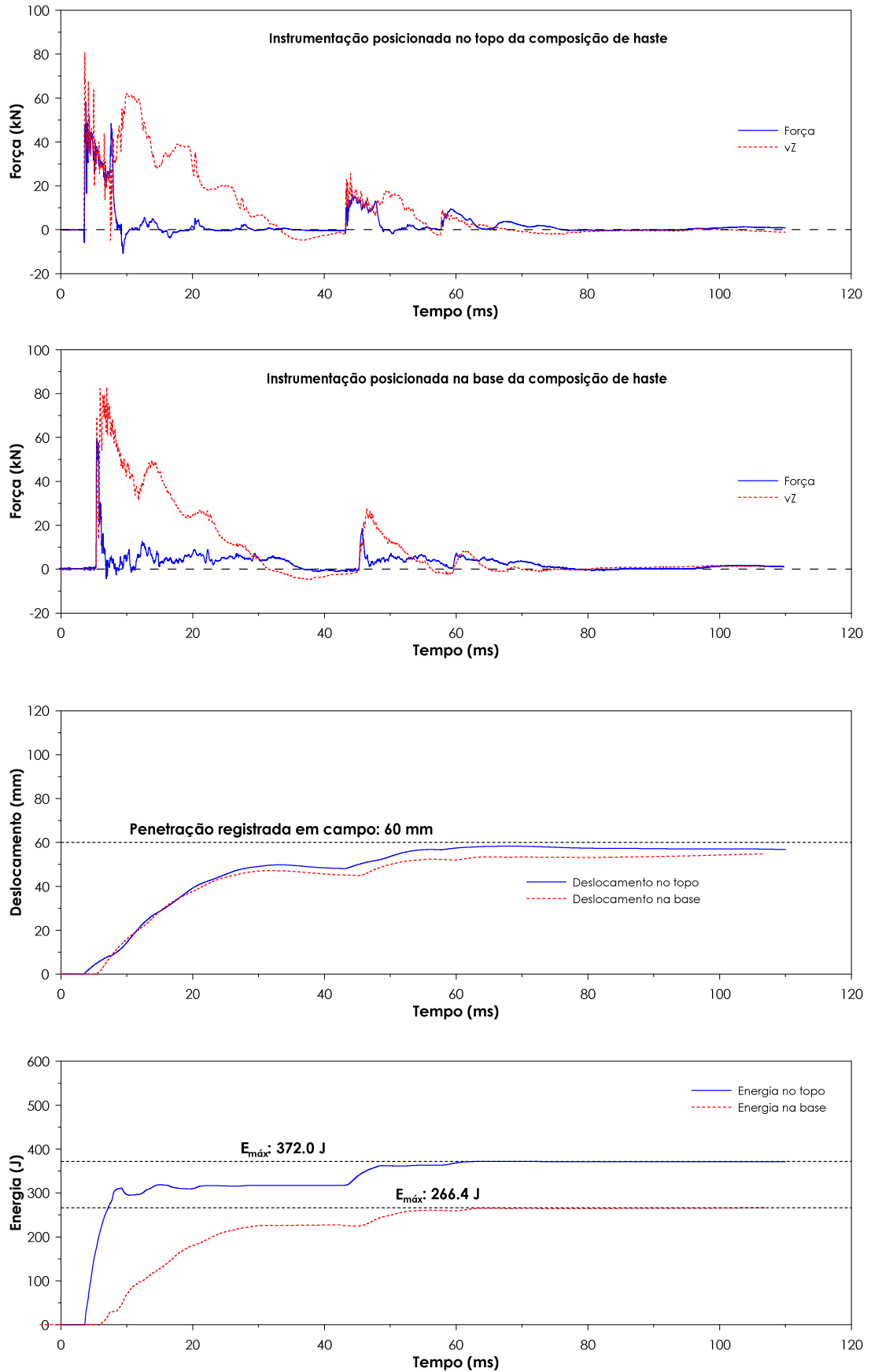


**Figura B.1-** Resultados para ensaio SPT realizado no Campo experimental da UNESP/Bauru (SP) (Equipamento convencional - Prof: 6 m - 3º golpe)

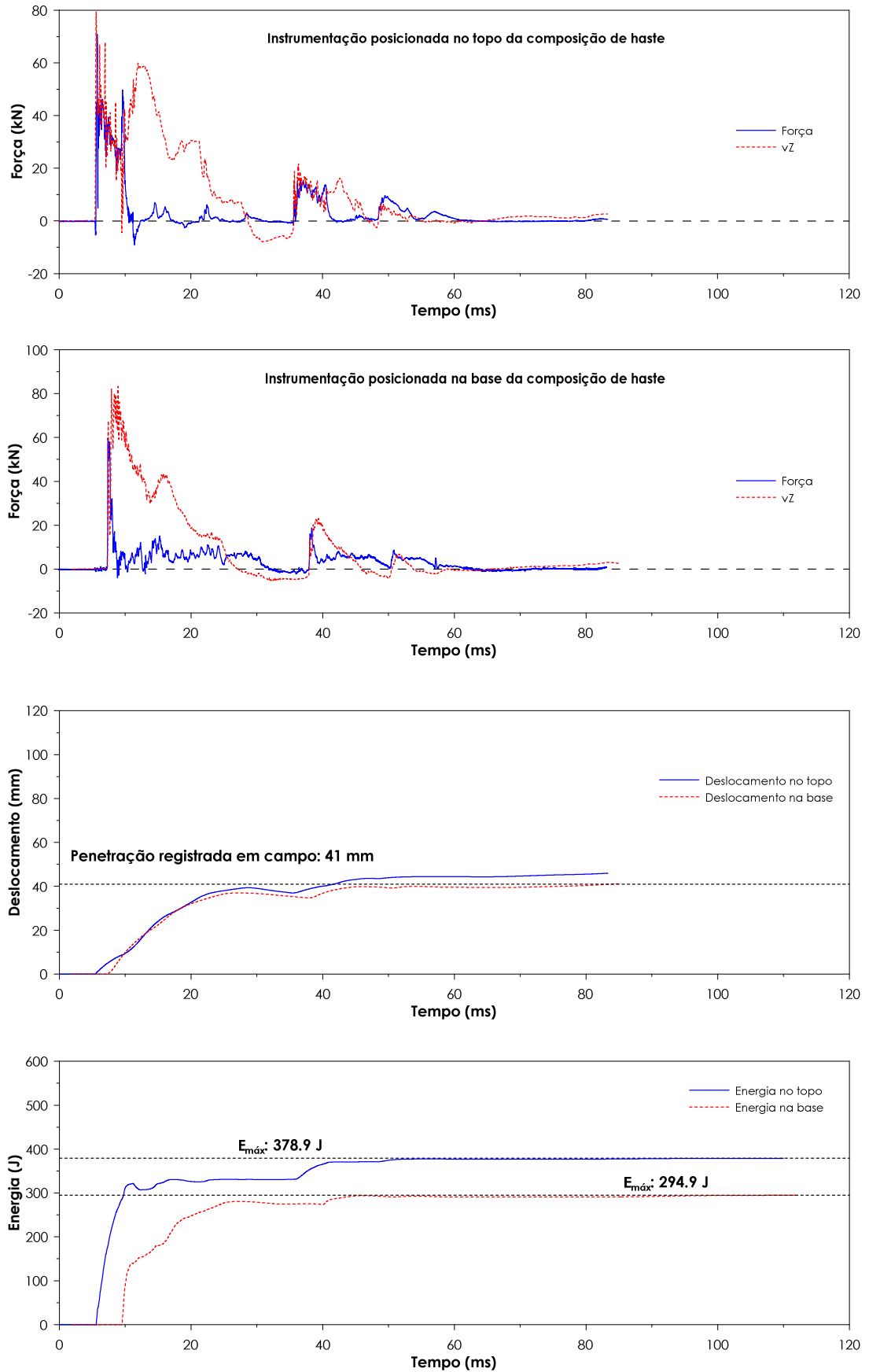




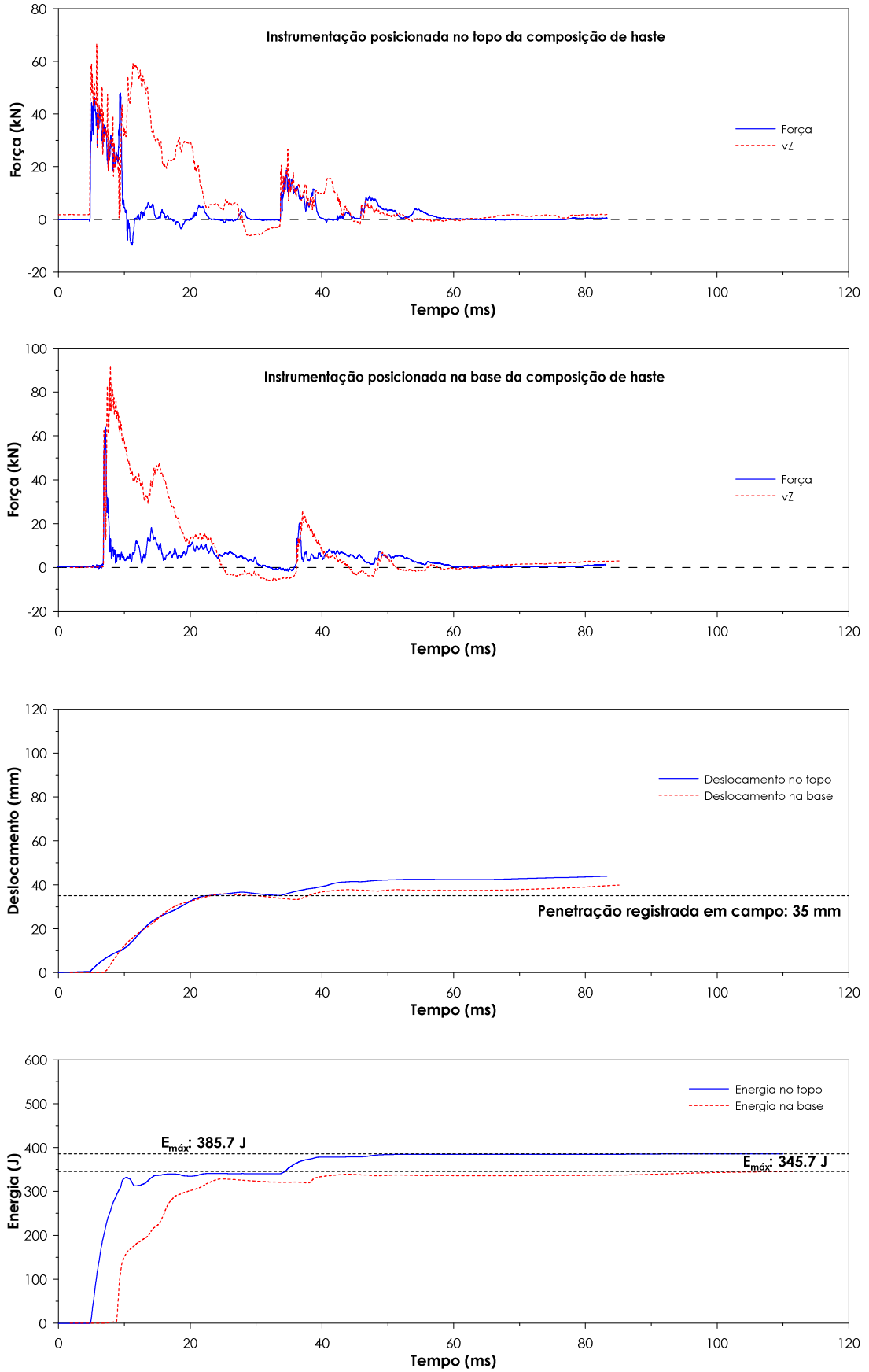
**Figura B.2-** Resultados para ensaio SPT realizado no Campo experimental da UNESP/Bauru (SP) (Equipamento convencional - Prof: 8 m - 5º golpe)



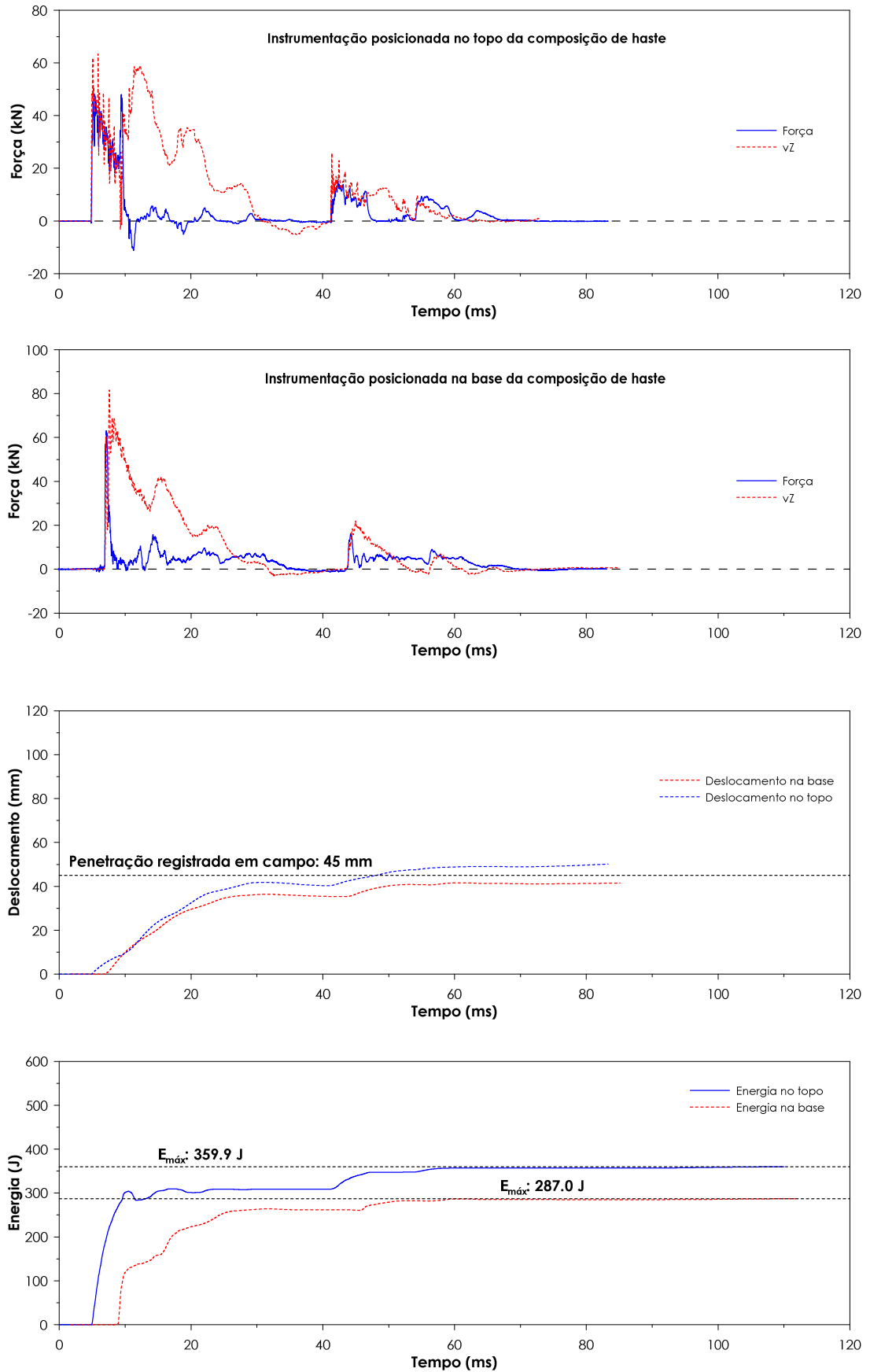
**Figura B.3-** Resultados para ensaio SPT realizado no Campo experimental da UNESP/Bauru (SP) (Equipamento convencional - Prof: 9 m - 4º golpe)



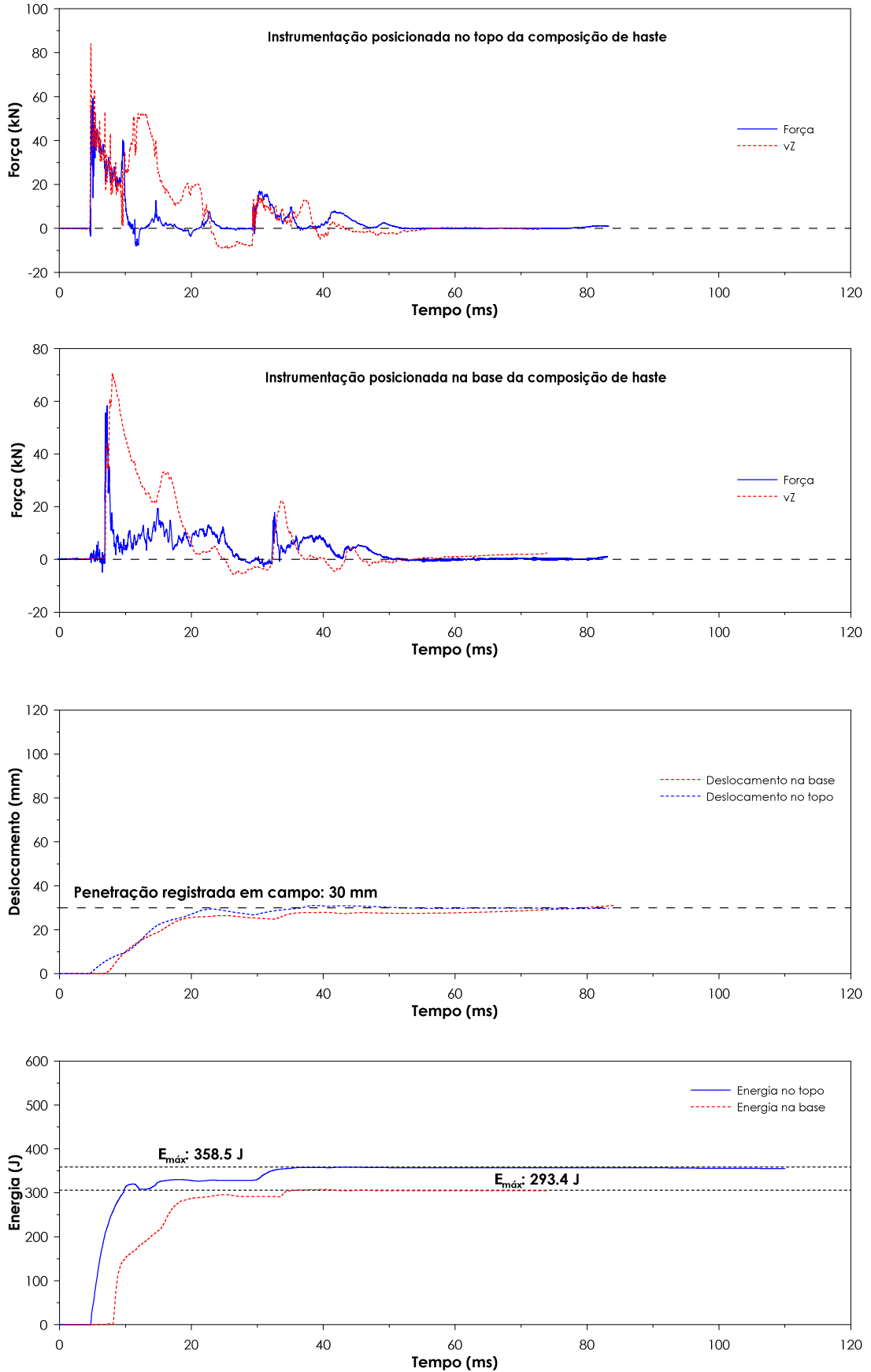
**Figura B.4-** Resultados para ensaio SPT realizado no Campo experimental da UNESP/Bauru (SP) (Equipamento convencional - Prof: 9 m - 7º golpe)



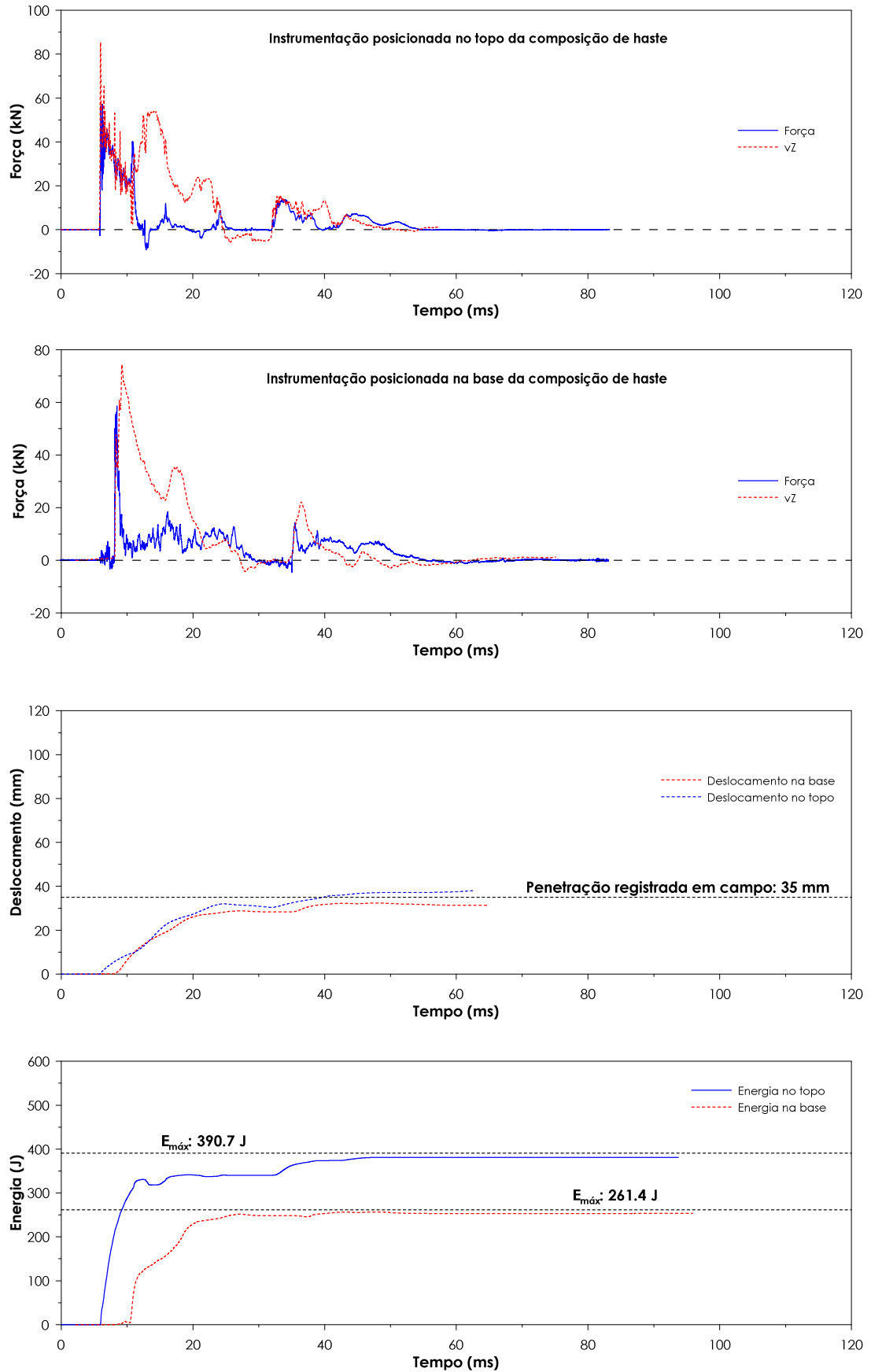
**Figura B.5-** Resultados para ensaio SPT realizado no Campo experimental da UNESP/Bauru (SP) (Equipamento convencional - Prof: 10 m - 6º golpe)



**Figura B.6-** Resultados para ensaio SPT realizado no Campo experimental da UNESP/Bauru (SP) (Equipamento convencional - Prof: 10 m - 10° golpe)



**Figura B.7-** Resultados para ensaio SPT realizado no Campo experimental da UNESP/Bauru (SP) (Equipamento convencional - Prof: 11 m - 6º golpe)



**Figura B.8-** Resultados para ensaio SPT realizado no Campo experimental da UNESP/Bauru (SP) (Equipamento convencional - Prof: 11 m - 8° golpe)

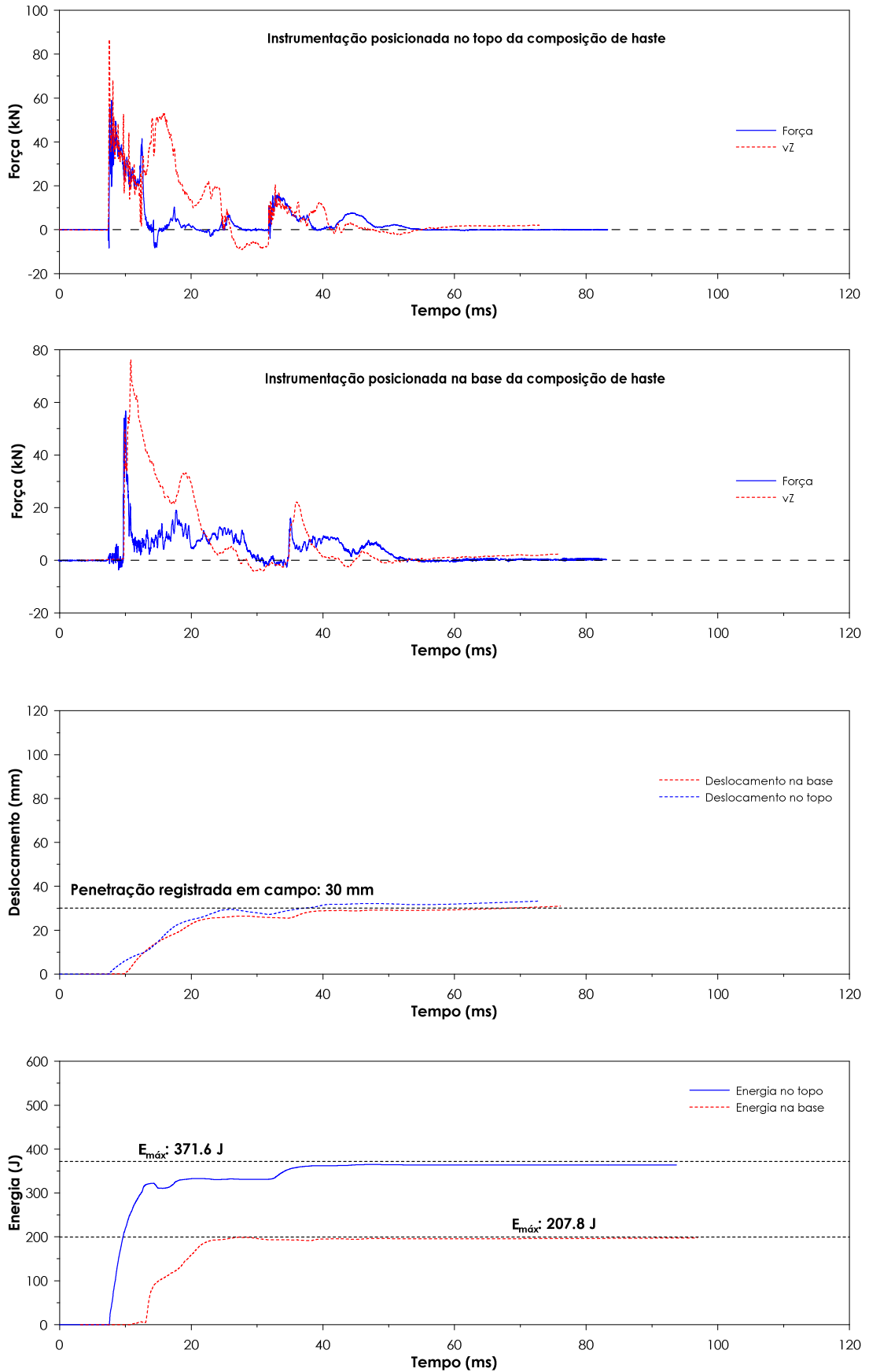
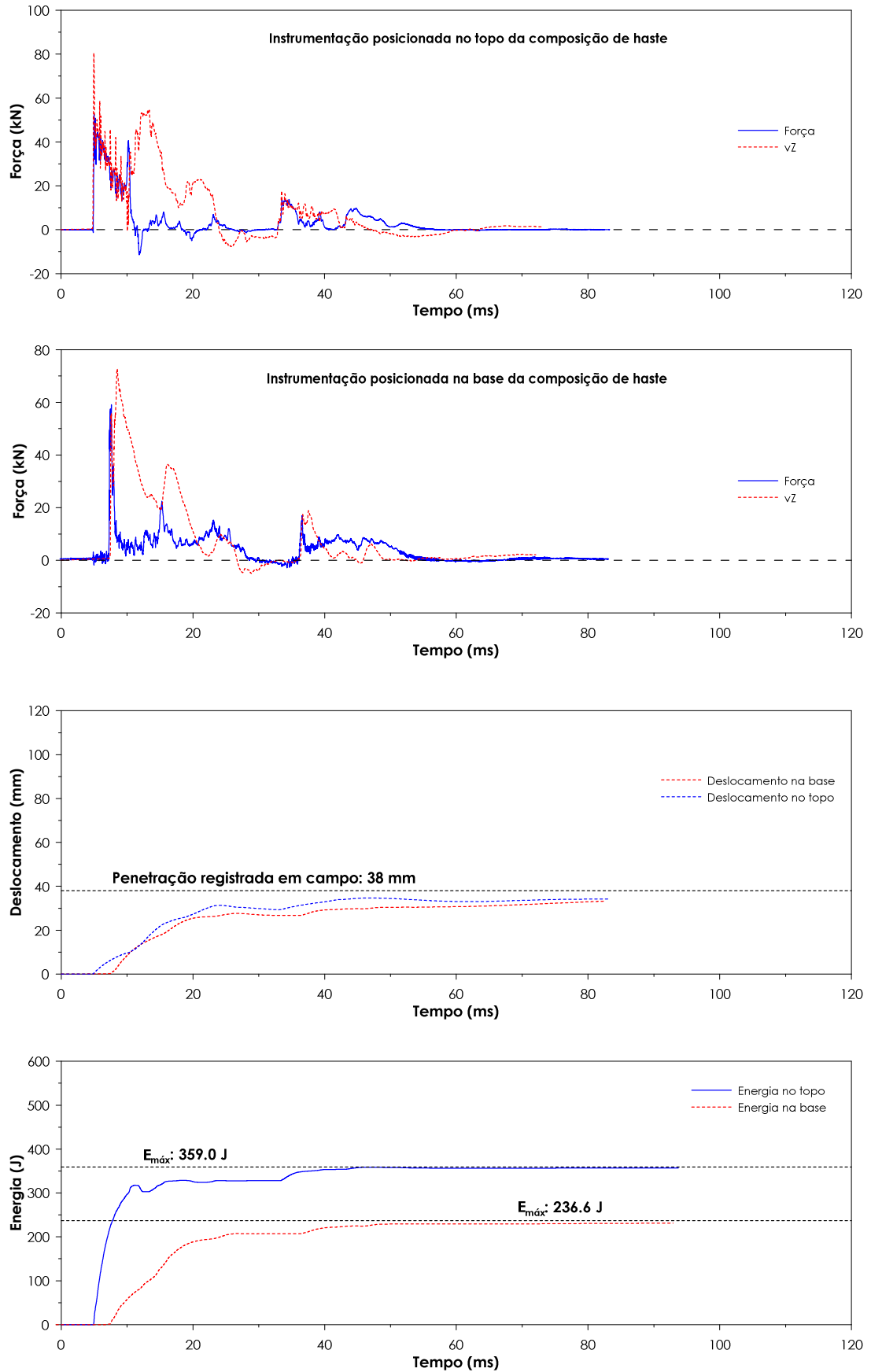


