



SPT INSTRUMENTADO EM CÂMARA DE CALIBRAÇÃO

Christian Matos de Santana

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientadores: Fernando Artur Brasil Danziger
Bernadete Ragoni Danziger

Rio de Janeiro
Janeiro de 2015

SPT INSTRUMENTADO EM CÂMARA DE CALIBRAÇÃO

Christian Matos de Santana

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof. Fernando Artur Brasil Danziger, D.Sc.

Prof^a. Bernadete Ragoni Danziger, D.Sc.

Prof. Francisco de Rezende Lopes, Ph.D.

Prof. Marcus Peigas Pacheco, Ph.D.

Prof. Renato Pinto da Cunha, Ph.D.

Prof. Erinaldo Hilário Cavalcante, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JANEIRO DE 2015

Santana, Christian Matos de

SPT Instrumentado em Câmara de Calibração /
Christian Matos de Santana. – Rio de Janeiro:
UFRJ/COPPE, 2015.

IX, 251 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Fernando Artur Brasil Danziger,
Bernadete Ragoni Danziger.

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de
Engenharia Civil, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 231-236.

1. SPT. 2. Energia. 3. Câmara de calibração. I.
Danziger, Fernando Artur Brasil *et al.* II. Universidade
Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de
Engenharia Civil. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me conceder essa oportunidade.

Aos meus pais, Zenóbio e Josefa, pelo amor, apoio e motivação constantes e incondicionais.

À minha esposa, Raquel, pelo amor, apoio, companheirismo e compreensão em todos os momentos.

Aos meus irmãos, Júnior e Michele, pelo constante incentivo e carinho.

Ao professor Fernando Artur Brasil Danziger, pela amizade, excelente orientação, que muitas vezes foi além do desenvolvimento dessa tese e pela sua disposição em sempre ajudar.

À professora Bernadete Ragoni Danziger, pela amizade, excelente orientação e constante disposição em contribuir.

À servidora da UFRJ Rita de Cássia, pela amizade e disposição em sempre ajudar.

Aos técnicos de laboratório Roberto Marinho e Edgard Bispo, pelo importante apoio na realização dos ensaios em laboratório e campo.

Aos estagiários Mauro Duarte, Arthur Veiga e Hugo Mollerli pelo importante apoio na realização dos ensaios e sua interpretação.

Aos colegas Maurício Espírito Santo, Alessandra Conde, Graziela Jannuzzi, Vítor Aguiar e Gustavo Guimarães pelo companheirismo e apoio durante o doutorado.

Aos professores da COPPE/UFRJ, pelos conhecimentos transmitidos durante o curso de doutorado e pela disposição em esclarecer dúvidas.

À empresa Grom Acústica e Vibração pelo auxílio na recuperação da câmara de calibração.

Ao CNPq e à Fundação Coppetec, pelo apoio financeiro a essa pesquisa.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

SPT INSTRUMENTADO EM CÂMARA DE CALIBRAÇÃO

Christian Matos de Santana

Janeiro/2015

Orientadores: Fernando Artur Brasil Danziger
Bernadete Ragoni Danziger

Programa: Engenharia Civil

O objetivo principal desta pesquisa é o aprimoramento da compreensão do processo de transferência de energia no SPT. Para isso, foram monitorados 1064 golpes de SPTs realizados em duas localidades no estado do Rio de Janeiro, sendo quantificadas as perdas de energia durante a queda do martelo, no impacto com a cabeça de bater e ao longo da composição de hastes. Com os resultados encontrados, foi possível obter faixas de variação de valores dos fatores de eficiência e_1 , e_2 e e_4 . Além disso, verificou-se grande dispersão nos valores de altura de queda dos ensaios acompanhados, em grande parte dos casos, ficando acima de 80 cm.

Outro aspecto relevante que mereceu atenção especial na pesquisa foi a questão do embuchamento. O fenômeno do embuchamento foi estudado através de cravações estáticas e dinâmicas, em câmara de calibração, do amostrador SPT e de um novo amostrador instrumentado, desenvolvido especialmente para os propósitos da presente pesquisa. Os resultados obtidos mostram que ocorreu embuchamento em todos os casos analisados. Além disso, foi possível evidenciar que fatores como a velocidade de cravação, a compacidade da amostra e a forma do amostrador influenciam a mobilidade da bucha de solo no interior do amostrador, o que afeta a sua resistência à cravação.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

INSTRUMENTED SPT IN CALIBRATION CHAMBER

Christian Matos de Santana

January/2015

Advisors: Fernando Artur Brasil Danziger

Bernadete Ragoni Danziger

Department: Civil Engineering

The main objective of this research is the improvement in the comprehension of the energy transfer process in SPT. The energy was monitored in 1064 blows, in SPT's performed in two sites in the state of Rio de Janeiro. Energy losses were obtained during hammer fall, anvil impact and along the rods. From the results, it was possible to achieve ranges of the efficiency factors values e_1 , e_2 and e_4 . Moreover, there was great dispersion in drop height values monitored in the tests, in many cases greater than 80 cm.

Another aspect that deserved special attention in this research was plugging effect. The plugging phenomenon was observed from static and dynamic SPT sampler driving in calibration chamber and also from the driving records from a new instrumented sampler, specially developed for the present research purposes. The results indicate the occurrence of plugging in all instrumented records. Moreover, it was possible to observe from the instrumented records relevant aspects such as driven velocity, soil density and dimensions of sampler that can modify soil plugging mobility inside the sampler, which affect its driven resistance.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS E OBJETIVOS.....	1
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. COMPORTAMENTO DE AREIAS	4
<i>2.1.1. Comportamento de areias sob condições drenadas.....</i>	<i>4</i>
<i>2.1.2. Comportamento de areias sob condições não-drenadas.....</i>	<i>15</i>
2.2. ENERGIA DO SPT.....	19
<i>2.2.1. Considerações sobre o ensaio SPT.....</i>	<i>19</i>
<i>2.2.2. Considerações iniciais sobre a energia do SPT.....</i>	<i>20</i>
<i>2.2.3. Principais fatores que afetam a energia do SPT.....</i>	<i>22</i>
2.3. ESTÁTICA DO SPT	37
2.4. EMBUCHAMENTO	41
3. CÂMARA DE CALIBRAÇÃO	43
3.1. INTRODUÇÃO.....	43
3.2. HISTÓRICO DA CÂMARA DE CALIBRAÇÃO NGI-COPPE/UFRJ.	
.....	44
3.3. COMPONENTES DA CÂMARA DE CALIBRAÇÃO NGI-COPPE/UFRJ	
.....	45
3.4. INSTRUMENTAÇÃO DA CÂMARA DE CALIBRAÇÃO NGI-	
COPPE/UFRJ.....	56
3.5. OPERAÇÃO DA CÂMARA DE CALIBRAÇÃO NGI-COPPE/UFRJ	57
3.6. RECUPERAÇÃO DA CÂMARA DE CALIBRAÇÃO NGI-	
COPPE/UFRJ.....	63
3.7. A AREIA DE HOKKSUND.....	67
3.8. PIEZOCONE COPPE IV	68
3.9. RESULTADOS DE ENSAIOS REALIZADOS NA CÂMARA DE	
CALIBRAÇÃO NGI-COPPE/UFRJ.....	69
4. EQUIPAMENTOS PARA MONITORAÇÃO DO SPT.....	76
4.1. SPT ANALYZER.....	76
4.2. HPA	79

4.3. CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE	80
5. DESENVOLVIMENTO DE UM AMOSTRADOR INSTRUMENTADO	82
6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS DOS ENSAIOS EM CAMPO.....	89
6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	89
6.2. ENSAIOS NO CAMPO EXPERIMENTAL DE SARAPUÍ II.....	89
6.2.1. <i>Considerações iniciais</i>	89
6.2.2. <i>Características dos ensaios</i>	90
6.2.3. <i>Apresentação dos resultados</i>	93
6.2.4. <i>Análise dos resultados</i>	111
6.3. ENSAIOS NA ÁREA PORTUÁRIA DE ITAGUAÍ.....	118
6.3.1. <i>Considerações iniciais</i>	118
6.3.2. <i>Características dos ensaios</i>	118
6.3.3. <i>Apresentação dos resultados</i>	122
6.3.4. <i>Análise dos resultados</i>	146
6.4. COMPARAÇÃO DE VALORES MEDIDOS COM A LITERATURA	151
7. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS DOS ENSAIOS EM CÂMARA DE CALIBRAÇÃO	154
7.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	154
7.2. ENSAIOS DE CONE (CPT)	155
7.2.1. <i>Considerações iniciais</i>	155
7.2.2. <i>Características dos ensaios</i>	155
7.2.3. <i>Apresentação dos resultados</i>	161
7.2.4. <i>Análise dos resultados</i>	168
7.3. CRAVAÇÃO ESTÁTICA DO AMOSTRADOR SPT.....	170
7.3.1. <i>Considerações iniciais</i>	170
7.3.2. <i>Características dos ensaios</i>	170
7.3.3. <i>Apresentação dos resultados</i>	173
7.3.4. <i>Análise dos resultados</i>	177
7.4. CRAVAÇÃO ESTÁTICA DO NOVO AMOSTRADOR	181
7.4.1. <i>Considerações iniciais</i>	181

7.4.2. <i>Características dos ensaios</i>	181
7.4.3. <i>Apresentação dos resultados</i>	182
7.4.4. <i>Análise dos resultados</i>	188
7.5. CRAVAÇÃO DINÂMICA DO AMOSTRADOR SPT	192
7.5.1. <i>Considerações iniciais</i>	192
7.5.2. <i>Características dos ensaios</i>	192
7.5.3. <i>Apresentação dos resultados</i>	193
7.5.4. <i>Análise dos resultados</i>	196
7.6. CRAVAÇÃO DINÂMICA DO NOVO AMOSTRADOR	200
7.6.1. <i>Considerações iniciais</i>	200
7.6.2. <i>Características dos ensaios</i>	200
7.6.3. <i>Apresentação dos resultados</i>	201
7.6.4. <i>Análise dos resultados</i>	207
7.7. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	211
7.7.1. <i>Comparação de dados de embuchamento</i>	211
7.7.2. <i>Comparação de energias medidas nos ensaios SPT</i>	222
8. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.	225
8.1. CONCLUSÕES	225
8.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	230
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	231
ANEXO 1	237
ANEXO 2	240
ANEXO 3	244
ANEXO 4	246
ANEXO 5	248
ANEXO 6	250

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS E OBJETIVOS

Segundo Campanella e Sy (1994), apesar dos problemas associados à confiabilidade e à repetibilidade, o SPT (*Standard Penetration Test* – Ensaio de Penetração Padrão) continua a ser o ensaio de campo mais utilizado para projetos de fundações, avaliação do potencial de liquefação e controle de compactação de areias e siltes arenosos. Diversos autores associam a ampla disseminação do ensaio à sua simplicidade de execução, robustez dos equipamentos e baixo custo operacional (e.g., Broms e Flodin 1988, Décourt 1989, Belincanta 1998, Cavalcante 2002).

Entretanto, é freqüente a realização do ensaio com equipamentos e procedimentos diferentes dos prescritos pelas normas. Outro problema é que, apesar de existir uma referência internacional para a realização do SPT (ISSMFE, 1989), as normas do ensaio variam entre diferentes países, o que faz com que o significado do N_{SPT} dependa dos equipamentos e práticas adotados no ensaio.

Uma forma de uniformizar o significado do índice de resistência à penetração do SPT (N_{SPT}) tem sido através da medida da energia efetivamente transferida ao topo da composição de hastes e posterior correção do N_{SPT} para uma energia de referência.

Diversos trabalhos, realizados desde meados da década de 70, têm analisado e medido considerável variabilidade nos valores da eficiência na energia que chega ao topo da composição de hastes no SPT (e.g. Schmertmann 1976, Palacios 1977, Schmertmann e Palacios 1979, Robertson et al. 1983, Décourt 1989, Abou-Matar e Goble 1997, Belincanta 1998, Cavalcante 2002, Odebrecht 2003), entretanto pouco se estudou sobre as perdas de energia entre o topo da composição de hastes e o amostrador, especialmente em hastes com comprimentos superiores a 30 m.

Esse trabalho tem como objetivo principal aprimorar a compreensão da transferência de energia no SPT, com a medição de energia desde a soltura do martelo até sua chegada

ao amostrador. Essa monitoração aconteceu em ensaios de campo e sob condições controladas de tensões e deformações, numa câmara de calibração.

A altura de queda do martelo foi medida a partir dos registros de uma câmera filmadora de alta velocidade, capaz de armazenar imagens com até 1000 quadros por segundo. Ainda com essa câmera, foi estimada a velocidade de impacto do martelo. Adicionalmente, tentou-se medir a velocidade de impacto do martelo com um radar de martelos (*HPA – Hammer Performance Analyzer*), porém o equipamento apresentou mau funcionamento, impedindo seu uso. Com as medidas de altura de queda e velocidade de impacto foi possível estimar a energia do martelo no momento da soltura e na iminência do impacto com a cabeça de bater.

A energia na composição de hastes, nas posições imediatamente abaixo da cabeça de bater e imediatamente acima do amostrador, foi medida através da integração de registros de força e de velocidade, provenientes de medidores de deformação e acelerômetros, instalados nas hastes, que fazem parte do sistema *SPT Analyzer*.

Os ensaios SPT instrumentados em campo foram realizados no campo experimental de Sarapuí II e na Base de Submarinos de Itaguaí, ambos no Estado do Rio de Janeiro, com a monitoração de 1064 golpes.

Os ensaios SPT instrumentados em laboratório foram realizados na câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ, localizada no Prédio Professor Willy Lacerda, no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ. Durante os ensaios foi utilizada a areia de Hokksund seca ao ar, da qual são conhecidos resultados de ensaios de cone em câmara de calibração e já se possui extensa caracterização através de ensaios de laboratório.

O segundo objetivo desse trabalho foi melhor compreender o fenômeno do embuchamento no amostrador SPT. Para isso, foi projetado e fabricado um amostrador de seção quadrada, o qual foi instrumentado com três células de tensão total no seu interior, o que permitiu estudar o estado de tensões nas paredes do amostrador e sua variação com a cravação. Foram realizados ensaios estáticos e dinâmicos, com o amostrador desenvolvido e com o convencional, para posteriores comparações entre eles. Todos os experimentos foram executados em câmara de calibração com a areia de Hokksund seca ao ar.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esse trabalho está organizado da seguinte forma:

Capítulo 1 – Mostra um panorama geral sobre os temas em discussão, apresenta os objetivos da presente pesquisa e a organização do trabalho.

Capítulo 2 – Apresenta uma revisão bibliográfica sobre o comportamento de areias sob o enfoque tradicional (descrito em trabalhos como Taylor 1948, Lee e Seed 1967 e Seed e Lee 1967). Em seguida discute a questão da energia do ensaio SPT e os principais fatores intervenientes. Por fim, detalha a estática do SPT, com base principalmente no trabalho de Schmertmann (1979).

Capítulo 3 – Descreve o funcionamento e a operação da câmara de calibração NGI/COPPE/UFRJ, além de mostrar os pontos mais relevantes do seu processo de recuperação.

Capítulo 4 – Apresenta os equipamentos utilizados na medição da energia em ensaios SPT: SPT Analyzer, HPA e câmara de alta velocidade.

Capítulo 5 – Descreve o desenvolvimento do projeto do novo amostrador instrumentado, a instrumentação utilizada e sua calibração.

Capítulo 6 – Apresenta e analisa os resultados das monitorações de energia nos ensaios SPT realizados em campo.

Capítulo 7 – Apresenta e analisa os resultados de ensaios realizados em câmara de calibração, com o objetivo de estudar o fenômeno do embuchamento.

Capítulo 8 – Apresenta as principais conclusões do presente trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Finalmente, são apresentadas as Referências Bibliográficas e os Anexos.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 COMPORTAMENTO DE AREIAS

2.1.1 *Comportamento de areias sob condições drenadas*

Segundo Lee e Seed (1967), as primeiras demonstrações de que há variação de volume durante o cisalhamento de areias foram feitas por Reynolds (1885), que mostrou experimentalmente que areias compactas dilatam quando cisalhadas.

Casagrande (1940) demonstrou que há dependência entre o ângulo de atrito de uma areia e a sua variação de volume durante o cisalhamento, com areias compactas dilatando e apresentando altos valores de ângulo de atrito, enquanto areias fofas comprimem e desenvolvem menores ângulos de atrito.

Casagrande (1940) também definiu o conceito de índice de vazios crítico para descrever um estado particular de compacidade em que a areia é cisalhada essencialmente sem variação de volume. O valor do índice de vazios crítico diminui com o aumento da tensão confinante.

Taylor (1948) sugeriu que parte da tensão cisalhante necessária para levar à ruptura uma amostra de areia compacta é usada para prover energia para a areia expandir contra a tensão confinante. Assim a resistência ao cisalhamento é composta de duas parcelas (ver Figura 2.1):

- i) Uma parcela de atrito entre os grãos (combinação de atrito por rolamento e deslizamento) - τ_{cv} ;
- ii) Uma componente de variação de volume (chamada de interlocking ou entrosamento dos grãos) - τ_e .

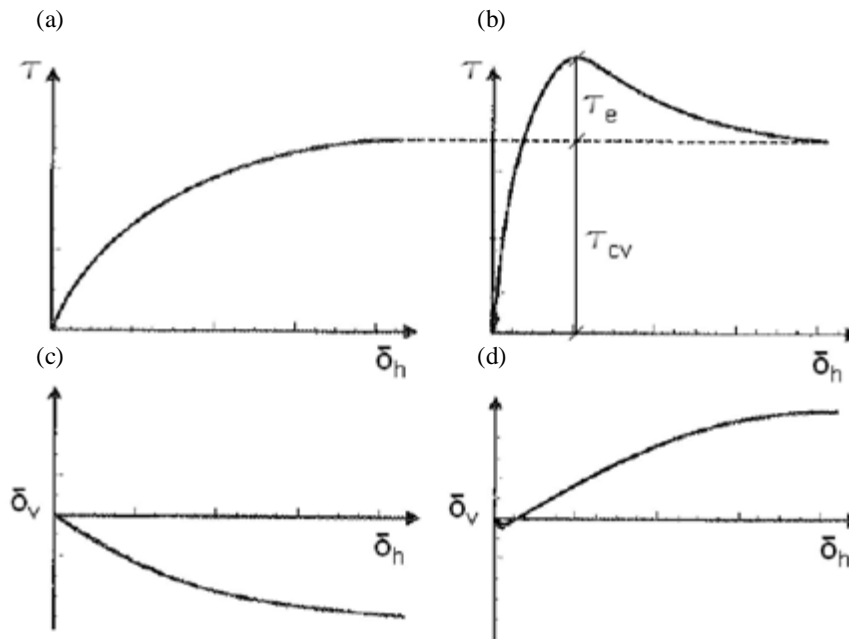


Figura 2.1 – Resultados típicos de ensaios de cisalhamento direto: (a) $\tau \times \delta_h$ para areias fofas, (b) $\tau \times \delta_h$ para areias compactas, (c) $\delta_v \times \delta_h$ para areias fofas e (d) $\delta_v \times \delta_h$ para areias compactas; sendo: τ = tensão cisalhante, δ_v = deslocamento vertical da amostra e δ_h = deslocamento horizontal da amostra (adaptado de Pinto, 2001).

Segundo Taylor (1948), a perda gradual de resistência nas areias compactas passado o pico pode ser atribuída à diminuição do entrosamento dos grãos, que decorre da expansão da areia.

O valor de τ_e pode ser obtido igualando-se a parcela do trabalho necessário para cisalhar o corpo de prova associada ao entrosamento com a parcela do trabalho para expandir a amostra. Num ensaio de cisalhamento direto, tem-se:

$$\tau_e \cdot A \cdot d\delta_h = \sigma_n \cdot A \cdot d\delta_v \Rightarrow \tau_e = \sigma_n \frac{d\delta_v}{d\delta_h} \quad (2.1)$$

Sendo:

A = Área da seção transversal da amostra;

$d\delta_h$ = Incremento de deslocamento horizontal;

$d\delta_v$ = Incremento de variação de altura no corpo de prova;

σ_n = Tensão normal.

$d\delta_v/d\delta_h$ representa a primeira derivada do gráfico δ_v x δ_h , sendo que seu valor máximo ocorre para a mesma deformação horizontal que o pico do gráfico τ x δ_h , em areias compactas.

Partindo do mesmo princípio, Bishop (1954) deduziu uma expressão para quantificar a parcela da tensão desviadora em ensaios triaxiais que é gasta na expansão do corpo de prova (σ_e), ver Figura 2.2.

O trabalho realizado pela força axial é igualado ao trabalho para cisalhar o corpo de prova a volume constante (dw) mais o trabalho para expandir a amostra. Assim tem-se:

$$\sigma_1 \cdot \pi r^2 \cdot d\delta_v = dw + \sigma_3 \cdot 2\pi r \cdot h \cdot d\delta_r \quad (2.2)$$

Sendo:

σ_1 = Tensão principal maior;

σ_3 = Tensão confinante;

r = Raio da amostra;

h = Altura da amostra.

$d\delta_r$ = Incremento de deslocamento radial.

Dividindo a Equação 2.2 pelo volume da amostra ($V = \pi \cdot r^2 \cdot h$) tem-se:

$$\sigma_1 \cdot \frac{d\delta_v}{h} = \frac{dw}{V} + \sigma_3 \cdot 2 \cdot \frac{d\delta_r}{r} \Rightarrow \sigma_1 \cdot d\varepsilon_1 = \frac{dw}{V} + \sigma_3 \cdot 2 \cdot d\varepsilon_3 \quad (2.3)$$

Sendo:

$d\varepsilon_1$ = Incremento de deformação axial;

$d\varepsilon_3$ = Incremento de deformação radial;

Da teoria da elasticidade (no domínio de pequenos deslocamentos e pequenas deformações) tem-se que $d\varepsilon_v = d\varepsilon_1 + 2d\varepsilon_3$, sendo $d\varepsilon_v$ o incremento de deformação volumétrica da amostra. Assim:

$$\sigma_1 \cdot d\varepsilon_1 = \frac{dw}{V} + \sigma_3 (d\varepsilon_v - d\varepsilon_1) \Rightarrow (\sigma_1 - \sigma_3) d\varepsilon_1 = \frac{dw}{V} + \sigma_3 \cdot d\varepsilon_v \quad (2.4)$$

Considerando que $\sigma_1 = \sigma_e + \sigma_{cv}$ e substituindo em 2.4 tem-se:

$$\sigma_e d\varepsilon_1 + (\sigma_{cv} - \sigma_3) d\varepsilon_1 = \sigma_3 \cdot d\varepsilon_v + \frac{dw}{V} \quad (2.5)$$

A parcela da Equação 2.5 que relaciona a tensão desviadora à variação de volume da amostra é dada por:

$$\sigma_e = \sigma_3 \cdot \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1} \quad (2.6)$$

O ângulo de atrito de uma areia (ϕ_d) para ensaios triaxiais é dado por:

$$\tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi_d}{2}\right) = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3}\right)_f \quad (2.7)$$

Desse modo, o ângulo de atrito de uma areia subtraído da parcela de dilatação (ângulo de atrito a volume constante, ou seja, ϕ_{cv}) é dado por:

$$\tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi_{cv}}{2}\right) = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3} - \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1}\right)_f \quad (2.8)$$

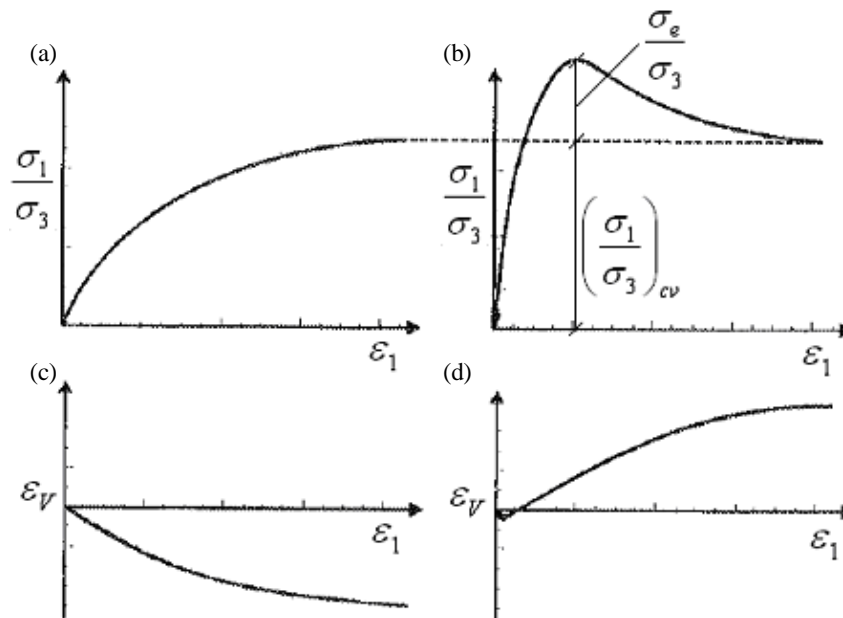


Figura 2.2 – Resultados típicos de ensaios triaxiais: (a) $\sigma_1/\sigma_3 \times \varepsilon_1$ para areias fofas, (b) $\sigma_1/\sigma_3 \times \varepsilon_1$ para areias compactas, (c) $\varepsilon_v \times \varepsilon_1$ para areias fofas e (d) $\varepsilon_v \times \varepsilon_1$ para areias compactas (adaptado de Pinto, 2001).

Lee e Seed (1967) realizaram uma extensa série de ensaios triaxiais drenados em amostras da areia do rio Sacramento (nos Estados Unidos). As amostras ensaiadas tinham compacidade relativa (D_r) iniciais (após a etapa de compressão hidrostática) que variavam de $D_r = 38\%$ a $D_r = 100\%$ e foram submetidas a diversas tensões confinantes, variando de 100 kPa a 12.000 kPa.

A Figura 2.3 mostra os resultados dos ensaios triaxiais no conjunto de amostras mais compactas (com $D_r = 100\%$) para tensões confinantes (σ_3) variando de 100 kPa a 12.000 kPa. Lee e Seed (1967) descrevem como comportamento típico dessas amostras:

- Gráficos $\sigma_1/\sigma_3 \times \varepsilon_1$ apresentam pico;
- Após o pico a relação σ_1/σ_3 decresce com o aumento das deformações até estabilizar-se num valor residual;
- Ao longo do cisalhamento verifica-se pequena redução de volume seguida de aumento de volume.

A Figura 2.4 mostra os resultados dos ensaios no conjunto de amostras mais fofas (com $D_r = 38\%$). Lee e Seed (1967) descrevem como comportamento típico dessas amostras:

- A relação σ_1/σ_3 cresce com o incremento das deformações de maneira mais lenta que nas areias compactas e sem apresentar pico;
- Ao longo do cisalhamento verifica-se somente redução de volume do corpo de prova.

Nos dois casos verifica-se que o acréscimo de tensão confinante tem três efeitos:

- Reduz as características friáveis da curva $\sigma_1/\sigma_3 \times \varepsilon_1$, ou seja, suaviza os picos;
- Aumenta a deformação na ruptura;
- Reduz a tendência de dilatância.

Assim, mesmo uma amostra de areia compacta pode sofrer compressão durante todo o cisalhamento, desde que a tensão confinante seja alta o suficiente para produzir esse efeito. Ou seja, uma areia compacta sob altos valores de tensão confinante pode comportar-se de modo similar a uma areia fofa sob tensão confinante mais baixa. Do mesmo modo, uma areia fofa sob baixa tensão confinante pode apresentar tendência de dilatância durante o cisalhamento.

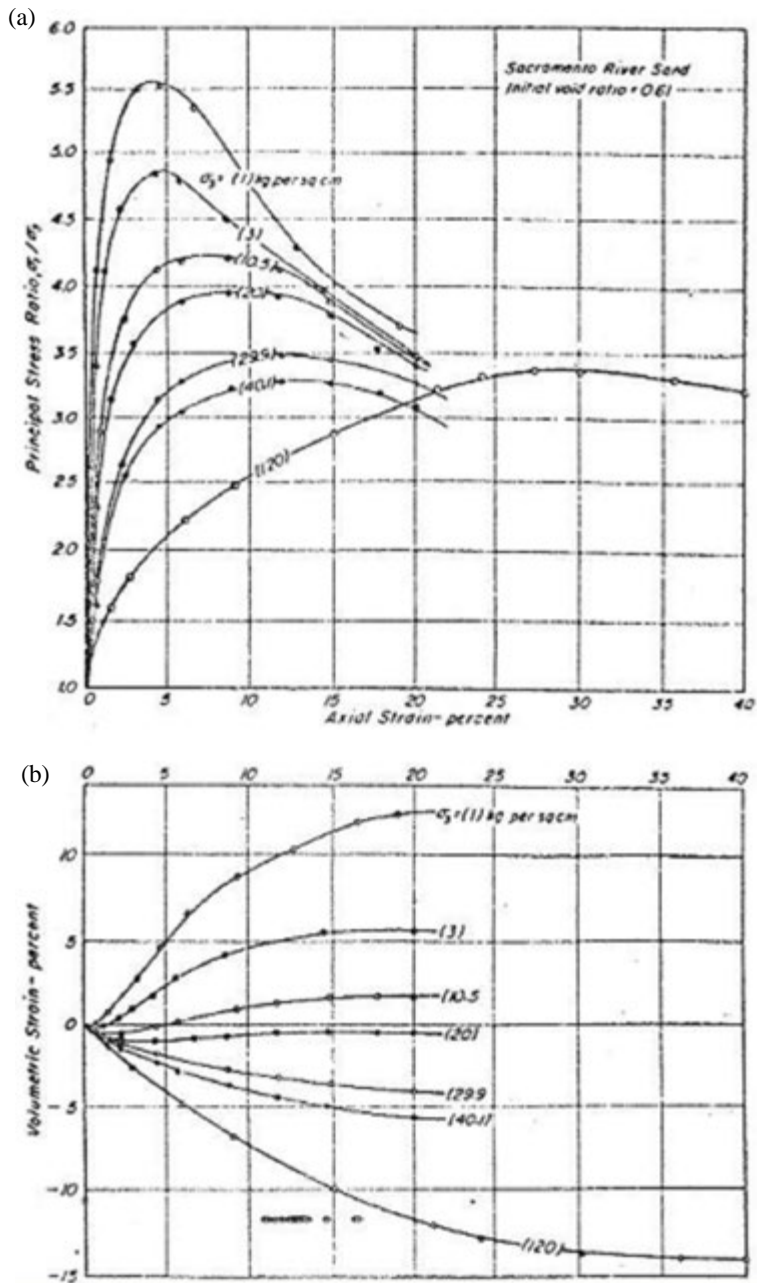


Figura 2.3 – Resultados de ensaios triaxiais na areia do rio Sacramento – Amostras mais compactas ($D_r = 100\%$): (a) $\sigma_1/\sigma_3 \times \varepsilon_1$ e (b) $\varepsilon_v \times \varepsilon_1$ (Lee e Seed, 1967).

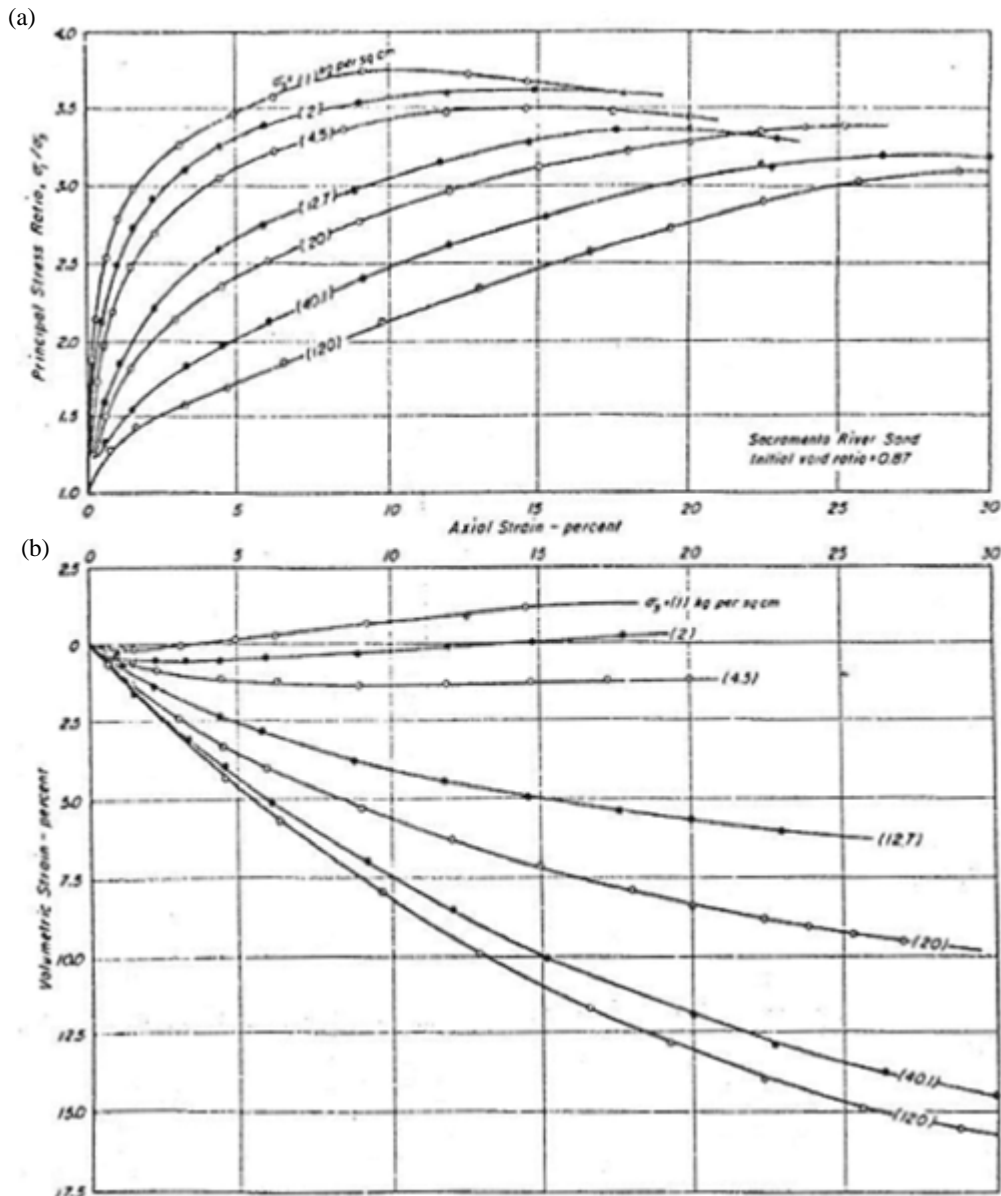


Figura 2.4 – Resultados de ensaios triaxiais na areia do Rio Sacramento – Amostras mais fofas ($D_r = 38\%$): (a) $\sigma_1/\sigma_3 \times \varepsilon_1$ e (b) $\varepsilon_v \times \varepsilon_1$ (Lee e Seed, 1967).

Lee e Seed (1967) plotaram, para cada ensaio triaxial, os valores de variação de volume na ruptura (ε_{vf}) em função do índice de vazios inicial da fase de cisalhamento (fim do adensamento), obtendo-se curvas para diferentes valores de tensão confinante (σ_3), a fim de interpolar quais índices de vazios iniciais produziriam deformação volumétrica nula na ruptura, em cada curva (Figura 2.5a). O índice de vazios inicial que, para uma dada tensão confinante, conduz à deformação nula na ruptura foi chamado de índice de vazios crítico (e_c). A tensão confinante associada à deformação volumétrica nula na

ruptura foi chamada de tensão confinante crítica (σ_{3c}). A Figura 2.5b mostra a relação entre índice de vazios crítico e tensão confinante crítica para a areia do rio Sacramento. Esses resultados indicam que a relação entre e_c e σ_{3c} é única para uma areia e independe do índice de vazios inicial do corpo de prova.

Assim a curva $e_c \times \sigma_{3c}$ é uma divisora de comportamento de uma areia, já que amostras ensaiadas com o par $e - \sigma_3$ acima dessa linha apresentam comportamento compressivo e abaixo da linha apresentam comportamento dilatante.

É importante salientar que apesar do conceito de índice de vazios crítico utilizado por Lee e Seed (1967) referir-se a uma deformação volumétrica nula na ruptura, as amostras ensaiadas apresentam alguma variação de volume antes e após a ruptura, conforme exemplificado na Figura 2.6.

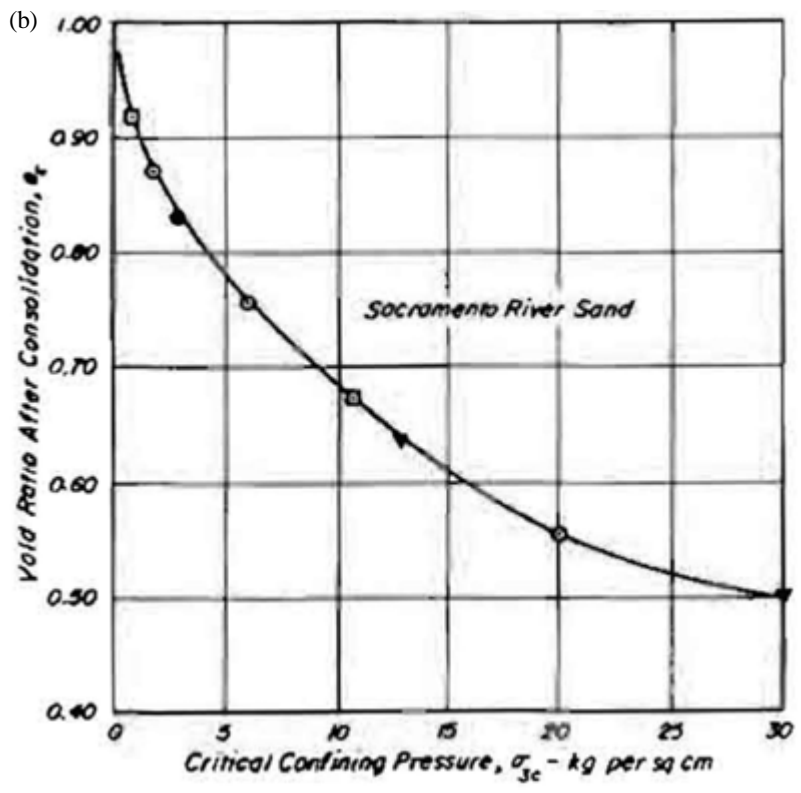
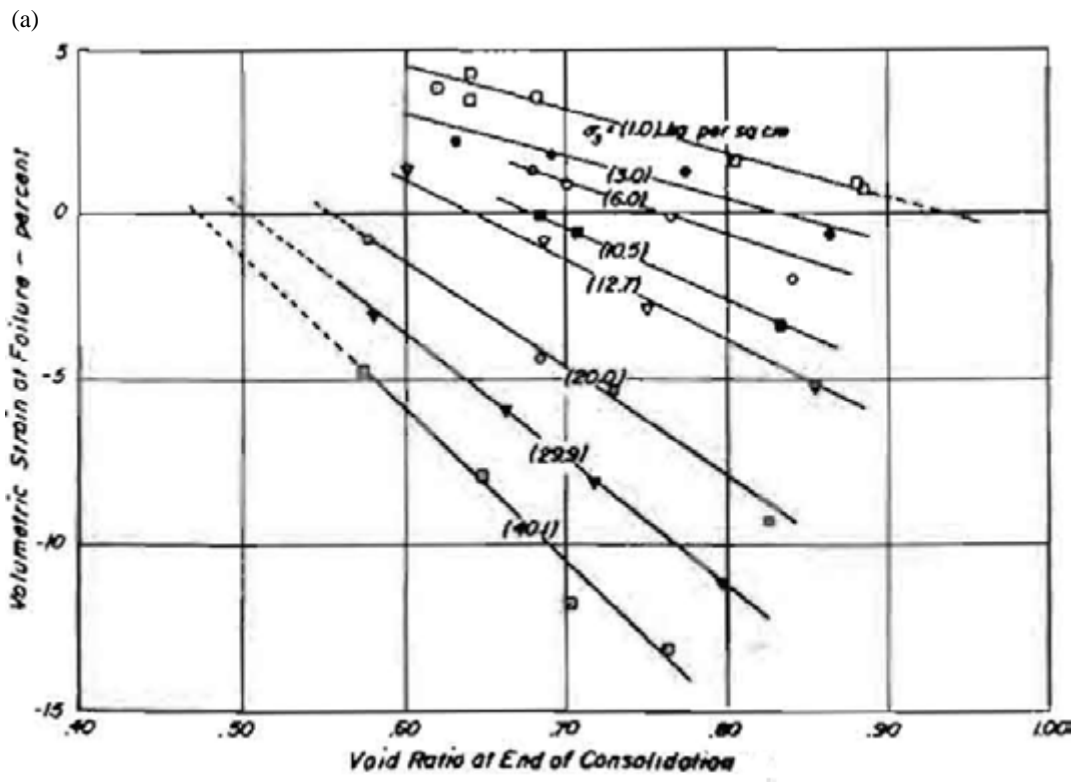


Figura 2.5 – Resultados de ensaios triaxiais na areia do Rio Sacramento: a) $\epsilon_{vf} \times e$, b) $e_c \times \sigma_{3c}$ (Lee e Seed, 1967).

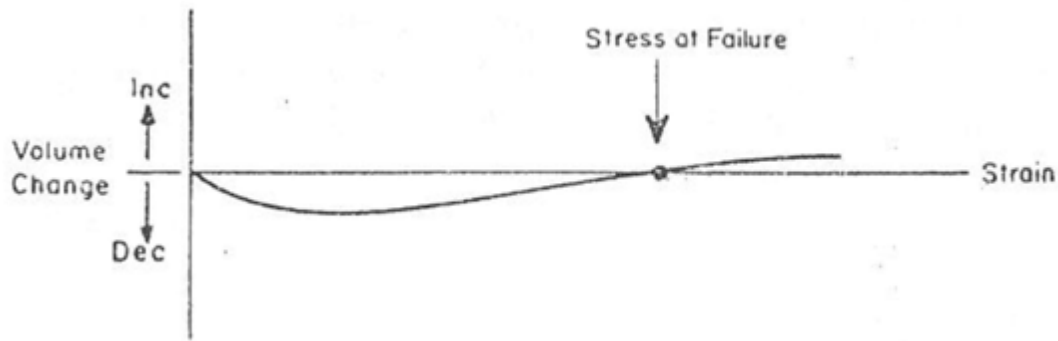


Figura 2.6 – Relação típica ε_v x ε_1 para ensaios triaxiais drenados essencialmente a volume constante (Seed e Lee, 1967).

Rowe e Barden (1969) definem o índice de vazios crítico real como aquele que uma areia atinge após a ruptura a grandes deformações, quando passa a ser cisalhada a volume constante ($d\varepsilon_v/d\varepsilon_1 = 0$) e sem variação na tensão desviadora ($d\sigma_d/d\varepsilon_1 = 0$). E o índice de vazios associado a uma deformação volumétrica nula na ruptura (conceito adotado por Lee e Seed, 1967) é chamado de índice de vazios crítico inferior, ver Figura 2.7.

Assim é de se esperar que o índice de vazios crítico real forneça um ângulo de atrito menor que o índice de vazios crítico inferior, já que o último possui relação $d\varepsilon_v/d\varepsilon_1 \neq 0$ na ruptura e conseqüentemente relação $\sigma_e/\sigma_3 \neq 0$.

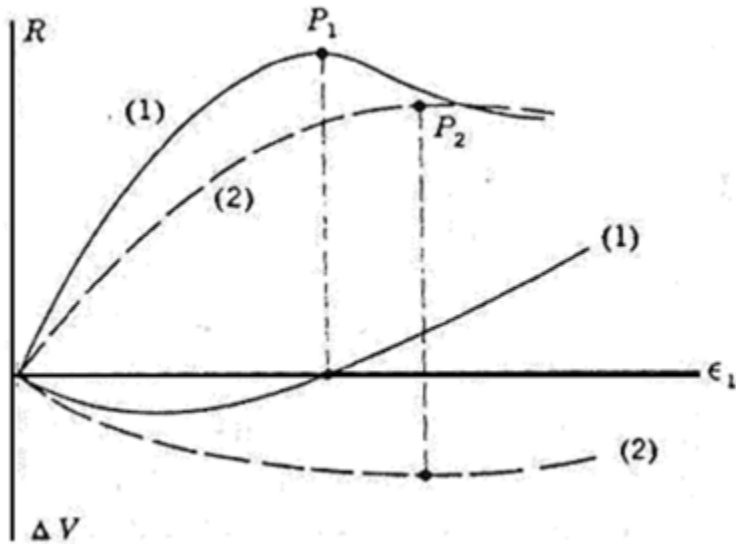


Figura 2.7 – Comparação entre resultados de ensaios triaxiais conduzidos com índice de vazios crítico real (linha tracejada) e índice de vazios crítico inferior (linha contínua). Sendo $R =$ Resistência mobilizada e $\Delta V =$ Variação volumétrica da amostra (Rowe e Barden, 1969).

Outra importante observação feita por Lee e Seed (1967) é que a envoltória de resistência de areias torna-se progressivamente achatada com o aumento das tensões confinantes. A Figura 2.8 mostra envoltórias de resistências para a areia do rio Sacramento com quatro diferentes compacidades iniciais. A amostra mais compacta apresenta um ângulo de atrito para baixas tensões confinantes de 41° e a mais fofa de 34° . Para tensões confinantes mais altas o ângulo de atrito de todas as amostras cai para 24° . Uma explicação para esse fenômeno é a quebra de grãos. Ensaio granulométricos realizados após os triaxiais mostraram significativa quebra de partículas.

Com base nessas observações, Lee e Seed (1967) concluíram que a resistência ao cisalhamento de areias é uma combinação de três parcelas:

- Atrito por deslizamento e rolamento;
- Efeito de dilatância;
- Efeito de quebra e rearranjo de partículas.

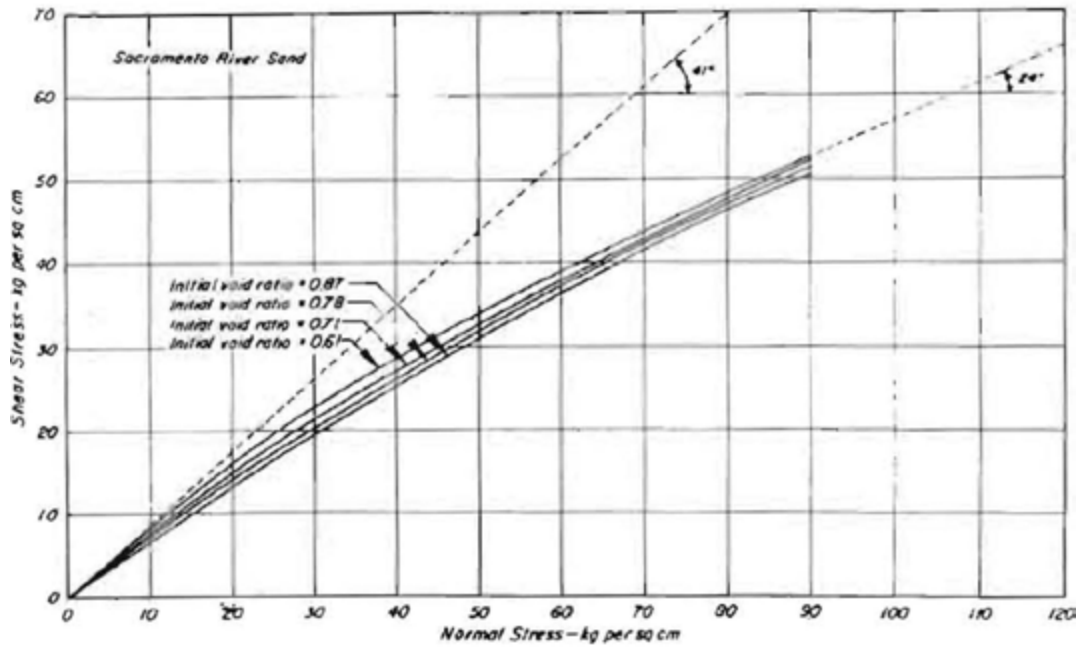


Figura 2.8 – Envoltórias de resistência da areia do rio Sacramento para amostras com quatro diferentes compacidades (Lee e Seed, 1967).

2.1.2 Comportamento de areias sob condições não-drenadas

De acordo com Seed e Lee (1967), as areias são muito permeáveis e na grande maioria dos casos práticos a velocidade de aplicação dos carregamentos é tal que os acréscimos de poro-pressão (induzidos pelas solicitações) são dissipados quase que instantaneamente, ou seja, esses carregamentos ocorrem de maneira drenada. Existem casos, porém, em que as solicitações são tão rápidas que podem ocorrer de forma não-drenada em areias. Isso pode acontecer, por exemplo, durante explosões ou terremotos.

Casagrande (1940) verificou que quando areias fofas são cisalhadas sob condições não-drenadas a tendência de compressão é substituída pelo desenvolvimento de poro-pressões positivas. Já em areias compactas a tendência de dilatância é substituída pelo desenvolvimento de poro-pressões negativas.

Bishop e Eldin (1950) concluíram a partir de ensaios triaxiais não-drenados em areias saturadas:

- A poro-pressão não pode atingir valores menores que -1 atm (cerca de -100 kPa). Atingido esse valor de poro-pressão ocorre cavitação, com a formação de pequenas bolhas de vapor de água nos vazios do solo.
- Quando ocorre cavitação em ensaios não-drenados, a envoltória de ruptura em termos de tensões totais tem a inclinação semelhante à da envoltória em termos de tensões efetivas (ver Figura 2.9).
- Quando não ocorre cavitação em ensaios não-adensados e não-drenados, a envoltória de ruptura em termos de tensões totais é horizontal ($\phi_u = 0^\circ$), ver Figura 2.10.

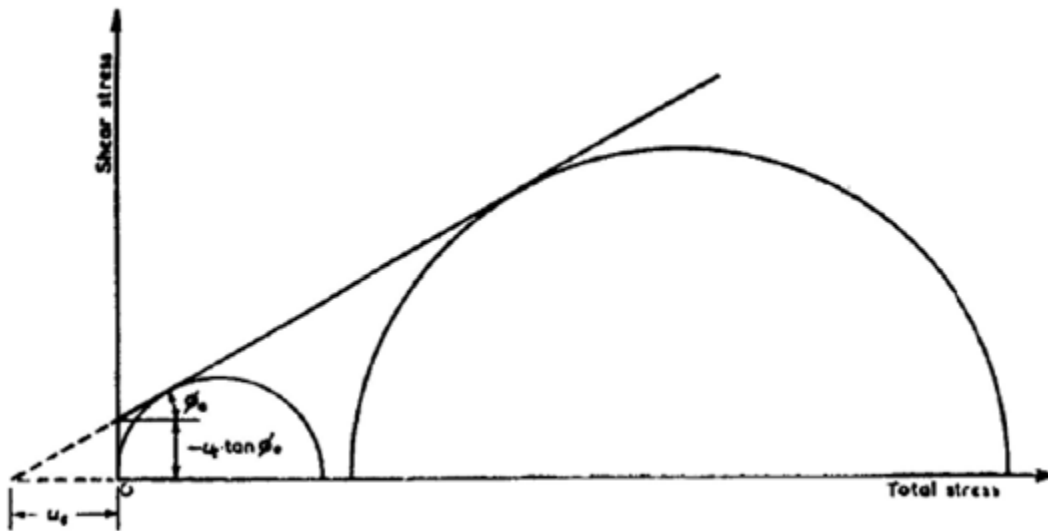


Figura 2.9 – Envoltória de ruptura em termos de tensões totais de ensaios não-drenados em que aconteceu cavitação (Bishop e Eldin, 1950).

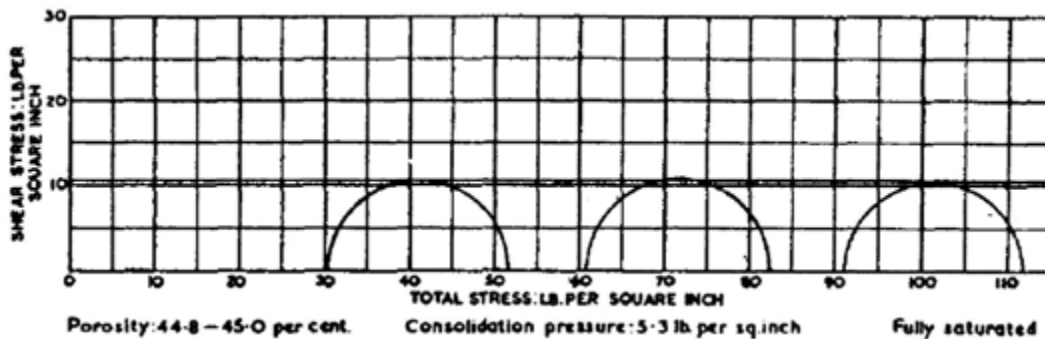


Figura 2.10 – Envoltória de ruptura em termos de tensões totais de ensaios não-adensados e não-drenados em que não aconteceu cavitação (Bishop e Eldin, 1950).

Em ensaios não-drenados a curva $e_c \times \sigma_{3c}$ (Figura 2.11) continua sendo uma divisora de comportamento de uma areia, já que as amostras ensaiadas com o par $e - \sigma_3$ acima dessa linha desenvolvem acréscimos de poro-pressão positivos e abaixo dela negativos.

Assim, caso um ensaio não-drenado seja realizado numa amostra de areia sob tensão confinante menor que a sua tensão confinante crítica, serão gerados incrementos negativos de poro-pressão durante o cisalhamento. E a tensão confinante efetiva aumentará até que:

- A tensão confinante efetiva atinja um valor igual à tensão confinante crítica. A partir desse ponto não há variação na tensão confinante efetiva até a ruptura da amostra. As condições de ensaio se deslocam, por exemplo, de A até D (Figura 2.11).
- A poro-pressão atinja -1 atm, quando acontece a cavitação e a poro-pressão não pode mais diminuir, ocorrendo variação de volume na amostra. As condições de ensaio se deslocam, por exemplo, de B até E (Figura 2.11)

Já se um ensaio não-drenado for realizado numa amostra de areia sob tensão confinante maior que a sua tensão confinante crítica, serão gerados incrementos positivos de poro-pressão durante o cisalhamento, o que diminuirá a tensão confinante efetiva até que ela atinja um valor igual à tensão confinante crítica. As condições de ensaio se deslocam, por exemplo, de C até D (Figura 2.11)

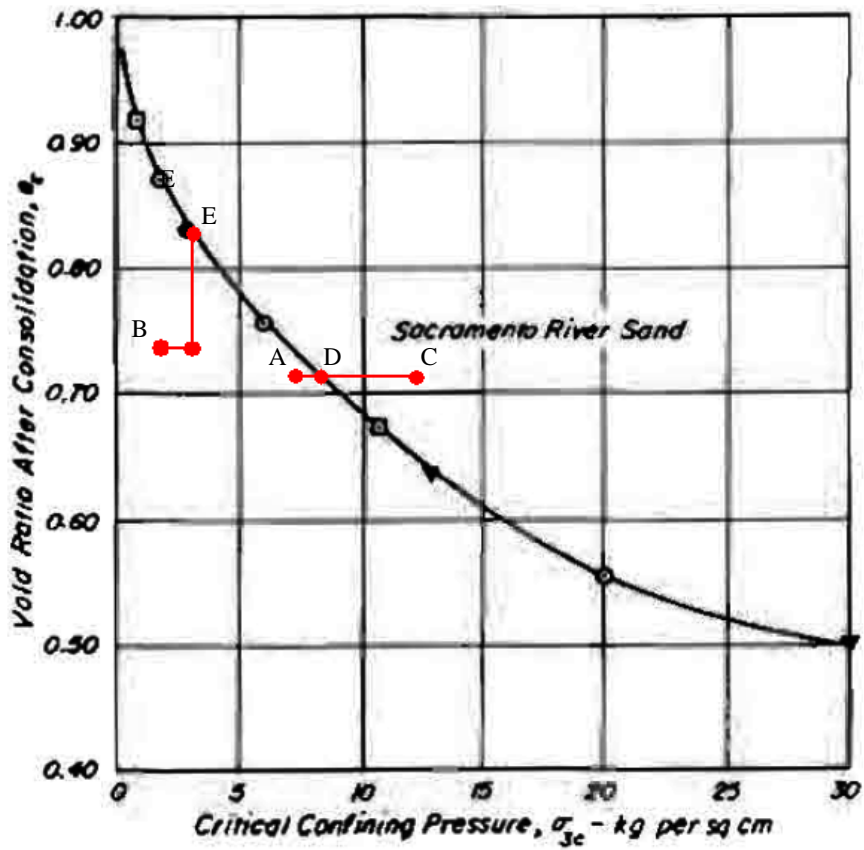


Figura 2.11 – Resultados de ensaios triaxiais na areia do rio Sacramento: $e_c \times \sigma_{3c}$ (adaptado de Lee e Seed, 1967).

2.2 ENERGIA DO SPT

2.2.1 Considerações sobre o ensaio SPT

A sondagem de simples reconhecimento de solos, na qual é realizado o ensaio SPT (Standard Penetration Test), é descrita na NBR-6484/2001 como tendo as seguintes finalidades para a engenharia civil:

- a) Determinar os tipos de solos em suas profundidades de ocorrência;
- b) Determinar a posição do nível d'água;
- c) Determinar os índices de resistência à penetração a cada metro (através da cravação do amostrador SPT).

Segundo a NBR-6484/2001, o ensaio SPT consiste na cravação de um amostrador padrão no solo por ação da queda de um martelo normalizado, com massa igual a 65 kg, caindo de uma altura padrão de 75 cm. O parâmetro resultante desse procedimento é o número de golpes necessário para a penetração dos 30 cm finais do amostrador no solo, após a cravação inicial de 15 cm (N_{SPT}). Além disso, após a cravação é possível a coleta de amostras deformadas do solo, que foram retidas no amostrador, para posteriores ensaios em laboratório.

O índice de resistência à penetração fornecido pelo ensaio SPT (N_{SPT}) é utilizado em diversas aplicações geotécnicas, como estimativas de recalques e de capacidade de carga de fundações, de compactação de areias e avaliação do potencial de liquefação.

Em consequência de sua simplicidade de execução, robustez e baixo custo operacional, o SPT tornou-se de longe o ensaio geotécnico de campo mais empregado no mundo, segundo Broms e Flodin (1988).

Fletcher (1965), Teixeira (1977), Broms e Flodin (1988), Belincanta (1998), Belincanta e Cintra (1998) e Cavalcante (2002), dentre outros autores, fazem relatos históricos do processo de desenvolvimento do ensaio SPT. Por considerar os trabalhos citados suficientemente claros e abrangentes, não será feito nesse trabalho um histórico do ensaio.

2.2.2 Considerações iniciais sobre a energia do SPT

Apesar do SPT possuir norma em diversos países, ocorre com frequência na sua realização o uso de procedimentos e equipamentos fora de norma, o que pode resultar em diferentes valores de N_{SPT} em um mesmo solo dentro de um mesmo país. Ocorrem, ainda, diferenças entre as normas em diferentes países, apesar da existência de um procedimento de referência internacional para o ensaio, ISSMFE (1989). Desse modo, o significado do N_{SPT} depende do equipamento e da prática de ensaio empregados.

A fim de uniformizar o significado do N_{SPT} , a energia efetivamente transferida à composição de hastes (E_i) passou a ser estudada no início da década de 70, a partir, principalmente, dos trabalhos de De Melo (1971), Schmertmann (1976), Palacios (1977) e Schmertmann e Palacios (1979). Esses estudos foram suficientes para estimular outros pesquisadores envolvidos com os ensaios *in situ* a dar continuidade ao entendimento cada vez mais racional da dinâmica do SPT (e.g., Robertson *et al.* 1983, Seed *et al.* 1985, Skempton 1986, Abou-Matar e Goble 1997, Belicanta 1998, Cavalcante 2002, Odebrecht 2003). Assim, a medição da energia se tornou uma ferramenta auxiliar na explicação da influência de vários fatores nos resultados do ensaio, tornando o SPT mais confiável no meio geotécnico.

Schmertmann e Palacios (1979) mostraram que o valor do N_{SPT} é inversamente proporcional à energia que efetivamente atinge a composição de hastes, pelo menos até valores de N_{SPT} de 50 golpes. A seguinte equação permite corrigir o valor do N_{SPT} em função da energia:

$$N_1.E_1 = N_2.E_2 \quad (2.9)$$

Sendo:

E_i = Energia medida no topo da composição de hastes;

N_i = Número de golpes para uma energia E_i .

A ISSMFE (1989) estabeleceu como energia de referência internacional 60% da energia potencial teórica internacional ($E^* = 474$ J, considerando altura de queda de 76 cm e peso do martelo de 63,5 kgf). Desse modo, $E_{60} = 0,60 \times 474$ J = 284,4 J. Assim, os resultados de um SPT com uma dada energia (E) podem ser convertidos para N_{60} através da seguinte equação:

$$N_{60} = N_{SPT} \frac{E}{E_{60}} \quad (2.10)$$

Cabe ressaltar que a energia potencial teórica do sistema brasileiro é 478,2 J (considerando altura de queda de 75 cm e massa do martelo de 65 kg), valor apenas 1% superior à referência internacional.

O valor de N_{60} também pode ser calculado em função da eficiência (η) de um sistema SPT (Equação 2.11), que é dada pela razão entre a energia medida e a energia padrão. Cavalcante (2002) encontrou um valor médio de eficiência da ordem de 82% para o sistema SPT brasileiro, em pesquisa envolvendo sondagens nos estados do Rio de Janeiro e Paraíba.

$$N_{60} = N_{SPT} \frac{\eta(\%)}{60\%} \quad (2.11)$$

A energia na composição de hastes é igual à integral da força (F) multiplicada pela velocidade (v) em função do tempo (t). Estes dados são obtidos através de instrumentação instalada nas hastes (medidores de deformação e acelerômetros).

$$E = \int F \cdot v \cdot dt \quad (2.12)$$

Segundo Décourt (1989), a energia no topo da composição de hastes (E_i), quando não medida, pode ser estimada através da seguinte equação:

$$E_i = e_1 \cdot e_2 \cdot e_3 \cdot E^* \quad (2.13)$$

Sendo e_1 , e_2 e e_3 fatores de eficiência descritos a seguir.

O fator de eficiência e_1 relaciona a energia cinética imediatamente antes do impacto do martelo com a cabeça de bater (E_c) com a energia potencial teórica (E^*). Esse fator é influenciado por perdas de energia no sistema de levantamento e soltura. O fator e_2 quantifica as perdas de energia durante o impacto entre o martelo e a cabeça de bater, sendo afetado principalmente pela massa da cabeça de bater. Seu valor é dado por E_i/E_c . Já o fator e_3 está relacionado com o comprimento da composição de hastes, e será discutido posteriormente.

A energia que chega à composição de hastes pode não ser a mesma que chega ao amostrador, e que finalmente ocasiona um certo valor de penetração, o que é de fato o mais importante. Por isso, Danziger *et al.* (2008) sugerem que a energia que atinge o amostrador, E_s , seja dada pela seguinte expressão:

$$E_s = e_1 \cdot e_2 \cdot e_3 \cdot e_4 \cdot E^* \quad (2.14)$$

O fator e_4 quantifica as perdas de energia ao longo da composição de hastes, sendo dado por $e_4 = E_s/E_i$. Um dos objetivos da presente pesquisa é mensurar essas perdas, medindo-se a energia que efetivamente atinge o amostrador.

2.2.3 Principais fatores que afetam a energia do SPT

2.2.3.1 Considerações iniciais

A classificação dos fatores intervenientes no ensaio SPT mais difundida é a proposta por Hvorslev (1949), que agrupa esses fatores em três classes:

- i. Equipamento;
- ii. Procedimento;
- iii. Condição do solo.

No primeiro grupo estão inclusos fatores como geometria e estado de conservação do amostrador, peso e altura de queda do martelo, geometria, comprimento e estado de conservação das hastes, além de diâmetro do revestimento do furo.

No grupo de procedimento estão relacionados método de avanço e limpeza do furo, intervalo de tempo entre perfuração e ensaio, distância entre ensaios, profundidade relativa entre o fundo do furo e do revestimento e a estabilidade do furo.

No grupo de condição de solo estão inclusos fatores como: resistência do solo, compacidade ou consistência, permeabilidade, grau de saturação e tamanho dos grãos.

Ainda segundo Hvorslev (1949), a curva típica de resistência em função da penetração do amostrador SPT pode ser dividida em três trechos distintos (ver Figura 2.12):

- i. Trecho irregular – afetado pelas perturbações no fundo do furo;

- ii. Trecho com evolução linear sem embuchamento – resistência comandada pelas parcelas de ponta e atrito lateral interno e externo do amostrador. Estende-se até a profundidade de segurança;
- iii. Trecho com a formação de embuchamento no amostrador – a resistência passa gradualmente a ser comandada por atrito lateral externo e resistência de ponta da bucha. A velocidade de crescimento da resistência passa a cair até a resistência tornar-se aproximadamente constante com a profundidade.

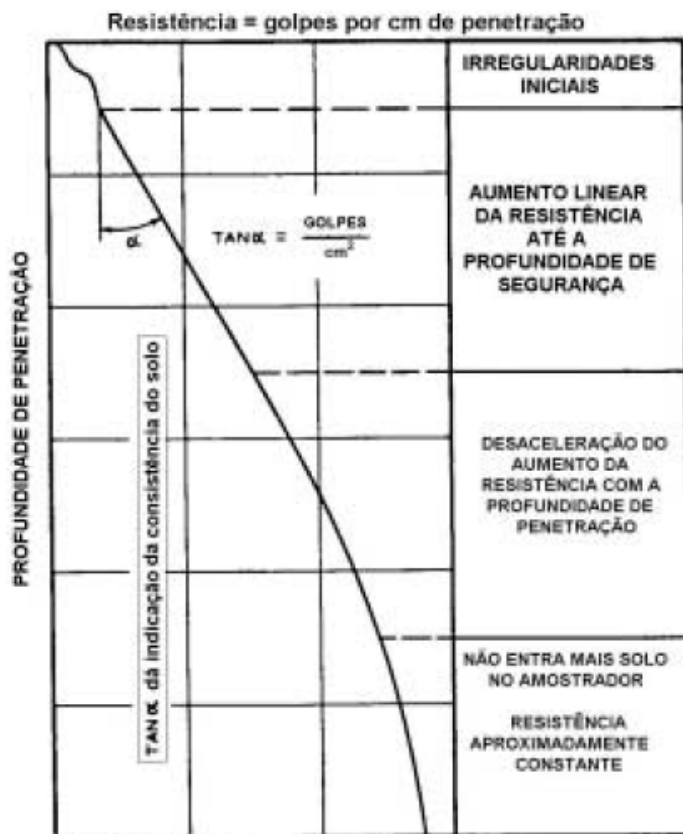


Figura 2.12 – Resistência em função da penetração do amostrador SPT (adaptado por Cavalcante 2002 de Hvorslev 1949).

A seguir serão discutidos os aspectos mais relevantes, relativos a equipamentos, que afetam os ensaios SPT brasileiros. Teixeira (1977), Décourt (1989), Belincanta (1998), Belincanta e Cintra (1998), Cavalcante (2002), dentre outros autores, fazem discussões esclarecedoras sobre procedimentos de ensaio e condições do solo que podem afetar os resultados do SPT.

2.2.3.2 Tipo de martelo

Os martelos mais usados no Brasil são maciços, operados manualmente e contêm haste-guia, conforme mostrado na Figura 2.13. A NBR-6484/2001 também admite o uso de martelo vazado (ver Figura 2.13). Estudos realizados por Belincanta e Cintra (1998) mostram que o primeiro tipo de martelo é mais eficiente que o segundo (ver Tabela 2.1). Cabe ressaltar que, no caso do martelo maciço, a NBR-6484/2001 apresenta apenas esquema para a fabricação do martelo prismático, porém predomina no Brasil o uso de martelos maciços cilíndricos. O autor do presente trabalho não tem conhecimento de trabalhos que quantifiquem a influência da forma do martelo na transferência de energia para a composição de hastes.

Segundo Belincanta e Cintra (1998), é registrado o uso de martelos com gatilho disparador (ver Figura 2.14) em território brasileiro, especialmente no estado de São Paulo. Os martelos com esse dispositivo têm apresentado maiores eficiências, como pode ser observado na Tabela 2.1, que mostra a eficiência das energias com o uso de diferentes tipos de martelos e dispositivos de acionamento.

Tabela 2.1 – Eficiência da energia para diferentes tipos de martelo e dispositivos de acionamento. Sistema SPT com composição de hastes de 14 m de comprimento, martelo com coxim de madeira e cabeça de bater de 3,6 kg (Belincanta e Cintra, 1998).

Equipamento	Estado da composição de hastes	Eficiência das energias (η)					
		Acionamento Manual			Acionamento com Gatilho		
		Média (%)	Nº dados	Desvio padrão (%)	Média (%)	Nº dados	Desvio padrão (%)
Martelo cilíndrico com pino guia, acionamento com corda	Velha	69,4	178	3,59	75,5	195	2,95
	Nova	72,7	153	3,59	81,3	90	3,98
Martelo cilíndrico com pino guia, acionamento com cabo de aço	Velha	63,2	45	4,78	74,4	23	2,23
	Nova	73,9	54	3,43	83,2	26	2,52
Martelo cilíndrico vazado, acionamento com corda	Nova	66,5	50	3,74	74,2	39	5,30

Um possível problema envolvendo martelos numa sondagem está na sua diferença de massa em relação ao padrão (65 kg, de acordo com a NBR-6484/2001). Por isso, há necessidade de uma periódica verificação, visto que, com os constantes impactos, é possível a perda de massa por parte do martelo.

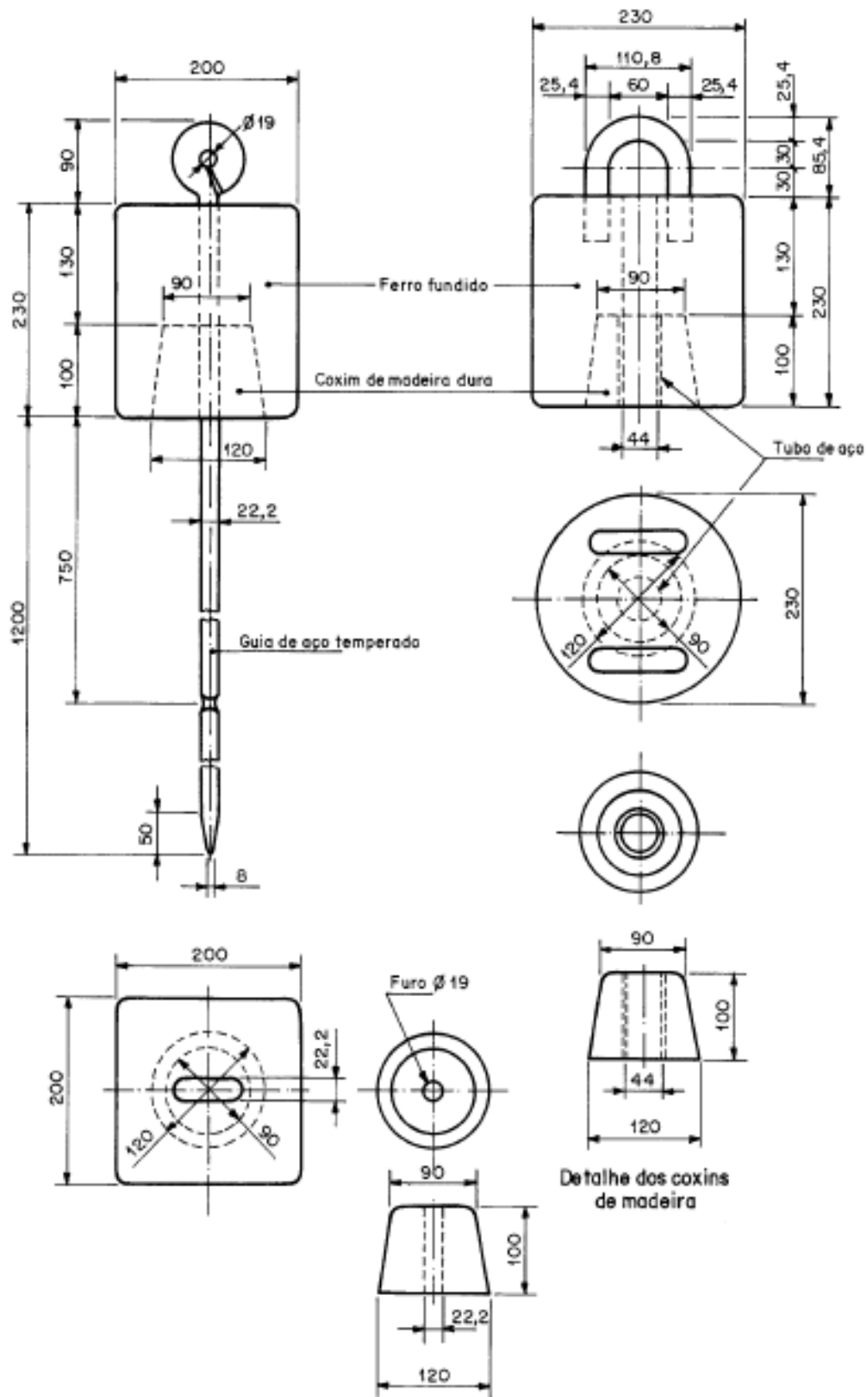


Figura 2.13 – Tipos de martelos: maciço (à esquerda) e vazado (à direita), (NBR-6484/2001).