Figura B.9- Resultados para ensaio SPT realizado no Campo experimental da UNESP/Bauru (SP) (Equipamento convencional - Prof: 11 m - 12° golpe)





**Figura B.10-** Resultados para ensaio SPT realizado no Campo experimental da UNESP/Bauru (SP) (Equipamento convencional - Prof: 12 m - 8° golpe)

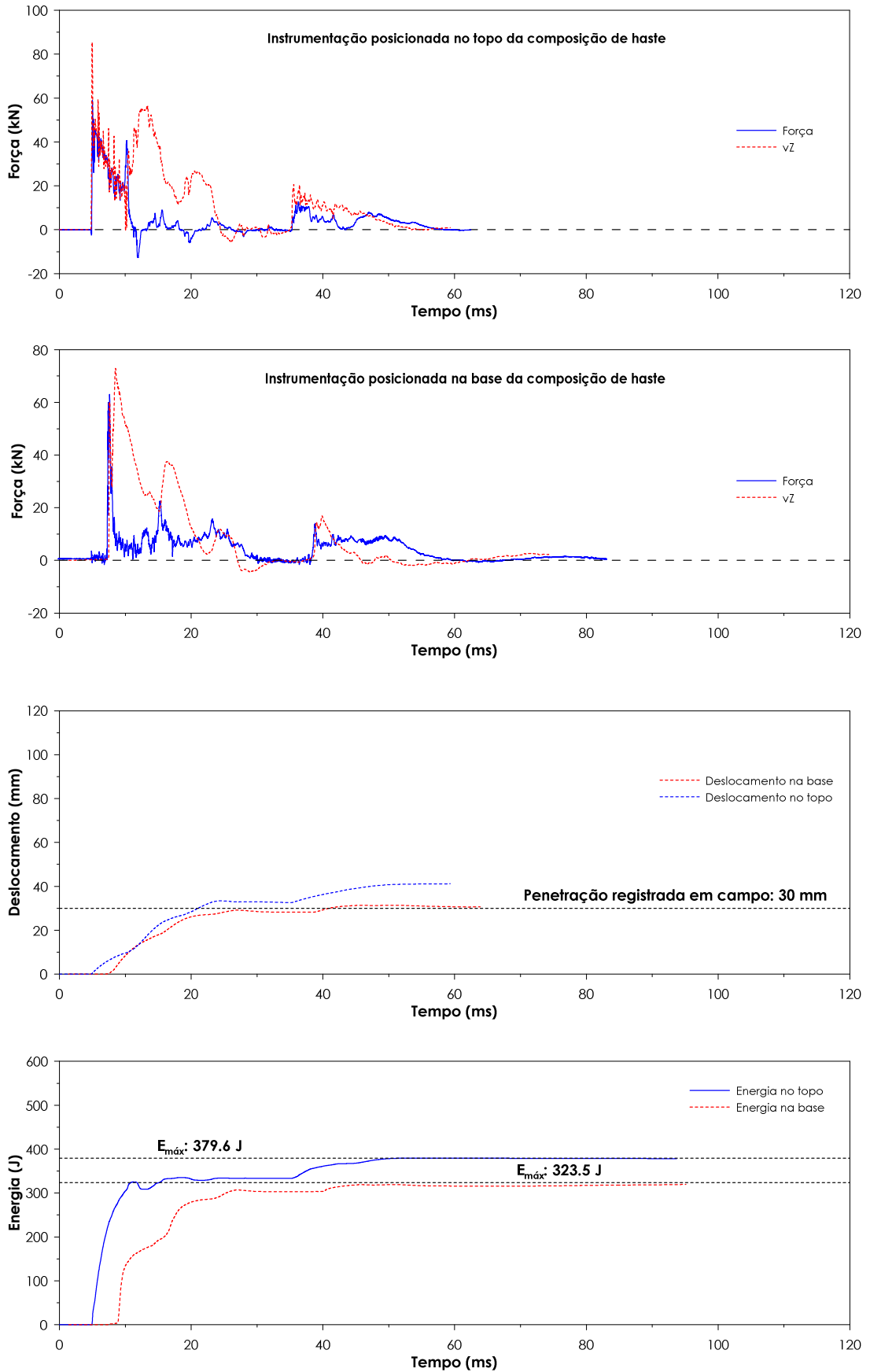
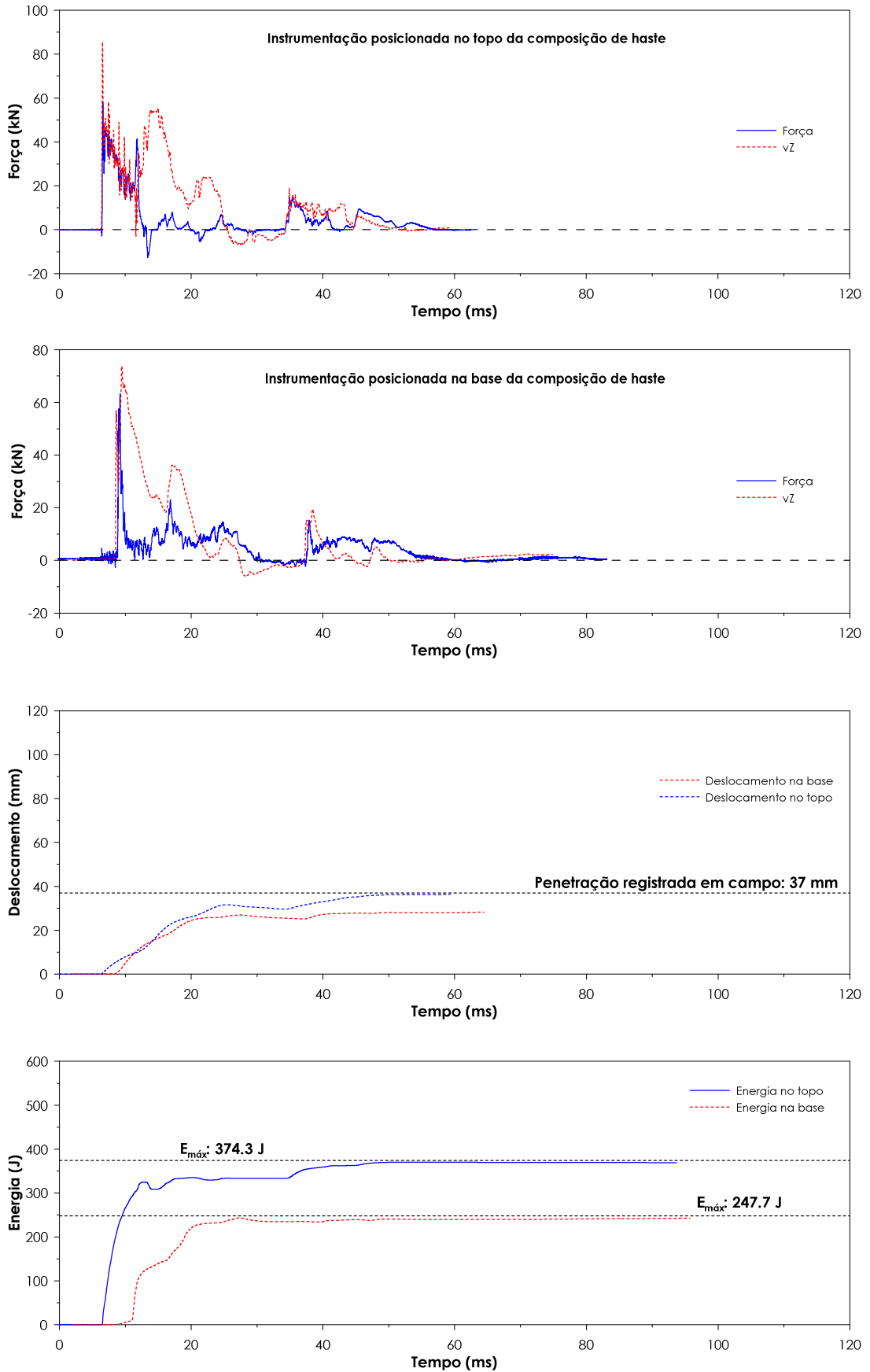


Figura B.11- Resultados para ensaio SPT realizado no Campo experimental da UNESP/Bauru (SP) (Equipamento convencional - Prof: 12 m - 11° golpe)



**Figura B.12-** Resultados para ensaio SPT realizado no Campo experimental da UNESP/Bauru (SP) (Equipamento convencional - Prof: 12 m - 13° golpe)

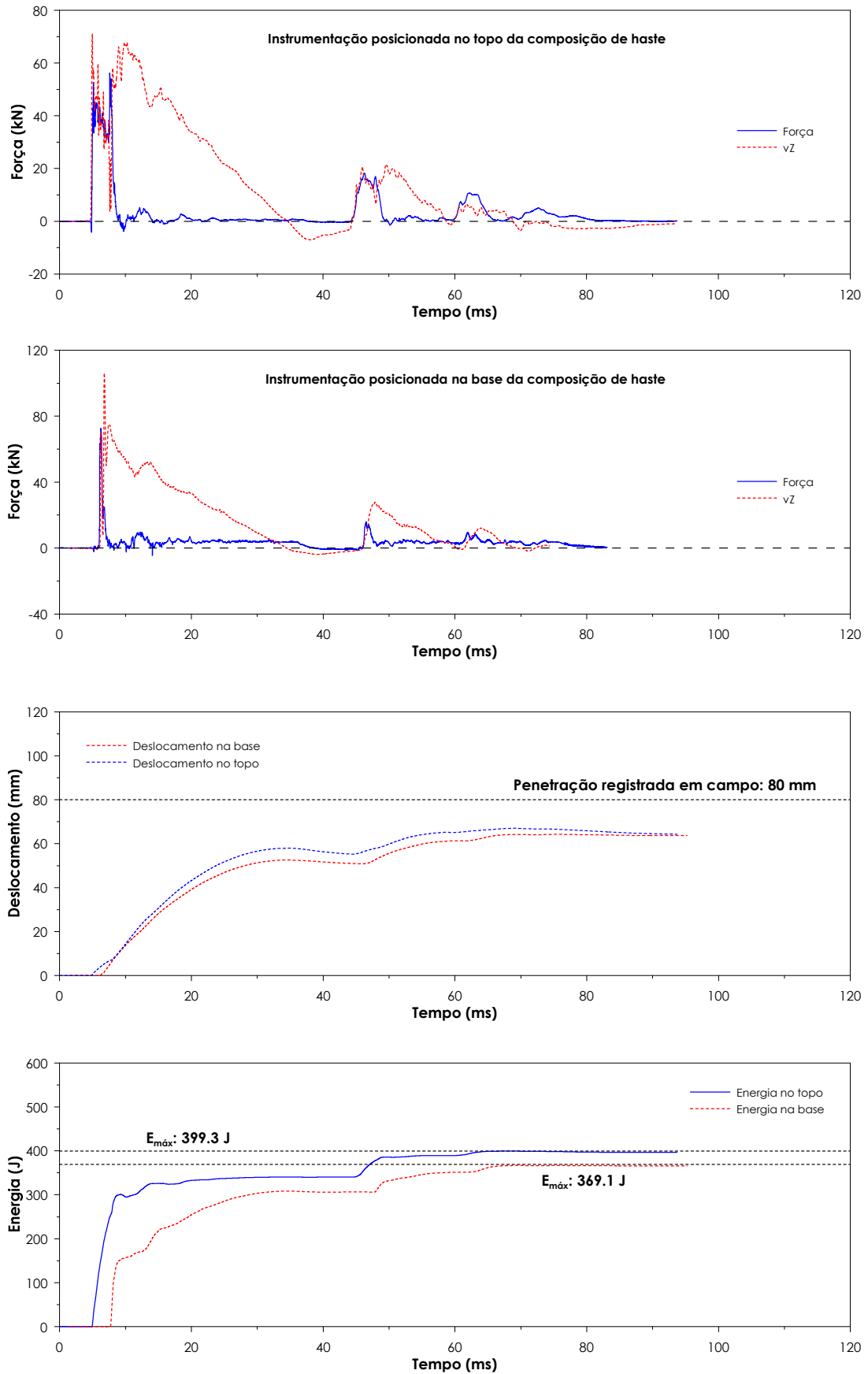
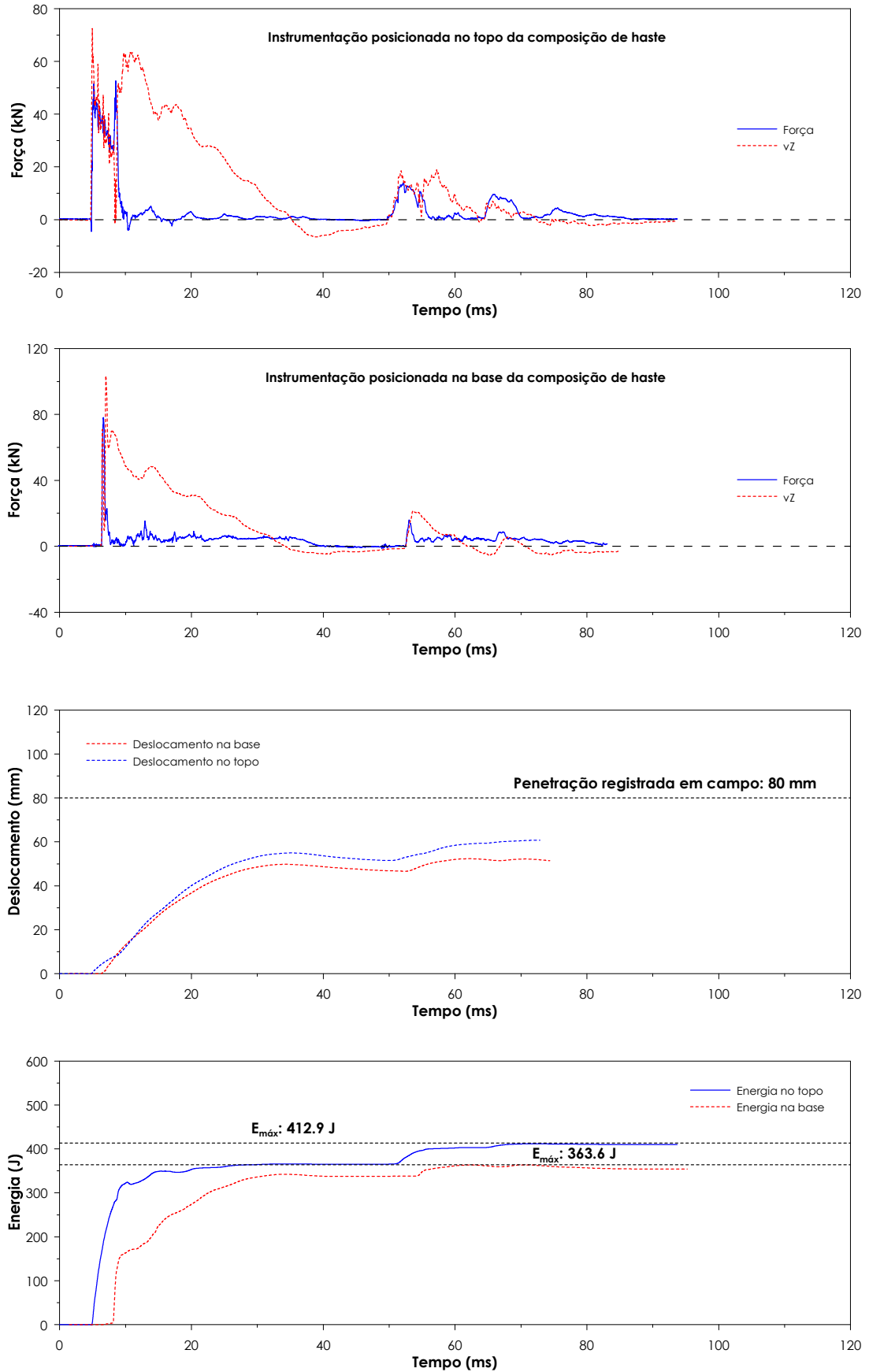
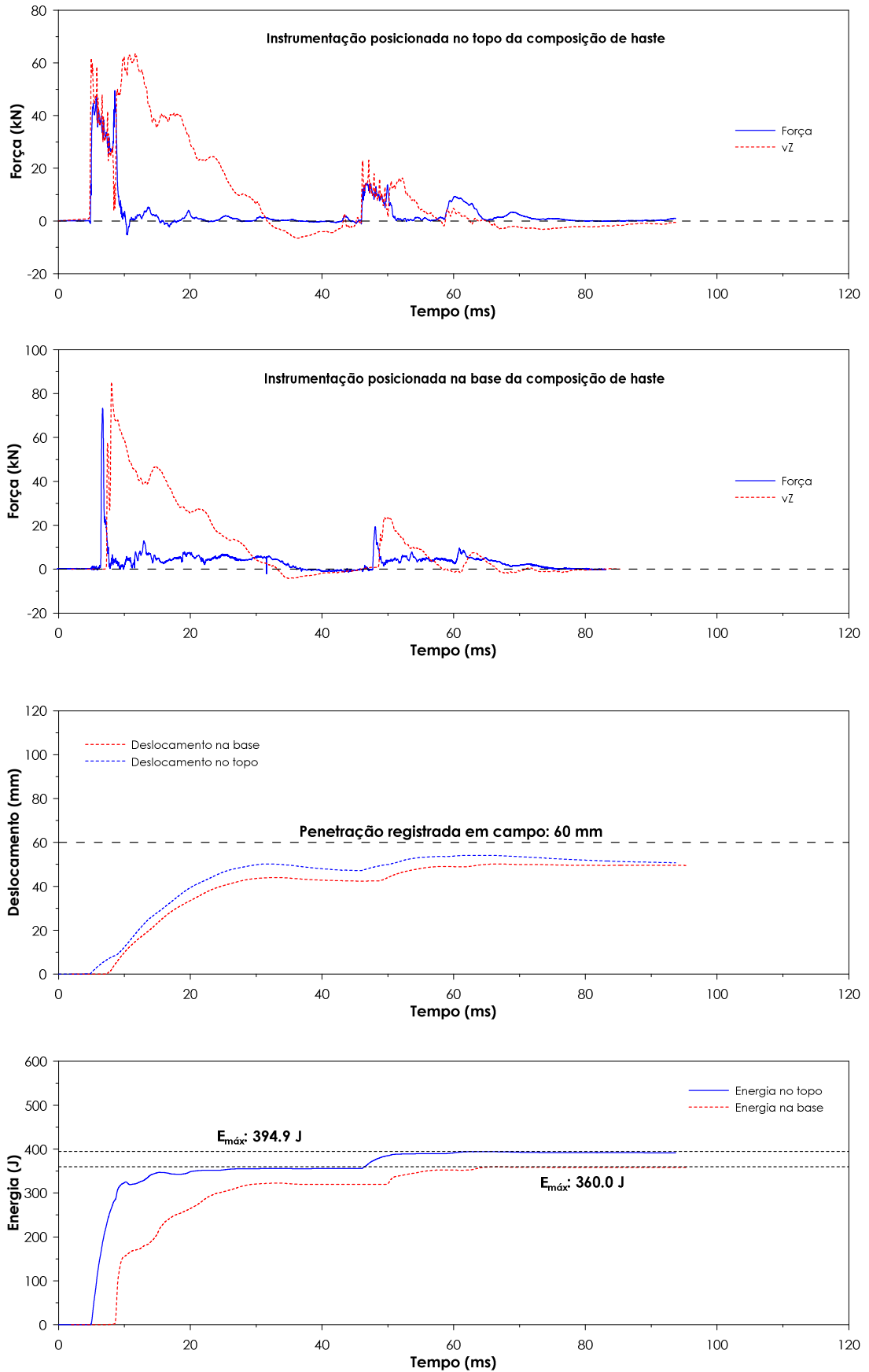


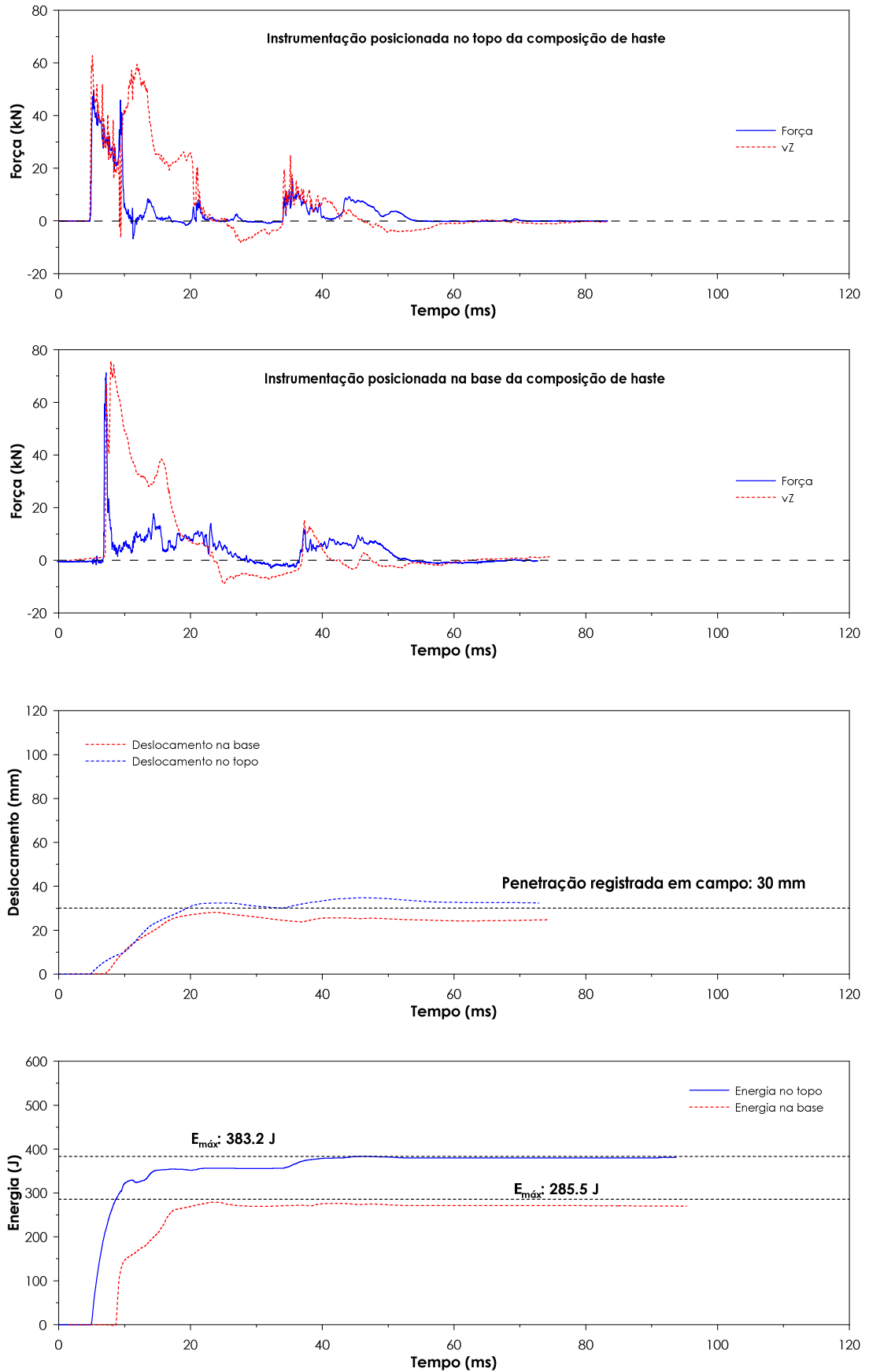
Figura B.13- Resultados para ensaio SPT realizado no Campo experimental da UNESP/Bauru (SP) (Equipamento mecanizado - Prof: 6 m - 4º golpe)



**Figura B.14-** Resultados para ensaio SPT realizado no Campo experimental da UNESP/Bauru (SP) (Equipamento mecanizado - Prof: 8 m - 5° golpe)



**Figura B.15-** Resultados para ensaio SPT realizado no Campo experimental da UNESP/Bauru (SP) (Equipamento mecanizado - Prof: 8 m - 7º golpe)



**Figura B.16-** Resultados para ensaio SPT realizado no Campo experimental da UNESP/Bauru (SP) (Equipamento mecanizado - Prof: 10 m - 7º golpe)