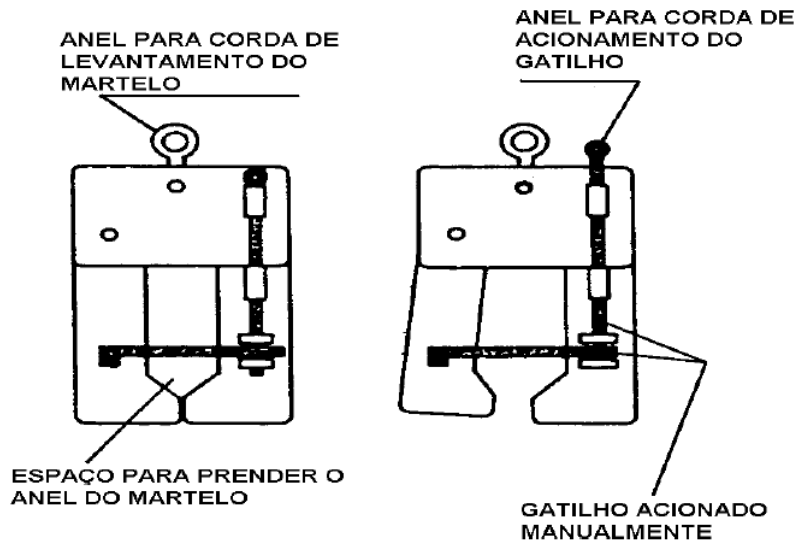


Figura 2.14 – Martelo com gatilho disparador (Belincanta e Cintra, 1998).

2.2.3.3 Altura de queda do martelo

O controle ineficiente da altura de queda é um problema comum nas sondagens que utilizam martelos operados manualmente, os quais são muito difundidos no Brasil. Com esse sistema é natural uma variação na altura de queda do martelo ao longo do dia, o que pode ser justificado por pressa ou cansaço da equipe de sondagem. Além disso, o fato do controle da altura de queda do martelo geralmente ser feito apenas com uma marcação no pino-guia compromete a acurácia dessa operação.

Uma maior altura de queda fará com que o martelo caia com maior velocidade e, conseqüentemente, haverá uma maior transmissão de energia para as hastes, podendo reduzir o N_{SPT} . Já em caso contrário, haverá aumento do N_{SPT} .

Um estudo realizado por Cavalcante (2002), a partir da monitoração de 129 golpes de martelo SPT, no Estado do Rio de Janeiro, verificou que somente 6 desses golpes foram dados com altura menor que a padrão (75 cm). A altura de queda média medida foi de 79 cm.

Numa pesquisa de iniciação científica realizada pelo autor do presente trabalho, entre os anos de 2003 e 2005, no estado de Sergipe, foi monitorada a altura de queda de 141 golpes em ensaios SPT, realizados por 6 diferentes sondadores. Foi verificada uma

altura de queda média de 83 cm, sendo que 10% dos golpes estavam abaixo de 75 cm, 28% estavam entre 75 cm e 80 cm e 62% acima de 80 cm. Alguns golpes monitorados chegaram a mais de 95 cm (20 cm acima do prescrito em norma).

Nas duas pesquisas citadas os martelos utilizados eram operados manualmente e possuíam controle da altura de queda baseado apenas numa marcação na haste guia. Todos esses dados comprovam, embora com amostragem ainda limitada, a tendência de se levantar o martelo significativamente acima da altura padrão.

É importante ressaltar que sistemas automatizados podem também conduzir a alturas de queda significativamente distintas da altura de queda nominal. Tais resultados podem estar associados à velocidade de realização do ensaio (e.g., Kovacs 1979), ver Figura 2.15.

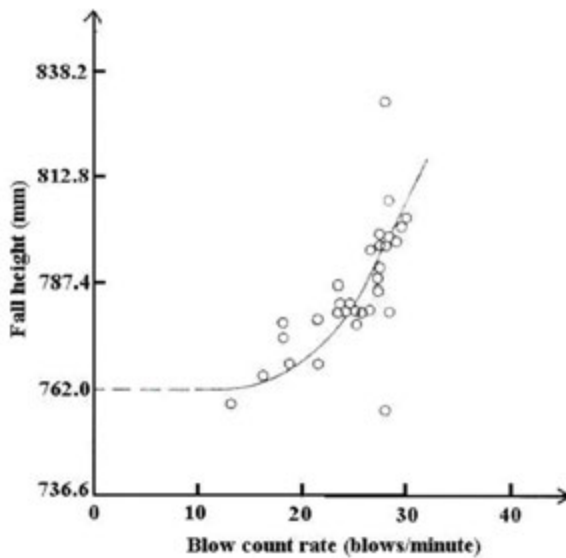


Figura 2.15 – Aumento da altura de queda gerado pelo aumento da velocidade de realização do ensaio em um sistema automático (Kovacs, 1979).

2.2.3.4 Uso de coxim de madeira

O uso do coxim de madeira no martelo SPT tem a finalidade de melhorar as condições de contato entre o martelo e a cabeça de bater, evitando assim o choque aço-aço e reduzindo as vibrações do sistema. A sua utilização não é generalizada, apesar de sua prescrição na NBR-6484/2001.

Dados apresentados por Belincanta e Cintra (1998) apontam pequena influência nos valores do N_{SPT} por ocasião da supressão do coxim de madeira.

2.2.3.5 Sistema de levantamento e soltura do martelo

A energia cinética na iminência do impacto ($E_c = 0,5m.v_i^2$) é menor que a energia potencial de soltura do martelo ($E_p = m.g.h_q$), sendo m = massa do martelo, v_i = velocidade de impacto do martelo, h_q = altura de queda. Isso ocorre porque há atrito entre a roldana e o cabo. Além disso, pode haver atrito entre o pino-guia e a composição de hastes.

Diversos fatores, como estado de lubrificação da roldana e seu diâmetro, tipo de cabo utilizado, seu diâmetro e sua idade têm influência direta na eficiência do SPT.

Os tipos mais comuns de cabos utilizados são cordas de nylon e de sisal e cabos de aço, sendo que o uso do cabo de aço e da corda de nylon está em desacordo com a norma vigente, apesar de existirem diversos registros de seu uso no SPT.

Belincanta e Cintra (1998) mostraram que o cabo de aço é de 1,7% a 3,6% mais eficiente do que a corda de sisal.

Além do sistema manual de levantamento e soltura, único sistema previsto na NBR-6484/2001, é registrado no Brasil o uso de sistemas mecanizados, também conhecidos como corda e tambor (e.g. Cavalcante, 2002), *rope-cathead* (e.g. Décourt, 2002) ou sistema *cathead* (e.g. Kovacs e Salomone, 1979). No presente trabalho esse sistema será chamado de mecanizado, do mesmo modo que foi denominado por Odebrecht (2003).

No caso de SPTs realizados com sistemas mecanizados, o número de voltas em torno do tambor também influencia o valor da eficiência do ensaio, segundo experimentos realizados por Kovacs (1979). O mesmo autor afirma que a partir de três voltas a perda de energia se torna relevante.

A Figura 2.16 reúne valores de e_1 , obtidos de monitoração de ensaios com SPT realizados com diversos tipos de equipamentos. São mostrados valores sugeridos por Décourt (1989) e medidos por Cavalcante *et al.* (2011).

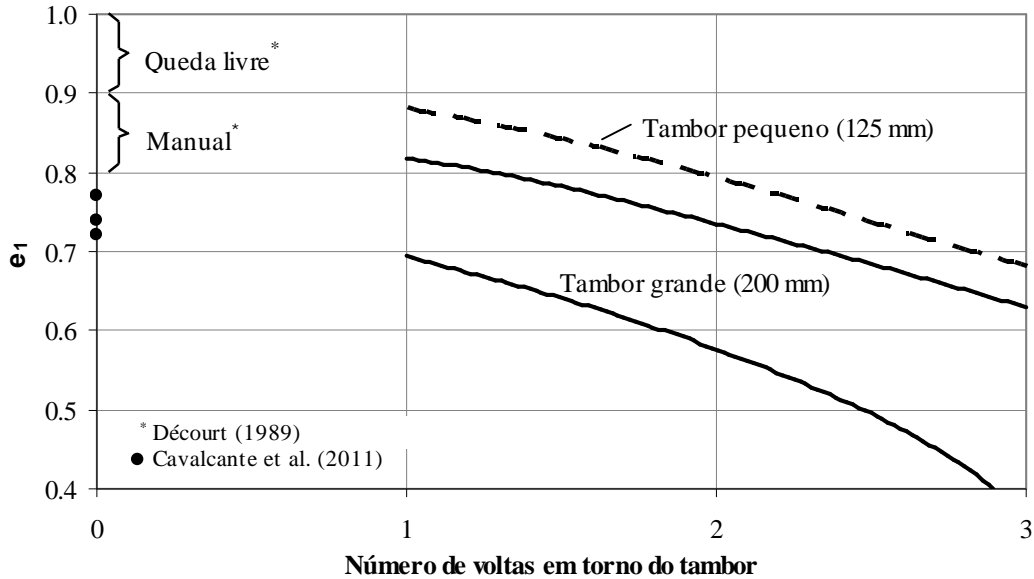


Figura 2.16 – Valores de fator de eficiência e_1 (adaptado de Skempton, 1986, Décourt, 1989 e Cavalcante et al., 2011).

2.2.3.6 Massa da cabeça de bater

A cabeça de bater é um elemento de grande importância para o equipamento do SPT, já que a partir dela a energia originada no martelo é transmitida para o segmento de hastes. Estudos indicam considerável influência da massa da cabeça de bater no processo de transmissão de energia às hastes (e.g., Skempton 1986, Décourt 1989, Belincanta 1998, Belincanta e Cintra 1998, Cavalcante 2002 e Cavalcante *et al.* 2011), com cabeças de bater com massas menores apresentando maiores eficiências. A Figura 2.17 mostra a variação do fator de eficiência e_2 em função da massa da cabeça de bater.

Existem registros no Brasil do uso de cabeças de bater com massas diferentes da prescrita em norma (entre 3,5 kg e 4,5 kg) – geralmente massas significativamente menores –, do uso de luvas substituindo a cabeça de bater, e até do uso de cabeça de bater feita de propileno e com massa de apenas 200 g. São necessários mais estudos para se avaliar a real influência de todos esses desvios da norma no valor do N_{SPT} .

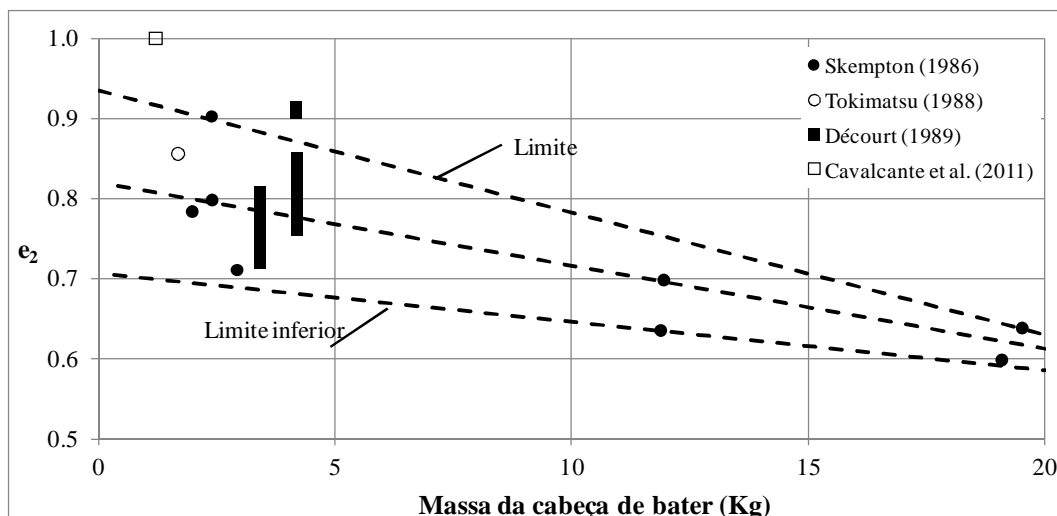


Figura 2.17 – Fator de eficiência e_2 em função da massa da cabeça de bater (adaptado de Décourt, 1989).

2.2.3.7 Comprimento das hastes e estado de conservação

A influência do comprimento da composição de hastes é um ponto bastante polêmico no meio geotécnico mundial, já que, segundo Schmertmann e Palacios (1979), a energia só seria plenamente transmitida à composição de hastes se esta tivesse um comprimento crítico mínimo. A Figura 2.18 relaciona a energia teórica que chega à composição de hastes na primeira onda de compressão em função do comprimento.

Para comprimentos menores que o crítico, haveria a necessidade de se aplicar um fator de correção (e_3). Isso ocorreria na hipótese de que a primeira onda de compressão, ao se refletir na extremidade inferior do amostrador e retornar como onda de tração, ocasiona a separação entre o martelo e a composição de hastes, impedindo novas transferências de energia. O tempo correspondente a esse evento seria $2L/c$, sendo L o comprimento da composição de hastes e c a velocidade de propagação da onda.

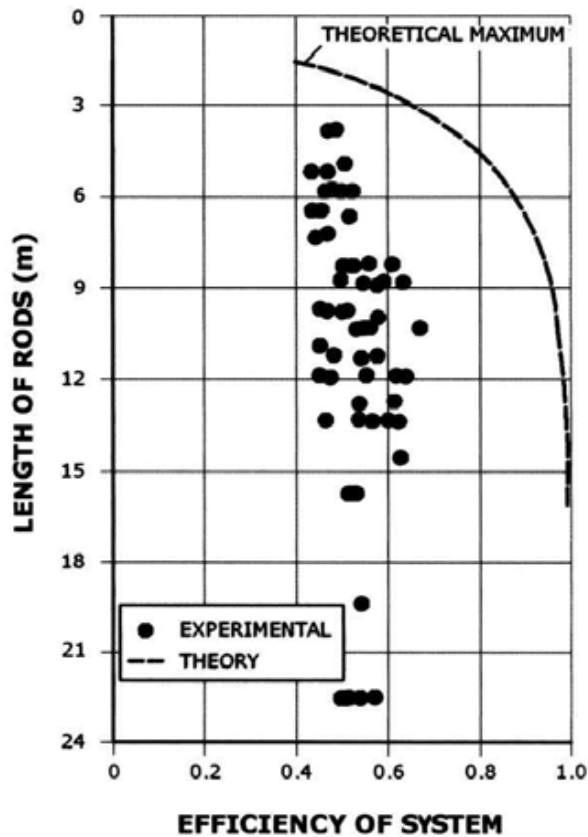


Figura 2.18 – Eficiência de energia que chega à composição de hastes na primeira onda de compressão (Schmertmann e Palacios 1979).

Porém, pesquisas recentes (e.g., Cavalcante 2002, Odebrecht 2003, Daniel *et al.* 2005, Danziger *et al.* 2006) têm mostrado que na realidade os impactos subsequentes (oriundos de um mesmo golpe) podem ter contribuição muito relevante na transmissão de energia, como pode ser visto na Figura 2.19, em que se observam registros de velocidade e força nas hastes oriundos de vários impactos após o primeiro.

A correspondente transferência de energia com os vários impactos é ilustrada na Figura 2.20. Neste caso, apenas 41% da energia total transmitida à composição de hastes resulta do primeiro impacto.

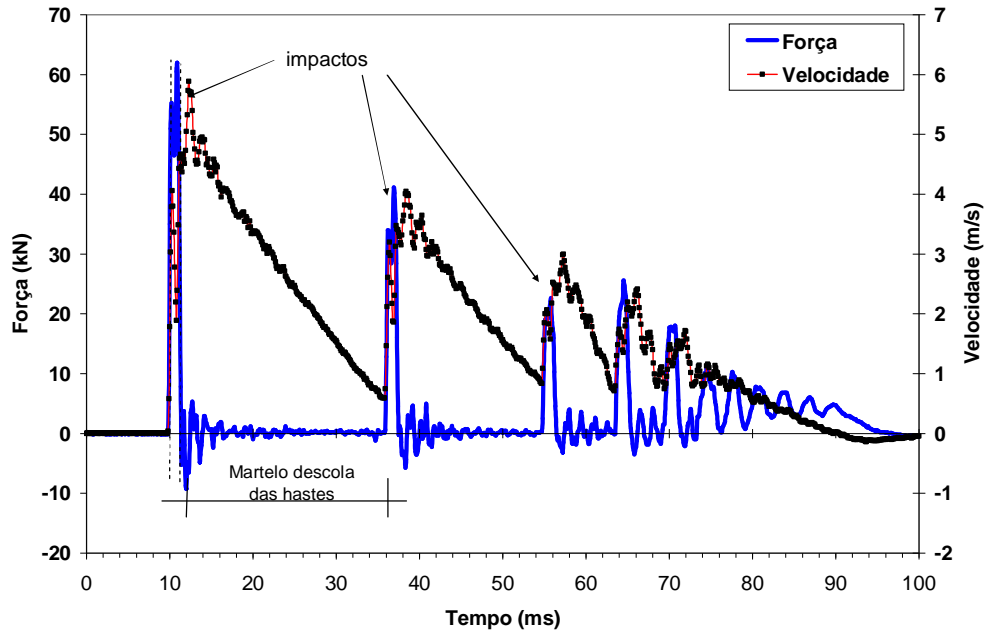


Figura 2.19 – Força e velocidade em função do tempo. Comprimento da composição de 2,39 m, $N_{SPT} \approx 2$, argila arenosa com pedregulho (adaptado por Danziger et al. 2008 de Cavalcante 2002).

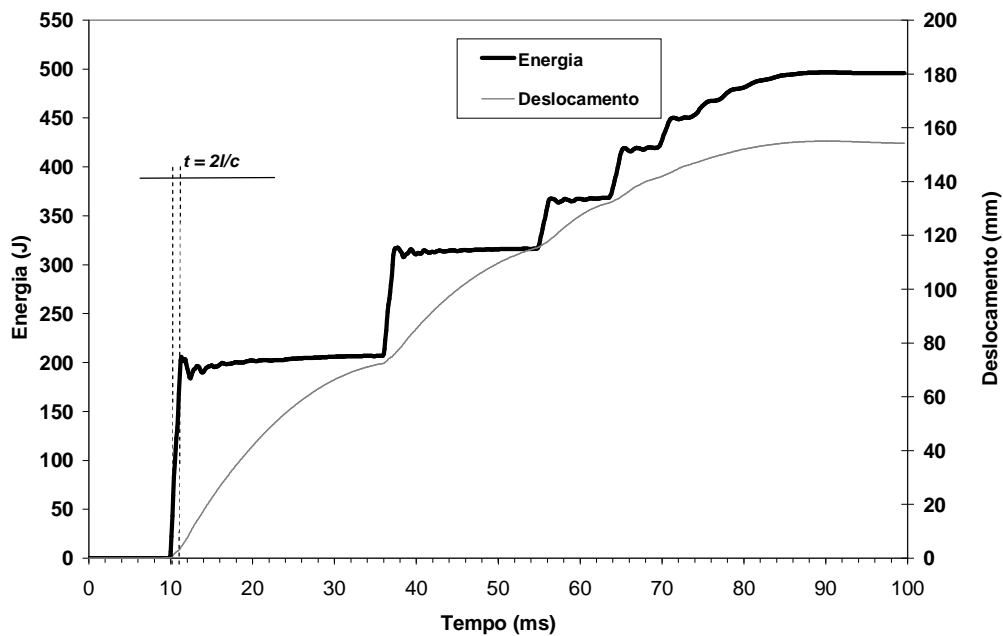


Figura 2.20 – Energia e deslocamento em função do tempo. Comprimento da composição de 2,39 m, $N_{SPT} \approx 2$, argila arenosa com pedregulho (adaptado por Danziger et al. 2008 de Cavalcante 2002).

Segundo Cavalcante (2002), o número de impactos gerados por um golpe decresce com o aumento do comprimento da composição de hastes e com o aumento da resistência do solo. Ou seja, em hastes de maiores comprimentos e solos com maiores valores de N_{SPT} haverá menor número de impactos em um mesmo golpe. Assim, o caso ilustrado anteriormente representa uma situação limite, já que a composição de hastes é de pequeno comprimento e o valor de N_{SPT} é baixo.

Os impactos adicionais em um mesmo golpe fazem com que praticamente toda a energia acabe por ser transmitida à composição de hastes, conforme pode se observar na Figura 2.20. Desse modo, a energia transmitida ao topo da composição de hastes torna-se independente de seu comprimento, e o fator e_3 deve ser considerado igual a 1, segundo Danziger *et al.* (2008).

O estado de conservação da composição de hastes também influi na eficiência do SPT, conforme foi demonstrado por Belincanta e Cintra (1998), que encontraram diferenças de eficiências de 4,8 % para martelos operados manualmente e 7,7 % para martelos com gatilho, a favor das hastes mais novas.

Ainda existem poucos dados sobre a perda de energia ao longo da composição de hastes e quais fatores lhes influenciam. Os primeiros estudos indicam que há uma tendência de incremento nas perdas de energia com o aumento do comprimento da composição de hastes (e.g., Cavalcante 2002, Odebrecht 2003, Jonhsen and Jargello 2007 e Cavalcante *et al.* 2008). As Figuras 2.21 e 2.22 mostram dados de perda de energia em função do comprimento das hastes, retirados de Cavalcante *et al.* (2008), Odebrecht (2003) e Jonhsen and Jargello (2007).

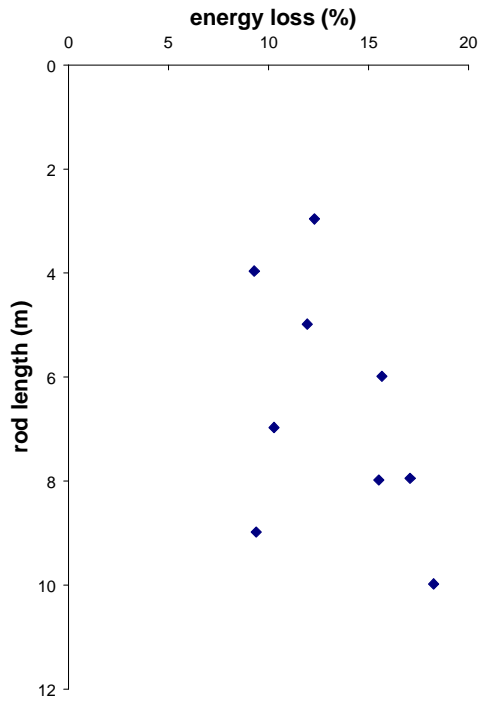


Figura 2.21 – Perda de energia em função do comprimento da composição de hastes (Cavalcante et al., 2008).

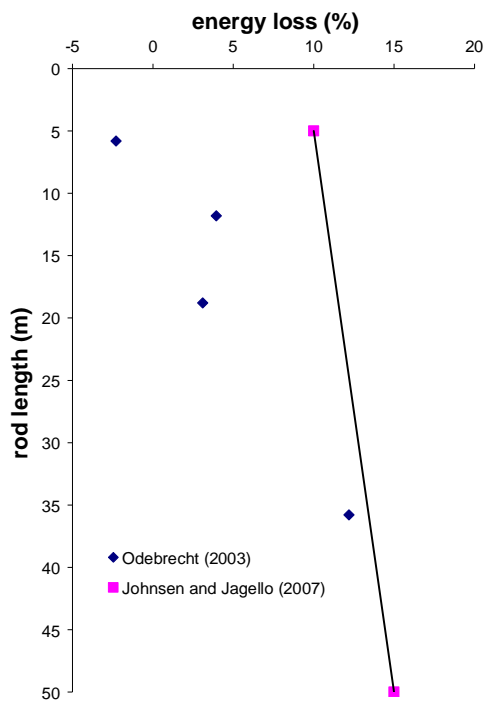


Figura 2.22. Perda de energia em função do comprimento da composição de hastes (adaptado de Odebrecht 2003 e Johnsen and Jargello 2007 por Cavalcante et al. 2008).

2.2.3.8 Amostrador danificado

Em consequência do uso, o amostrador SPT tende a se desgastar e deformar, especialmente no bico. Quando essas deformações e imperfeições atingem níveis consideráveis, prejudicam a sua penetração no solo, o que pode causar maior resistência à cravação e consequente aumento do N_{SPT} .

2.3 ESTÁTICA DO SPT

Schmertmann (1979) faz uma análise estática da cravação do amostrador SPT no solo, comparando-a à cravação do cone no CPT. Nessa análise considera-se que não ocorre embuchamento no amostrador, de modo distinto do admitido por Hvorslev (1949), conforme descrito no item 2.2.

A Figura 2.23 mostra o equilíbrio das forças envolvidas na penetração de um amostrador SPT e de um cone no solo. No caso do amostrador SPT, a força externa (F) somada ao peso submerso das hastes e amostrador (W') é igual à resistência de ponta (F_e) mais as resistências por atrito lateral externo (F_0) e interno (F_i). Essa análise considera o amostrador não embuchado (ver Equação 2.15).

$$F + W' = F_e + (F_0 + F_i) \quad (2.15)$$

Considerando que o atrito médio por unidade de área nas paredes internas e externas do amostrador vale f , que a resistência média de ponta por unidade de área vale q e que a penetração média do amostrador vale L , tem-se:

$$F + W' = q.A + \pi.L.f.(d_{ext} + d_{int}) \quad (2.16)$$

Sendo:

A = Área (da superfície anelar) de ponta do amostrador SPT;

d_{ext} = Diâmetro externo do amostrador;

d_{int} = Diâmetro interno do amostrador;

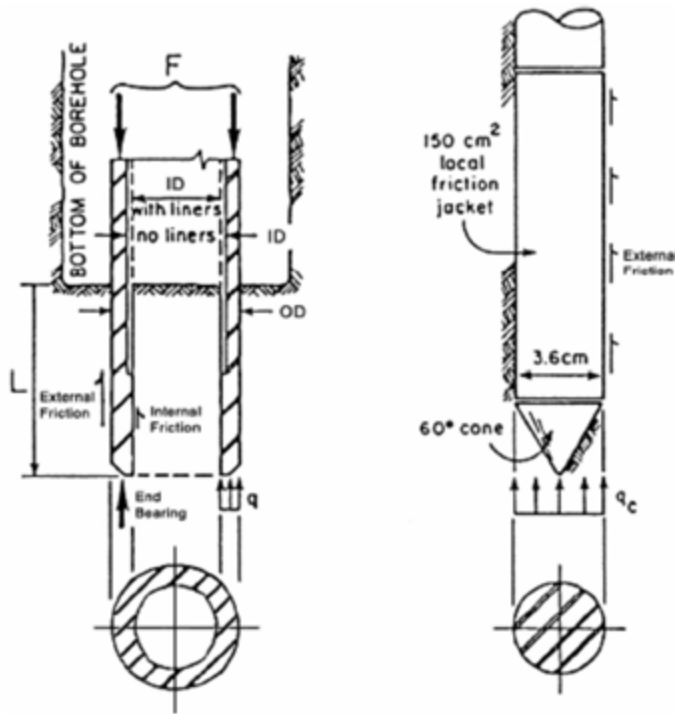


Figura 2.23 – Equilíbrio de forças na cravação estática de um amostrador SPT e de um cone (Schmertmann, 1979).

Schmertmann (1979) admitiu que a resistência q é igual à resistência de ponta do cone q_c multiplicada por uma constante C_1 , ou seja, $q = C_1 \cdot q_c$. O autor também considerou o atrito (f) igual ao atrito lateral do cone (f_c) multiplicado por uma constante C_2 , ou seja, $f = C_2 \cdot f_c$. A razão entre f_c e q_c (razão de atrito) é denotada por R_f . Assim:

$$F + W' = [C_1 \cdot A + \pi \cdot L \cdot C_2 \cdot R_f \cdot (d_{ext} + d_{int})] \cdot q_c \quad (2.17)$$

A energia requerida para a penetração do amostrador, além da energia potencial relativa ao peso das hastes, é igual ao incremento de penetração do amostrador, ΔL , multiplicado pela força média (F_M).

Segundo Schmertmann (1979), a razão entre o número de golpes e o incremento de penetração ($\Delta N = N_{SPT}/\Delta L$) varia linearmente com a energia requerida na penetração quase-estática no mesmo intervalo (ver Equação 2.18).

$$\Delta N \approx F_M \cdot \Delta L \quad (2.18)$$

Num ensaio com o amostrador SPT a penetração ocorre em três estágios de 15 cm, totalizando 45 cm. Assim o ΔL_M (médio) de cada estágio vale, respectivamente: 7,5 cm, 22,5 cm e 37,5 cm. A razão entre os ΔN vale:

$$X_1 = \frac{\Delta N_{15iniciais}}{\Delta N_{finais}} = \frac{[10,7 \cdot C_1 + 2,052C_2 \cdot R_f(\%)] \cdot q_c - W'}{[10,7 \cdot C_1 + 10,26C_2 \cdot R_f(\%)] \cdot q_c - W'} \quad (2.19a)$$

$$X_2 = \frac{\Delta N_{15intermediários}}{\Delta N_{finais}} = \frac{[10,7 \cdot C_1 + 6,156C_2 \cdot R_f(\%)] \cdot q_c - W'}{[10,7 \cdot C_1 + 10,26C_2 \cdot R_f(\%)] \cdot q_c - W'} \quad (2.19b)$$

Nas equações acima se considerou a área anelar da sapata do amostrador $A = 10,7 \text{ cm}^2$, seu diâmetro interno $d_{int} = 3,5 \text{ cm}$, seu diâmetro externo $d_{ext} = 5,1 \text{ cm}$, que q_c tem unidade em kgf/cm^2 e W' em kgf .

Schmertmann (1979) mostrou que os valores de X_1 e X_2 determinados pelas equações 2.19a e 2.19b se ajustam aos valores observados nas pesquisas experimentais por ele conduzidas. Além disso, observou que a partir da razão dos valores medidos de ΔN para cada 15 cm de penetração, ou seja, dos valores de X_i , é possível se separar as parcelas de resistência de ponta e atrito lateral.

A partir das Equações 2.17, 2.19a e 2.19b, Danziger et al. (2009) obtiveram as curvas mostradas na Figura 2.24, que relacionam as parcelas de resistência mobilizada (atrito lateral ou de ponta) com a razão de atrito.

A Figura 2.24 confirma as observações de Schmertmann (1979), que sugere que a parcela de resistência de ponta predomina em solos com pequena razão de atrito (areias), enquanto a parcela de atrito lateral predomina nos solos com razão de atrito elevada (argilas).

É importante salientar que, de acordo com Danziger *et al.* (2009), a energia requerida à penetração dinâmica do amostrador SPT normalmente excede aquela necessária à penetração estática, face às perdas devidas ao deslocamento elástico do solo, efeitos viscosos, etc.

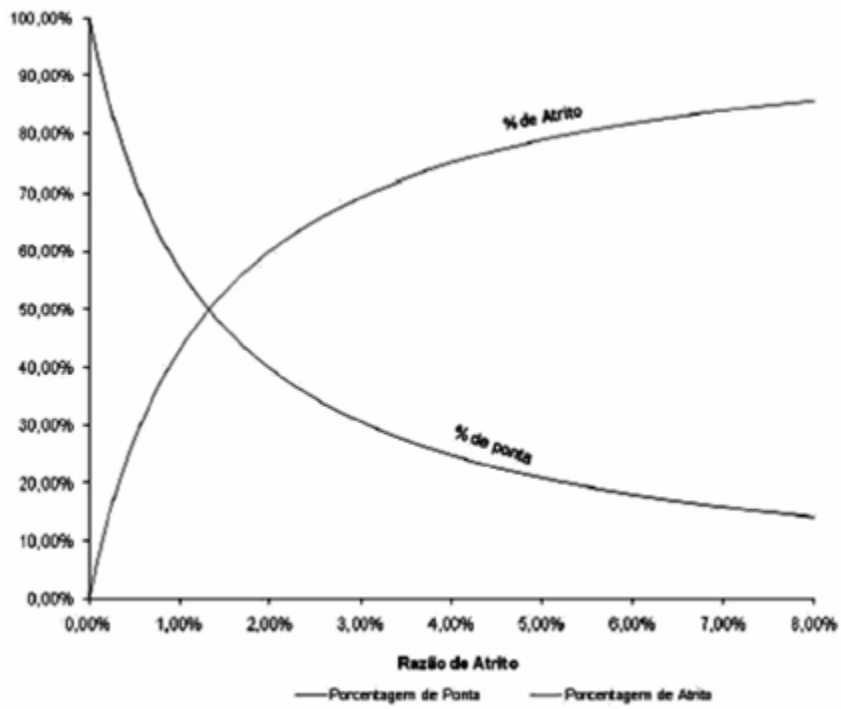


Figura 2.24 – Percentual da resistência mobilizada em função da razão de atrito (Danziger et al., 2009).

2.4 EMBUCHAMENTO

Em função da carência de estudos sobre o embuchamento no amostrador SPT, serão descritos nesse item estudos sobre o embuchamento em estacas tubulares. O autor do presente trabalho acredita que o fenômeno do embuchamento ocorra de forma similar no amostrador SPT.

Segundo Paik e Salgado (2003), quando uma estaca tubular é cravada no terreno, uma “bucha” de solo pode se formar no seu interior, o que impediria ou dificultaria a entrada de mais solo na estaca. Sabe-se que a capacidade de carga de estacas é afetada por esse efeito.

De acordo com Randolph *et al.* (1991), numa análise estática, o embuchamento ocorre quando a resistência lateral da bucha de solo no interior de uma estaca supera sua resistência de ponta. Adicionalmente, durante a cravação dinâmica, forças inerciais atuantes na bucha de solo dificultam o embuchamento. Desse modo, uma estaca pode apresentar comportamento não embuchado durante a cravação dinâmica, mas apresentar embuchamento durante o carregamento estático.

A estimativa de capacidade de carga em estacas tubulares normalmente considera as estacas com embuchamento imóvel ou sem embuchamento. Entretanto, na prática, existem situações intermediárias, em que a massa de solo embuchada continua a deslocar-se no interior da estaca, mas numa medida menor que a estaca é inserida no solo.

Paik e Salgado (2003) sugerem que a mobilidade do embuchamento pode ser quantificada através do índice IFR (*incremental filling ratio* ou razão incremental de preenchimento), que relaciona o incremento de penetração da bucha de solo na estaca (ΔL) com o incremento de penetração da estaca no solo (ΔD), $IFR = \Delta L / \Delta D$.

Um índice IFR igual a 0 indica que a bucha de solo está imóvel no interior da estaca (não houve penetração adicional). Um índice IFR igual a 1 indica que não houve embuchamento. Assim, quanto menor o valor de IFR, menos móvel a bucha de solo no interior da estaca.

Com base em ensaios realizados em campo e câmara de calibração, Paik e Salgado (2003) chegaram às seguintes conclusões:

- Os valores de IFR aumentam significativamente com o aumento da compacidade relativa;
- Os valores de IFR aumentam significativamente com o aumento da tensão efetiva horizontal. Entretanto, os valores de IFR são pouco sensíveis ao aumento da tensão efetiva vertical;
- A resistência de ponta de estacas tubulares diminui com o aumento de IFR.

Ainda segundo Paik e Salgado (2003), o índice IFR não é facilmente medido em campo, podendo ser medido em substituição o índice PLR (*plug length ratio* ou razão de comprimento embuchado). O índice PLR é dado pela razão entre o comprimento total embuchado (L) e o comprimento total penetrado da estaca no solo (D), $PLR = L/D$.

Os valores de IFR variam linearmente com PLR, podendo ser obtidos através da seguinte expressão:

$$IFR (\%) = 109.PLR - 22 \quad (2.20)$$

Como PLR varia linearmente com IFR, as três conclusões feitas acima para IFR também são válidas para PLR.

CAPÍTULO 3

CÂMARA DE CALIBRAÇÃO

3.1 INTRODUÇÃO

Segundo Chapman (1974), as desvantagens de calibrar equipamentos para ensaios geotécnicos em campo, onde as condições de contorno do problema são desconhecidas, são superadas calibrando esses equipamentos em laboratório sob condições controladas e que reproduzam as existentes em campo. Deve-se entender “calibrar equipamentos para ensaios geotécnicos” como calibrar correlações entre resultados de ensaios de campo e parâmetros geotécnicos.

As câmaras de calibração constituem uma importante ferramenta nesse sentido, já que permitem a realização de ensaios em amostras de areia com diversas compacidades e sob estados de tensões e deformações conhecidos e controlados. A Figura 3.1 apresenta um esquema da câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ.

De acordo com Chapman (1974), duas condições de projeto de câmara de calibração são possíveis: as de paredes rígidas e as de paredes flexíveis.

As primeiras, que serão chamadas nesse trabalho de tanques de paredes rígidas, impõem a condição de deformação lateral nula à amostra contida em seu interior. Segundo Chapman (1974), os tanques de paredes rígidas necessitam ter diâmetro da ordem de 200 vezes o diâmetro do penetrômetro, para que o efeito de fronteira não influencie os resultados dos ensaios. Isso torna os ensaios nos tanques de paredes rígidas caros e lentos. Por exemplo, para um penetrômetro de diâmetro de 36 mm seria necessário um tanque com diâmetro de pelo menos 7,20 m.

Uma câmara de calibração de paredes flexíveis pode ser construída com dimensões muito menores e ainda assim fornecer resultados compatíveis com ensaios de campo (Chapman, 1974). Segundo Holden (1971), as condições de contorno de câmaras de paredes flexíveis têm sido descritas como mais próximas das de campo do que as de um tanque de paredes rígidas.

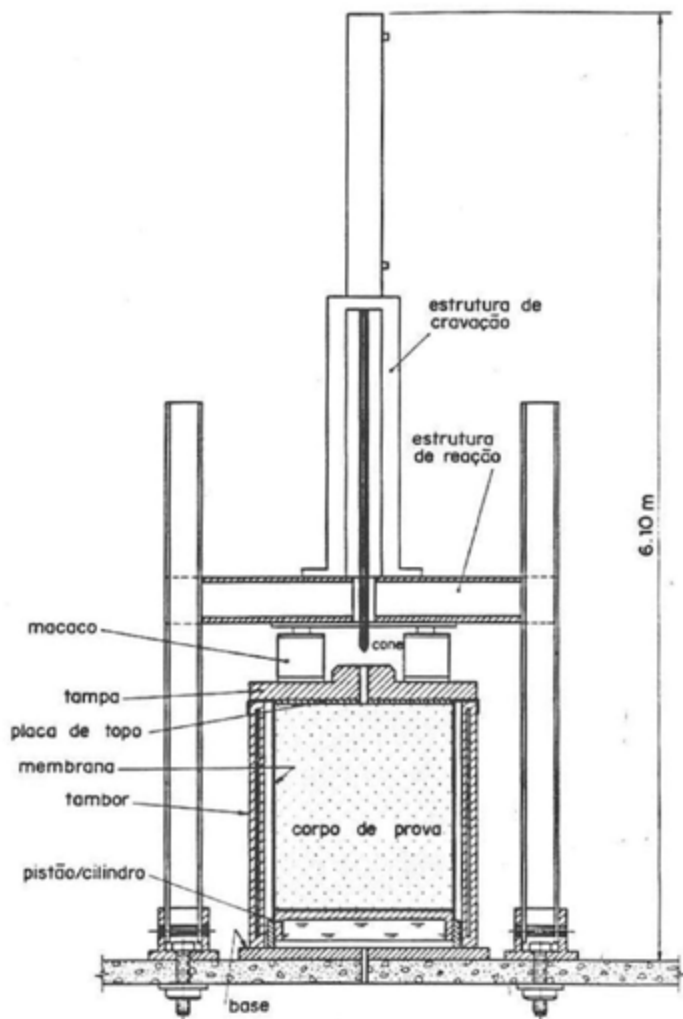


Figura 3.1 – Esquema da câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ.

3.2 HISTÓRICO DA CÂMARA DE CALIBRAÇÃO NGI-COPPE/UFRJ

De acordo com Chapman (1974), a primeira câmara de calibração de paredes flexíveis foi construída no *Country Boards Road* (CBR) de Victoria, na Austrália, em 1969, com diâmetro de 0,76 m e altura 0,91 m. A segunda câmara de calibração foi construída na Universidade da Florida, nos Estados Unidos, em 1971, com diâmetro de 1,22 m e altura de 1,22 m, e a terceira câmara na Universidade de Monash, na Austrália, em 1973, com diâmetro de 1,22 m e altura de 1,82 m. Essas três primeiras câmaras foram desenvolvidas para calibrar penetrômetros em areia seca ao ar.

Segundo Zohrabi (1993), a câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ foi instalada em 1976 no NGI (*Norwegian Geotechnical Institute*), em Oslo, Noruega, sendo a quarta produzida no mundo. Na época de sua instalação o NGI buscava correlacionar resultados de ensaios de cone com propriedades de resistência e deformabilidade de areias do Mar do Norte.

Essa câmara, que pesa cerca de 13 kN vazia, comporta um corpo de prova cilíndrico de areia com diâmetro de 1,209 m e altura de 1,470 m (volume útil de cerca de 1,7 m³).

Entre os anos de 1983 e 1993 a câmara foi emprestada à Universidade de Southampton na Inglaterra. Em 1994 o NGI fez a doação do conjunto completo da câmara à COPPE/UFRJ. O conjunto é constituído de:

- Câmara de calibração propriamente dita;
- Estrutura de reação e cravação;
- Câmara de pluviação;
- Três silos para armazenamento e transporte de areia;
- Bancada de controle;
- Acessórios diversos, incluindo dois cones elétricos de 10 cm².

Essa câmara foi instalada em 1995 no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ, mas pouco depois foi desmontada, permanecendo assim até o ano de 2008, quando se iniciou o processo de recuperação e remontagem no Prédio Professor Willy Lacerda na COPPE/UFRJ. Esse processo é descrito com detalhes no item 3.6.

Outras câmaras foram construídas após essa, porém foge aos objetivos desse trabalho um histórico mais detalhado sobre câmaras de calibração. Para mais informações ver Chapman (1974), Chapman (1979), Lunne *et al.* (1997) e Salgado *et al.* (1998).

3.3 COMPONENTES DA CÂMARA DE CALIBRAÇÃO NGI-COPPE/UFRJ

De acordo com Zohrabi (1993), a câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ é constituída de seis componentes básicos: i) base; ii) pistão e cilindro; iii) tambor; iv) membranas; v) placa de topo e vi) tampa e estrutura de reação (ver Figura 3.1). A Figura 3.2 mostra um detalhe de tais componentes.

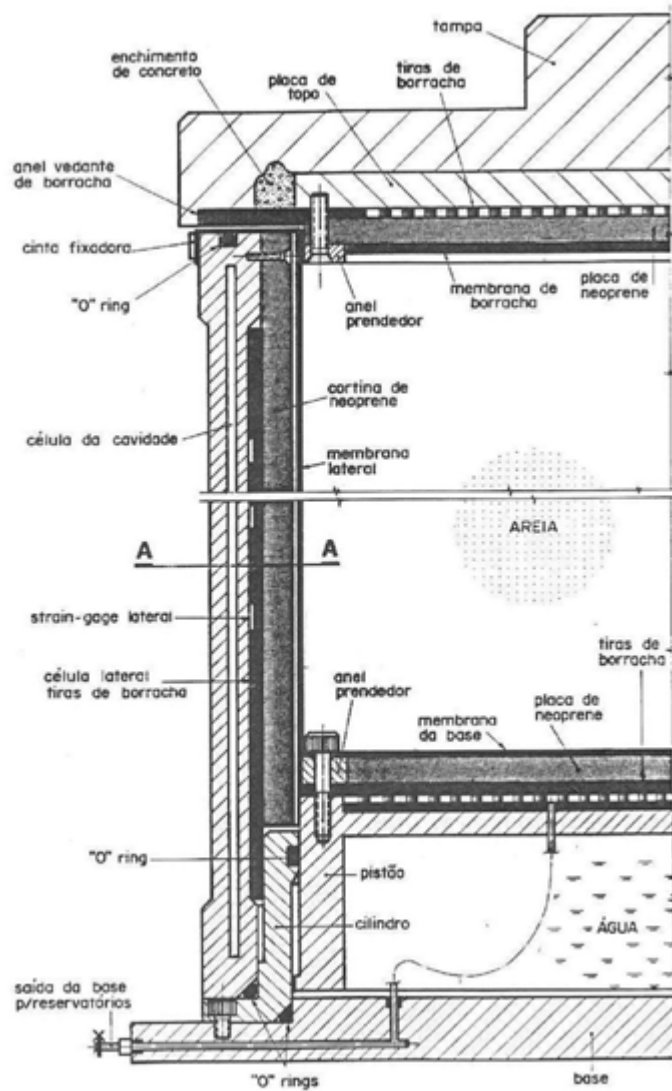


Figura 3.2 – Detalhe dos componentes da câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ (adaptado de Zohrabi, 1993).

i. Base

A base foi construída a partir de uma placa circular de aço, com 40 mm de espessura, sobre a qual o restante da câmara foi montado (Figura 3.3).



Figura 3.3 – Foto da base da câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ.

ii. Pistão e cilindro

O carregamento axial na amostra é aplicado por meio de um pistão de aço inox localizado sobre a base da câmara. Esse pistão, que tem curso de 115 mm, desloca-se dentro de um cilindro fixado à base da câmara. Um anel de vedação (*o-ring*), colocado num sulco na parte interna do cilindro, fornece a vedação do conjunto, ver Figuras 3.2, 3.4, 3.5 e 3.6.

O espaço limitado pela base da câmara e o pistão forma uma célula (célula da base do pistão) que permite aplicar carga vertical ao corpo de prova através de variação de pressão no fluido em seu interior (ar no projeto original, mas atualmente água). O deslocamento do pistão originalmente era monitorado por um transdutor de deslocamento, ligado ao pistão, e por controle do volume de fluido injetado (ou expulso) na célula, a fim de garantir redundância na medida. Atualmente apenas a última opção é utilizada.

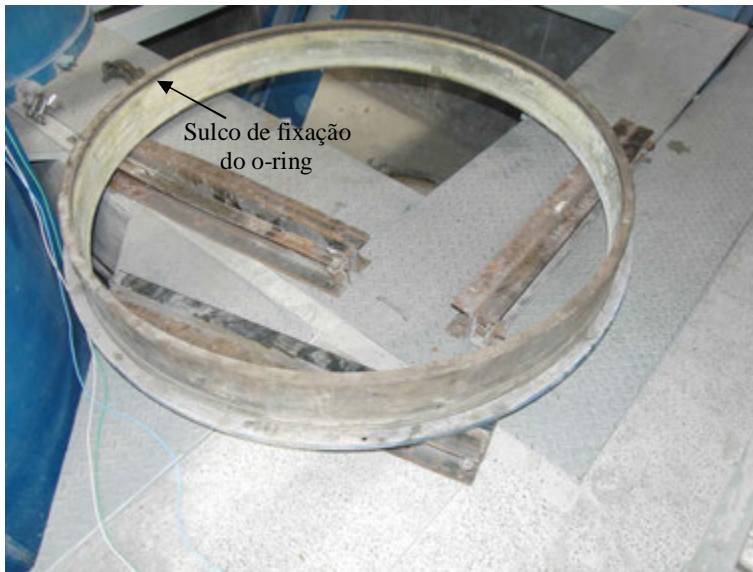


Figura 3.4 – Foto de cilindro da câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ.



Figura 3.5 – Foto do pistão da câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ.

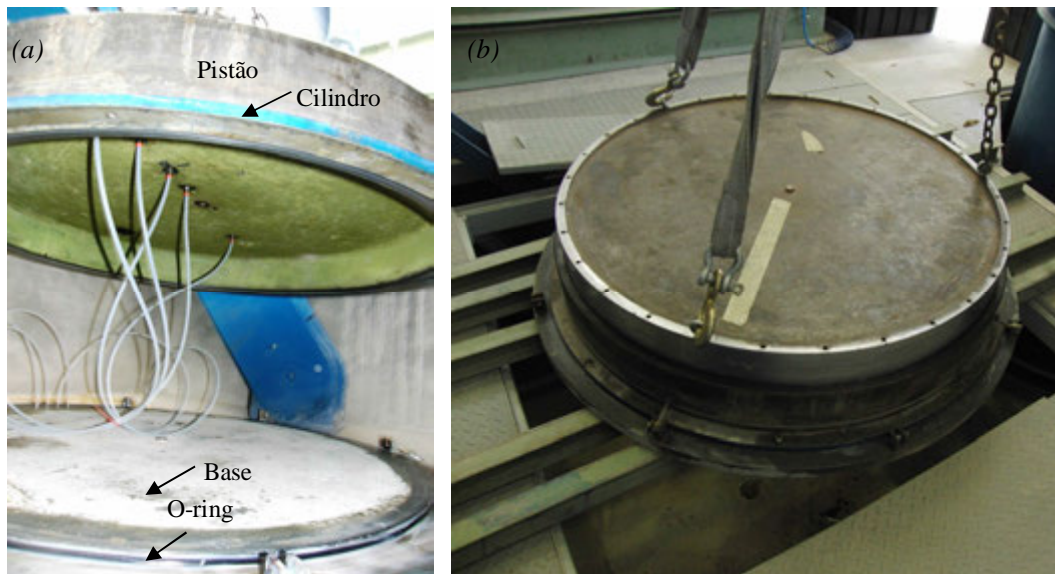


Figura 3.6 – Foto da parte inferior da câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ – base da câmara, cilindro e pistão – durante a montagem (3.6a) e após a montagem (3.6b).

iii. Tambor da câmara

A amostra de solo é envolvida por duas paredes cilíndricas e coaxiais de aço, com espessura de 6,5 mm cada. Entre essas paredes está localizada a célula de cavidade (ver Figura 3.2). Essa construção fornece meios de controlar a deformação lateral durante a compressão da amostra. O topo e a base das duas paredes coaxiais foram soldados a anéis metálicos, formando o corpo do tambor. A ligação entre a base do tambor e o cilindro da base da câmara, e a ligação entre o topo do tambor e a tampa da câmara são vedadas com o-rings, ver Figura 3.2.

Fixadas à chapa mais interna do tambor, existem tiras verticais de borracha com seção de $6 \times 6 \text{ mm}^2$. Essas tiras, que são espaçadas de 14 mm entre eixos, têm a função de fornecer ao corpo de prova rigidez correspondente àquela que uma massa infinita de solo teria naquele raio (ver Figura 3.7). A rigidez da borracha utilizada e suas dimensões foram definidas experimentalmente com base em ensaios na areia de Hokksund.

Uma cortina de neoprene de 19 mm de espessura separa a membrana lateral das tiras de borracha, tendo a função de uniformizar a distribuição de tensões e servir de molde para o corpo de prova sem risco de danificar a membrana de borracha. Os espaços entre a

membrana lateral e a parede de aço mais interna formam a célula lateral (ver Figuras 3.7 e 3.8).

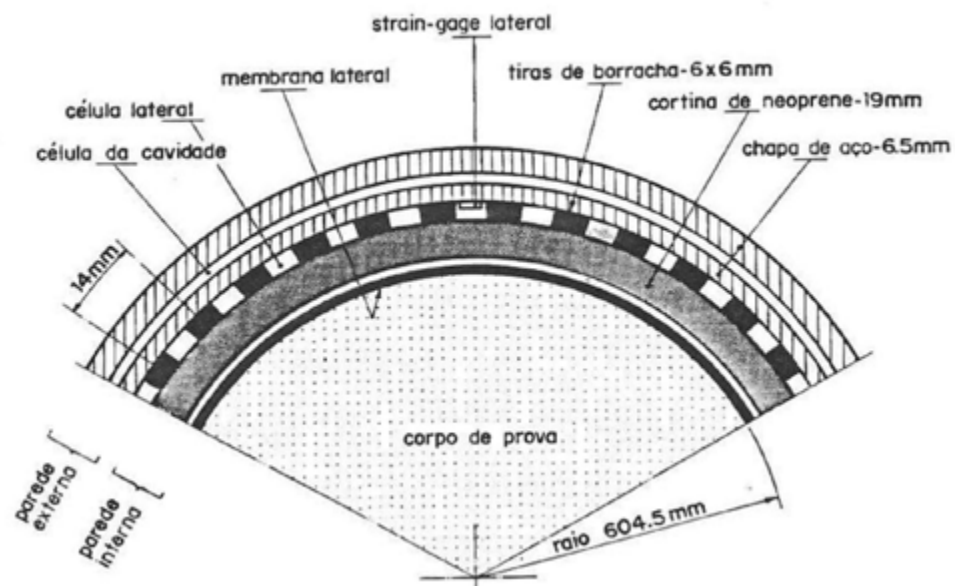


Figura 3.7 – Corte A-A da Figura 3.2, mostrando detalhe das fronteiras laterais da câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ.

Anel unindo as
paredes de aço

Tiras verticais
de borracha

Cortina de
neoprene

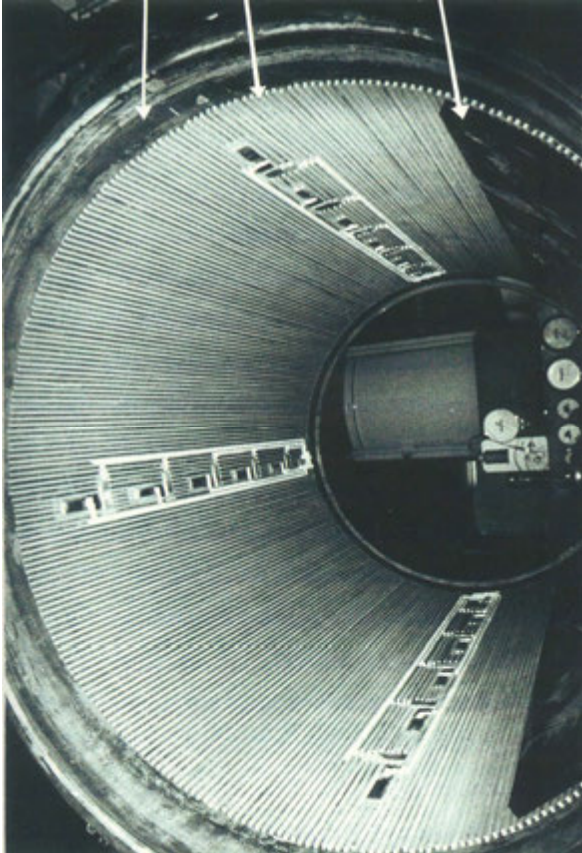


Figura 3.8 – Foto interna do tambor da câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ sem parte da cortina de neoprene (Zohrabi, 1993).

iv. Membranas

As membranas envolvem a amostra de areia na lateral e na base, sendo flexíveis o bastante para permitir a amostra deformar-se livremente, e impermeáveis o suficiente para manter a areia seca durante o ensaio.

A membrana da base é feita de uma peça circular de neoprene com 3 mm de espessura. A membrana lateral constitui-se de uma peça retangular de neoprene com 2 mm de espessura.

A peça retangular tem suas extremidades unidas por vulcanização, de modo que seja formado um cilindro com topo e base abertos. No projeto original a peça circular era unida à peça cilíndrica por vulcanização, formando um cilindro de topo aberto. Atualmente as duas membranas são independentes (ver Figura 3.2 e 3.9).

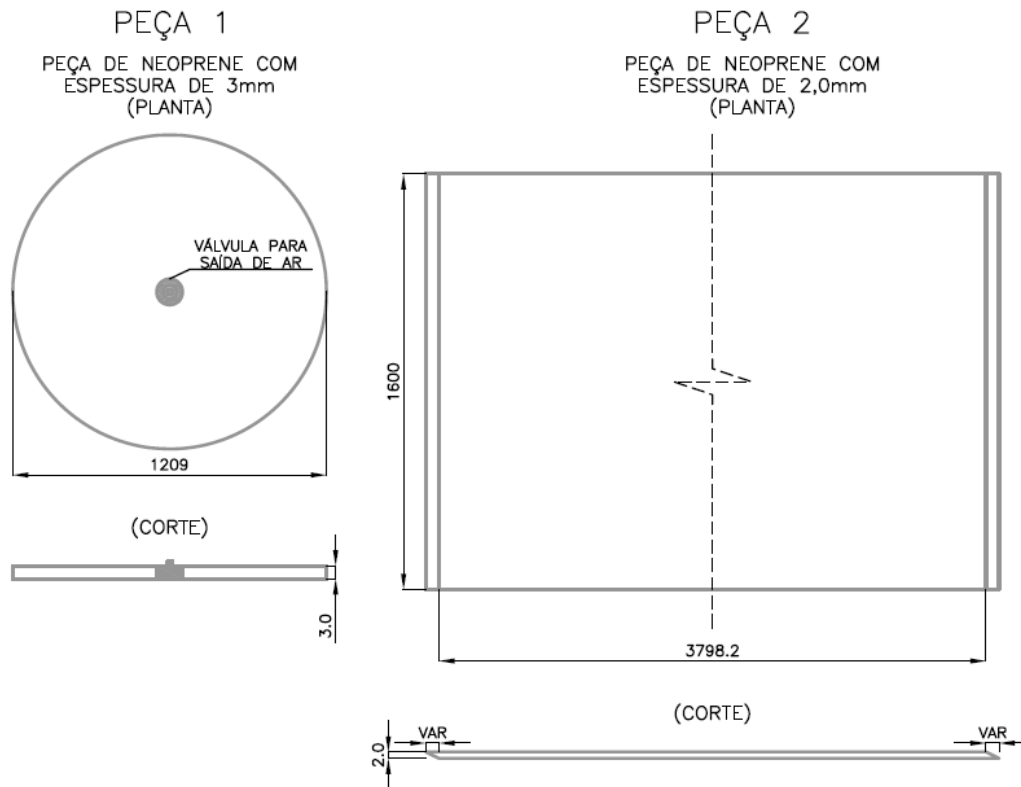


Figura 3.9 – Projeto para fabricação de membranas para a câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ (medidas em milímetro).

As membranas são fixadas ao pistão, em torno das suas bordas, por um anel metálico e parafusos de fixação (ver Figura 3.10). Essa ligação é impermeabilizada em seguida.

A tensão lateral atuante no corpo de prova é alterada através de variação de pressão de água na célula lateral. Isso é feito controlando a pressão de ar que entra num reservatório de ar e água ligado à célula lateral. O deslocamento lateral médio da amostra pode ser estimado pela variação no volume de água na célula de cavidade.

Existem tiras de borracha, com 6 mm de espessura, nas fronteiras de topo e base da câmara, distribuídas sobre lâminas de borracha, conforme apresentado nas Figuras 3.2 e 3.11. A função dessas tiras é fornecer ao corpo de prova rigidez correspondente a uma massa infinita de solo, tomando como referência a areia de Hokksund. Essas tiras de borracha estão separadas em 5 regiões estanques e concêntricas (ver Figura 3.11). Na base da câmara, cada região, que é chamada de base pocket, originalmente estava conectada a um recipiente para medida de variação de volume e a um manômetro através de mangueiras (ver Figura 3.6). A medida de variação de volume nos *base*

pockets era feita por medição de variação de peso de água nos recipientes de volume. Atualmente controla-se apenas a pressão nos *base pockets*.



Figura 3.10 – Foto da membrana no interior da câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ.

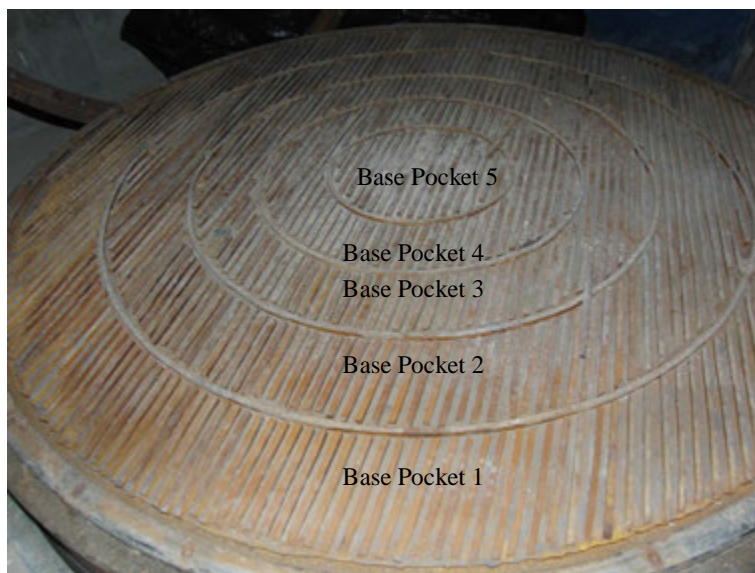


Figura 3.11 – Foto dos base pockets da câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ.

Os cinco *base pockets*, quando preenchidos com água e cobertos pela membrana de base, formam a célula de água da base da câmara, que tem a função de garantir a

transferência uniforme de tensões para a base da amostra de solo e a medição da distribuição de tensões. A distribuição uniforme de tensões ao longo do pistão, quando ele é levantado, evita que haja tendência de inclinação.

v. Placa de topo

Placas circulares de neoprene com espessura de 19 mm são colocadas na base e no topo do corpo de prova para que haja melhor transferência de tensões nas extremidades. A placa de neoprene do topo (ver figura 3.12) possui um orifício central para entrada do penetrômetro e é fixada à placa de topo da câmara através de parafusos.

A placa de topo, que é feita de madeira dura, transfere o carregamento imposto à amostra para a tampa da câmara, de modo análogo ao *top cap* num ensaio triaxial. Além disso, a membrana lateral é vedada na placa de topo, a fim de evitar que a amostra receba umidade da célula lateral. (ver Figura 3.2).



Figura 3.12 – Foto da tampa da câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ.

vi. Tampa e estrutura de reação

A tampa da câmara é formada por uma placa rígida de metal com um orifício central, através do qual o penetrômetro é cravado. A ligação entre o contorno interno do topo do tambor e a tampa da câmara é selada por um *o-ring* (ver Figura 3.2).

A força vertical fornecida pelo pistão pode superar o peso da amostra, por isso a tampa da câmara precisa ser suportada por uma estrutura de reação ancorada ao piso. A ligação entre a estrutura de reação e a tampa da câmara é feita por um par de macacos hidráulicos alimentados por um multiplicador hidráulico que automaticamente balanceia o carregamento (ver Figuras 3.1 e 3.13). Assim o deslocamento na placa de topo será mínimo, garantindo a segurança do ensaio.

A estrutura de reação, que é basculante, também serve de apoio para o sistema de cravação do penetrômetro (ver Figura 3.13). A Figura 3.14 mostra a câmara de calibração NGI/COPPE montada para um ensaio.



Figura 3.13 – Foto da câmara de calibração e estrutura de reação.



Figura 3.14 – Foto da câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ montada para um ensaio de cone.

3.4 INSTRUMENTAÇÃO DA CÂMARA DE CALIBRAÇÃO NGI-COPPE/UFRJ

A instrumentação original da câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ (no estado em que era utilizada no NGI) permitia monitorar pressão na célula lateral, na célula de cavidade e nos base pockets; variação de volume nos base pockets e na célula de cavidade, além de deslocamento vertical do pistão.

A medida de pressão era feita através de manômetros analógicos ligados às diferentes células. A variação de volume era medida pela variação de peso de água em recipientes de volume suspensos por hastes instrumentadas, e o deslocamento vertical do pistão era quantificado por meio de um LVDT ligado ao pistão. A Figura 3.15 mostra um esquema da instrumentação original da câmara de calibração NGI/COPPE.

Durante o período que a câmara de calibração foi emprestada à Universidade de Southampton, foram instalados strain-gauges (medidores de deformação) nas suas paredes, distribuídos em quatro colunas verticais, com o objetivo de monitorar esforços no tambor da câmara.

Os dispositivos para medição de volume nos base pockets e na célula de cavidade, os strain-gauges e o LVDT não seriam utilizados na presente pesquisa, assim não foram remontados durante a instalação da câmara de calibração no Laboratório de Modelos Físicos da COPPE/UFRJ.

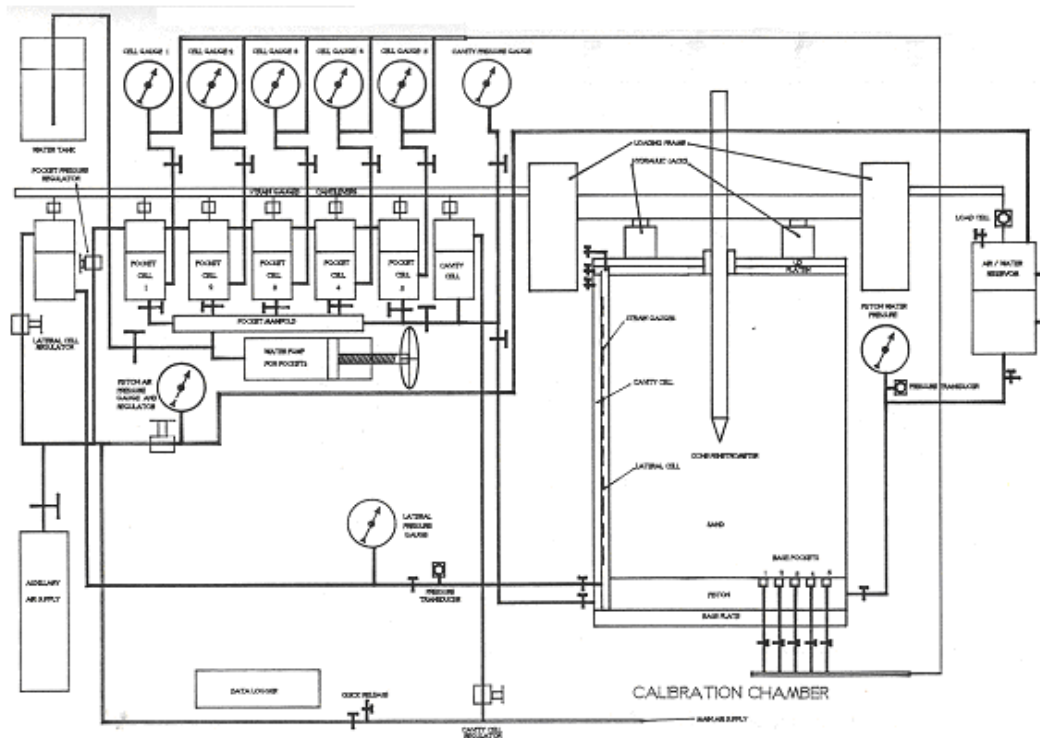


Figura 3.15 – Esquema da instrumentação original da câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ (Zohrabi, 1993).

3.5 OPERAÇÃO DA CÂMARA DE CALIBRAÇÃO NGI/COPPE

Segundo Zohrabi (1993), a operação da câmara de calibração NGI/COPPE é realizada em 3 etapas: i) formação do corpo de prova; ii) carregamento da amostra; iii) ensaio de penetração.

Antes da formação do corpo de prova, é necessário saturar os *base pockets* com água pelo processo de sifonamento. A água entra pelas cinco mangueiras conectadas aos base pockets (ver Figura 3.6) e o ar sai pela válvula central da membrana (ver Figura 3.9). Ao fim do processo a válvula central deve ser fechada.

i. Formação do corpo de prova

Um pequeno vácuo (cerca de 3 kPa) é aplicado à célula lateral para juntar a membrana lateral à cortina de neoprene e esta às tiras de borracha.

O corpo de prova de areia seca é formado por pluviação no interior da câmara de calibração. O sistema de pluviação é composto por silos de transporte, alimentador, chapas perfuradas, base e difusor. O sistema é montado conforme pode ser visto na Figura 3.16 e 3.17.

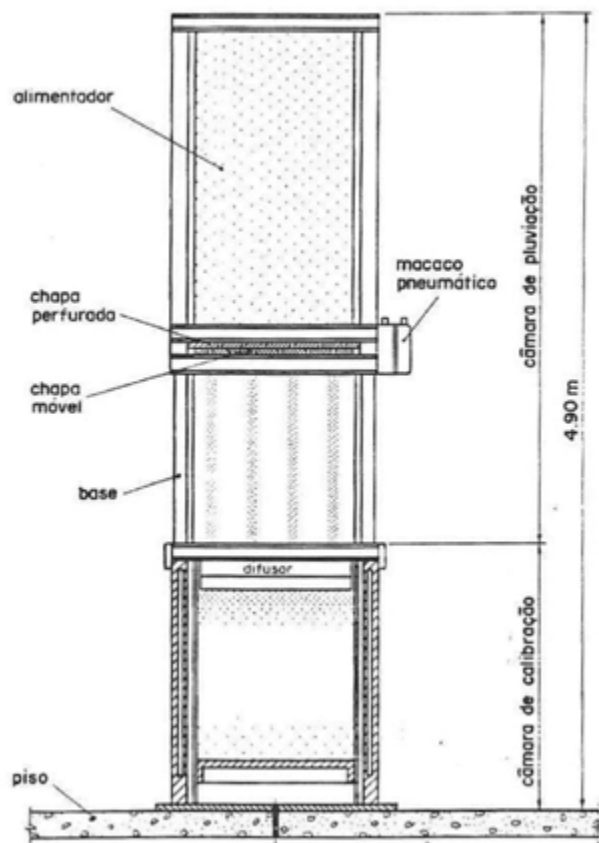


Figura 3.16 – Esquema do sistema de pluviação da câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ.



Figura 3.17 – Foto do sistema de pluviação sobre a câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ.

A areia é transportada para dentro do alimentador com o auxílio de silos. Os furos das chapas perfuradas embaixo do alimentador inicialmente estão defasados, de modo que a areia lá acumulada não pode descer. Quando a chapa de baixo (chapa móvel) é deslocada horizontalmente, através de um macaco pneumático, e os furos das duas chapas coincidem, inicia-se a pluviação. Para encerrar o processo é necessário deslocar-se a chapa móvel para a posição original. Existem cinco chapas perfuradas com diferentes diâmetros de furo, o que permite formar amostras com diferentes compacidades. A Figura 3.18 mostra detalhes de chapas perfuradas e do difusor.

Após passar pelas placas perfuradas, a areia cai através da base da câmara de pluviação, numa altura mínima de 75 centímetros, na forma de jatos bem definidos até encontrar o difusor. O difusor consiste de duas telas circulares de malha fina retangular, separadas por uma distância de 20 cm e com defasagem angular de 45°, de modo a maximizar a dispersão das partículas de areia. Segundo Jacobsen (1976), nessas condições a densidade de um depósito de areia de 1 m de altura variará menos que 1%.



Figura 3.18 – Foto de placas perfuradas (3.18a) e do difusor (3.18b).

Após a câmara ser cheia ligeiramente acima do nível da borda, a pluviação é interrompida e a superfície de areia nivelada, tomando como base a borda. Por fim a câmara é cuidadosamente fechada.

ii. Carregamento da amostra

Um tanque de suprimento de água é posicionado acima da câmara, com a função de alimentar com água a célula lateral, a célula de cavidade, a célula de água da base do pistão e os dois reservatórios de ar e água (vertical e lateral). Em seguida as células e os reservatórios são preenchidos. No caso das três células citadas, é necessário utilizar-se uma bomba de vácuo ligada aos orifícios de saída de ar de cada um deles, a fim de evitar que bolhas de ar fiquem presas. Esses orifícios de saída de ar são conectados a manômetros em seguida.

Os reservatórios de ar e água vertical e lateral são células que recebem ar comprimido e transmitem a pressão de ar para a água. O reservatório de ar e água vertical é responsável pelo deslocamento do pistão, e o reservatório de ar e água lateral aplica pressão nas células lateral e de cavidade. Os reservatórios utilizados têm pressões de trabalho de 10 bar (ver Figura 3.19).



Figura 3.19 – Reservatório de ar e água lateral (à esquerda) e vertical (à direita).

A estrutura de reação é levantada e os macacos de reação, posicionados sobre a tampa da câmara, são conectados e levemente bombeados.

Caso o carregamento inicial da amostra seja feito na condição K_0 , isto é, sem permitir deformação lateral durante o estágio de aplicação de carregamento, as pressões nas células de cavidade e lateral precisam ser mantidas iguais e a drenagem da célula lateral fechada. Assim é possível garantir que a célula lateral não sofrerá variação de volume, já que sua drenagem está fechada, nem distorção, já que a célula vizinha está submetida à mesma pressão.

No início do carregamento a pressão na célula de água da base do pistão é aumentada em incrementos, de 25 kPa até 200 kPa e de 33 kPa após 200 kPa, através da regulação do fornecimento de ar para o reservatório de ar e água vertical. Esse carregamento vertical gera incrementos de pressão horizontal na célula lateral, que devem ser igualados na célula de cavidade, através de acréscimo de pressão de ar no reservatório de ar e água lateral, para que a condição K_0 seja mantida. A força aplicada na tampa da câmara pela amostra é transmitida pelos macacos para a estrutura de reação, que resiste ao esforço. Quando o equilíbrio de pressão nas células lateral e de cavidade é atingido, após cada incremento de tensão vertical, é feita a leitura de pressões nas células.

Amostras sobreadensadas podem ser produzidas reduzindo a tensão vertical e mantendo a deformação lateral nula.

Durante a etapa de aplicação de tensões no corpo de prova, com base nos registros de pressões na célula lateral e na célula de água da base da câmara, e nos deslocamentos verticais do pistão, é possível estimar os seguintes parâmetros da amostra: K_0 , E_0 e v_0 .

iii. Ensaio de penetração

Nessa etapa é realizado o ensaio de penetração utilizando cone, pressiômetro, dilatômetro ou SPT. Na presente pesquisa são utilizados cone, SPT e um novo amostrador instrumentado, sendo que o ensaio de cone tem como objetivo principal aferir o perfeito funcionamento da câmara de calibração.

De acordo com Ghionna e Jamiolkowski (1991), nessa etapa existem 4 condições de contorno (boundary conditions - BC) para ensaios em câmara de calibração, ver Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Condições de contorno para ensaios em câmara de calibração, segundo Ghionna e Jamiolkowski (1991).

BC	Restrição lateral	Restrição de base
1	Tensão constante ($\Delta\sigma_h = 0$)	Tensão constante ($\Delta\sigma_v = 0$)
2	Deformação nula ($\Delta\varepsilon_h = 0$)	Deformação nula ($\Delta\varepsilon_v = 0$)
3	Deformação nula ($\Delta\varepsilon_h = 0$)	Tensão constante ($\Delta\sigma_v = 0$)
4	Tensão constante ($\Delta\sigma_h = 0$)	Deformação nula ($\Delta\varepsilon_v = 0$)

As condições BC 1 e BC 3 são as mais utilizadas internacionalmente. Em ambas, a tensão vertical que a amostra está submetida é constante. Na primeira, a tensão lateral é mantida constante e na segunda, a deformação lateral é nula.

Segundo Zohrabi (1993), as duas condições de contorno (BC 1 e BC 3) representam os limites inferior e superior das reais condições de campo, já que são esperados durante a penetração acréscimos na tensão e na deformação radial.

Após a conclusão do ensaio, a amostra é descarregada lentamente e o penetrômetro é retirado da câmara. Em seguida a estrutura de reação é baixada e a tampa é removida.

Durante o ensaio de penetração, pode ocorrer quebra de partículas na areia em torno do penetrômetro. Essa areia é removida, a fim de não alterar as propriedades originais da amostra em ensaios futuros. Isto é feito introduzindo um tubo, com diâmetro de 10 a 15 cm, no eixo da câmara, isolando aquela areia. O restante da areia é removido para um silo para ser reaproveitado.

Na mesma medida que a areia é removida, o nível de água das células de cavidade e lateral deve ser rebaixado, a fim de evitar danos nas paredes da câmara.

3.6 RECUPERAÇÃO DA CÂMARA DE CALIBRAÇÃO NGI-COPPE/UFRJ

Durante o período em que a câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ ficou fora de operação, alguns de seus componentes foram deteriorados, já o perfeito funcionamento de outros se tornou incerto. Assim foi necessário um extenso programa de avaliação e recuperação desse equipamento.

Até o momento, essa foi a etapa mais árdua da presente pesquisa, pela complexidade do equipamento, pela escassez de informações a respeito de seu funcionamento e pela dificuldade em encontrar empresas interessadas em fabricar ou reparar alguns componentes, como as membranas de borracha, por exemplo. A seguir será realizada uma breve descrição das principais atividades relacionadas com a recuperação da câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ.

Os seguintes componentes foram lixados e pintados: exterior da câmara de calibração, silos de armazenamento e transporte de areia, alimentador da câmara de pluviação, base da câmara de pluviação (também teve corpo de acrílico recuperado), estrutura de reação e estrutura de cravação do cone. As placas de pluviação e as cintas de fixação das membranas receberam jateamento de areia, para remoção de crosta de ferrugem.

Como a membrana original estava rasgada, foi necessária a construção de uma nova membrana, feita a partir do projeto mostrado na Figura 3.9. Esse projeto foi baseado em informações apresentadas em Chapman (1974), Chapman (1979) e Zohrabi (1993). O projeto também foi adequado à capacidade da indústria nacional e aos materiais disponíveis. A nova membrana é apresentada na Figura 3.20.

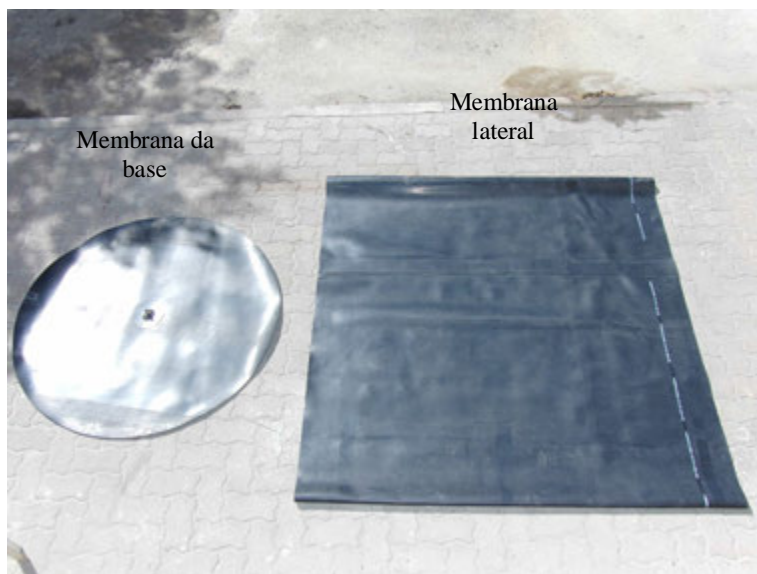


Figura 3.20 – Foto da nova membrana.

As placas de neoprene do topo e da base da câmara também necessitaram ser recuperadas, tendo suas dimensões sido mantidas. Já as tiras de borracha dos *base pockets* necessitaram ser retiradas e coladas novamente.

Os seguintes instrumentos foram enviados para uma empresa mecânica para restauração: macacos hidráulicos da tampa da câmara, macaco pneumático da pluviação, sistema hidráulico de cravação do penetrômetro, sistema hidráulico de movimentação da estrutura de reação e dinamômetro para pesagem da amostra.

Os reservatórios de ar e água vertical e lateral passaram por testes de pressão estática e avaliação do estado de corrosão, a fim de evitar acidentes durante sua utilização. Ambos foram aprovados nos testes, sendo protegidos por camada de níquel. A Figura 3.19 mostra os reservatórios de ar e água vertical e lateral após a recuperação.

A base da câmara foi aberta para recuperação, as partes oxidadas foram lixadas, todo o interior protegido com vaselina sólida, e todas as conexões e mangueiras trocadas. Foram realizados testes de estanqueidade nas conexões e na célula de água da base do pistão.

O vacuômetro e os manômetros analógicos da célula lateral, da célula de cavidade, do ar comprimido para o reservatório de ar e água vertical e do ar comprimido para o

reservatório de ar e água lateral foram recuperados (limpos, lixados, pintados e regulados). Foram comprados novos manômetros analógicos para os 5 *base pockets*. Além disso, foram comprados 3 manômetros digitais registradores (registram as leituras e as transferem para um computador), um para a célula lateral, um para a célula de cavidade e outro para um dos *base pockets*, garantindo redundância nas medidas. Todos esses manômetros têm pressão de trabalho de 6 bar (pressão máxima de trabalho da câmara).

Para o suprimento de ar comprimido dos reservatórios de ar e água, foi adaptado um sistema a partir de uma linha de ar comprimido existente no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ. A pressão na linha existente é de cerca de 13 bar, por isso foi instalado um regulador de pressão com diafragma, limitando a pressão disponível em 6 bar, a fim de evitar danos aos componentes da câmara de calibração. Foram instalados mais dois reguladores de pressão com diafragma, para controle de pressão em ambos os reservatórios. Também foi conectado à linha um filtro para retirar água do ar comprimido, o que poderia afetar a medição de variação de volume na amostra.

A Figura 3.21 mostra o painel de controle da câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ após a recuperação.



Figura 3.21 – Foto do painel de controle da câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ após a recuperação.

a = Manômetro analógico da célula lateral;

b = Manômetro analógico da célula de cavidade;

c = Manômetro analógico do ar comprimido para o reservatório de ar e água lateral;

d = Manômetro analógico do ar comprimido para o reservatório de ar e água vertical;

e = Regulador de pressão do reservatório de ar e água lateral;

f = Regulador de pressão do reservatório de ar e água vertical;

g = Regulador de pressão do sistema;

h = Filtro do ar comprimido;

i = Manômetro do base pocket n. 1;

j = Manômetro do base pocket n. 2;

k = Manômetro do base pocket n. 3;

l = Manômetro do base pocket n. 4;

m = Manômetro do base pocket n. 5;

n = Manômetro digital da célula lateral;

o = Manômetro digital da célula de cavidade;

p = Vacuômetro;
q = Manômetro digital do base pocket n. 3;
r = Bomba de vácuo;
s = Dinamômetro para pesagem da amostra.

3.7 A AREIA DE HOKKSUND

Todos os ensaios realizados em câmara de calibração (CPT, cravação do amostrador SPT e cravação de amostrador instrumentado) foram realizados com a areia de Hokksund seca ao ar.

De acordo com Zohrabi (1993), a areia de Hokksund é originária de um depósito flúvio-glacial no Vale do Rio Drummen, próximo a Oslo/Noruega. A composição mineralógica da areia, que foi determinada por difração de raio-X, indica a seguinte composição: 45% de feldspato, 35% de quartzo, 10% de mica e 10% de outros minerais. A densidade relativa média de seus grãos vale 2,7.

Segundo Parkin e Lunne (1982), a areia de Hokksund tem partículas com forma sub-angular, seu peso específico seco varia de 13,9 kN/m³ a 17,2 kN/m³. O ângulo de atrito vale 46° no estado mais compacto e 42° para valores de compactidade relativa entre 80% e 90%. A Figura 3.22 mostra a curva granulométrica dessa areia e um resumo das principais propriedades.

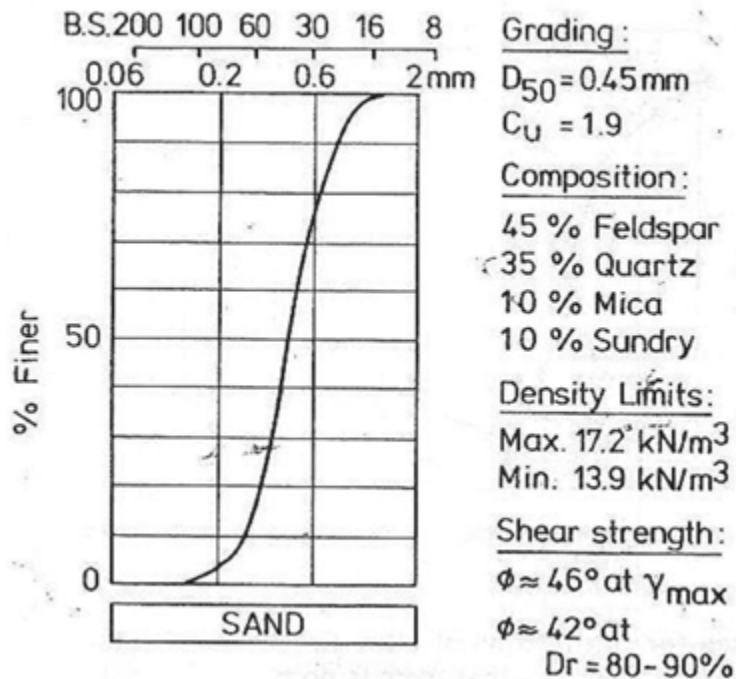


Figura 3.22 – Resumo das propriedades da areia de Hokksund (Parkin e Lunne, 1982).

3.8 PIEZOCONE COPPE IV

Conforme já mencionado, juntamente com a câmara de calibração, foram recebidos do NGI dois cones elétricos. Esses equipamentos não estavam funcionando na época dos ensaios descritos no presente trabalho. Assim, foi utilizado nos ensaios de cone o Piezocone COPPE IV, que tem 10 cm^2 de área de ponta.

O Piezocone COPPE IV é capaz de medir resistência de ponta, atrito lateral, poro-pressão em duas posições (superfície lateral e base do cone), além do desvio da vertical da composição de hastes. A célula de carga da ponta tem capacidade de 60 kN e a célula de carga de atrito de 10 kN.

Como os ensaios em câmara de calibração foram realizados em areia seca, não foi realizada medida de poro-pressão. Também não foi medido desvio de verticalidade. Dessa maneira, os transdutores de poro-pressão e o sensor de inclinação não serão descritos com mais detalhes. O desenvolvimento do Piezocone COPPE IV é apresentado com detalhes em Bezerra (1996).

A Figura 3.23 mostra o aparato montado para a calibração de resistência de ponta e atrito lateral do Piezocone COPPE IV. A resistência de ponta foi calibrada para cargas de até 14,9 kN e o atrito lateral para cargas de até 3,7 kN. No Anexo 1 são apresentadas as curvas de calibração da resistência de ponta e do atrito lateral.



Figura 3.23 – Aparato para calibração de (a) resistência de ponta, (b) atrito lateral.

3.9 RESULTADOS DE ENSAIOS REALIZADOS NA CÂMARA DE CALIBRAÇÃO NGI-COPPE/UFRJ

As Tabelas 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 mostram resultados de ensaios de cone, realizados na câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ, apresentados por Last. *et al.* (1987). A Tabela 3.6 mostra resultados de ensaios de cone, realizados na mesma câmara de calibração, apresentados por Zohrab (1993). Nessas Tabelas também são apresentadas as condições de contorno de cada ensaio. Todos os ensaios apresentados foram realizados com a areia de Hokksund.

As Figuras 3.24a e 3.24b mostram resultados típicos de ensaios de cone em câmara de calibração. Na Figura 3.24a são apresentados resultados de resistência de ponta do cone (q_c) em função da profundidade. Já na Figura 3.24b são apresentados resultados típicos de atrito lateral do cone (f_s) em função da profundidade.

Tabela 3.2 – Resultados de ensaios de cone realizados na câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ (Last et al. 1987).

Teste ¹	γ_d^2 (t/m ³)	D_R^3 (%)	$\sigma'_v{}^4$ (kg/cm ²)	K_o^5	OCR ⁶	M^7 (kg/cm ²)	q_c^8 (kg/cm ²)	f_s^9 (kg/cm ²)	d_c^{10} (cm)	BC ¹¹
SU1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SU2	1,715	91,40	0,63	0,37	1	508	176	0,48	2,52	BC1
SU3	1,717	91,90	0,63	0,35	1	510	133	0,37	3,57	BC1
SU4	1,727	94,40	1,13	0,33	1	638	204	0,70	3,57	BC1
SU5	1,730	95,10	2,13	0,32	1	1020	275	1,16	3,57	BC1
SU6	1,720	92,40	4,13	0,31	1	1250	377	2,13	3,57	BC1
SU7	1,705	88,90	3,13	0,36	1	1378	342	1,97	2,52	BC1
SU8	1,711	90,40	4,13	0,31	1	1190	418	2,71	3,57	BC3
SU9	1,740	97,60	2,13	0,33	1	1075	336	1,94	3,57	BC3
SU10	1,720	92,70	1,13	0,33	1	714	224	1,03	3,57	BC3
SU11	1,706	89,10	0,63	0,51	1	852	163	0,71	3,57	BC3
SU12	1,692	85,60	1,13	0,60	1	-	284	1,29	3,57	BC1
SU13	1,717	91,90	1,13	0,95	1	-	323	1,81	3,57	BC1
SU14	1,690	85,10	1,13	0,95	1	-	266	1,29	3,57	BC1
SU15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SU22	1,733	95,90	1,13	0,37	1	887	265	0,73	2,52	BC1
SU23	1,706	89,10	2,13	0,37	1	1187	367	1,05	2,52	BC1
SU24	1,700	87,60	3,13	0,38	1	1275	408	1,35	2,52	BC1
SU25	1,713	90,90	4,13	0,37	1	1595	500	1,58	2,52	BC1
SU26	1,731	95,40	0,63	0,37	1	576	194	0,56	2,52	BC3
SU27	1,720	92,70	1,13	0,37	1	750	265	0,91	2,52	BC3
SU28	1,710	90,20	2,13	0,37	1	1250	408	1,68	2,52	BC3
SU29	1,720	92,70	4,13	0,38	1	1765	540	2,32	2,52	BC3
SU32	1,720	92,70	0,63	0,39	1	576	175	0,57	2,52	BC1
SU33	1,630	69,00	0,62	0,38	1	536	98	0,25	2,52	BC1
SU34	1,628	68,50	0,62	0,34	1	329	95	0,39	3,57	BC3
SU35	1,627	68,20	0,62	0,35	1	392	84	0,39	3,57	BC1
SU36	1,610	63,40	2,12	0,38	1	809	238	1,03	3,57	BC3
SU37	1,620	66,20	2,12	0,36	1	950	228	0,90	3,57	BC1
SU38	1,570	51,80	0,62	0,39	1	283	57	0,19	3,57	BC3
SU39	1,550	45,70	2,12	0,40	1	490	112	0,51	3,57	BC3
SU40	1,552	46,30	1,12	0,40	1	329	76	0,28	3,57	BC3
SU41	1,564	50,00	4,12	0,40	1	864	209	1,03	3,57	BC3
SU42	1,472	20,50	0,61	0,47	1	116	20	0,06	3,57	BC3
SU43	1,482	23,90	2,11	0,47	1	302	57	0,19	3,57	BC3
SU44	1,482	23,90	4,11	0,47	1	481	121	0,65	3,57	BC3

Tabela 3.3 – Resultados de ensaios de cone realizados na câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ (Last et al. 1987).

Teste ¹	γ_d^2 (t/m ³)	D_R^3 (%)	$\sigma'_v{}^4$ (kg/cm ²)	K_o^5	OCR ⁶	M^7 (kg/cm ²)	q_c^8 (kg/cm ²)	f_s^9 (kg/cm ²)	d_c^{10} (cm)	BC ¹¹
SU16	1,719	92,4	1,13	0,49	2	2307	245	1,03	3,57	BC1
SU17	1,680	82,5	1,13	0,60	4	2000	296	1,55	3,57	BC1
SU18	1,718	91,9	0,63	0,47	2	1456	163	0,55	3,57	BC1
SU19	1,730	95,1	0,63	0,63	4	1530	184	0,71	3,57	BC1
SU20	1,733	95,8	0,63	0,81	8	1342	204	0,87	3,57	BC1
SU21	1,701	87,9	2,13	0,40	2	3191	347	1,88	3,57	BC1
SU30	1,730	91,4	1,13	0,49	2	1974	306	1,15	2,52	BC1
SU31	1,730	95,1	1,13	0,61	4	3000	367	1,42	3,57	BC1
SU45	1,476	21,9	0,61	0,54	2	927	38	0,16	3,57	BC3
SU46	1,481	23,6	0,61	0,63	4	1020	35	0,17	3,57	BC3
SU47	1,481	23,6	1,11	0,64	4	1417	66	0,28	3,57	BC3
SU48	1,469	19,5	0,61	0,56	2	1457	30	0,14	3,57	BC1
SU49	1,473	20,9	1,11	0,56	2	1457	52	0,28	3,57	BC1
SU50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SU51	1,478	22,6	1,11	0,53	2	1430	60	0,28	3,57	BC3
SU52	1,470	19,8	0,61	0,69	8	981	68	0,33	3,57	BC1
SU53	1,470	19,8	0,61	0,62	4	1020	56	0,22	3,57	BC1
SU54	1,480	23,2	1,11	0,66	4	1457	67	0,36	3,57	BC3
SU55	1,472	20,5	2,11	0,57	2	2125	103	0,53	3,57	BC3
SU56	1,475	21,5	1,11	0,64	4	1417	63	0,35	3,57	BC1
SU57	1,481	23,6	2,11	0,56	2	2550	127	0,64	3,57	BC1
SU58	1,489	26,2	0,61	0,71	8	936	56	0,28	3,57	BC3
SU59	1,498	29,2	0,61	0,63	4	1085	52	0,18	3,57	BC3
SU72	1,623	67,1	0,62	0,78	8	900	78	0,29	3,57	BC1
SU73	1,643	72,6	0,62	0,88	8	1020	72	0,27	3,57	BC1
SU74	1,616	65,1	0,62	0,47	2	1275	78	0,26	3,57	BC1
SU75	1,619	66,0	0,62	0,59	4	1020	95	0,30	3,57	BC1
SU76	1,654	75,6	0,62	0,58	4	1133	133	0,36	3,57	BC1

Tabela 3.4 – Resultados de ensaios de cone realizados na câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ (Last et al. 1987).

Teste ¹	γ_d^2 (t/m ³)	D_R^3 (%)	$\sigma'_v{}^4$ (kg/cm ²)	K_o^5	OCR ⁶	M^7 (kg/cm ²)	q_c^8 (kg/cm ²)	f_s^9 (kg/cm ²)	d_c^{10} (cm)	BC ¹¹
E174	1,692	82,3	1,23	0,451	1,00	729	221,5	1,47	3,57	BC1
E175	1,690	81,7	0,70	0,436	1,00	545	152,9	0,81	3,57	BC1
E177	1,692	82,3	2,72	0,439	1,00	1075	354,1	2,96	3,57	BC1
E178	1,742	95,6	0,70	0,438	1,00	553	190,5	1,03	3,57	BC1
E179	1,742	95,6	0,70	0,442	1,00	532	234,2	0,99	2,54	BC1
E180	1,742	95,6	0,72	0,424	1,00	581	264,7	-	2,00	BC1
E184	1,533	34,0	1,19	0,489	1,00	415	28,4	0,23	3,57	BC1
E185	1,528	32,3	0,64	0,479	1,00	300	15,2	0,11	3,57	BC1
E186	1,525	31,3	3,18	0,506	1,00	613	59,9	0,50	3,57	BC1
N001	1,734	96,0	0,62	0,460	1,00	733	167,8	-	3,57	BC1
N002	1,721	93,0	0,62	0,350	1,00	630	209,0	-	3,57	BC3
N005	1,510	33,0	0,60	0,410	1,00	207	22,6	-	3,57	BC1
N006	1,514	34,0	0,60	0,370	1,00	205	29,4	-	3,57	BC3
N009	1,725	94,0	0,62	0,350	1,00	692	153,0	-	3,57	BC1
N013	1,710	90,0	0,62	0,390	1,00	873	185,4	-	2,52	BC1
N015	1,706	49,0	0,62	0,320	1,00	637	230,5	-	2,52	BC1
N018	1,495	28,0	0,60	0,400	1,00	242	36,3	-	2,52	BC1
N019	1,499	30,0	0,60	0,380	1,00	214	11,8	-	2,52	BC3
N022	1,709	90,0	0,62	0,360	1,00	692	217,8	-	2,52	BC1
N023	1,714	91,0	0,62	0,350	1,00	685	187,4	-	2,52	BC1
N024	1,533	40,0	0,60	0,400	1,00	213	60,8	-	2,52	BC3

Tabela 3.5 – Resultados de ensaios de cone realizados na câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ (Last et al. 1987).

Teste ¹	γ_d^2 (t/m ³)	D_R^3 (%)	$\sigma'_v{}^4$ (kg/cm ²)	K_o^5	OCR ⁶	M^7 (kg/cm ²)	q_c^8 (kg/cm ²)	f_s^9 (kg/cm ²)	d_c^{10} (cm)	BC ¹¹
E181	1,744	96,1	0,64	1,272	14,55	2428	206,6	1,48	3,57	BC1
E182	1,745	96,4	0,64	1,265	14,47	2435	351,1	1,44	2,54	BC1
E183	1,744	96,1	0,65	1,253	14,40	2466	389,1	-	2,00	BC1
E187	1,528	32,3	1,14	0,870	7,29	1985	45,7	0,40	3,57	BC1
N003	1,727	94,0	0,62	1,000	8,00	2410	229,6	-	3,57	BC1
N004	1,723	93,0	0,62	0,990	8,00	2560	232,5	-	3,57	BC1
N007	1,498	29,0	0,60	0,910	8,00	1550	50,0	-	3,57	BC1
N008	1,489	26,0	0,60	0,750	8,00	1690	52,0	-	3,57	BC3
N010	1,718	92,0	0,62	0,840	8,00	2580	160,9	-	3,57	BC1
N011	1,510	33,0	0,60	0,900	8,00	1690	42,2	-	3,57	BC1
N012	1,502	31,0	0,60	0,930	8,00	1680	40,2	-	3,57	BC1
N014	1,719	92,0	0,62	0,890	8,00	2140	299,2	-	2,52	BC1
N016	1,710	90,0	0,62	0,900	8,00	2210	300,2	-	2,52	BC1
N017	1,713	91,0	0,62	0,980	8,00	2290	313,9	-	2,52	BC1
N020	1,487	26,0	0,60	0,790	8,00	1570	29,4	-	2,52	BC1
N021	1,480	23,0	0,60	0,870	8,00	1510	26,5	-	2,52	BC3
N025	1,496	29,0	0,60	0,740	8,00	1730	49,1	-	2,52	BC1
N026	1,720	93,0	0,62	0,910	8,00	2460	214,8	-	2,52	BC1

¹Teste = nome do ensaio realizado;

² γ_d = peso específico da amostra;

³ D_R = compactidade relativa da amostra;

⁴ σ'_v = tensão efetiva vertical no topo da amostra;

⁵ K_o = coeficiente de empuxo no repouso;

⁶OCR = razão de sobreadensamento;

⁷ M = Módulo de elasticidade edométrico;

⁸ q_c = resistência de ponta do ensaio de cone;

⁹ f_s = atrito lateral do ensaio de cone;

¹⁰ d_c = diâmetro do penetrômetro;

¹¹BC = condição de contorno do ensaio em câmara de calibração.

Tabela 3.6 – Resultados de ensaios de cone realizados na câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ (Zohrab, 1993) – Condição de contorno BC3.

Teste ¹	D _R ² (%)	σ'_v ³ (kgf/cm ²)	σ'_h ⁴ (kgf/cm ²)	σ'_m ⁵ (kgf/cm ²)	OCR ⁶	K _o ⁷	M ⁸ (kgf/cm ²)	q _c ⁹ (kgf/cm ²)	f _s ¹⁰ (kgf/cm ²)
CP1 ^s	90,7	4,150	1,394	2,313	1	0,336	1602	285	2,05
CP2 ^{s@}	83,2	2,150	0,711	1,191	1	0,331	1060	127	0,60
CP3 ^s	85,1	2,150	0,737	1,208	1	0,343	1612	107	1,14
CP4	88,0	2,150	0,728	1,202	1	0,339	1670	155	0,59
CP5 ^s	85,1	2,150	0,721	1,197	1	0,335	1710	257	1,55
CP6 ^s	98,6	1,150	0,621	0,797	4	0,54	2290	242	1,41
CP7	99,8	1,145	0,603	0,784	4	0,537	2820	322	1,74
CP8	99,0	2,150	0,66	1,157	1	0,307	1925	307	1,83
CP9	91,0	2,052	0,672	1,132	1	0,327	720	229	0,97
CP10	94,8	2,100	0,561	1,074	1	0,267	950	255	1,26
CP11	88,0	1,024	0,475	0,658	4	0,464	2620	202	0,94
CP12	87,2	0,518	0,365	0,416	8	0,705	1970	185	0,80
CP13	97,6	0,576	0,277	0,277	16	1,003	950	162	0,67
CP14	97,6	3,993	1,339	2,224	1	0,335	2170	432	2,85
CP15	64,0	4,022	1,604	2,410	1	0,399	1230	205	1,26
CP16	69,0	1,030	0,636	0,767	4	0,617	2180	138	0,58
CP17	64,9	0,268	0,313	0,298	16	1,168	750	52	0,24

¹Teste = nome do ensaio realizado;

²D_R = compacidade relativa da amostra;

³ σ'_v = tensão efetiva vertical na amostra;

⁴ σ'_h = tensão efetiva horizontal na amostra;

⁵ σ'_m = tensão efetiva octaédrica;

⁶OCR = razão de sobreadensamento;

⁷K_o = coeficiente de empuxo no repouso;

⁸M = Módulo de elasticidade edométrico;

⁹q_c = resistência de ponta do ensaio de cone;

¹⁰f_s = atrito lateral do ensaio de cone;

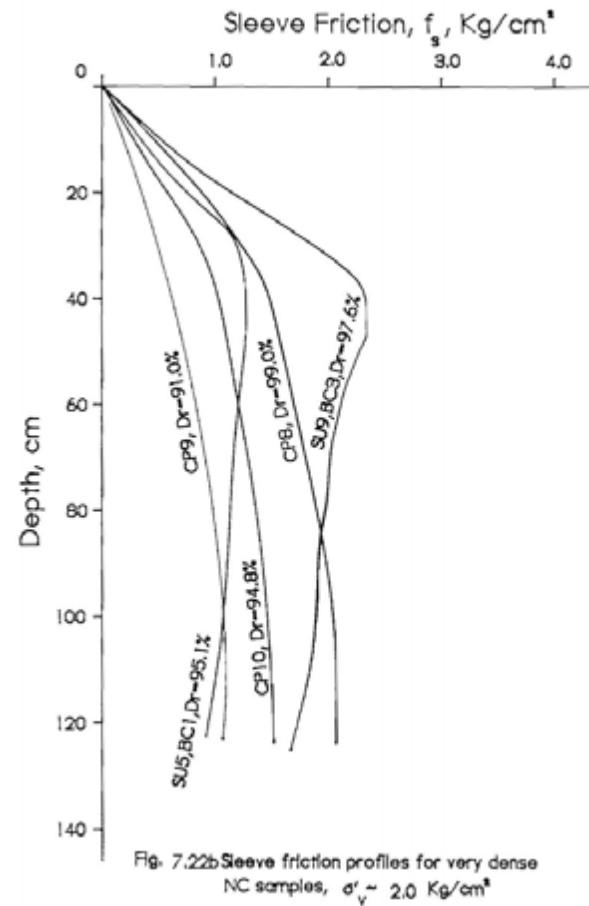
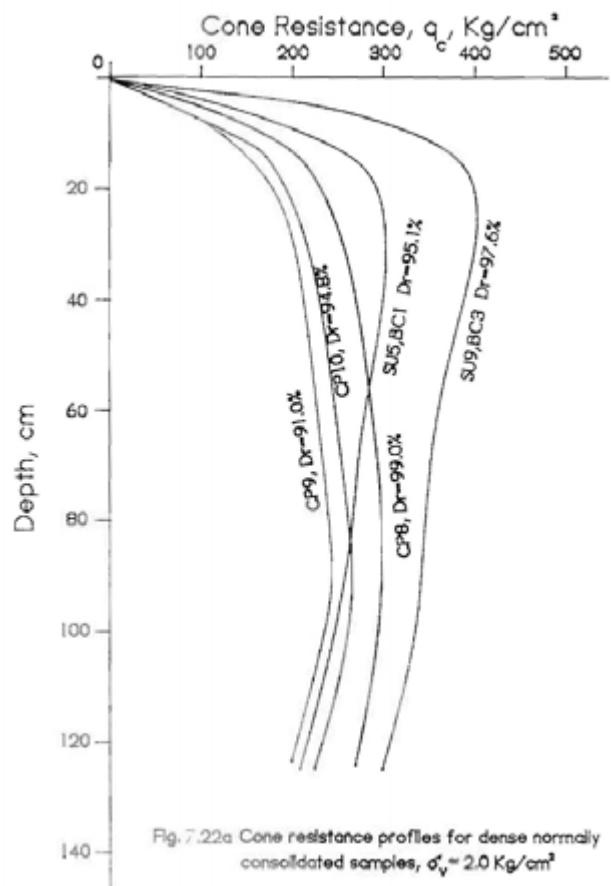


Figura 3.24 – Resultados de ensaio de cone na câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ (a) resistência de ponta x profundidade (b) atrito lateral x profundidade. (Zohrab, 1993).

CAPÍTULO 4

EQUIPAMENTOS PARA MONITORAÇÃO DO SPT

4.1 SPT ANALYZER

O *SPT Analyzer* mede, entre outras grandezas, a energia transferida para composições de hastes do SPT. Ele é composto de unidade de aquisição de dados, segmentos de hastes instrumentadas e cabos de conexão entre os segmentos de hastes e a unidade de aquisição de dados, ver Figura 4.1. Esse equipamento é produzido pela empresa *Pile Dynamics Inc (PDI)*, tendo sido adquirido pela Fundação Universitária José Bonifácio, inicialmente, para a tese de doutorado de Cavalcante (2002).

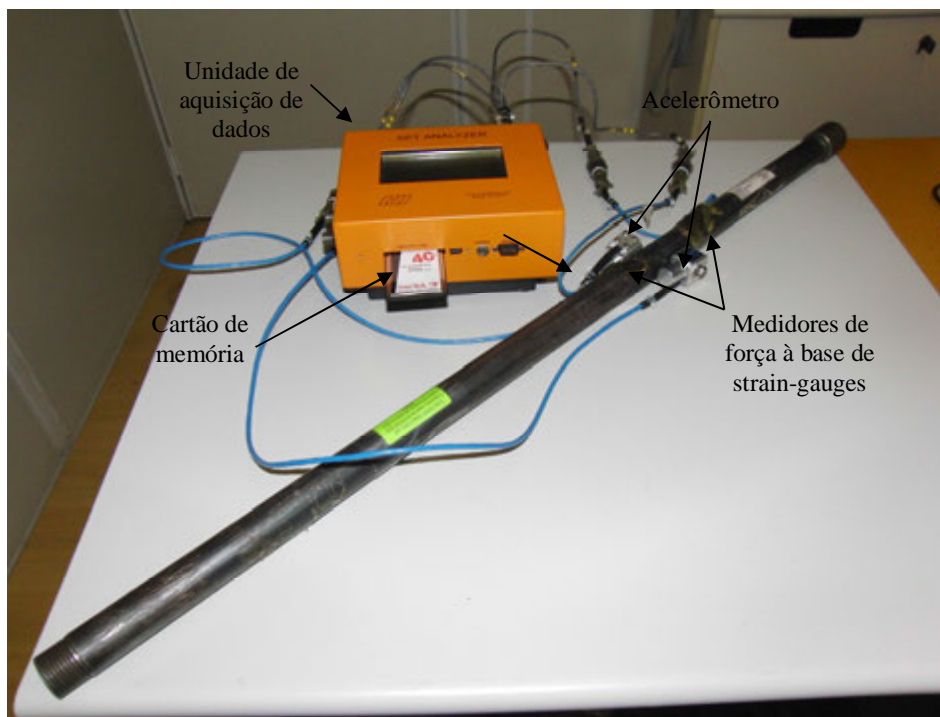


Figura 4.1 – SPT Analyzer.

A unidade de aquisição de dados, que tem tela sensível ao toque, possui dois canais para sinal de força e dois canais para sinal de aceleração, sendo a sua frequência máxima de amostragem de 20 kHz. O intervalo de tempo máximo de cada leitura é de 102,4 ms. Essa unidade é alimentada por uma bateria de 12V, que pode ser recarregada numa

tomada 100-250 V AC. Os dados coletados são armazenados automaticamente num cartão de memória do tipo *PCMCIA* com capacidade de 40 MB.

Dois segmentos de hastes com comprimento de 1 m foram instrumentados, cada um com um par de medidores de força e um par de acelerômetros. Uma dessas hastes foi impermeabilizada especialmente para a presente pesquisa, a fim de permitir o monitoramento abaixo do nível d'água.

Para o monitoramento de força nas hastes utilizam-se strain-gauges (medidores de deformação) elétricos, formados em pontes de *Wheatstone*, que foram colados diretamente nas hastes (ver Figura 4.1). Esses sensores resistem a acelerações de até 5000 g. As constantes de calibração dos sensores de força são apresentadas na Tabela 4.1.

Para o monitoramento de aceleração nas hastes são utilizados acelerômetros piezoelétricos com resolução de 0,02 g, podendo registrar acelerações de até 5000 g. Os acelerômetros são aparafusados nas hastes em posições diametralmente opostas e entre os dois sensores de força (ver Figura 4.1). A unidade de aquisição de dados transforma os registros de aceleração, por integração no tempo, em velocidade. As constantes de calibração desses acelerômetros são apresentadas na Tabela 4.1

Tabela 4.1 – Constantes de calibração de sensores e hastes do SPT Analyzer (informadas pela PDI).

Haste	Área da haste (cm²)	Módulo de Young da haste (GPa)	Sensor	Constante de calibração
65BR	4,2	207	Acelerômetro 52205	1180 g/V
			Acelerômetro 55207	1145 g/V
			Sensor de força 65BR-1	221,49 me/V
			Sensor de força 65BR-2	220,81 me/V
66BR	4,3	207	Acelerômetro 52202	1150 g/V
			Acelerômetro 52204	1155 g/V
			Sensor de força 66BR-1	219,36 me/V
			Sensor de força 66BR-2	218,22 me/V

Foram adquiridos para a presente pesquisa cabos de conexão impermeabilizados para acelerômetros e sensores de força com comprimento de 50 m, para permitir o monitoramento de ensaios até grandes profundidades.

Ao ligar a unidade de aquisição de dados, o usuário pode escolher entre revisar dados pré-existentes ou coletar novos dados. Caso deseje coletar novos dados, o usuário deverá informar: identificação do projeto, a sondagem, tipo de martelo e nome do operador. Em seguida deverá informar: comprimento das hastes, área da seção instrumentada, profundidade do ensaio e constantes de calibração dos sensores.

O *SPT Analyzer* é capaz de detectar se algum sensor está danificado ou não está ligado corretamente, mostrando a mensagem “FAULT” ao lado do nome do sensor. É possível também que o usuário escolha quais registros de força e velocidade serão utilizados para o cálculo da energia.

Quando o usuário autoriza o início da coleta de dados, os registros de força e velocidade, além da energia calculada, são armazenados automaticamente no cartão de memória tipo *PCMCIA*.

O programa *PDA-W*, que acompanha o equipamento e também é utilizado na análise de ensaios de carregamento dinâmico em estacas, permite alterar as constantes de calibração dos sensores e ativar ou desativar registros, alterando assim o cálculo de energia pelos métodos EF2 e EFV, ver Figura 4.2.



Figura 4.3 – Foto do equipamento HPA.

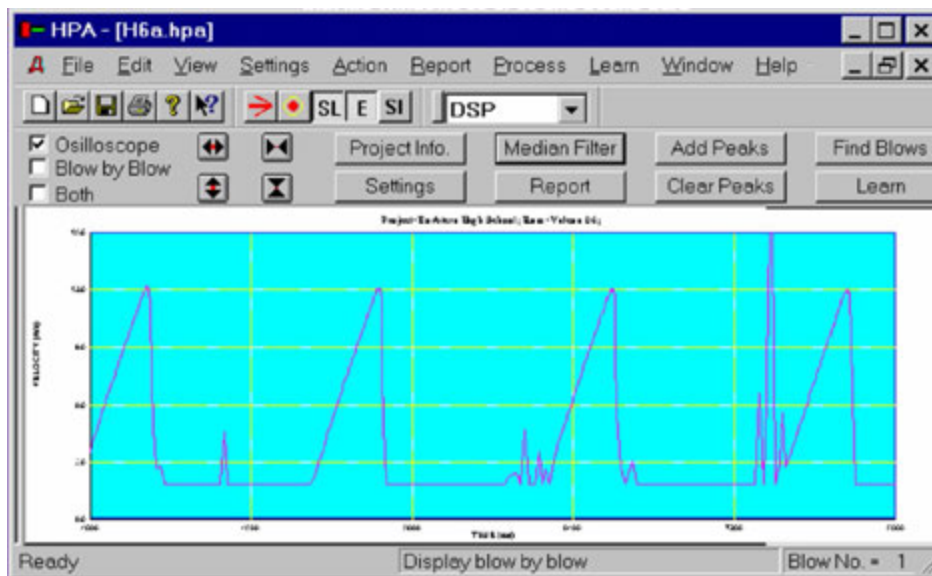


Figura 4.4 – Tela do programa HPA 2.0.

4.3 CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE

Foi adquirida para a presente pesquisa uma câmera de alta velocidade *Casio EX-FH20*, capaz de gravar imagens com até 1000 quadros por segundo. Essa câmera, que é montada sobre um tripé, é utilizada para determinar a altura de queda do martelo SPT e sua velocidade de impacto.

As imagens produzidas pela câmera são digitalizadas e analisadas quadro a quadro, de modo que é possível identificar com erro máximo de cerca de 2 mm a altura máxima que o martelo é erguido e o momento do impacto entre o martelo e a cabeça de bater. Para auxiliar a determinação da posição do martelo, é colocada uma mira estadimétrica ao lado do conjunto SPT. A Figura 4.5 mostra o sistema utilizado na monitoração de energia em ensaios SPT.



Figura 4.5 – Sistema utilizado na monitoração da energia cinética no SPT.

CAPÍTULO 5

DESENVOLVIMENTO DE UM AMOSTRADOR INSTRUMENTADO

Foi projetado na presente pesquisa um amostrador instrumentado para estudar o fenômeno do embuchamento durante ensaios de penetração (estática e dinâmica). Esse amostrador foi dotado de células de tensão total em seu interior. Para comportar as células de tensão total, que têm forma de disco, sem que a célula ficasse saliente – gerando alterações no estado de tensões –, o amostrador foi projetado com seção quadrada.

A seção transversal do novo amostrador foi projetada de tal maneira que as condições de embuchamento permanecessem o mais possível inalteradas em relação ao amostrador SPT convencional, apesar da mudança de forma.

O embuchamento ocorre quando a resistência lateral da bucha de solo no interior do amostrador é maior que a sua resistência de ponta. Considerando-se que as resistências unitárias lateral e de ponta valem respectivamente R_l e R_p , por ocasião do embuchamento, tem-se:

$$R_l \cdot A_l = R_p \cdot A_p \quad (5.1)$$

Sendo:

R_l = resistência lateral da bucha por unidade de área;

R_p = resistência de ponta da bucha por unidade de área;

A_l = área lateral da bucha;

A_p = área de ponta da bucha.

No caso do amostrador SPT convencional (com seção circular), tem-se:

$$R_l \cdot \pi \cdot d_{\text{int}} \cdot h = R_p \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{int}}^2}{4} \quad (5.2)$$

logo

$$\frac{R_l}{R_p} = \frac{d_{int}}{4h} \quad (5.2a)$$

Sendo d_{int} o diâmetro interno do amostrador e h a altura da bucha no interior do amostrador.

No caso de um amostrador com seção quadrada tem-se:

$$R_l \cdot 4l_{int} \cdot h = R_p \cdot l_{int}^2 \quad (5.3)$$

logo

$$\frac{R_l}{R_p} = \frac{l_{int}}{4h} \quad (5.3a)$$

Sendo l_{int} a largura interna do amostrador.

Para que a relação entre resistência lateral e resistência de ponta da bucha de solo seja a mesma nos amostradores de seção circular e quadrada, é necessário igualar as equações 5.2a e 5.3a. Admitindo que a altura embuchada seja a mesma nos dois amostradores e que a relação R_l/R_p não é influenciada pela sua forma, tem-se:

$$l_{int} = d_{int} \quad (5.4)$$

De acordo com a norma NBR-6484/2001, o diâmetro interno do amostrador SPT convencional é de $34,9 \pm 2$ mm (ver Figura 5.1), assim adotou-se $l_{int} = 34,9$ mm.

Outras dimensões do novo amostrador, como espessura de paredes, comprimento da sapata e do corpo bi-partido e inclinação do bico, foram mantidas iguais às do amostrador convencional.

A cabeça do novo amostrador foi projetada sem a preocupação de reproduzir o amostrador convencional, considerando que sua forma tem pequena importância na penetração dos 45 cm iniciais do amostrador.

A união entre a sapata e o corpo do amostrador e entre a cabeça e o corpo do amostrador foi feita através de parafusos de alta resistência com 8 mm de diâmetro, sendo utilizados 4 em cada ligação. A Figura 5.1 mostra o esquema do amostrador SPT convencional, a Figura 5.2 o projeto do novo amostrador instrumentado e a Figura 5.3 os diversos componentes do novo amostrador.

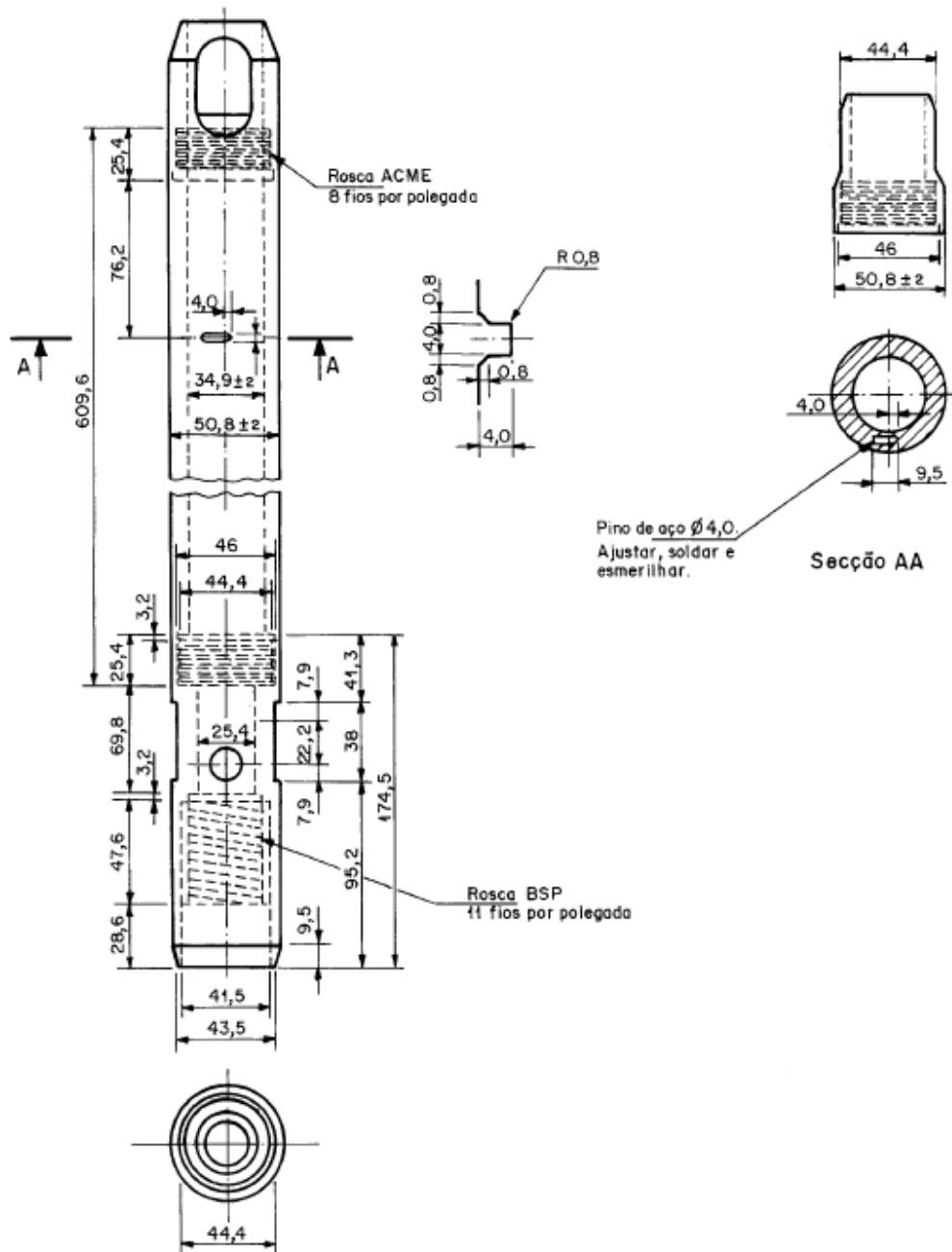


Figura 5.1 – Esquema do amostrador convencional – Dimensões em milímetro (NBR-6484/2001).

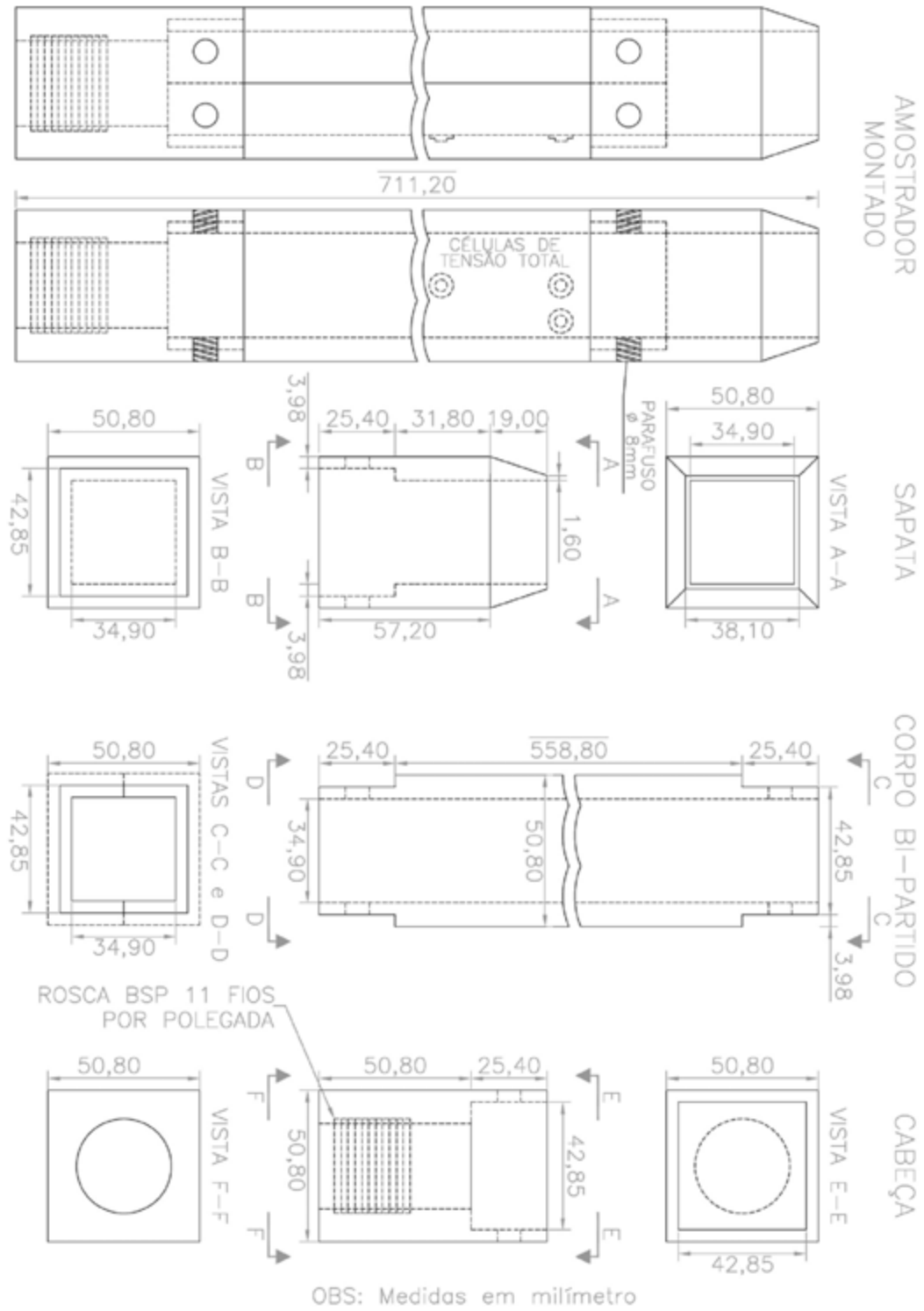


Figura 5.2 – Projeto do novo amostrador instrumentado – Dimensões em milímetro.

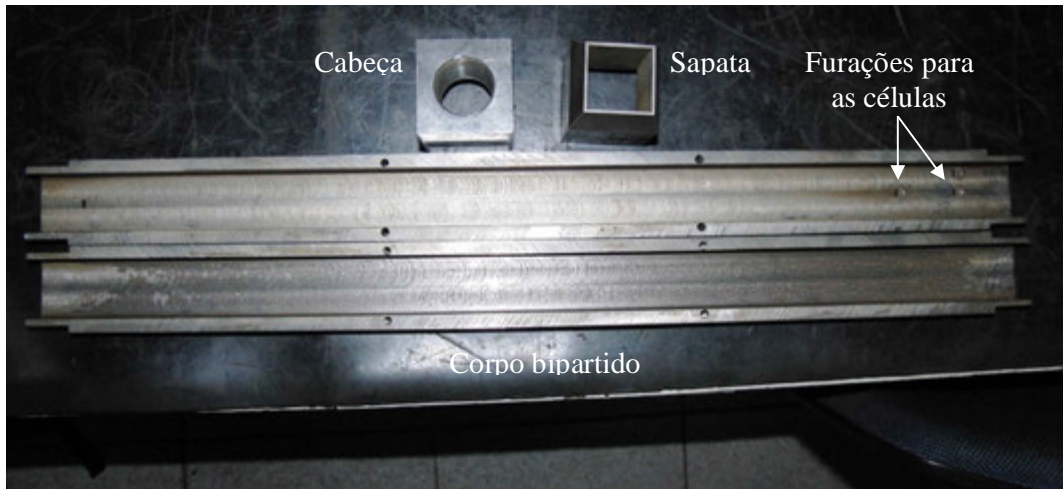


Figura 5.3 – Componentes do novo amostrador instrumentado.

Três células de tensão total modelo PS-5KC da *Kyowa*, com diâmetro de 6 mm, espessura de 0,6 mm e tensão de trabalho de 500 kPa, foram instaladas no interior do corpo do amostrador. Suas posições permitem estudar a distribuição de tensões ao longo das paredes. Essas células foram chamadas de CTT 2, CTT 3 e CTT 4. A Figura 5.4 mostra o detalhe do amostrador após a colagem das células.

Para a instalação das células foram realizadas furações em dois níveis, conforme mostrado nas Figuras 5.2, 5.3 e 5.4, sendo a cola depositada apenas no nível inferior, a fim de evitar colar as laterais da célula, o que comprometeria seu funcionamento.

O cabeamento das células de tensão total passou por um canal feito na parte externa do amostrador, de modo a não afetar as condições de embuchamento. Esse canal posteriormente foi preenchido com resina à base de epóxi.

As células de tensão total foram ligadas a uma fonte elétrica de corrente contínua e a um sistema de aquisição de dados modelo 34970A, da *Agilent*. Assim os sinais de saída podem ser gravados e visualizados em forma de gráficos com o programa *HP BenchLink Data Logger* instalado num computador.

O sinal de saída das células de tensão total (em mV) pode ser transformado em tensão normal através da equação sugerida pela fabricante:

$$\sigma = \frac{V_S}{V_E} \times \frac{500}{C} \text{ kPa} \quad (5.5)$$

Sendo:

σ = tensão normal atuante na célula (kPa);

V_S = tensão elétrica de saída (mV);

V_E = tensão elétrica de entrada (V);

C = constante de calibração (mV/V).

As três células foram calibradas simultaneamente, antes da instalação no amostrador, através da injeção de pressão de ar numa câmara de acrílico. Um manômetro aferido estava ligado à linha de ar comprimido. A Figura 5.5 mostra o aparato utilizado na calibração das células de tensão total. As curvas de calibração das três células são apresentadas no Anexo 2



Figura 5.4 – Célula de tensão total PS-5KC.

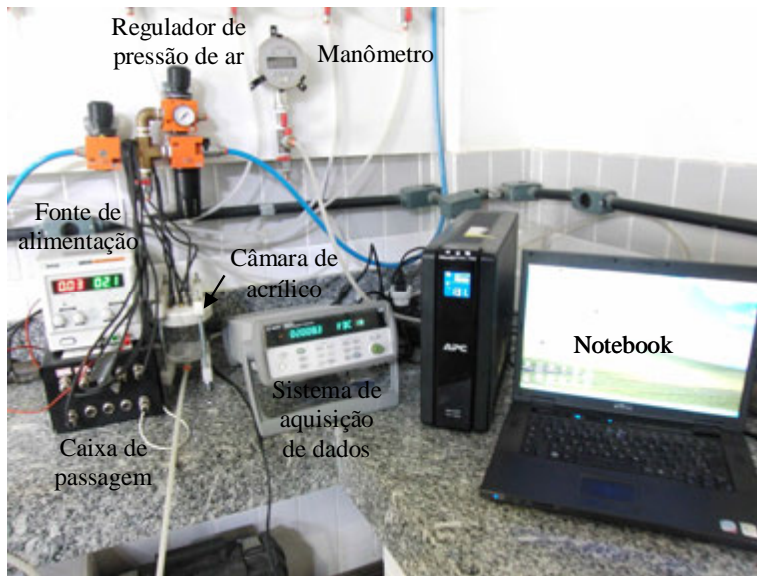


Figura 5.5 – Aparato utilizado para a calibração das células de tensão total.

CAPÍTULO 6

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS EM CAMPO

6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Durante a presente pesquisa foram monitoradas nove sondagens SPT, duas realizadas no Campo Experimental de Sarapuí II (Duque de Caxias/RJ) e sete na área do Porto de Itaguaí (Itaguaí/RJ), com um total de 1064 golpes. Nesses golpes foram medidas altura de queda e velocidade de impacto do martelo SPT, além de energia no topo da composição de hastes. Num número menor de golpes (206), também foi medida energia na base da composição de hastes, logo acima do amostrador. Desse modo, foi possível conhecer as perdas de energia no SPT, nas diversas etapas da sua transmissão, desde a soltura do martelo até a energia atingir o amostrador. Cabe salientar que durante a monitoração de energia evitou-se ao máximo interferir na rotina dos ensaios.

Outro aspecto que recebeu especial atenção foi a catalogação de equipamentos e procedimentos utilizados nos diferentes ensaios, na tentativa de associá-los à perda de energia.

6.2 ENSAIOS NO CAMPO EXPERIMENTAL DE SARAPUÍ II

6.2.1 *Considerações iniciais*

Nessa campanha foram monitoradas duas sondagens SPT realizadas no Campo Experimental de Sarapuí II, que fica localizado às margens da Rodovia Washington Luiz, na área da Estação Rádio da Marinha, município de Duque de Caxias/RJ. Segundo Jannuzzi (2009), o perfil geotécnico da região é formado por uma camada de argila muito mole com espessura típica de 7,5 m a 8,0 m, seguida de camadas de menor espessura de argila siltosa, areia argilosa, silte argiloso e novamente argilas. O nível d'água é praticamente coincidente com o nível do terreno. A Figura 6.1 mostra o perfil geotécnico da região.

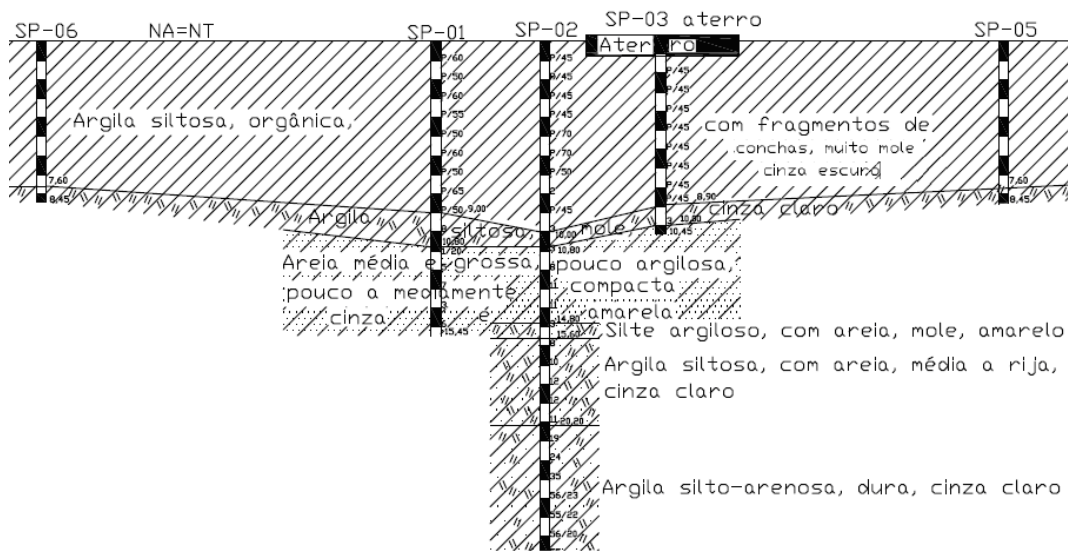


Figura 6.1 – Perfil geotécnico do Campo Experimental de Sarapuú II (adaptado de Jannuzzi, 2009).

6.2.2 Características dos ensaios

A mesma equipe, que era composta por um sondador e três auxiliares, realizou as duas sondagens. Em função disso, os equipamentos e as práticas adotados eram semelhantes. A seguir serão descritos os aspectos mais relevantes.

Foi registrado o uso de uma cabeça de bater com massa de 977 g nas duas sondagens (ver Figura 6.2). Cabe lembrar que a NBR-6484/2001 estabelece que a massa da cabeça de bater esteja entre 3,5 kg e 4,5 kg. Diversos estudos mostram que a redução da massa da cabeça de bater aumenta a energia transmitida à composição de hastes (e.g., Skempton, 1986, Décourt, 1989, Belincanta, 1998 e Belincanta e Cintra, 1998). Esse tema é também estudado na presente pesquisa. Vale salientar que cabeças de bater com massas da ordem de 1,0 a 1,5 kg são frequentemente usadas no Brasil, segundo experiência do autor.

O sistema de levantamento e soltura era manual e acionado por uma corda de sisal. O martelo era dotado de haste guia e coxim de madeira. Não foi realizada medição de massa do martelo. Entretanto, foi informado pela empresa de sondagem que a verificação de massa do martelo é realizada periodicamente. O controle da altura de queda era visual, realizado a partir de marcação na haste guia.

Percebeu-se, em todos os ensaios realizados, excentricidade do martelo em relação à composição de hastes, com o martelo descendo ligeiramente inclinado (ver Figura 6.3). Acredita-se que isso possa ter aumentado as perdas de energia durante a queda do martelo, em função do maior atrito da haste guia com as paredes internas das hastes.

As hastes utilizadas nos ensaios possuíam diâmetro externo de 33 mm, o que é comum nos ensaios realizados no Brasil, e está de acordo com o prescrito na NBR-6484/2001. Não foi verificado o peso das hastes. Foram utilizadas hastes com comprimentos de 1, 2 e 3 m. Cabe lembrar que a NBR-6484/2001 só prevê o uso de hastes com comprimentos de 1 e 2 m.



Figura 6.2 – Cabeça de bater utilizada nos ensaios em Sarapuú II.

Na primeira sondagem, chamada nesse trabalho de Sondagem 1, foram monitorados 141 golpes, com medição de energia no topo e na base da composição de hastes. O comprimento da composição de hastes (incluindo o amostrador) variou de 10,80 a 22,80 m (profundidades nominais de ensaio variando de 9 a 21 m). Para isso, foram utilizadas duas hastes instrumentadas (ver item 4.1), sendo que a posicionada na parte de baixo da composição era impermeabilizada. Cada haste contava apenas com um medidor de deformação e um acelerômetro, já que o SPT Analyzer admite no máximo sinal de quatro instrumentos simultaneamente. Cabe salientar que Cavalcante et. al. (2003) mostraram que quando um par de acelerômetros ou de medidores de deformação é utilizado na mesma haste, os sinais medidos são essencialmente os mesmos.

Na segunda sondagem, chamada nesse trabalho de Sondagem 2, foram monitorados 232 golpes, com medição de energia apenas no topo da composição de hastes. O comprimento da composição de hastes (incluindo o amostrador) variou de 11,70 a 25,70 m (profundidades nominais variando de 10 a 23 m). Nesse caso, a haste contava com dois medidores de deformação e dois acelerômetros, o que permitiu confirmar que os sinais dos acelerômetros e medidores de deformação na mesma haste eram essencialmente os mesmos.

Com o objetivo de determinar a altura de queda do martelo SPT e sua velocidade de impacto, nas duas sondagens foram realizadas filmagens com uma câmera filmadora de alta velocidade (ver item 4.3), que pode armazenar imagens com até 1000 quadros por segundo. Para evitar perda significativa de qualidade na imagem, as filmagens foram realizadas com uma taxa de 210 quadros por segundo, o que resulta numa resolução máxima de 480 x 360 pixels. A câmera foi fixada num tripé nas proximidades do ensaio. Para auxiliar a determinação da posição do martelo, foi posicionada uma mira stadimétrica ao lado do equipamento de sondagem. A Figura 6.3 mostra a montagem do ensaio.



Figura 6.3 – Equipamento utilizado nos ensaios em Sarapuí II.

Também se tentou utilizar o equipamento HPA (ver item 4.2) para medir a velocidade de impacto do martelo, e assim comparar as velocidades medidas com as obtidas pelo processo descrito no parágrafo anterior. Entretanto, o HPA apresentou mau

funcionamento, sendo enviado para conserto na sede da PDI, nos Estados Unidos, o que impossibilitou outras tentativas de uso do equipamento nessa pesquisa.

Na Sondagem 1 foi utilizado revestimento com diâmetro de 100 mm, o que permitiu a passagem da haste instrumentada para monitoração de energia na base da composição. Já na Sondagem 2 foi utilizado revestimento com diâmetro de 75 mm. Nas duas sondagens utilizou-se lama bentonítica para estabilizar o furo, além de revestimento,

6.2.3 Apresentação dos resultados

Os registros da câmera de alta velocidade foram transferidos para um computador, separados quadro a quadro (como fotos) e analisados no programa *AutoCAD*, de modo que fosse possível definir com erro mínimo a altura do martelo durante a queda em cada golpe. A mira estadimétrica serviu de referência.

A altura medida no quadro imediatamente anterior à soltura do martelo é definida como altura de queda. A velocidade de impacto do martelo foi obtida analisando a sua altura quadro a quadro, desde o momento da soltura até a iminência do impacto (último quadro antes do martelo ter contato com a cabeça de bater). Assim foi possível ajustar uma função que descrevesse a relação entre a altura do martelo e o tempo, conforme mostrado na Figura 6.4.

A derivada da função altura do martelo em função do tempo, quando a altura tende a zero, é igual à velocidade de impacto.

Foram testados em diversos golpes funções polinomiais de graus 2 e 3, que produziram bons ajustes. Verificou-se também que a variação de velocidade adotando-se uma função ou outra não era significativa. Dessa forma, optou-se por realizar os ajustes utilizando funções polinomiais de grau 2, o que facilitava os cálculos.

A função aceleração do martelo x tempo é a segunda derivada da função altura x tempo. Utilizar uma função polinomial de grau 2 no ajuste da função altura x tempo implica considerar que a aceleração do martelo é constante ao longo da queda. A aceleração do martelo durante a queda é influenciada pela força gravitacional (que é constante no problema analisado) e por forças de atrito. Desse modo, a resultante das forças de atrito é considerada constante durante a queda.

Considerando-se que funções polinomiais de grau 2 ou 3 não produziram mudanças significativas no ajuste, é razoável supor que a função de atrito x tempo nos casos analisados seja aproximadamente constante.

A câmera de alta velocidade também permite conhecer o deslocamento do topo da composição de hastes após o choque com o martelo, informação que pode ser comparada com os deslocamentos obtidos a partir da instrumentação nas hastes. Em função do grande trabalho que envolve essa tarefa, essa análise foi realizada apenas em ensaios em câmara de calibração.

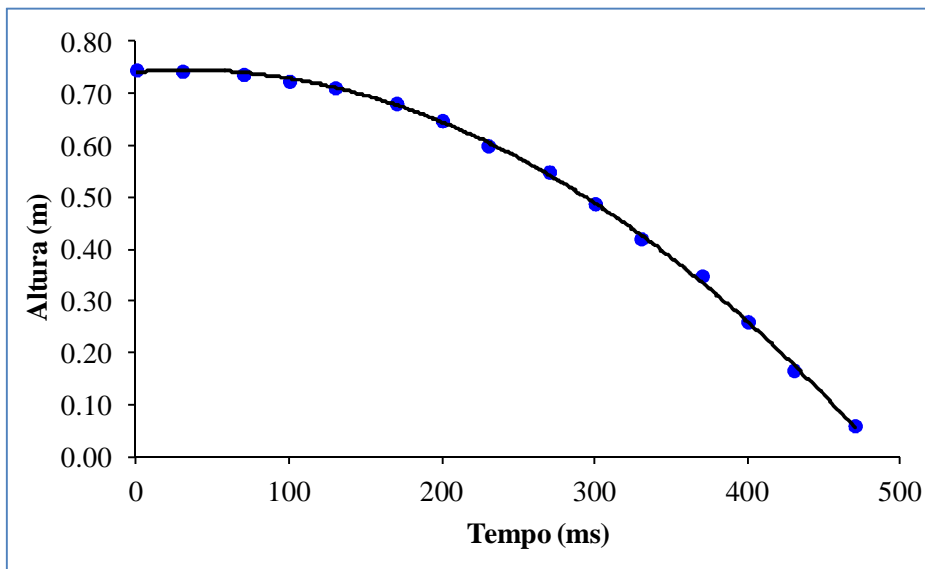


Figura 6.4 – Exemplo de altura de queda do martelo em função do tempo (obtida de filmagens).

Os valores médios de altura de queda (h_q), velocidade de impacto (v_i), energia potencial de soltura do martelo (E_p) e energia cinética de impacto (E_c) em cada sequência de golpes das Sondagens 1 e 2 são apresentados nas Tabelas 6.1 e 6.2, respectivamente. As energias potencial e cinética foram calculadas por:

$$E_p = m.g.h_q \quad (6.1)$$

$$E_c = 0,5.m.v_i^2 \quad (6.2)$$

Sendo:

m = massa do martelo, admitida 65 kg;

g = aceleração da gravidade, admitida 9,81 m/s².

Nas três primeiras sequências de golpes da Sondagem 2 não foram realizadas filmagens, não sendo, portanto, possível a determinação da altura de queda e da velocidade de impacto para esse grupo de golpes. Além disso, num número significativo de golpes das Sondagens 1 e 2 (152) não foi possível determinar a velocidade de impacto em função de problemas no vídeo. Num número menor de golpes (102) problemas no vídeo impediram a determinação da altura de queda nas duas sondagens.

Por erro na operação do SPT Analyzer, não foi monitorada a energia nas hastes em 6 golpes pertencentes às sequências 6 e 9 da Sondagem 2. Foram medidas apenas altura de queda e velocidade de impacto desses golpes.

As Figuras 6.5 e 6.6 mostram a distribuição de frequências das alturas de queda do martelo SPT nas Sondagens 1 e 2, respectivamente. Já as Figuras 6.7 e 6.8 mostram os percentuais de golpes aplicados em diferentes faixas de alturas nas Sondagens 1 e 2, respectivamente.

As Figuras 6.9, 6.10a e 6.10b mostram a altura de queda golpe a golpe em cada sequência das Sondagens 1 e 2. Não foi possível medir a altura de queda em alguns golpes por problemas no vídeo.

Nas Tabelas 6.1 e 6.2 também são apresentados, para cada sequência de golpes: o número de golpes para a penetração de 45 cm do amostrador (N), a frequência média de aplicação desses golpes, o turno de trabalho (definido adiante) em que esses golpes foram aplicados, a profundidade nominal do ensaio e o comprimento da composição de hastes.

A frequência média de aplicação dos golpes foi calculada levando-se em conta o tempo desde o início do levantamento do martelo, no primeiro golpe de cada sequência, até o final do impacto do martelo no último golpe.

Na sequência 5 da Sondagem 1 não foi calculada a frequência dos golpes, porque houve intervalos de tempo muito acima do normal entre os golpes. Nas sequências 1, 2 e 3 da Sondagem 2 não foram realizadas filmagens, o que também impediu a estimativa de frequência de golpes. A Figura 6.11 mostra a variação da altura de queda em função da frequência de golpes.

A fim de avaliar a variação da altura de queda ao longo do dia, o período de trabalho das equipes de sondagem foi dividido em quatro turnos, chamados de Turno 1, entre 8 e 10 horas; Turno 2, entre 10 e 12 horas; Turno 3, entre 14 e 16 horas; e Turno quatro, entre 16 e 18 horas. A Figura 6.12 mostra a variação da altura de queda ao longo do dia.

As energias no topo da composição de hastes (E_i) e na base da composição de hastes (E_s) foram calculadas através da integral do produto de força (F) pela velocidade (v) em função do tempo (t), método EFV, equação 2.12. Os valores de força e velocidade foram medidos através dos strain-gauges e acelerômetros instalados nas hastes. As Tabelas 6.1 e 6.2 mostram os valores de energia medidos nas hastes.

$$E = \int F \cdot v \cdot dt \quad (2.12)$$

As Figuras 6.13 e 6.14 mostram sinais típicos de força e velocidade medidos no topo e na base da composição de hastes, respectivamente. As Figuras 6.15 e 6.16 mostram gráficos típicos de energia medida no topo e base da composição de hastes.

A Figura 6.17 mostra a energia medida no topo da composição de hastes (E_i), normalizada pela energia potencial real (E_p), em função do comprimento de hastes, para as Sondagens 1 e 2. Já a Figura 6.18 mostra a variação do fator e_4 em função do comprimento das hastes na Sondagem 1. Nas duas Figuras os dados das sequências 2, 5 e 6 da Sondagem 1 foram omitidos, conforme será explicado no item 6.2.4.

Tabela 6.1 – Energias medidas nos ensaios da Sondagem 1.