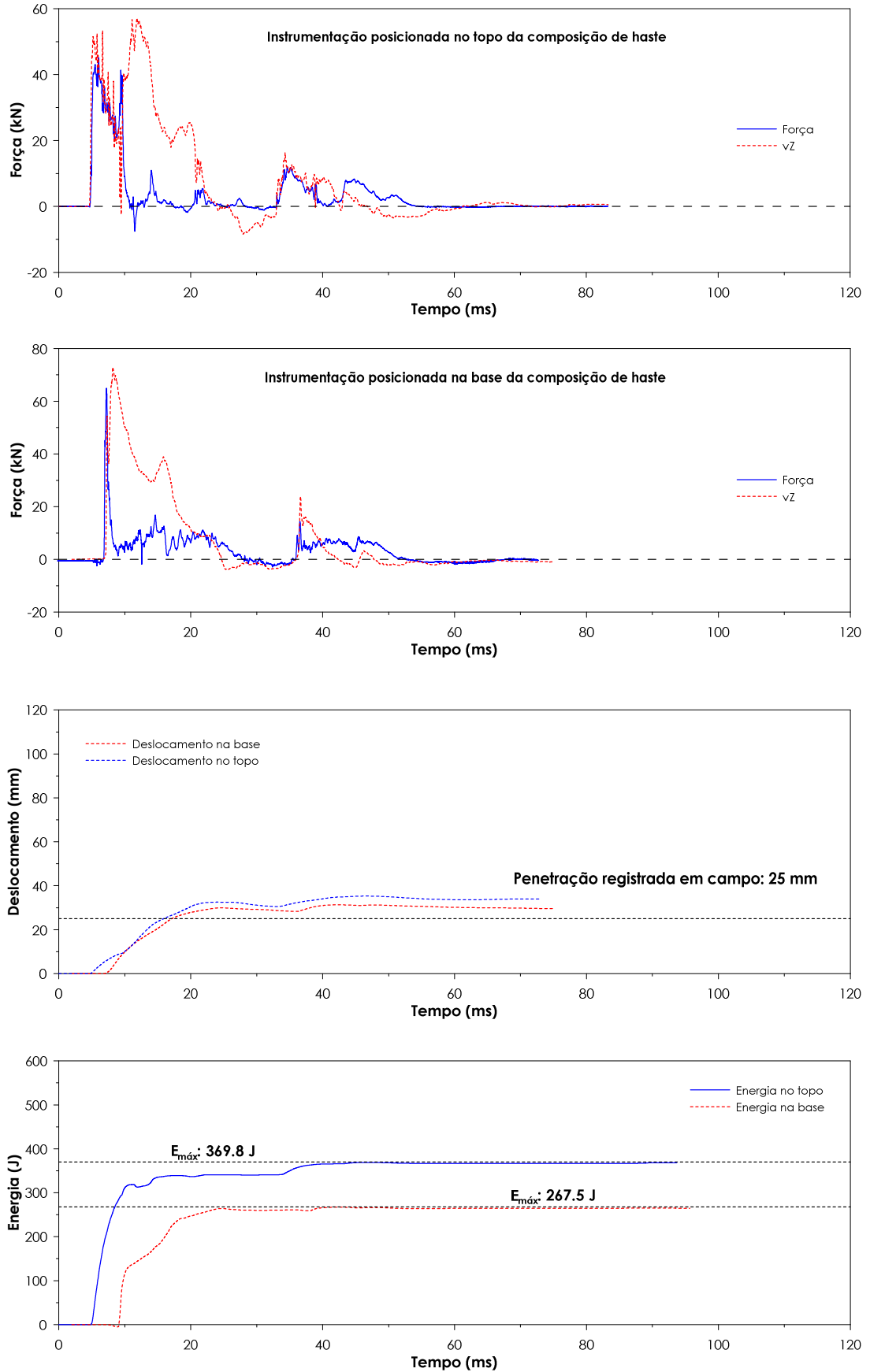
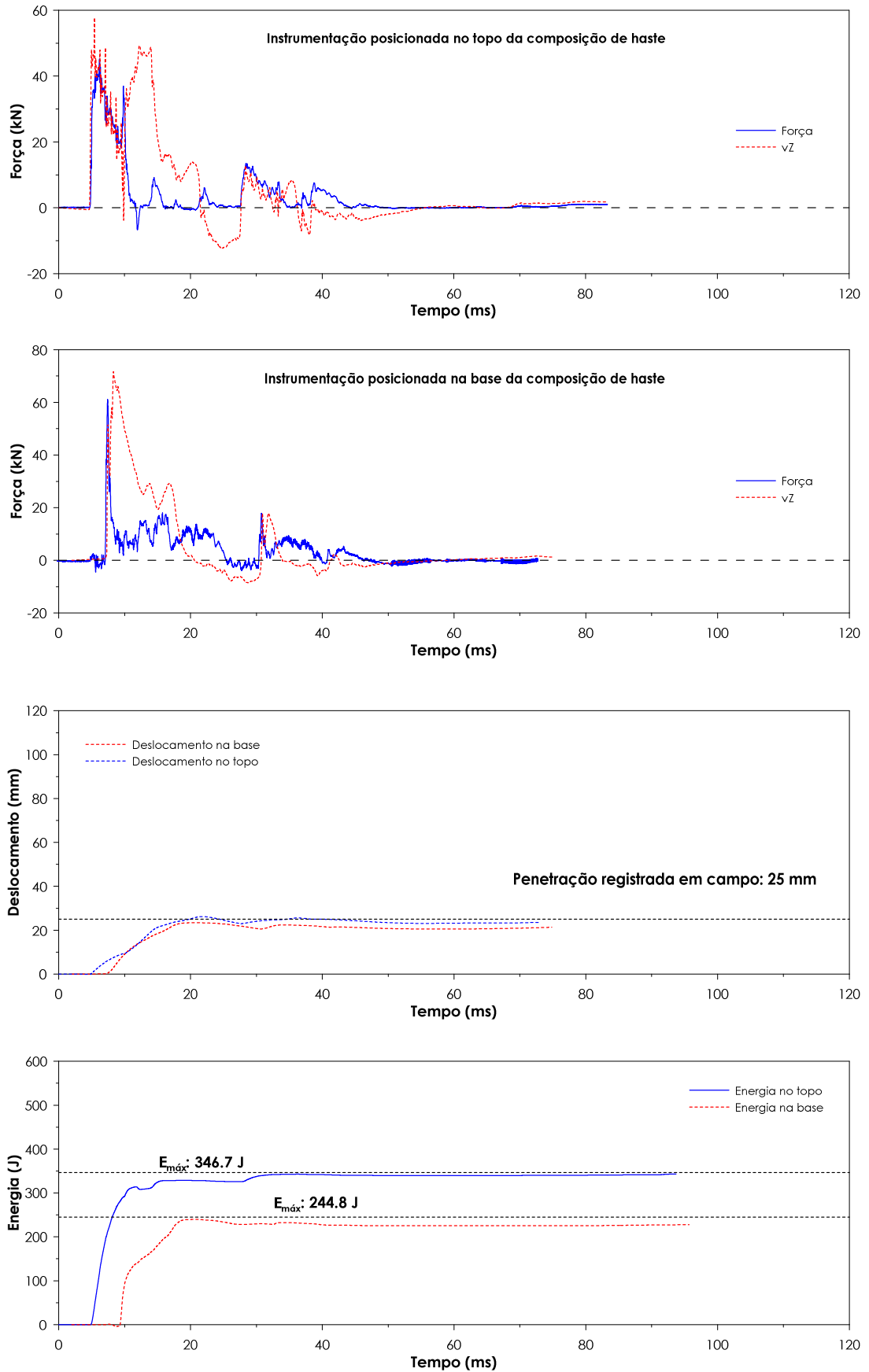


Figura B.17- Resultados para ensaio SPT realizado no Campo experimental da UNESP/Bauru (SP) (Equipamento mecanizado - Prof: 10 m - 11° golpe)





**Figura B.18-** Resultados para ensaio SPT realizado no Campo experimental da UNESP/Bauru (SP) (Equipamento mecanizado - Prof: 11 m - 8° golpe)

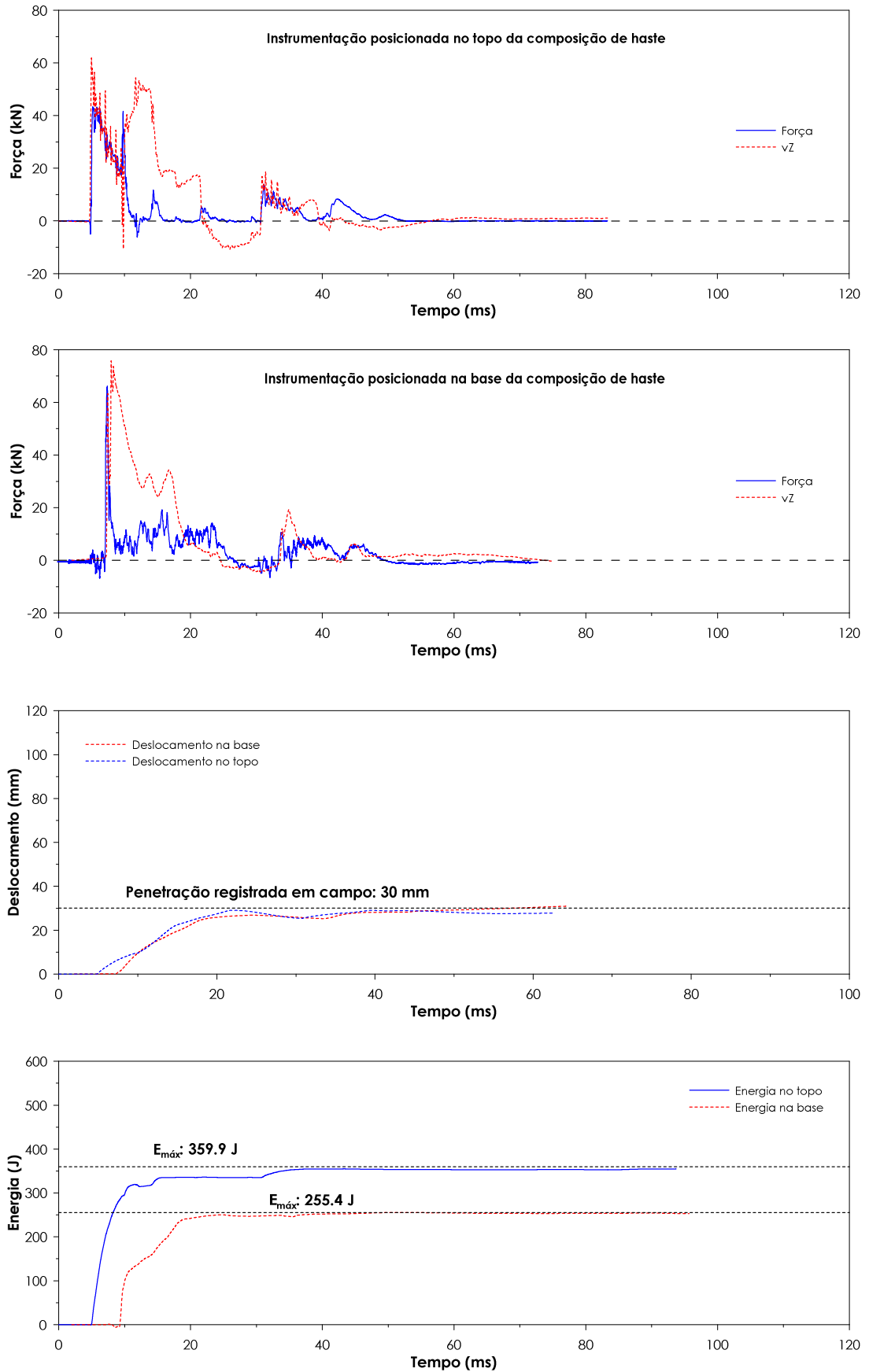
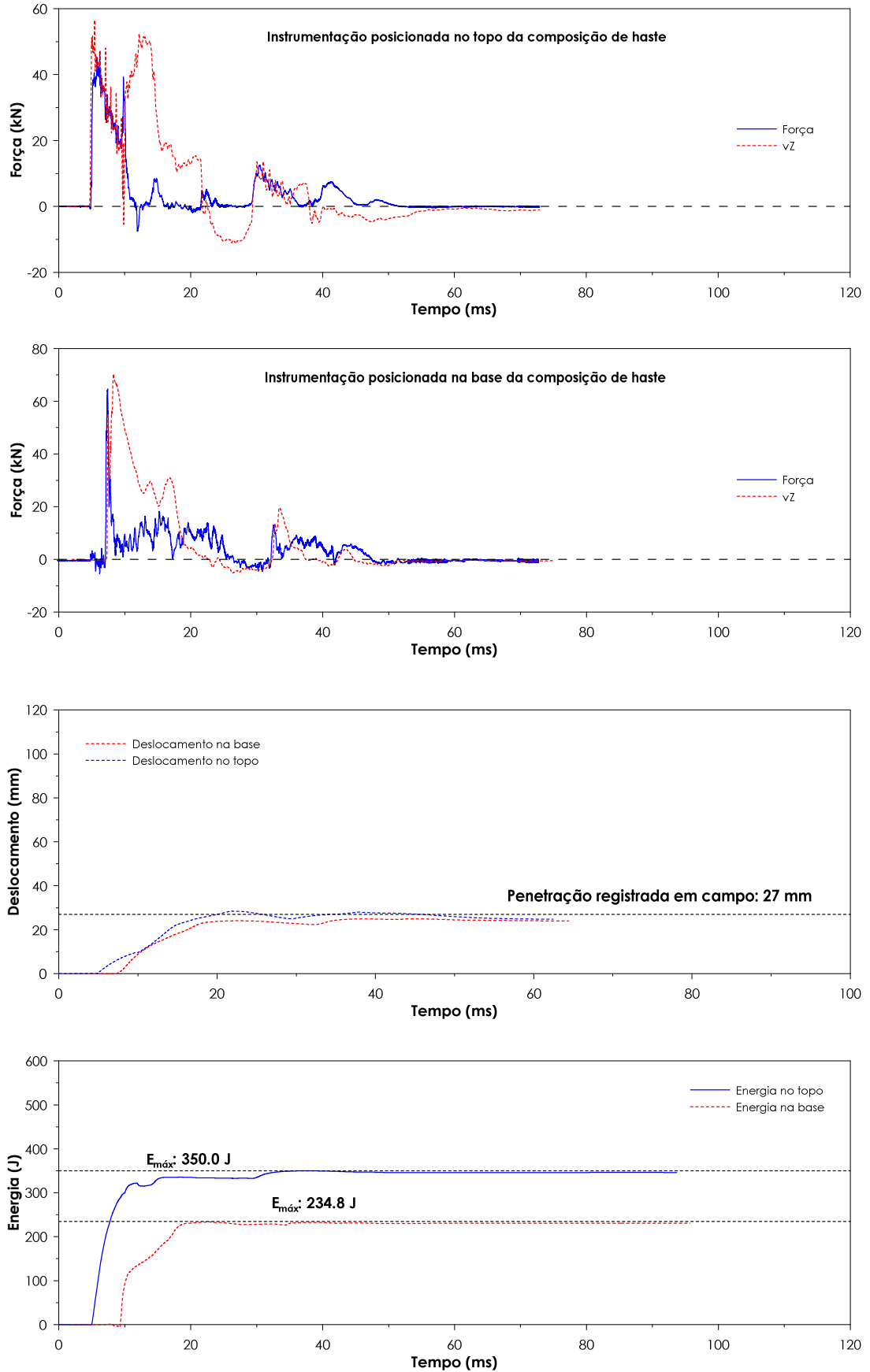
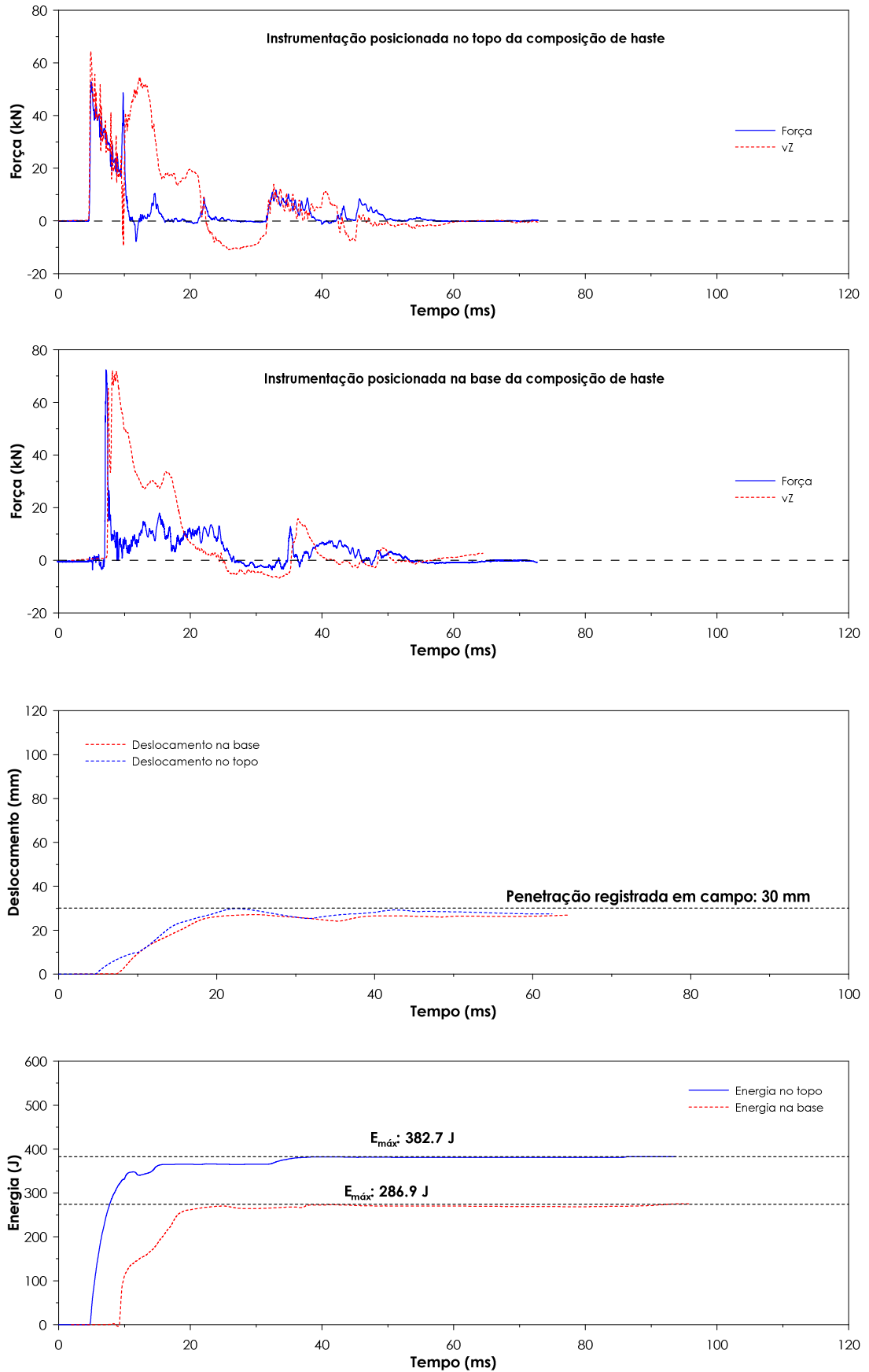


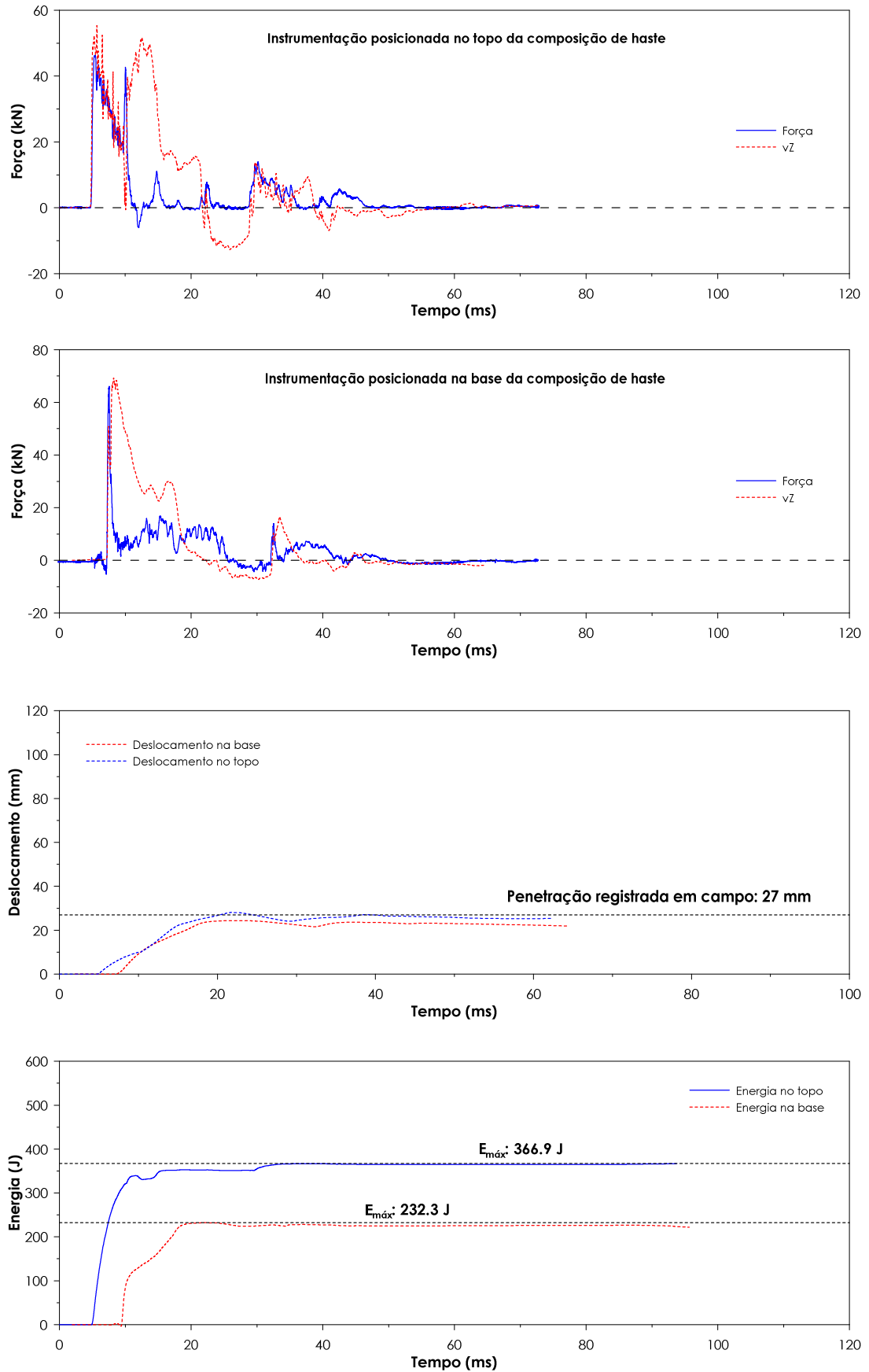
Figura B.19- Resultados para ensaio SPT realizado no Campo experimental da UNESP/Bauru (SP) (Equipamento mecanizado - Prof: 11 m - 12° golpe)



**Figura B.20-** Resultados para ensaio SPT realizado no Campo experimental da UNESP/Bauru (SP) (Equipamento mecanizado - Prof: 11 m - 14° golpe)



**Figura B.21-** Resultados para ensaio SPT realizado no Campo experimental da UNESP/Bauru (SP) (Equipamento mecanizado - Prof: 12 m - 6º golpe)



**Figura B.22-** Resultados para ensaio SPT realizado no Campo experimental da UNESP/Bauru (SP) (Equipamento mecanizado - Prof: 12 m - 11° golpe)

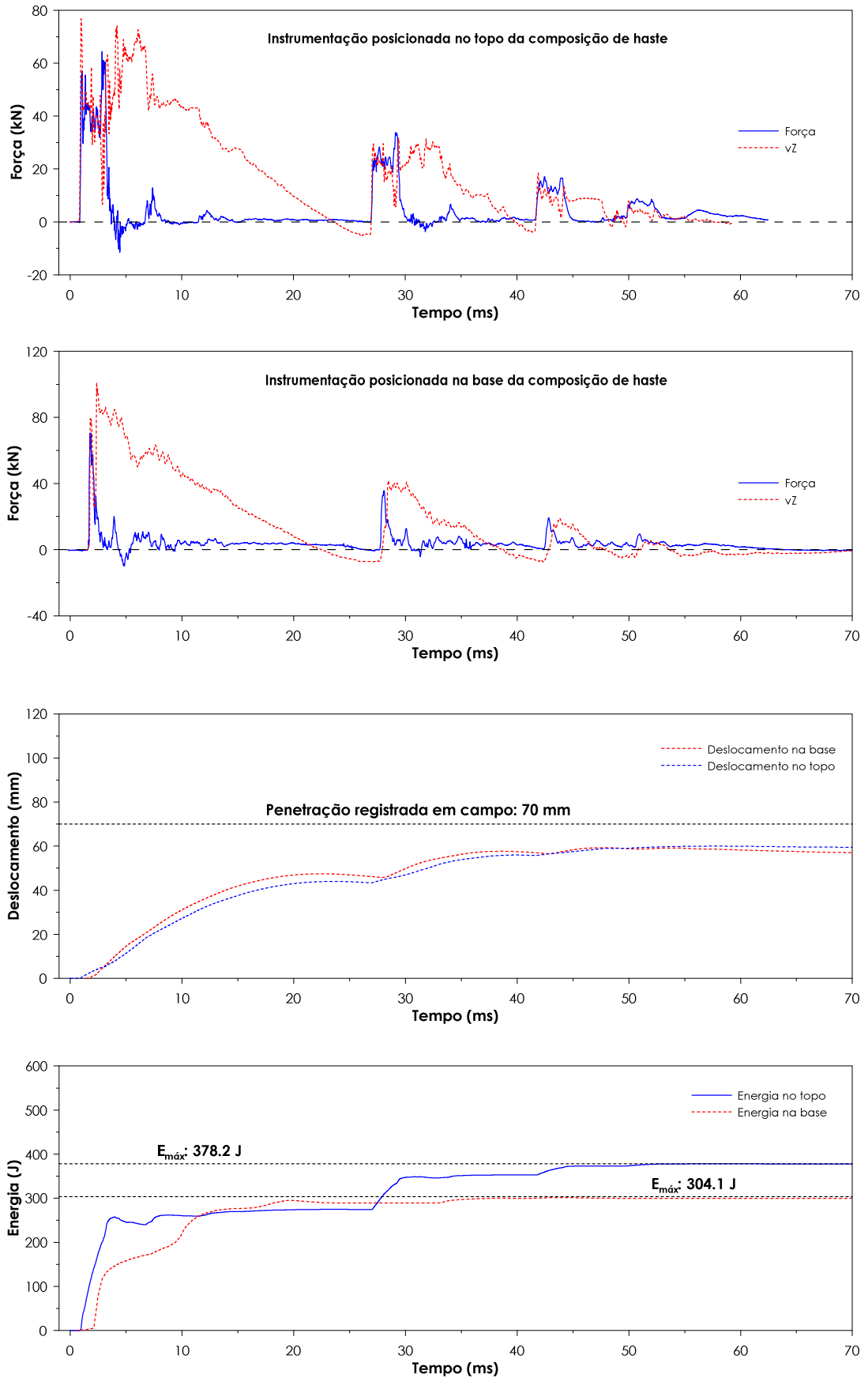
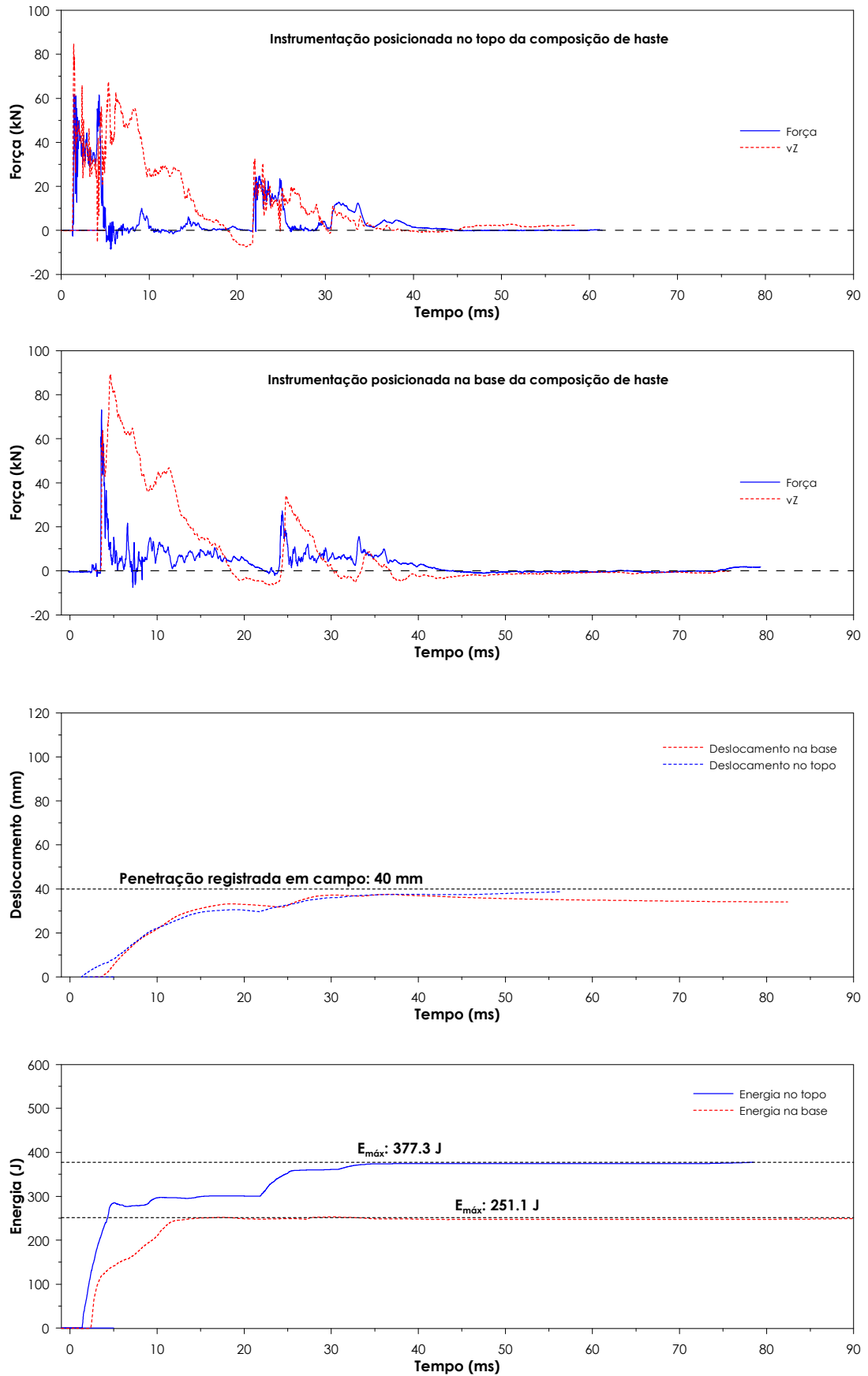


Figura B.23- Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento convencional - Prof: 4 m - 4º golpe)