Sequência	N ¹	Frequência (Golpes/min)	Turno ²	Prof. ³ (m)	L ⁴ (m)	h _q ⁵ (m)		v _i ⁸ (m/s)		E _p ⁹ (J)		E _c ¹⁰ (J)		E _i ¹¹ (J)		E _s ¹² (J)		E _p /E ^{*13}	E _c /E ^{* (e₁)}	E _i /E [*]	E _s /E [*]	E _c /E _p (e ₁ [*])	E _i /E _p	E _s /E _p	E _i /E _c (e ₂)	E _s /E _i (e ₄)
						M ⁶	DP ⁷	M	DP	M	DP	M	DP	M	DP	M	DP									
1	5	32,1	4	9	10,80	0,87	0,07	3,83	0,16	554,0	47,5	478,2	40,5	429,6	63,4	267,3	75,2	1,16	1,00	0,90	0,56	0,86	0,78	0,48	0,90	0,62
2	2	31,3	2	10	11,79	0,71	0,07	3,53	-	451,9	41,5	405,7	-	366,7	65,2	81,6	30,4	0,94	0,85	0,77	0,17	0,90	0,81	0,18	0,90	0,22
3	8	22,8	2	11	12,80	0,77	0,06	3,61	0,08	492,8	35,9	423,9	18,6	382,1	27,1	263,3	36,0	1,03	0,89	0,80	0,55	0,86	0,78	0,53	0,90	0,69
4	15	29,0	3	12	13,80	0,87	0,06	4,02	0,15	553,4	37,8	525,8	40,0	493,5	34,3	370,7	33,3	1,16	1,10	1,03	0,78	0,95	0,89	0,67	0,94	0,75
5	3	-	3	13	14,81	0,69	0,05	3,41	0,27	437,4	32,8	380,2	60,7	328,6	41,8	83,7	9,7	0,91	0,80	0,69	0,17	0,87	0,75	0,19	0,86	0,25
6	4	39,7	3	15	16,83	0,67	0,03	3,38	0,03	429,1	20,0	371,6	5,9	318,1	22,7	70,7	10,9	0,90	0,78	0,67	0,15	0,87	0,74	0,16	0,86	0,22
7	18	27,2	2	19	20,68	0,69	0,03	3,67	0,09	441,1	18,4	436,9	21,7	411,4	18,4	326,6	27,1	0,92	0,91	0,86	0,68	0,99	0,93	0,74	0,94	0,79
8	19	24,0	3	20	21,76	0,83	0,06	3,75	0,14	529,4	39,0	458,0	33,5	431,5	18,1	367,0	27,7	1,11	0,96	0,90	0,77	0,87	0,82	0,69	0,94	0,85
9	26	26,1	4	21	22,77	0,86	0,08	3,93	0,18	547,3	47,9	502,9	46,1	447,1	35,4	392,4	27,3	1,14	1,05	0,93	0,82	0,92	0,82	0,72	0,89	0,88
10	41	19,4	4	22	23,80	0,78	0,05	3,68	0,11	497,8	29,1	441,3	25,5	409,6	22,6	377,5	45,7	1,04	0,92	0,86	0,79	0,89	0,82	0,76	0,93	0,92

¹N = número de golpes contabilizados pelo SPT Analyzer para a penetração de 45 cm do amostrador;

²Turno = turno do dia: Turno 1 entre 8 e 10 horas, Turno 2 entre 10 e 12 horas, Turno 3 entre 14 e 16 horas, Turno 4 entre 16 e 18 horas;

³Prof. = profundidade nominal do ensaio SPT (m);

⁴L = comprimento da composição de hastes, incluindo o comprimento do amostrador (m);

⁵h_q = altura de queda do martelo SPT

⁶M = média;

⁷DP = desvio padrão;

⁸v_i = velocidade de impacto do martelo SPT;

⁹E_p = energia potencial real do martelo SPT no momento da soltura;

¹⁰E_c = energia cinética do martelo SPT na iminência do impacto;

¹¹E_i = energia medida no topo da composição de hastes;

¹²E_s = energia medida na base da composição de hastes;

$^{13}E^*$ = energia potencial teórica do martelo SPT do sistema brasileiro (478,2 J).

Tabela 6.2 – Energias medidas nos ensaios da Sondagem 2.

Sequência	N ¹	Frequência (Golpes/min)	Turno ²	Prof. ³ (m)	L ⁴ (m)	h _q ⁵ (m)		v _i ⁸ (m/s)		E _p ⁹ (J)		E _c ¹⁰ (J)		E _i ¹¹ (J)		E _p /E ^{*12}	E _c /E [*] (e ₁)	E _i /E [*]	E _c /E _p (e ₁ [*])	E _i /E _p	E _i /E _c (e ₂)
						M ⁶	DP ⁷	M	DP	M	DP	M	DP	M	DP						
1	7	-	-	10	11,70	-	-	-	-	-	-	-	-	451,7	29,7	-	-	0,94	-	-	-
2	8	-	-	11	12,70	-	-	-	-	-	-	-	-	449,3	34,2	-	-	0,94	-	-	-
3	5	-	-	12	14,70	-	-	-	-	-	-	-	-	472,2	42,7	-	-	0,99	-	-	-
4	5	27,1	3	13	15,70	0,75	0,04	3,69	0,12	477,4	28,2	442,5	29,5	408,1	15,1	1,00	0,93	0,85	0,93	0,85	0,92
5	11	26,6	3	14	16,70	0,78	0,06	3,78	0,16	497,9	41,1	466,2	39,2	463,9	31,2	1,04	0,97	0,97	0,94	0,93	0,99
6	9	28,6	4	15	17,70	0,85	0,13	3,92	0,27	541,2	80,8	501,8	68,0	551,4	15,0	1,13	1,05	1,15	0,93	-	-
7	7	33,3	4	16	18,70	0,74	0,05	3,71	0,12	471,2	32,3	448,2	28,1	427,2	19,6	0,99	0,94	0,89	0,95	0,91	0,95
8	15	29,8	1	17	19,70	0,78	0,06	3,78	0,16	496,5	39,3	465,1	38,8	445,5	41,7	1,04	0,97	0,93	0,94	0,90	0,96
9	5	25,7	2	18	20,70	0,74	0,01	3,64	0,08	470,4	8,8	430,3	18,2	481,8	44,9	0,98	0,90	1,01	0,91	-	-
10	16	32,9	2	19	21,70	0,80	0,06	3,86	0,14	512,4	39,3	484,9	35,5	465,9	28,4	1,07	1,01	0,97	0,95	0,91	0,96
11	25	28,3	2	20	22,70	0,87	0,06	3,98	0,12	553,0	36,5	516,2	32,1	482,2	35,6	1,16	1,08	1,01	0,93	0,87	0,93
12	46	27,6	2	21	23,70	0,75	0,07	3,70	0,18	475,8	41,7	446,5	43,3	445,6	42,2	1,00	0,93	0,93	0,94	0,94	1,00
13	51	24,0	3	22	24,70	0,72	0,04	3,67	26,68	457,8	22,7	438,9	26,7	441,0	18,1	0,96	0,92	0,92	0,96	0,96	1,00
14	28	20,5	4	23	25,70	0,69	0,04	3,57	0,09	440,8	22,8	414,3	21,4	403,5	26,8	0,92	0,87	0,84	0,94	0,92	0,97

¹N = número de golpes contabilizados pelo SPT Analyzer para a penetração de 45 cm do amostrador;

²Turno = turno do dia: Turno 1 entre 8 e 10 horas, Turno 2 entre 10 e 12 horas, Turno 3 entre 14 e 16 horas, Turno 4 entre 16 e 18 horas;

³Prof. = profundidade nominal do ensaio SPT (m);

⁴L = comprimento da composição de hastes, incluindo o comprimento do amostrador (m);

⁵h_q = altura de queda do martelo SPT

⁶M = média;

⁷DP = desvio padrão;

⁸v_i = velocidade de impacto do martelo SPT;

- ⁹E_p = energia potencial real do martelo SPT no momento da soltura;
¹⁰E_c = energia cinética do martelo SPT na iminência do impacto;
¹¹E_i = energia medida no topo da composição de hastes;
¹²E* = energia potencial teórica do martelo SPT do sistema brasileiro (478,2 J).

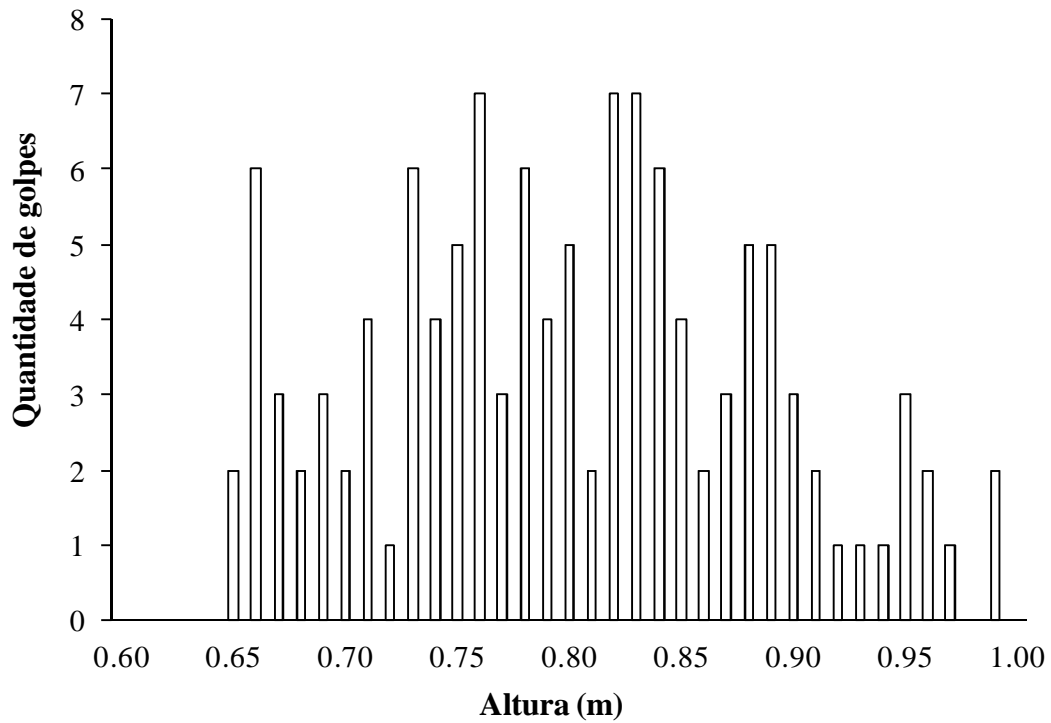


Figura 6.5 – Distribuição de frequências de altura de queda da Sondagem 1.

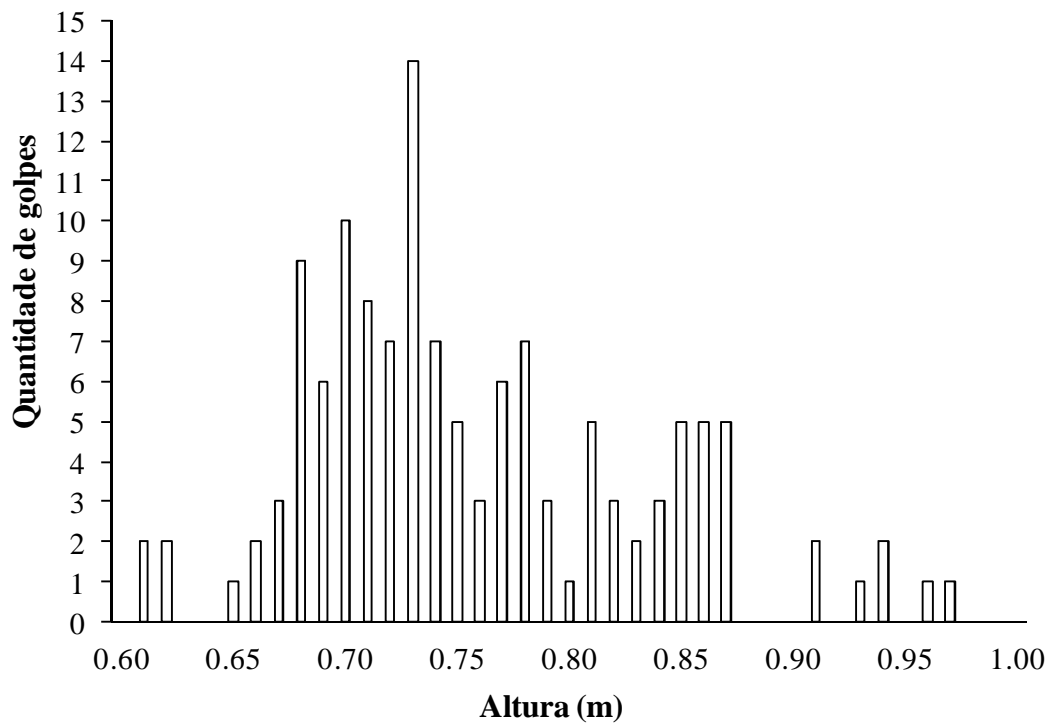


Figura 6.6 – Distribuição de frequências de altura de queda da Sondagem 2.

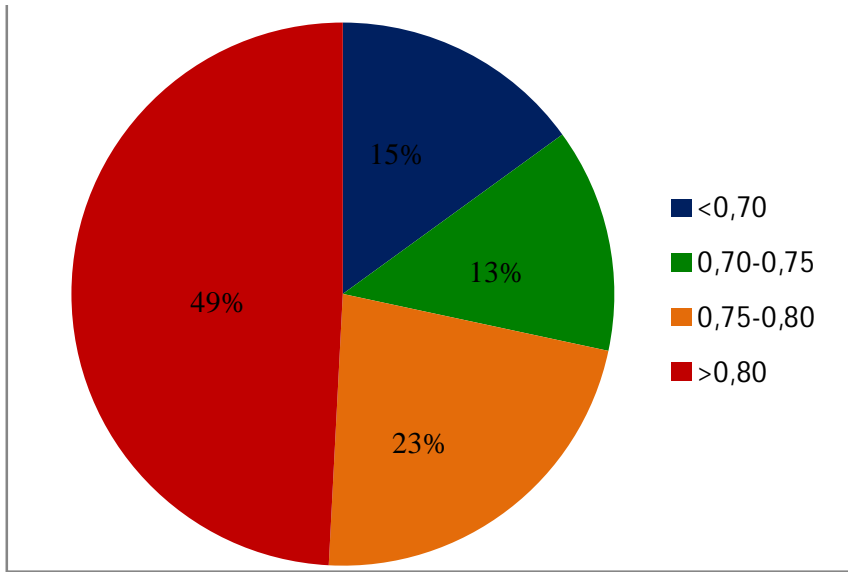


Figura 6.7 – Percentuais de golpes aplicados em diferentes faixas de altura na Sondagem 1.

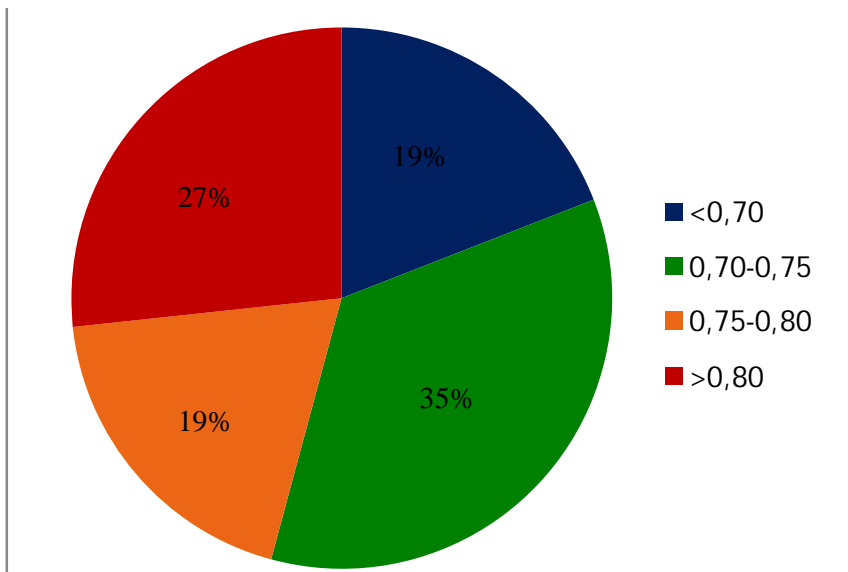


Figura 6.8 – Percentuais de golpes aplicados em diferentes faixas de altura na Sondagem 2.

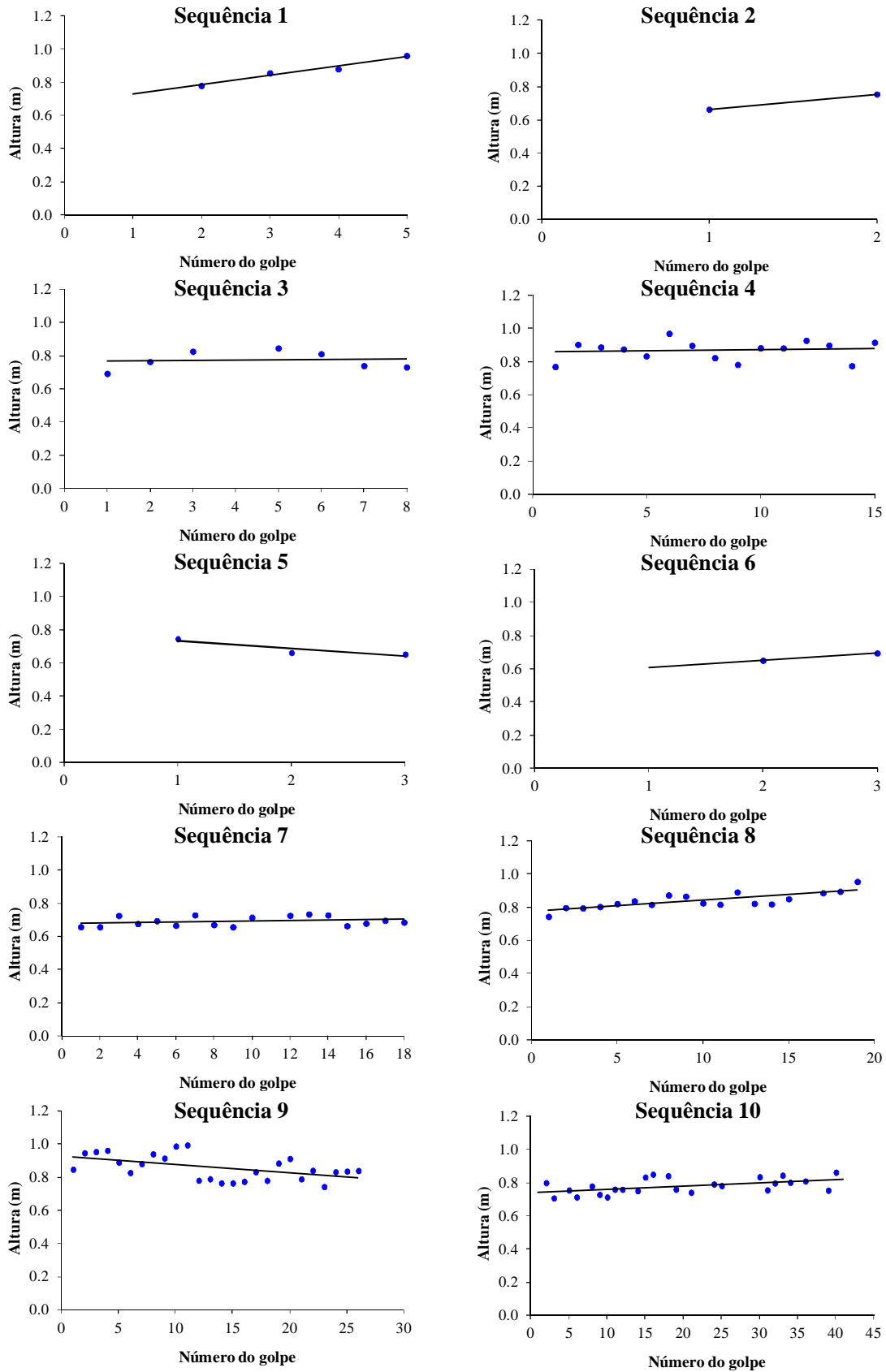


Figura 6.9 – Alturas de queda medidas na Sondagem 1.

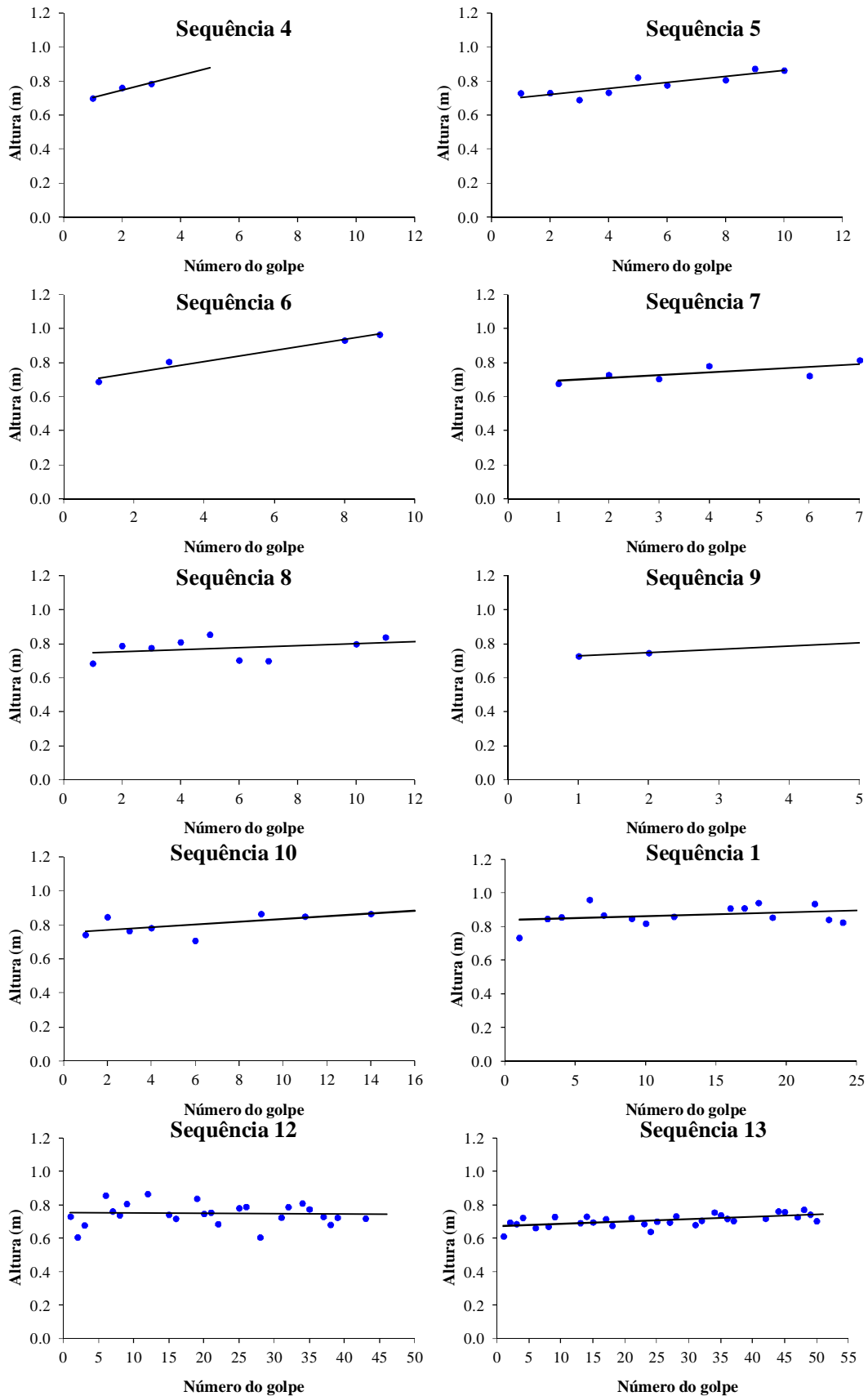


Figura 6.10a – Alturas de queda medidas na Sondagem 2 (sequências de 4 a 13).

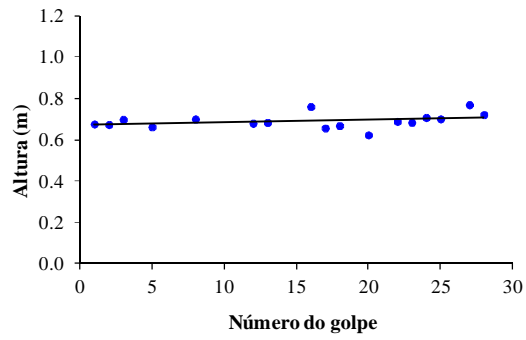


Figura 6.10b – Alturas de queda medidas na Sondagem 2 (sequência 14).

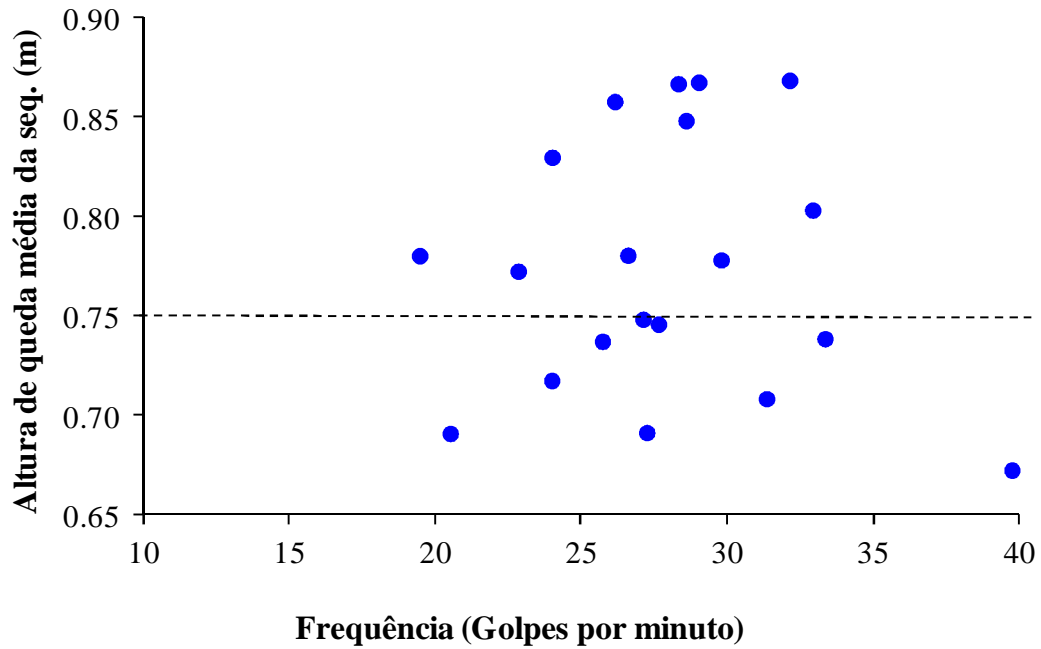


Figura 6.11 – Alturas de queda em função da frequência de golpes por minuto.

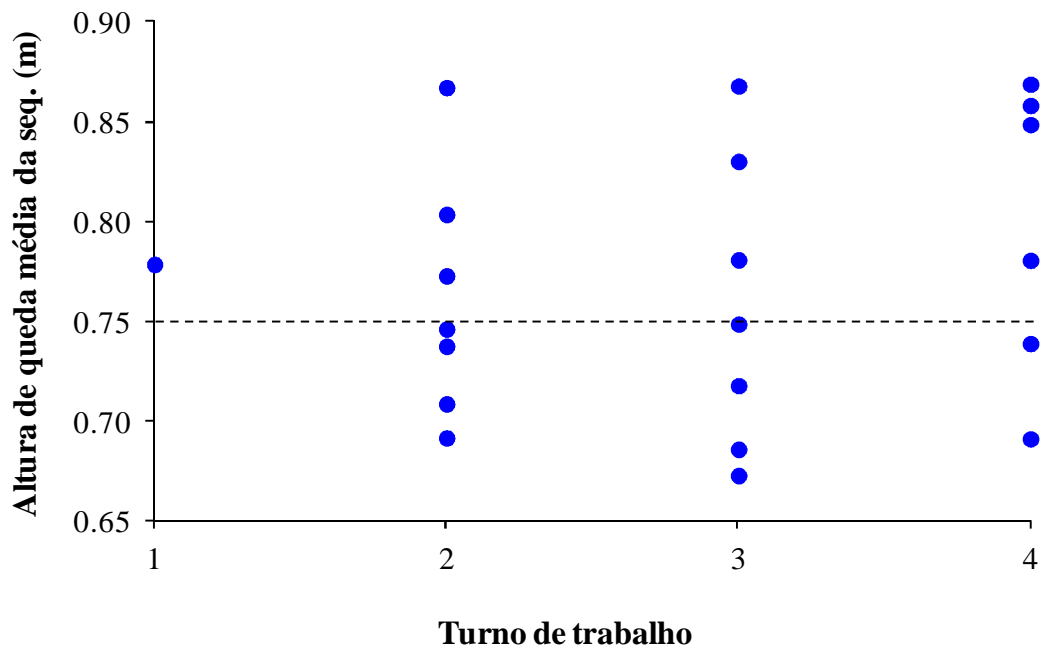


Figura 6.12 – Alturas de queda em função do turno (Turno 1 – das 8 às 10 horas; Turno 2 – das 10 às 12 horas; Turno 3 – das 14 às 16 horas; Turno 4 – das 16 às 18 horas).

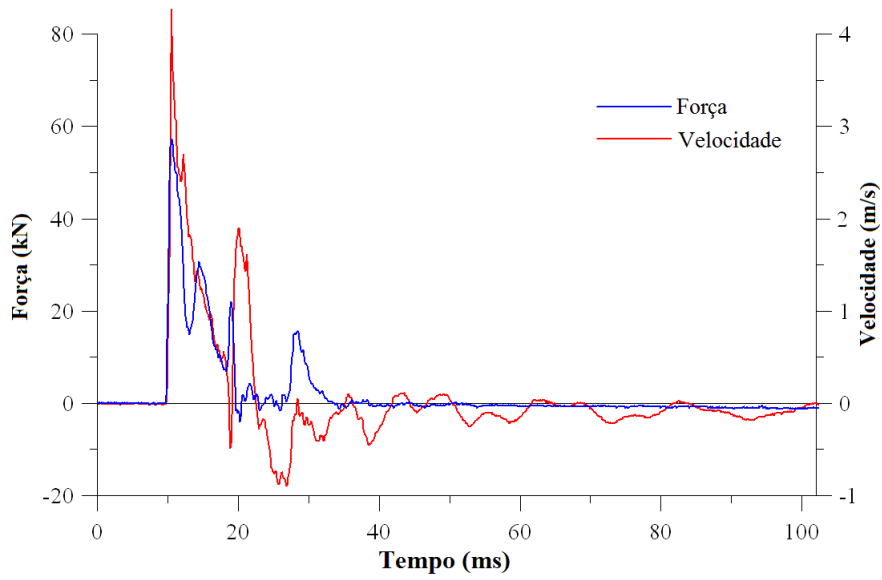


Figura 6.13 – Sinais típicos de força e velocidade medidos no topo da composição de hastes (Golpe 21 da Sequência 9, Sondagem 1).

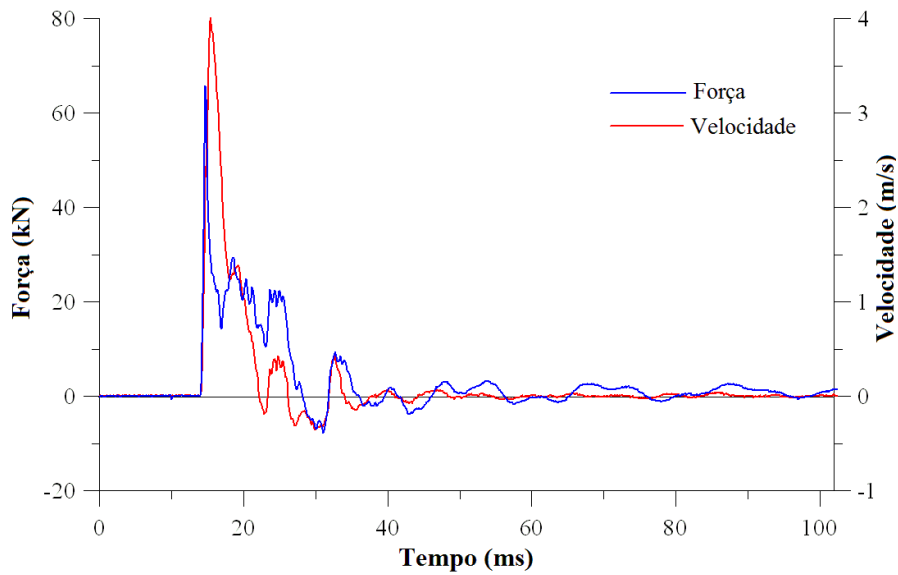


Figura 6.14 – Sinais típicos de força e velocidade medidos na base da composição de hastes (Golpe 21 da Sequência 9, Sondagem 1).

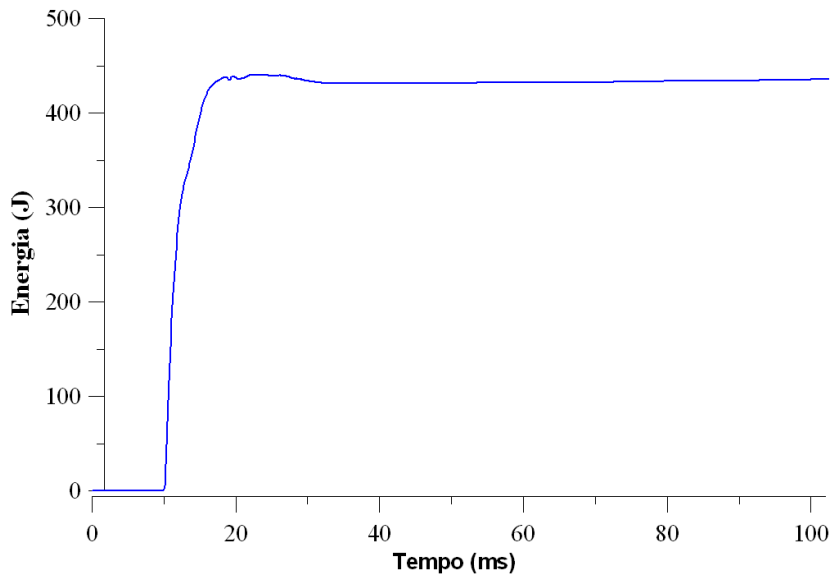


Figura 6.15 – Gráfico típico de energia medida no topo da composição de hastes (Golpe 21 da Sequência 9, Sondagem 1).

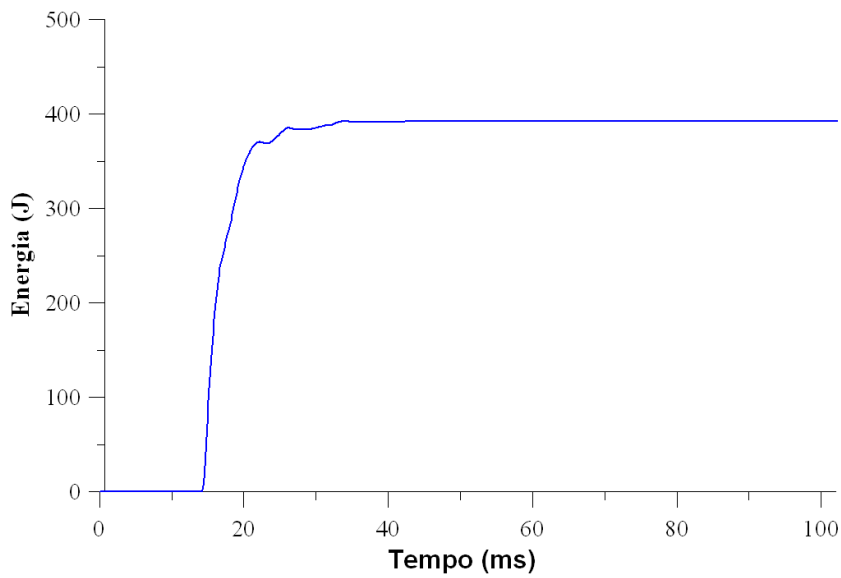


Figura 6.16 – Gráfico típico de energia medida na base da composição de hastes (Golpe 21 da Sequência 9, Sondagem 1).

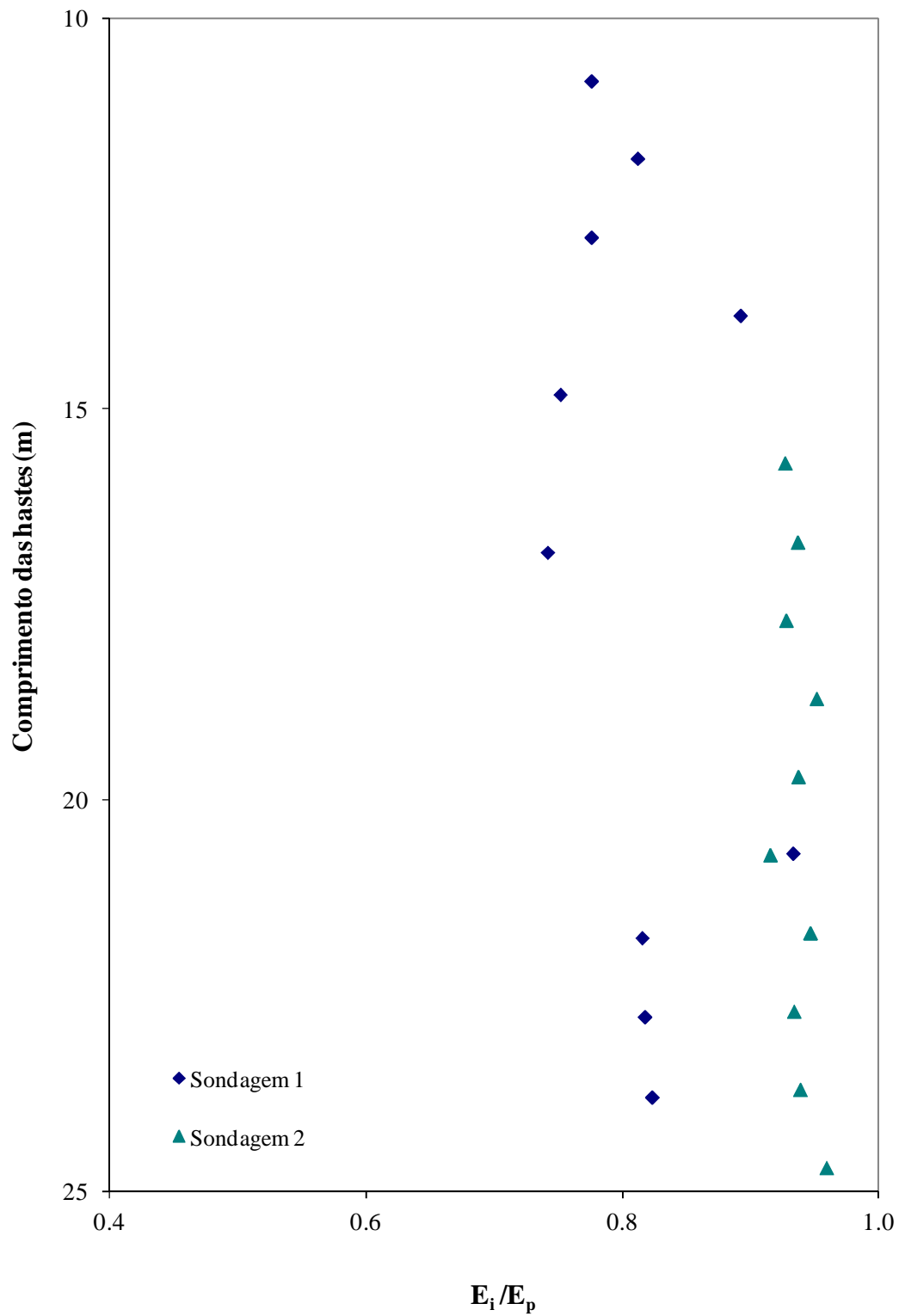


Figura 6.17 – Energia no topo das hastes normalizada pela energia potencial real (E_i/E_p), em função do comprimento de hastes.

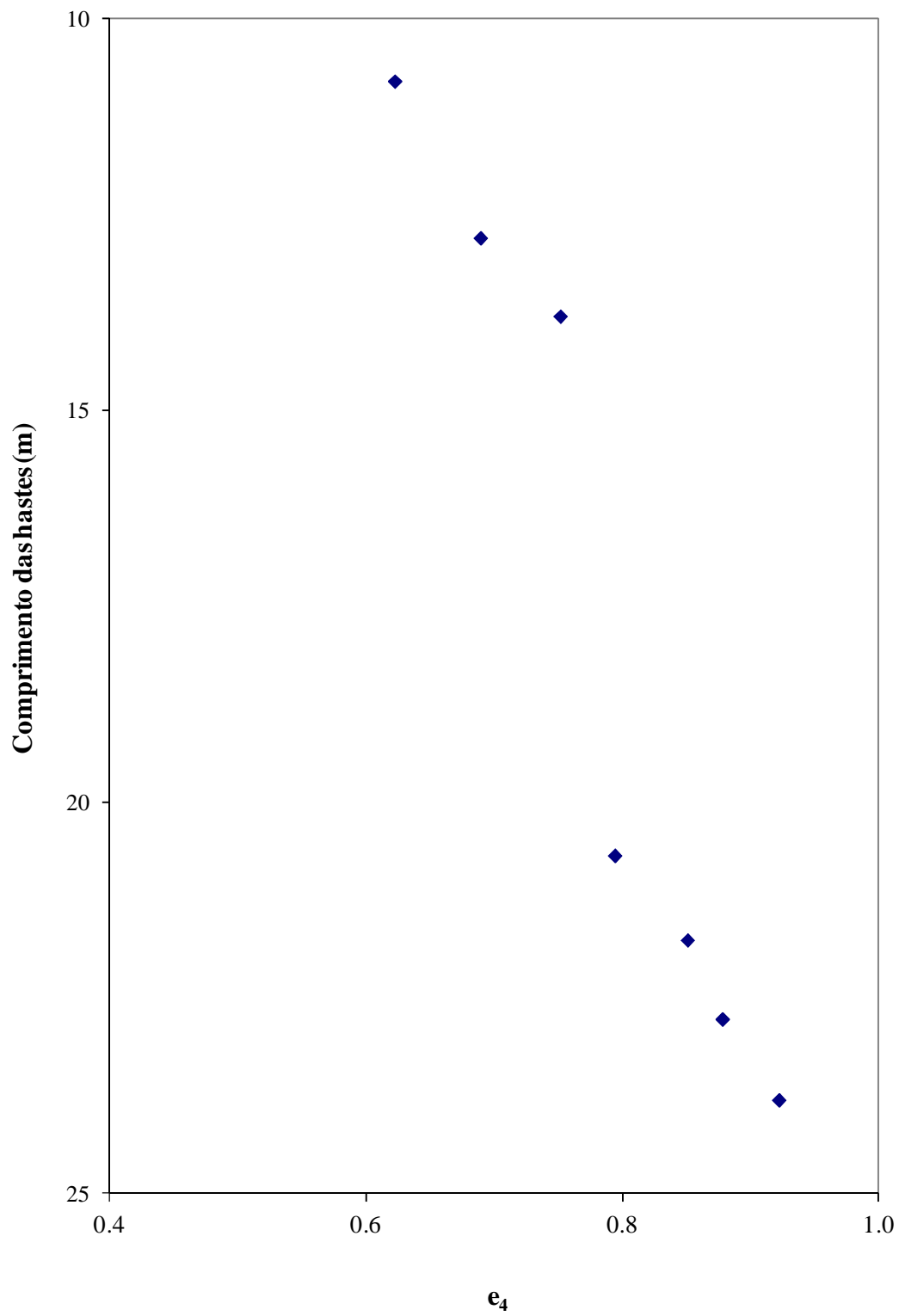


Figura 6.18 – Fator e_4 em função do comprimento de hastes.

6.2.4 Análise dos resultados

A altura de queda média das sequências da Sondagem 1 variou de 67 a 87 cm, com energias potenciais de soltura variando de 429,1 a 554,0 J, diferença de 29%. Em 64% dos golpes o martelo foi erguido a alturas superiores a 80 cm ou alturas inferiores a 70 cm (diferença superior a 5 cm da altura padrão). Vale ressaltar o elevado desvio padrão da altura de queda observado em algumas sequências, chegando a 8 cm. A altura de queda média de todos os golpes analisados é de 80 cm, com desvio padrão de 9 cm, ver Tabela 6.1 e Figuras 6.5 e 6.7.

Na Sondagem 2 a dispersão nas medidas de altura de queda foi, de uma maneira geral, um pouco menor. A altura de queda média das sequências variou de 69 a 87 cm, com energias potenciais variando de 440,8 a 553,0 J, diferença de 25%. Em 46% dos golpes o martelo foi erguido a alturas superiores a 80 cm ou inferiores a 70 cm. Numa das sequências o desvio padrão da altura de queda chegou a 13 cm. A altura de queda média de todos os golpes é de 76 cm, com desvio padrão de 8 cm, ver Tabela 6.2 e Figuras 6.6 e 6.8.

Um aspecto que chama atenção é a diferença na altura de queda média observada nas Sondagens 1 e 2 (80 e 76 cm, respectivamente), que foram realizadas pela mesma equipe, utilizando os mesmos equipamentos e no mesmo local, ou seja, as duas sondagens foram realizadas em condições semelhantes. Cabe ressaltar que ao longo do monitoramento não foi feita qualquer interferência no trabalho das equipes de sondagem.

Outros dois pontos merecem especial atenção: i) a significativa variação na altura de queda dos golpes de uma mesma sequência; ii) a significativa variação na altura de queda média de diferentes sequências.

Nas Sondagens 1 e 2 é verificada uma tendência de aumento na altura de queda ao longo da sequência de golpes (ver Figuras 6.9, 6.10a e 6.10b). Apenas em 2 das 21 sequências analisadas foi verificada a tendência inversa, de redução da altura de queda ao longo da sequência. Provavelmente, a tendência de aumento da altura de queda é motivada pelo cansaço da equipe de sondagem, o que faz com que os golpes sejam aplicados com menos cuidado.

As frequências médias de aplicação dos golpes variaram de 19,4 a 39,7 golpes por minuto, nas Sondagens 1 e 2, diferença de mais de 100%. Verificam-se as menores frequências nas sequências mais longas, com mais de 25 golpes, fato provavelmente motivado pelo cansaço da equipe. As sequências mais curtas, com 5 golpes ou menos, apresentam as maiores frequências. A frequência média de aplicação de golpes de todas as sequências das Sondagens 1 e 2 é de 27,8 golpes/min, e o desvio padrão é de 4,7 golpes/min.

Diversos autores (e.g. Kovacs 1979, Seed *et al.* 1985, Skempton 1986 e Décourt *et al.* 1988) abordam a questão da frequência de aplicação de golpes no ensaio SPT. A ISSMFE (1989) recomenda uma frequência de 30 golpes por minuto. Já a NBR-6484/2001 não faz qualquer recomendação sobre a frequência de aplicação dos golpes.

A cravação dinâmica do amostrador SPT em solos saturados pode gerar excessos de poro-pressão que podem alterar a resistência do solo à penetração em relação à condição drenada. Esses excessos de poro-pressão podem ser influenciados pela frequência de cravação do amostrador. Dessa maneira, ensaios realizados com frequências diferentes podem conduzir a valores diferentes de N_{SPT} no mesmo solo. Seed *et al.* (1985) mostraram que os valores de N_{SPT} podem ser afetados pela frequência de aplicação dos golpes, a depender das características do solo.

Souza (2009) observou comportamento diferente do N_{SPT} para areias fofas e compactas. Face à elevada velocidade de penetração do amostrador, o ensaio SPT tende a gerar excessos positivos de poro-pressão em areias fofas e negativos em areias compactas. Os resultados de Souza (2009) sugerem que o N_{SPT} deve ser maior do que seria, se o ensaio fosse realizado em condições drenadas, no caso de areias compactas, e menor no caso de areias fofas.

A Figura 6.11 mostra uma tendência de maior diferença na altura de queda, em relação à altura padrão, com o aumento da frequência de aplicação dos golpes, tanto para mais quanto para menos.

Nas Sondagens 1 e 2 o horário em que a sequência é executada não parece ter influenciado a altura de queda, posto que sequências executadas em diferentes horários

apresentaram dispersões semelhantes em torno da altura de queda padrão, ver Figura 6.12.

A velocidade média de impacto do martelo variou de 3,38 a 4,02 m/s (energias cinéticas de 371,6 e 525,8 J, respectivamente) nas sequências da Sondagem 1, e nas sequências da Sondagem 2 de 3,57 a 3,98 m/s (energias cinéticas de 414,3 e 516,2 J, respectivamente), ver Tabelas 6.1 e 6.2. Essa significativa variação na energia cinética de impacto é consequência dos problemas no controle da altura de queda.

Conforme já dito anteriormente, em 6 golpes pertencentes às sequências 6 e 9 da Sondagem 2 não foi possível medir energia no topo da composição de hastes. Em outros golpes das mesmas sequências, por problemas no vídeo, não foi possível medir altura de queda ou velocidade de impacto. Desse modo, apenas num número reduzido de golpes das duas sequências mediu-se energia no topo da composição de hastes, altura de queda e velocidade de impacto conjuntamente. Soma-se a esse problema a significativa dispersão nas alturas de queda dos golpes dessas sequências. Em função disso, não foi possível estabelecer valores confiáveis das relações E_i/E_p e E_i/E_c para as sequências 6 e 9 da Sondagem 2.

O fator de eficiência e_1 (E_c/E^*), definido por Décourt (1989), variou na Sondagem 1 de 0,78 a 1,10 e na Sondagem 2 de 0,87 a 1,08. Esses valores são superiores aos encontrados por Cavalcante *et al.* (2011) e variam numa faixa mais ampla que os apresentados por Décourt (1989), ver Figura 2.16. Cabe lembrar que nos dados analisados por Décourt (1989) e Cavalcante *et al.* (2011) a altura de queda não variou tanto quanto nos ensaios apresentados no presente trabalho (ver Tabelas 6.1 e 6.2).

É importante salientar que valores de e_1 maiores que 1,00 são explicados pela altura de queda significativamente acima da padrão em diversas sequências.

A fim de evitar a influência da altura de queda na análise da energia perdida durante a descida do martelo, Santana *et al.* (2012) propuseram a utilização do fator e_1^* , dado por E_c/E_p . Os valores de e_1^* variaram na Sondagem 1 de 0,86 a 0,99 e na Sondagem 2 de 0,91 a 0,96, ficando acima dos apresentados por Décourt para o sistema manual de levantamento e soltura, mas variando numa faixa menos ampla, ver Figura 2.16.

Na Sondagem 1 a energia média medida no topo da composição de hastes, E_i (logo abaixo da cabeça de bater), variou de 318,1 J (eficiência de 67% em relação à energia potencial teórica ou nominal) a 493,5 J (eficiência de 103%). Já na Sondagem 2 a energia média no topo da composição de hastes variou de 403,5 J (eficiência de 84%) a 551,4 J (eficiência de 115%). Essa significativa dispersão nos valores de E_i é consequência principalmente da grande variação na altura de queda, ver Tabelas 6.1 e 6.2.

Esses resultados demonstram que mesmo ensaios SPT realizados pela mesma equipe de sondagem, em condições semelhantes, podem conduzir a valores de N_{SPT} com significados distintos, em função, principalmente, da significativa diferença na energia transferida à composição de hastes. É provável que esse aspecto se agrave quando são comparadas equipes que utilizam práticas e equipamentos diferentes.

Quando a eficiência da energia no topo da composição de hastes é calculada em relação à energia potencial real, medida, varia numa faixa significativamente menor, de 74% a 93% na Sondagem 1, e de 85% a 96% na Sondagem 2, ver Tabelas 6.1 e 6.2.

O fator de eficiência e_2 (E_i/E_c) variou na Sondagem 1 de 0,86 a 0,94 e na Sondagem 2 de 0,92 a 1,00. Esses valores estão entre a linha média dos apresentados por Décourt (1989) e os encontrados por Cavalcante *et al.* (2011), considerando a massa da cabeça de bater de 977 g, ver Tabelas 6.1 e 6.2 e Figura 2.17.

É possível que altos valores do fator e_2 estejam associados à descida da composição de hastes durante o impacto do martelo, o que gera um acréscimo de energia potencial, que é transferida às hastes nos impactos subsequentes do martelo no mesmo golpe. Esse fenômeno, que foi descrito por Odebrecht (2003), é mais importante em solos de baixa resistência. O SPT Analyzer é capaz de medir toda a energia transferida à composição de hastes, desde que o processo ocorra em até 102 ms. No entanto, a energia cinética é calculada em relação ao primeiro impacto do martelo com a cabeça de bater, o que pode superestimar valores de e_2 em caso de outros impactos.

Em três sequências de golpes da Sondagem 1, sequências 2, 5 e 6, foram encontrados valores muito baixos de energia na base da composição de hastes (E_s), que variaram de 70,7 J a 83,7 J. As três sequências de golpes têm em comum baixa resistência do solo à

penetração. Na sequência 2 foram medidos 2 golpes para penetração de 45 cm do amostrador, na sequência 5 foram medidos 3 golpes e na sequência 6 foram medidos 4 golpes. Dois aspectos podem ter contribuído para que a energia que chegou à base da composição de hastes não fosse completamente medida: i) O SPT Analyzer foi configurado para começar a contar o tempo de aquisição quando a primeira onda de compressão passa pelos sensores de cima. Em função da distância entre os sensores de cima e de baixo, é perdido tempo de aquisição nos sensores de baixo; ii) A baixa resistência do solo pode ter permitido o descolamento entre as hastes e o martelo durante o primeiro impacto, de modo que uma parcela significativa da energia seria transferida em impactos subsequentes, que podem não ter sido medidos pelo SPT Analyzer, durante o tempo de aquisição, de 102,4 ms. As hastes tinham comprimentos que variaram de 11,79 m a 16,83 m. Cavalcante (2002), Odebrecht (2003) e Danziger *et al.* (2006) relataram esse fenômeno.

A Figura 6.19 mostra sinais de força e velocidade medidos no topo da composição de hastes de um golpe da primeira sequência da Sondagem 1. Nessa sequência foram aplicados apenas 5 golpes para a penetração de 45 cm do amostrador. A Figura 6.20 mostra a energia medida nesse mesmo golpe. Nos dois gráficos é possível perceber a ocorrência de impactos subsequentes ao primeiro. Os impactos subsequentes ao primeiro aumentaram a energia transmitida à composição de hastes em 18%. Cabe lembrar que esse efeito é mais intenso em hastes mais curtas e solos menos resistentes.

Os valores de E_s da sequência 1 da Sondagem 1, que são pouco menores que os das outras sequências da mesma sondagem, também podem ter sido afetados por esse fenômeno.

Os valores de E_s das sequências 2, 5 e 6 da Sondagem 1 serão desconsiderados nas análises subsequentes, em função do exposto anteriormente. Desse modo, os valores de E_s variaram de 263,3 J (eficiência de 55% em relação à energia padrão e de 53% em relação à energia potencial) a 392,4 J (eficiência de 82% em relação à energia padrão e de 72% em relação à energia potencial). Entretanto, outras duas sequências apresentaram os valores mínimo e máximo da relação E_s/E_p , que valem 48% e 76%, respectivamente.

Os valores de E_i medidos nas seqüências 2, 5 e 6 da Sondagem 1 não parecem ter sido afetados pela baixa resistência à penetração do solo, como ocorreu nos valores de E_s medidos nos sensores de baixo. Conforme já dito, o tempo de aquisição é menor nos sensores de baixo, e esse efeito é mais intenso à medida que o comprimento das hastes aumenta.

Os resultados de E_i/E_p em função do comprimento de hastes, medidos nas Sondagens 1 e 2 e apresentados na Figura 6.17, mostram que a energia transferida ao topo da composição de hastes não é significativamente afetada pelo comprimento das mesmas, pelo menos na faixa de comprimentos analisada, de 10,80 a 25,70 m. Isso corrobora o defendido por Danziger *et al.* (2008), que afirmam que a energia transmitida ao topo da composição de hastes independe de seu comprimento, e o fator e_3 deve ser considerado igual a 1,00.

Os valores de e_4 variaram de 0,62 a 0,92, desconsiderando-se os resultados das seqüências 2, 5 e 6 da Sondagem 1. Na Figura 6.18 percebe-se a tendência de crescimento nos valores de e_4 com o aumento da profundidade, ou seja, as perdas de energia diminuem com o aumento da profundidade. Essa tendência é contrária ao mostrado por Cavalcante (2002), Odebrecht (2003), Johnsen and Jargello (2007) e Cavalcante *et al.* (2008). Cabe salientar, entretanto, que os valores correspondentes às maiores profundidades referem-se a material com elevado número de golpes, enquanto os relativos a menores profundidades foram obtidos em solo com número de golpes significativamente menor. A tendência obtida deve, portanto, ser vista com cuidado.

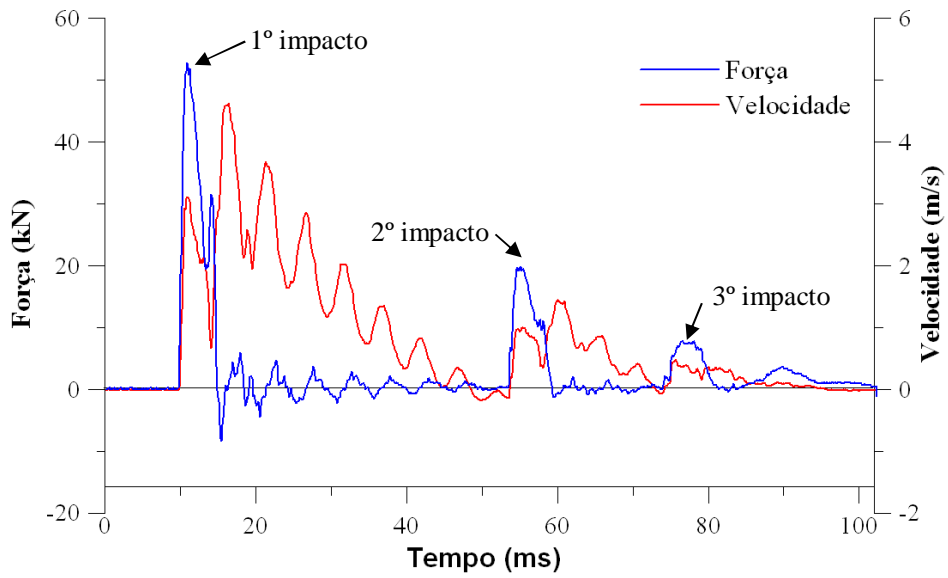


Figura 6.19 – Sinais de força e velocidade medidos no topo da composição de hastes (Golpe 3 da Sequência 1, Sondagem 1).

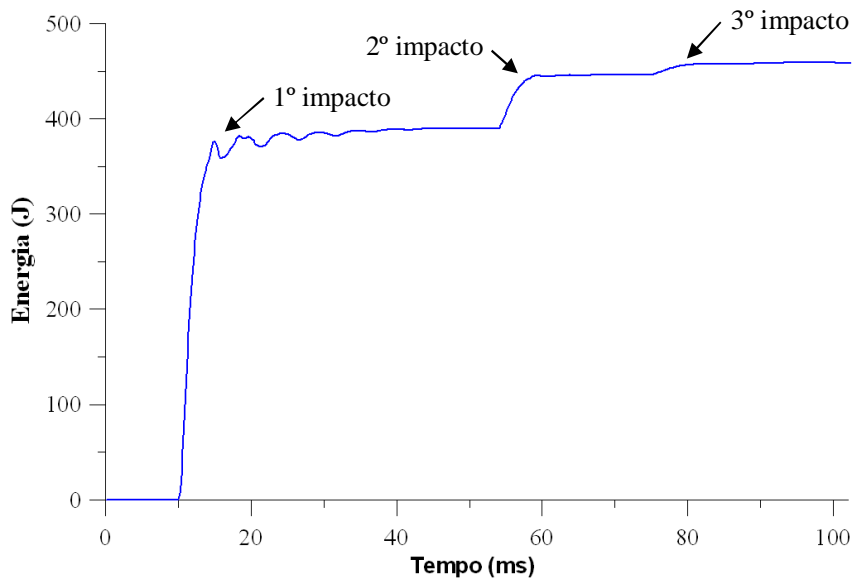


Figura 6.20 – Energia medida no topo da composição de hastes (Golpe 3 da Sequência 1, Sondagem 1).

6.3 ENSAIOS NA ÁREA PORTUÁRIA DE ITAGUAÍ

6.3.1 Considerações iniciais

Nessa campanha foram monitoradas sete sondagens, realizadas na área portuária de Itaguaí, município de Itaguaí/RJ. Uma dessas sondagens foi realizada no mar, sobre um flutuante.

A região das sondagens em terra é formada por um aterro hidráulico, com espessura média de 13 m. Essa camada é seguida de camadas de argila, areia siltosa e silte arenoso, até atingir solo residual em profundidades que variam de 32 a 40 m. O nível d'água médio é encontrado a cerca de 2 m de profundidade.

6.3.2 Características dos ensaios

Cada uma das sete sondagens foi realizada por uma equipe diferente, todas pertencentes à mesma empresa, que é diferente da empresa que realizou os ensaios em Sarapuí II. Essas equipes foram denominadas nesse trabalho por Equipe 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7. De modo geral, os equipamentos e procedimentos utilizados pelas sete equipes eram semelhantes, divergindo, entretanto, em alguns pontos:

- Forma e massa da cabeça de bater: foi registrado o uso de três tipos de cabeça de bater, com forma e massa distintas, sendo designados no trabalho por tipo 1, tipo 2 e tipo 3, conforme mostrado na Figura 6.21. As massas das cabeças de bater de cada equipe são apresentadas na Tabela 6.3. Vale mencionar que apenas a cabeça de bater do tipo 3 atende à prescrição da NBR-6484/2001 no quesito massa (entre 3,5 kg e 4,5 kg).
- Tipo de cabo utilizado: foi observado o uso de corda de sisal e cabo de aço na realização dos ensaios (ver Tabela 6.3). A NBR-6484/2001 prevê apenas o uso de corda de sisal.
- Sistema de levantamento e soltura do martelo: além do sistema de levantamento manual, que representa o procedimento usual e previsto na NBR-6484/2001, também foi utilizado um segundo sistema, mecanizado, de levantamento em alguns ensaios (ver Tabela 6.3). Esse segundo sistema só é possível no caso da

presença de equipamento de sondagem rotativa (ver Figura 6.22). Nos ensaios com sistema mecanizado a corda dava uma volta em torno do tambor. Em todos os casos, o controle da altura de queda era visual, baseado em marcação na haste guia.

- Martelo: algumas equipes utilizaram o coxim de madeira na base do martelo, outras não (ver Tabela 6.3). A NBR-6484/2001 prevê o uso de coxim.
- Revestimento: as Equipes 1, 2, 3, 4, 5 e 6 utilizaram revestimento com diâmetro interno de 75 mm, já a Equipe 7 utilizou revestimento com diâmetro interno de 100 mm. Essa mudança de diâmetro permitiu a monitoração de energia na base da composição de hastes. Todas as equipes utilizaram lama bentonítica para estabilizar o furo, além do revestimento.

As hastes utilizadas em todos os ensaios possuíam diâmetro externo de 33 mm, o que é comum nos ensaios realizados no Brasil, e está de acordo com o prescrito na NBR-6484/2001. Não foi verificado o peso das hastes. Foram utilizadas hastes com comprimentos de 1, 2 e 3 m. Cabe lembrar que a NBR-6484/2001 só prevê o uso de hastes com comprimentos de 1 e 2 m.

Todas as equipes utilizaram martelo maciço cilíndrico dotado de haste guia, que é o tipo mais usual no Brasil, mas não está explicitado nos desenhos da NBR-6484/2001. Não foi verificada a massa dos martelos utilizados nos ensaios. Entretanto, as equipes de sondagem informaram que a empresa realiza esse controle regularmente.

O amostrador utilizado nos ensaios possuía comprimento de 648 mm, próximo do recomendado pela ISSMFE (1989), entretanto, a NBR-6484/2001 prevê que o amostrador deve ter comprimento de 809,6 mm, com tolerância de $\pm 4\%$.

Nas 7 equipes acompanhadas, a contagem dos golpes era feita pelo sondador, enquanto erguia o martelo (sozinho nos ensaios com sistema mecanizado). O número de golpes era memorizado e ao final do ensaio anotado. Em função disso, num número significativo de sequências, o número de golpes foi contado incorretamente.

Nos ensaios realizados pela Equipe 7 verificou-se que, quando a penetração do amostrador era superior a 15 cm num intervalo, as marcações para os estágios seguintes de 15 cm eram corrigidas, de modo que a penetração final em alguns casos era

significativamente maior que os 45 cm. Essa prática está em desacordo com a NBR-6484/2001.

A Tabela 6.3 apresenta um resumo de equipamentos e procedimentos utilizados pelas Equipes 1 a 7. Uma das colunas identifica o ensaio realizado a partir de flutuantes (ver Figura 6.23).



Figura 6.21 – Cabeças de bater utilizadas nos ensaios em Itaguaí.

Tabela 6.3 – Características dos equipamentos e procedimentos das equipes monitoradas.

Equipe	Tipo de cabeça de bater	Massa da cabeça de bater (kg)	Tipo de cabo	Sistema de levantamento	Uso de coxim de madeira	Uso de flutuantes
1	1	1,5	Cabo de aço	Manual	Não	Não
2	2	1,3	Corda de sisal	Mecanizado	Não	Não
3	2	1,1	Corda de sisal	Mecanizado	Sim	Sim
4	3	3,7	Corda de sisal	Mecanizado	Sim	Não
5	3	3,7	Cabo de aço	Manual	Sim	Não
6	3	3,7	Corda de sisal	Mecanizado	Sim	Não
7	3	3,7	Corda de sisal	Mecanizado	Sim	Não



Figura 6.22 – Sistema mecanizado de levantamento do martelo.

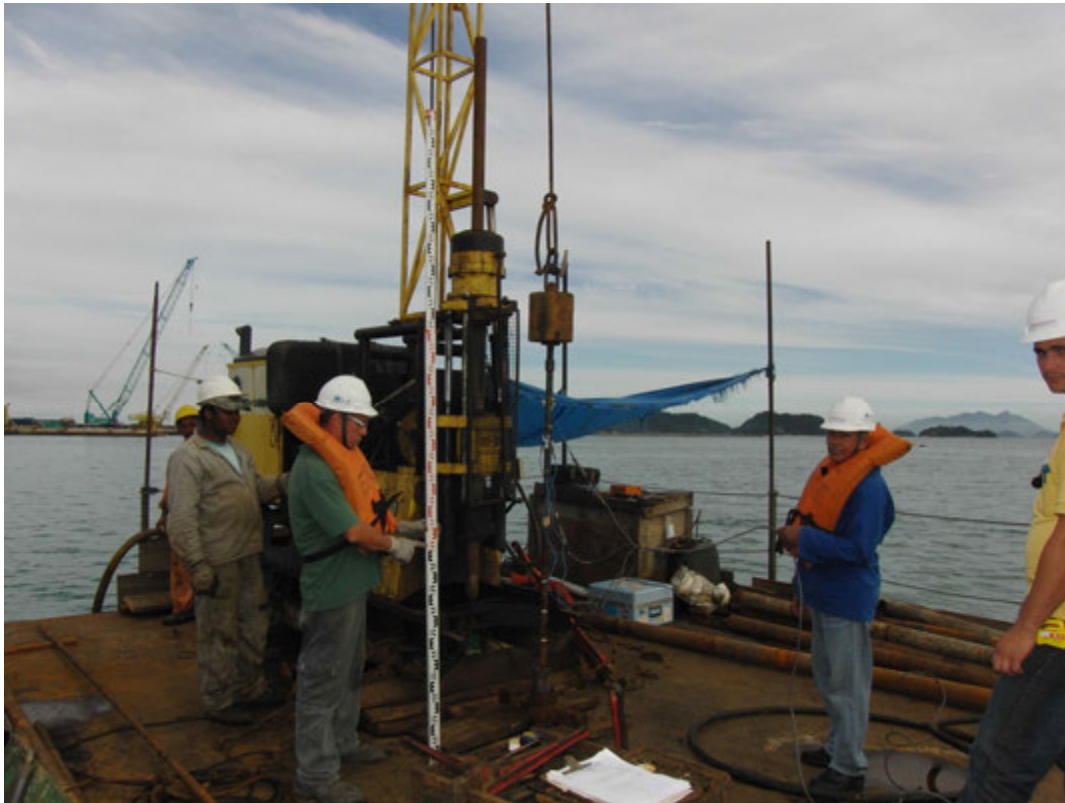


Figura 6.23 – Ensaio realizado sobre flutuante.

Foram monitorados 691 golpes nas sete sondagens, com medição de energia no topo da composição de hastes em todos. Em sete sequências de golpes realizadas pela Equipe 7 (total de 65 golpes) também foi monitorada energia na base da composição de hastes. Nesses ensaios, as hastes instrumentadas foram montadas do mesmo modo que nos ensaios em Sarapuí II (ver item 6.2.2). Os comprimentos de hastes variaram de 2,98 a 37,49 m.

A medição de altura de queda do martelo SPT e de sua velocidade de impacto foi realizada da mesma maneira que nos ensaios realizados em Sarapuí II (ver item 6.2.2).

6.3.3 Apresentação dos resultados

As energias potencial de soltura do martelo (E_p), cinética de impacto (E_c), no topo da composição de hastes (E_i) e na base da composição de hastes (E_s) foram obtidas do mesmo modo que nos ensaios em Sarapuí II (ver item 6.2.2). Um resumo das energias medidas nos 691 golpes monitorados das sete equipes de sondagem é apresentado nas Tabelas 6.4, 6.5 e 6.6. As sequências são designadas com dois números: o primeiro o da equipe correspondente e o segundo o da sequência em si. Na Tabela 6.7 é apresentado um comparativo entre as equipes.

Na sequência 1.2 não foi possível estimar a altura de queda e a velocidade de impacto, por uma falha humana na gravação do vídeo. Além disso, num número reduzido de golpes de outras sequências (10 golpes) não foi possível determinar a velocidade de impacto em função de problemas no vídeo. Em 5 golpes problemas no vídeo também impediram a determinação da altura de queda. Essa redução no número de golpes afetados por problemas no vídeo, comparando-se com os ensaios em Sarapuí II, é consequência da troca do cartão de memória da câmera de alta velocidade.

As Figuras 6.24, 6.25, 6.26, 6.27, 6.28, 6.29 e 6.30 apresentam a distribuição de frequências das alturas de queda do martelo SPT das 7 equipes. As Figuras 6.31, 6.32, 6.33a, 6.33b, 6.34a e 6.34b mostram a altura de queda golpe a golpe em cada sequência.

As Figuras 6.35 e 6.36 mostram a altura de queda em função da frequência de aplicação dos golpes e do turno de trabalho, respectivamente, para os ensaios realizados com sistema manual de levantamento e soltura. As Figuras 6.37 e 6.38 mostram os mesmos gráficos para os ensaios realizados com sistema mecanizado de levantamento e soltura.

A Figura 6.39 mostra a energia medida no topo da composição de hastes (E_i), normalizada pela energia potencial real (E_p), em função do comprimento de hastes. Já a Figura 6.40 mostra a variação do fator e_4 em função do comprimento das hastes.

Verificou-se no campo que ao final da sequência 6.18 os dois acelerômetros estavam folgados. Ao final da sequência 7.1 também se verificou folga em acelerômetro, mas nesse caso apenas no acelerômetro fixado à haste de cima. Os acelerômetros são fixados às hastes através de parafusos (ver item 4.3). Acredita-se que essa folga ocorreu em função de vibração na composição de hastes ao longo da aplicação dos golpes, já que no início de cada sequência os parafusos eram apertados. O autor do presente trabalho já havia verificado acelerômetros folgarem ao final de cravações em materiais resistentes.

Nos últimos 30 golpes da sequência 6.18 e últimos 10 golpes da sequência 7.1 os sinais de velocidade não apresentaram proporcionalidade com os sinais de força, como é mostrado na Figura 6.41, conduzindo a valores de energia baixos. Acredita-se que esse fenômeno tenha ligação com a ocorrência relatada acima. Dessa maneira, decidiu-se desconsiderar a energia medida na composição de hastes nesse conjunto de golpes.

Tabela 6.4 – Energias medidas nas sequências – Equipes 1, 2, 3, 4 e 5.

Equipe	Sequência	N ¹	Frequência (Golpes/min)	Turno ²	Prof. ³ (m)	L ⁴ (m)	h _q ⁵ (m)		v _i ⁸ (m/s)		E _p ⁹ (J)		E _c ¹⁰ (J)		E _i ¹¹ (J)		E _p /E ^{*12}	E _c /E ^{* (e1)}	E _i /E [*]	E _c /E _p (e1*)	E _i /E _p	E _i /E _c (e2)
							M ⁶	DP ⁷	M	DP	M	DP	M	DP	M	DP						
1	1.1	25	20,2	2	8	9,92	0,93	0,06	3,87	0,14	596,0	35,7	488,1	35,1	441,0	28,6	1,25	1,02	0,92	0,82	0,74	0,90
	1.2	25	-	-	9	10,90	-	-	-	-	-	-	-	-	349,5	30,5	-	-	0,73	-	-	-
	1.3	32	24,4	3	10	11,91	0,85	0,04	3,78	0,17	544,6	27,3	465,8	41,7	383,7	25,9	1,14	0,97	0,80	0,86	0,70	0,82
	1.4	45	24,7	3	11	12,91	0,85	0,04	3,80	0,13	541,5	24,3	469,4	33,1	370,3	25,3	1,13	0,98	0,77	0,87	0,68	0,79
2	2.1	26	10,3	4	20	21,90	0,67	0,03	3,23	0,21	430,0	20,1	340,4	44,4	304,5	64,5	0,90	0,71	0,64	0,79	0,71	0,89
3	3.1	8	6,9	2	14	15,76	0,84	0,05	3,57	0,12	536,1	32,5	414,3	27,8	371,5	23,1	1,12	0,87	0,78	0,77	0,69	0,90
	3.2	6	10,7	3	15	16,75	0,82	0,03	3,53	0,10	520,0	18,1	405,2	21,7	381,5	32,8	1,09	0,85	0,80	0,78	0,73	0,94
	3.3	8	12,2	3	16	17,76	0,85	0,04	3,63	0,19	543,6	28,0	429,6	44,3	406,0	50,5	1,14	0,90	0,85	0,79	0,75	0,95
	3.4	3	8,6	4	17	19,76	0,87	0,06	3,55	0,11	556,1	39,0	408,6	24,4	378,8	25,2	1,16	0,85	0,79	0,73	0,68	0,93
	3.5	5	13,2	4	18	20,76	0,84	0,03	3,62	0,08	535,3	17,5	425,6	19,4	403,6	23,5	1,12	0,89	0,84	0,80	0,75	0,95
4	4.1	31	13,5	1	2	4,01	0,78	0,02	3,37	0,18	498,0	13,7	369,9	39,6	283,0	36,8	1,04	0,77	0,59	0,74	0,57	0,77
5	5.1	24	17,2	3	1	3,98	0,78	0,08	3,32	0,25	495,5	49,5	359,6	54,1	298,4	32,3	1,04	0,75	0,62	0,73	0,60	0,83
	5.2	17	22,3	3	2	4,97	0,82	0,05	3,63	0,15	519,9	29,2	428,8	34,9	320,2	21,2	1,09	0,90	0,67	0,82	0,62	0,75
	5.3	10	21,5	3	3	5,96	0,94	0,13	3,90	0,32	600,3	80,6	497,0	78,5	371,3	35,3	1,26	1,04	0,78	0,83	0,62	0,75
	5.4	11	20,8	4	4	6,96	0,89	0,08	3,88	0,15	568,1	48,3	490,0	37,9	361,8	49,4	1,19	1,02	0,76	0,86	0,64	0,74

¹N = número de golpes contabilizados pelo SPT Analyzer para a penetração de 45 cm do amostrador;

²Turno = turno do dia: Turno 1 entre 8 e 10 horas, Turno 2 entre 10 e 12 horas, Turno 3 entre 14 e 16 horas, Turno 4 entre 16 e 18 horas;

³Prof. = profundidade nominal do ensaio SPT (m);

⁴L = comprimento da composição de hastes, incluindo o comprimento do amostrador (m);

⁵h_q = altura de queda do martelo SPT

⁶M = média;

⁷DP = desvio padrão;

⁸ v_i = velocidade de impacto do martelo SPT;

⁹ E_p = energia potencial real do martelo SPT no momento da soltura;

¹⁰ E_c = energia cinética do martelo SPT na iminência do impacto;

¹¹ E_i = energia medida no topo da composição de hastes;

¹² E^* = energia potencial teórica do martelo SPT do sistema brasileiro (478,2 J).

Tabela 6.5 – Energias medidas nas sequências – Equipe 6.

Sequência	N ¹	Frequência (Golpes/min)	Turno ²	Prof. ³ (m)	L ⁴ (m)	h _q ⁵ (m)		v _i ⁸ (m/s)		E _p ⁹ (J)		E _c ¹⁰ (J)		E _i ¹¹ (J)		E _p /E ^{*12}	E _c /E ^{* (e₁)}	E _i /E [*]	E _c /E _p (e ₁ [*])	E _i /E _p	E _i /E _c (e ₂)
						M ⁶	DP ⁷	M	DP	M	DP	M	DP	M	DP						
6.1	17	4,2	3	1	2,98	0,75	0,01	3,49	0,09	478,3	7,5	395,8	19,7	278,6	18,1	1,00	0,83	0,58	0,83	0,58	0,70
6.2	16	10,0	3	3	5,98	0,75	0,01	3,44	0,09	476,0	7,3	385,7	20,2	295,6	23,7	1,00	0,81	0,62	0,81	0,62	0,77
6.3	5	7,1	1	5	7,98	0,74	0,02	3,53	0,08	474,2	11,3	404,4	18,0	384,9	9,0	0,99	0,85	0,80	0,85	0,81	0,95
6.4	6	4,5	1	7	9,98	0,77	0,01	3,63	0,06	490,1	6,0	427,5	13,3	366,1	28,7	1,02	0,89	0,77	0,87	0,75	0,86
6.5	7	8,2	2	9	11,98	0,76	0,01	3,64	0,06	485,1	7,1	431,2	14,8	403,8	17,3	1,01	0,90	0,84	0,89	0,83	0,94
6.6	10	7,3	3	11	13,98	0,75	0,01	3,53	0,06	477,5	6,3	404,3	14,2	374,8	12,3	1,00	0,85	0,78	0,85	0,78	0,93
6.7	12	4,4	3	13	15,98	0,75	0,01	3,49	0,08	475,3	4,1	396,7	17,2	373,8	10,5	0,99	0,83	0,78	0,83	0,79	0,94
6.8	8	8,0	1	15	17,98	0,74	0,01	3,51	0,09	470,8	5,5	401,3	21,5	385,2	18,3	0,98	0,84	0,81	0,85	0,82	0,96
6.9	8	7,6	1	17	19,98	0,75	0,01	3,56	0,06	476,4	5,0	411,3	13,9	380,6	10,1	1,00	0,86	0,80	0,86	0,80	0,93
6.10	5	5,1	2	19	21,98	0,74	0,01	3,50	0,06	473,0	7,3	397,5	12,9	349,8	8,7	0,99	0,83	0,73	0,84	0,74	0,88
6.11	12	8,5	3	21	23,98	0,75	0,01	3,47	0,05	475,2	3,9	392,3	11,6	355,0	12,4	0,99	0,82	0,74	0,83	0,75	0,91
6.12	14	9,6	1	23	25,49	0,75	0,01	3,49	0,08	476,9	7,3	396,8	17,7	363,3	14,9	1,00	0,83	0,76	0,83	0,76	0,92
6.13	18	10,6	2	25	27,49	0,74	0,03	3,50	0,12	470,2	16,5	397,6	27,9	356,6	28,3	0,98	0,83	0,75	0,85	0,76	0,90
6.14	17	8,8	3	27	29,49	0,74	0,01	3,46	0,06	470,4	5,4	388,2	12,8	365,6	25,8	0,98	0,81	0,76	0,83	0,78	0,94
6.15	16	10,0	3	29	31,49	0,74	0,01	3,45	0,04	473,3	5,5	387,5	9,4	363,1	9,7	0,99	0,81	0,76	0,82	0,77	0,94
6.16	11	9,3	1	31	33,49	0,75	0,01	3,54	0,05	476,2	3,9	406,9	12,5	356,7	15,6	1,00	0,85	0,75	0,85	0,75	0,88
6.17	23	10,2	2	33	35,49	0,74	0,01	3,50	0,06	474,7	5,9	398,7	13,0	348,3	26,9	0,99	0,83	0,73	0,84	0,73	0,87
6.18	44	9,4	3	35	37,49	0,75	0,01	3,43	0,10	476,0	4,4	383,3	22,3	355,7	25,8	1,00	0,80	0,74	0,81	0,75	0,93

¹N = número de golpes contabilizados pelo SPT Analyzer para a penetração de 45 cm do amostrador;

²Turno = turno do dia: Turno 1 entre 8 e 10 horas, Turno 2 entre 10 e 12 horas, Turno 3 entre 14 e 16 horas, Turno 4 entre 16 e 18 horas;

³Prof. = profundidade nominal do ensaio SPT (m);

⁴L = comprimento da composição de hastes, incluindo o comprimento do amostrador (m);

⁵ h_q = altura de queda do martelo SPT

⁶ M = média;

⁷ DP = desvio padrão;

⁸ v_i = velocidade de impacto do martelo SPT;

⁹ E_p = energia potencial real do martelo SPT no momento da soltura;

¹⁰ E_c = energia cinética do martelo SPT na iminência do impacto;

¹¹ E_i = energia medida no topo da composição de hastes;

¹² E^* = energia potencial teórica do martelo SPT do sistema brasileiro (478,2 J).

Tabela 6.6 – Energias medidas nas sequências – Equipe 7.

Sequência	N ¹	Frequência (Golpes/min)	Turno ²	Prof. ³ (m)	L ⁴ (m)	h _q ⁵ (m)		v _i ⁸ (m/s)		E _p ⁹ (J)		E _c ¹⁰ (J)		E _i ¹¹ (J)		E _s ¹² (J)		E _p /E ^{*13}	E _c /E [*] (e ₁)	E _i /E [*]	E _s /E [*]	E _c /E _p (e ₁ [*])	E _i /E _p	E _s /E _p	E _i /E _c (e ₂)	E _s /E _i (e ₄)
						M ⁶	DP ⁷	M	DP	M	DP	M	DP	M	DP	M	DP									
7.1	15	12,5	2	3	5,46	0,75	0,01	3,41	0,17	481,4	7,5	378,2	37,1	311,2	21,1	284,2	29,8	1,01	0,79	0,65	0,59	0,79	0,65	0,59	0,82	0,91
7.2	27	12,2	3	5	7,46	0,75	0,01	3,26	0,13	481,0	5,0	345,6	28,3	302,9	13,9	-	-	1,01	0,72	0,63	-	0,72	0,63	-	0,88	-
7.3	5	6,0	3	7	9,46	0,76	0,01	3,34	0,11	482,5	4,3	361,6	23,5	324,1	12,3	253,2	36,8	1,01	0,76	0,68	0,53	0,75	0,67	0,52	0,90	0,78
7.4	6	6,2	1	9	11,46	0,76	0,01	3,34	0,10	483,3	4,3	362,1	21,3	347,0	17,0	-	-	1,01	0,76	0,73	-	0,75	0,72	-	0,96	-
7.5	8	7,5	2	11	13,46	0,76	0,01	3,43	0,03	485,1	8,3	382,4	6,4	327,6	37,8	264,1	38,7	1,01	0,80	0,69	0,55	0,79	0,68	0,54	0,86	0,81
7.6	13	12,5	3	13	15,46	0,77	0,01	3,43	0,11	489,7	8,0	381,5	25,7	347,7	8,3	-	-	1,02	0,80	0,73	-	0,78	0,71	-	0,91	-
7.7	4	2,7	1	15	17,46	0,75	0,01	3,44	0,08	479,4	8,0	384,4	17,7	346,6	21,5	199,7	84,8	1,00	0,80	0,72	0,42	0,80	0,72	0,42	0,90	0,58
7.8	6	4,8	2	17	19,46	0,76	0,01	3,57	0,09	484,6	8,2	413,2	21,5	352,1	27,4	-	-	1,01	0,86	0,74	-	0,85	0,73	-	0,85	-
7.9	12	4,2	3	19	21,46	0,76	0,01	3,65	0,07	486,3	5,9	432,5	15,9	373,3	31,6	209,1	73,6	1,02	0,90	0,78	0,44	0,89	0,77	0,43	0,86	0,56
7.10	9	12,5	3	21	23,46	0,76	0,01	3,36	0,14	486,0	6,7	366,9	31,3	336,8	16,0	-	-	1,02	0,77	0,70	-	0,75	0,69	-	0,92	-
7.11	14	14,3	2	23	25,46	0,76	0,01	3,36	0,09	482,0	5,6	366,8	20,2	337,2	41,2	267,7	34,5	1,01	0,77	0,71	0,56	0,76	0,70	0,56	0,92	0,79
7.12	11	14,3	3	25	27,46	0,76	0,01	3,54	0,07	487,1	7,5	407,7	16,6	349,6	19,9	-	-	1,02	0,85	0,73	-	0,84	0,72	-	0,86	-
7.13	9	15,9	3	27	29,46	0,77	0,01	3,53	0,05	488,9	4,6	404,4	11,7	369,4	32,4	244,5	33,6	1,02	0,85	0,77	0,51	0,83	0,76	0,50	0,91	0,66
7.14	25	11,5	4	29	31,46	0,76	0,01	3,41	0,12	486,5	4,5	376,9	27,0	339,6	16,0	-	-	1,02	0,79	0,71	-	0,77	0,70	-	0,90	-

¹N = número de golpes contabilizados pelo SPT Analyzer para a penetração de 45 cm do amostrador;

²Turno = turno do dia: Turno 1 entre 8 e 10 horas, Turno 2 entre 10 e 12 horas, Turno 3 entre 14 e 16 horas, Turno 4 entre 16 e 18 horas;

³Prof. = profundidade nominal do ensaio SPT (m);

⁴L = comprimento da composição de hastes, incluindo o comprimento do amostrador (m);

⁵h_q = altura de queda do martelo SPT

⁶M = média;

⁷DP = desvio padrão;

⁸v_i = velocidade de impacto do martelo SPT;

- ⁹E_p = energia potencial real do martelo SPT no momento da soltura;
¹⁰E_c = energia cinética do martelo SPT na iminência do impacto;
¹¹E_i = energia medida no topo da composição de hastes;
¹²E_s = energia medida na base da composição de hastes;
¹³E* = energia potencial teórica do martelo SPT do sistema brasileiro (478,2 J).

Tabela 6.7 – Comparativo de energias medidas por equipe.

Equipe	Frequência (Golpes/min)	h_q^1 (m)		v_i^4 (m/s)		E_p^5 (J)		E_c^6 (J)		E_i^7 (J)		E_s^8 (J)		E_p/E^{*9}	$E_c/E^*(e_1)$	E_i/E^*	E_s/E^*	$E_c/E_p(e_1^*)$	E_i/E_p	E_s/E_p	$E_i/E_c(e_2)$	$E_s/E_i(e_4)$
		M ²	DP ³	M	DP	M	DP	M	DP	M	DP	M	DP									
1	23,1	0,87	0,06	3,81	0,15	555,8	36,3	472,9	37,1	391,9	38,8	-	-	1,16	0,99	0,82	-	0,85	0,70	-	0,83	-
2	10,3	0,67	0,03	3,23	0,21	430,0	20,1	340,4	44,4	304,5	64,5	-	-	0,90	0,71	0,64	-	0,79	0,71	-	0,89	-
3	10,3	0,84	0,04	3,58	0,13	536,1	26,8	418,2	30,6	390,0	35,6	-	-	1,12	0,87	0,82	-	0,78	0,73	-	0,93	-
4	13,5	0,78	0,02	3,37	0,18	498,0	13,7	369,9	39,6	283,0	36,8	-	-	1,04	0,77	0,59	-	0,74	0,57	-	0,77	-
5	20,5	0,83	0,10	3,60	0,33	532,0	63,7	425,0	76,4	327,9	44,4	-	-	1,11	0,89	0,69	-	0,80	0,62	-	0,77	-
6	7,9	0,75	0,01	3,49	0,09	475,4	7,6	395,8	20,3	352,9	36,2	-	-	0,99	0,83	0,74	-	0,83	0,74	-	0,89	-
7	9,8	0,76	0,01	3,41	0,15	483,6	6,84	379,6	32,4	336,1	30,2	255,8	51,8	1,01	0,79	0,70	0,53	0,79	0,70	0,53	0,89	0,76

¹ h_q = altura de queda do martelo SPT

²M = média;

³DP = desvio padrão;

⁴ v_i = velocidade de impacto do martelo SPT;

⁵ E_p = energia potencial real do martelo SPT no momento da soltura;

⁶ E_c = energia cinética do martelo SPT na iminência do impacto;

⁷ E_i = energia medida no topo da composição de hastes;

⁸ E_s = energia medida na base da composição de hastes;

⁹ E^* = energia potencial teórica do martelo SPT do sistema brasileiro (478,2 J).

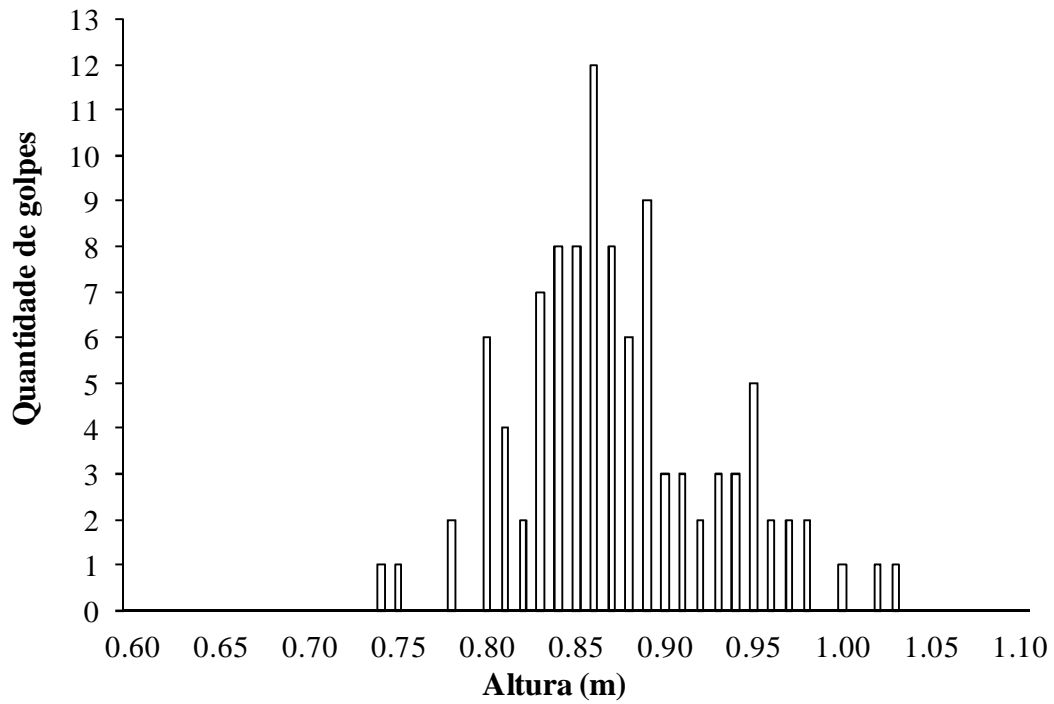


Figura 6.24 – Distribuição de frequências de altura de queda da Equipe 1.

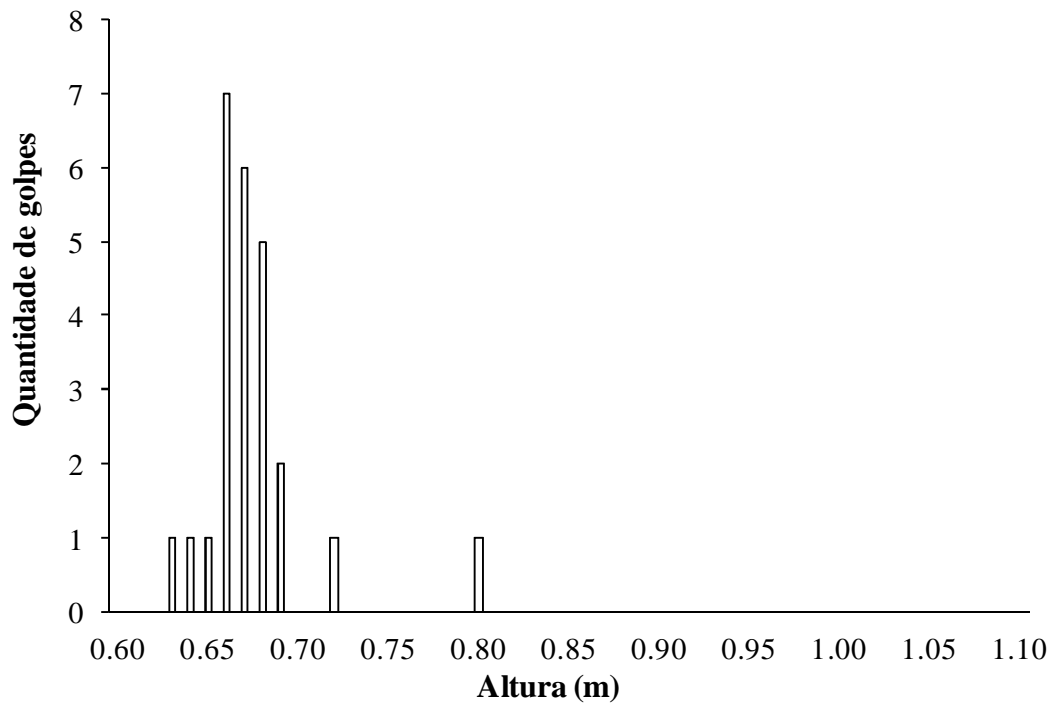


Figura 6.25 – Distribuição de frequências de altura de queda da Equipe 2.

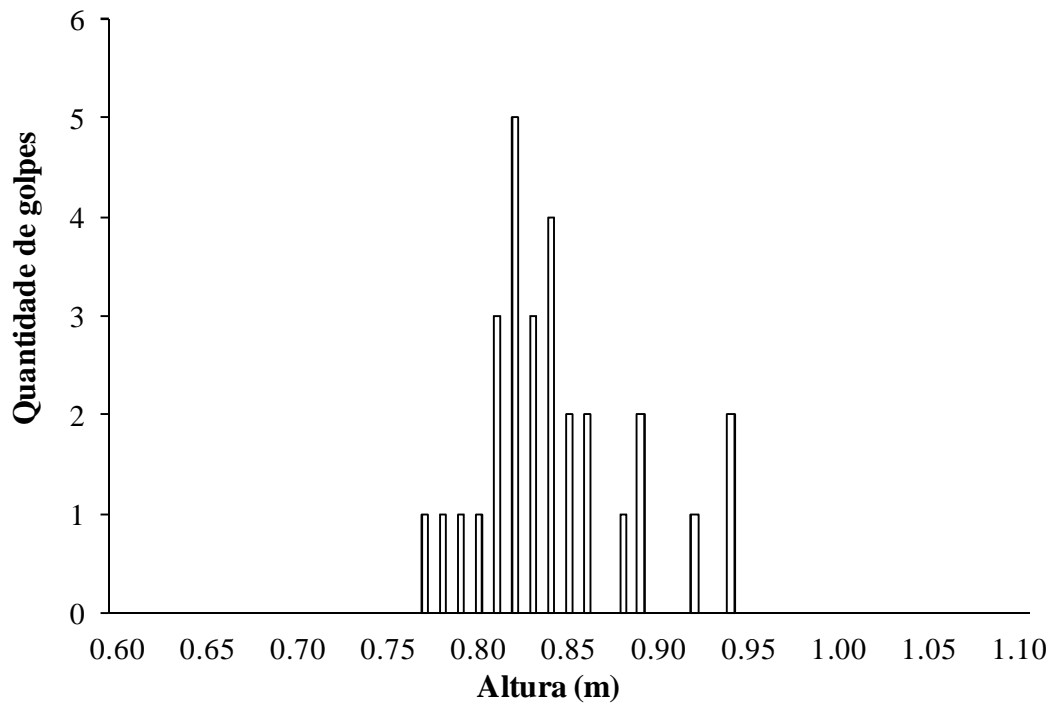


Figura 6.26 – Distribuição de frequências de altura de queda da Equipe 3.

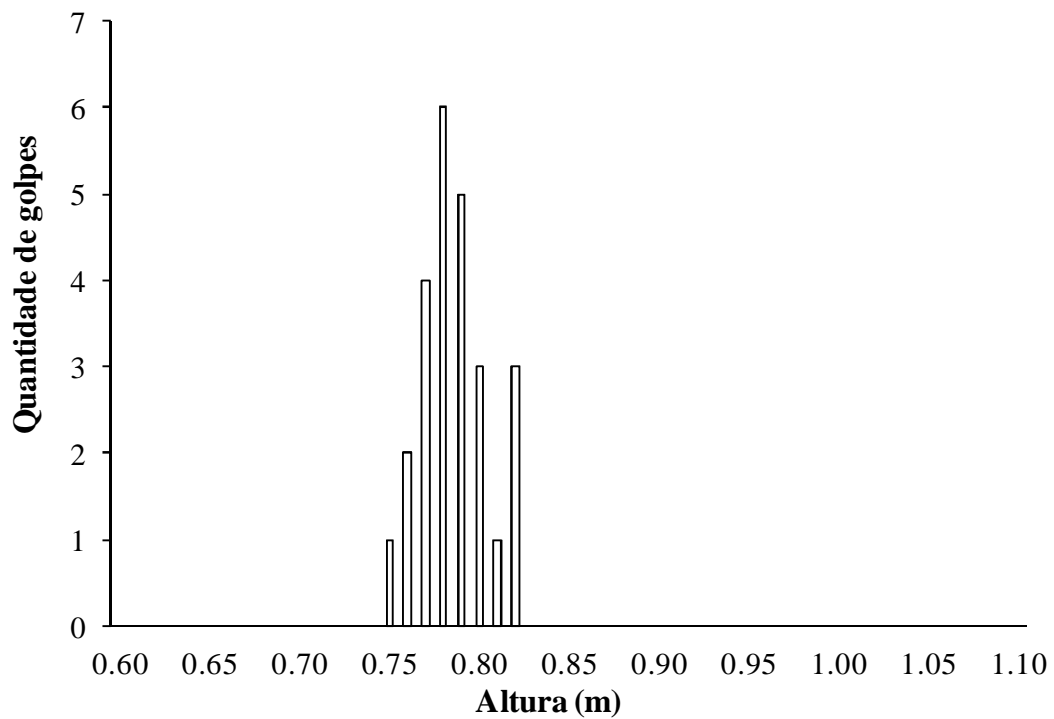


Figura 6.27 – Distribuição de frequências de altura de queda da Equipe 4.

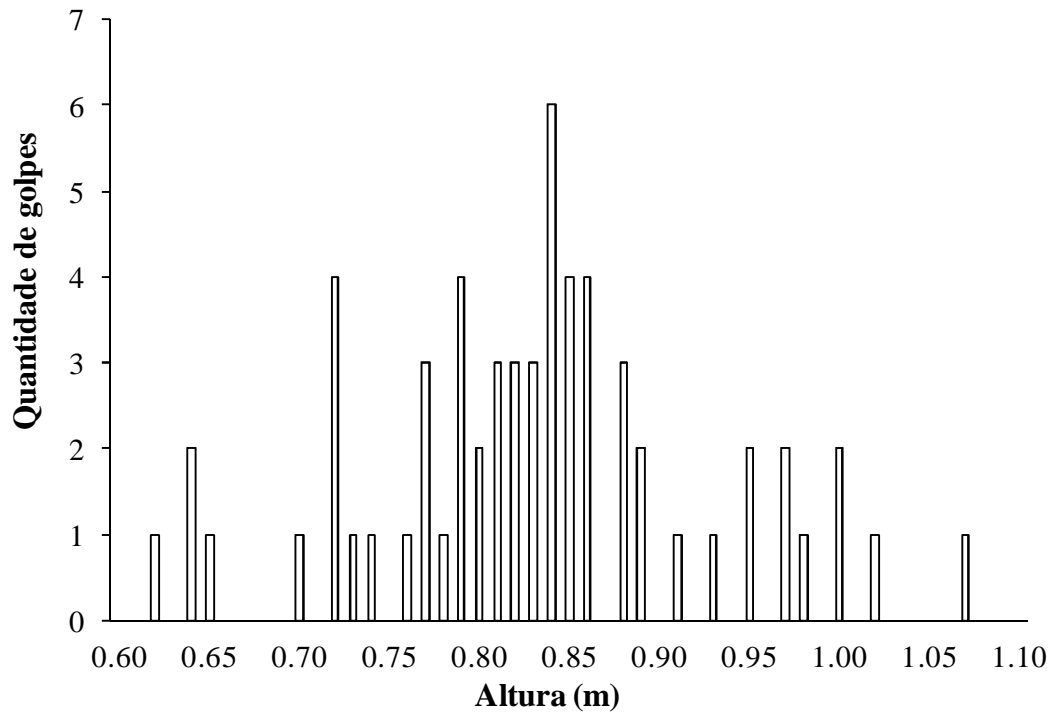


Figura 6.28 – Distribuição de frequências de altura de queda da Equipe 5.

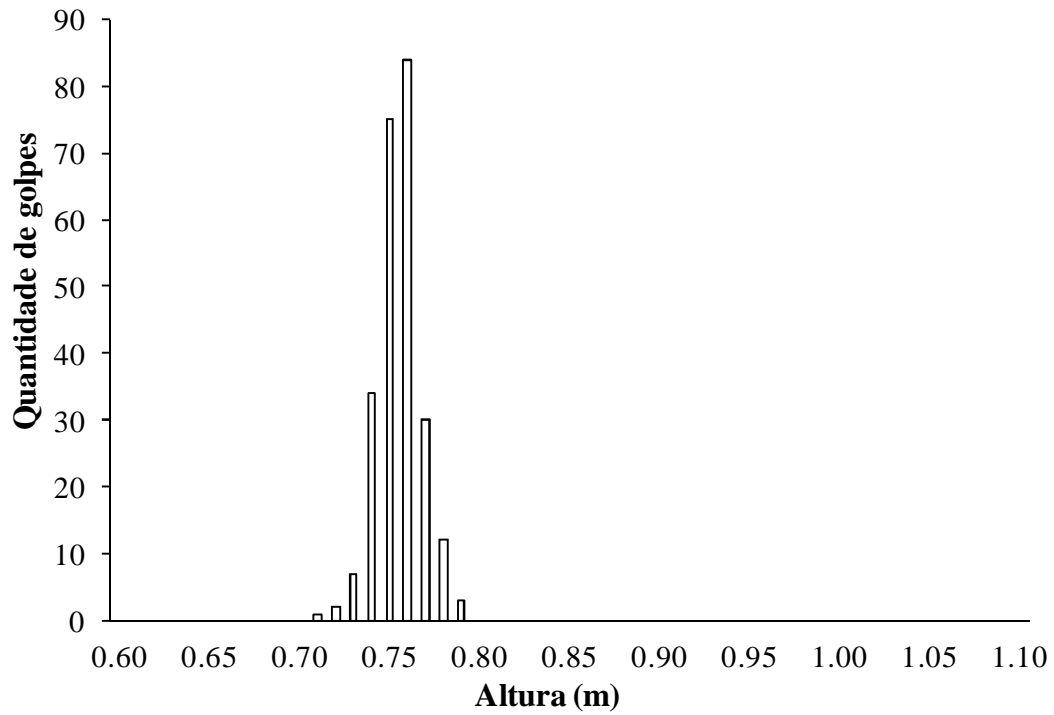


Figura 6.29 – Distribuição de frequências de altura de queda da Equipe 6.

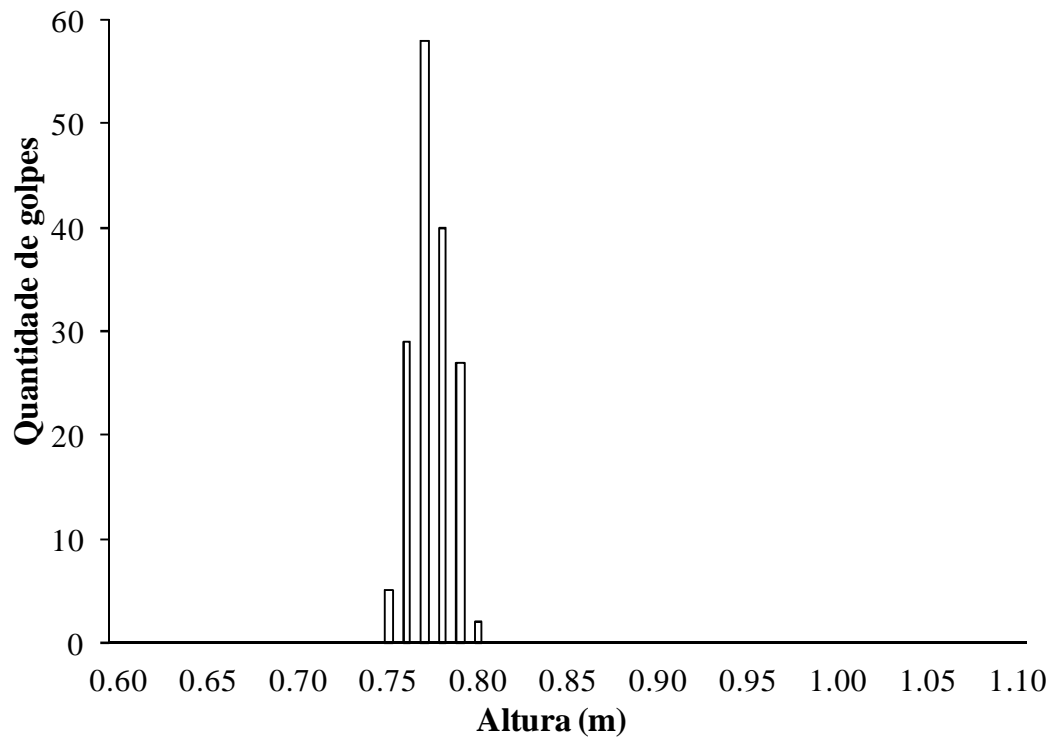


Figura 6.30 – Distribuição de frequências de altura de queda da Equipe 7.

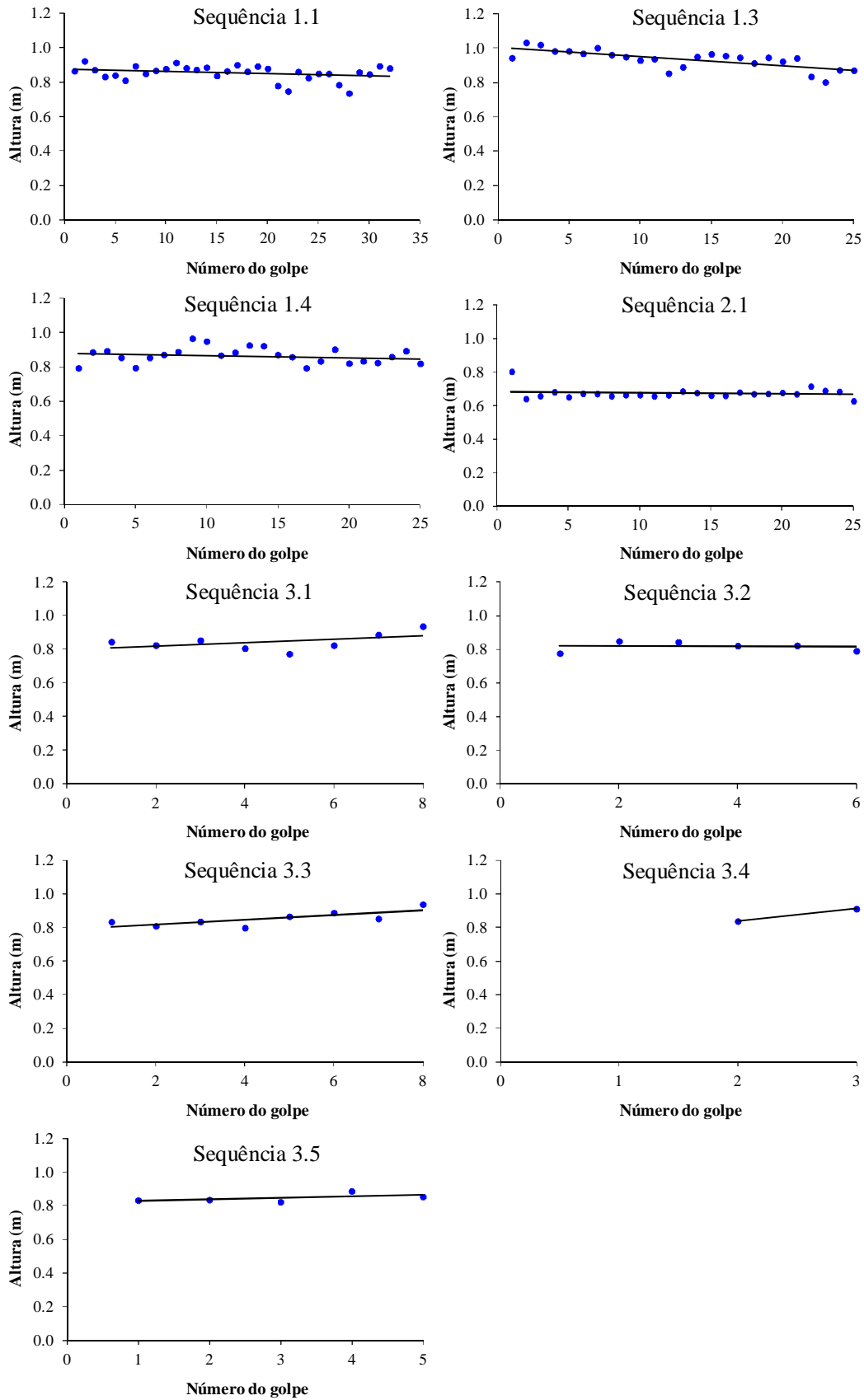


Figura 6.31 – Alturas de queda medidas das Equipes 1, 2 e 3.

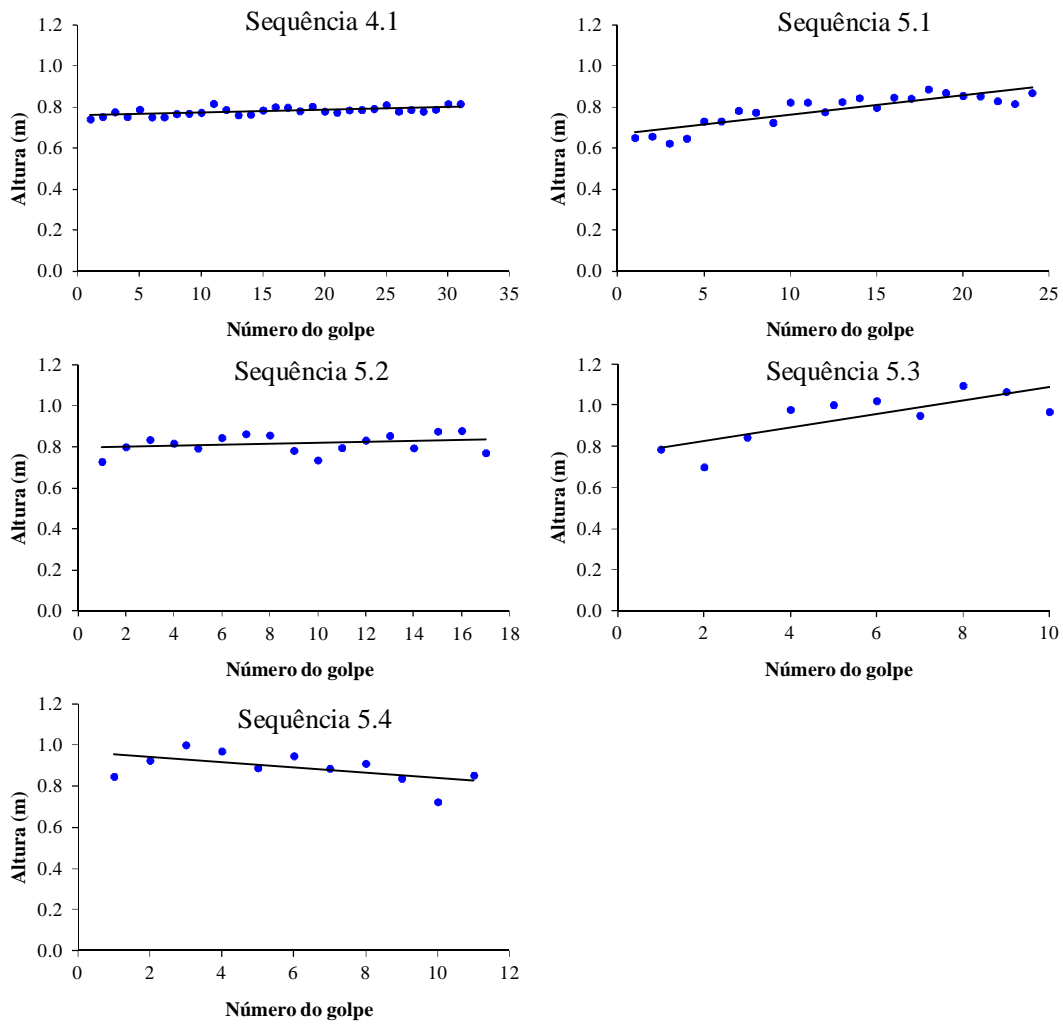


Figura 6.32 – Alturas de queda medidas das Equipes 4 e 5.

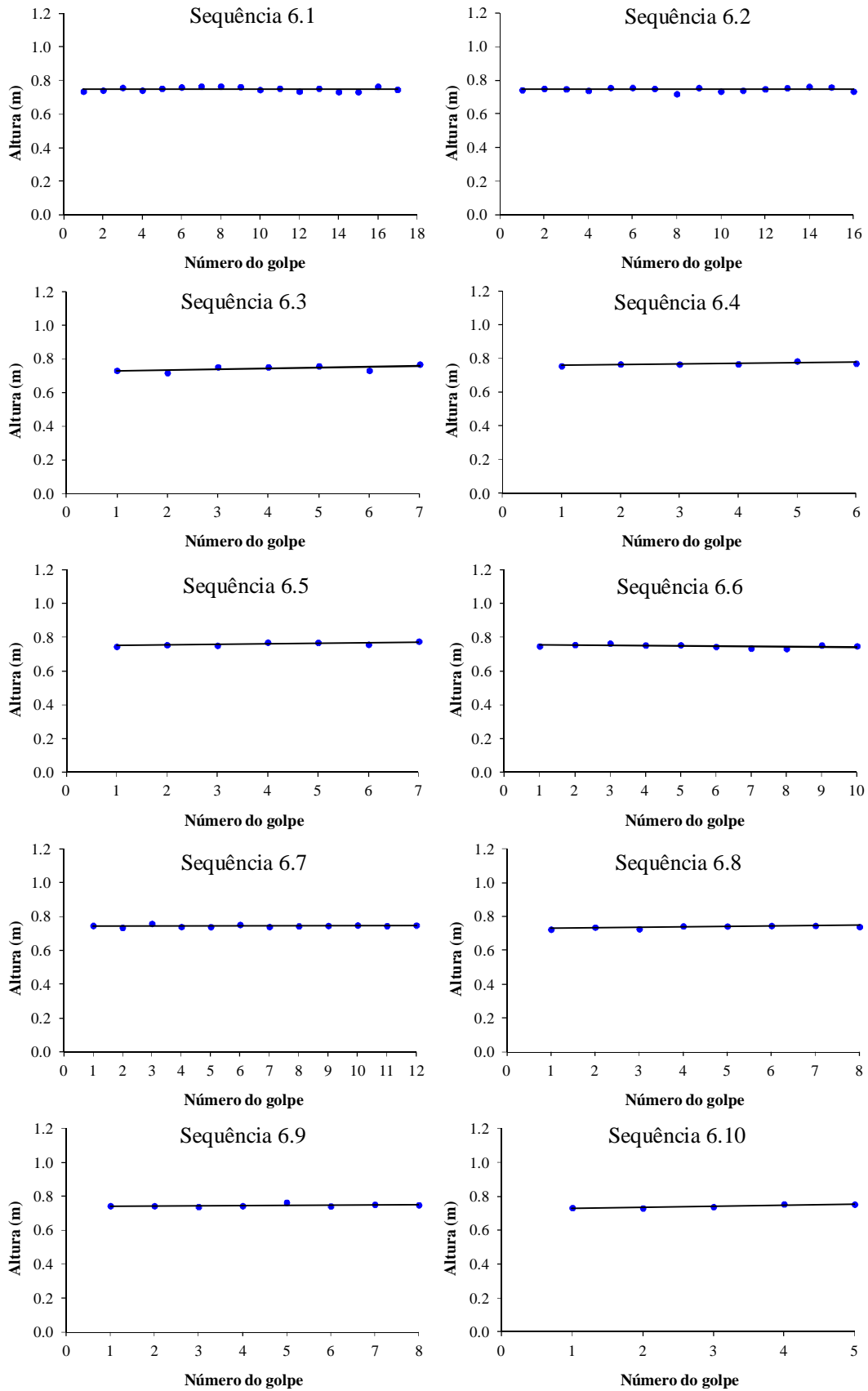


Figura 6.33a – Alturas de queda medidas da Equipe 6 (Sequências 6.1 a 6.10).

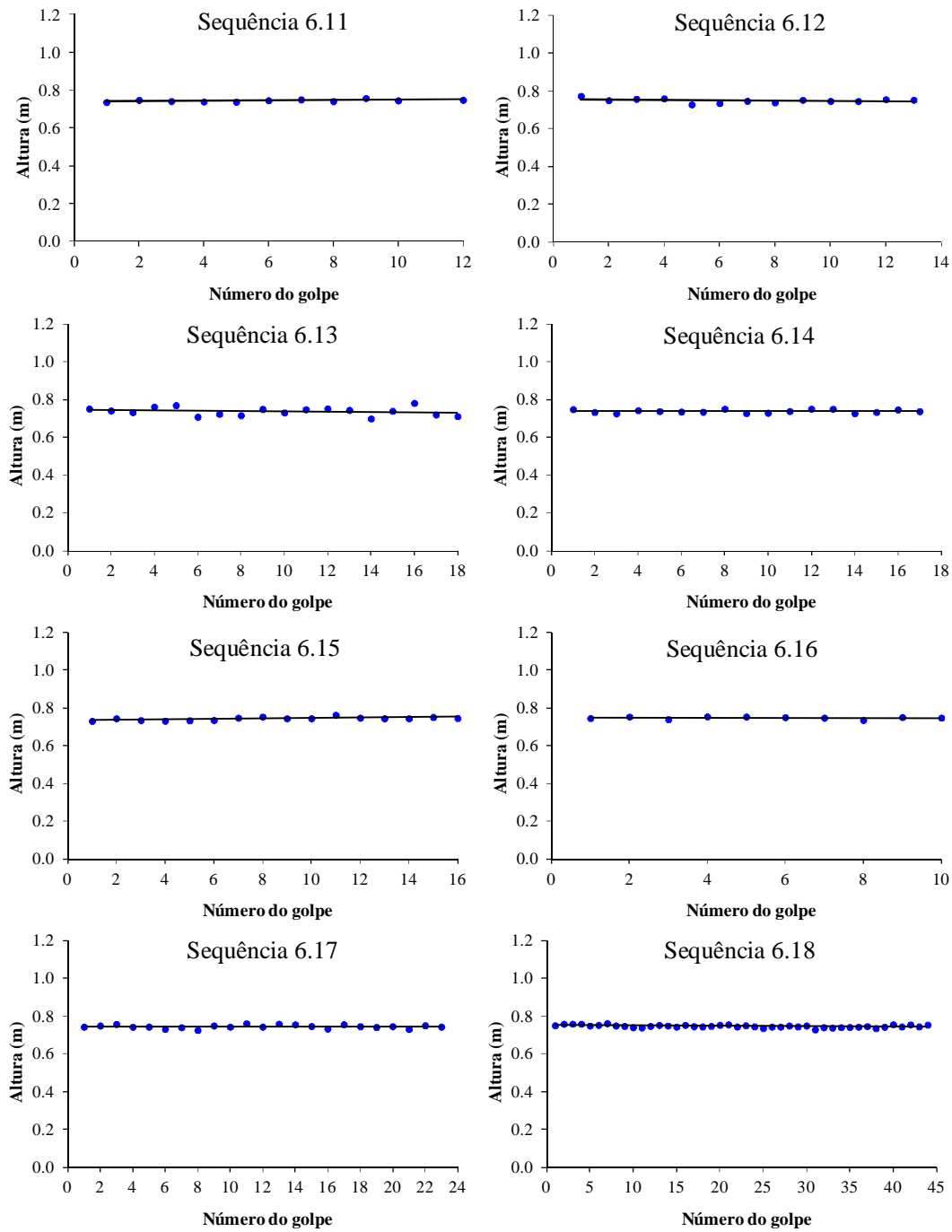


Figura 6.33b – Alturas de queda medidas da Equipe 6 (Sequências 6.11 a 6.18).

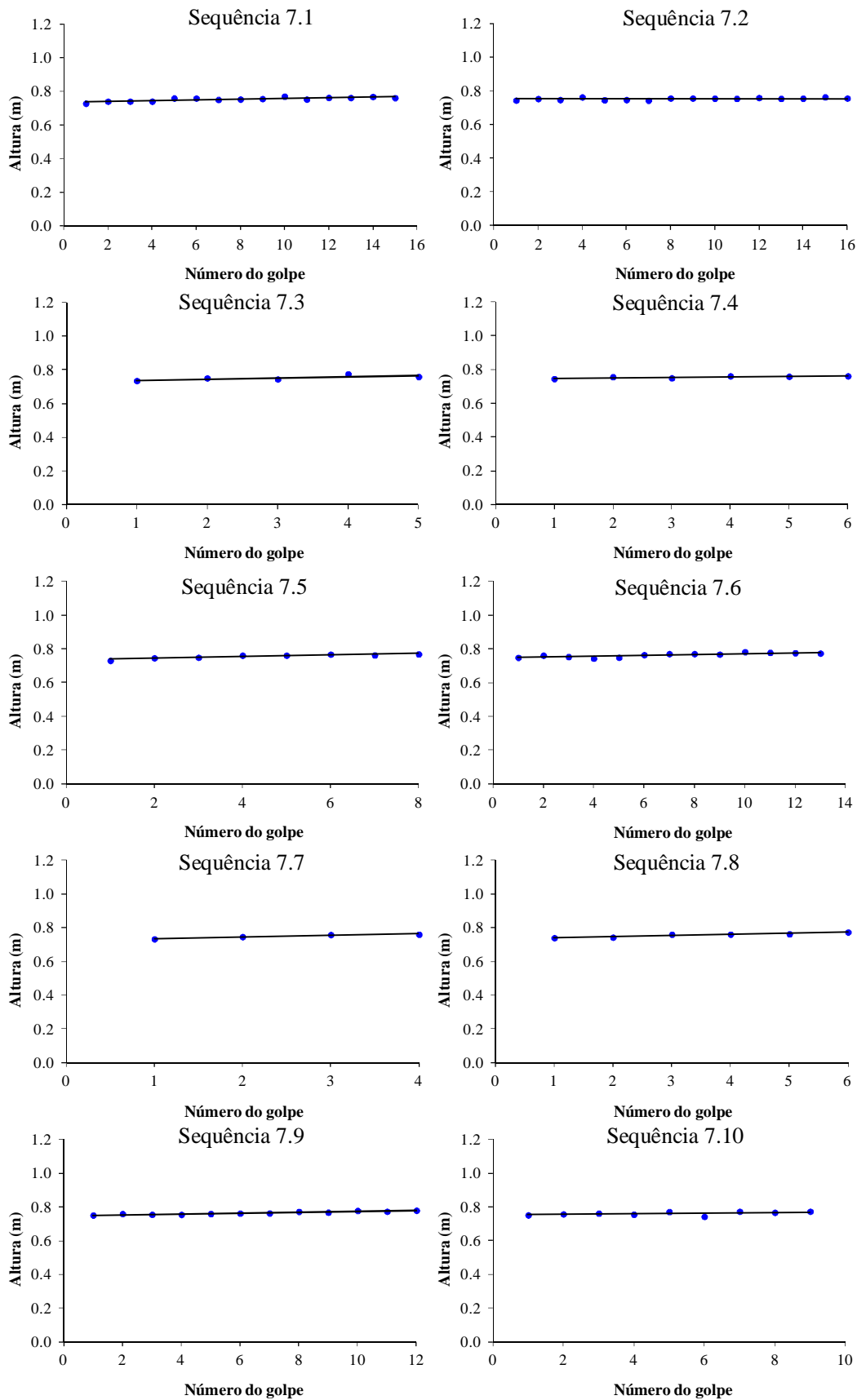


Figura 6.34a – Alturas de queda medidas da Equipe 7 (sequências 7.1 a 7.10).

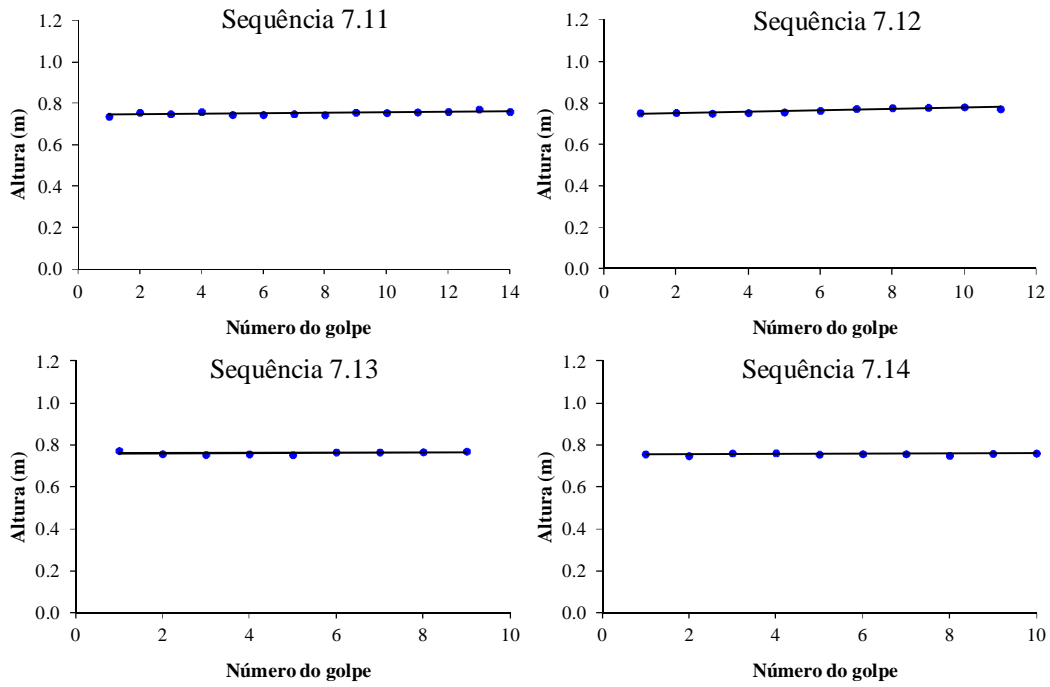


Figura 6.34b – Alturas de queda medidas da Equipe 7 (sequências 7.11 a 7.14).

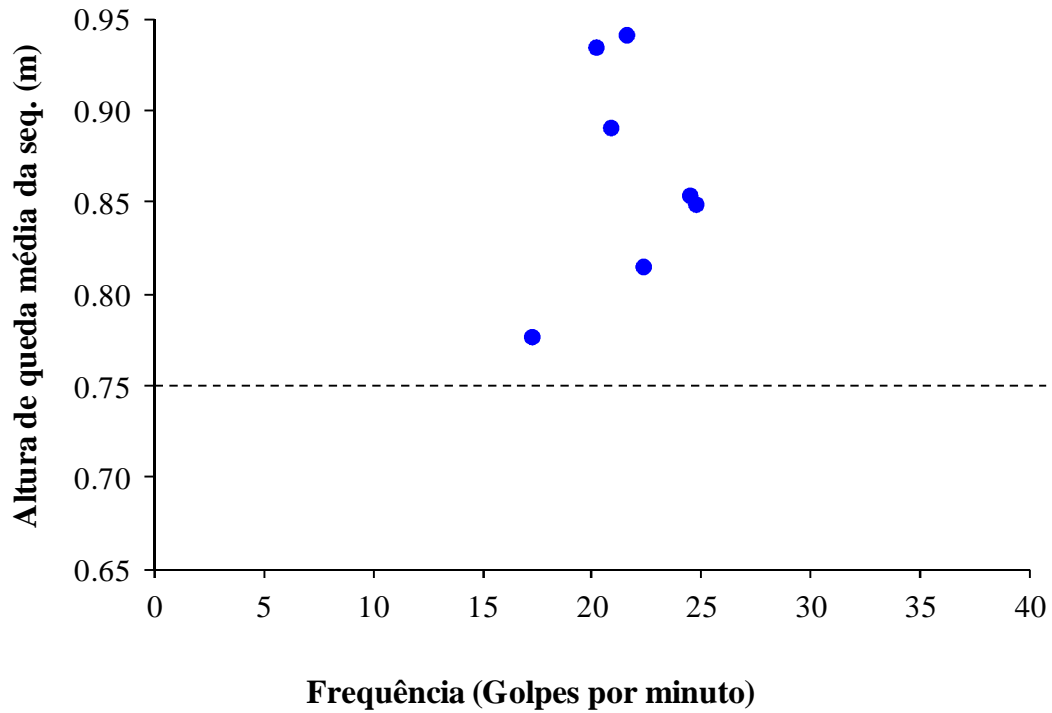


Figura 6.35 – Alturas de queda em função da frequência de golpes por minuto – Equipes que utilizaram sistema manual de levantamento e soltura (Equipes 1 e 5).

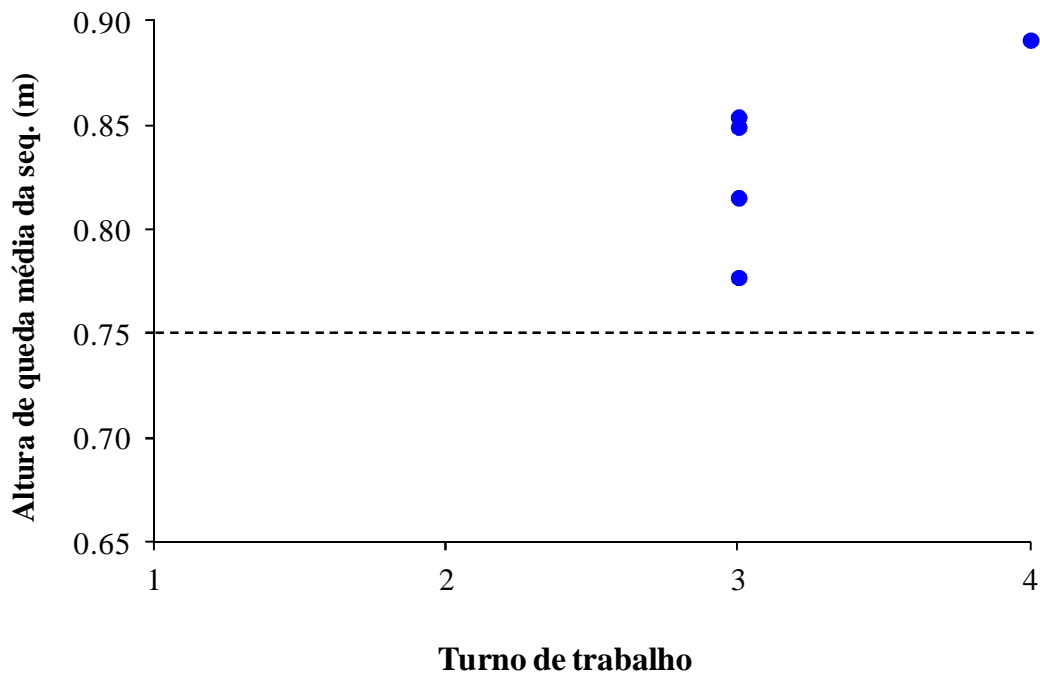


Figura 6.36 – Alturas de queda em função do turno (Turno 1 – das 8 às 10 horas; Turno 2 – das 10 às 12 horas; Turno 3 – das 14 às 16 horas; Turno 4 – das 16 às 18 horas) – Equipes que utilizaram sistema manual de levantamento e soltura (Equipes 1 e 5).

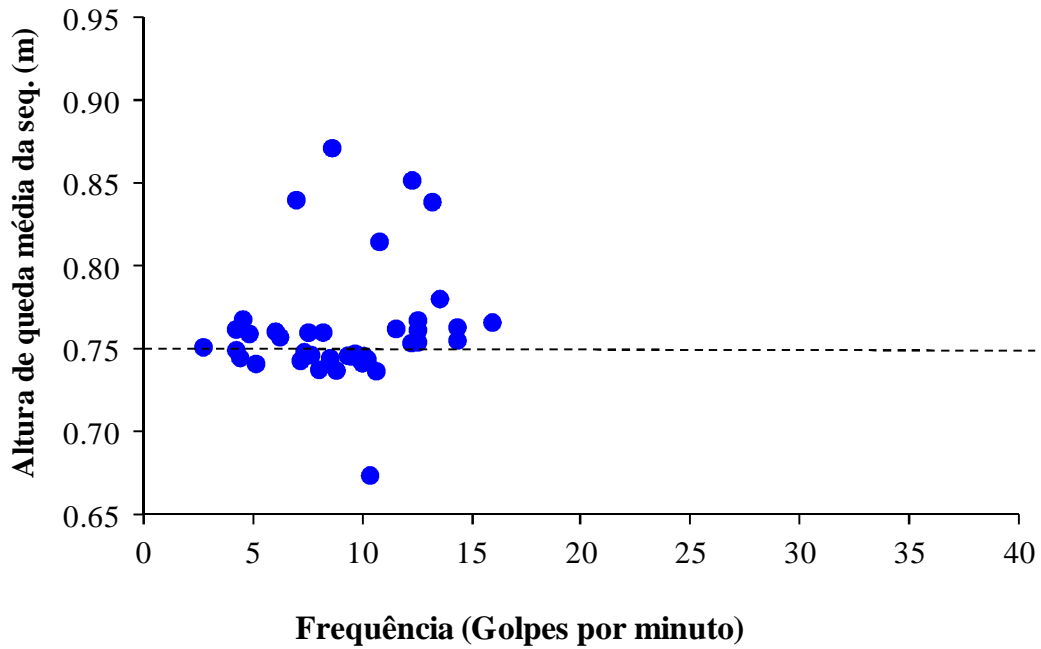


Figura 6.37 – Alturas de queda em função da frequência de golpes por minuto – Equipes que utilizaram sistema mecanizado de levantamento e soltura (Equipes 2, 3, 4, 6 e 7).

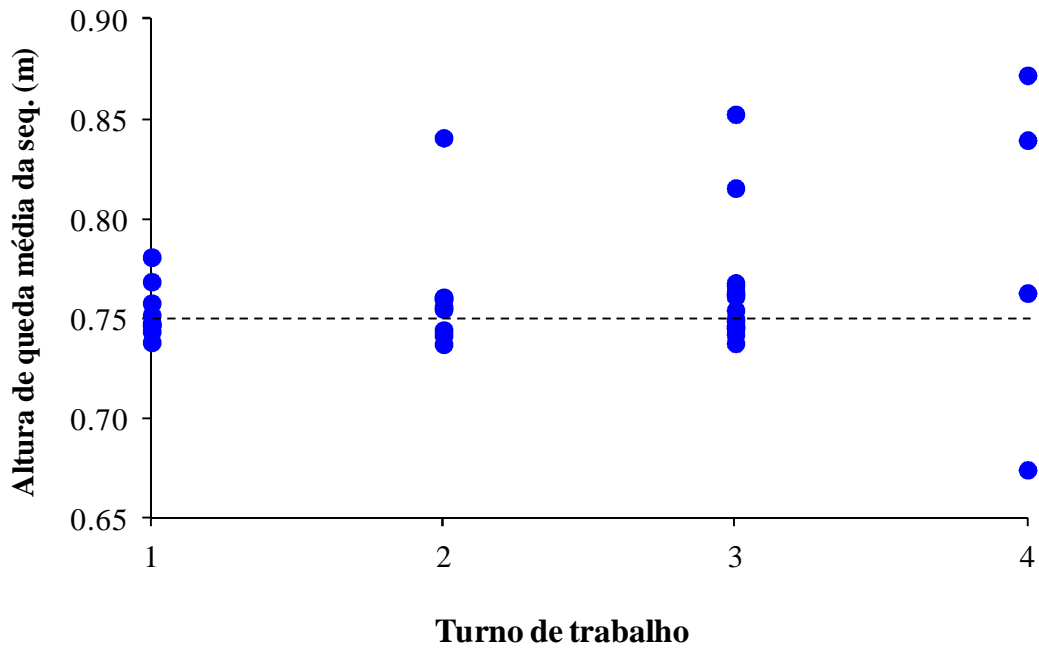


Figura 6.38 – Alturas de queda em função do turno (Turno 1 – das 8 às 10 horas; Turno 2 – das 10 às 12 horas; Turno 3 – das 14 às 16 horas; Turno 4 – das 16 às 18 horas) – Equipes que utilizaram sistema mecanizado de levantamento e soltura (Equipes 2, 3, 4, 6 e 7).

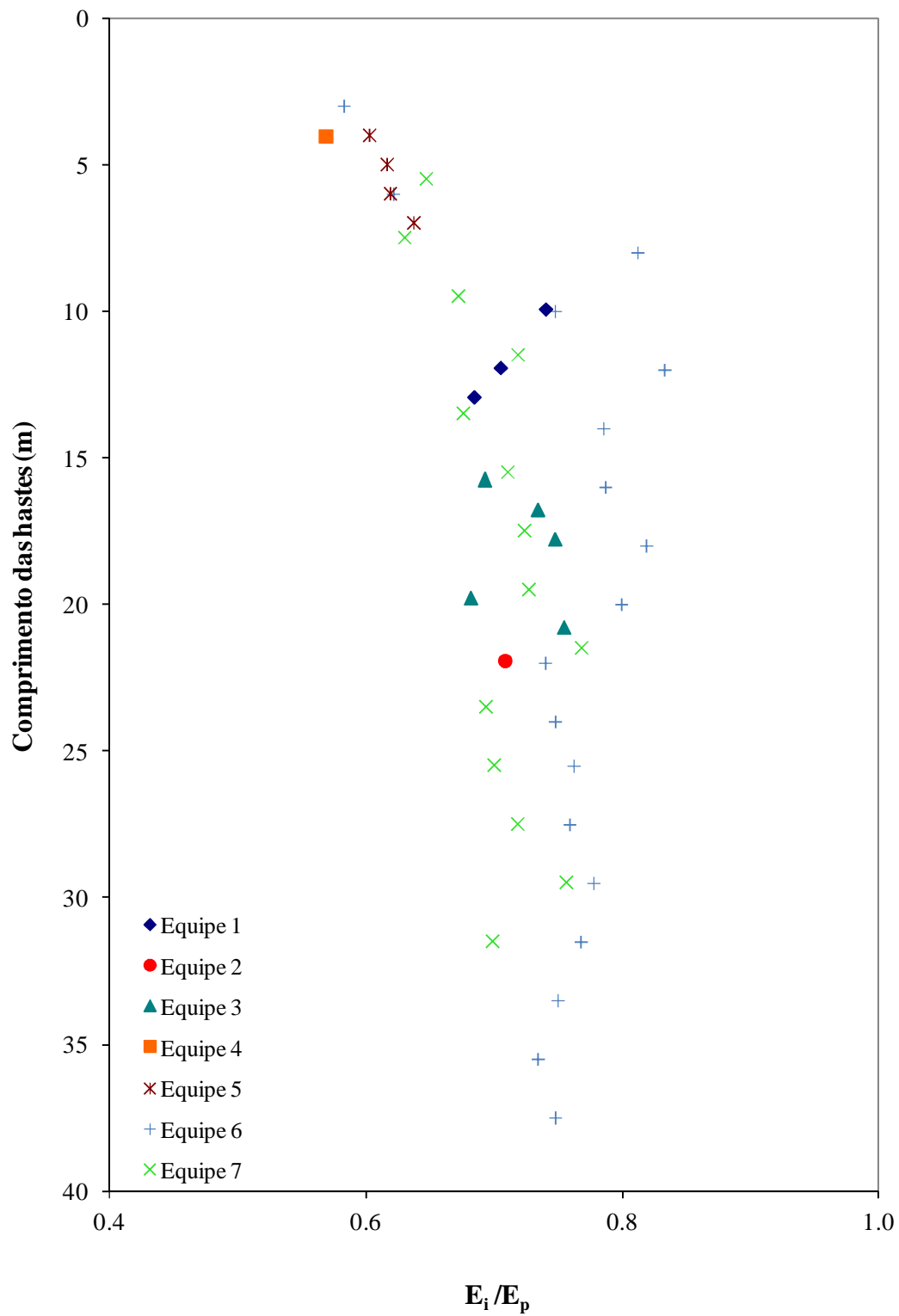


Figura 6.39 – Energia no topo das hastes normalizada pela energia potencial real (E_i/E_p), em função do comprimento de hastes.

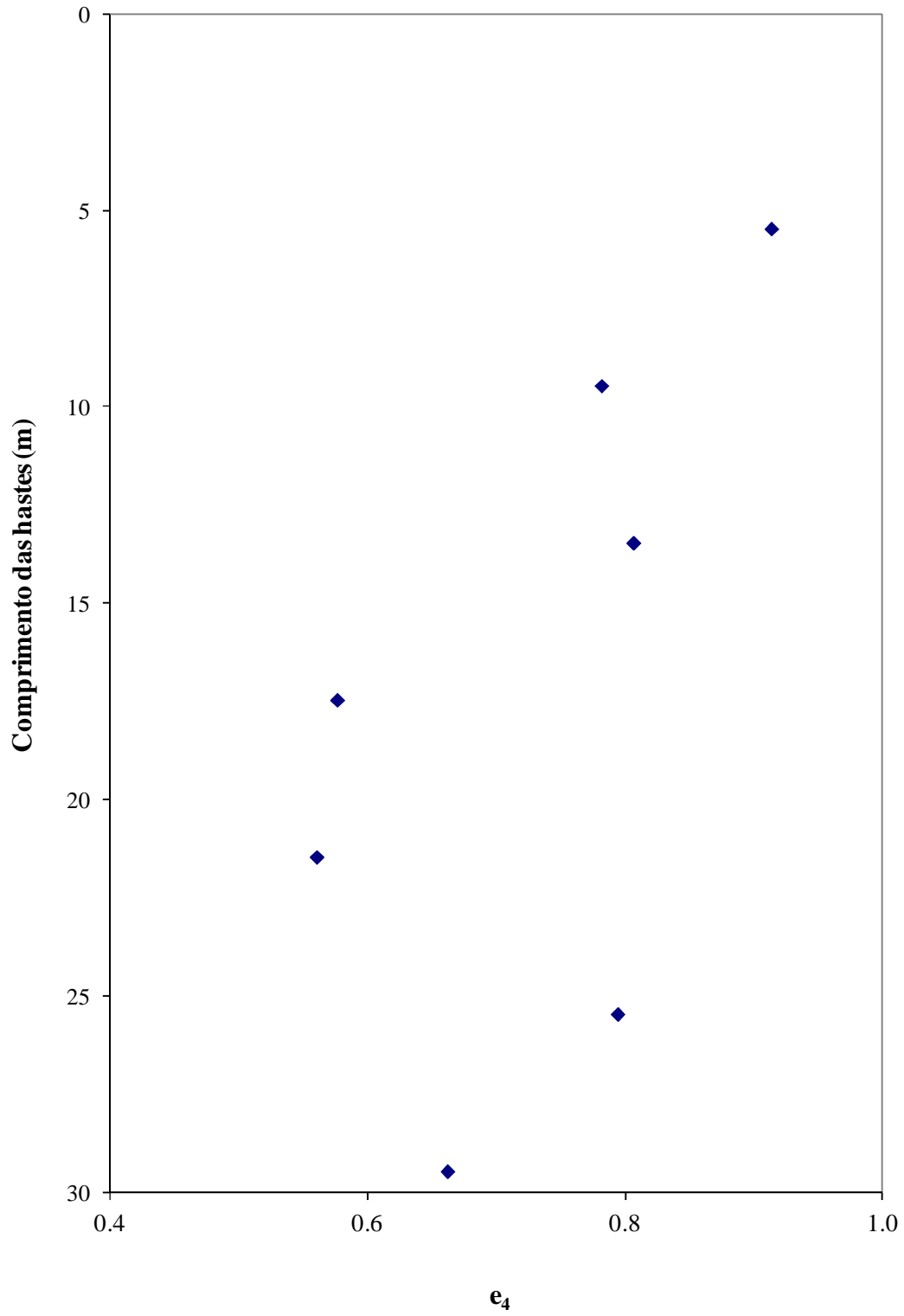


Figura 6.40 – Fator e_4 em função do comprimento de hastes.

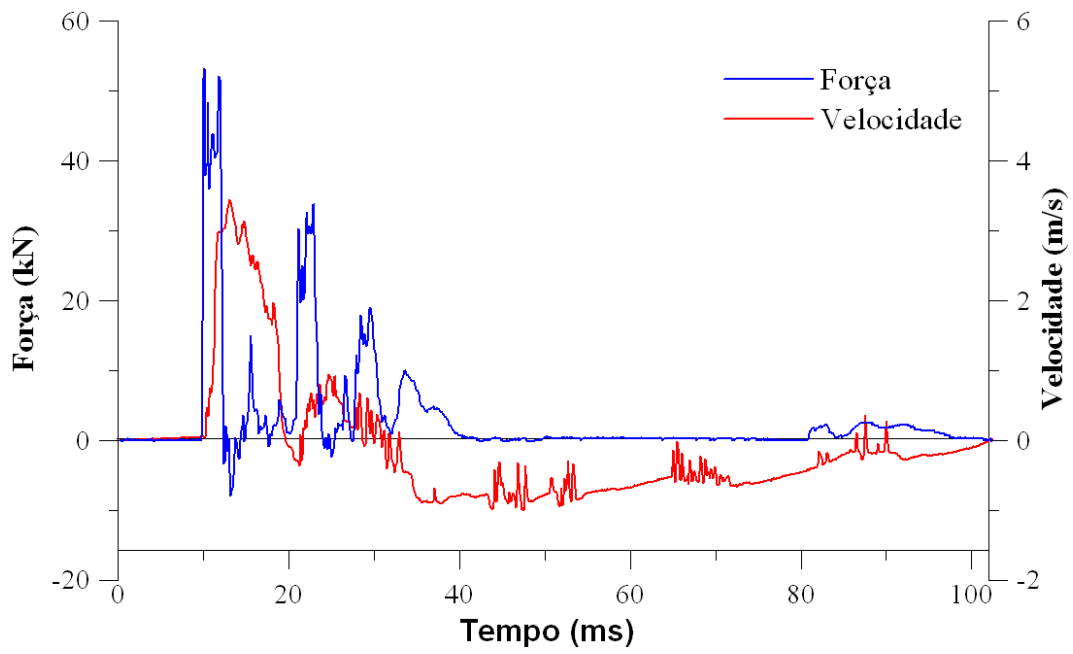


Figura 6.41 – Sinais de força e velocidade medidos no topo da composição de hastes (Golpe 14 da Sequência 7.1).