**Figura B.24-** Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento convencional - Prof: 6 m - 5º golpe)

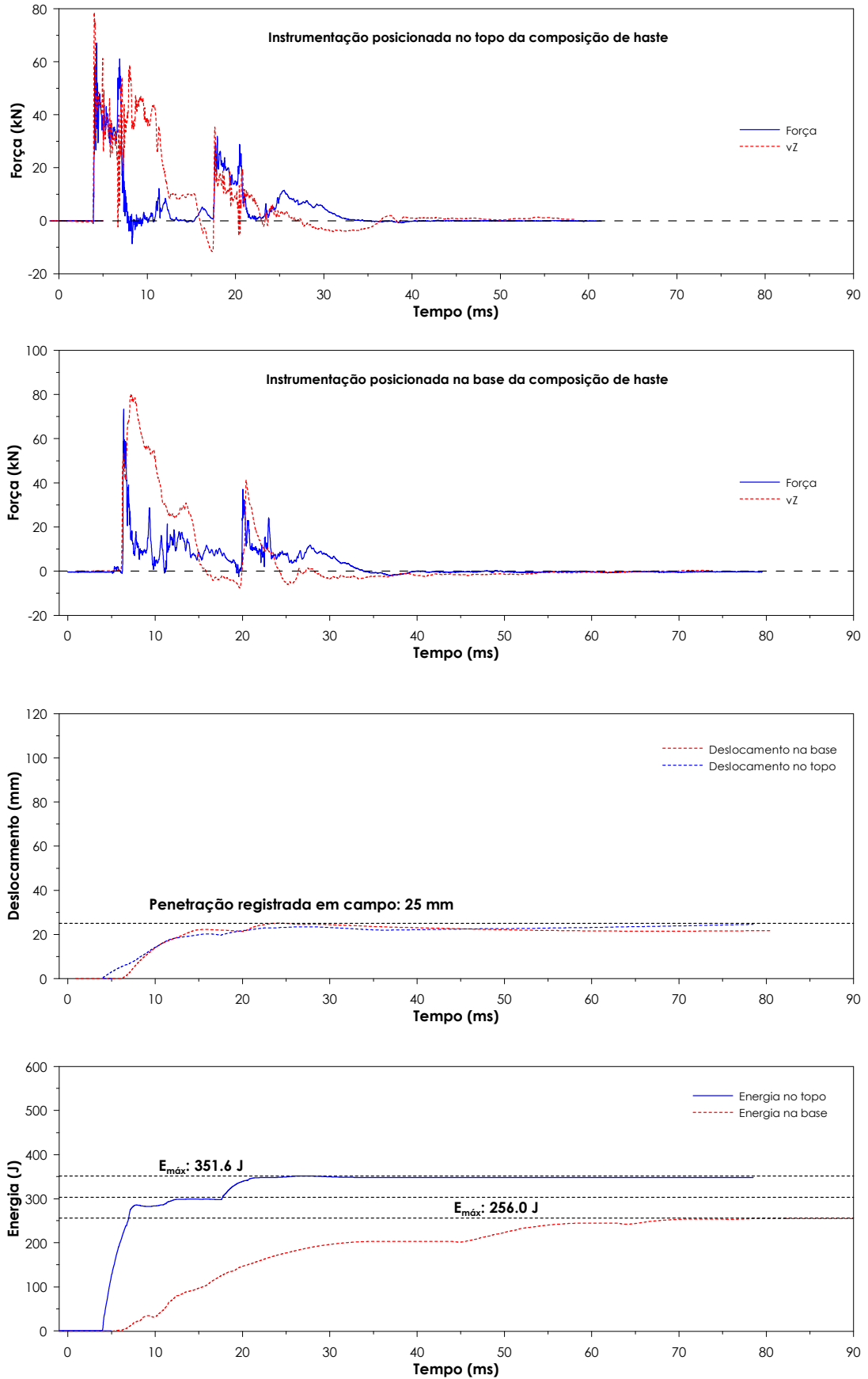


Figura B.25- Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento convencional - Prof: 6 m - 12º golpe)



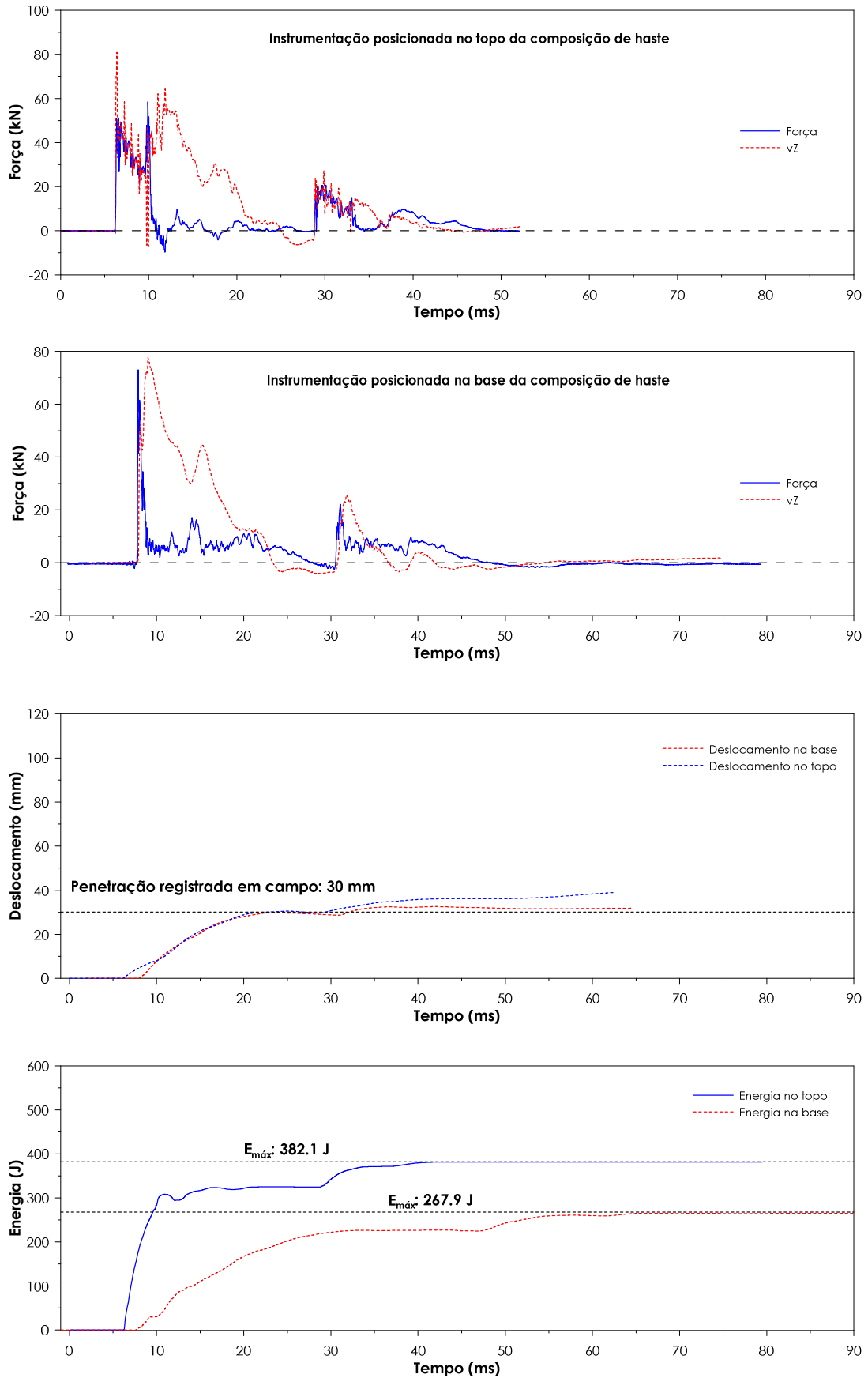


Figura B.26- Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento convencional - Prof: 8 m - 6° golpe)

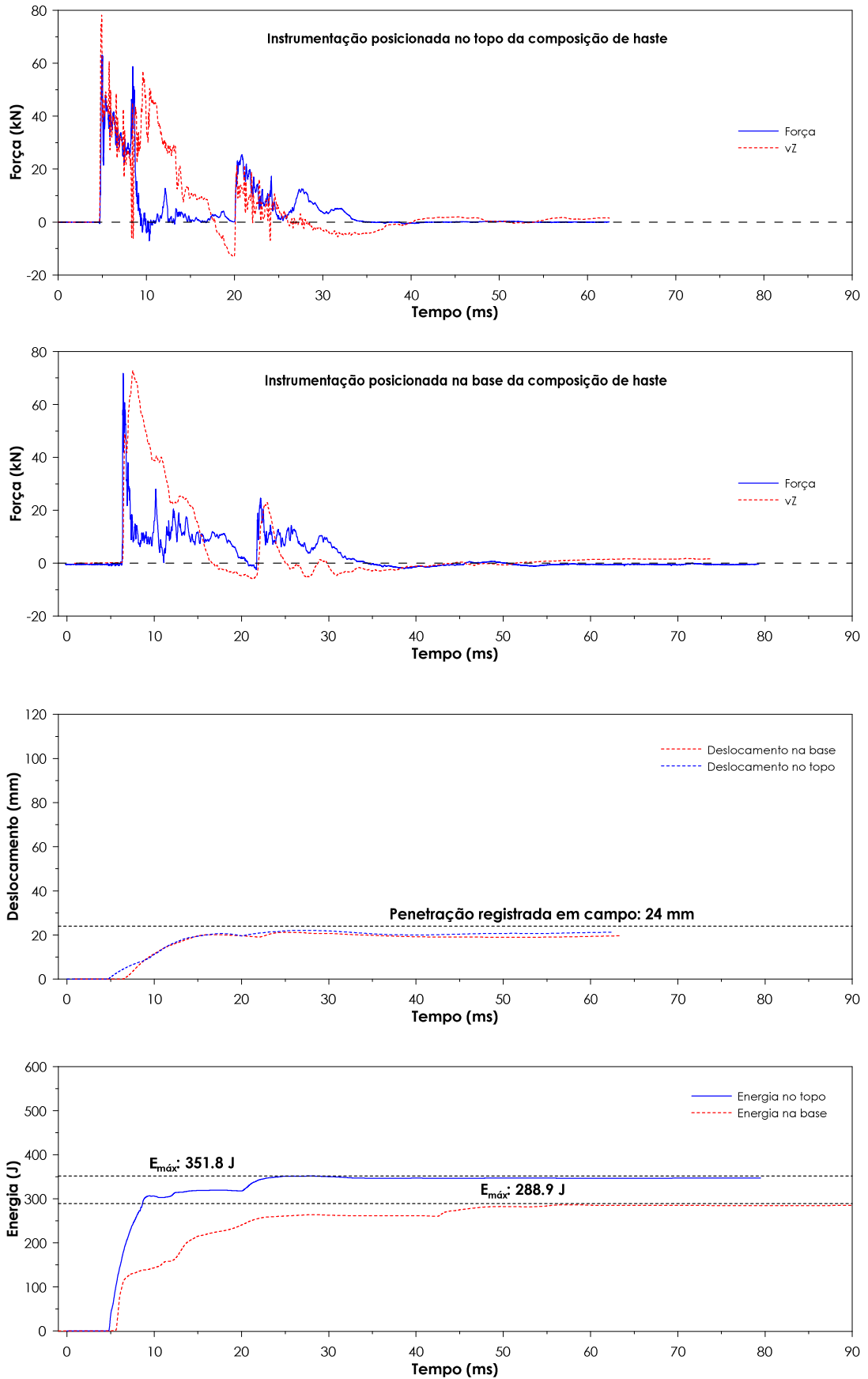
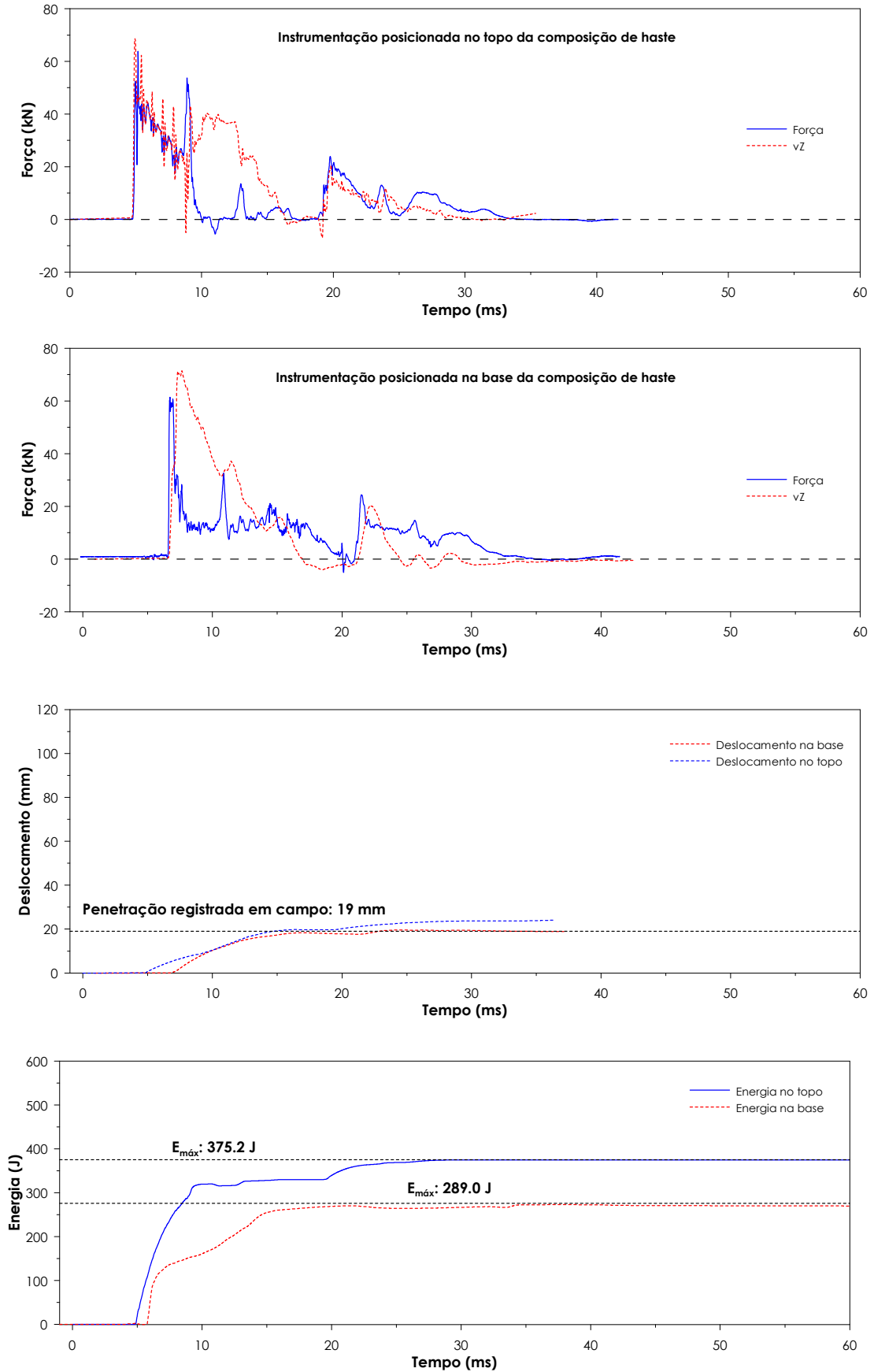


Figura B.27- Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento convencional - Prof: 8 m - 10º golpe)



**Figura B.28-** Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento convencional - Prof: 9 m - 9º golpe)

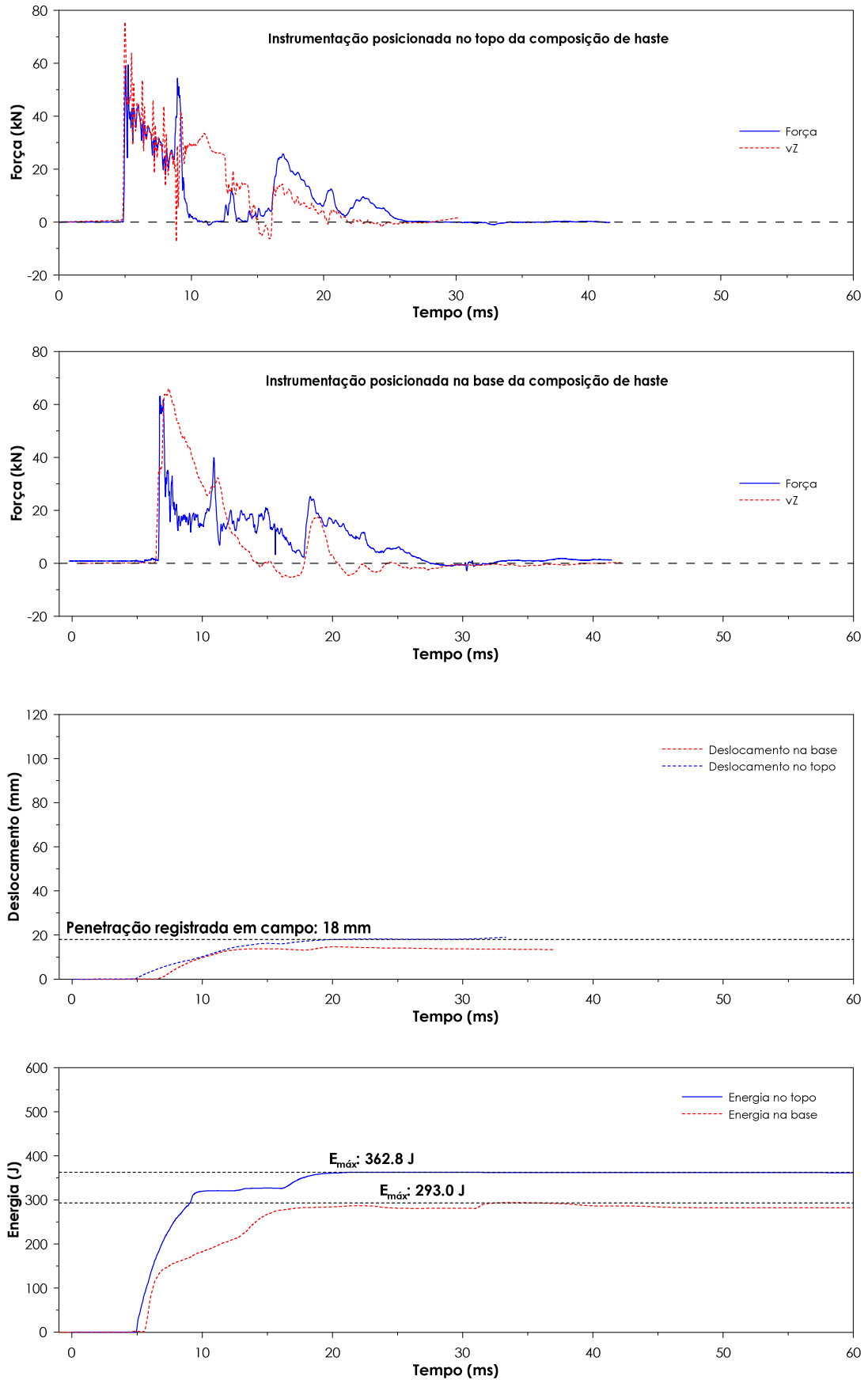
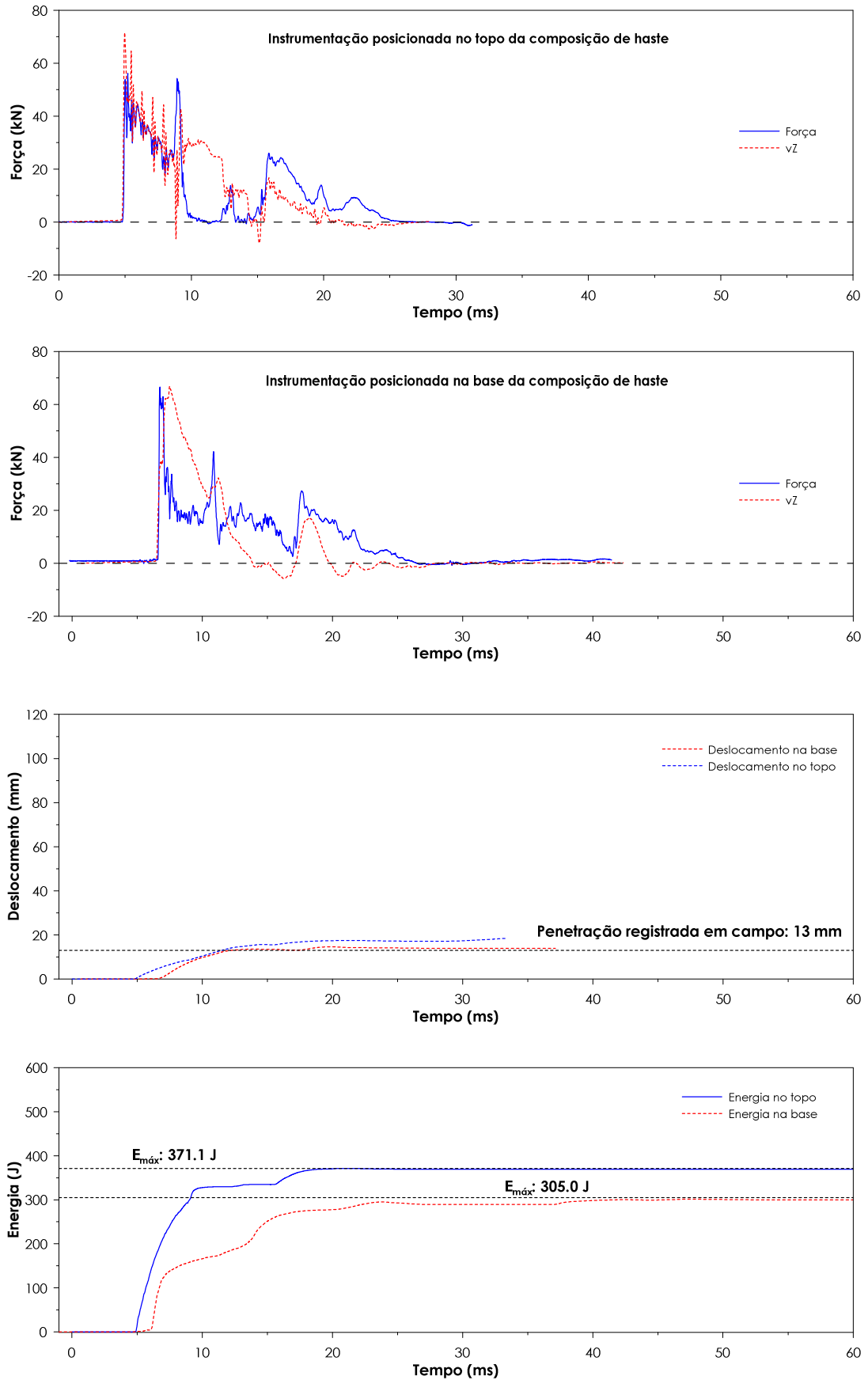


Figura B.29- Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento convencional - Prof: 9 m - 14º golpe)



**Figura B.30-** Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento convencional - Prof: 9 m - 16° golpe)

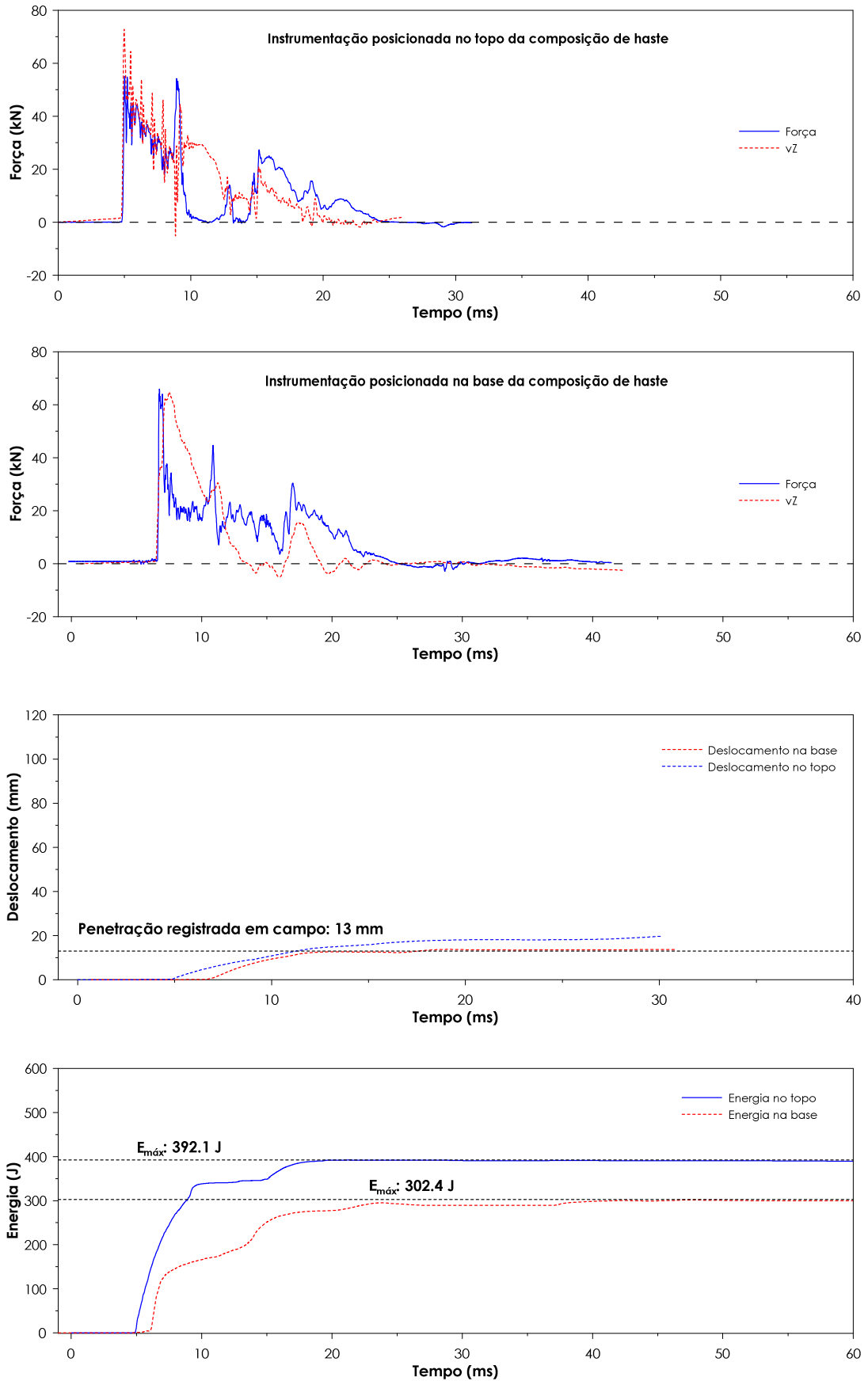


Figura B.31- Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento convencional - Prof: 9 m - 19º golpe)

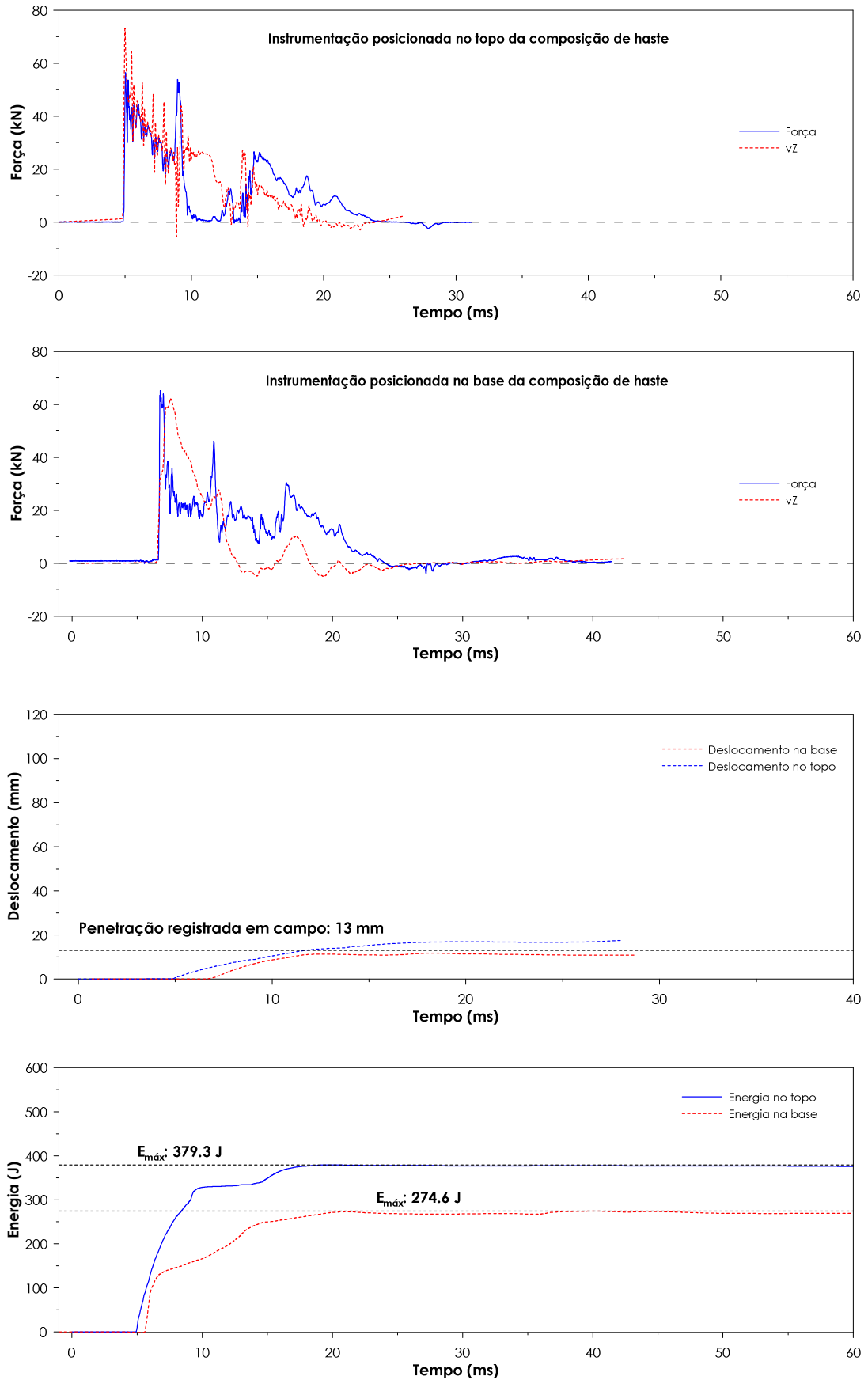


Figura B.32- Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento convencional - Prof: 9 m - 22° golpe)