6.3.4 Análise dos resultados

A altura de queda média de todas as sequências de Itaguaí variou de 67 a 94 cm (diferença de 27 cm), com energias potenciais de soltura variando de 430,0 a 600,3 J, diferença de 40% (ver Tabela 6.4). Desse conjunto de dados percebe-se dois cenários distintos: i) para as equipes que utilizam sistema manual de levantamento e soltura; ii) para as equipes que utilizaram sistema mecanizado e levantamento de soltura.

Nas equipes que utilizaram o sistema manual de levantamento e soltura, Equipes 1 e 5, são verificadas as sequências com alturas de queda mais distantes da prescrita na NBR-6484/2001 (75 cm), muitas vezes superiores a 80 cm. As alturas de queda médias das Equipes 1 e 5, considerando-se todos os seus golpes, são 87 e 83 cm (ver Tabela 6.7), respectivamente. Além disso, as Equipes 1 e 5 apresentavam as sequências com maiores dispersões, com desvios padrão chegando a 13 cm. A altura de queda média das equipes que utilizaram sistema manual é de 86 cm, com desvio padrão de 8 cm.

As equipes que utilizaram o sistema mecanizado de levantamento e soltura, Equipes 2, 3, 4, 6 e 7 apresentaram as sequências com menores dispersões, com desvios padrão variando de 0 a 6 cm. De um modo geral, essas cinco equipes também apresentaram valores de altura de queda mais próximos do prescrito em norma, com exceção das Equipes 2 e 3. Aparentemente, a Equipe 2 cometeu um erro na marcação da altura de queda na haste guia, marcando 65 cm em vez de 75 cm, mas manteve a tendência de levantar o martelo numa altura próxima da marcação, com média de 67 cm e desvio padrão de 3 cm.

As Equipes 6 e 7 foram descritas por membros da empresa em que trabalham como as formadas por profissionais mais qualificados. Suas alturas de queda médias medidas são de 75 e 76 cm, respectivamente, ambas com desvio padrão de 1 cm.

Considerando todos os golpes com sistema mecanizado, a altura de queda média é de 75 cm, com desvio padrão de 3 cm. Cabe ressaltar que o número de golpes aplicados pelas Equipes 6 e 7 (415 golpes) é muito superior ao aplicado pelas Equipes 2, 3 e 4 (87 golpes), o que afetou os valores de média e desvio padrão.

Nas equipes que utilizaram sistema manual de levantamento e soltura há uma tendência bem definida de variação da altura de queda ao longo dos golpes. A Equipe 1 mostrou

tendência de reduzir a altura de queda ao longo dos golpes, nas três sequências analisadas. A Equipe 5 mostra a tendência contrária, de aumento na altura de queda, em três das quatro sequências analisadas, ver Figuras 6.31 e 6.32. É provável que o cansaço da equipe cause esse relaxamento no controle da altura de queda, em ambos os casos.

Nas equipes que utilizaram sistema mecanizado de levantamento e soltura verifica-se uma tendência de pequena variação na altura de queda, na maioria dos casos com aumento da altura no decorrer da sequência, ver Figuras 6.32, 6.33a, 6.33b, 6.34a, 6.34b.

Nos ensaios realizados com sistema manual de levantamento e soltura as frequências médias de aplicação dos golpes variaram de 17,2 a 24,7 golpes/min (Figura 6.35), diferença de 44%. Nesse caso, não se verificou uma tendência clara de aumento ou redução da frequência de aplicação dos golpes para sequências mais curtas ou mais longas. A frequência média de aplicação dos golpes dos ensaios com sistema manual é de 21,6 golpes/min, com desvio padrão de 2,6 golpes/min. Esses valores são inferiores aos encontrados nos ensaios de Sarapuí II, mas estão na mesma ordem de grandeza.

Nos ensaios realizados com sistema mecanizado de levantamento e soltura as frequências médias de aplicação dos golpes variaram de 2,7 a 15,9 golpes/min (Figura 6.37), diferença de mais de 400%. Aqui também não se verificou uma tendência clara de aumento ou redução da frequência de aplicação dos golpes para sequências mais curtas ou mais longas. A frequência média de aplicação dos golpes nesses ensaios é de 9,1 golpes/min, com desvio padrão de 3,3 golpes/min.

As frequências de aplicação dos golpes com o sistema manual, em média, valem mais que o dobro das frequências com o sistema mecanizado. Cabe lembrar que a ISSMFE (1989) recomenda uma frequência de 30 golpes por minuto. Além disso, Seed *et al.* (1985) defendem que a variação da frequência de golpes pode afetar os valores de N_{SPT} , a depender das características do solo.

As Figuras 6.35 e 6.37 mostram uma tendência de maior diferença na altura de queda, em relação à altura padrão, com o aumento da velocidade de aplicação dos golpes, tanto em ensaios com sistema manual quanto em ensaios com sistema mecanizado.

Nos ensaios realizados com sistema mecanizado de levantamento verifica-se uma tendência de aumento da diferença da altura de queda, em relação à altura padrão, no decorrer do dia, ver Figura 6.38. Não foi possível avaliar essa tendência nos ensaios realizados com sistema manual em Itaguaí, já que esses ensaios foram executados quase exclusivamente no mesmo turno, ver Figura 6.36.

A velocidade média de impacto do martelo variou de 3,32 a 3,90 m/s (energias cinéticas de 359,6 e 497,0, respectivamente) nas equipes que utilizaram sistema manual de levantamento. Já nas equipes que utilizaram sistema mecanizado de levantamento, a velocidade de impacto variou de 3,23 a 3,64 m/s (energias cinéticas de 340,4 e 431,2 J, respectivamente), ver Tabelas 6.4, 6.5 e 6.6.

O fator de eficiência e_1 (E_c/E^*) nas equipes que utilizaram sistema manual de levantamento variou de 0,75 a 1,04. O limite inferior está próximo dos valores encontrados por Cavalcante *et al.* (2011) e o limite superior é significativamente maior que os valores apresentados por Décourt (1989).

Nos ensaios com o sistema mecanizado de levantamento o fator e_1 variou de 0,71 a 0,90. Esses valores variam numa faixa mais ampla que a apresentada por Décourt (1989), considerando uma volta da corda em torno de um tambor com diâmetro de 125 mm.

Os valores de e_1^* (E_c/E_p) nos ensaios que utilizaram o sistema manual de levantamento variaram numa faixa menos ampla, de 0,73 a 0,87, sendo que a maioria dos valores está entre 0,82 e 0,87, ficando dentro da faixa de valores apresentada por Décourt (1989), para sistema manual de levantamento.

Os ensaios em Sarapuí II foram realizados com corda de sisal no sistema de levantamento e soltura e apresentaram valores de e_1^* variando de 0,86 a 0,99, acima dos valores de e_1^* das equipes com sistema manual de levantamento em Itaguaí, que utilizaram cabo de aço. Esses resultados contrariam as observações de Belincanta e Cintra (1998), que mostraram que o cabo de aço é de 1,7% a 3,6% mais eficiente que a corda de sisal.

Os valores de e_1^* nos ensaios que utilizaram o sistema mecanizado de levantamento variaram de 0,72 a 0,89. Esses valores variam numa faixa mais ampla que a apresentada

por Décourt (1989), considerando uma volta da corda em torno de um tambor com diâmetro de 125 mm.

As energias no topo da composição de hastes (E_i) variaram de 278,6 (eficiência de 58% em relação à energia potencial teórica) a 441,0 (eficiência de 92% em relação à energia potencial teórica), diferença de 37%, ver Tabelas 6.4, 6.5 e 6.6.

Essa significativa diferença na energia transferida à composição de hastes é consequência, principalmente, da grande variação na altura de queda do martelo, já que as equipes com menor dispersão na altura de queda (Equipes 4, 6 e 7) apresentam menor desvio padrão nos valores de E_i , ver Tabela 6.7. Desse modo, os valores de N_{SPT} obtidos por equipes diferentes podem possuir significados distintos. Em alguns casos, quando a variação de E_i é significativa entre sequências de golpes de uma mesma equipe, como aconteceu nos ensaios em Sarapuí II, seus resultados também podem ter significados distintos. Por isso, é fundamental o desenvolvimento de mecanismos para melhorar o controle da altura de queda nos ensaios SPT brasileiros.

Os resultados das Equipes 6 e 7 do caso de Itaguaí mostram que é possível a realização de ensaios com alturas de queda próximas à padrão.

Quando a eficiência da energia no topo da composição de hastes é calculada em relação à energia potencial medida, esta varia numa faixa significativamente menor, de 57% a 83%, ver Tabelas 6.4, 6.5 e 6.6.

O fator e_2 (E_i/E_c) é influenciado principalmente pela massa da cabeça de bater. Nesse sentido, as equipes de sondagem acompanhadas em Itaguaí foram divididas em dois grupos: i) equipes com cabeça de bater mais leve (massa variando de 1,1 a 1,5 kg) – Equipes 1, 2 e 3; ii) equipes com cabeça de bater mais pesada (massa de 3,7 kg) – Equipes 4, 5, 6 e 7, ver Tabela 6.3.

As equipes com cabeça de bater mais leve apresentaram fator e_2 variando de 0,79 a 0,95. Esses valores estão, em sua maioria, dentro da faixa apresentada por Décourt (1989).

As equipes com cabeça de bater mais pesada apresentaram fator e_2 variando de 0,70 a 0,96. Esses valores estão, em grande parte, dentro da faixa apresentada por Décourt (1989).

Conforme já dito no item 6.2.4, é possível que altos valores do fator e_2 estejam associados à descida da composição de hastes durante o impacto do martelo, o que gera um acréscimo de energia potencial, que é transferida às hastes nos impactos subsequentes do martelo no mesmo golpe. Esse fenômeno é mais importante em solos de baixa resistência. O SPT Analyzer é capaz de medir toda a energia transferida à composição de hastes, desde que o processo ocorra em até 102 ms. No entanto, a energia cinética é calculada em relação ao primeiro impacto do martelo com a cabeça de bater, o que pode superestimar valores de e_2 em caso de outros impactos.

Os resultados de E_i/E_p em função do comprimento de hastes, medidos pelas sete equipes de sondagem em Itaguaí, e apresentados na Figura 6.39, mostram dois cenários. Para hastes com comprimentos inferiores a 7,98 m, parece haver um crescimento na energia transferida às hastes com o aumento do seu comprimento. Para hastes com comprimentos variando de 7,98 m a 37,49 m, a energia transferida à composição de hastes não é significativamente afetada pelo seu comprimento.

O trecho inferior (entre 7,98 m e 37,49 m) apresenta comportamento semelhante ao observado em Sarapuí II, e que corrobora o defendido por Danziger *et al.* (2008), que afirmam que a energia transmitida ao topo da composição de hastes independe de seu comprimento, e o fator e_3 deve ser considerado igual a 1,00.

O observado no trecho com comprimento inferior a 7,98 m pode ter duas explicações:

- i) O SPT Analyzer não foi capaz de medir a energia transferida à composição de hastes durante seu tempo de aquisição, subestimando os valores de E_i ;
- ii) Em composições de hastes com comprimento inferior ao crítico, a energia não seria transferida do mesmo modo que seria em composições de hastes mais longas.

Apenas utilizando um sistema de aquisição de dados para medição de sinais de força e velocidade com tempo de aquisição maior é possível esclarecer essa dúvida.

Os valores de E_s variaram de 199,7 J (eficiência de 42% em relação às energias padrão e potencial real) a 284,2 J (eficiência de 65% em relação às energias padrão e potencial real). O valor médio de E_s , considerando-se todas as sequências realizadas pela Equipe 7, é de 255,8 J (eficiência de 53% em relação às energias padrão e potencial real), com desvio padrão de 51,8 J.

Os valores de e_4 , que variaram de 0,56 a 0,91, são apresentados na Figura 6.40. Apesar da dispersão nos seus valores, a tendência é de redução de e_4 com o aumento da profundidade.

6.4 COMPARAÇÃO DE VALORES MEDIDOS COM A LITERATURA

As Figuras 6.42, 6.43 e 6.44 mostram, respectivamente, valores de e_1 , e_1^* e e_2 , encontrados na presente pesquisa, nos ensaios realizados em Sarapuí II e Itaguaí, juntamente com valores apresentados por Décourt (1989) e Cavalcante *et al.* (2011). É possível observar que os valores de e_1 e e_1^* da presente pesquisa estão acima dos valores apresentados por Cavalcante *et al.* (2011) e variam numa faixa mais ampla que os valores apresentados por Décourt (1989), ver Figuras 6.42 e 6.43.

Os valores de e_2 encontrados nas campanhas de Sarapuí e Itaguaí encontram-se, em grande parte, dentro da faixa de valores apresentada por Décourt (1989), ver Figura 6.44.

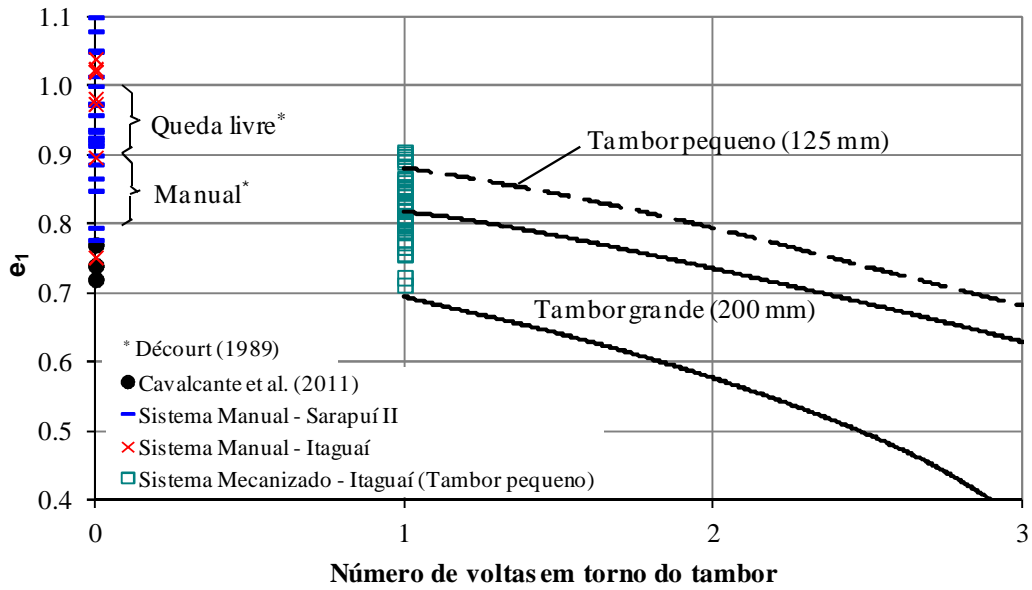


Figura 6.42 – Valores de fator de eficiência e_1 (adaptado de Skempton, 1986, Décourt, 1989 e Cavalcante et al., 2011).

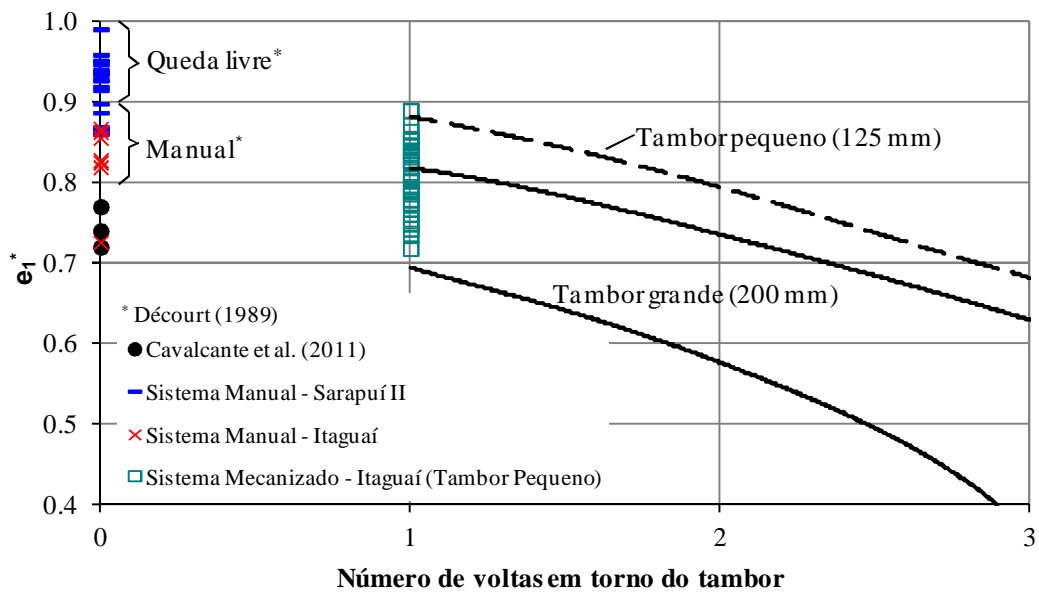


Figura 6.43 – Valores de fator de eficiência e_1^* (adaptado de Skempton, 1986, Décourt, 1989 e Cavalcante et al., 2011).

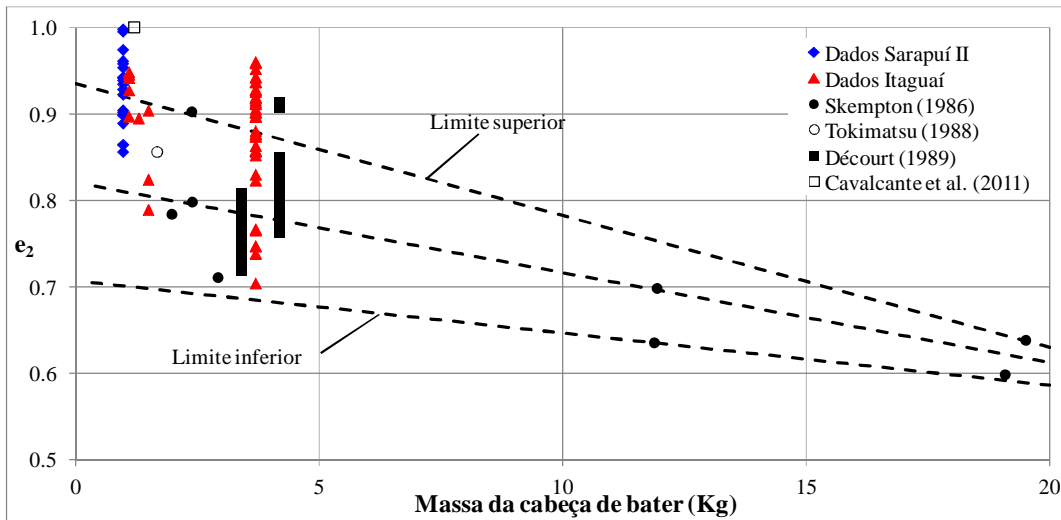


Figura 6.44 – Fator de eficiência e_2 em função da massa da cabeça de bater (adaptado de Décourt, 1989 e Cavalcante et al., 2011).

CAPÍTULO 7

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS EM CÂMARA DE CALIBRAÇÃO

7.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Durante a presente pesquisa foram realizados cinco tipos de ensaios de penetração em câmara de calibração, com objetivos principais de estudar o fenômeno do embuchamento no amostrador SPT e de comparar as cravações estática e dinâmica. Os tipos de ensaios realizados foram:

- i. cone (CPT);
- ii. cravação estática do amostrador SPT;
- iii. cravação estática do novo amostrador;
- iv. cravação dinâmica do amostrador SPT;
- v. cravação dinâmica do novo amostrador.

Em todos os ensaios foi utilizada a areia de Hokksund seca ao ar, sendo realizados dois ensaios de cada tipo, sempre utilizando amostras de areia com duas compacidades diferentes.

Nos dez ensaios, que foram realizados na câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ, foi utilizada a condição de contorno BC 3 (deformação lateral nula e tensão vertical constante).

Nos ensaios dinâmicos foi medida a energia no topo da composição de hastes com o sistema SPT Analyzer (ver item 4.3). Além disso, foi obtida a altura de queda e a velocidade de impacto do martelo, através de filmagens com uma câmera de alta velocidade (ver item 4.1).

Foi desenvolvido para a presente pesquisa um amostrador instrumentado, dotado de células de tensão total, a fim de estudar o estado de tensões no interior do amostrador durante a cravação (ver Capítulo 5).

7.2 ENSAIOS DE CONE (CPT)

7.2.1 *Considerações iniciais*

Na presente pesquisa os ensaios de cone têm duas finalidades:

- i. aferir o perfeito funcionamento da câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ após o processo de recuperação, posto que outros ensaios de cone já haviam sido conduzidos nessa câmara (e.g., Parkin e Lunne, 1982, Last et al., 1987, Zohrabi, 1993), inclusive utilizando a mesma areia de Hokksund seca ao ar;
- ii. estabelecer correlações entre os resultados do ensaio de cone, que já possui métodos de interpretação confiáveis, e os demais ensaios realizados.

7.2.2 *Características dos ensaios*

Foi utilizado nos dois ensaios o piezocone COPPE IV (ver item 3.8), com medida de resistência de ponta e atrito lateral. A penetração do cone foi medida através de um medidor de profundidade (ver Figura 7.1). No Anexo 3 é apresentada a curva de calibração do medidor de profundidade.

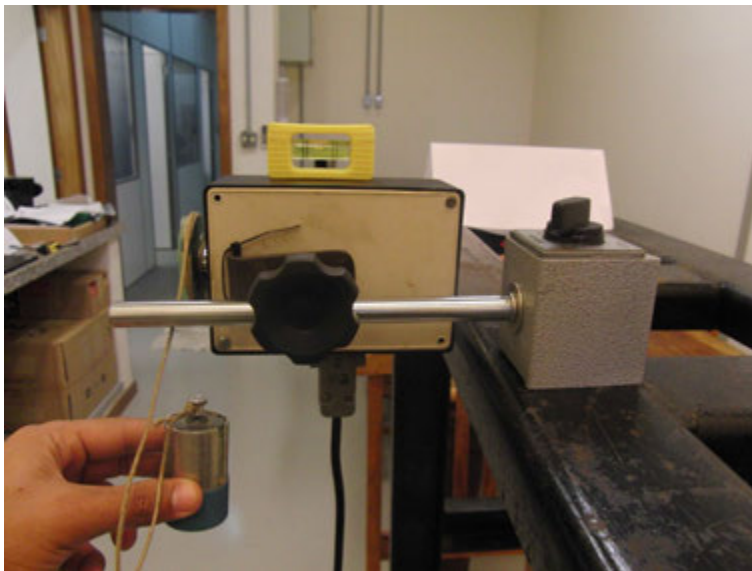


Figura 7.1 – Medidor de profundidade.

A execução dos ensaios em câmara de calibração seguiu, de modo geral, o descrito no item 3.5, apenas com pequenas modificações, que serão descritas a seguir.

A areia foi erguida para a pesagem e posteriormente transportada para o pluviador dentro de sacos com capacidade de 5 kN, ver Figura 7.2. Esses sacos substituíram os silos metálicos originais do sistema da câmara, em função da falta de espaço vertical para a manobra dos silos.

Na pesagem foi utilizado um dinamômetro com capacidade de 20 kN, ver Figura 7.2. No Anexo 4 é apresentada a curva de calibração do dinamômetro, que foi realizada com auxílio de prensa, para cargas de tração de até 8 kN.



Figura 7.2 – Processo de pesagem da amostra de areia.

Na pluviação da amostra para os dois ensaios de cone foram utilizadas placas perfuradas diferentes. Em função da quantidade limitada de areia da Hokksund, cerca de 2800 kg, optou-se por realizar ensaios com a placa com maiores furos e a terceira placa com maiores furos, ou seja, aquelas que produziram a amostra mais fofa e a terceira amostra mais fofa (ou mais compacta, visto que são disponíveis cinco placas perfuradas), respectivamente. As mesmas placas foram utilizadas nos outros tipos de ensaios. A

Figura 7.3 mostra a câmara de calibração NGI-COPPE/UFRJ após a pluviação e nivelamento da amostra de areia.

Durante a fase de carregamento da amostra, a tensão vertical foi aumentada em incrementos, até se atingir o valor de tensão desejado. Após cada incremento de tensão vertical, a pressão da célula de cavidade era igualada à pressão da célula lateral, para que a condição BC3 fosse atendida. Foram necessários cerca de 20 minutos em cada estágio para que a pressão nas células ficasse estável.

O primeiro ensaio (Ensaio 1.1) foi realizado com uma tensão vertical de cerca de 30 kPa no topo da amostra, a fim de testar o funcionamento do equipamento. No segundo ensaio (Ensaio 1.2) adotou-se uma tensão vertical no topo da amostra de cerca de 60 kPa, com objetivo de compará-lo com ensaios realizados por Last et al. (1987), realizados sob mesma tensão. Os demais tipos de ensaios foram realizados com tensão vertical no topo da amostra de cerca de 60 kPa.

Em nenhum ensaio a amostra de areia foi sobreadensada antes da cravação do penetrômetro.



Figura 7.3 – Amostra de areia após pluviação e nivelamento.

O sistema de cravação utilizado nos ensaios, que é o original da câmara de calibração e passou por reparos, possui velocidade regulável. Assim foi necessário calibrar a sua velocidade de cravação em função das posições da sua chave seletora. Para isso, foram filmadas, com uma câmera de alta velocidade, cravações nas diversas posições da chave seletora do equipamento. No Anexo 5 é apresentada a curva de calibração obtida. Todos os ensaios de cravação estática (CPT, amostrador SPT e novo amostrador) foram realizados com uma velocidade de 2,0 cm/s. Essa velocidade foi conferida em todos os ensaios através de filmagens.

A Figura 7.4 mostra a montagem de um dos dois ensaios de cone realizados na presente pesquisa.



Figura 7.4 – Montagem de ensaio de cone em câmara de calibração.

A Figura 7.5 apresenta a amostra de areia após a realização de um ensaio de cone. Ao final do ensaio, um tubo de PVC de 75 mm de diâmetro é introduzido na parte central da amostra, a fim de evitar que as partículas de areia que sofreram quebra durante a cravação do penetrômetro se misturem com o restante da amostra, que é reaproveitada. Chapman (1979) relata a quebra de grãos após a cravação de penetrômetros em areias.

Ainda na Figura 7.5, chama atenção o abatimento na areia em função do carregamento aplicado.



Figura 7.5 – Amostra de areia após a realização do ensaio.

Entre o primeiro e o segundo ensaio de cone a amostra de areia foi molhada pela chuva, em decorrência de infiltrações no telhado do laboratório. Para a secagem dessa areia foi montada uma estufa no laboratório, conforme mostrado na Figura 7.6. A estufa possui na cobertura de topo tábuas com espessura de 40 mm. Na base há um estrado feito com sarrafos de madeira de 30x50 mm² de seção transversal, evitando o contato entre os sacos de areia e o piso de concreto. No interior da estufa foram instaladas 4 lâmpadas incandescentes infravermelho de 375 W. Foram necessários 3 dias para que a areia apresentasse condições de ensaio.



Figura 7.6 – Estufa montada para a secagem da amostra de areia.

7.2.3 Apresentação dos resultados

Os ensaios em câmara de calibração serão designados com dois números: o primeiro número identifica o ensaio (cone = 1, cravação estática do amostrador SPT = 2, cravação estática do novo amostrador = 3, cravação dinâmica do amostrador SPT = 4, cravação dinâmica do novo amostrador = 5) e o segundo número a compacidade da amostra (menor compacidade = 1, maior compacidade = 2). Por exemplo, o Ensaio 1.1 corresponde a um ensaio de cone realizado com a amostra menos compacta.

A Tabela 7.1 mostra um resumo das condições utilizadas nos ensaios de cone em câmara de calibração. O peso específico refere-se à condição antes do carregamento da amostra.

Cabe salientar que o peso específico após a fase de carregamento da amostra seria praticamente o mesmo, já que para o nível de tensões adotado nos dez ensaios (tensões verticais de até 60 kPa) as deformações verticais esperadas são menores ou iguais a 1 cm. Desse modo, as variações no peso específico seriam de cerca de 1% do valor inicial.

As Figuras 7.7 e 7.8 mostram os gráficos de resistência de ponta do cone em função da profundidade nos Ensaios 1.1 e 1.2, respectivamente. As Figuras 7.9 e 7.10 mostram os

gráficos de atrito lateral do cone em função da profundidade nos mesmos ensaios. Nos dois ensaios a profundidade zero está associada à penetração da base do cone.

Tabela 7.1 – Condições dos ensaios de cone realizados em câmara de calibração.

Ensaio	W ¹ (kN)	V ² (m ³)	γ^3 (kN/m ³)	OCR ⁴	Base da amostra			Meio da amostra			Topo da amostra		
					σ'_v ⁵ (kPa)	σ'_h ⁶ (kPa)	K ₀ ⁷	σ'_v (kPa)	σ'_h (kPa)	K ₀	σ'_v (kPa)	σ'_h (kPa)	K ₀
Ensaio 1.1	23,7	1,71	13,9	1	49,9	25,5	0,51	39,7	18,3	0,46	29,4	11,0	0,37
Ensaio 1.2	25,1	1,71	14,7	1	82,4	36,4	0,44	71,6	29,2	0,41	60,7	21,9	0,36

¹W = peso da amostra de areia depositada na câmara;

²V = volume útil da câmara;

³ γ = peso específico da amostra de areia antes do carregamento

⁴OCR = Razão de sobreadensamento da amostra;

⁵ σ'_v = Tensão efetiva vertical de ensaio;

⁶ σ'_h = Tensão efetiva horizontal de ensaio;

⁷K₀ = Coeficiente de empuxo horizontal no repouso (σ'_h/σ'_v).

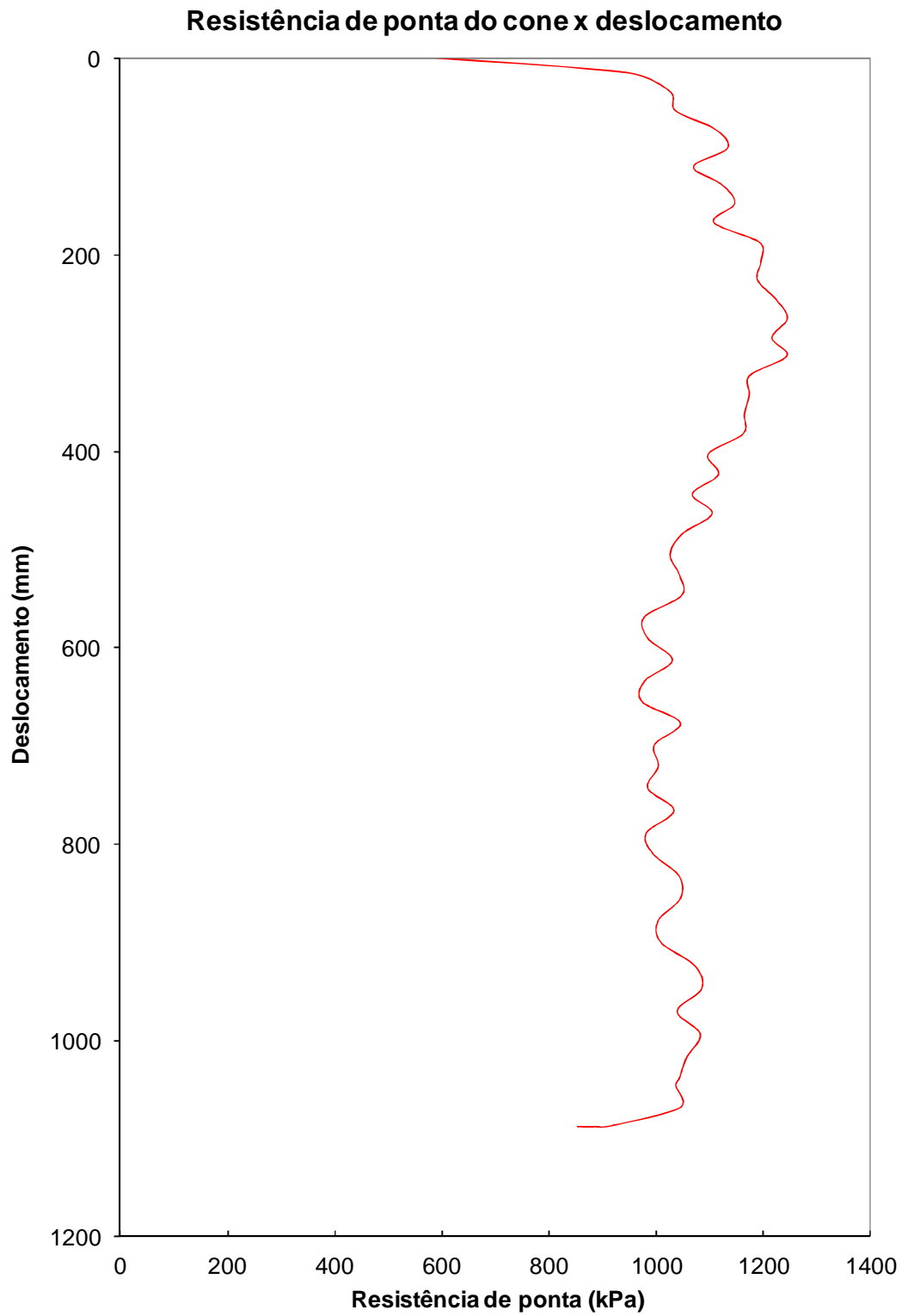


Figura 7.7 – Resistência de ponta do cone – Ensaio 1.1.

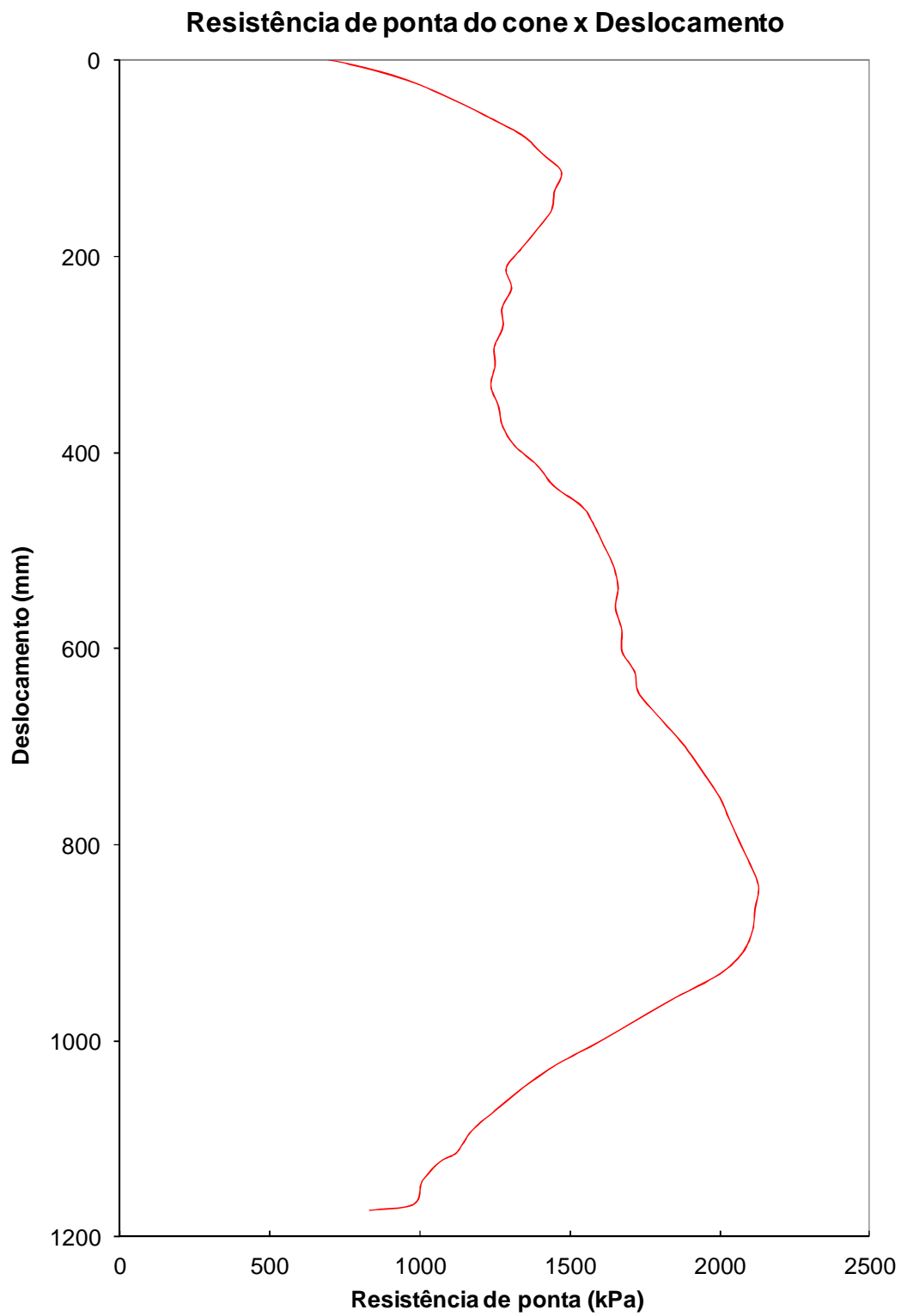


Figura 7.8 – Resistência de ponta do cone – Ensaio 1.2.

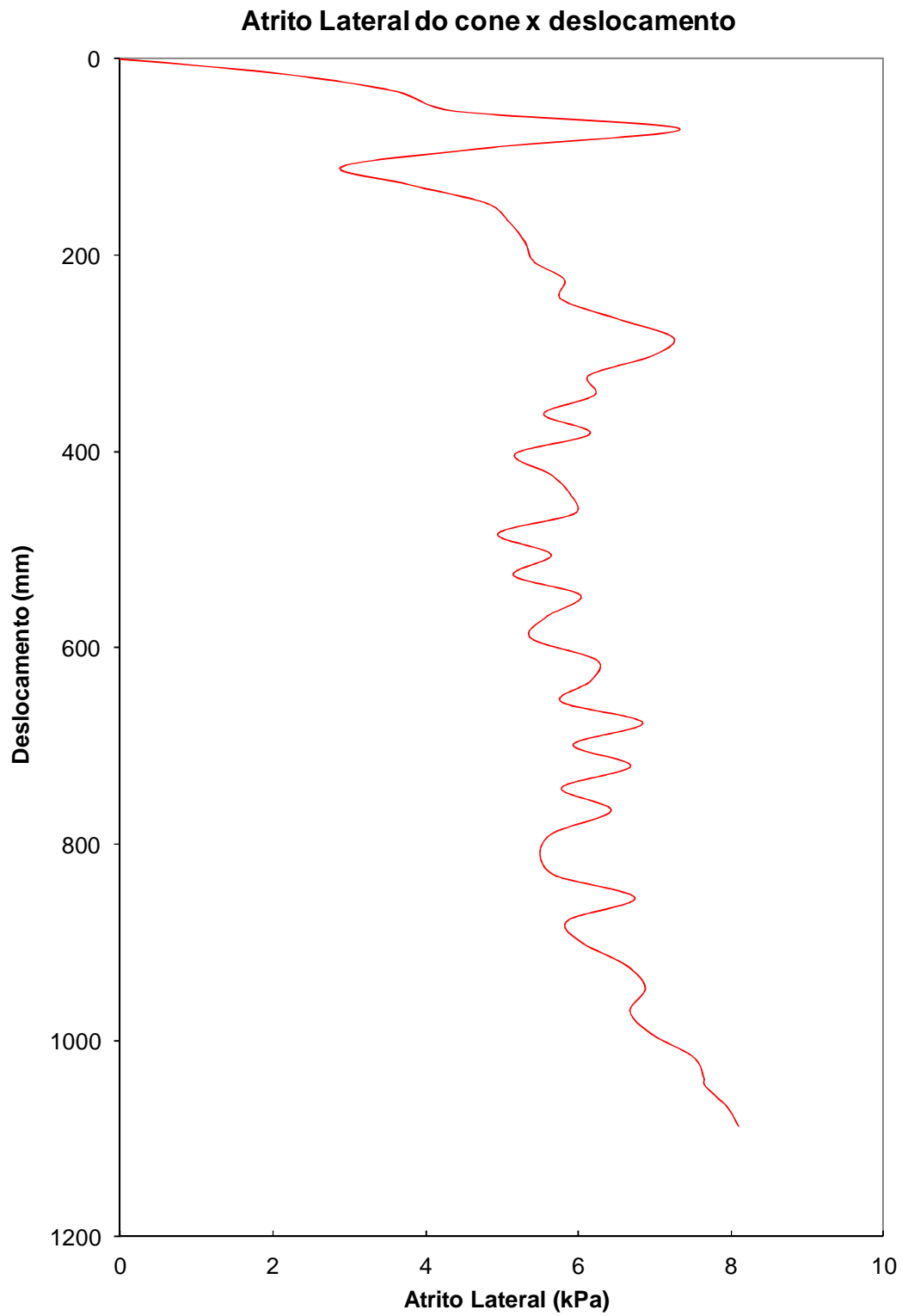


Figura 7.9 – Atrito lateral do cone – Ensaio 1.1.

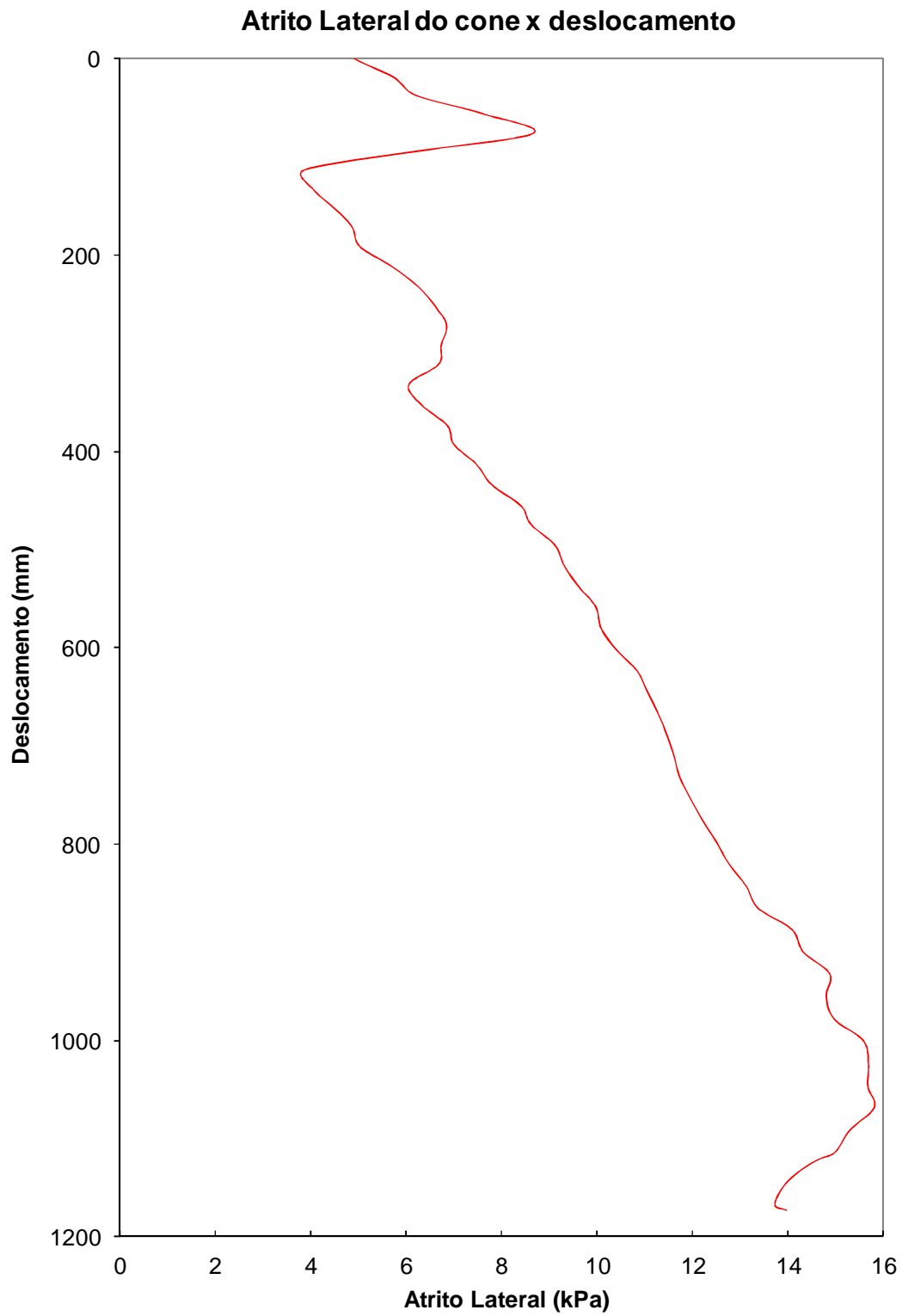


Figura 7.10 – Atrito lateral do cone – Ensaio 1.2.

7.2.4 *Análise dos resultados*

As massas específicas das amostras de areia, antes da etapa de compressão, valem 13,9 e 14,7 kN/m³ nos Ensaio 1.1 e 1.2, respectivamente. Esses valores são pouco menores que o limite inferior dos valores apresentados por Last et al. (1987), ver Tabelas 3.2, 3.3, 3.4, 3.5. Cabe informar que os valores de massa específica apresentados naquele trabalho foram obtidos após a fase de compressão da amostra, ao contrário da presente pesquisa, o que explica a diferença.

Os valores de K_0 no centro da amostra valem 0,46 no Ensaio 1.1 e 0,41 no Ensaio 1.2. Esses valores estão dentro da faixa de valores encontrados por Last et al. (1987) e Zohrabi (1993) em ensaios utilizando a mesma câmara de calibração e a mesma areia, ver Tabelas 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6. A amostra com menor compactação apresenta maior valor de K_0 .

Nos dois ensaios a forma dos gráficos de resistência de ponta (q_c) x profundidade e atrito lateral (f_s) x profundidade é compatível com resultados apresentados por Zohrabi (1993), ver Figura 3.24.

O valores de q_c no meio do corpo de prova (profundidade de 762 mm) valem 1032 kPa no Ensaio 1.1 e 2033 kPa no Ensaio 1.2. Como era de se esperar, a resistência de ponta do cone é maior no Ensaio 1.2, que possui amostra mais compacta e é submetida a maior tensão horizontal (29,2 kPa do Ensaio 1.2 contra 18,3 kPa do Ensaio 1.1, ambas no meio da câmara).

Os valores de f_s no meio do corpo de prova valem 6,4 kPa no Ensaio 1.1 e 12,2 kPa no Ensaio 1.2.

Chama atenção a irregularidade dos gráficos q_c x profundidade e f_s x profundidade no Ensaio 1.1, ao longo de todo ensaio. Acredita-se que isso seja consequência do baixo nível de tensões confinantes do Ensaio 1.1, já que no Ensaio 1.2, quando a tensão vertical no meio da amostra era cerca de 80% maior, essa característica foi atenuada.

Outro aspecto que merece atenção é a acentuada irregularidade nos valores de f_s nas primeiras profundidades, tanto no Ensaio 1.1 quanto no Ensaio 1.2. Isso provavelmente é consequência dos efeitos de extremidade nas proximidades da tampa da câmara.

Observa-se nos ensaios uma mudança de comportamento, numa certa profundidade, quando a resistência de ponta do cone para de crescer (ver Figuras 7.7. e 7.8). Esse fenômeno está associado à quebra de partículas, durante a cravação do penetrômetro, segundo Chapman (1979).

Em função do exposto até aqui, acredita-se que a câmara de calibração está funcionando normalmente, o que permitiu a realização dos demais ensaios e comparação de seus resultados.

7.3 CRAVAÇÃO ESTÁTICA DO AMOSTRADOR SPT

7.3.1 Considerações iniciais

Foram realizados dois ensaios de cravação estática do amostrador SPT em câmara de calibração, sendo monitoradas a carga e a penetração durante a cravação de cerca de 450 mm do amostrador. Ao final da penetração foi medido o comprimento de bucha de solo no interior do amostrador.

7.3.2 Características dos ensaios

Nesses ensaios foi utilizado o amostrador padrão SPT, conforme descrito na NBR-6484/2001. Também foram utilizados dois segmentos de hastes, cada um com 1 m de comprimento, na ligação entre amostrador e sistema de cravação. No topo da composição de hastes foi montada uma célula de carga (ver Figura 7.11). Essa célula de carga tem capacidade de 50 kN, tanto à compressão quanto à tração. A curva calibração à compressão da célula de carga é apresentada no Anexo 6.

A penetração do amostrador SPT foi monitorada através do medidor de profundidade descrito no item 7.2.2. Além disso, a cravação foi filmada com uma câmera de alta velocidade. A Figura 7.11 mostra a montagem do ensaio.

A amostra de areia foi preparada e o ensaio realizado de modo similar ao descrito no item 7.2.2, apenas com uma diferença: foi feito um pré-furo de 450 mm de profundidade na amostra de areia, para a introdução do amostrador, a fim de simular a perfuração realizada no ensaio SPT convencional.

Com esse pré-furo o amostrador atinge uma penetração de 300 mm (de um total de 450 mm) na metade da altura da câmara de calibração. Dessa maneira, os 300 mm finais da penetração, faixa considerada mais nobre no SPT convencional, ficariam na faixa central da câmara de calibração, região menos afetada pelos efeitos de bordo.

Nos dois ensaios o pré-furo foi feito buscando-se afetar minimamente a compacidade da amostra de areia formada. Para isso um tubo de PVC foi suavemente apoiado no topo da amostra e com um aspirador de pó a areia foi retirada do interior do tubo. À medida que a areia era retirada, o tubo descia lentamente. Tomou-se o cuidado de manter o tubo na

posição vertical durante a descida. Ao longo desse processo não foi percebido qualquer abatimento na superfície da amostra.



Figura 7.11 – Montagem do ensaio de cravação estática do amostrador SPT.

A Figura 7.12 mostra o pré-furo sendo executado e a Figura 7.13 a amostra de areia após o pré-furo ser realizado.

As duas amostras foram submetidas a tensões verticais de aproximadamente 80 kPa na sua base, a fim de facilitar a comparação de seus resultados.



Figura 7.12 – Execução de pré-furo na amostra de areia.

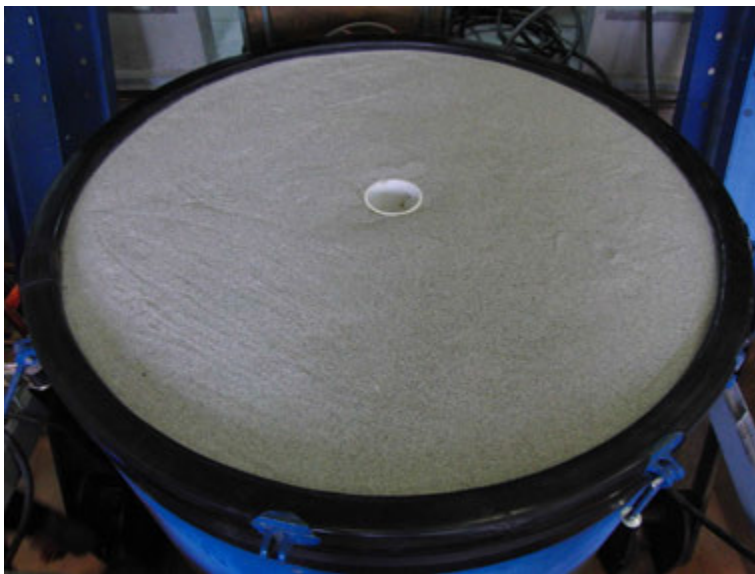


Figura 7.13 – Amostra de areia após a execução de pré-furo.

Ao fim da cravação, o amostrador foi separado da composição de hastes, tomando-se o cuidado de não alterar sua posição original. Em seguida as pressões nas células da câmara foram aliviadas, os macacos desmontados, o sistema de cravação baixado e a tampa da câmara foi retirada. A cabeça do amostrador também foi cuidadosamente retirada, o que permitiu medir o comprimento de bucha de solo no interior do amostrador. A Figura 7.14 mostra o amostrador no interior do pré-furo.

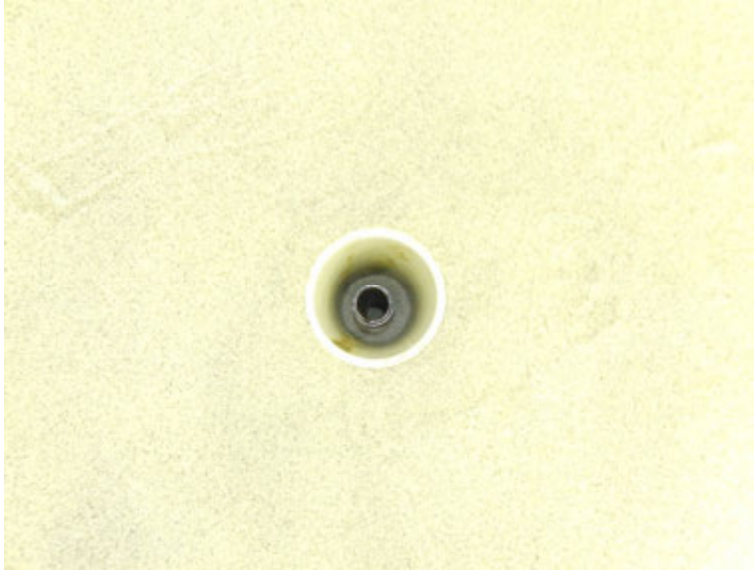


Figura 7.14 – Amostrador no interior do pré-furo.

7.3.3 Apresentação dos resultados

A Tabela 7.2 mostra um resumo das condições utilizadas nas cravações estáticas do amostrador SPT em câmara de calibração.

As Figuras 7.15 e 7.16 mostram os gráficos de carga de cravação em função da profundidade nos Ensaio 2.1 e 2.2, respectivamente. Nos dois ensaios a profundidade zero está associada à penetração da extremidade inferior do amostrador SPT.

No Ensaio 2.2 a penetração foi interrompida, por falha humana, pouco antes de se atingir 450 mm. A perda de resistência observada ao final desse ensaio é consequência da redução da velocidade do sistema de cravação, antes que parasse.

O comprimento de bucha medido no Ensaio 2.1 foi de 232 mm e no Ensaio 2.2 foi de 244 mm, conforme mostrado na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Condições dos ensaios de cravação estática do amostrador SPT realizados em câmara de calibração.

Ensaio	W ¹ (kN)	V ² (m ³)	γ^3 (kN/m ³)	OCR ⁴	Base da amostra			Meio da amostra			Topo da amostra			L _C ⁸ (mm)	L _E ⁹ (mm)	PLR ¹⁰
					σ'_v ⁵ (kPa)	σ'_h ⁶ (kPa)	K ₀ ⁷	σ'_v (kPa)	σ'_h (kPa)	K ₀	σ'_v (kPa)	σ'_h (kPa)	K ₀			
Ensaio 2.1	23,3	1,71	13,6	1	79,1	48,9	0,62	69,1	41,7	0,60	59,0	34,4	0,58	453	232	0,51
Ensaio 2.2	24,8	1,71	14,5	1	79,7	32,4	0,41	69,0	25,2	0,36	58,3	17,9	0,31	444	244	0,55

¹W = peso da amostra de areia depositada na câmara;

²V = volume útil da câmara;

³ γ = peso específico da amostra de areia antes do carregamento;

⁴OCR = Razão de sobreadensamento da amostra;

⁵ σ'_v = Tensão efetiva vertical de ensaio;

⁶ σ'_h = Tensão efetiva horizontal de ensaio;

⁷K₀ = Coeficiente de empuxo horizontal no repouso (σ'_h/σ'_v);

⁸L_C = Penetração do amostrador;

⁹L_E = Comprimento de bucha de solo;

¹⁰PLR = Razão de embuchamento (L_E/L_C).

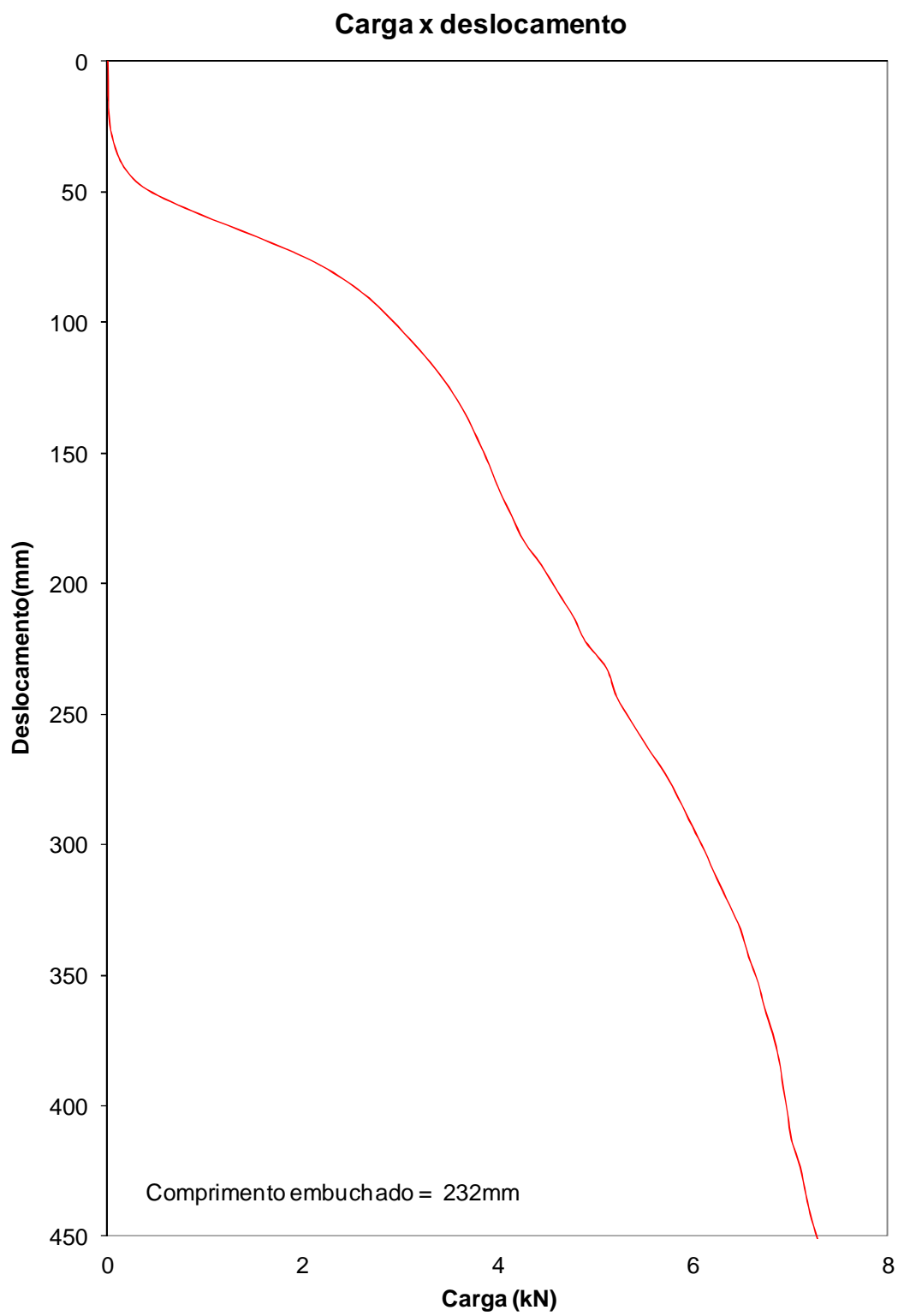


Figura 7.15 – Carga de cravação em função da profundidade – Ensaio 2.1.

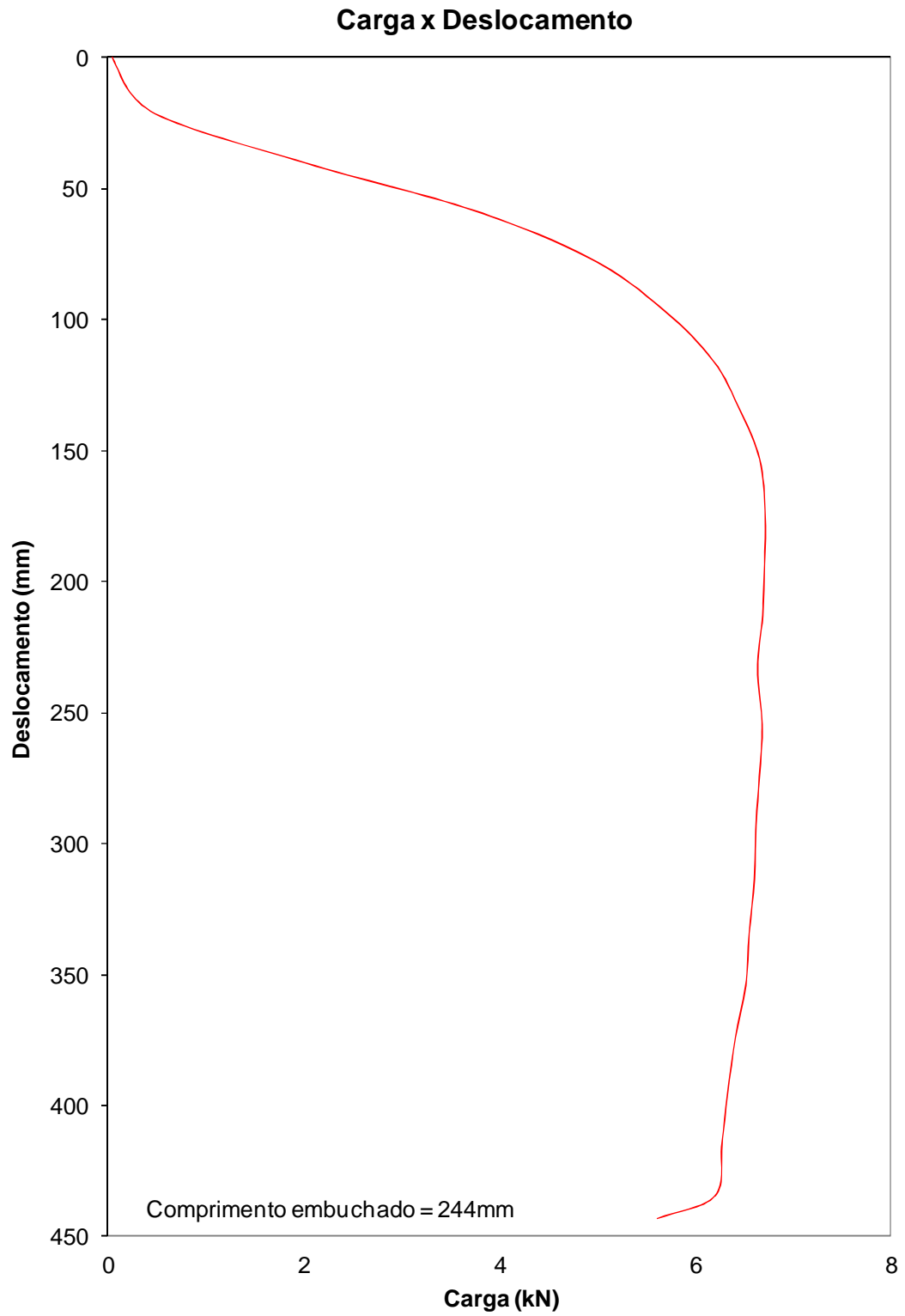


Figura 7.16 – Carga de cravação em função da profundidade – Ensaio 2.2.

7.3.4 *Análise dos resultados*

As massas específicas das amostras de areia, antes da etapa de compressão, valem 13,6 e 14,5 kN/m³ nos Ensaio 2.1 e 2.2, respectivamente. Como esperado, o Ensaio 2.1 atingiu massa específica próxima ao Ensaio 1.1 (13,9 kN/m³) e o Ensaio 2.2 atingiu massa específica próxima ao Ensaio 1.2 (14,7 kN/m³).

Os valores de K_0 no centro da amostra valem 0,60 no Ensaio 2.1 e 0,36 no Ensaio 2.2. Esses valores também estão dentro da faixa de valores encontrados por Last et al. (1987) e Zohrabi (1993) em ensaios utilizando a mesma câmara de calibração e a mesma areia, ver Tabelas 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6. A amostra com menor compactação apresenta maior valor de K_0 .

Nos gráficos de carga de cravação em função da profundidade, obtidos dos Ensaio 2.1 e 2.2, verificam-se quatro trechos distintos:

- i. Trecho inicial com crescimento lento da carga à medida que a profundidade aumenta. Provavelmente nesse trecho a amostra foi afetada pelo processo de escavação do pré-furo.
- ii. No segundo trecho a carga de cravação passa a crescer rapidamente com o aumento da profundidade, possuindo comportamento aproximadamente linear.
- iii. No terceiro trecho há uma desaceleração no crescimento da carga de cravação, sendo verificado comportamento não-linear.
- iv. No último trecho a carga de cravação passa a crescer numa velocidade menor ou torna-se constante, apresentando comportamento aproximadamente linear.

É possível que a mudança de comportamento entre o segundo e o terceiro trecho seja causada pelo início da formação do embuchamento. Antes da formação da bucha, a resistência à cravação é governada por resistência de ponta da área anelar do amostrador e atrito lateral (interno e externo) de suas paredes. Após a formação da bucha a resistência à cravação é governada pela resistência de ponta da bucha e do amostrador e pelo atrito lateral externo do amostrador.

Além disso, é provável que no último trecho o embuchamento tenha se tornado menos móvel, com pequeno ou nenhum avanço da bucha.

O comportamento anteriormente descrito é similar ao sugerido por Hvorslev (1949), quando relaciona a resistência à cravação de um amostrador com a sua penetração.

A carga máxima de cravação medida no Ensaio 2.1 foi 7,3 kN e no Ensaio 2.2 foi 6,7 kN. É provável que a amostra mais fofo tenha apresentado maior carga de cravação em função da maior tensão horizontal do Ensaio 2.1.

Nas Figuras 7.17 e 7.18 são mostradas as energias gastas (trabalho realizado) na cravação do amostrador SPT em função da profundidade, nos Ensaios 2.1 e 2.2, respectivamente. Essas energias foram obtidas através do cálculo da área dos gráficos de carga de cravação x deslocamento (ver Figuras 7.15 e 7.16). É importante notar que, apesar da maior carga máxima de cravação no Ensaio 2.1, no Ensaio 2.2 a energia de cravação é significativamente maior, provavelmente em função da maior compacidade da amostra.

Verifica-se que o ensaio realizado na amostra de maior compacidade apresenta comprimento de bucha maior que o ensaio realizado na amostra de menor compacidade, sendo o comprimento de bucha no Ensaio 2.2 de 244 mm e no Ensaio 2.1 de 232 mm. O valor de PLR no Ensaio 2.1 foi de 0,51 e no Ensaio 2.2 foi de 0,55. Isso corrobora o previsto por Paik e Salgado (2003), quando preveem aumento do comprimento de bucha com o aumento da compacidade relativa.

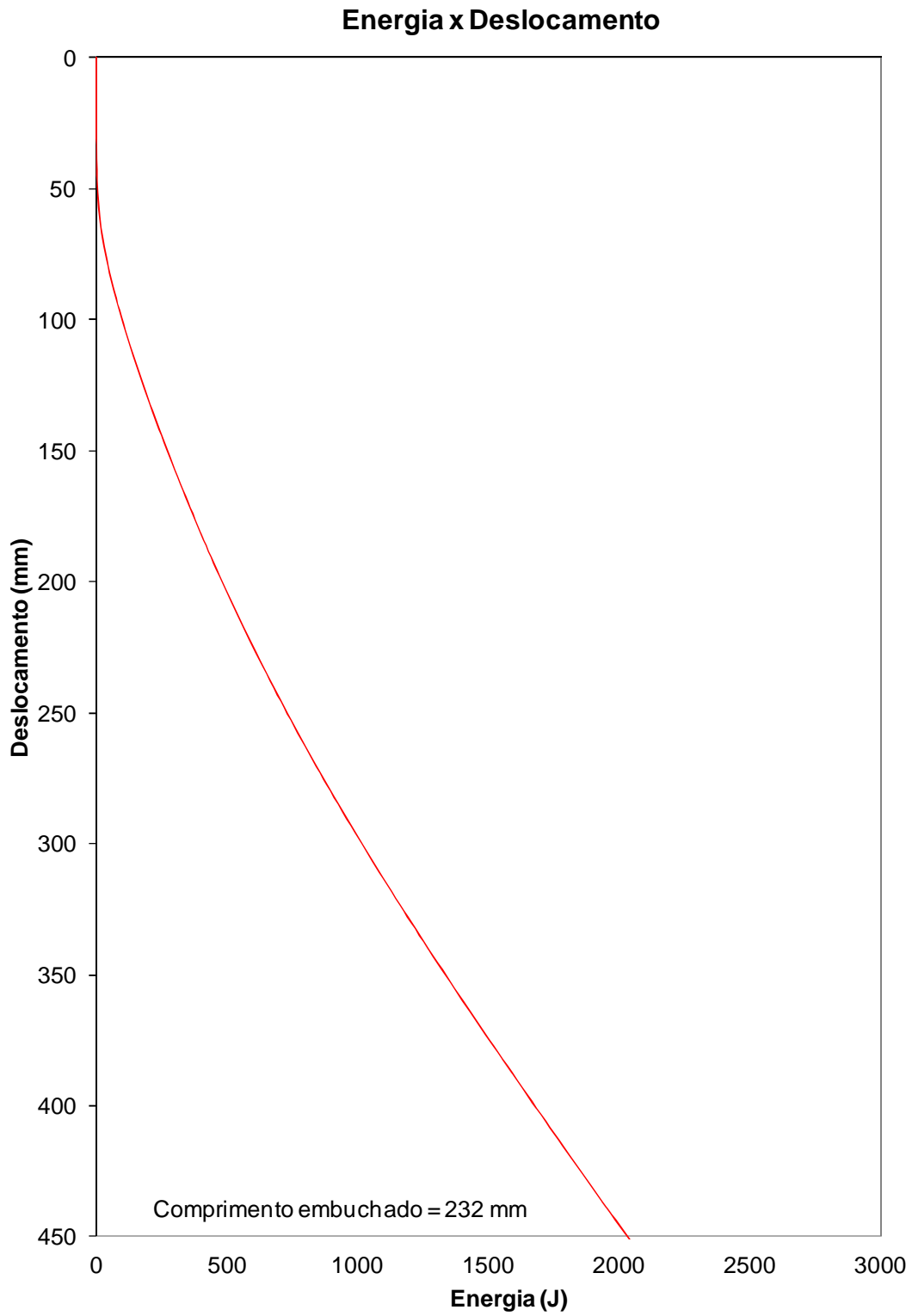


Figura 7.17 – Energia gasta na cravação do amostrador em função da profundidade – Ensaio 2.1.

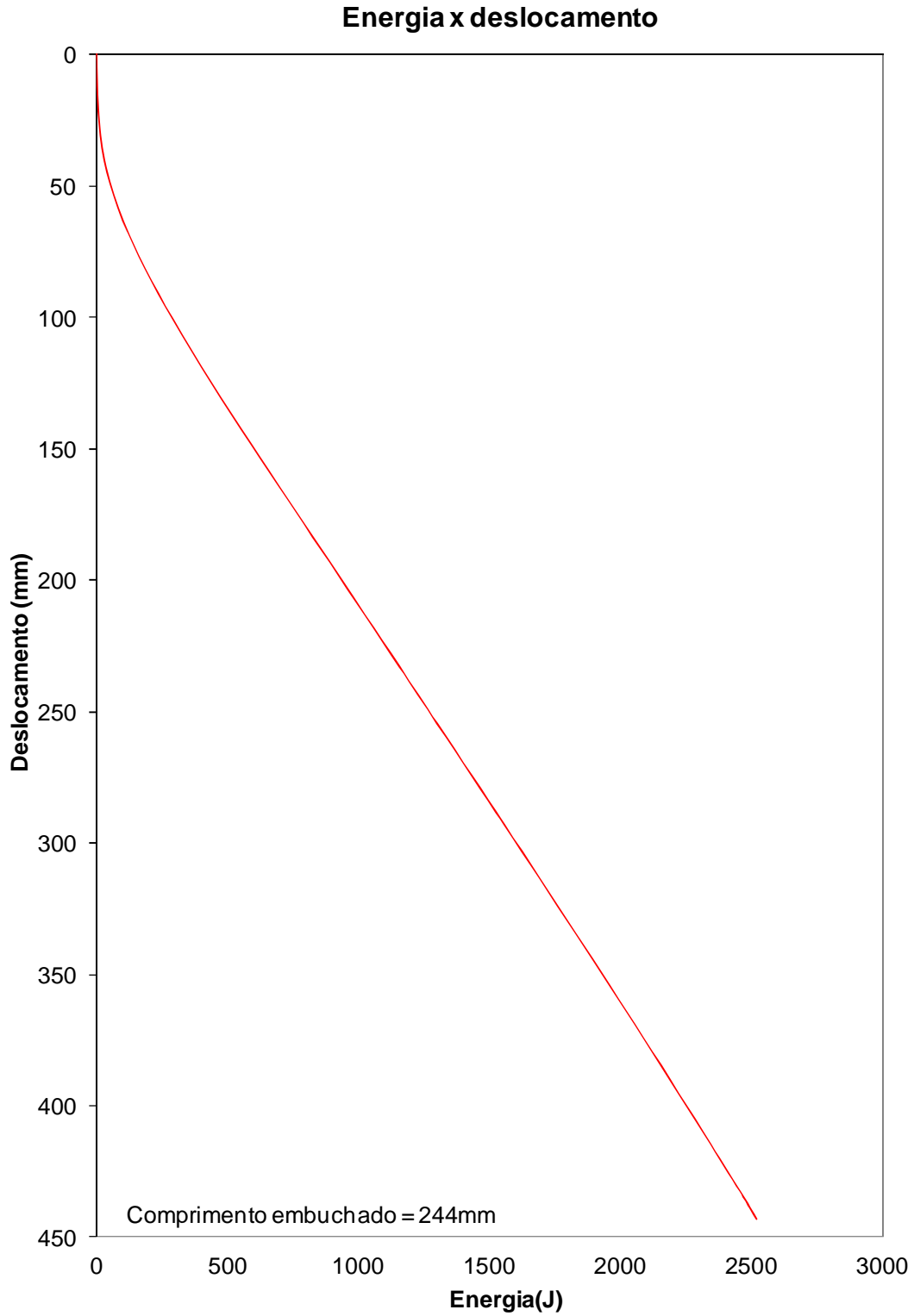


Figura 7.18 – Energia gasta na cravação do amostrador em função da profundidade – Ensaio 2.2.

7.4 CRAVAÇÃO ESTÁTICA DO NOVO AMOSTRADOR

7.4.1 Descrição dos ensaios

Foram realizados dois ensaios de cravação estática do novo amostrador em câmara de calibração, sendo monitoradas a carga e a penetração durante a cravação de cerca de 450 mm do amostrador. Três células de tensão total, instaladas nas paredes internas do amostrador, permitiram a monitoração de tensões ao longo do ensaio. Ao final da cravação foi medido o comprimento de bucha de solo no interior do amostrador.

7.4.2 Características dos ensaios

Nesses ensaios foi utilizado o amostrador instrumentado, desenvolvido na presente pesquisa, e descrito no Capítulo 5. As demais características dos ensaios são similares às apresentadas no item 7.3.2. A Figura 7.19 mostra a montagem de um dos ensaios de cravação estática do novo amostrador.

As duas amostras de areia foram submetidas a tensões verticais de aproximadamente 80 kPa na sua base, ver Tabela 7.3.



Figura 7.19 – Montagem do ensaio de cravação estática do novo amostrador.

7.4.3 Apresentação dos resultados

A Tabela 7.3 mostra um resumo das condições utilizadas nas cravações estáticas do novo amostrador em câmara de calibração.

As Figuras 7.20 e 7.21 mostram os gráficos de carga de cravação em função da profundidade nos Ensaio 3.1 e 3.2, respectivamente. Nos dois ensaios a profundidade zero está associada à penetração da extremidade da sapata do novo amostrador.

As Figuras 7.22 e 7.23 mostram as tensões normais medidas pelas três células de tensão instaladas nas paredes internas do amostrador instrumentado, nos ensaios 3.1 e 3.2, respectivamente. As Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 mostram as posições das células de tensão total CTT-2, CTT-3 e CTT-4.

O comprimento de bucha medido no Ensaio 3.1 foi de 209 mm e no Ensaio 3.2 foi de 205 mm, conforme mostrado na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 – Condições dos ensaios de cravação estática do novo amostrador realizados em câmara de calibração.

Ensaio	W ¹ (kN)	V ² (m ³)	γ^3 (kN/m ³)	OCR ⁴	Base da amostra			Meio da amostra			Topo da amostra			L _C ⁸ (mm)	L _E ⁹ (mm)	PLR ¹⁰
					σ'_v ⁵ (kPa)	σ'_h ⁶ (kPa)	K ₀ ⁷	σ'_v (kPa)	σ'_h (kPa)	K ₀	σ'_v (kPa)	σ'_h (kPa)	K ₀			
Ensaio 3.1	23,3	1,71	13,6	1	77,5	46,6	0,60	67,5	39,4	0,58	57,4	32,1	0,56	465	209	0,45
Ensaio 3.2	25,2	1,71	14,7	1	81,8	42,1	0,51	70,9	34,9	0,49	60,1	27,6	0,46	461	205	0,44

¹W = peso da amostra de areia depositada na câmara;

²V = volume útil da câmara;

³ γ = peso específico da amostra de areia antes do carregamento;

⁴OCR = Razão de sobreadensamento da amostra;

⁵ σ'_v = Tensão efetiva vertical de ensaio;

⁶ σ'_h = Tensão efetiva horizontal de ensaio;

⁷K₀ = Coeficiente de empuxo horizontal no repouso (σ'_h/σ'_v)

⁸L_C = Penetração do amostrador;

⁹L_E = Comprimento de bucha de solo;

¹⁰PLR = Razão de embuchamento (L_E/L_C).

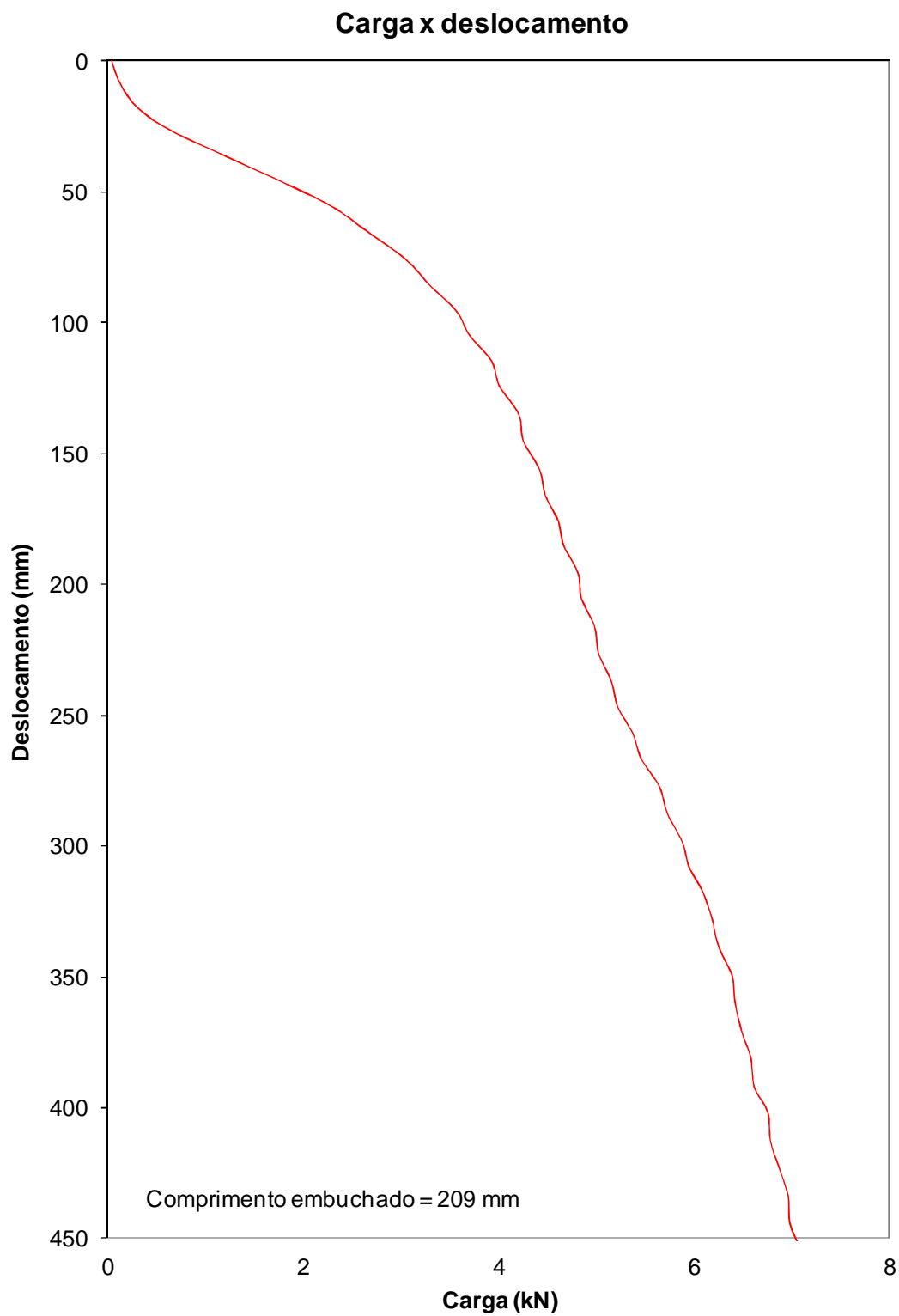


Figura 7.20 – Carga de cravação em função da profundidade – Ensaio 3.1.

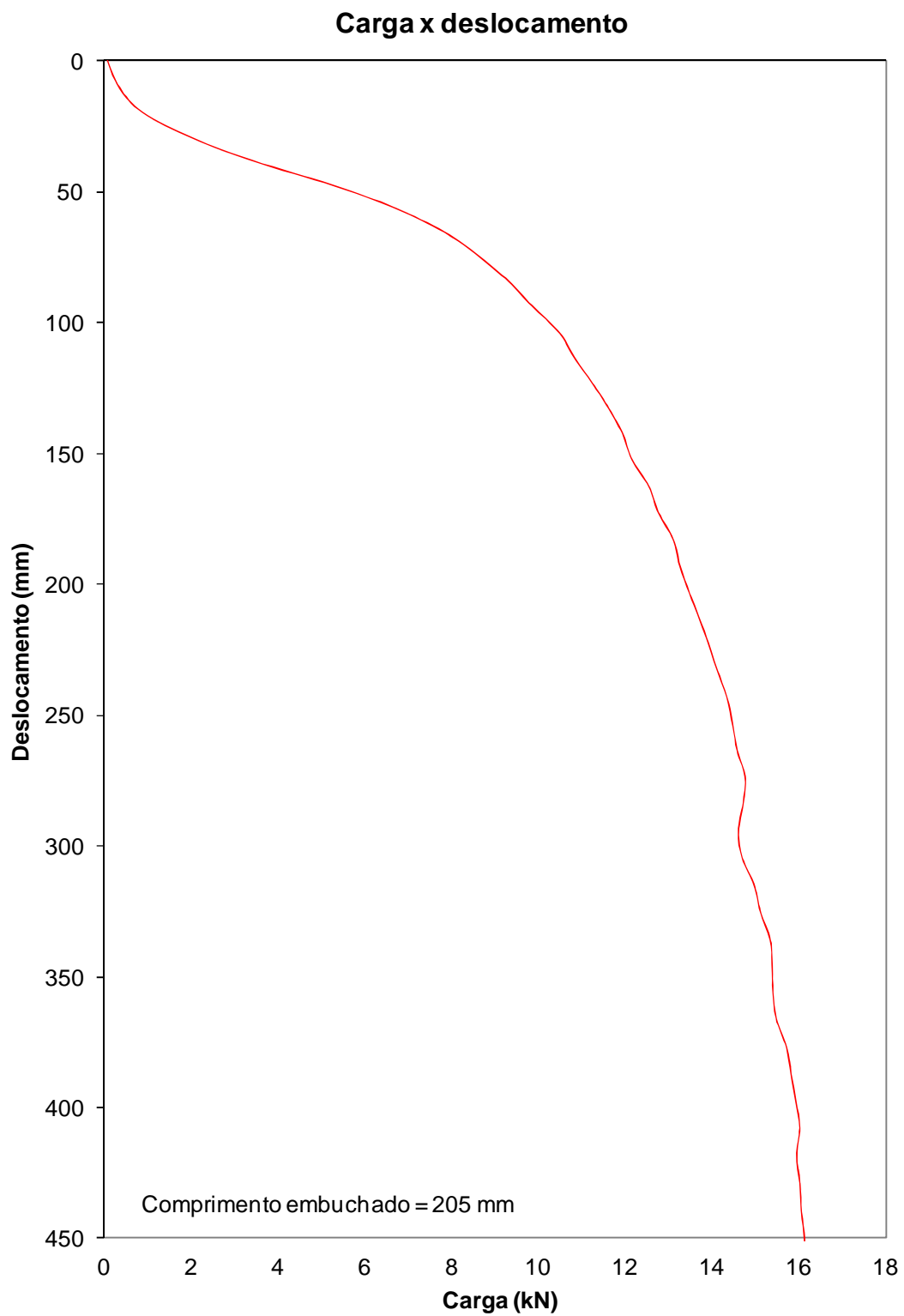


Figura 7.21 – Carga de cravação em função da profundidade – Ensaio 3.2.

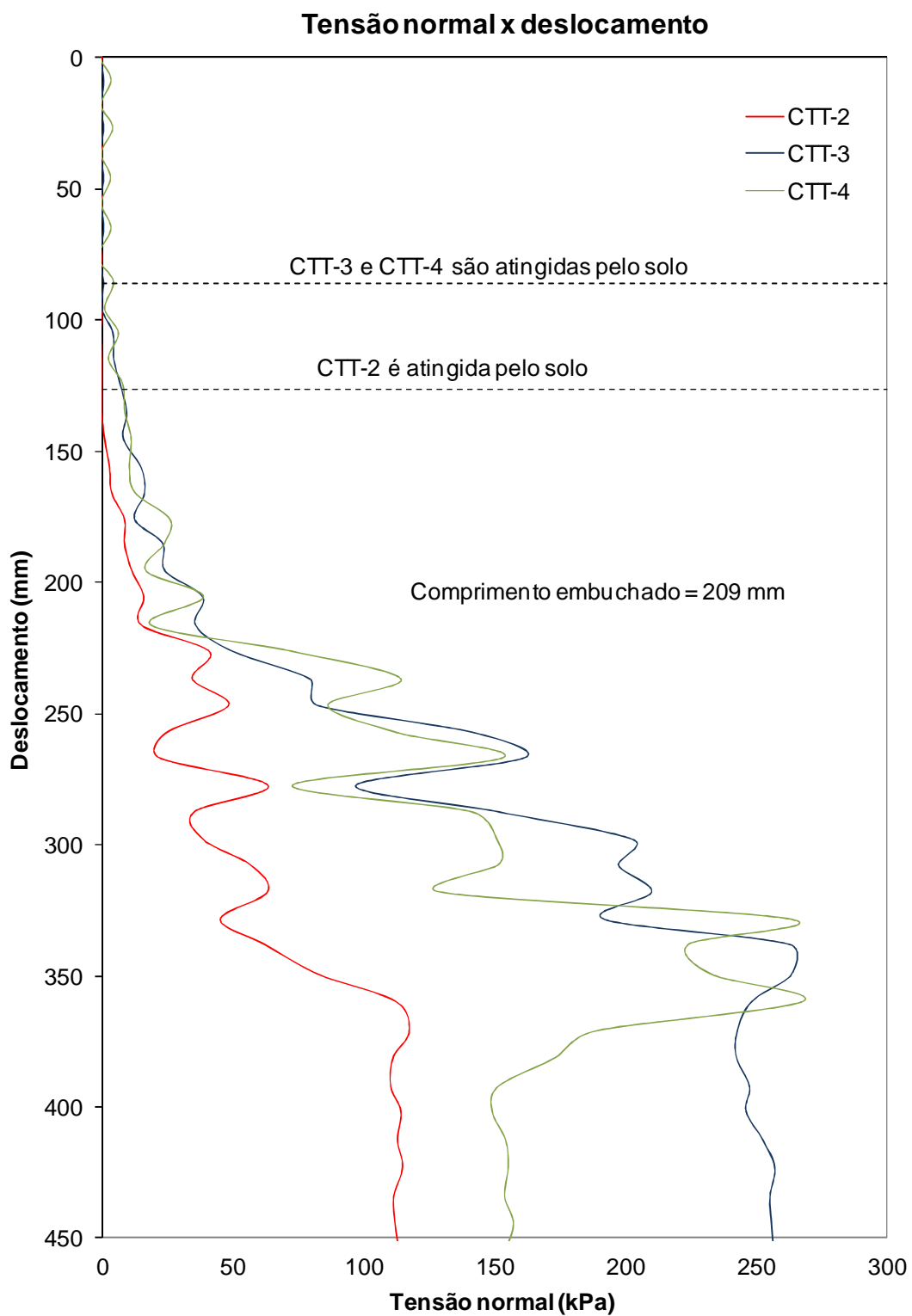


Figura 7.22 – Tensões normais medidas nas paredes internas do amostrador – Ensaio 3.1.

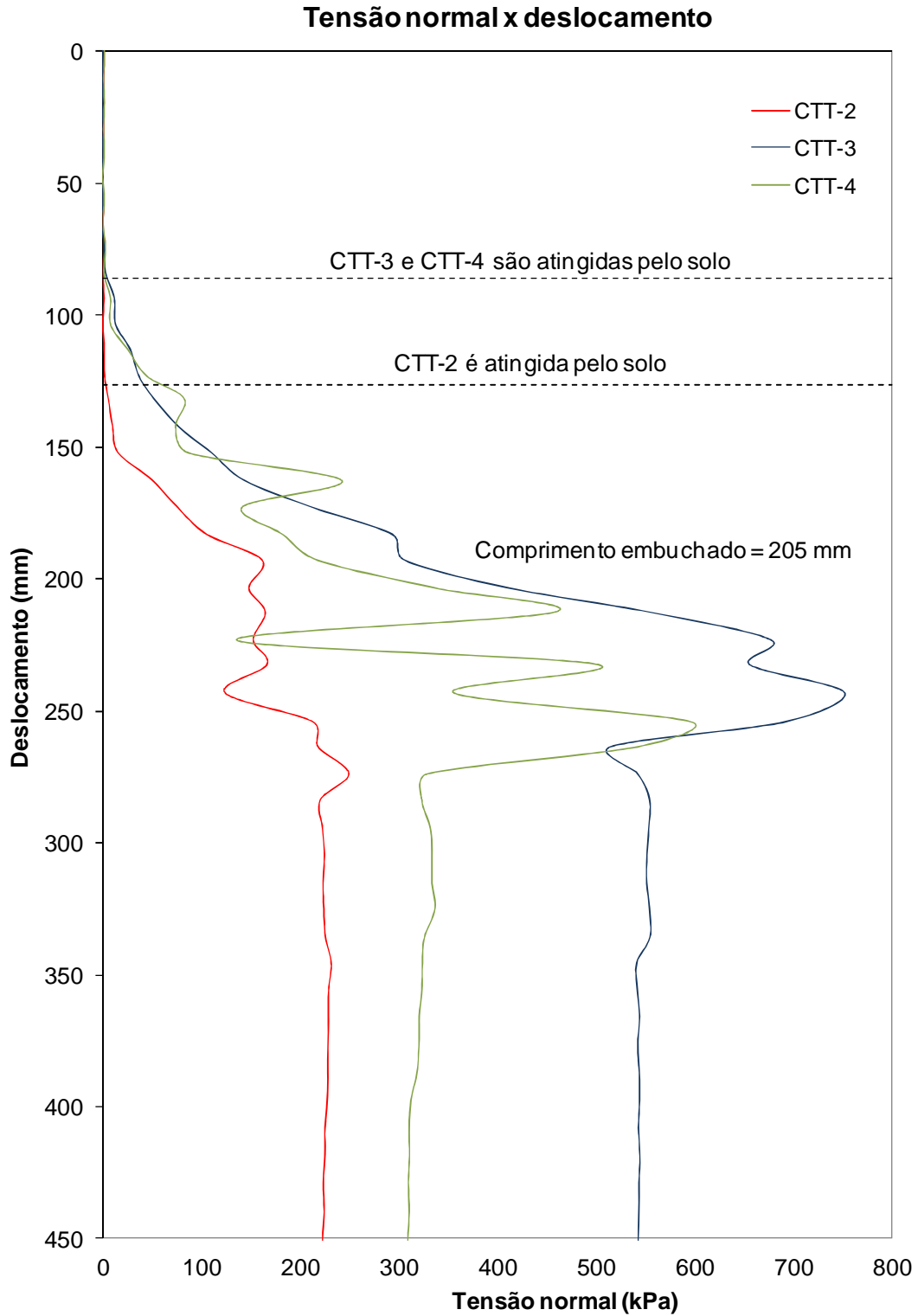


Figura 7.23 – Tensões normais medidas nas paredes internas do amostrador – Ensaio 3.2.

7.4.4 *Análise dos resultados*

As massas específicas das amostras de areia, antes da etapa de compressão, valem 13,6 e 14,7 kN/m³ nos Ensaio 3.1 e 3.2, respectivamente. Como esperado, o Ensaio 3.1 atingiu massa específica próxima aos Ensaio 1.1 e 2.1 e o Ensaio 3.2 atingiu massa específica próxima aos Ensaio 1.2 e 2.2.

Os valores de K_0 no centro da amostra valem 0,58 no Ensaio 3.1 e 0,49 no Ensaio 3.2. Esses valores também estão dentro da faixa de valores encontrados por Last et al. (1987) e Zohrabi (1993) em ensaios utilizando a mesma câmara de calibração e a mesma areia, ver Tabelas 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6. Do mesmo modo que nos ensaios anteriores, as amostras com menor compactação apresentam maiores valores de K_0 .

Os gráficos de carga de cravação em função da profundidade, obtidos dos Ensaio 3.1 e 3.2 (Figuras 7.20 e 7.21), apresentam o mesmo aspecto observado no item 7.3.4. A carga máxima de cravação medida no Ensaio 3.1 foi 7,1 kN e no Ensaio 3.2 foi 16,1 kN. Chama atenção a grande diferença de carga de cravação entre o Ensaio 3.2 e o Ensaio 3.1.

As tensões normais medidas no interior do amostrador, nos Ensaio 3.1 e 3.2, mostradas nas Figuras 7.22 e 7.23, apresentam comportamento distinto em quatro trechos:

- i. No trecho inicial o solo ainda não atingiu os sensores.
- ii. No segundo trecho, após o solo atingir os sensores, as tensões crescem lentamente com a profundidade, possuindo aspecto aproximadamente linear.
- iii. No terceiro trecho as tensões passam a crescer mais rapidamente, possuindo aspecto mais irregular.
- iv. No trecho final, após atingido um pico, as tensões sofrem redução e tornam-se quase constantes com o decorrer da cravação.

É provável que no primeiro e segundo trechos da cravação ainda não tenha acontecido o embuchamento. No terceiro trecho inicia-se a formação de embuchamento, com a penetração de solo no interior do amostrador sendo menor que a penetração do próprio amostrador. No trecho final a bucha de solo torna-se menos móvel, o que mantém as tensões praticamente constantes.

As maiores tensões no interior do amostrador foram verificadas na posição mais periférica (Célula CTT-3). Na posição central superior as tensões são as menores (Célula CTT-2), ver Figuras 7.22 e 7.23. No Ensaio 3.1 foram medidas tensões de até 263 kPa e no Ensaio 3.2 foram medidas tensões de até 752 kPa.

Nas Figuras 7.24 e 7.25 são mostradas as energias gastas na cravação do novo amostrador em função da profundidade, nos Ensaios 3.1 e 3.2, respectivamente. Essas energias foram obtidas do mesmo modo que nos Ensaios 2.1 e 2.2. Em função da maior carga de cravação no Ensaio 3.2, a energia de cravação também é significativamente maior nesse ensaio, quando comparada ao Ensaio 3.1.

Os comprimentos de bucha de solo nos Ensaios 3.1 e 3.2 (209 mm e 205 mm, respectivamente), utilizando o novo amostrador, foram pouco menores que nos Ensaios 2.1 e 2.2 (232 mm e 244 mm), utilizando o amostrador SPT convencional. O valor de PLR no Ensaio 3.1 foi de 0,45 e no Ensaio 3.2 foi de 0,44.

Nos Ensaios 3.1 e 3.2 verifica-se, ao contrário dos ensaios 2.1 e 2.2, que o ensaio realizado com a amostra de menor compactidade apresenta maior comprimento de bucha.

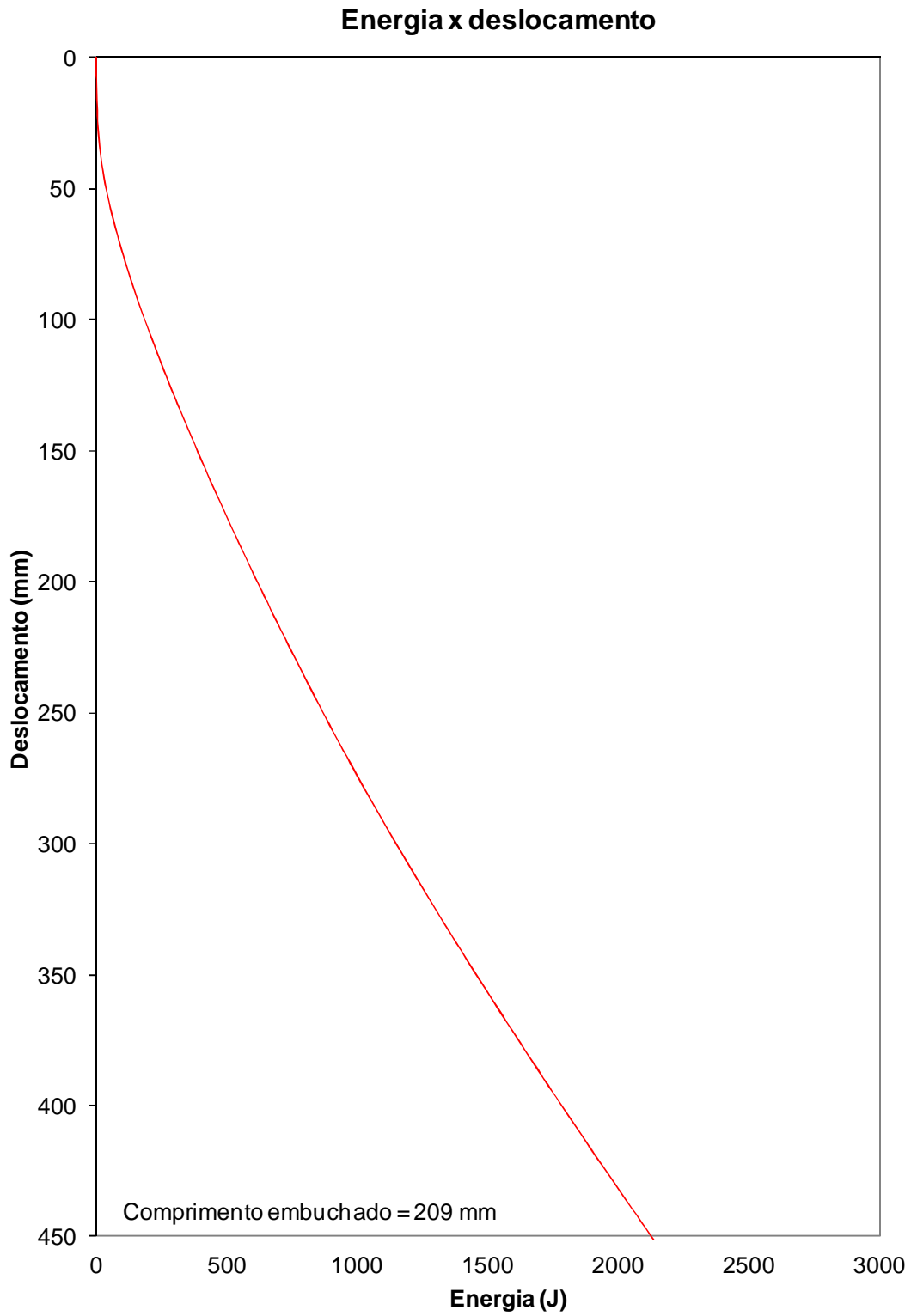


Figura 7.24 – Energia gasta na cravação do amostrador em função da profundidade – Ensaio 3.1.

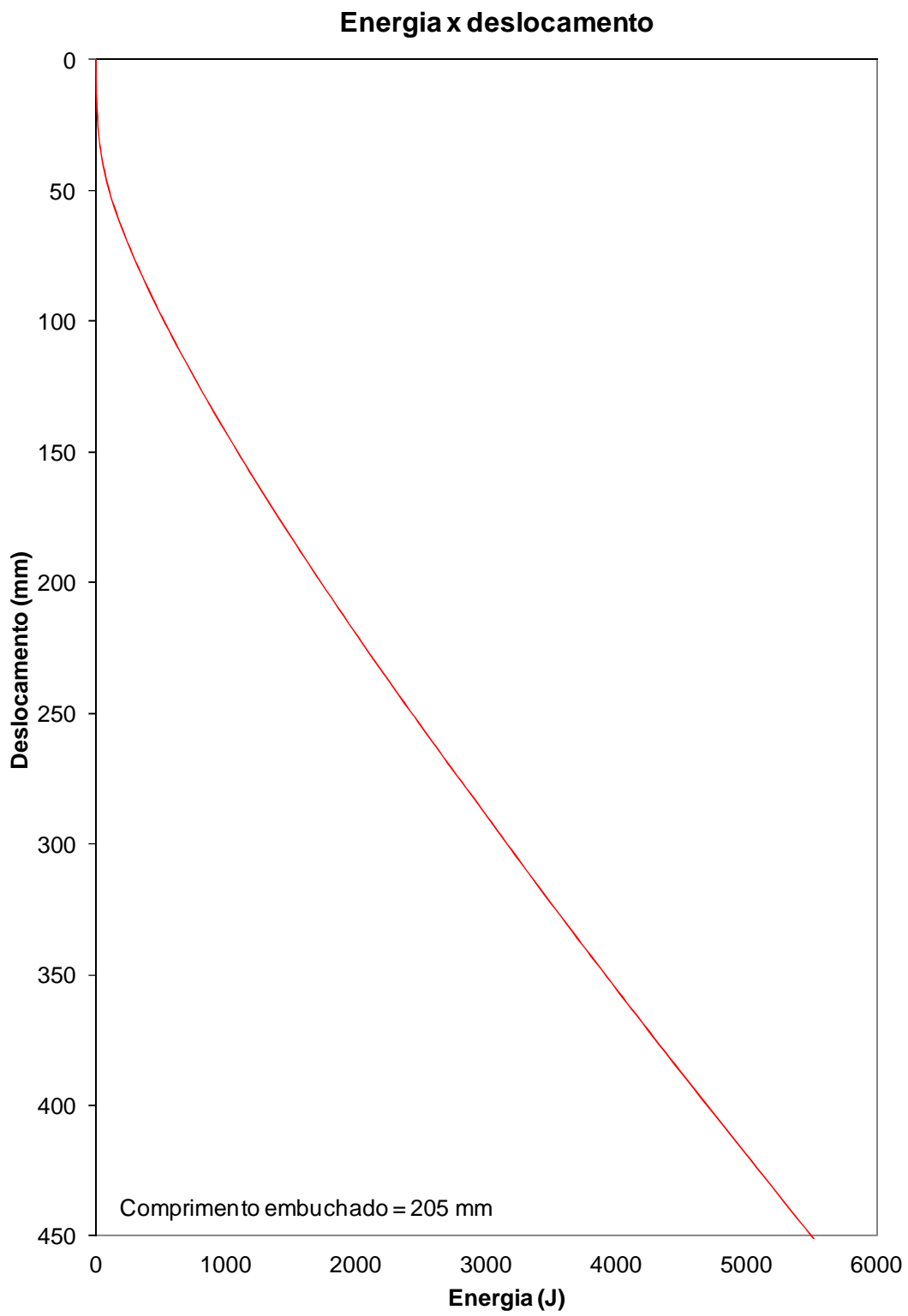


Figura 7.25 – Energia gasta na cravação do amostrador em função da profundidade – Ensaio 3.2.

7.5 CRAVAÇÃO DINÂMICA DO AMOSTRADOR SPT

7.5.1 Descrição dos ensaios

Foram realizados dois ensaios de cravação dinâmica do amostrador SPT em câmara de calibração, com monitoramento da energia no topo da composição de hastes, medição de altura de queda do martelo e de sua velocidade de impacto. Além disso, ao final do ensaio foi medido o comprimento de bucha de solo no interior do amostrador.

7.5.2 Características dos ensaios

A montagem desses ensaios foi similar à utilizada nos ensaios de cravação estática do amostrador SPT (ver item 7.3.2), com uma diferença, a cravação do amostrador foi dinâmica, através de um martelo SPT de 65 kg, caindo de uma altura de 75 cm. O martelo utilizado nos ensaios era maciço, cilíndrico e dotado de haste-guia.

O levantamento do martelo era manual, num sistema que contava com roldana e corda de sisal, conforme prescrito na NBR-6484/2001. O controle da altura de queda era visual, baseado numa marcação na haste-guia.

Foram utilizados apenas dois segmentos de haste, em virtude da limitação de altura no prédio onde fica a câmara de calibração. A haste superior era dotada de dois medidores de deformação e dois acelerômetros, para permitir o monitoramento de energia nos ensaios, ver item 4.1. No topo da composição de hastes foi instalada uma cabeça de bater com massa de 977 g (ver Figura 6.2).

Os ensaios foram filmados com uma câmera de alta velocidade, o que permitiu a medição da altura de queda do martelo, sua velocidade de impacto, além da penetração do amostrador após cada golpe. Foi utilizada uma mira stadimétrica para auxiliar esses procedimentos, conforme já descrito no item 4.3.

A Figura 7.26 mostra a montagem utilizada nos dois ensaios de cravação dinâmica do amostrador SPT em câmara de calibração.

As duas amostras foram submetidas a tensões verticais de aproximadamente 80 kPa na sua base.



Figura 7.26 – Montagem do ensaio de cravação dinâmica do amostrador SPT.

7.5.3 Apresentação dos resultados

A Tabela 7.4 mostra um resumo das condições utilizadas nas cravações dinâmicas do amostrador SPT em câmara de calibração.

As energias potencial de soltura do martelo (E_p), cinética de impacto (E_c) e no topo da composição de hastes (E_i) foram obtidas conforme descrito no item 6.2.2. As energias medidas nos 3 golpes do Ensaio 4.1 e 9 golpes do Ensaio 4.2 são apresentadas nas Tabelas 7.5 e 7.6, respectivamente.

O comprimento de bucha de solo medido no Ensaio 4.1 foi de 361 mm e no Ensaio 4.2 foi de 360 mm.

Tabela 7.4 – Condições dos ensaios de cravação dinâmica do amostrador SPT realizados em câmara de calibração.

Ensaio	W ¹ (kN)	V ² (m ³)	γ^3 (kN/m ³)	OCR ⁴	Base da amostra			Meio da amostra			Topo da amostra			L _C ⁸ (mm)	L _E ⁹ (mm)	PLR ¹⁰
					σ'_v ⁵ (kPa)	σ'_h ⁶ (kPa)	K ₀ ⁷	σ'_v (kPa)	σ'_h (kPa)	K ₀	σ'_v (kPa)	σ'_h (kPa)	K ₀			
Ensaio 4,1	23,4	1,71	13,7	1	79,5	50,0	0,63	69,4	42,8	0,62	59,3	35,5	0,60	489	361	0,74
Ensaio 4,2	25,3	1,71	14,8	1	81,2	52,9	0,65	70,3	45,7	0,65	59,4	38,4	0,65	480	360	0,75

¹W = peso da amostra de areia depositada na câmara;

²V = volume útil da câmara;

³ γ = peso específico da amostra de areia antes do carregamento;

⁴OCR = Razão de sobreadensamento da amostra;

⁵ σ'_v = Tensão efetiva vertical de ensaio;

⁶ σ'_h = Tensão efetiva horizontal de ensaio;

⁷K₀ = Coeficiente de empuxo horizontal no repouso (σ'_h/σ'_v)

⁸L_C = Penetração do amostrador;

⁹L_E = Comprimento de bucha de solo;

¹⁰PLR = Razão de embuchamento (L_E/L_C).

Tabela 7.5 – Energias medidas no Ensaio 4.1.

Golpe	Penetração acumulada (mm)	h_q^1 (m)	v_i^2 (m/s)	E_p^3 (J)	E_c^4 (J)	E_i^5 (J)	E_p/E^{*6}	$E_c/E^* (e_1)$	E_i/E^*	$E_c/E_p (e_1^*)$	E_i/E_p	$E_i/E_c (e_2)$
1	218	0,75	3,51	478,2	401,5	324,9	1,00	0,84	0,68	0,84	0,68	0,81
2	357	0,75	3,51	478,2	400,4	354,7	1,00	0,84	0,74	0,84	0,74	0,89
3	489	0,75	3,53	478,2	404,9	395,5	1,00	0,85	0,83	0,85	0,83	0,98
Média	-	0,75	3,52	478,2	402,3	358,4	1,00	0,84	0,75	0,84	0,75	0,89
Desvio Padrão	-	0,00	0,01	0,0	2,3	35,4	0,00	0,00	0,07	0,00	0,07	0,08

Tabela 7.6 – Energias medidas no Ensaio 4.2.

Golpe	Penetração acumulada (mm)	h_q^1 (m)	v_i^2 (m/s)	E_p^3 (J)	E_c^4 (J)	E_i^5 (J)	E_p/E^{*6}	$E_c/E^* (e_1)$	E_i/E^*	$E_c/E_p (e_1^*)$	E_i/E_p	$E_i/E_c (e_2)$
1	76	0,75	3,60	478,2	421,2	385,8	1,00	0,88	0,81	0,88	0,81	0,92
2	127	0,75	3,52	478,2	402,7	398,4	1,00	0,84	0,83	0,84	0,83	0,99
3	178	0,75	3,52	478,2	402,7	376,8	1,00	0,84	0,79	0,84	0,79	0,94
4	230	0,75	3,60	478,2	421,2	387,4	1,00	0,88	0,81	0,88	0,81	0,92
5	276	0,75	3,58	478,2	416,5	396,4	1,00	0,87	0,83	0,87	0,83	0,95
6	328	0,75	3,56	478,2	411,9	401,5	1,00	0,86	0,84	0,86	0,84	0,97
7	388	0,75	3,55	478,2	409,6	393,5	1,00	0,86	0,82	0,86	0,82	0,96
8	427	0,75	3,72	478,2	449,7	397,4	1,00	0,94	0,83	0,94	0,83	0,88
9	480	0,72	3,49	459,1	395,9	378,5	0,96	0,83	0,79	0,86	0,82	0,96
Média	-	0,75	3,57	476,1	414,6	390,6	1,00	0,87	0,82	0,87	0,82	0,94
Desvio Padrão	-	0,01	0,07	6,4	15,8	8,9	0,01	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03

¹ h_q = altura de queda do martelo SPT

² v_i = velocidade de impacto do martelo SPT;

³ E_p = energia potencial real do martelo SPT no momento da soltura;

⁴ E_c = energia cinética do martelo SPT na iminência do impacto;

⁵ E_i = energia medida no topo da composição de hastes;

⁶ E^* = energia potencial teórica do martelo SPT do sistema brasileiro (478,2 J).

7.5.4 Análise dos resultados

As massas específicas das amostras de areia, antes da etapa de compressão, valem 13,7 e 14,8 kN/m³ nos Ensaio 4.1 e 4.2, respectivamente. Como esperado, o Ensaio 4.1 atingiu massa específica próxima aos Ensaio 1.1, 2.1 e 3.1 e o Ensaio 4.2 atingiu massa específica próxima aos Ensaio 1.2, 2.2 e 3.2, logo as compacidades podem ser consideradas equivalentes.

Os valores de K_0 no centro da amostra valem 0,62 no Ensaio 4.1 e 0,65 no Ensaio 4.2. Esses valores também estão dentro da faixa de valores encontrados por Last et al. (1987) e Zohrabi (1993) em ensaios utilizando a mesma câmara de calibração e a mesma areia, ver Tabelas 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6. O valor de K_0 da amostra de menor compacidade foi menor que o valor de K_0 da amostra de maior compacidade, ao contrário do verificado nos ensaios anteriores.

A altura de queda média nos Ensaio 4.1 e 4.2 foi de 75 cm, com desvios padrão de 0 e 1 cm, respectivamente. As alturas de queda médias iguais à prescrita em norma e o seu pequeno desvio padrão são consequências do cuidado tomado na execução dos ensaios em laboratório. Cabe salientar que dificilmente o mesmo cuidado é tomado na execução rotineira de um ensaio SPT em campo.

A velocidade média de impacto no Ensaio 4.1 foi de 3,52 m/s e no Ensaio 4.2 foi de 3,57 m/s, o que corresponde a energias cinéticas médias de 402,3 J no Ensaio 4.1 e 414,6 J no ensaio 4.2.

A energia média medida no topo da composição de hastes no Ensaio 4.1 foi de 358,4 J (eficiência de 75 % em relação às energias padrão e potencial real) e no Ensaio 4.2 foi de 390,6 J (eficiência de 82 % em relação às energias padrão e potencial real).

Os valores médios de e_1 e e_1^* no Ensaio 4.1 foram de 0,84 e no Ensaio 4.2 foram de 0,87. Esses valores estão dentro da faixa encontrada nos ensaios realizados em campo e descritos no Capítulo 6 desse trabalho, para o sistema manual de levantamento e soltura, ver Figuras 6.42 e 6.43.

O valor médio de e_2 no Ensaio 4.1 foi de 0,89 e no Ensaio 4.2 foi de 0,94. Esses valores também se encontram na faixa de valores encontrados nos ensaios realizados em campo, para uma cabeça de bater com massa de 977 g, ver Figura 6.44.

Os comprimentos de bucha de solo nos ensaios dinâmicos 4.1 e 4.2 (361 mm e 360 mm, respectivamente) são significativamente maiores que os encontrados nos ensaios estáticos 2.1 e 2.2 (232 mm e 244 mm), realizados com o mesmo amostrador. Isso sugere que o mecanismo de formação do embuchamento é influenciado pela velocidade de cravação do amostrador. O valor de PLR no Ensaio 4.1 foi de 0,74 e no Ensaio 4.2 foi de 0,75.

Nas Figuras 7.27 e 7.28 são mostradas as energias acumuladas na cravação do amostrador SPT em função da profundidade, nos Ensaios 4.1 e 4.2, respectivamente.

É possível que o sistema SPT Analyzer não tenha sido capaz de medir toda a energia transferida à composição de hastes nos golpes do Ensaio 4.1, em função do tempo de aquisição ser insuficiente, como já verificado em outras cravações em solos com N_{SPT} baixo. Isso explica o pequeno valor de energia acumulada no ensaio 4.1 (1075 J), que é significativamente menor que a energia acumulada no Ensaio 2.1 (2060 J), durante a cravação estática do amostrador SPT numa amostra de areia com compacidade semelhante.

A Energia gasta na cravação dinâmica do amostrador SPT no Ensaio 4.2 foi de 3516 J, valor significativamente maior que o verificado no Ensaio 2.2 (2520 J), durante a cravação estática do amostrador SPT numa amostra de areia com compacidade semelhante.

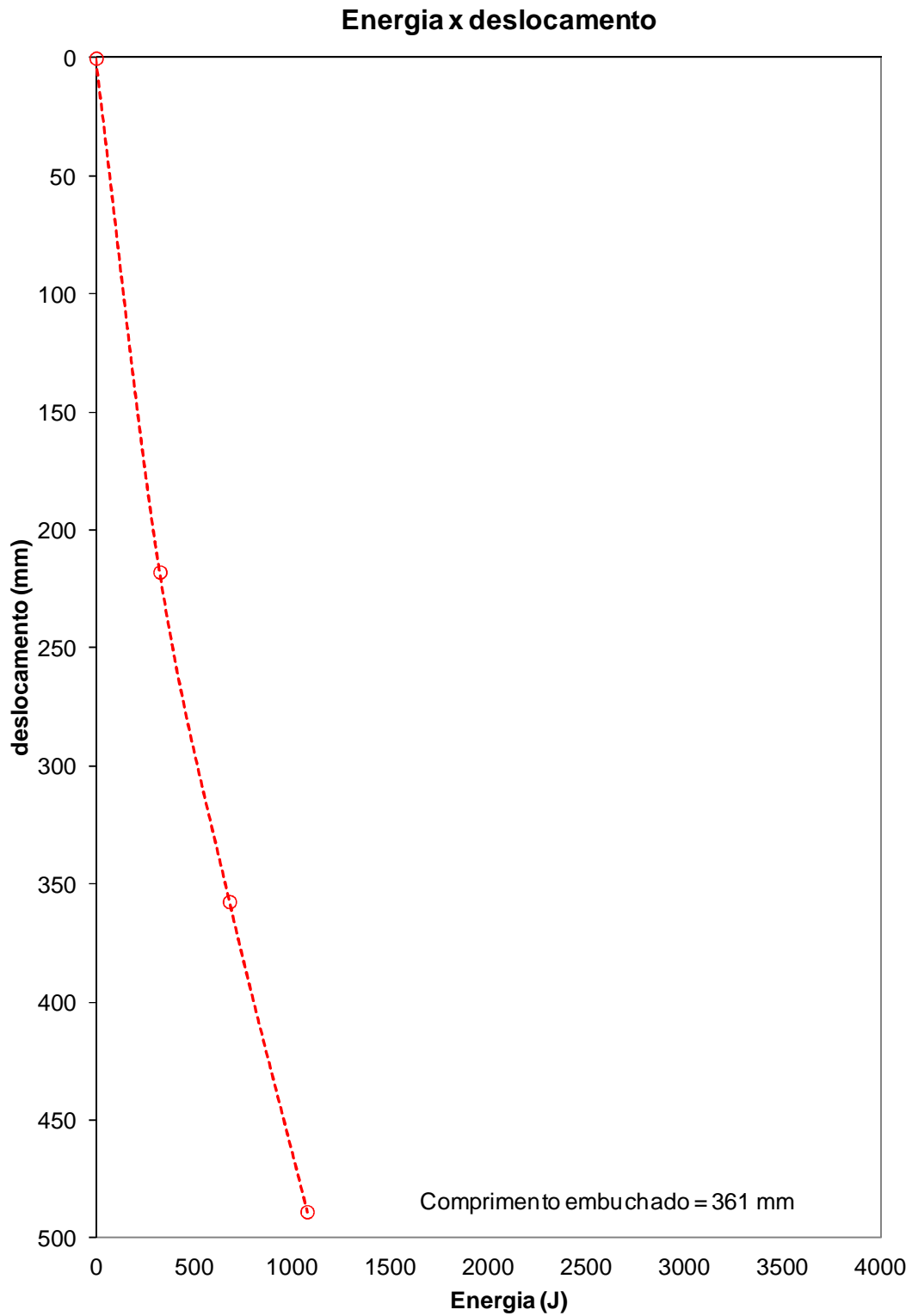


Figura 7.27 – Energia acumulada na cravação do amostrador em função da profundidade – Ensaio 4.1.

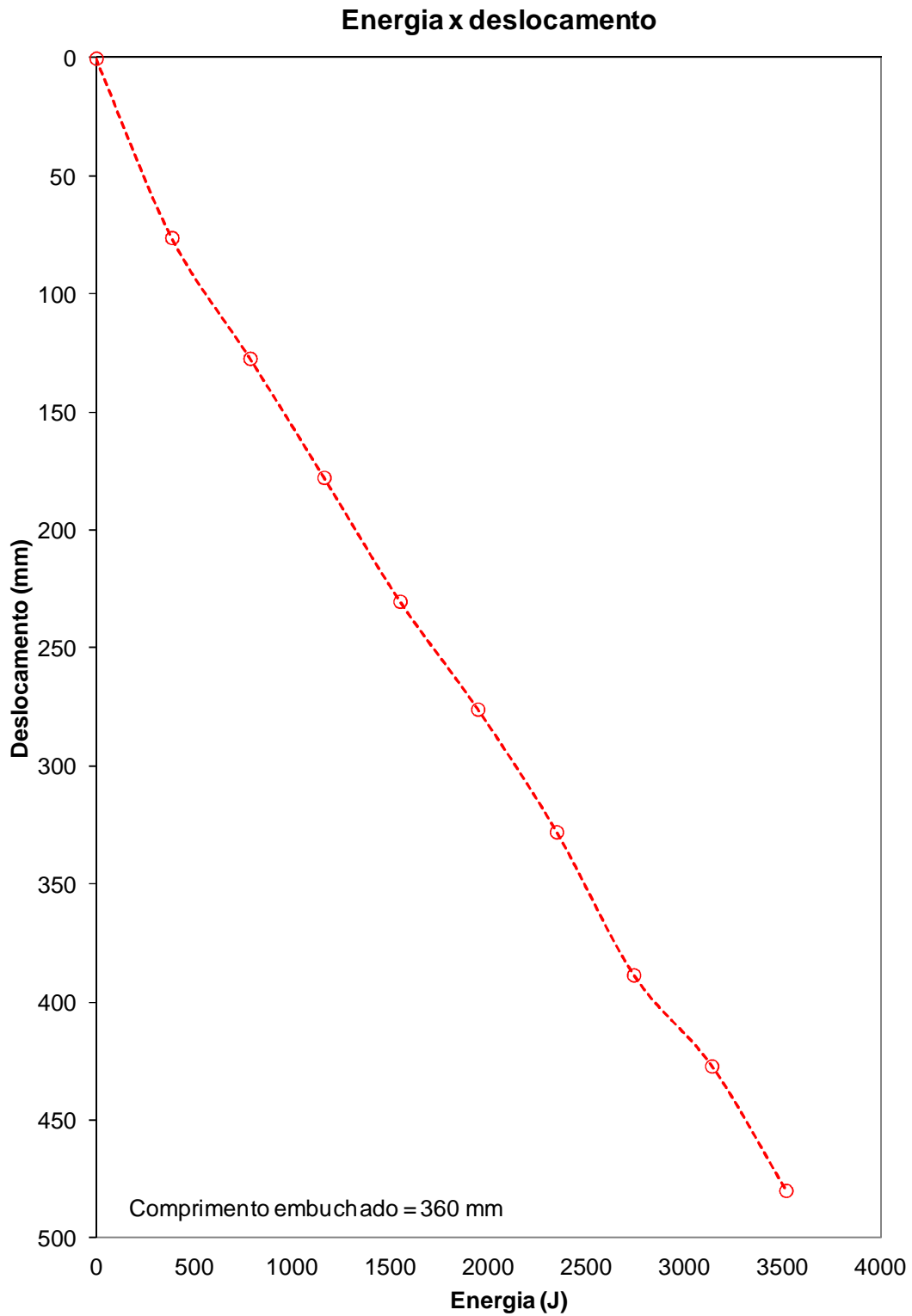


Figura 7.28 – Energia acumulada na cravação do amostrador em função da profundidade – Ensaio 4.2.

7.6 CRAVAÇÃO DINÂMICA DO NOVO AMOSTRADOR

7.6.1 Descrição dos ensaios

Foram realizados dois ensaios de cravação dinâmica do novo amostrador em câmara de calibração, com monitoramento da energia no topo da composição de hastes, medição de altura de queda do martelo e de sua velocidade de impacto. Além disso, foram medidas tensões no interior do amostrador, e, ao final do ensaio, foi medido o comprimento de bucha de solo.

7.6.2 Características dos ensaios

A montagem desses ensaios foi similar à utilizada nos ensaios de cravação dinâmica do amostrador SPT (ver item 7.5.2), com uma diferença: foi utilizado o novo amostrador instrumentado ao invés do amostrador SPT.

Mais uma vez, as duas amostras foram submetidas a tensões verticais de aproximadamente 80 kPa na sua base. A Figura 7.29 mostra a montagem utilizada nos dois ensaios de cravação dinâmica do amostrador SPT em câmara de calibração.



Figura 7.29 – Montagem do ensaio de cravação dinâmica do novo amostrador.

7.6.3 Apresentação dos resultados

A Tabela 7.7 mostra um resumo das condições utilizadas nas cravações dinâmicas do novo amostrador em câmara de calibração.

As energias potencial de soltura do martelo (E_p), cinética de impacto (E_c) e no topo da composição de hastes (E_i) foram obtidas conforme descrito no item 6.2.2. As energias medidas nos golpes do Ensaio 5.1 e do Ensaio 5.2 são apresentadas nas Tabelas 7.8 e 7.9, respectivamente.

No golpe 12 do Ensaio 5.2 não foi possível medir a velocidade de impacto do martelo SPT por problemas no vídeo.

O comprimento de bucha medido no Ensaio 5.1 foi de 344 mm e no Ensaio 5.2 foi de 322 mm.

As Figuras 7.30 e 7.31 mostram as tensões normais medidas pelas três células de tensão total, instaladas nas paredes internas do amostrador instrumentado, nos ensaios 5.1 e 5.2, respectivamente. As Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 mostram as posições das células de tensão total CTT-2, CTT-3 e CTT-4.

Tabela 7.7 – Condições dos ensaios de cravação dinâmica do novo amostrador realizados em câmara de calibração.

Ensaio	W ¹ (kN)	V ² (m ³)	γ^3 (kN/m ³)	OCR ⁴	Base da amostra			Meio da amostra			Topo da amostra			L _C ⁸ (mm)	L _E ⁹ (mm)	PLR ¹⁰
					σ'_v ⁵ (kPa)	σ'_h ⁶ (kPa)	K ₀ ⁷	σ'_v (kPa)	σ'_h (kPa)	K ₀	σ'_v (kPa)	σ'_h (kPa)	K ₀			
Ensaio 5,1	23,2	1,71	13,6	1	88,8	44,9	0,51	78,8	37,7	0,48	68,8	30,4	0,44	482	344	0,71
Ensaio 5,2	25,3	1,71	14,8	1	80,6	48,1	0,60	69,7	40,9	0,59	58,8	33,6	0,57	439	322	0,73

¹W = peso da amostra de areia depositada na câmara;

²V = volume útil da câmara;

³ γ = peso específico da amostra de areia antes do carregamento;

⁴OCR = Razão de sobreadensamento da amostra;

⁵ σ'_v = Tensão efetiva vertical de ensaio;

⁶ σ'_h = Tensão efetiva horizontal de ensaio;

⁷K₀ = Coeficiente de empuxo horizontal no repouso (σ'_h/σ'_v)

⁸L_C = Penetração do amostrador;

⁹L_E = Comprimento de bucha de solo;

¹⁰PLR = Razão de embuchamento (L_E/L_C).

Tabela 7.8 – Energias medidas no Ensaio 5.1.

Golpe	Penetração acumulada (mm)	h_q^1 (m)	v_i^2 (m/s)	E_p^3 (J)	E_c^4 (J)	E_i^5 (J)	E_p/E^{*6}	$E_c/E^*(e_1)$	E_i/E^*	$E_c/E_p(e_1^*)$	E_i/E_p	$E_i/E_c(e_2)$
1	135	0,75	3,50	479,1	398,1	349,9	1,00	0,83	0,73	0,83	0,73	0,88
2	238	0,75	3,67	476,0	437,7	433,1	1,00	0,92	0,91	0,92	0,91	0,99
3	328	0,74	3,64	474,4	430,6	429,9	0,99	0,90	0,90	0,91	0,91	1,00
4	414	0,74	3,72	474,9	449,7	442,8	0,99	0,94	0,93	0,95	0,94	0,98
5	482	0,75	3,62	475,1	425,9	403,5	1,00	0,89	0,84	0,89	0,84	0,95
Média	-	0,75	3,63	475,9	428,4	411,8	0,99	0,90	0,86	0,90	0,87	0,96
Desvio Padrão	-	0,00	0,08	1,9	19,2	37,5	0,01	0,04	0,08	0,04	0,08	0,05

Tabela 7.9 – Energias medidas no Ensaio 5.2.

Golpe	Penetração acumulada (mm)	h_q^1 (m)	v_i^2 (m/s)	E_p^3 (J)	E_c^4 (J)	E_i^5 (J)	E_p/E^{*6}	$E_c/E^*(e_1)$	E_i/E^*	$E_c/E_p(e_1^*)$	E_i/E_p	$E_i/E_c(e_2)$
1	53	0,74	3,52	474,1	402,7	349,7	0,99	0,84	0,73	0,85	0,74	0,87
2	86	0,74	3,52	472,9	402,7	347,3	0,99	0,84	0,73	0,85	0,74	0,86
3	126	0,75	3,51	475,9	400,4	361,3	1,00	0,84	0,76	0,84	0,76	0,90
4	154	0,75	3,49	478,9	395,9	384,7	1,00	0,83	0,80	0,83	0,80	0,97
5	183	0,75	3,54	477,2	407,3	391,2	1,00	0,85	0,82	0,85	0,82	0,96
6	211	0,74	3,52	474,3	402,7	385,3	0,99	0,84	0,81	0,85	0,82	0,96
7	240	0,74	3,57	473,3	414,2	388,1	0,99	0,87	0,81	0,88	0,82	0,94
8	269	0,75	3,52	478,3	402,7	389,9	1,00	0,84	0,82	0,84	0,82	0,97
9	297	0,74	3,57	470,4	414,2	380,5	0,99	0,87	0,80	0,88	0,81	0,92
10	326	0,74	3,50	472,7	398,1	370,5	0,99	0,83	0,77	0,84	0,79	0,93
11	354	0,74	3,50	474,6	398,1	383,3	0,99	0,83	0,80	0,84	0,81	0,96
12	383	0,75	-	475,3	-	386,4	1,00	-	0,81	-	0,81	-
13	411	0,74	3,55	473,8	409,6	392,1	0,99	0,86	0,82	0,87	0,83	0,96
14	439	0,75	3,65	475,5	433,0	416,4	1,00	0,91	0,87	0,91	0,87	0,96
Média	-	0,74	3,54	474,8	406,3	380,5	0,99	0,85	0,80	0,86	0,80	0,94
Desvio Padrão	-	0,00	0,04	2,3	9,9	18,2	0,01	0,02	0,04	0,02	0,04	0,04

¹ h_q = altura de queda do martelo SPT

² v_i = velocidade de impacto do martelo SPT;

³ E_p = energia potencial real do martelo SPT no momento da soltura;

⁴ E_c = energia cinética do martelo SPT na iminência do impacto;

⁵ E_i = energia medida no topo da composição de hastes;

⁶ E^* = energia potencial teórica do martelo SPT do sistema brasileiro (478,2 J).

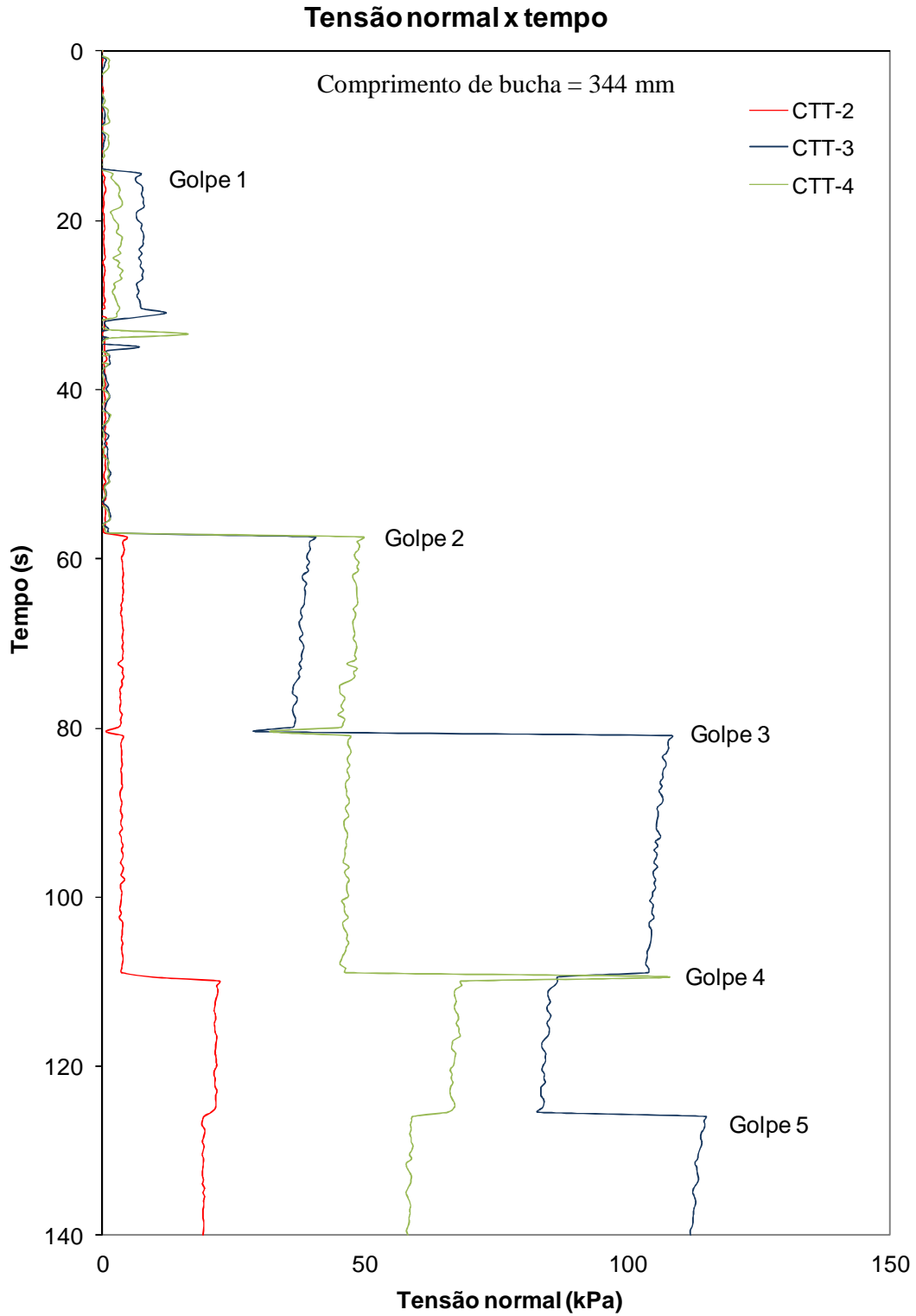


Figura 7.30 – Tensões normais medidas nas paredes internas do amostrador – Ensaio 5.1.

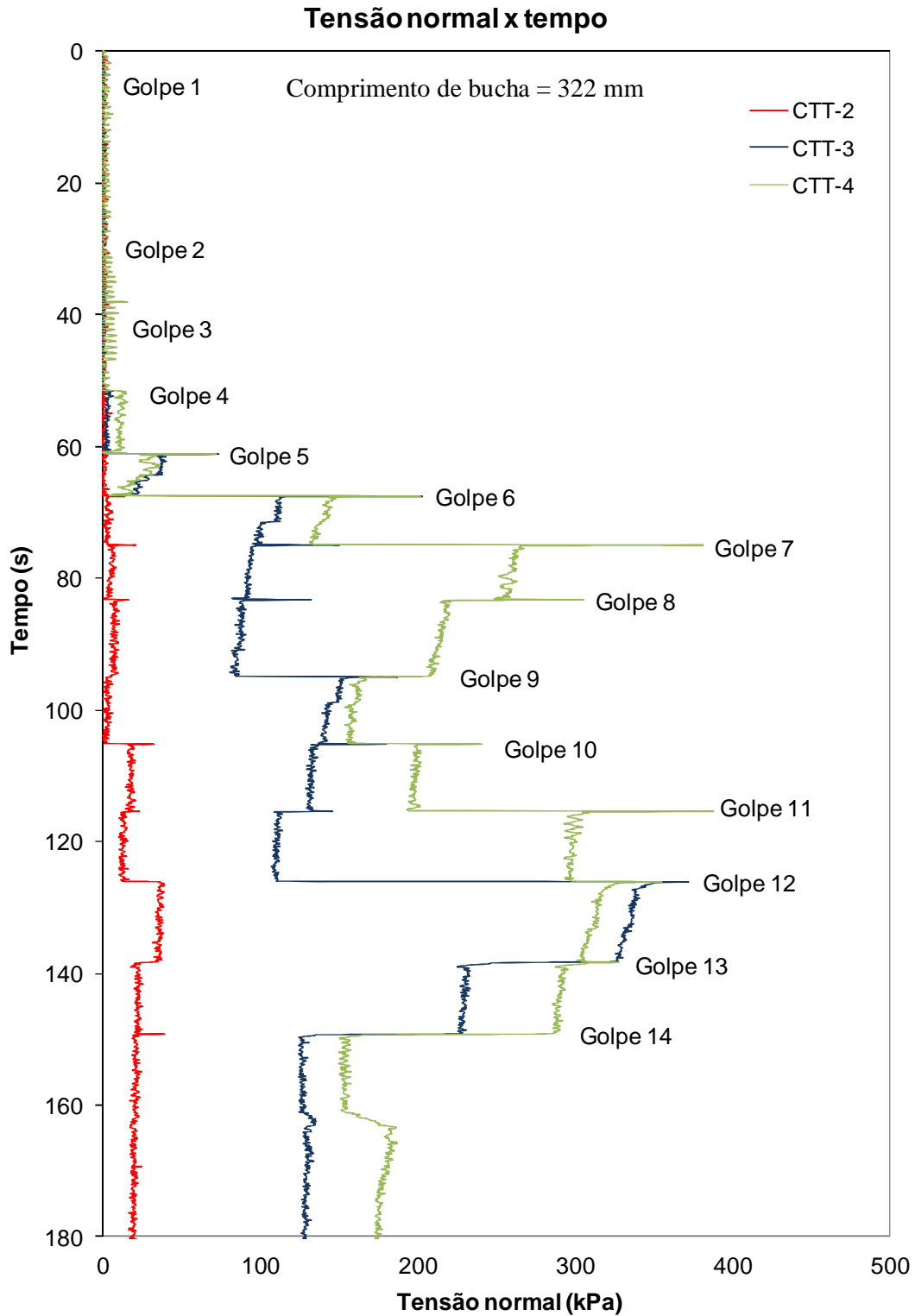


Figura 7.31 – Tensões normais medidas nas paredes internas do amostrador – Ensaio 5.2.

7.6.4 *Análise dos resultados*

As massas específicas das amostras de areia, antes da etapa de compressão, valem 13,6 e 14,8 kN/m³ nos Ensaio 5.1 e 5.2, respectivamente. Como esperado, o Ensaio 5.1 atingiu massa específica próxima aos Ensaio 1.1, 2.1, 3.1 e 4.1 e o Ensaio 5.2 atingiu massa específica próxima aos Ensaio 1.2, 2.2, 3.2 e 4.2.

Os valores de K_0 no centro da amostra valem 0,48 no Ensaio 5.1 e 0,59 no Ensaio 5.2. Esses valores também estão dentro da faixa de valores encontrados por Last et al. (1987) e Zohrabi (1993) em ensaios utilizando a mesma câmara de calibração e a mesma areia, ver Tabelas 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6. O valor de K_0 da amostra de menor compactidade foi menor que o valor de K_0 da amostra de maior compactidade, ao contrário do verificado nos três primeiros ensaios.

A altura de queda média no Ensaio 5.1 foi de 75 cm e no Ensaio 5.2 foi de 74 cm, com desvios padrão de 0 cm, nos dois casos.

A velocidade média de impacto no Ensaio 5.1 foi de 3,63 m/s e no Ensaio 5.2 foi de 3,54 m/s, o que corresponde a energias cinéticas médias de 428,4 J no Ensaio 5.1 e 406,3 J no ensaio 5.2.

A energia média medida no topo da composição de hastes no Ensaio 5.1 foi de 411,8 J (eficiência de 86% em relação à energia padrão e à potencial real) e no Ensaio 5.2 foi de 380,5 J (eficiência de 80 % em relação às energias padrão e potencial real).

Os valores médios de e_1 e e_1^* no Ensaio 5.1 foram de 0,90 e no Ensaio 5.2 foram 0,85 e 0,86. Esses valores estão dentro da faixa encontrada nos ensaios realizados em campo e descritos no Capítulo 6 desse trabalho, para o sistema manual de levantamento e soltura, ver Figuras 6.42 e 6.43.

O valor médio de e_2 no Ensaio 5.1 foi de 0,96 e no Ensaio 5.2 foi de 0,94. Esses valores também se encontram na faixa de valores encontrados nos ensaios realizados em campo, para uma cabeça de bater com massa de 977 g, ver Figura 6.44.

Os comprimentos de bucha de solo nos ensaios dinâmicos 5.1 e 5.2 (344 mm e 322 mm, respectivamente) são significativamente maiores que os encontrados nos ensaios

estáticos 3.1 e 3.2 (209 mm e 205 mm), realizados com o mesmo amostrador. Isso sugere que o mecanismo de formação do embuchamento é influenciado pela velocidade de cravação do amostrador. O mesmo já havia sido verificado comparando ensaios dinâmicos e estáticos realizados com o amostrador SPT padrão (Ensaio 2.1, 2.2, 4.1 e 4.2). O valor de PLR no Ensaio 5.1 foi de 0,71 e no Ensaio 5.2 foi de 0,73.

Nas Figuras 7.32 e 7.33 são mostradas as energias acumuladas na cravação do amostrador SPT em função da profundidade, nos Ensaio 5.1 e 5.2, respectivamente. Essas energias foram medidas no topo da composição de hastes com o equipamento SPT Analyzer.

A energia acumulada no ensaio dinâmico 5.1 (2059 J) é da mesma ordem de grandeza que a energia acumulada no ensaio estático 3.1 (2232 J), sendo ambos os ensaios realizados com o novo amostrador e com amostras de areia de menor compactidade. A energia acumulada no ensaio dinâmico 5.2 (5327 J) também é próxima da energia acumulada no ensaio estático 3.2 (5686 J), sendo ambos os ensaios realizados com o novo amostrador e com amostra de areia de maior compactidade.

Do mesmo modo que nos ensaios estáticos com o novo amostrador (3.1 e 3.2), as maiores tensões no interior do amostrador foram verificadas nas células inferiores (CTT-3 e CTT-4). Entretanto, essas tensões ora foram maiores na célula central (CTT-4), ora na célula periférica (CTT-3), ver Figuras 7.30 e 7.31. No Ensaio 5.1 foram medidas tensões de até 115 kPa e no Ensaio 5.2 foram medidas tensões de até 385 kPa.

Nos ensaios 5.1 e 5.2 inicialmente verifica-se um acréscimo de tensões no interior do amostrador após cada golpe. Depois de certo número de golpes, começa a haver uma redistribuição de tensões nas paredes do amostrador a cada golpe. Chama atenção que essa redistribuição de tensões não parece seguir um padrão definido, com aumentos e reduções de tensões.

Além disso, percebe-se que após cada golpe há um pequeno alívio de tensões, que é interrompido pelo golpe subsequente (ver Figuras 7.30 e 7.31).

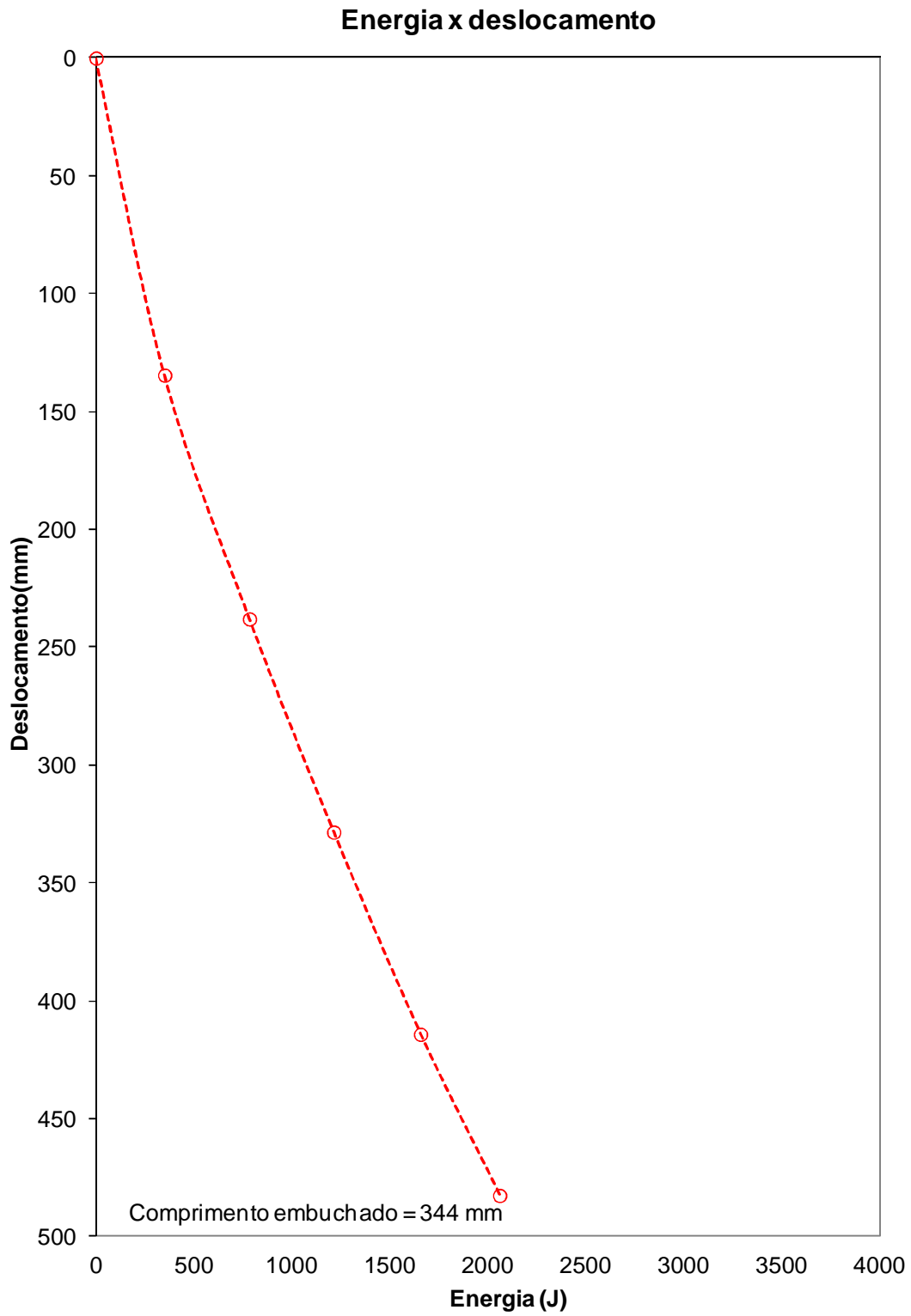


Figura 7.32 – Energia acumulada na cravação do amostrador em função da profundidade – Ensaio 5.1.