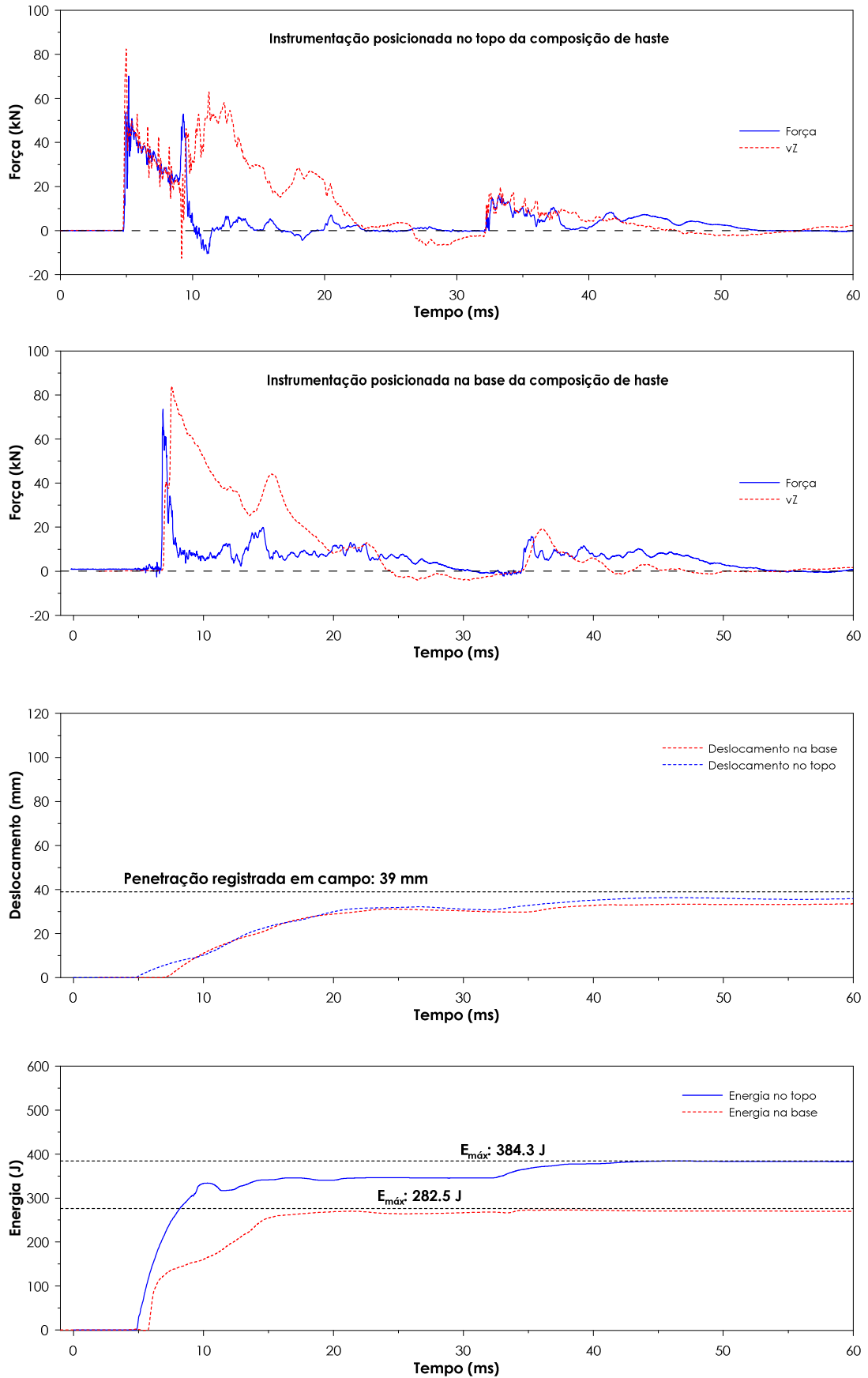
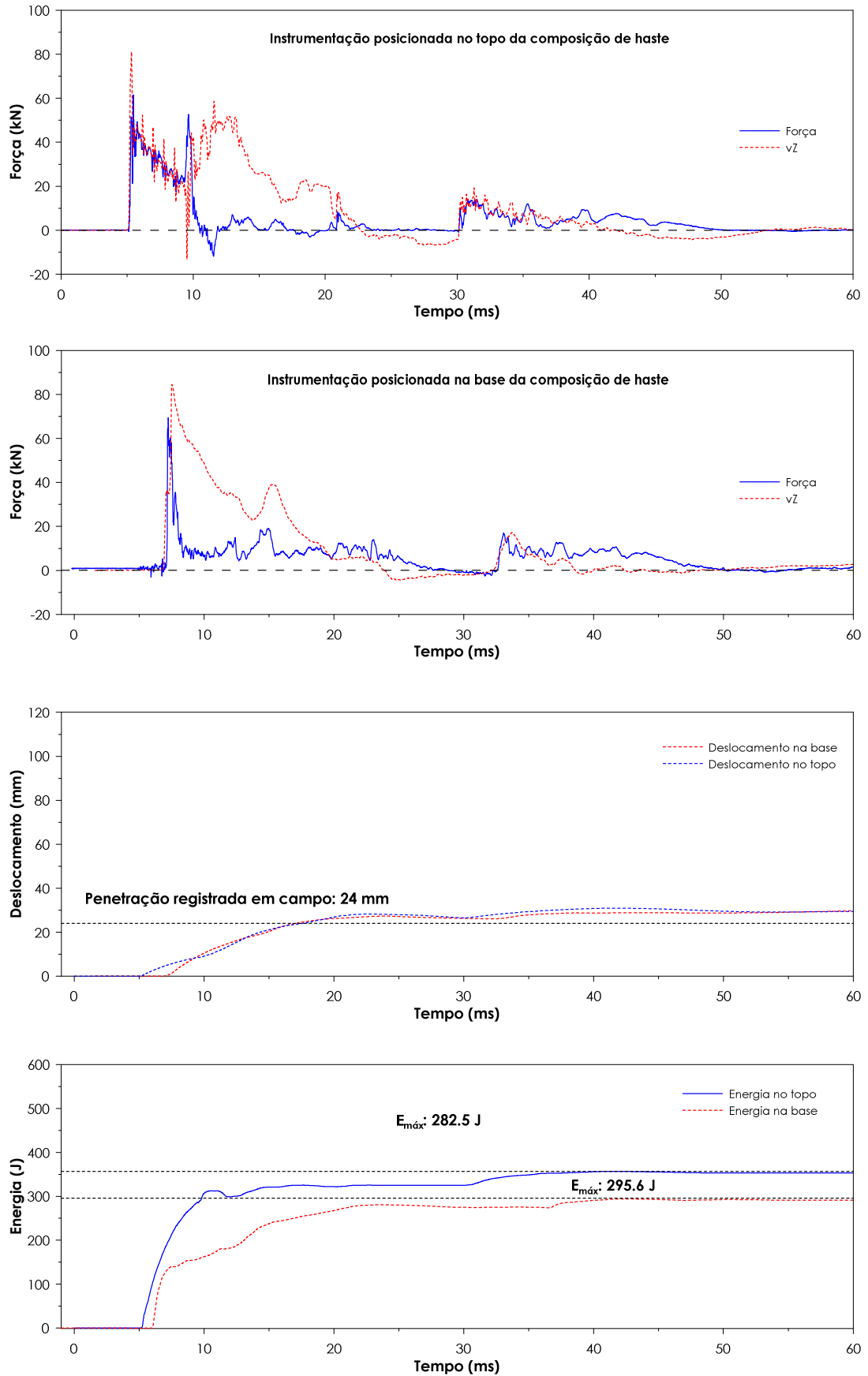


Figura B.33- Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento convencional - Prof: 10 m - 5º golpe)





**Figura B.34-** Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento convencional - Prof: 10 m - 8º golpe)

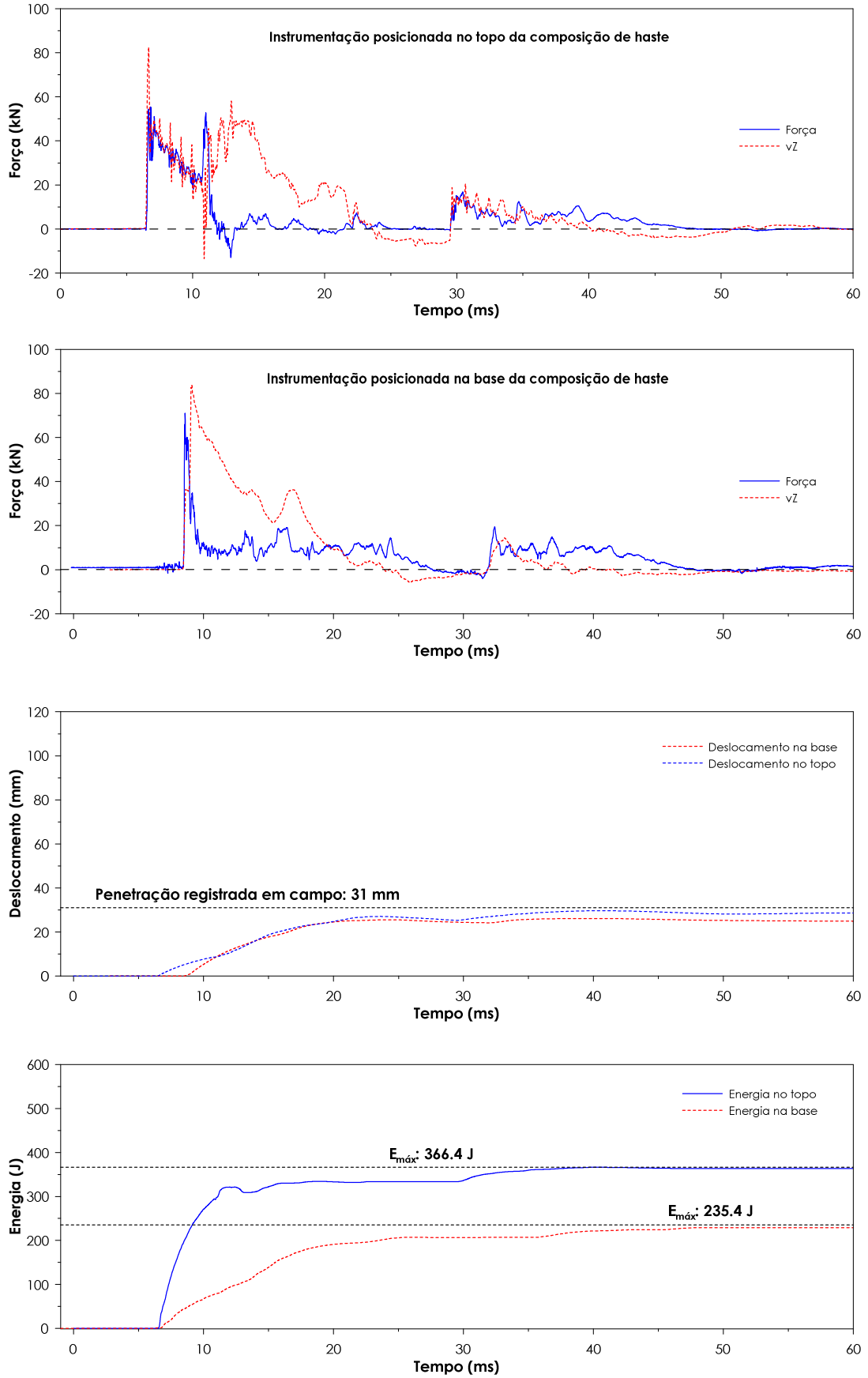
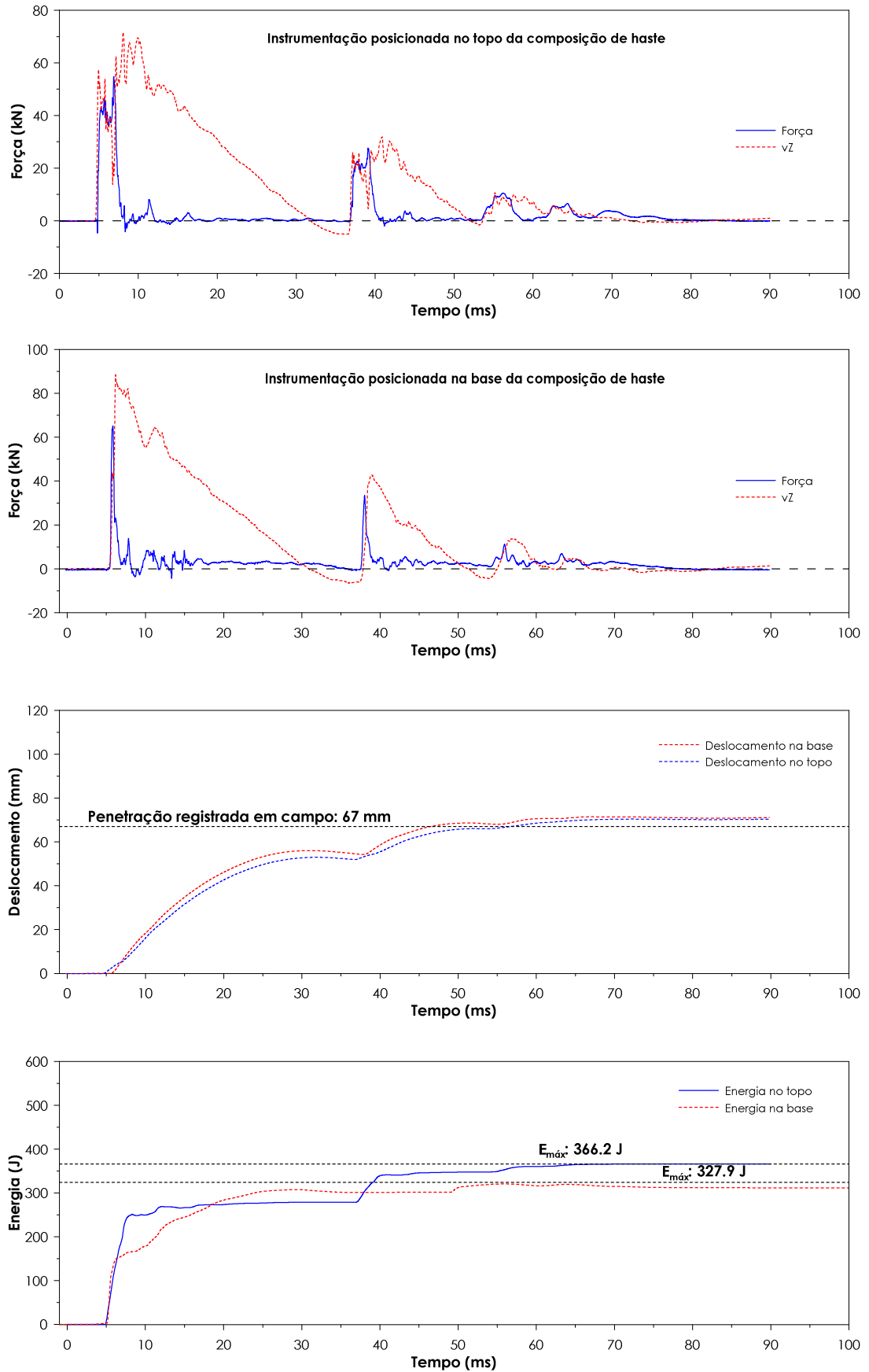


Figura B.35- Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento convencional - Prof: 10 m - 12º golpe)



**Figura B.36-** Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento mecanizado - Prof: 4 m - 3º golpe)

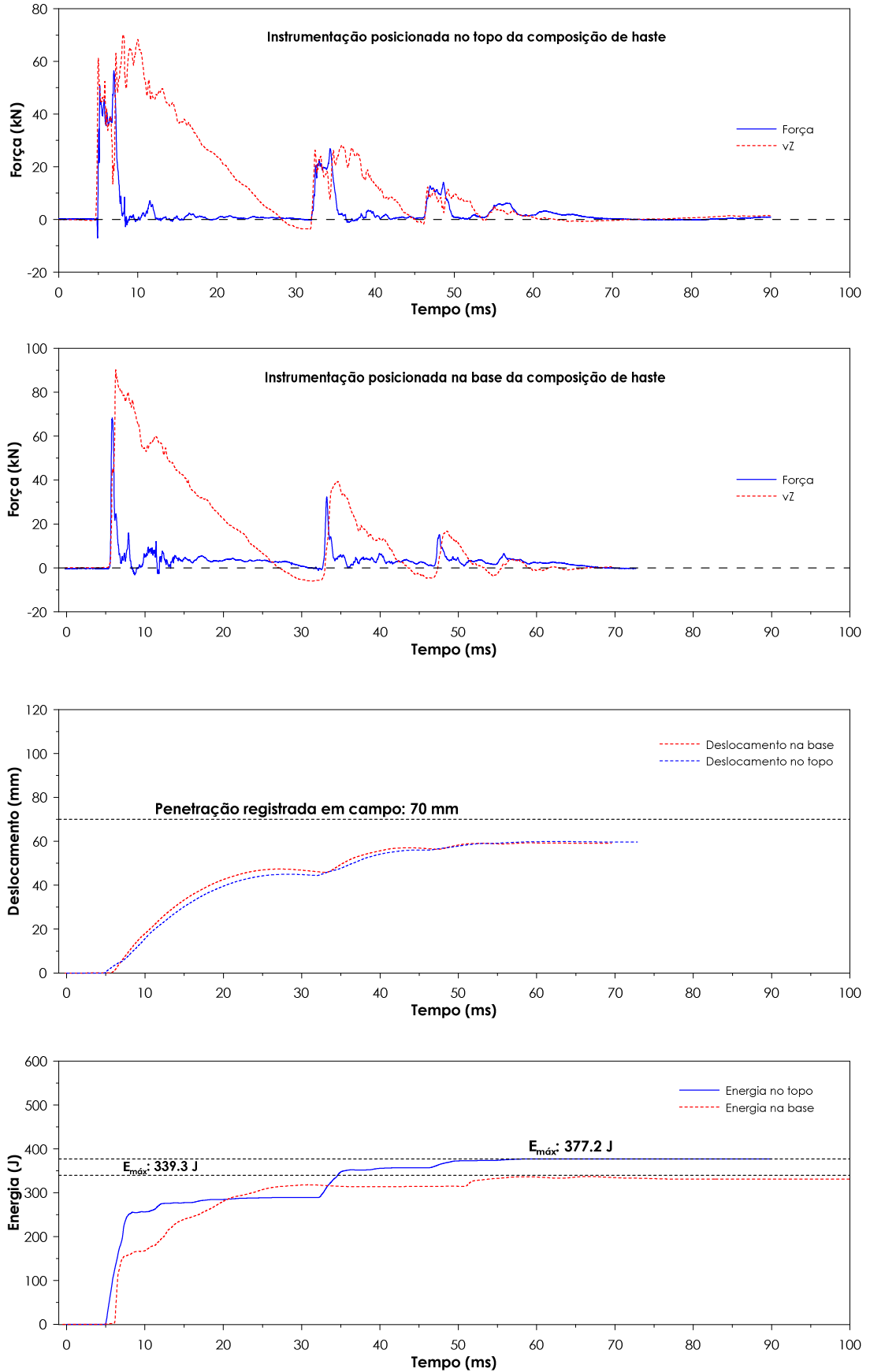


Figura B.37- Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento mecanizado - Prof: 4 m - 5º golpe)

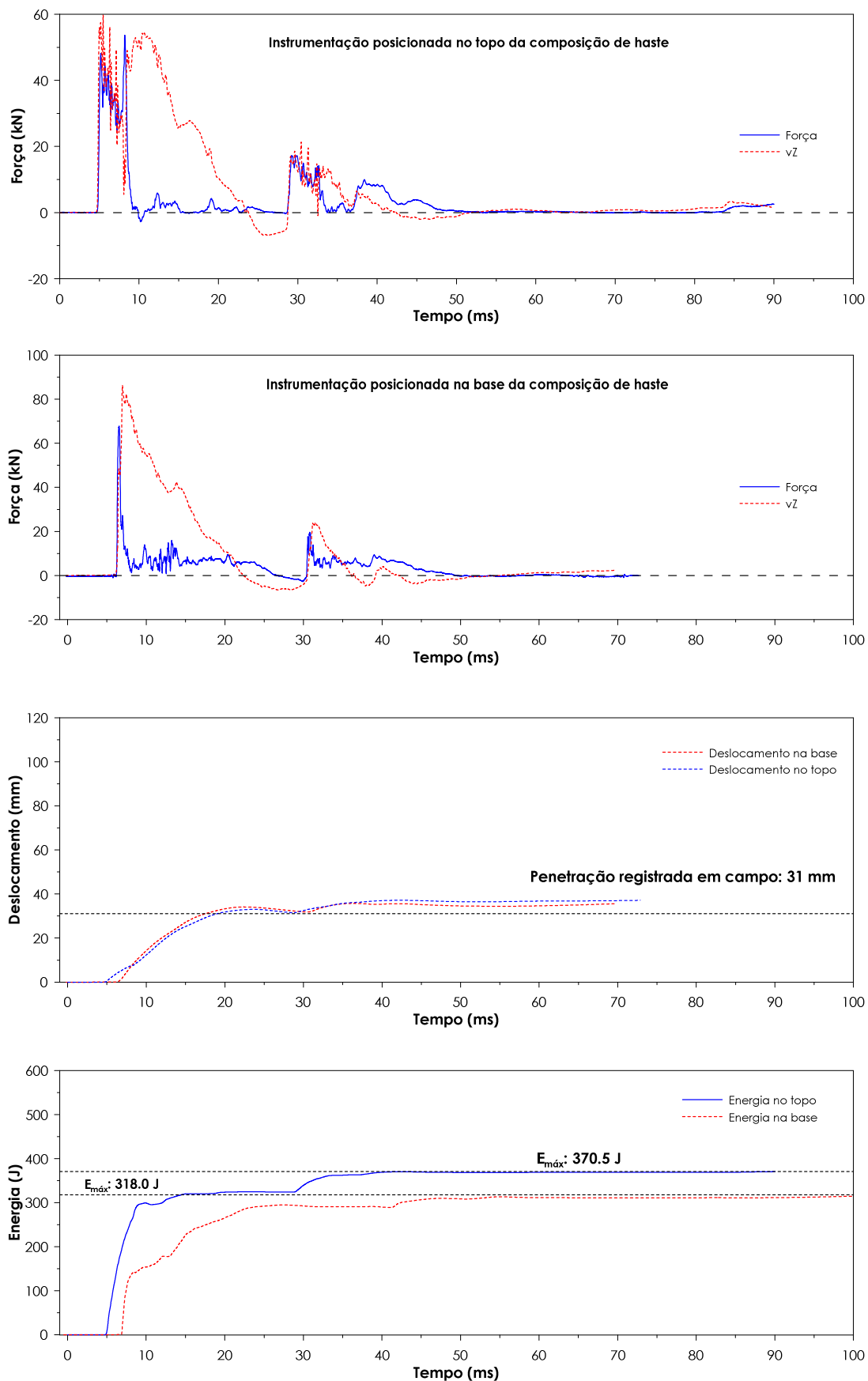
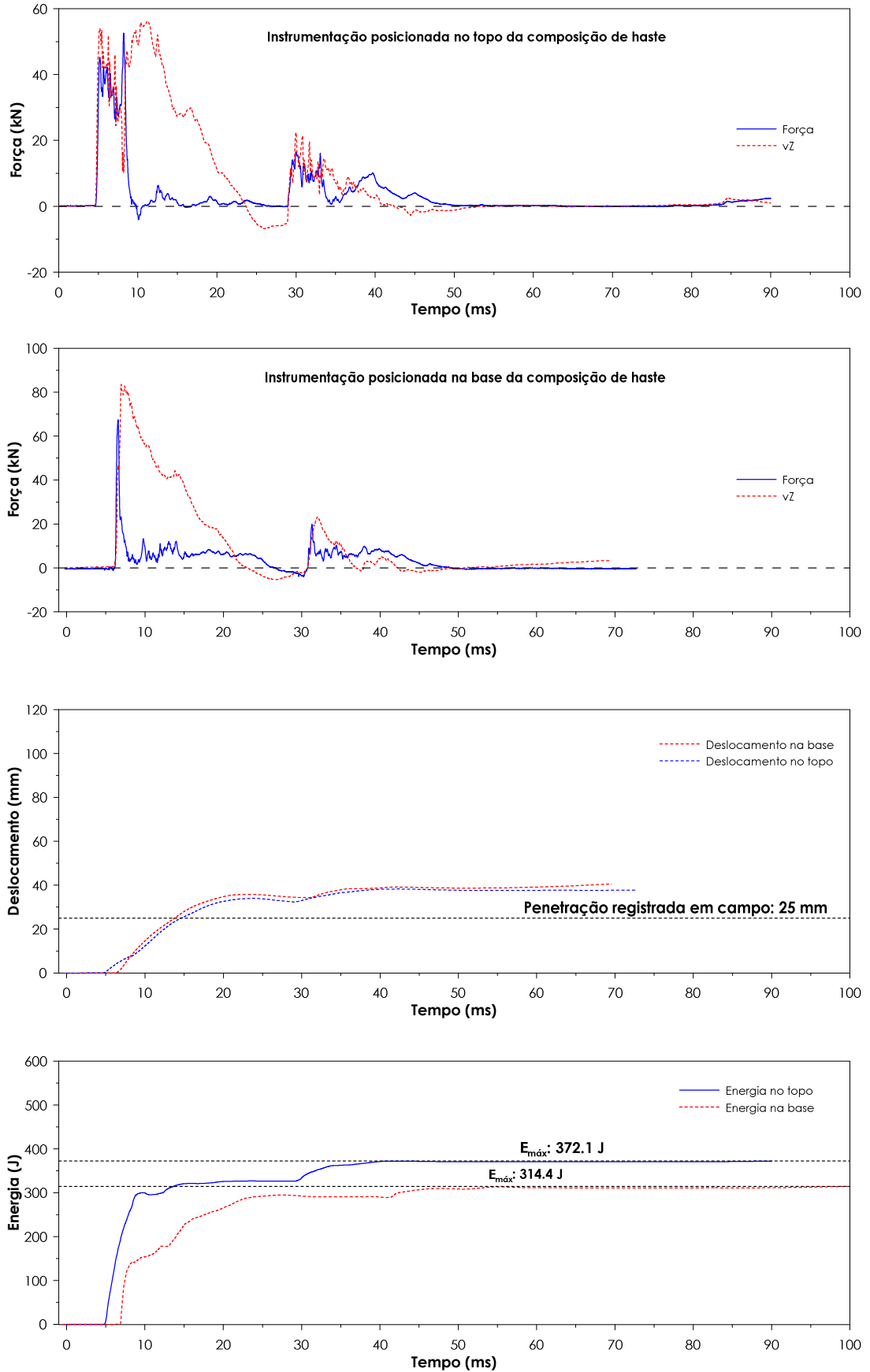
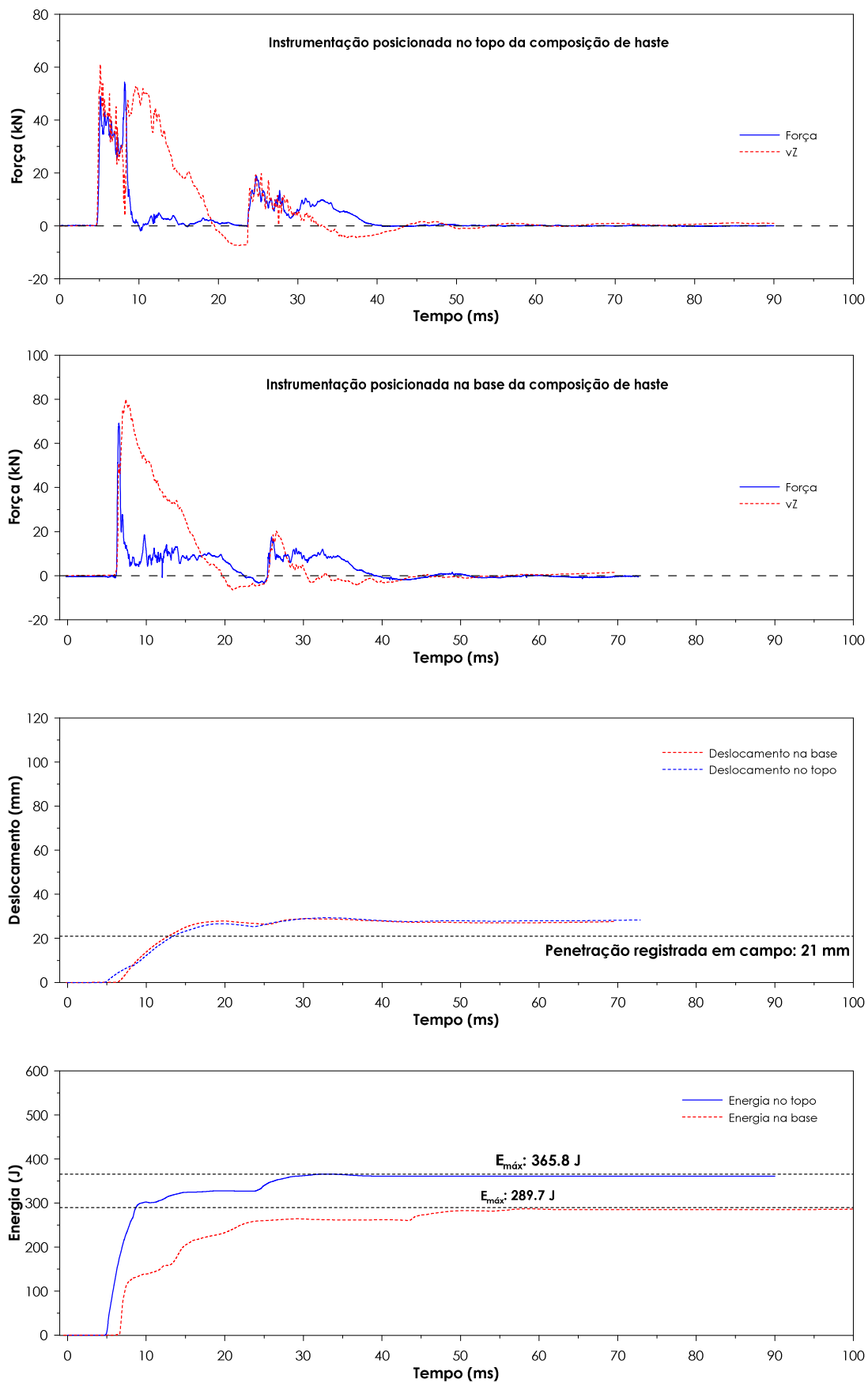


Figura B.38- Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento mecanizado - Prof: 7 m - 4º golpe)



**Figura B.39-** Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento mecanizado - Prof: 7 m - 7º golpe)



**Figura B.40-** Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento mecanizado - Prof: 7 m - 11º golpe)

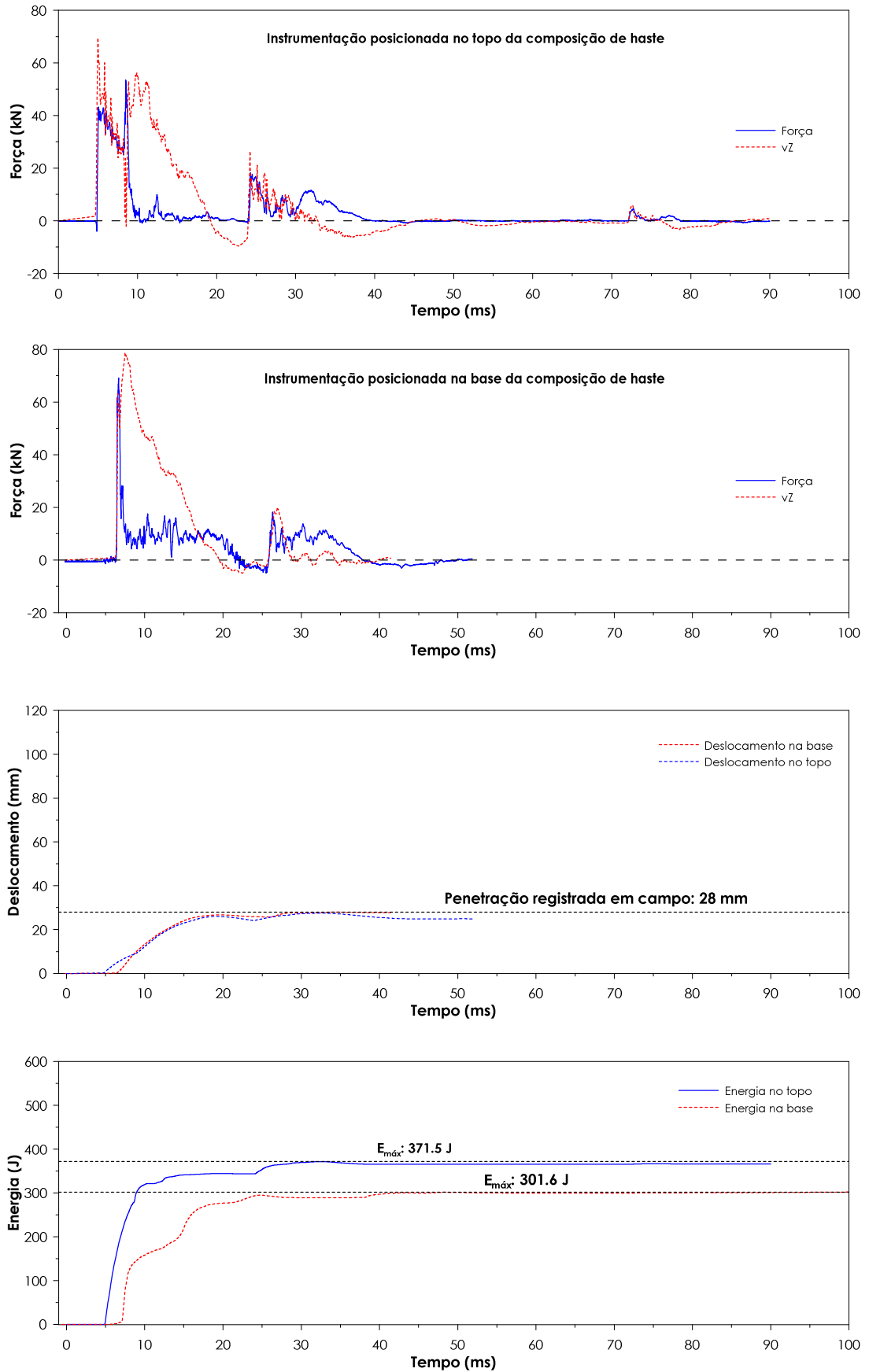
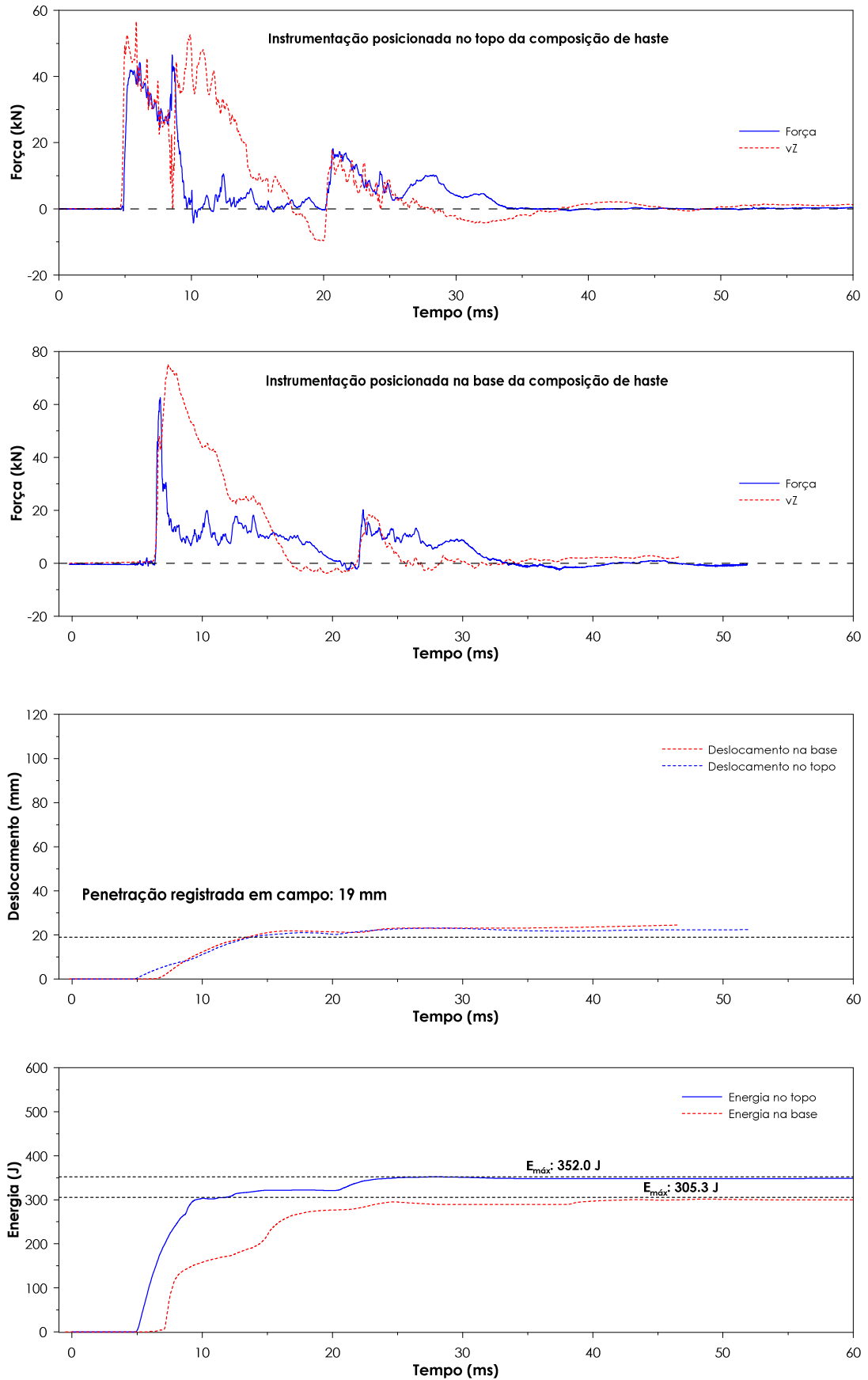


Figura B.41- Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento mecanizado - Prof: 8 m - 8º golpe)





**Figura B.42-** Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento mecanizado - Prof: 8 m - 12° golpe)

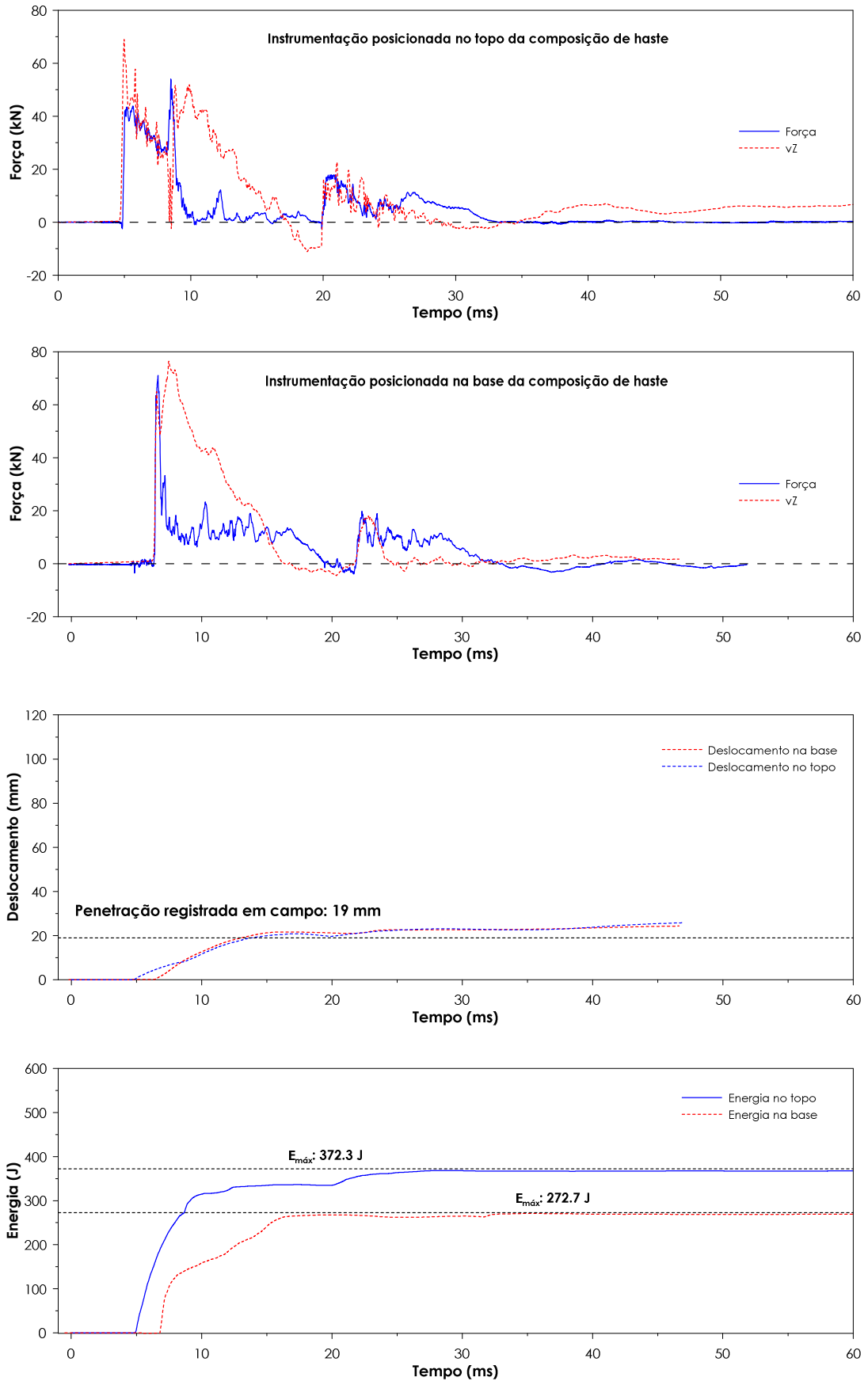
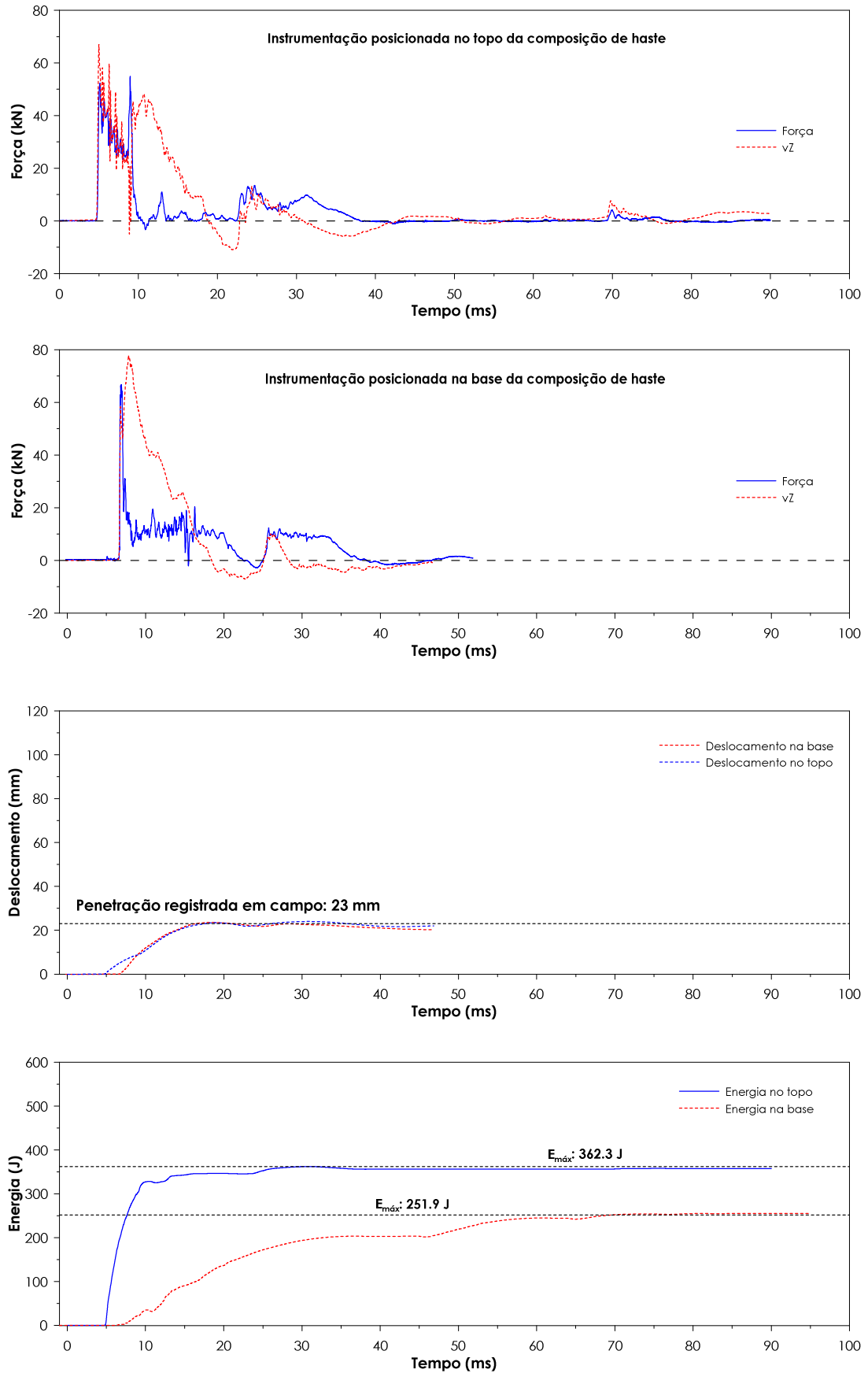


Figura B.43- Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento mecanizado - Prof: 8 m - 14º golpe)



**Figura B.44-** Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento mecanizado - Prof: 9 m - 6º golpe)

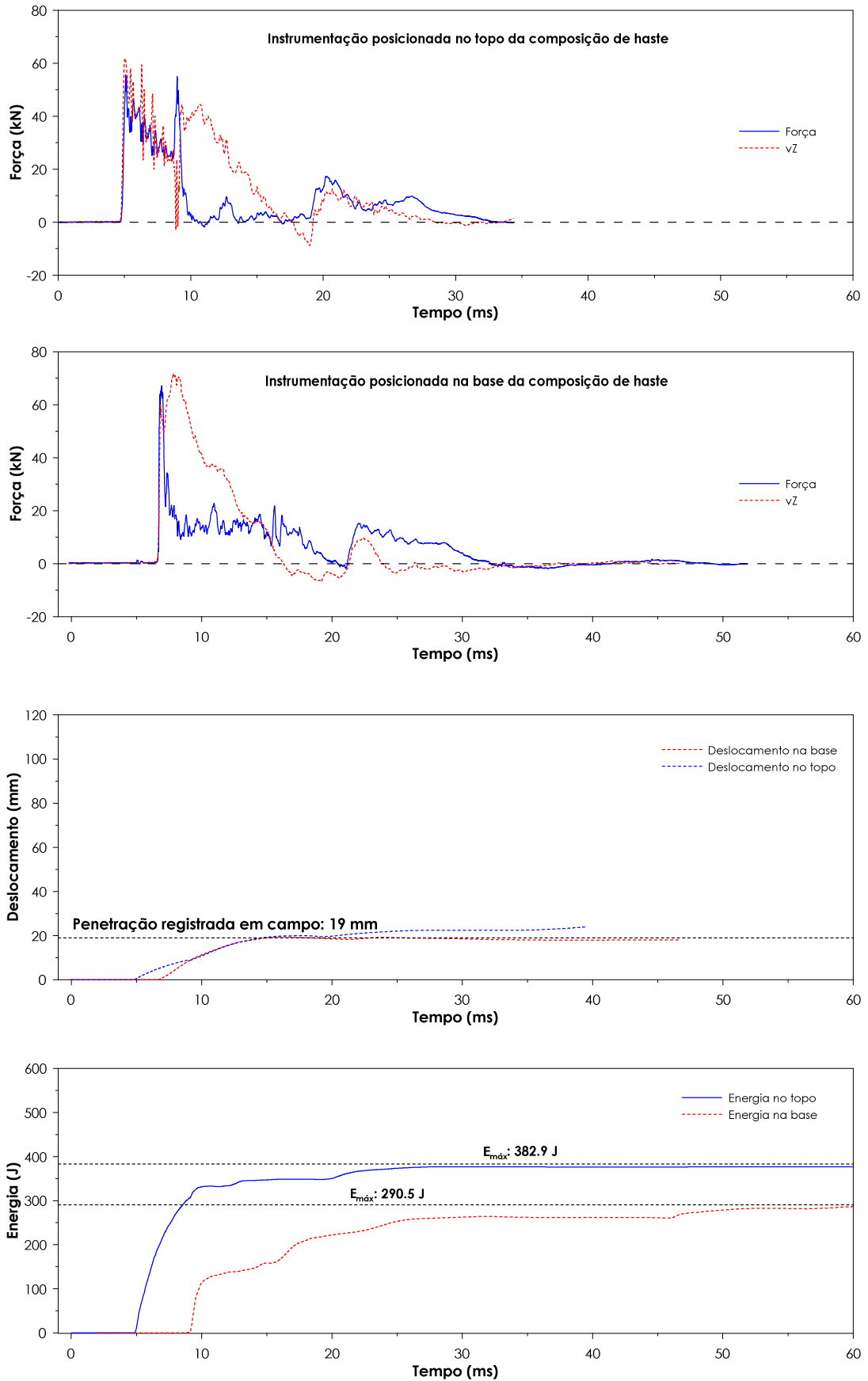
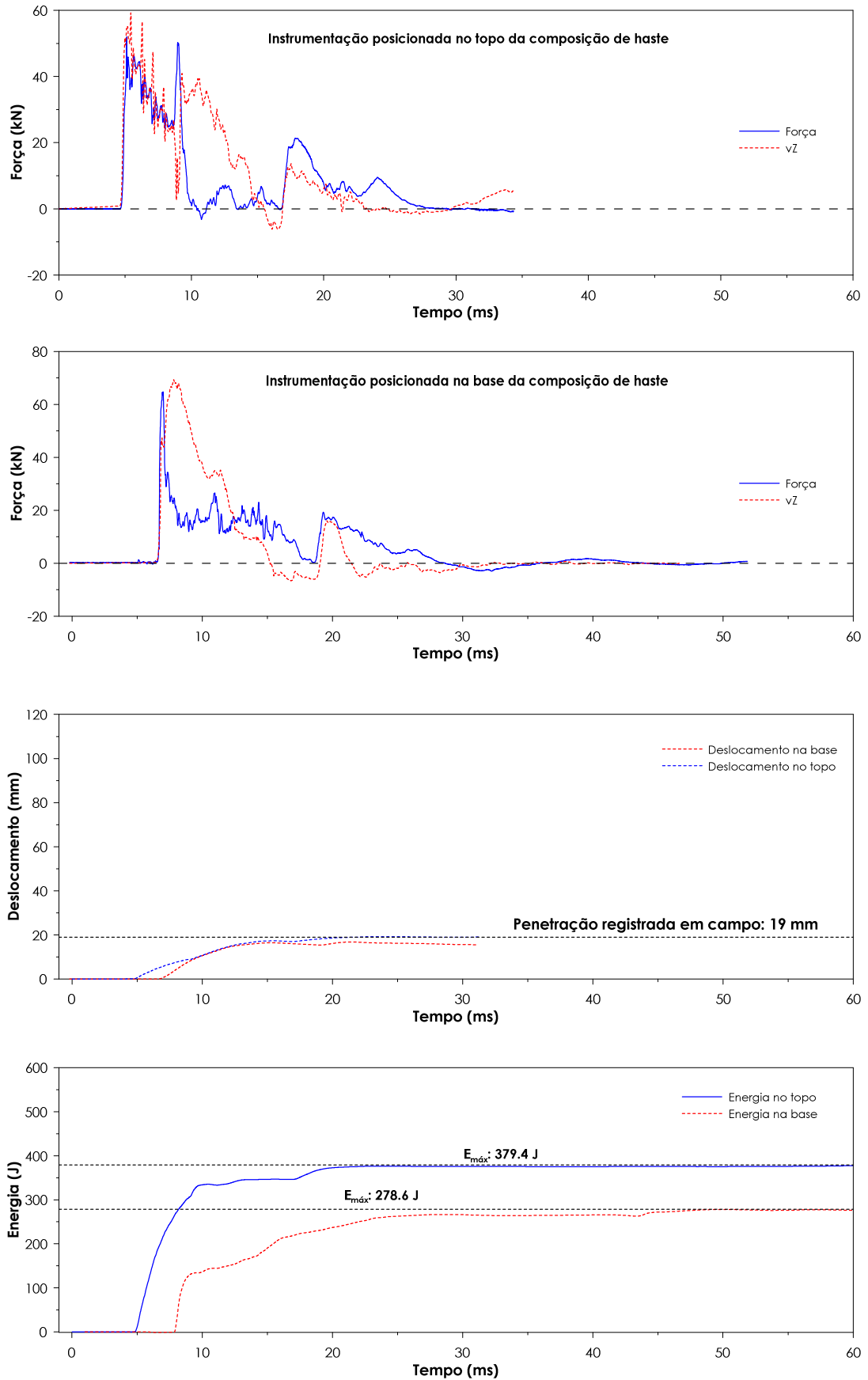
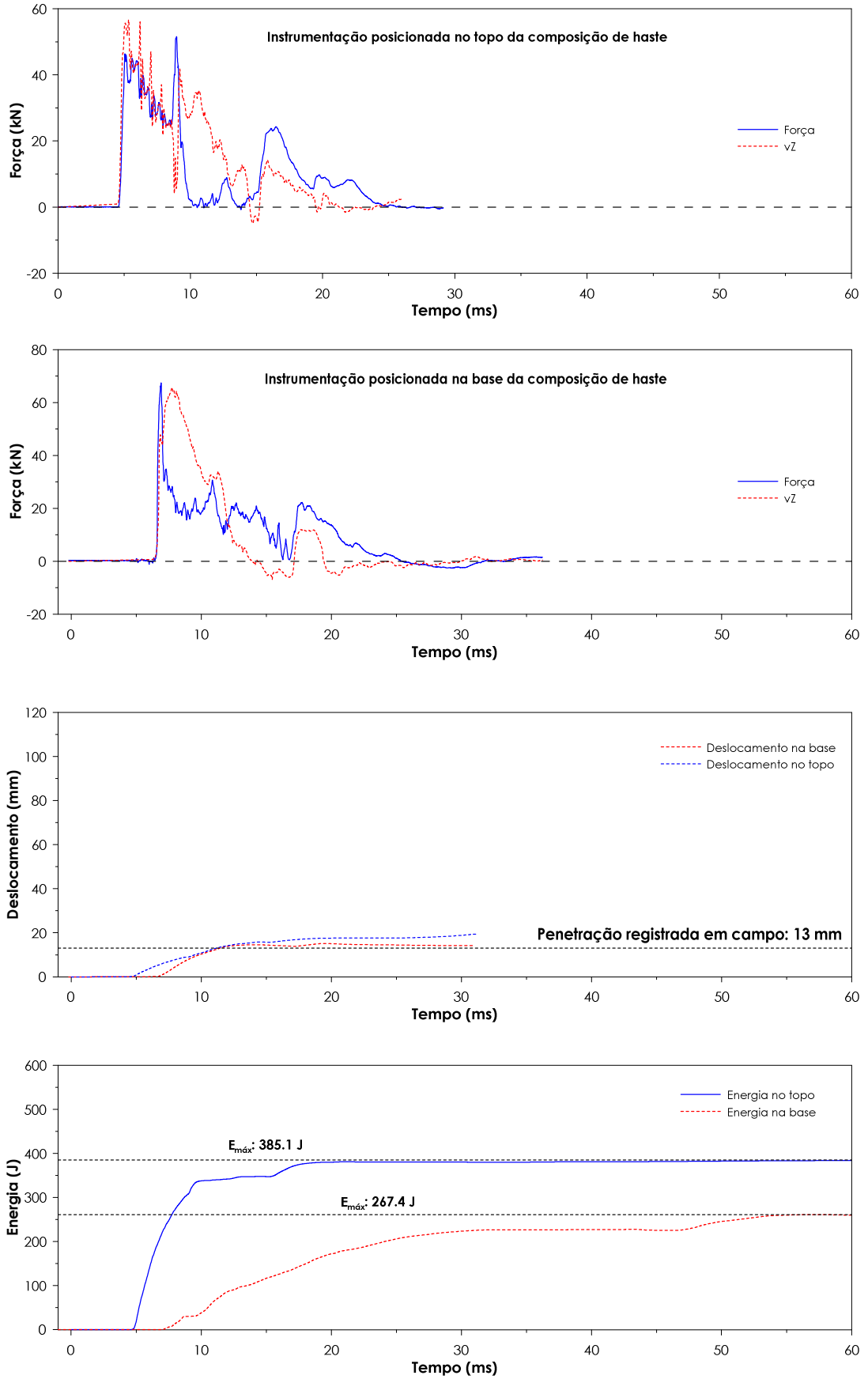


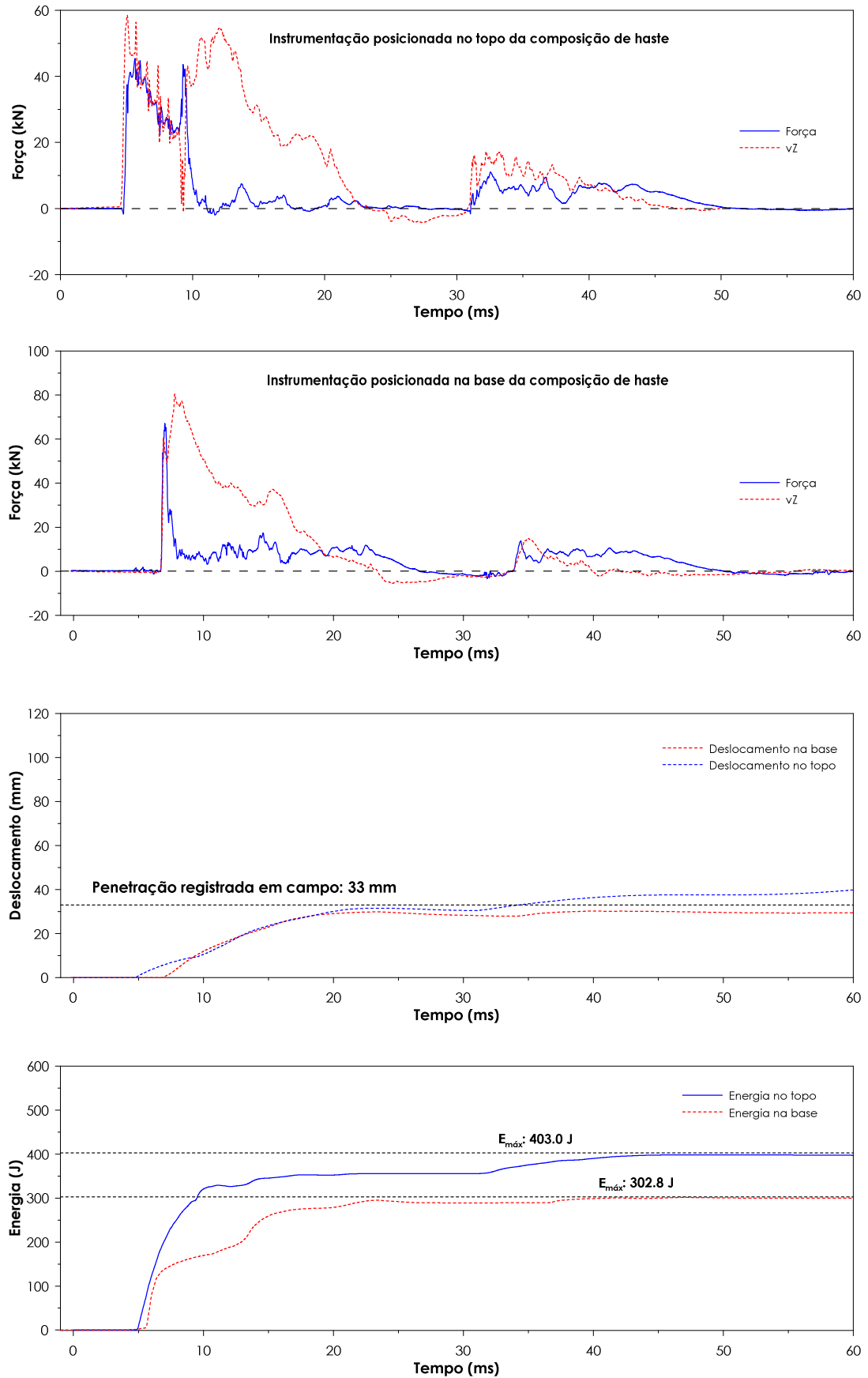
Figura B.45- Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento mecanizado - Prof: 9 m - 9º golpe)



**Figura B.46-** Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento mecanizado - Prof: 9 m - 12° golpe)



**Figura B.47-** Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento mecanizado - Prof: 9 m - 18º golpe)



**Figura B.48-** Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento mecanizado - Prof: 10 m - 5° golpe)

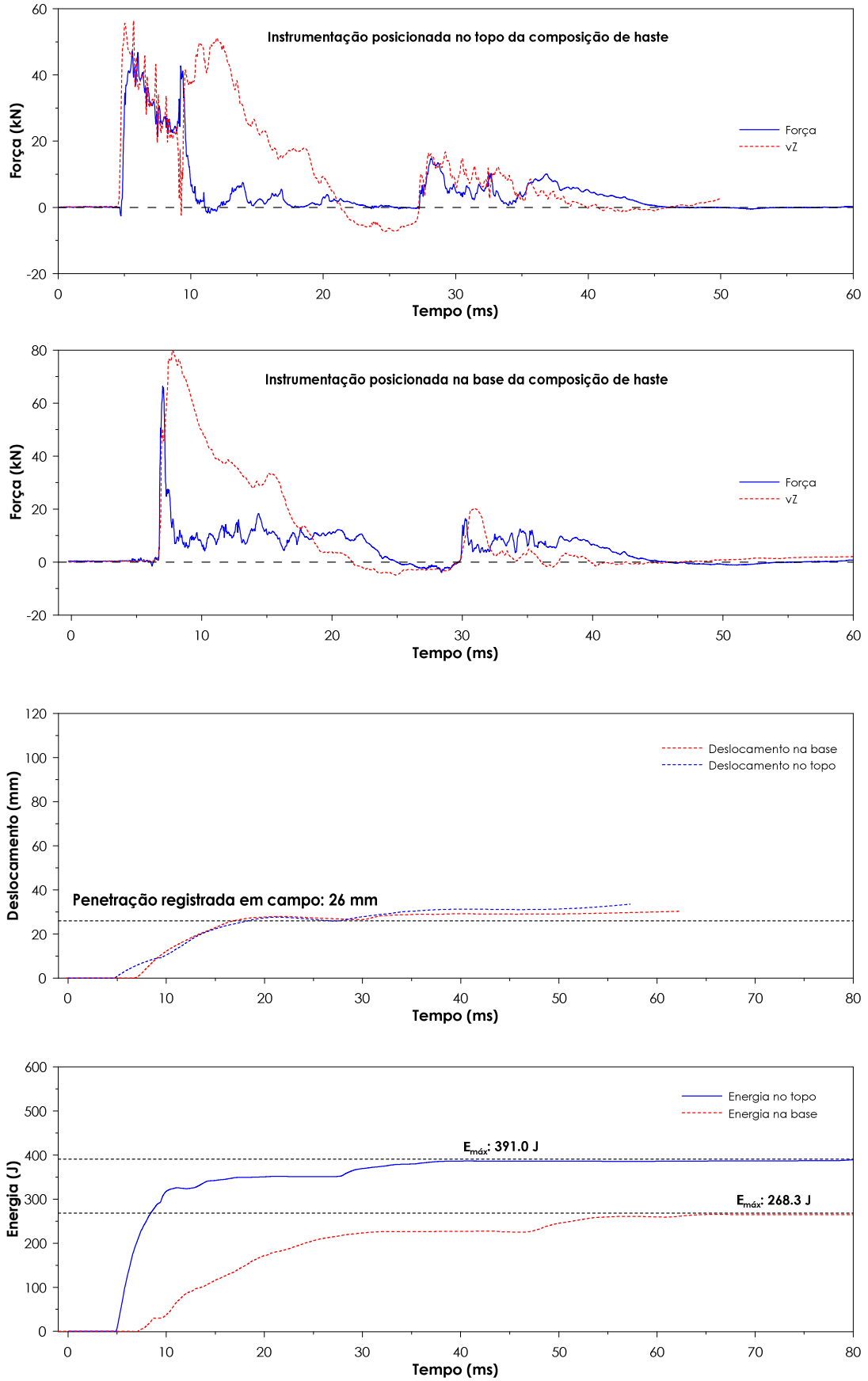
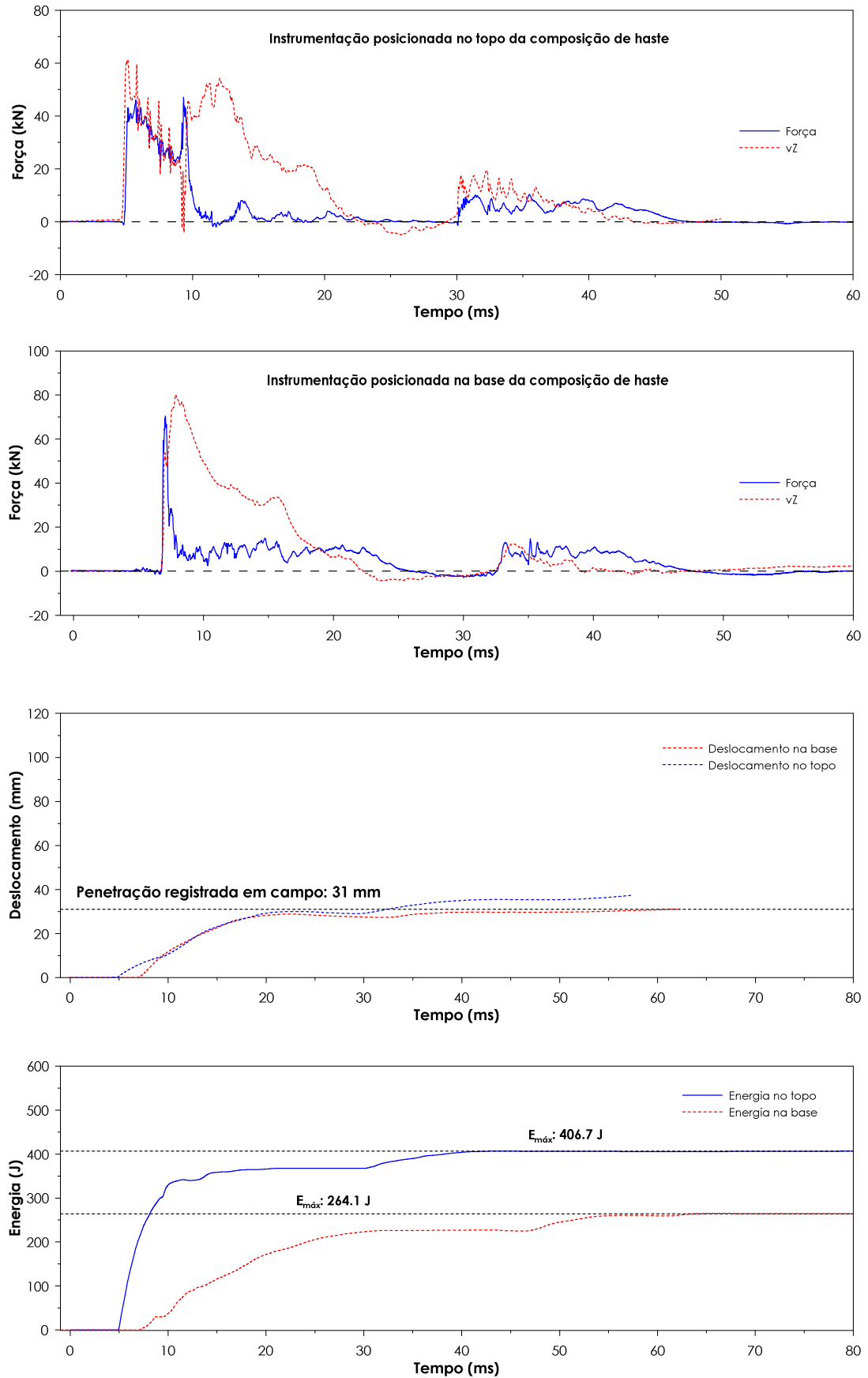
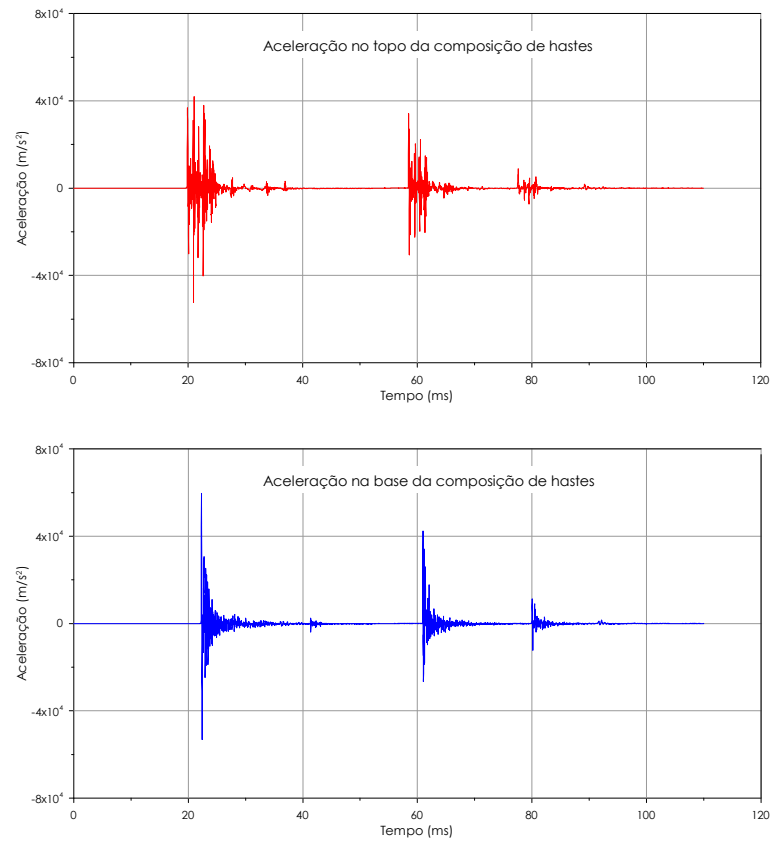


Figura B.49- Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento mecanizado - Prof: 10 m - 9º golpe)

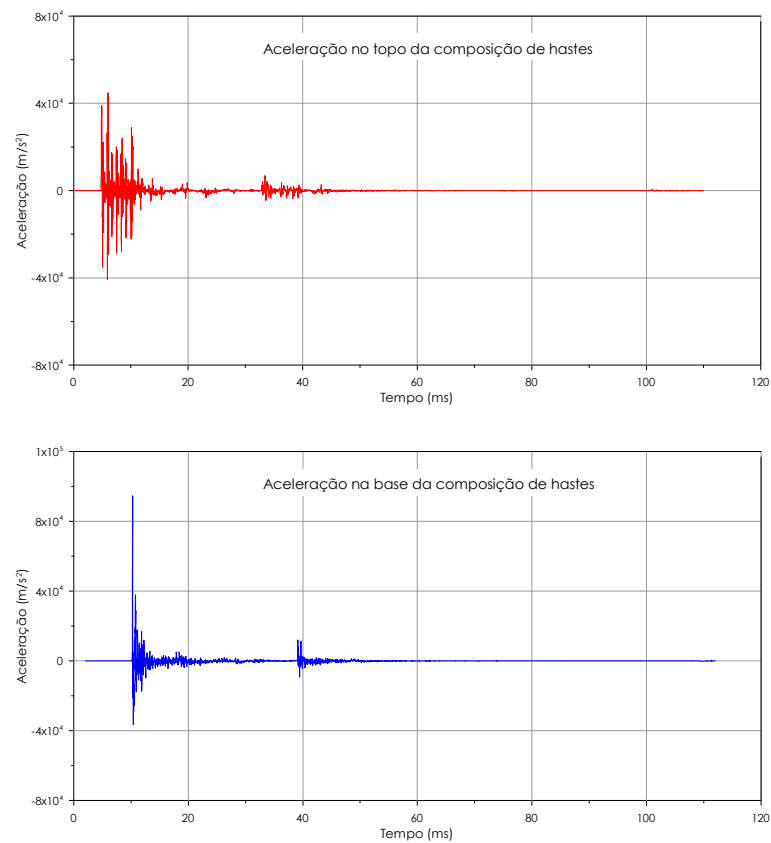




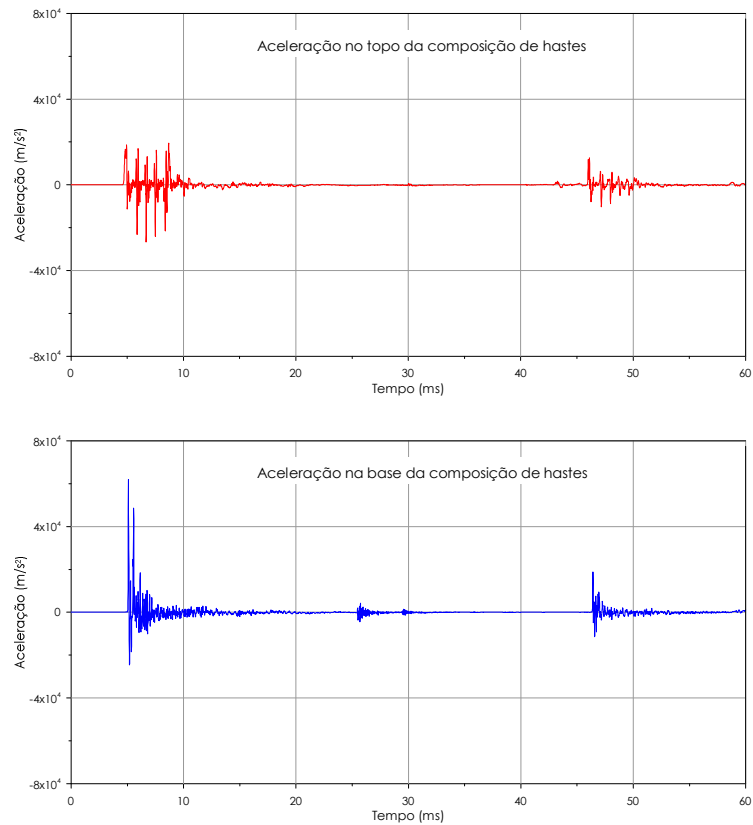
**Figura B.50-** Resultados para ensaio SPT realizado no Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (Equipamento mecanizado - Prof: 10 m - 13° golpe)



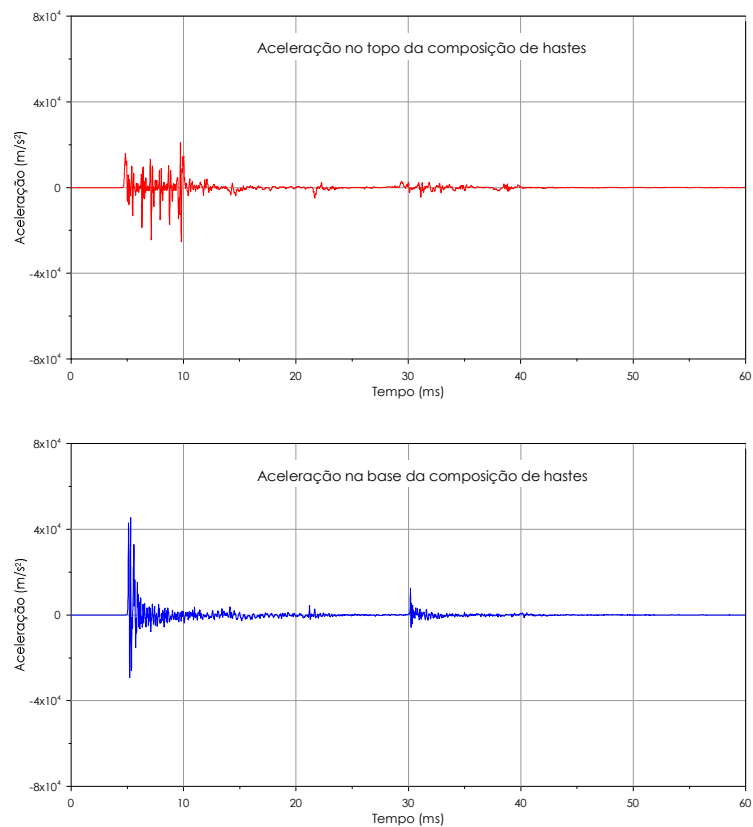
**Figura B.51-** Registros típicos de aceleração – Campo Experimental de Unesp de Bauru (SP) (Equipamento convencional - Prof: 6 m - 3º golpe)



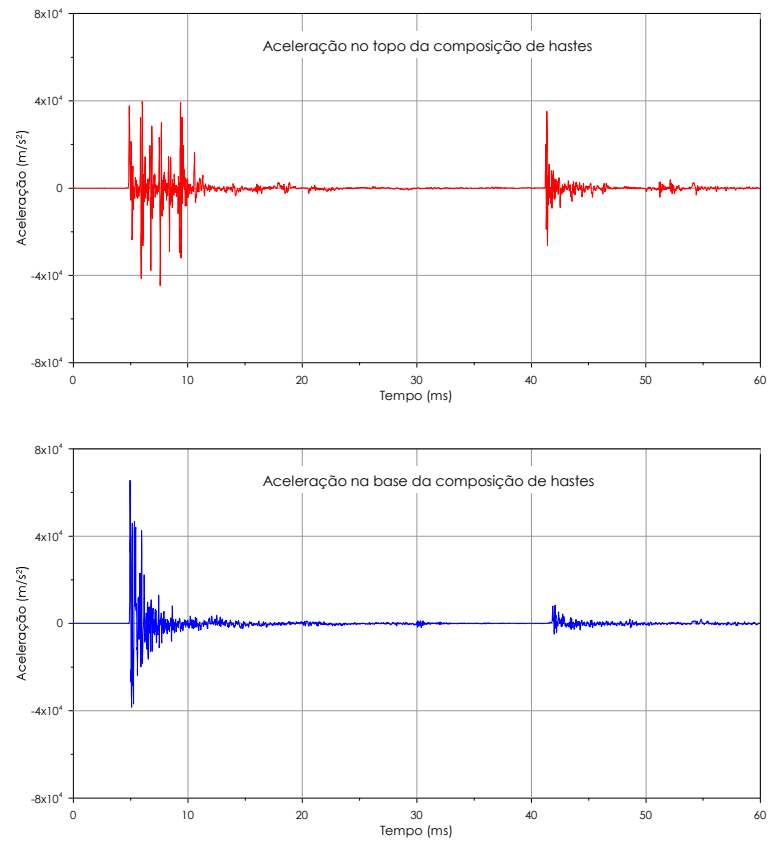
**Figura B.52-** Registros típicos de aceleração – Campo Experimental de Unesp de Bauru (SP) (Equipamento convencional - Prof: 12 m - 8º golpe)



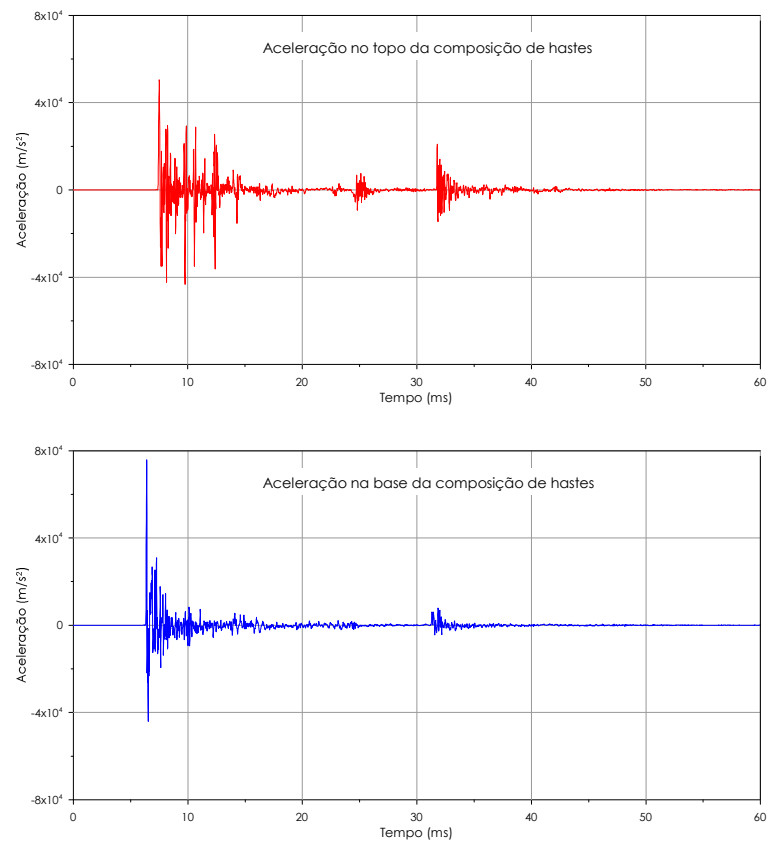
**Figura B.53-** Registros típicos de aceleração – Campo Experimental de Unesp de Bauru (SP) (Equipamento mecanizado - Prof: 8 m - 7° golpe)



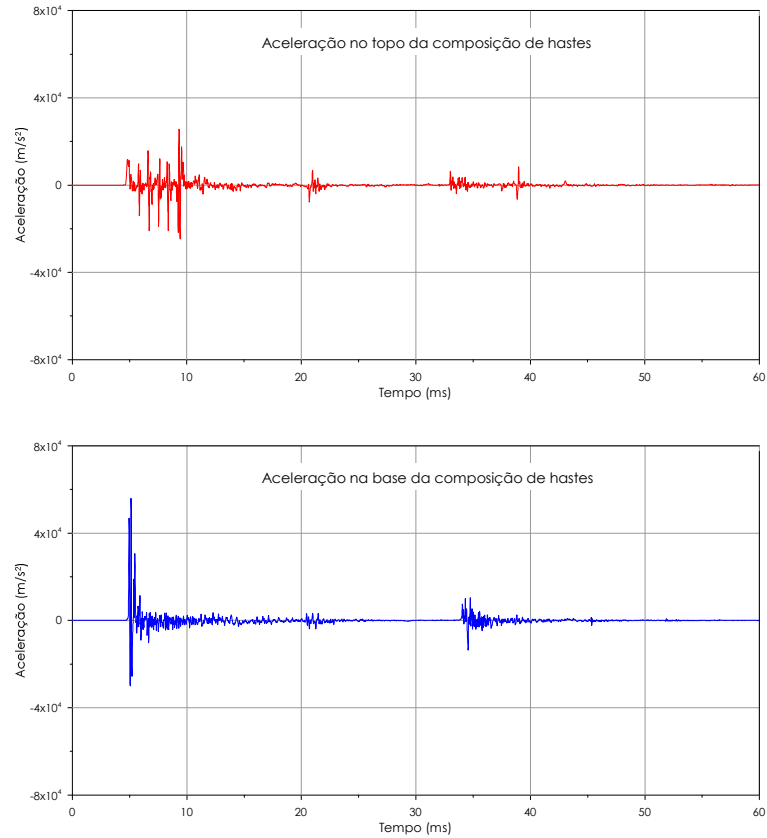
**Figura B.54-** Registros típicos de aceleração – Campo Experimental de Unesp de Bauru (SP) (Equipamento mecanizado - Prof: 11 m - 4° golpe)



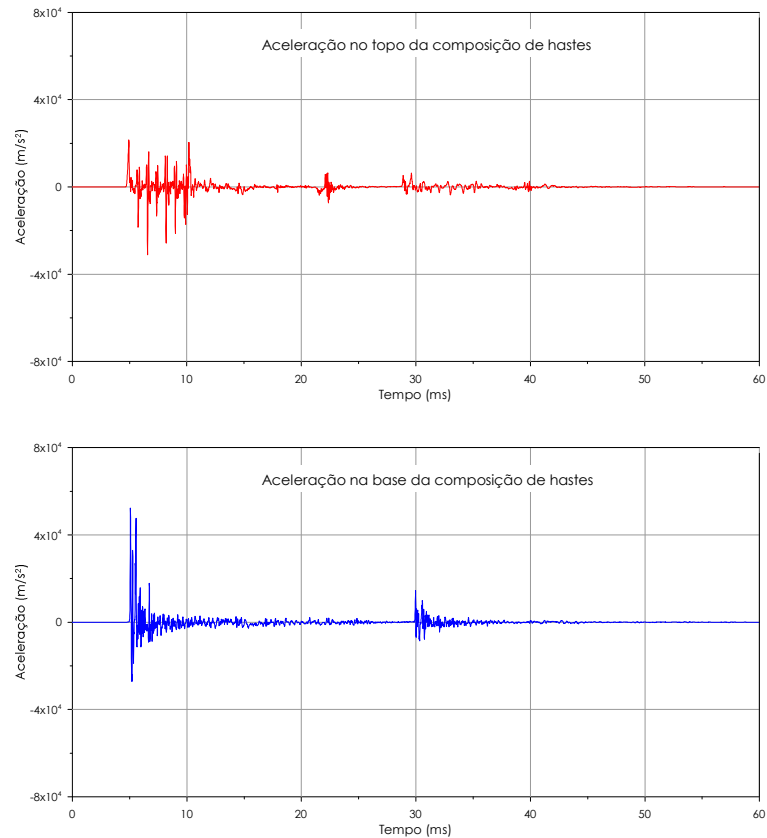
**Figura B.55-** Registros típicos de aceleração – Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (SP) (Equipamento convencional - Prof: 10 m - 10º golpe)



**Figura B.56-** Registros típicos de aceleração – Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (SP) (Equipamento convencional - Prof: 11 m - 12º golpe)



**Figura B.57-** Registros típicos de aceleração – Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (SP) (Equipamento convencional - Prof: 10 m - 11° golpe)



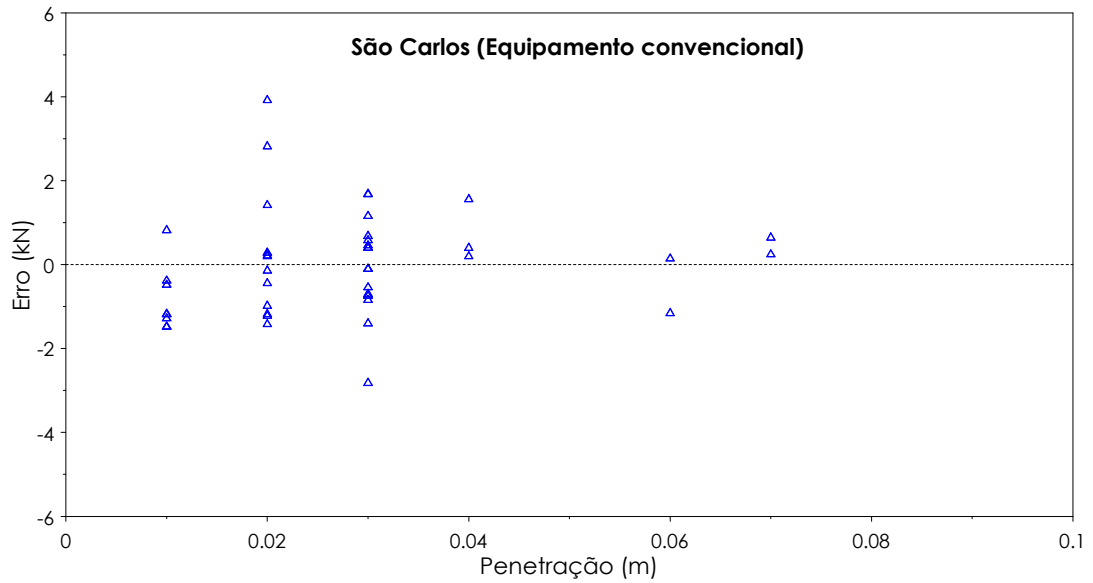
**Figura B.58-** Registros típicos de aceleração – Loteamento Residencial em São Carlos (SP) (SP) (Equipamento convencional - Prof: 12 m - 11° golpe)

# **Apêndice C**

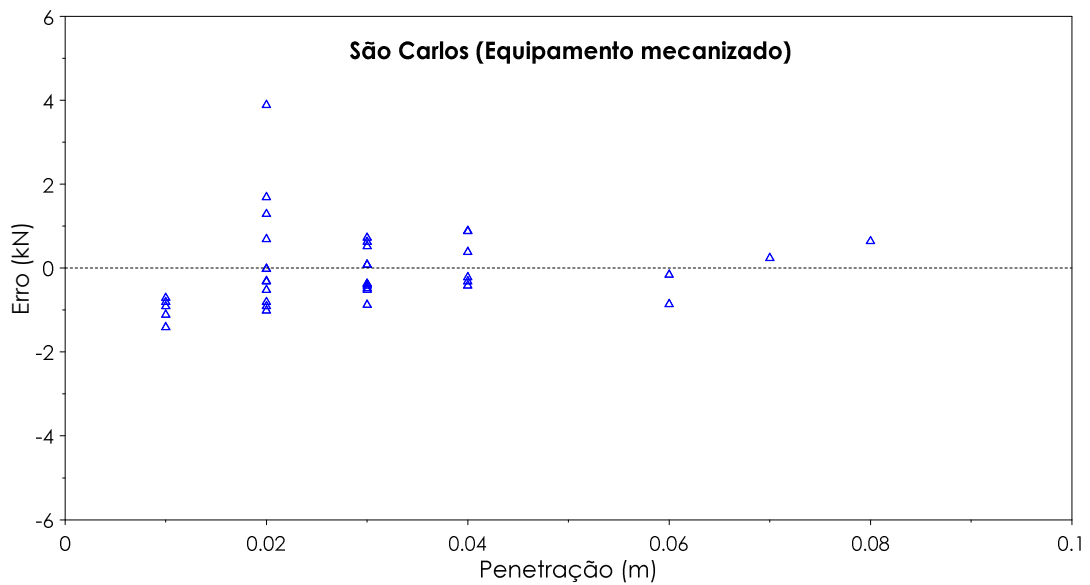
## **Resistência do solo**

---



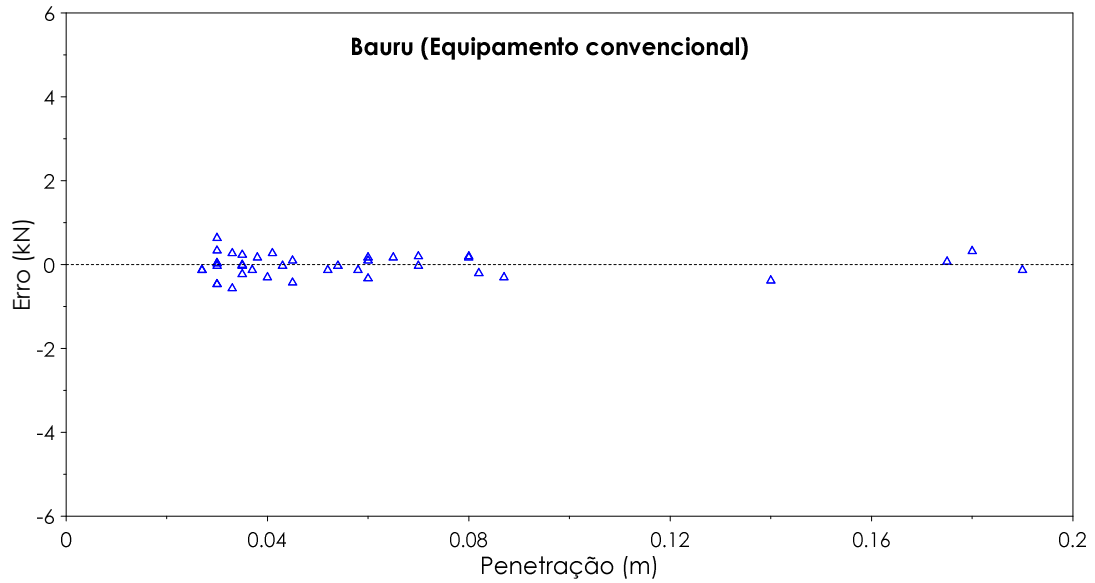


**Figura C.1-** Erro na estimativa da resistência dinâmica do solo versus penetração por golpe (São Carlos – Equipamento convencional).

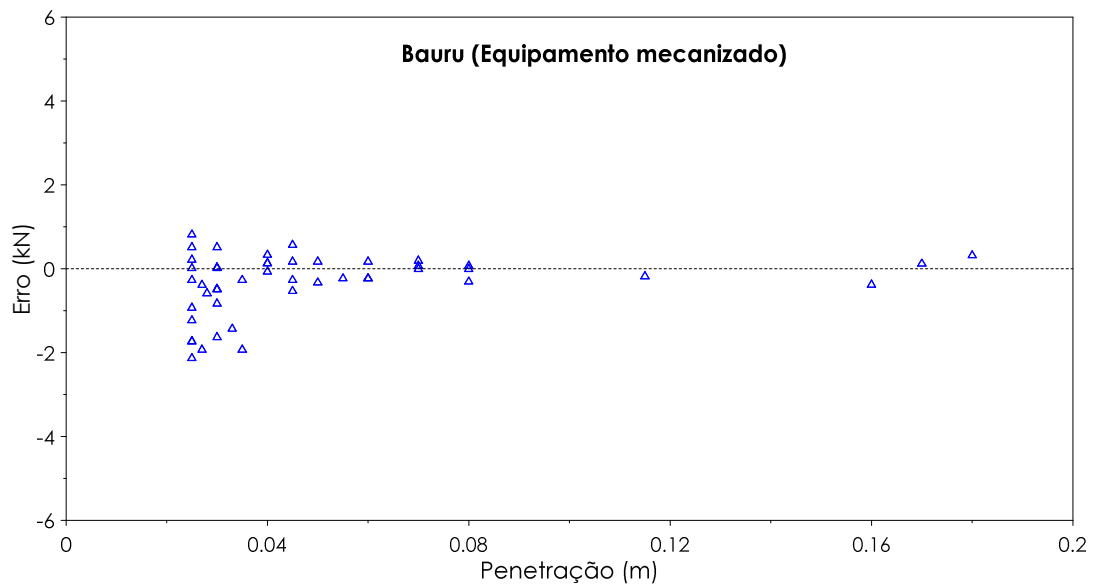


**Figura C.2-** Erro na estimativa da resistência dinâmica do solo versus penetração por golpe (São Carlos – Equipamento mecanizado).





**Figura C.3-** Erro na estimativa da resistência dinâmica do solo versus penetração por golpe (Bauru – Equipamento convencional).



**Figura C.4-** Erro na estimativa da resistência dinâmica do solo versus penetração por golpe (Bauru – Equipamento mecanizado).

# **Apêndice D**

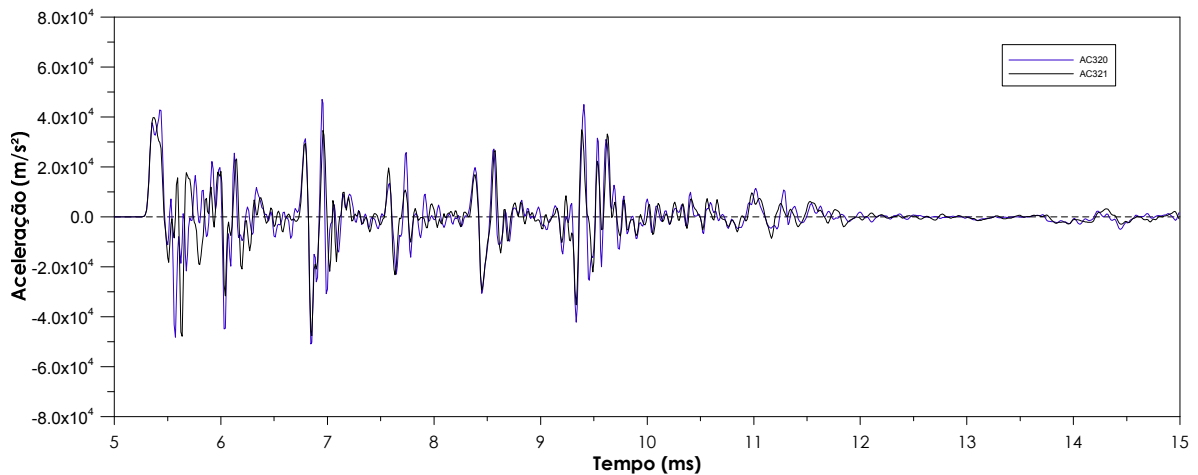
## **Roteiro para análise dos sinais**

---



### 1º Passo: Comparar os sinais de aceleração dos dois acelerômetros

Os sinais de aceleração registrados pelo par de acelerômetros devem ser comparados, a fim de se verificar a representatividade dos registros da instrumentação. Quando os sinais são bastante próximos entre si (Figura D.1) significa que existem uma concordância entre os sinais registrados pelos sensores e conseqüentemente pode-se utilizar o valor médio dos registros de aceleração para o cálculo da energia.



**Figura D.1-** Comparação entre os sinais de aceleração.

No entanto quando os sinais são divergentes (Figura D.2) significa que um dos sensores apresentou problema durante a aquisição dos registros. Para identificar qual dos sensores apresentou problemas, recomenda-se comparar as curvas de força e velocidade multiplicada pela impedância para ambos os acelerômetros (Figura D.3). Adotam-se, para o cálculo de energia, os registros fornecidos pelo acelerômetro que apresenta a melhor proporcionalidade entre os sinais de força obtidos através da célula de carga e através dos sinais de velocidade.

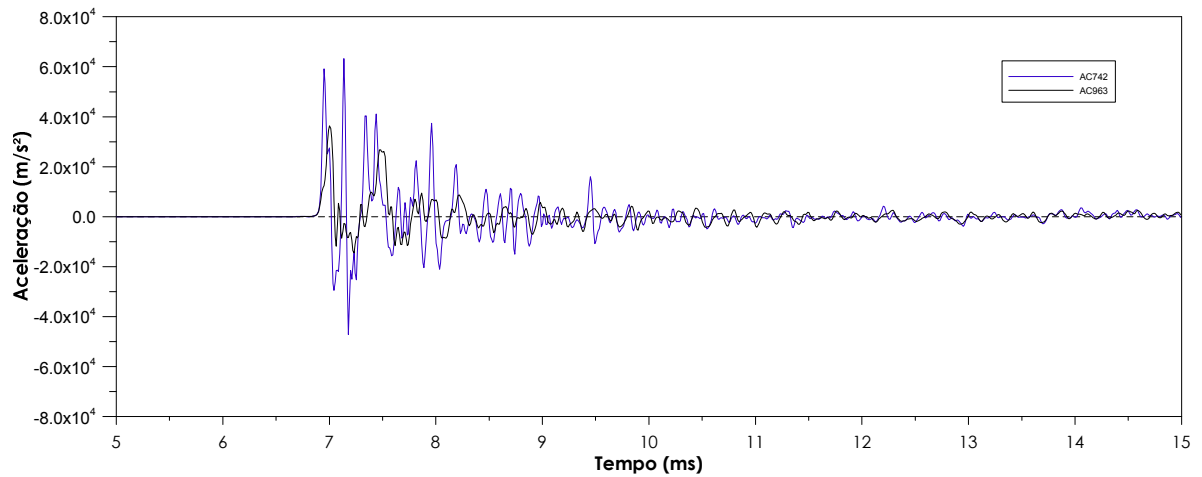


Figura D.2- Comparação entre os sinais de aceleração.

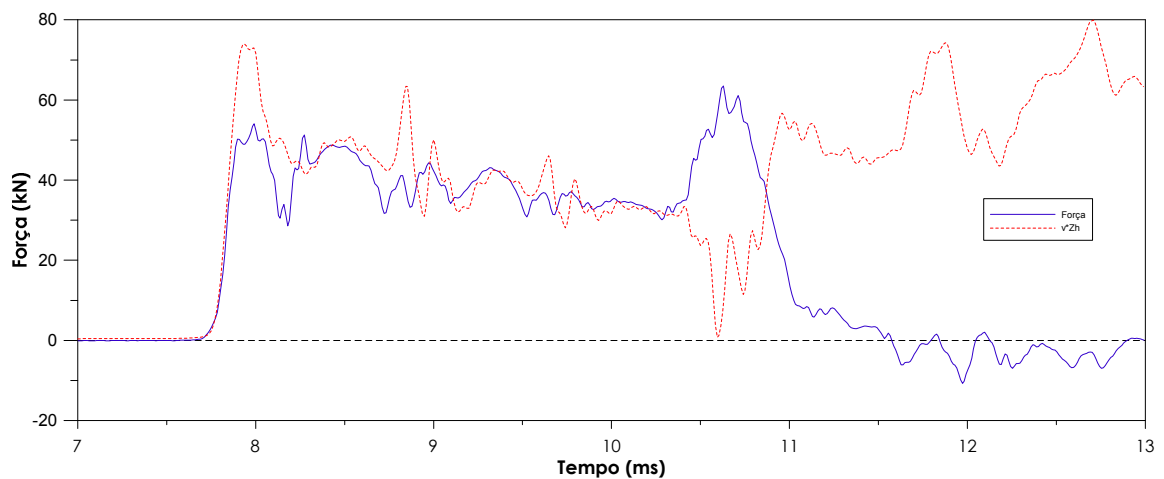
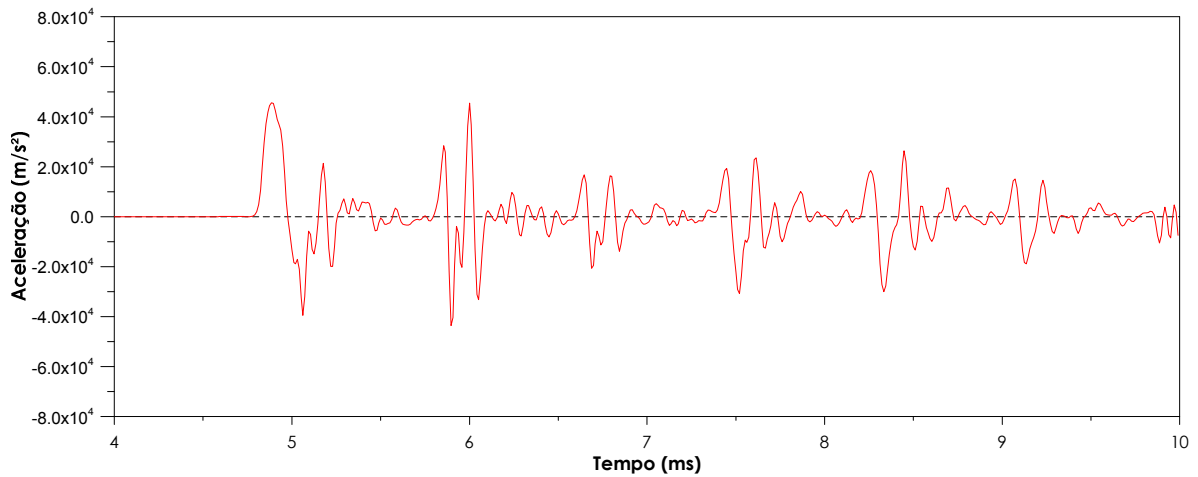


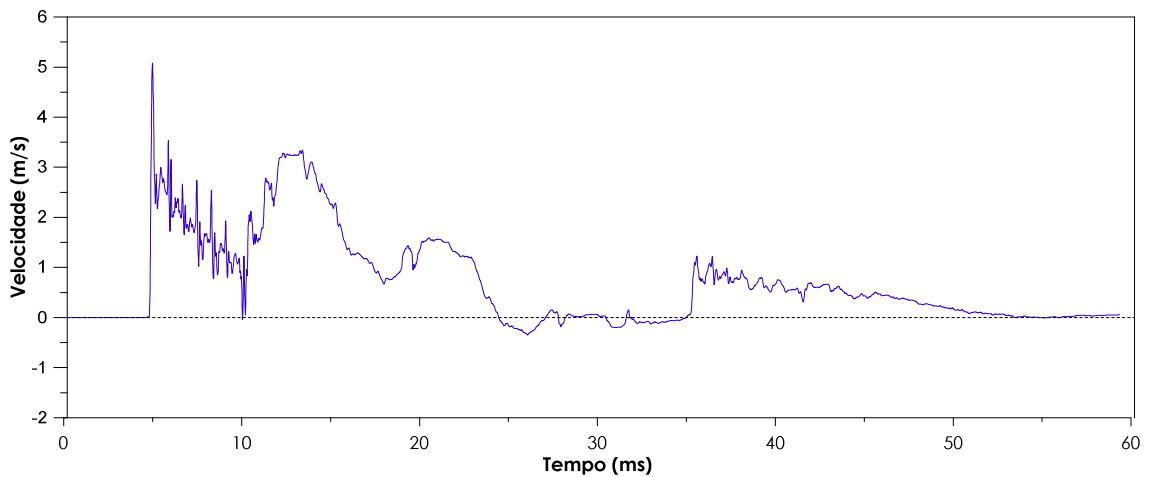
Figura D.3- Comparação entre os sinais de força e  $v \cdot Zh$ .

### 2º Passo: Corrigir os valores de velocidade através da baseline dos sinais de aceleração

A qualidade dos valores de deslocamento e de energia dependem essencialmente da representatividade dos valores de velocidade. Os sinais de velocidade devem ser iguais a zero no início e no fim do evento. Para isso, deve-se corrigir a baseline dos sinais de aceleração no início do evento (Figura D.4), de maneira que essa correção possibilite a obtenção de sinais de velocidade iguais a zero no final do evento (Figura D.5).



**Figura D.4-** Registros de aceleração com o baseline corrigido.



**Figura D.5-** Sinais de velocidade iguais a zero no início e no final do evento.

### 3º Passo: Cálculo da energia

A energia máxima entregue ao conjunto da composição de hastes (energia no topo) ou ao amostrador (energia na base) é determinada através da integração do produto dos sinais de força e velocidade durante o intervalo de tempo correspondente ao evento.

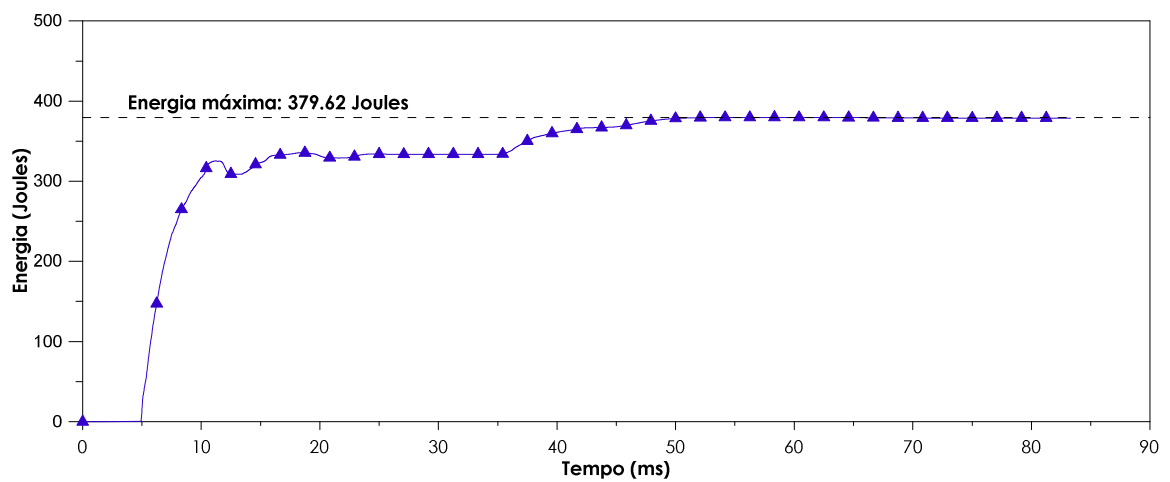
Os sinais de aceleração obtidos através dos acelerômetros devem ser integrados no intervalo de tempo do evento, fornecendo assim os valores de velocidade. A integração dos sinais de aceleração é realizada através da regra de Simpson ou regra dos trapézios. Nesse procedimento, os intervalos de tempo ( $\Delta t$ ) considerados são constantes e iguais ao inverso da taxa de aquisição dos dados ( $1/96000 \text{ s}^{-1}$ ). A velocidade num determinado instante é igual à soma das áreas dos trapézios até esse instante (Equação D.1).

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

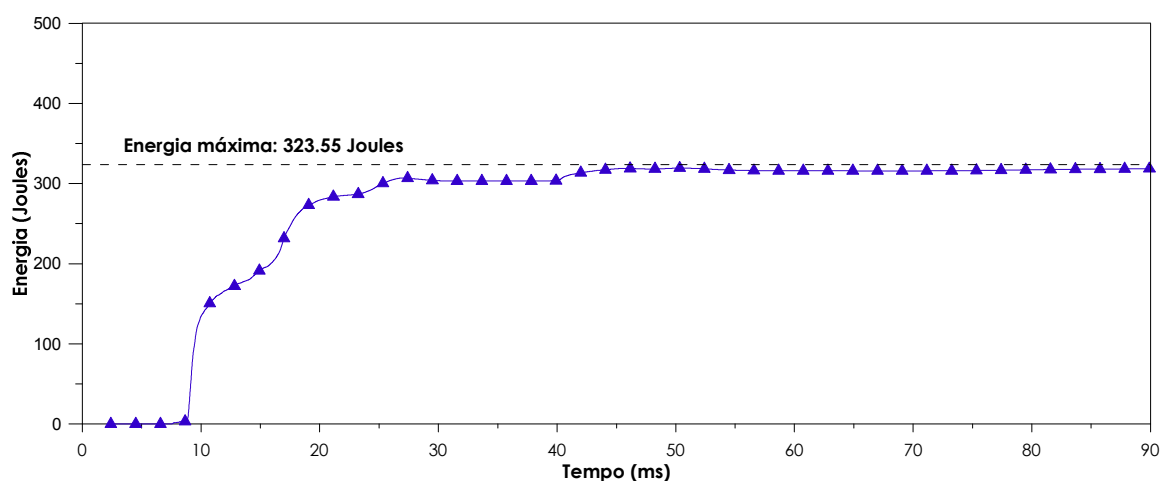
onde  $v_i$  é a velocidade,  $a_i$  é a aceleração em um determinado instante  $t_i$  e  $n$  é o número total dos intervalos de tempo. Nessa integração numérica, admite-se que no instante inicial a velocidade é igual a zero.

Assim, utilizando-se os valores de velocidade determina-se a energia máxima no topo ou na base da composição de hastes (Equação D.2) (Figura D.6 e D.7).

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



**Figura D.6-** Curva de energia versus tempo determinada no topo da composição de hastes.



**Figura D.7-** Curva de energia versus tempo determinada na base da composição de hastes.

#### 4º Passo: Eficiência no ensaio SPT

A eficiência no ensaio SPT é determinada através da relação entre a energia estimada através da instrumentação e a energia potencial do ensaio. A energia potencial do ensaio

SPT deve ser determinada considerando-se o acréscimo da energia potencial devido à penetração do amostrador no solo (ODEBRECHT, 2005) (Equação D.3).

$$EP_{sistema} = EP_M + EP_H = EP_T + (M_m \times g \times \rho) + (M_h \times g \times \rho) \quad (D.3)$$

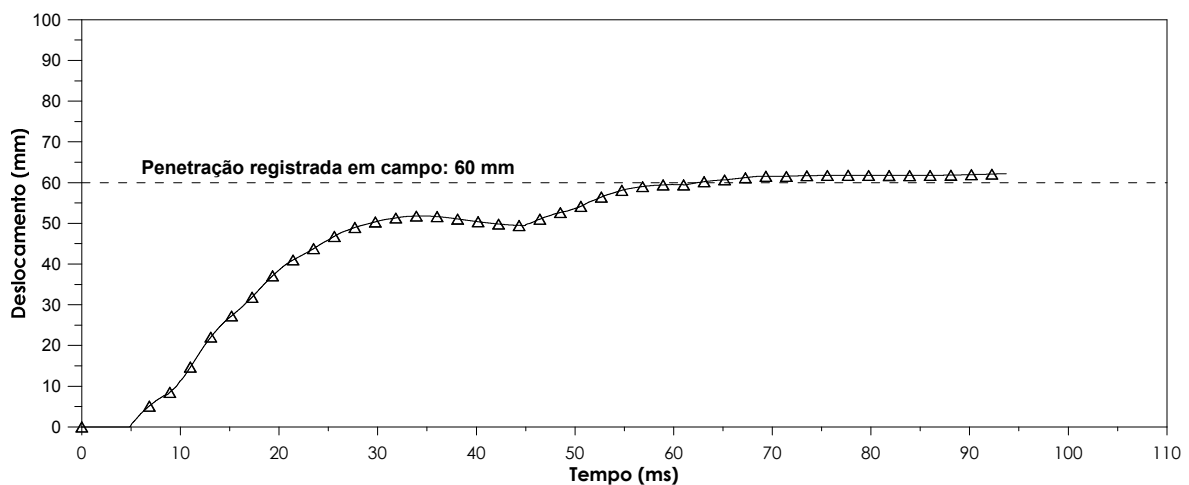
onde  $EP_T$  é a energia potencial nominal do ensaio SPT ( $\cong 478.2$  J),  $EP_M$  é a variação da energia potencial do martelo,  $EP_H$  é a variação da energia potencial das hastes,  $\rho$  é a penetração permanente do amostrador no solo devido à aplicação de um golpe,  $g$  é a aceleração da gravidade ( $\cong 9.81$  m/s<sup>2</sup>),  $M_m$  é a massa do martelo,  $M_h$  é a massa das hastes. A massa das hastes é representada pelo produto da massa linear das hastes ( $\cong 3.23$  kg/m) e o comprimento da composição de hastes.

#### 5º Passo: Sinais de deslocamento

Os valores de deslocamento são obtidos através da integração dos valores de velocidade e seguindo o mesmo procedimento de integração apresentado no 3º passo (Equação D.4). O deslocamento máximo obtido através da integração das velocidades deve ser compatível com a penetração permanente registrada em campo (Figura D.8 e D.9).

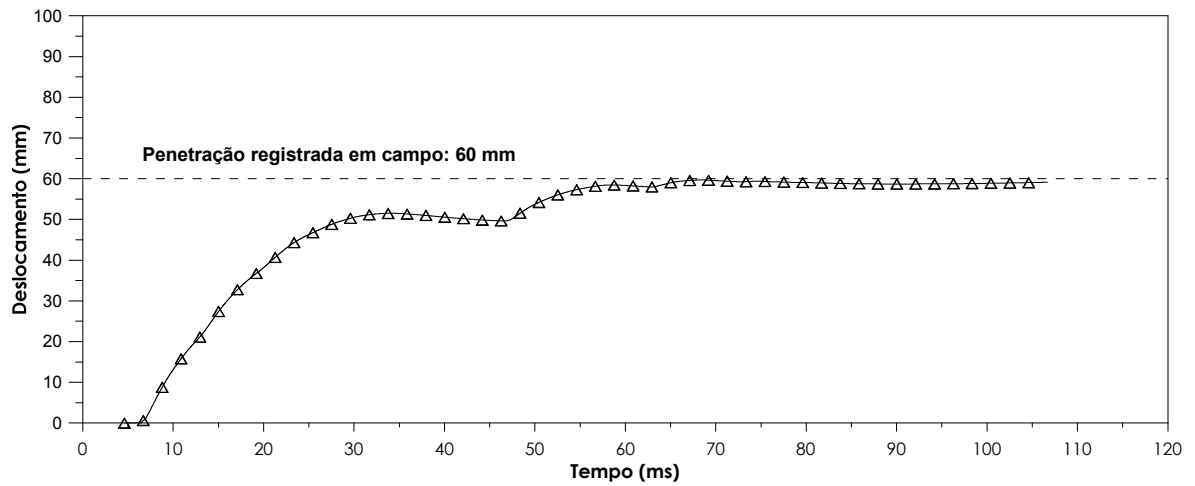
$$\rho_i = \sum_{i=1}^n \frac{(v_{i-1} + v_i)}{2} \times (t_i - t_{i-1}) \quad (D.4)$$

onde  $\rho_i$  é o deslocamento e  $v_i$  é a velocidade em um determinado instante  $t_i$ . Na solução dessa equação admite-se que no instante inicial o deslocamento é igual a zero.



**Figura D.8-** Curva de deslocamento versus tempo determinada na base da composição de hastes.





**Figura D.9-** Curva de deslocamento versus tempo determinada na base da composição de hastes.