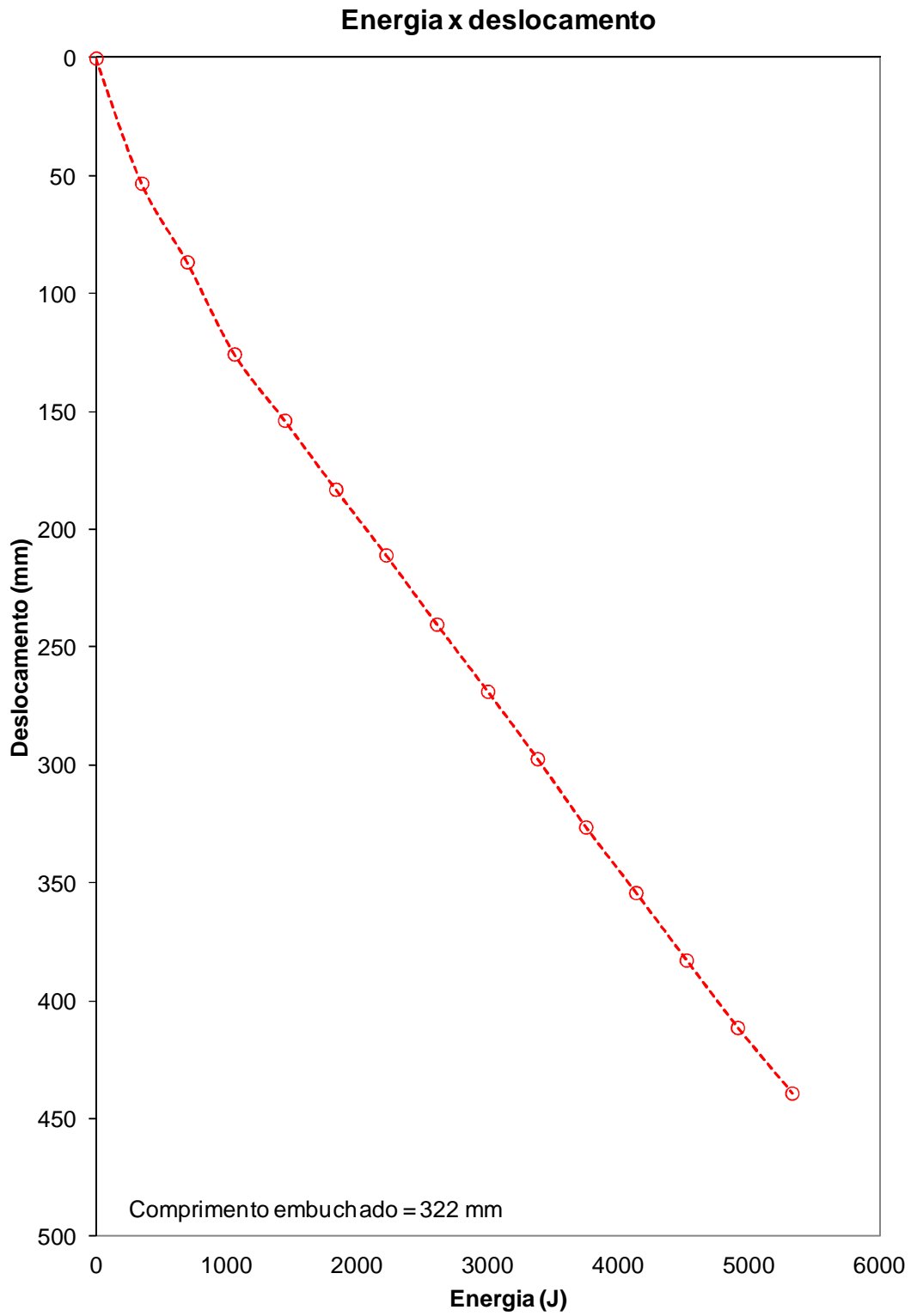


Figura 7.33 – Energia acumulada na cravação do amostrador em função da profundidade – Ensaio 5.2.

7.7 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

7.7.1 Comparação de dados de embuchamento

Nesse item é realizada uma análise comparativa dos dados de embuchamento de todos os ensaios apresentados. A Tabela 7.10 mostra um resumo das condições dos ensaios realizados.

Tabela 7.10 – Condições dos ensaios realizados em câmara de calibração.

Ensaio	W ¹ (kN)	γ^2 (kN/m ³)	Base da amostra				Meio da amostra				Topo da amostra				Lc ⁷ (mm)	L _E ⁸ (mm)	PLR ⁹	E (J) ¹⁰
			σ'_v ³ (kPa)	σ'_h ⁴ (kPa)	σ'_m ⁵ (kPa)	K ₀ ⁶	σ'_v (kPa)	σ'_h (kPa)	σ'_m (kPa)	K ₀	σ'_v (kPa)	σ'_h (kPa)	σ'_m (kPa)	K ₀				
Ensaio 1.1	23,7	13,9	49,9	25,5	33,6	0,51	39,7	18,3	25,4	0,46	29,4	11,0	17,1	0,37	-	-	-	-
Ensaio 1.2	25,1	14,7	82,4	36,4	51,7	0,44	71,6	29,2	43,3	0,41	60,7	21,9	34,8	0,36	-	-	-	-
Ensaio 2.1	23,3	13,6	79,1	48,9	59,0	0,62	69,1	41,7	50,8	0,60	59,0	34,4	42,6	0,58	453	232	0,51	2060
Ensaio 2.2	24,8	14,5	79,7	32,4	48,2	0,41	69,0	25,2	39,8	0,36	58,3	17,9	31,4	0,31	444	244	0,55	2520
Ensaio 3.1	23,3	13,6	77,5	46,6	56,9	0,60	67,5	39,4	48,8	0,58	57,4	32,1	40,5	0,56	465	209	0,45	2232
Ensaio 3.2	25,2	14,7	81,8	42,1	55,3	0,51	70,9	34,9	46,9	0,49	60,1	27,6	38,4	0,46	461	205	0,44	5686
Ensaio 4.1	23,4	13,7	79,5	50,0	59,8	0,63	69,4	42,8	51,7	0,62	59,3	35,5	43,4	0,60	489	361	0,74	1075
Ensaio 4.2	25,3	14,8	81,2	52,9	62,3	0,65	70,3	45,7	53,9	0,65	59,4	38,4	45,4	0,65	480	360	0,75	3516
Ensaio 5.1	23,2	13,6	88,8	44,9	59,5	0,51	78,8	37,7	51,4	0,48	68,8	30,4	43,2	0,44	482	344	0,71	2059
Ensaio 5.2	25,3	14,8	80,6	48,1	58,9	0,60	69,7	40,9	50,5	0,59	58,8	33,6	42,0	0,57	439	322	0,73	5327

¹W = peso da amostra de areia depositada na câmara;

² γ = peso específico da amostra de areia antes do carregamento, considerando-se V = 1,71 m³;

³ σ'_v = Tensão efetiva vertical de ensaio;

⁴ σ'_h = Tensão efetiva horizontal de ensaio;

⁵ σ'_m = Tensão efetiva octaédrica de ensaio;

⁶K₀ = Coeficiente de empuxo horizontal no repouso (σ'_h/σ'_v);

⁷L_C = Penetração do amostrador;

⁸L_E = Comprimento de bucha de solo;

⁹PLR = Razão de embuchamento (L_E/L_C);

¹⁰E = Energia gasta na cravação do amostrador.

Na Figura 7.34 os valores de K_0 de todos os ensaios são apresentados em função da tensão efetiva octaédrica (σ'_m). Verifica-se uma tendência clara de aumento de K_0 com o aumento de σ'_m , tanto para as amostras mais fofas quanto para as menos fofas. Cabe ressaltar a estreita faixa de variação das tensões octaédricas em que esses ensaios foram realizados (25,4 kPa a 53,9 kPa).

Verifica-se em todos os ensaios realizados, para ambos os amostradores (SPT convencional e novo amostrador), valores de PLR menores que 1, indicando que ocorreu algum grau de embuchamento. Na Figura 7.35 são apresentados os valores de PLR de todos os ensaios em função da tensão efetiva horizontal (σ'_h). Os ensaios estáticos apresentam menores valores de PLR que os ensaios dinâmicos. Os ensaios realizados com o novo amostrador apresentam menores valores de PLR que os ensaios realizados com o amostrador SPT convencional. Na maioria dos ensaios as amostras de menor compactidade apresentaram menores valores de PLR.

Conforme já discutido no Capítulo 2, menores valores de PLR indicam embuchamento de solo no amostrador menos móvel (menor penetração da bucha de solo no amostrador). Desse modo, pode-se concluir que o embuchamento apresentou-se menos móvel nos ensaios estáticos que nos dinâmicos. Do mesmo modo, o embuchamento apresentou-se menos móvel nos ensaios realizados com o novo amostrador que nos ensaios realizados com o amostrador SPT convencional. Na maioria dos ensaios o embuchamento foi menos móvel nas amostras de menor compactidade.

É possível que a forma do novo amostrador tenha contribuído para que os valores de PLR fossem menores que nos ensaios com o amostrador SPT convencional, já que se sabe que a redução do diâmetro favorece o embuchamento.

Paik e Salgado (2003) já haviam evidenciado, durante a cravação de estacas tubulares em areia, que com a redução da compactidade das areias são obtidos menores valores de PLR. Os resultados desse trabalho mostram que o mesmo é válido para o amostrador SPT e o novo amostrador.

Sabe-se que um embuchamento menos móvel, menor PLR, aumenta a resistência à cravação de estacas tubulares (e.g. Paik e Salgado, 2003). Acredita-se que o mesmo seja

válido para o amostrador SPT, daí a importância em compreender esse mecanismo, a fim de melhor interpretar os ensaios SPT.

As diferenças significativas nos valores de PLR obtidos nos ensaios estáticos e dinâmicos (ver Figura 7.35) evidenciam que a velocidade de cravação do amostrador afeta a razão de embuchamento, o que afeta a resistência à cravação do amostrador. Conforme já havia sido previsto por Randolph et al. (1991) para estacas, o embuchamento foi menos móvel em cravações estáticas que nas cravações dinâmicas dos amostradores.

Comparando-se os amostradores, verifica-se que o novo amostrador demanda maior energia de cravação que a correspondente ao amostrador convencional. Isso era esperado, já que o novo amostrador tem áreas de ponta e lateral maiores que o amostrador SPT, ver Figuras 7.36 e 7.37.

Nos ensaios realizados nas amostras menos compactas de areia, verifica-se maior energia gasta nos ensaios estáticos que nos dinâmicos. Esperava-se o contrário, em função de deslocamentos elásticos do solo, que ocorrem em ensaios dinâmicos.

É provável que nesses casos, o SPT Analyzer não tenha sido capaz de medir toda a energia transferida para a composição de hastes nos ensaios dinâmicos, em função da cravação de haste curta em material de baixa resistência, ver figura 7.36.

A Figura 7.38 mostra o gráfico de energia medida no topo da composição de hastes em função do tempo, em que é possível observar que golpes posteriores ao primeiro transferem energia à composição de hastes. É provável que o tempo de aquisição do SPT Analyzer tenha sido insuficiente para os ensaios em amostras de menor compactidade.

Já no conjunto de ensaios realizados nas amostras de maior compactidade, os ensaios dinâmicos demandam maior energia para a cravação que os estáticos, ver Figura 7.37.

A Figura 7.39a ilustra o comportamento típico observado nas curvas carga versus deslocamento da cravação estática dos amostradores em câmara de calibração. É possível fazer um paralelo entre o comportamento observado e o descrito por Hvorslev (1949), ver Figura 7.39b, conforme apresentado na Tabela 7.11.

Tabela 7.11 – Comparação dos resultados da presente pesquisa com os apresentados por Hvorslev (1943).

Trecho	Comportamento observado na presente pesquisa			Comportamento observado por Hvorslev (1949)
	Curva carga x deslocamento	-Tensões medidas no interior do amostrador	Comportamento da bucha de solo	
1	Crescimento lento da carga à medida que a profundidade aumenta.	-	Trecho afetado pelo processo de escavação.	Trecho com irregularidades iniciais.
2	A carga de cravação passa a crescer rapidamente com o aumento da profundidade, possuindo comportamento aproximadamente linear.	Após o solo atingir os sensores, as tensões crescem lentamente com a profundidade, possuindo aspecto aproximadamente linear.	Nesse trecho ainda não ocorre embuchamento.	Aumento linear da resistência.
3	Há uma desaceleração no crescimento da carga de cravação, sendo verificado comportamento não-linear.	As tensões passam a crescer mais rapidamente, possuindo aspecto marcadamente irregular.	Início do processo de embuchamento, com a penetração de solo no interior do amostrador menor que a penetração do amostrador no solo.	Desaceleração do aumento da resistência com a penetração.
4	A carga de cravação passa a crescer numa velocidade menor ou torna-se constante, apresentando comportamento aproximadamente linear.	Depois de atingido um pico, as tensões sofrem redução e tornam-se quase constantes com o decorrer da cravação.	O embuchamento do solo torna-se menos móvel, com a bucha de solo deslocando-se pouco ou permanecendo imóvel no interior do amostrador.	Resistência aproximadamente constante. Não entra mais solo no amostrador.

Cabe salientar que a extensão de cada trecho varia em função das características do solo e do tipo de solicitação.

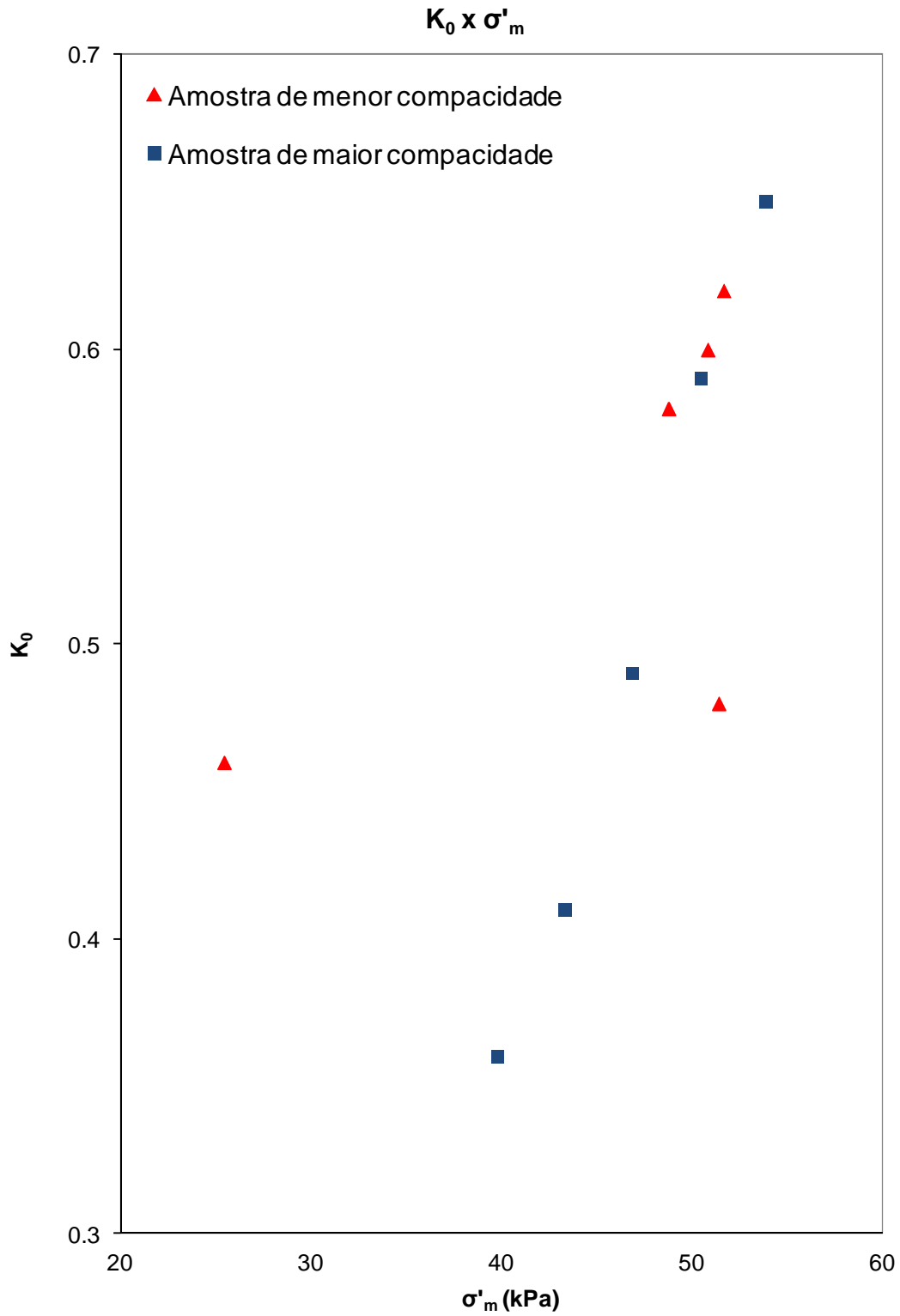


Figura 7.34 – Valores de K_0 em função da tensão efetiva octaédrica, obtidos de ensaios em câmara de calibração.

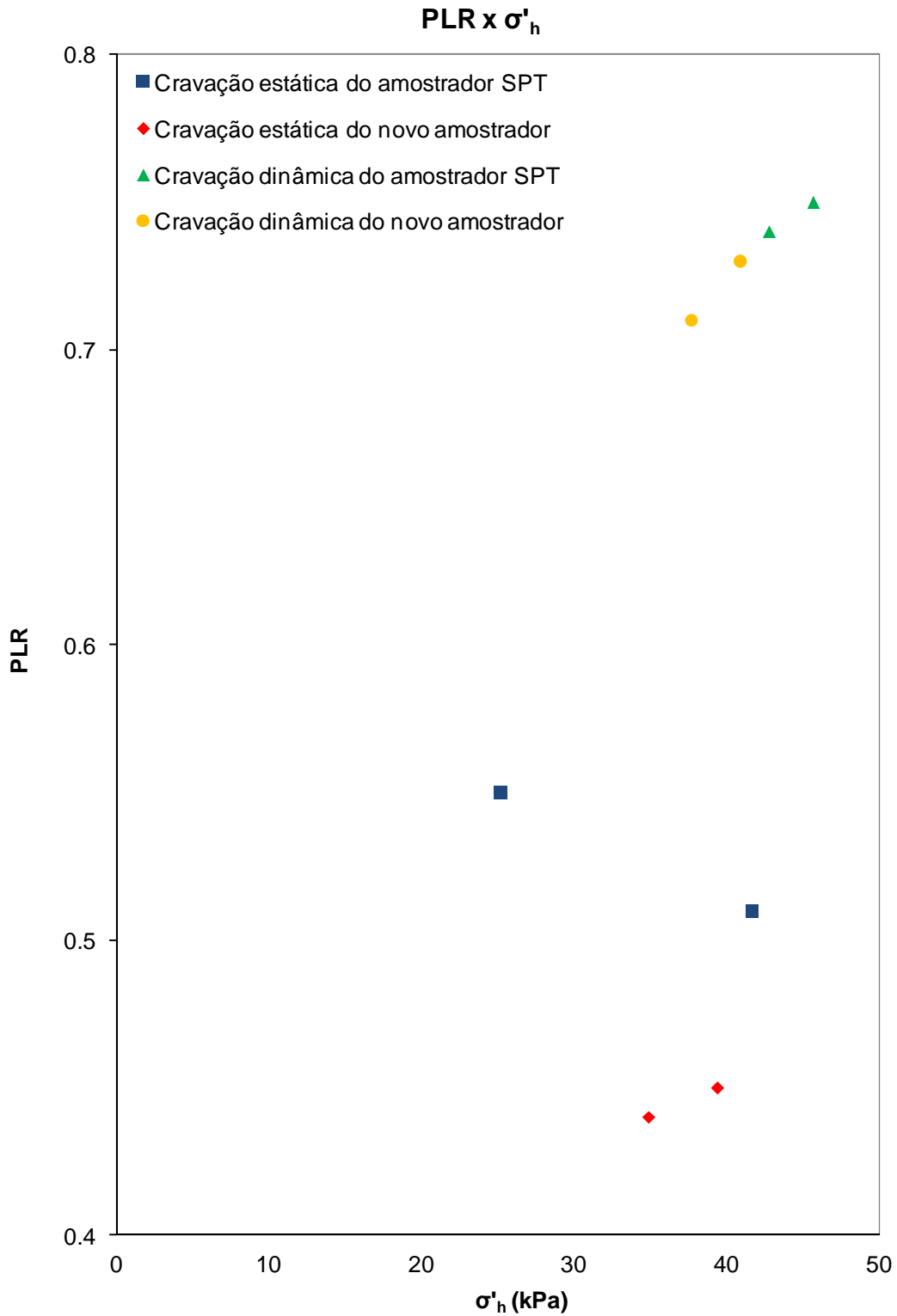


Figura 7.35 – Valores de PLR em função da tensão efetiva horizontal, obtidos de ensaios em câmara de calibração.

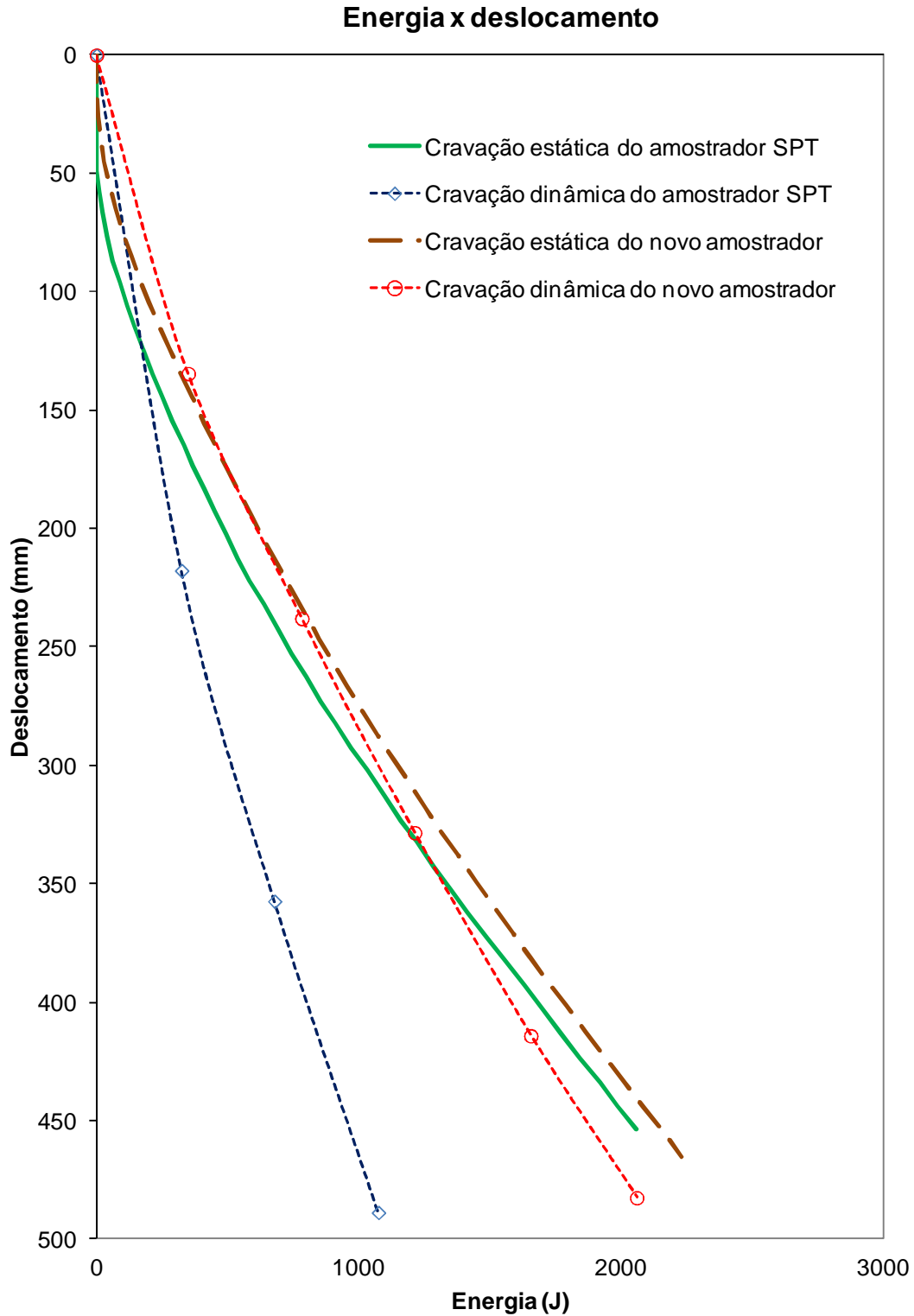


Figura 7.36 – Energias gastas durante a cravação dos amostradores nas amostras menos compactas de areia.

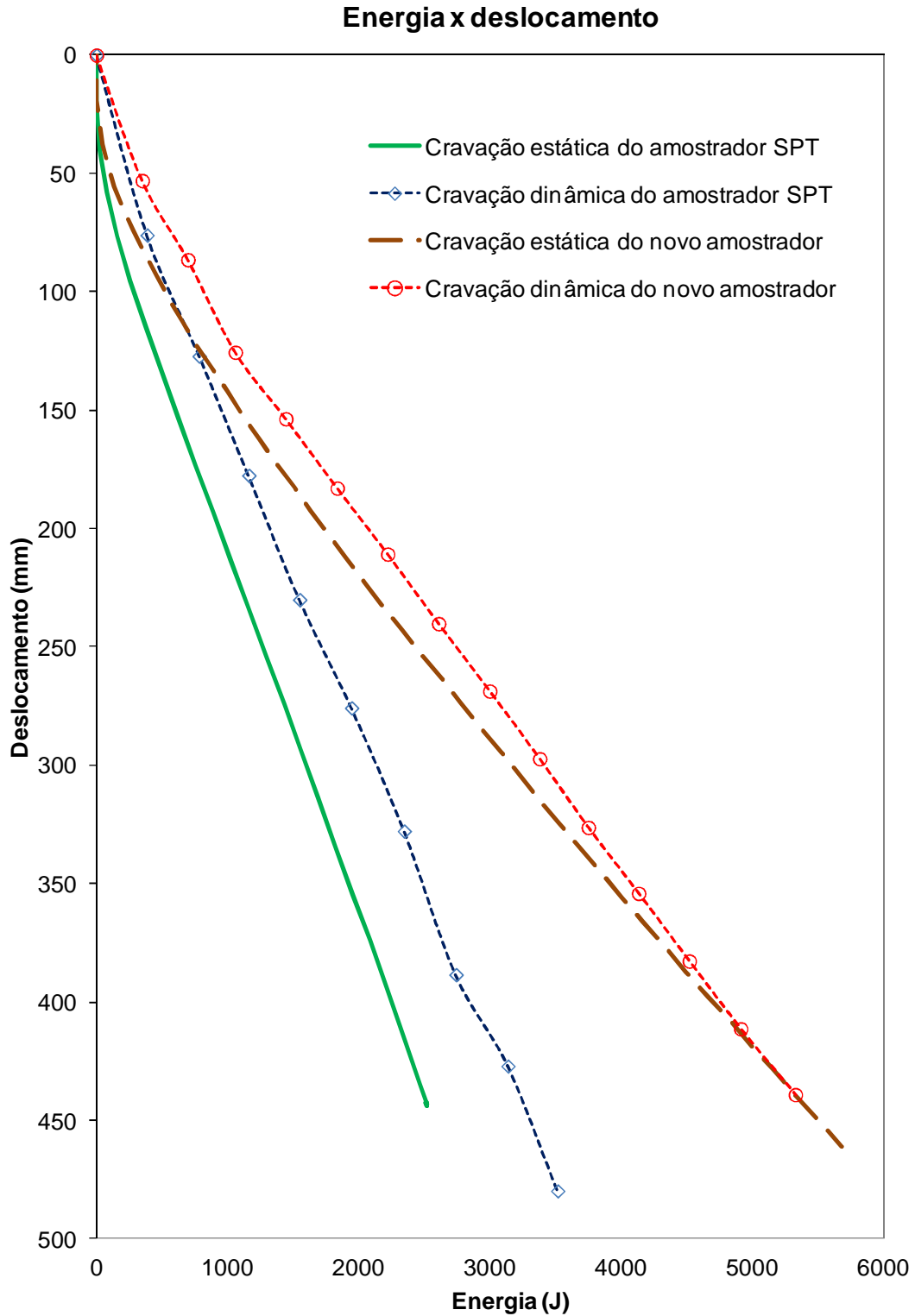


Figura 7.37 – Energias gastas durante a cravação dos amostradores nas amostras mais compactas de areia.

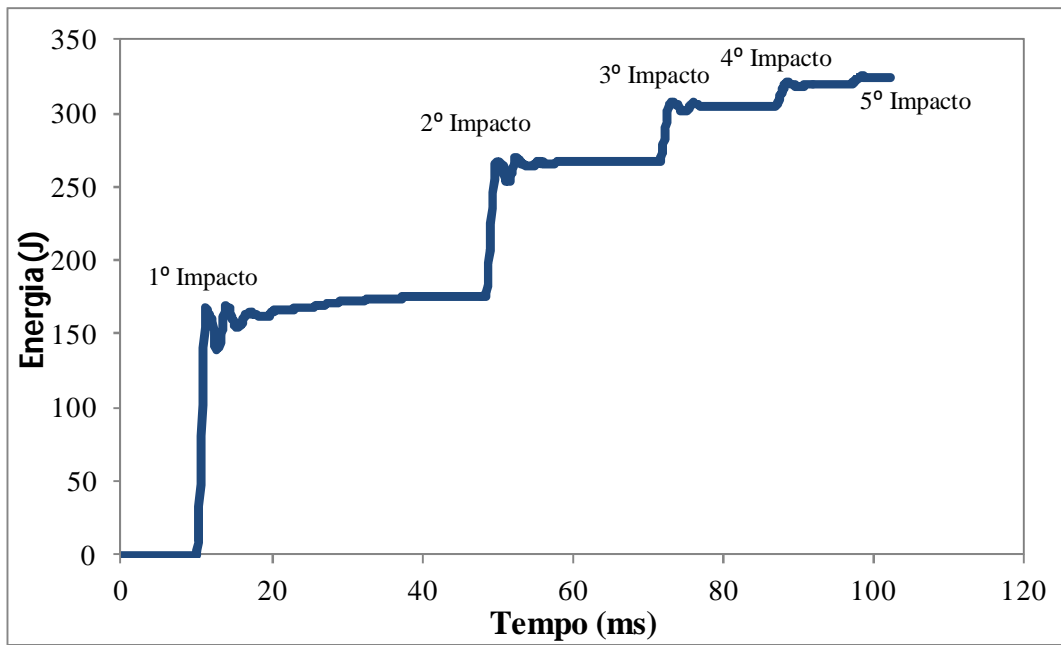


Figura 7.38 – Energia em função do tempo medida no Golpe 1 do Ensaio 4.1.

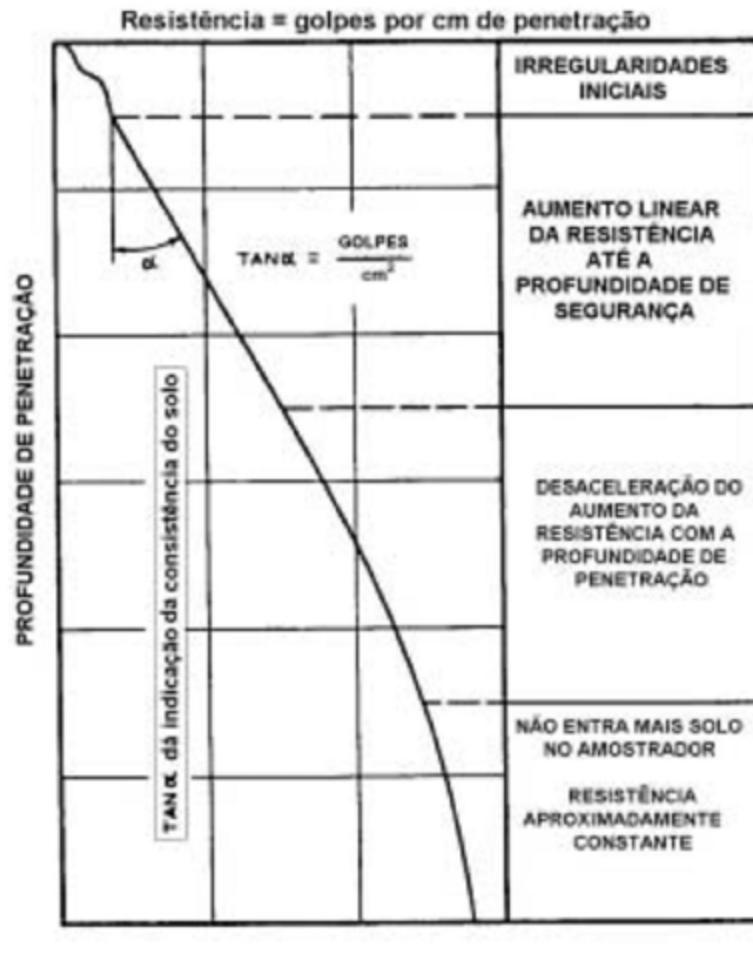
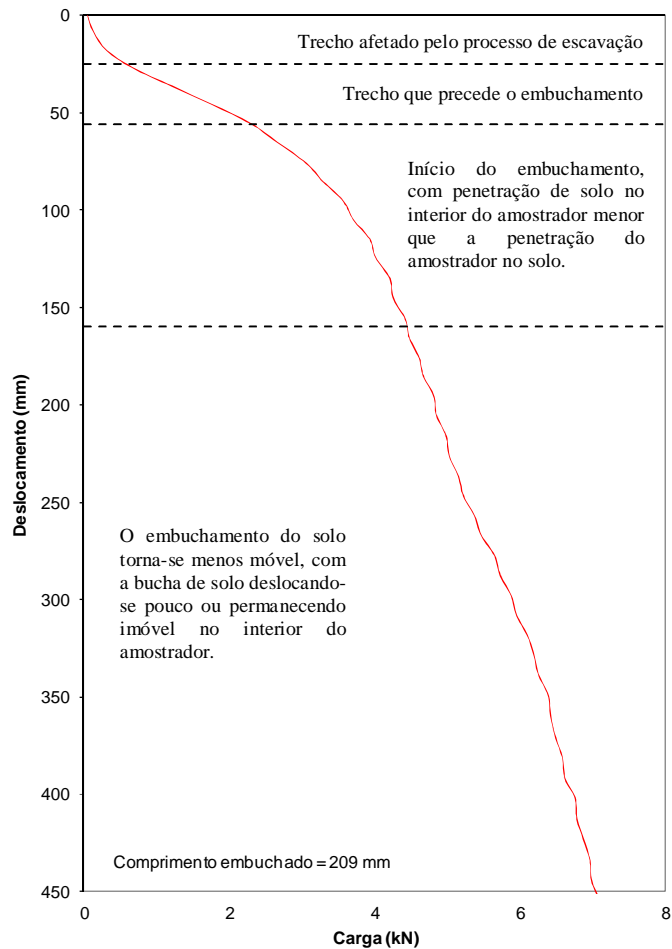


Figura 7.39 – (a) Carga de cravação estática em função da penetração do amostrador – Ensaio 3.1 (b) Resistência em função da penetração do amostrador SPT (adaptado por Cavalcante 2002 de Hvorslev 1949).

7.7.2 Comparação de energias medidas nos ensaios SPT

Nesse item são comparadas as energias medidas nos quatro ensaios dinâmicos. A Tabela 7.12 mostra um resumo das energias. Além disso, são comparados valores de e_1^* e e_2 , medidos em câmara de calibração com outros obtidos em campo, ver Figuras 7.36 e 7.37, respectivamente.

Tabela 7.12 – Energias medidas nos ensaios em câmara de calibração.

Ensaio	N ¹	h _q ² (m)		v _i ⁵ (m/s)		E _p ⁶ (J)		E _c ⁷ (J)		E _i ⁸ (J)		E _p /E ^{*9}	E _c /E ^{* (e₁)}	E _i /E [*]	E _c /E _p (e ₁ [*])	E _i /E _p	E _i /E _c (e ₂)
		M ³	DP ⁴	M	DP	M	DP	M	DP	M	DP						
4.1	3	0,75	0,00	3,52	0,01	478,2	0,0	402,3	2,3	358,4	35,4	1,00	0,84	0,75	0,84	0,75	0,89
4.2	9	0,75	0,01	3,57	0,07	476,1	6,4	414,6	15,8	390,6	8,9	1,00	0,87	0,82	0,87	0,82	0,94
5.1	5	0,75	0,00	3,63	0,08	475,9	1,9	428,4	19,2	411,8	37,5	0,99	0,90	0,86	0,90	0,87	0,96
5.2	14	0,74	0,00	3,54	0,04	474,8	2,3	406,3	9,9	380,5	18,2	0,99	0,85	0,80	0,86	0,80	0,94

¹N = número de golpes contabilizados pelo SPT Analyzer para a penetração de 45 cm do amostrador;

²h_q = altura do queda do martelo SPT

³M = média;

⁴DP = desvio padrão;

⁵v_i = velocidade de impacto do martelo SPT;

⁶E_p = energia potencial real do martelo SPT no momento da soltura;

⁷E_c = energia cinética do martelo SPT na iminência do impacto;

⁸E_i = energia medida no topo da composição de hastes;

⁹E^{*} = energia potencial teórica do martelo SPT do sistema brasileiro (478,2 J).

As alturas de queda médias dos ensaios ficaram bastante próximas da prescrita na NBR-6484/2001, variando entre 0,74 e 0,75 m, com desvios padrão oscilando entre 0,00 e 0,01 m. Cabe salientar que os ensaios foram realizados em laboratório, com um nível de cuidado dificilmente verificado na execução rotineira de um ensaio SPT em campo. Em consequência disso, as energias potenciais médias oscilaram pouco, variando entre 474,8 e 478,2 J.

As energias médias medidas no topo da composição de hastes (E_i) oscilaram de 358,4 J (eficiência de 75% em relação às energias potenciais teórica e medida) a 411,8 J (eficiência de 86% em relação às energias potenciais teórica e medida), ou seja, uma variação de cerca de 15%. Nos ensaios realizados em Sarapuí II os valores médios medidos tiveram uma variação máxima de cerca de 73% e em Itaguaí de cerca de 37%.

Esses resultados evidenciam, mais uma vez, a importância do controle adequado da altura de queda no ensaio SPT.

Os valores de e_1^* variaram entre 0,84 e 0,90, ficando na faixa de valores encontrados nos ensaios realizados em campo, nos quais foi utilizado o sistema manual de levantamento e soltura, ver Figura 7.40.

Os valores de e_2 variaram entre 0,89 e 0,96, ficando na faixa de valores encontrados nos ensaios realizados em campo, para uma cabeça de bater com massa de 977 g, ver Figura 7.41.

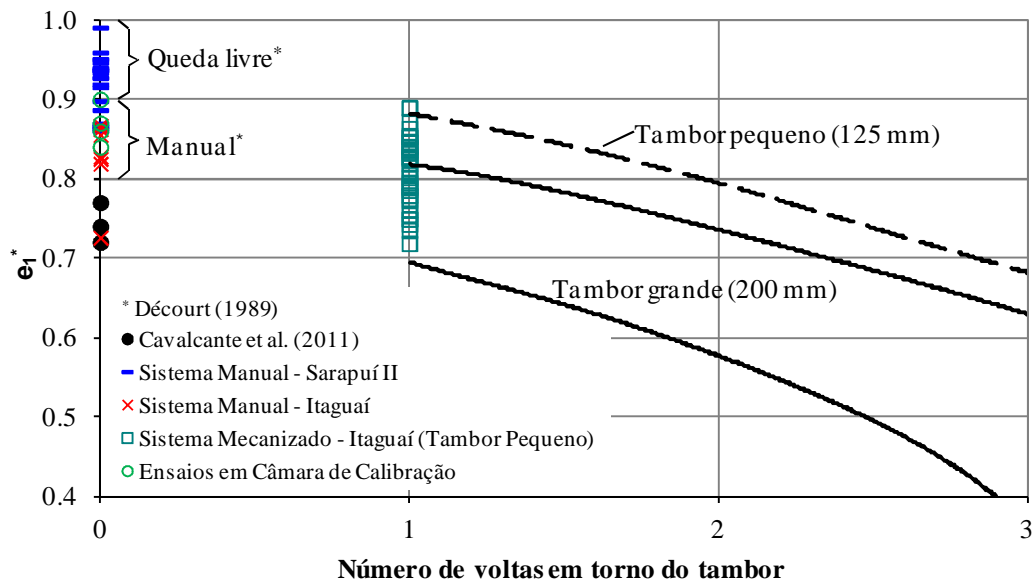


Figura 7.40 – Valores de fator de eficiência e_1^* (adaptado de Skempton, 1986, Décourt, 1989 e Cavalcante et al., 2011).

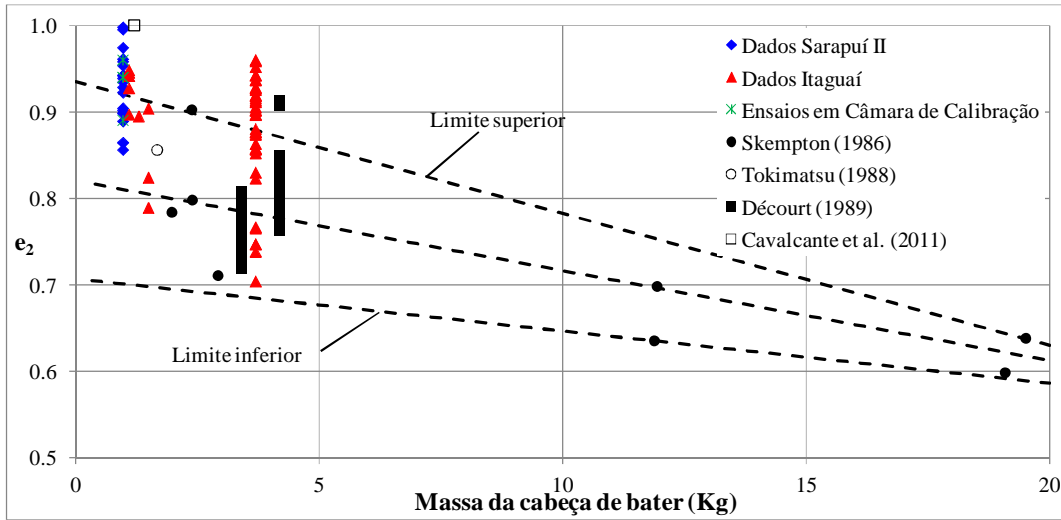


Figura 7.41 – Fator de eficiência e_2 em função da massa da cabeça de bater (adaptado de Décourt, 1989 e Cavalcante et al., 2011).

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

8.1 CONCLUSÕES

8.1.1 Conclusões relativas aos ensaios de campo

- Nenhuma das oito equipes de sondagem acompanhadas nas campanhas no campo experimental de Sarapuí II e na região portuária de Itaguaí seguiu integralmente as prescrições da NBR-6484/2001.
- Foi possível confirmar que sinais de pares de acelerômetros e de medidores de deformações instalados numa mesma haste são essencialmente iguais, para o sistema utilizado nesta pesquisa.
- O método de estimativa da velocidade de impacto do martelo SPT empregado na presente pesquisa, baseado em filmagens com uma câmera de alta velocidade, apresentou resultados consistentes.
- Nas equipes que utilizaram o sistema manual de levantamento e soltura são verificadas as sequências com alturas de queda mais distantes da prescrita na NBR-6484/2001 (75 cm). Em 46% das sequências as alturas médias são iguais ou superiores a 80 cm. Essa tendência foi verificada tanto na campanha de ensaios de Sarapuí II quanto na da Região Portuária de Itaguaí.
- As equipes que utilizaram o sistema mecanizado de levantamento e soltura apresentaram as sequências com menores dispersões. De um modo geral, essas equipes também apresentaram valores de altura de queda mais próximos do prescrito em norma. A altura de queda média encontrada foi de 75 ± 3 cm.
- Os resultados das equipes que utilizaram o sistema mecanizado de levantamento e soltura mostram que é possível a realização de ensaios SPT com alturas de queda próximas à padrão.
- Nas equipes que utilizaram sistema manual de levantamento e soltura verifica-se uma tendência bem definida de variação da altura de queda ao longo dos golpes, na maioria dos casos, com aumento da altura de queda. É provável que o cansaço da equipe cause esse relaxamento no controle da altura de queda.

- Nas equipes que utilizaram sistema mecanizado de levantamento e soltura verifica-se uma tendência de pequena variação na altura de queda, na maioria dos casos, com leve aumento da altura no decorrer da sequência.
- Nos ensaios realizados com sistema manual de levantamento e soltura as frequências médias de aplicação dos golpes variaram de 17,2 a 39,7 golpes/min. Já os ensaios realizados com sistema mecanizado de levantamento e soltura as frequências médias de aplicação dos golpes variaram de 2,7 a 15,9 golpes/min.
- Há uma tendência de maior diferença na altura de queda, em relação à altura padrão, com o aumento da velocidade de aplicação dos golpes, tanto em ensaios com sistema manual quanto em ensaios com sistema mecanizado.
- Não foi possível determinar de forma clara a influência do horário em que o ensaio é realizado na altura de queda, tanto em ensaios com sistema manual quanto em ensaios com sistema mecanizado.
- O fator de eficiência e_1 (E_c/E^*) obtido das equipes que utilizaram sistema manual de levantamento variou de 0,75 a 1,10. O limite inferior está próximo dos valores encontrados por Cavalcante et al. (2011) e o limite superior é significativamente maior que os valores apresentados por Décourt (1989).
- Nos ensaios com o sistema mecanizado de levantamento o fator e_1 variou de 0,71 a 0,90. Esses valores variam numa faixa mais ampla que a apresentada por Décourt (1989), considerando uma volta da corda em torno de um tambor com diâmetro de 125 mm.
- Os valores de e_1^* (E_c/E_p) dos ensaios que utilizaram o sistema manual de levantamento variaram numa faixa menos ampla, de 0,73 a 0,99, sendo que a maioria dos valores está entre 0,82 e 0,96, ficando próximos da faixa de valores apresentada por Décourt (1989), para sistema manual de levantamento.
- Os valores de e_1^* nos ensaios que utilizaram o sistema mecanizado de levantamento variaram de 0,72 a 0,89. Esses valores variam numa faixa mais ampla que a apresentada por Décourt (1989), considerando uma volta da corda em torno de um tambor com diâmetro de 125 mm.
- As energias no topo da composição de hastes variaram de 278,6 (eficiência de 58% em relação à energia potencial teórica) a 551,4 J (eficiência de 115%).
- A significativa dispersão nos valores de E_i é consequência, principalmente, da grande variação na altura de queda.

- Quando a eficiência da energia no topo da composição de hastes é calculada em relação à energia potencial medida, esta varia numa faixa significativamente menor, de 57% a 96%.
- As equipes que empregaram cabeça de bater mais leve apresentaram fator e_2 variando de 0,79 a 1,00. Esses valores estão, em grande parte, dentro da faixa apresentada por Décourt (1989). As equipes com cabeça de bater mais pesada apresentaram fator e_2 variando de 0,70 a 0,96. Esses valores também estão, em grande parte, dentro da faixa apresentada por Décourt (1989).
- Em alguns casos, é possível que altos valores do fator e_2 estejam associados à descida da composição de hastes durante o impacto do martelo, o que gera um acréscimo de energia potencial, que é transferida às hastes nos impactos subsequentes do martelo no mesmo golpe. O SPT Analyzer é capaz de medir toda a energia transferida à composição de hastes, desde que o processo ocorra em até 102 ms. No entanto, a energia cinética é calculada em relação ao primeiro impacto do martelo com a cabeça de bater, o que pode superestimar valores de e_2 em caso de outros impactos.
- Os valores de E_s variaram de 199,7 J (eficiência de 42% em relação às energias potencial padrão e medida) a 392,4 J (eficiência de 82% em relação à energia potencial padrão e de 72% em relação à energia potencial medida).
- Os resultados de E_i/E_p em função do comprimento de hastes, medidos em Sarapuí II, mostram que a energia transferida ao topo da composição de hastes não é significativamente afetada pelo comprimento das mesmas, pelo menos na faixa de comprimentos analisada, de 10,80 a 25,70 m. Isso corrobora o defendido por Danziger et al. (2008), que afirmam que a energia transmitida ao topo da composição de hastes independe de seu comprimento, e o fator e_3 deve ser considerado igual a 1,00.
- Entretanto, os resultados de E_i/E_p em função do comprimento de hastes, medidos em Itaguaí, mostram um cenário diferente. Para hastes com comprimentos inferiores a 7,98 m, parece haver um crescimento na energia transferida às hastes com o aumento do seu comprimento. Para hastes com comprimentos variando de 7,98 m a 37,49 m, a energia transferida à composição de hastes não é significativamente afetada pelo seu comprimento. O observado no trecho com comprimento inferior a 7,98 m pode ter duas explicações:

- i) O SPT Analyzer não foi capaz de medir a energia transferida à composição de hastes durante seu tempo de aquisição, subestimando os valores de E_i ;
 - ii) Em composições de hastes com comprimento inferior ao crítico, a energia não seria transferida à composição de hastes do mesmo modo que seria em composições de hastes mais longas.
- Apenas com a realização de novos ensaios, utilizando um sistema de aquisição de dados para medição de sinais de força e velocidade com tempo de aquisição superior a 102 ms, será possível esclarecer essa dúvida.
 - Os valores de e_4 variaram de 0,56 a 0,92. Chama atenção a grande dispersão nos seus valores, não permitindo definir uma tendência clara de redução ou crescimento nos valores e_4 com o aumento da profundidade.

8.1.2 Conclusões relativas aos ensaios realizados em câmara de calibração

- Verifica-se uma tendência clara de aumento de K_0 com o aumento de σ'_m , tanto para as amostras mais fofas quanto para as menos fofas. Cabe ressaltar a estreita faixa de variação das tensões octaédricas em que esses ensaios foram realizados (25,4 kPa a 53,9 kPa).
- Verifica-se em todos os ensaios realizados em câmara de calibração, seja com amostrador SPT convencional ou com o novo amostrador, valores de PLR menores que 1, indicando que ocorreu algum grau de embuchamento.
- Os ensaios estáticos apresentam menores valores de PLR que os ensaios dinâmicos, ou seja, o embuchamento apresentou-se menos móvel nos ensaios estáticos que nos dinâmicos. Isso evidencia que a velocidade de cravação do amostrador afeta a razão de embuchamento, o que afeta a resistência à cravação do amostrador.
- Os ensaios realizados com o novo amostrador apresentam menores valores de PLR que os ensaios realizados com o amostrador SPT convencional, indicando um embuchamento menos móvel com o uso do primeiro amostrador.
- Na maioria dos ensaios as amostras de menor compactidade apresentaram embuchamento menos móvel.

- Do comportamento observado na cravação estática do amostrador SPT e do novo amostrador é possível distinguir quatro etapas:
 - i. Trecho inicial com crescimento lento da carga à medida que a profundidade aumenta. Provavelmente nesse trecho a amostra foi afetada pelo processo de escavação do pré-furo.
 - ii. No segundo trecho a carga de cravação passa a crescer rapidamente com o aumento da profundidade, possuindo comportamento aproximadamente linear.
 - iii. No terceiro trecho há uma desaceleração no crescimento da carga de cravação, sendo verificado comportamento não-linear.
 - iv. No último trecho a carga de cravação passa a crescer numa velocidade menor ou torna-se constante, apresentando comportamento aproximadamente linear.

- É possível que a mudança de comportamento entre o segundo e o terceiro trecho seja causada pelo início da formação do embuchamento. Antes da formação da bucha, a resistência à cravação é governada por resistência de ponta da área anelar do amostrador e atrito lateral (interno e externo) de suas paredes. Após a formação da bucha, a resistência à cravação é governada pela resistência de ponta da bucha e do amostrador e pelo atrito lateral externo do amostrador. Além disso, é provável que no último trecho o embuchamento tenha se tornado menos móvel, com pequeno ou nenhum avanço da bucha.

- O comportamento anteriormente descrito é similar ao sugerido por Hvorslev (1949), quando relaciona a resistência à cravação de um amostrador à sua penetração.

8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas sugestões para trabalhos futuros:

- Medição de energia no topo da composição de hastes, utilizando sistema de aquisição de dados com tempo de aquisição superior a 102 ms, a fim de esclarecer se a energia no topo da composição de hastes é afetada pelo seu comprimento.
- Realização, em câmara de calibração, de cravações estáticas e dinâmicas do novo amostrador e do amostrador SPT em materiais com diferentes compacidades.
- Realização, em câmara de calibração, de cravações estáticas e dinâmicas do novo amostrador e do amostrador SPT em materiais saturados.
- Realização de séries de ensaios em câmara de calibração com objetivo de estabelecer correlações entre a capacidade de carga do amostrador SPT e parâmetros de resistência dos solos.
- Realização de análises numéricas, utilizando o programa Dinexp, a fim de melhorar a compreensão sobre o fenômeno do embuchamento no amostrador SPT.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (2001) “Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio”. NBR 6484.

Abou-Matar, H. & Goble, G.G. (1997) “SPT Dynamics Analysis and Measurements”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering – ASCE* – vol. 123, n. 10, pp. 921-928.

Aoki, N., Neves, L.F.S., Esquivel, E. R. & Cintra, J. C. A. (2004) “Prova de carga estática no amostrador SPT para obtenção da eficiência e da resistência estática em solo arenoso”, *Revista Solos e Rochas*, vol. 27, n. 2, pp. 147 – 160.

Belincanta, A. (1998) “Avaliação de Fatores Intervenientes no Índice de Resistência à Penetração do SPT”, Tese de Doutorado, EESC/USP.

Belincanta, A. & Cintra, J.C.A. (1998) “Fatores Intervenientes em Variantes do Método ABNT para Execução do SPT”, *Revista Solos e Rochas, ABMS*, vol. 21, n. 3, pp. 119-133.

Bezerra, R.L. (1996) “Desenvolvimento do Piezocone COPPE de terceira Geração e sua utilização em argilas moles”, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ.

Bishop, A.W. (1954) Correspondência para: “Shear Characteristics of a Saturated Silt, Measured in Triaxial Compression”, *Géotechnique*, vol. 4, pp.43-45.

Bishop, A.W. & Eldin, A.K.G. (1950) “Undrained Triaxial Tests on Saturated Sands and their Significance in the General Theory of Shear Strength” *Géotechnique*, vol. 2, pp. 13-32

Broms, B.B. & Flodim, N. (1988) “History of Soil Penetration Testing”, *Penetration Testing – ISOPT-1*, J. De Ruiter Ed., pp. 178-186, Orlando.

Campanella, R.G. & Sy, A. (1994) “Recent Developments in Energy Calibration of Penetration Tests at UBC”, *XII ICSMFE*, pp. 151-156, New Delhi.

Casagrande, A. (1940) "Characteristics of Cohesionless Soils Affecting the Stability of Slopes and Earth Fills", Contribution to Soil Mechanics, 1925-1940, Boston Society of Civil Engineers.

Cavalcante, E.H. (2002) "Investigação Teórico - Experimental Sobre o SPT", Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ.

Cavalcante, E.H.; Danziger, F.A.B. & Bezerra, R.L. (2003) "Recent Experience on SPT Instrumentation in Brazil". Proc. 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Cambridge, vol. 1, pp. 423-428.

Cavalcante, E.H., Danziger, F.A.B. & Danziger, B.R. (2006) "O SPT e Alguns Desvios da Norma Praticados no Brasil", XIII COBRAMSEG, vol. 2, pp. 583-588, Curitiba.

Cavalcante, E.H.; Danziger, B.R. & Danziger, F.A.B. (2008) "On the Energy Reaching the Sampler During SPT", Proc. 8th International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, Lisbon, vol. 1, pp. 737-742.

Cavalcante, E.H., Danziger, B.R. & Danziger, F.A.B. (2011) "Measurement of Drop Height and Impact Velocity in the Brazilian SPT System", Soils and Rocks, vol. 34, n. 3, pp. 207-218.

Chapman, G.A. (1974) "A Calibration Chamber for Field Test Equipments", ESOPT, vol. 22, pp. 59-66, Stockolm.

Chapman, G.A. (1979). "The interpretation of friction cone penetrometer tests in sand", Ph.D. Thesis, Monash University.

Daniel, C.R., Howie, J.A. & Walker, B. (2005) "Review of Standard Penetration Test Short Rod Corrections", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, vol. 131, n. 4, pp. 489-497.

Danziger, F.A.B., Danziger, B.R. & Cavalcante, E.H. (2006) "Discussion of Review of Standard Penetration Test Short Rod Corrections by Chris R. Daniel, John A. Howie, R. Scott Jackson, & Brian Walker", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, vol. 132, n. 12, pp. 1634-1637.

Danziger, F.A.B., Danziger, B.R. & Cavalcante, E.H. (2008) “Reflexões sobre a Energia no SPT e o Significado do Valor de N em Circunstâncias Particulares”, XIV COBRAMSEG, pp. 2214-2224, Búzios.

Danziger, B.R., Souza, J.M.S. & Danziger, F.A.B. (2009) “Comparação da Força Resistente Mobilizada Durante a Penetração do Amostrador SPT em Areias por Metodologias Distintas”, Engenharia de Fundações: Passado Recente e Perspectivas, vol. 1, pp. 65-73, São Carlos.

Décourt, L. (1989) “General report/ Discussion session 2: SPT, CPT, pressuremeter testing and recent developments in in-situ testing – Part 2: The Standard Penetration Test, state-of-the-art report”. Proc., XII ICSMFE, Rio de Janeiro, vol. 4, pp. 2405-2416.

Décourt, L. (2002) “SPT, SPT-T – A Prática Brasileira: Vantagens, Limitações e Críticas”. ABMS, São Paulo.

Décourt, L., Muromachi, T., Nixon, I. K., Schmertmann, J. H., Thorburn, S. & Zolkov, E. (1988) “Standard Penetration Test (SPT): International Reference Test Procedure”, Proc. ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing – SPT Working Party, ISOPT-I, Orlando, vol.1, pp. 3-26.

De Mello, V.F.B. (1971) “Standard Penetration Test”. Proc. 4th Pan-American Conf. on Soil Mech. Found. Eng., Puerto Rico, vol. 1, pp. 1-86.

Flecher, G.F.A. (1965) “Standard Penetration Test: Its Uses and Abuses”. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division – ASCE – vol. 91, n. SM4, pp. 67-75.

Francisco, G.M. (2004) “Estudo dos efeitos do tempo em estacas de fundação em solos argilosos”, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ.

Ghionna, V.N. & Jamiolkowski, M. (1991) “A Critical appraisal of Calibration Chamber Testing in Sand”, First International Symposium on Calibration Chamber Testing, Potsdam.

Goble, G.G. & Ruchti, P. (1981) “Measurements of Impact Velocity on Penetration Testing Systems”, Report: Department of Civil Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder.

Holden, J.C. (1971) “Research on Performance of Soil Penetrometers”, Final Report of Churchill Fellowship.

Hvorslev, M.J. (1949) “Subsurface Exploration and Sampling of Soils for Civil Engineering Purposes”, Committee on Sampling and Testing, Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE.

Ireland, H.O., Moretto, O. & Vargas, M. (1970), “The Dynamic Penetration Test: A Standard that is not Standardized”, *Géotechnique*, vol. 20, n. 2, pp. 185-92.

ISSMFE (1989) “Report of the ISSMFE – Technical Committee on Penetration Testing of Soils – TC 16 With Reference Test Procedures – CPT – SPT – DP – WST”, International Reference Test Procedure for the Standard Penetration Test (SPT), pp. 17-19.

Jacobsen, (1976) “On Pluvial Compaction of Sand” Rep. n. 9, Laboratoriet for Fundering, Aalborg University Centre, Denmark.

Jannuzzi, G.M.F (2009) “Caracterização do depósito de solo mole de Sarapuí II através de ensaios de campo”, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ.

Jefferies, M. & Been, K. (2006) “Soil liquefaction - A critical state approach”, Ed. Taylor e Francis, London.

Johnsen, L.F. & Jagello, J.J. (2007) “Discussion of Energy Efficiency for Standard Penetration Tests”, by Edgar Odebrecht, Fernando Schnaid, Marcelo Maia Rocha and George de Paula Bernardes, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, vol. 133, n. 4, pp. 486-487.

Kovacs, W.D. (1979) “Velocity Measurement of Free-Fall SPT Hammer”, *Journal of Geotechnical Engineering Division – ASCE – vol.105*, n. GT1, pp. 1-10.

Last, N.C., Butterfield, R. & Harkness, R.M. (1987) “An investigation of Full Scale Penetrometers in a Large Triaxial Calibration Chamber: Mar. 1983 to Feb. 1986” Civil Engineering Department, University of Southampton.

Lee, K.L. & Seed, H.B. (1967) “Drained Strength characteristics of Sands”, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division – ASCE, vol. 93, n. SM6, pp. 117-141.

Lunne, T., Robertson, P.K. & Powell, J.J.M. (1997) “Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice”, Ed. Blackie Academic e Professional, London.

Odebrecht, E. (2003) “Medidas de Energia no Ensaio SPT”, Tese de Doutorado, UFRGS.

Paik, K. & Salgado, R. (2003) “Determination of Bearing Capacity of Open-Ended Piles in Sand”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - ASCE, vol. 129, n. 1, pp. 46-57.

Parkin, A.K. & Lunne, T. (1982) “Boundary effects in the laboratory calibration of a cone penetrometer for sand”, Second European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam.

Palacios, A. (1977) “Theory and Measurements of Energy Transfer During Standard Penetration Test Sampling”, Ph.D. Thesis, University of Florida.

Pinto, C.S. (2001) “Curso Básico de Mecânica dos Solos”, Ed. Oficina de Textos, São Paulo.

Randolph, M.F., Leong, E.C. & Housby, G.T. (1991) “One-dimensional Analysis of Soil Plugs in Pipe Piles” Geotechnique, vol. 41, n. 4, pp. 587-598.

Robertson, P.K., Campanella, R.G. and Wightman, A. (1983) “SPT-CPT Correlations”, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 109, n. 11, pp. 1449-1459.

Reynolds, O. (1885) “The dilating of Media Composed of Rigid Particles in Contact” Philosophical Magazine, December.

Rowe, P.W. & Barden, L. (1969) “Discussion: Drained Strength characteristics of Sands”, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division – ASCE – vol.95, n. SM1, pp. 353-359.

Santana, C.M., Danziger, F.A.B. & Danziger, B.R. (2012) “The measurement of energy reaching the sampler in SPT”. Proc., 4th International Conference on Site Characterization, ISC-4, Porto de Galinhas, vol. 1, pp. 921-926.

Schmertmann, J.H. (1976) “Interpreting the Dynamics of the Standard Penetration Test”, Final Report on Project D-636 to the Florida Department of Transportation, Research Division. Waldo Road, Gainesville, Fla. 32601.

Schmertmann, J.H. (1978) “Use the SPT to Measure Dynamic Soil Properties? Yes, But!”, Dynamic Geotechnical Testing – ASTM – STP 654, pp. 341-355.

Schmertmann, J.H. (1979) “Statics of SPT”, ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division, vol.105, n. 105, pp. 655-699.

Schmertmann, J.H. & Palacios, A. (1979) “Energy Dynamics of SPT”, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 105, n. GT8, pp. 909-926.

Seed, H.B. & Lee, K.L. (1967) “Undrained Strength characteristics of Sands”, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division – ASCE, vol. 93, n. SM6, pp. 333-359.

Skempton, A.W. (1986) “Standard Penetration Test Procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Ageing and Overconsolidation”, Géotechnique, vol. 36, n. 3, pp. 425-447.

Souza, J.M.S. (2009) “A influência da Compacidade das Areias nas Correlações entre os Ensaios de Cone e o SPT”, Dissertação de Mestrado, UERJ.

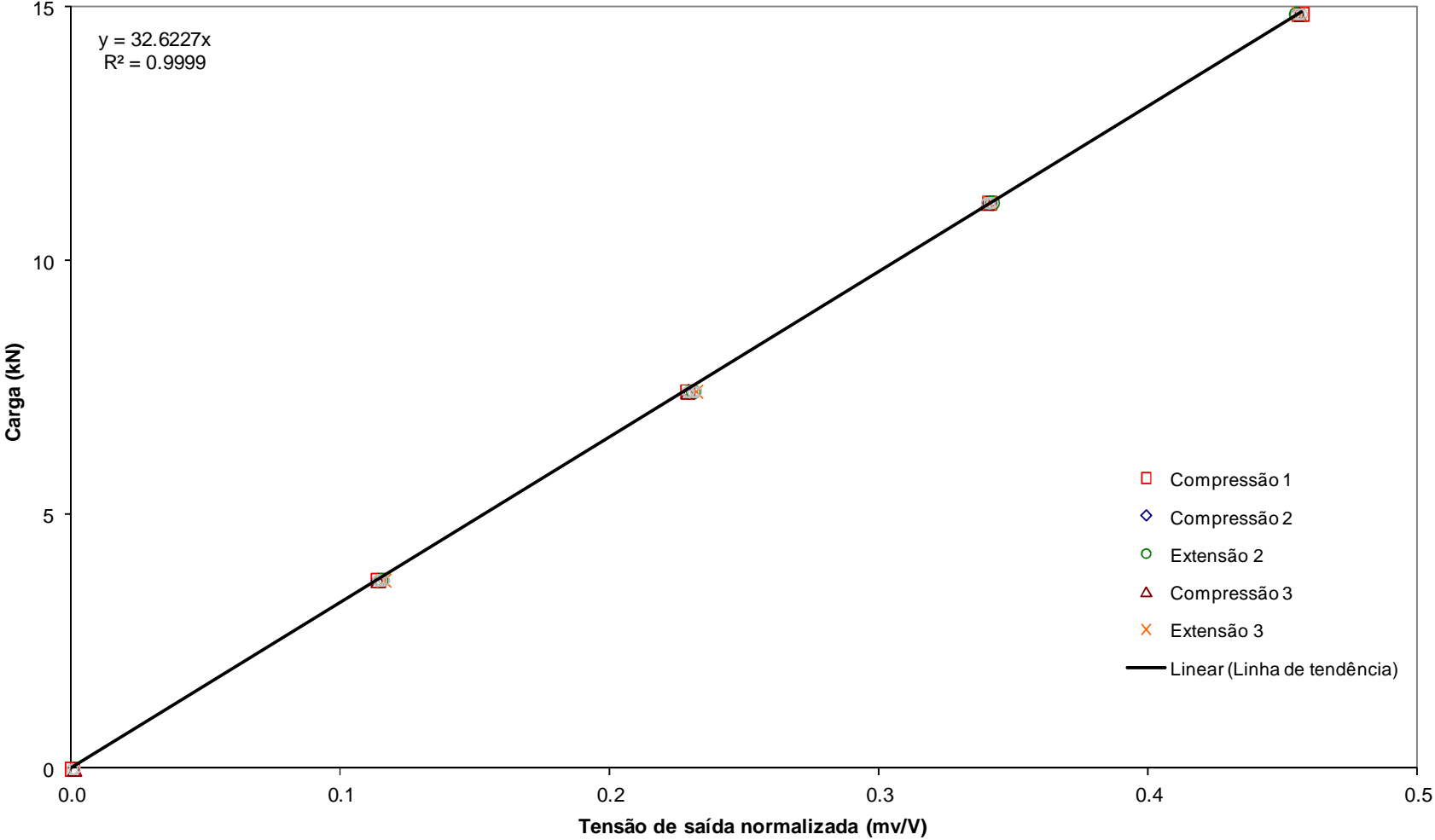
Teixeira, A.H. (1977), “Sondagens: Metodologia, Erros mais Comuns, Normas de Execução”, I Simpósio de Prospecção do Subsolo – ABMS – Núcleo Nordeste, pp. 41-61, Recife.

Taylor, D.W. (1948) “Fundamentals of Soil Mechanics”, John Wiley and Sons Ed., New York.

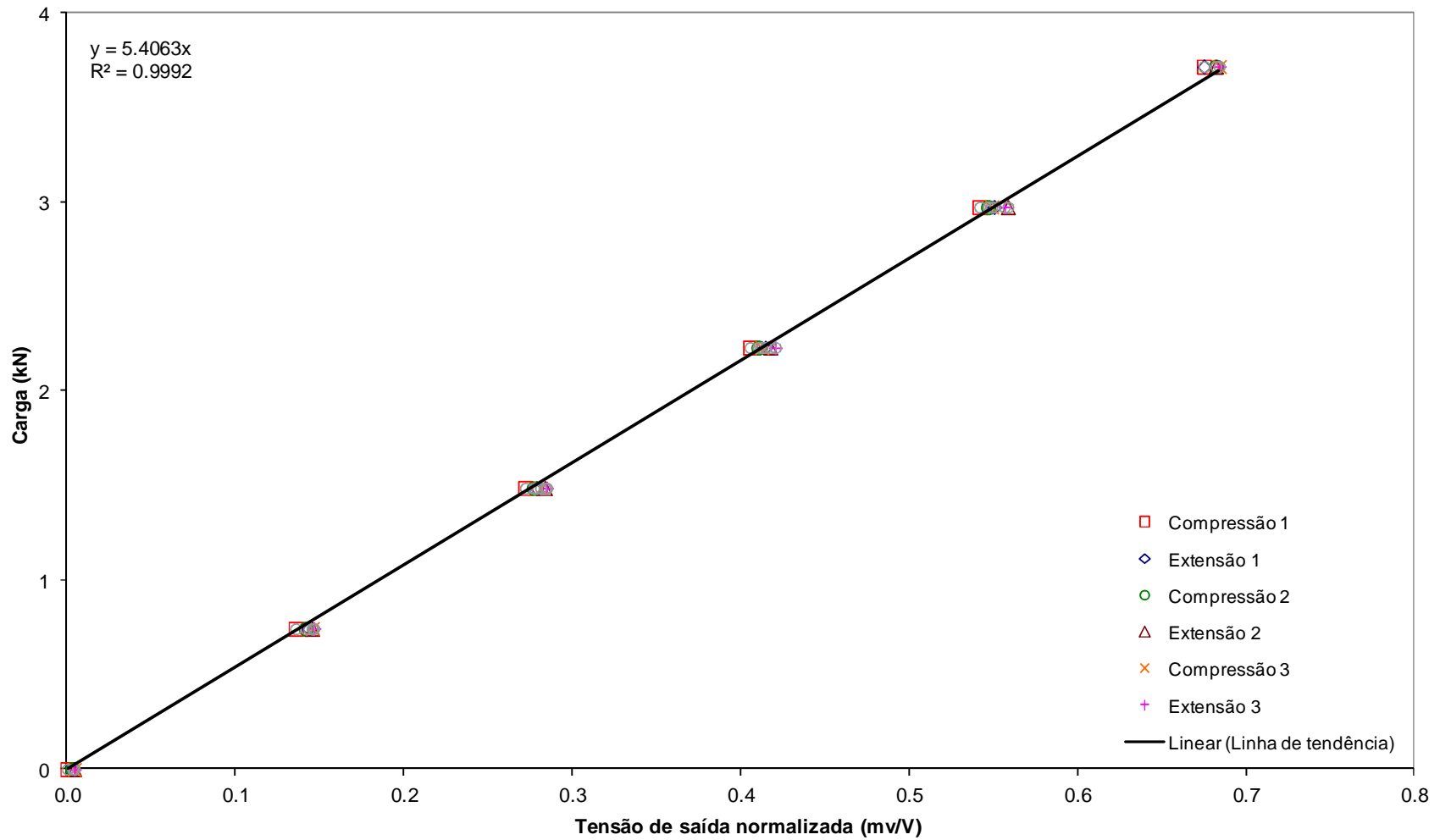
Zohrabi, M. (1993). "Calibration of penetrometers and interpretation of pressuremeters in sand", Ph.D. Thesis, University of Southampton.

ANEXO 1 – CURVAS DE CALIBRAÇÃO
DO PIEZOCONE COPPE IV

Curva de calibração do Piezocone COPPE IV - Resistência de ponta

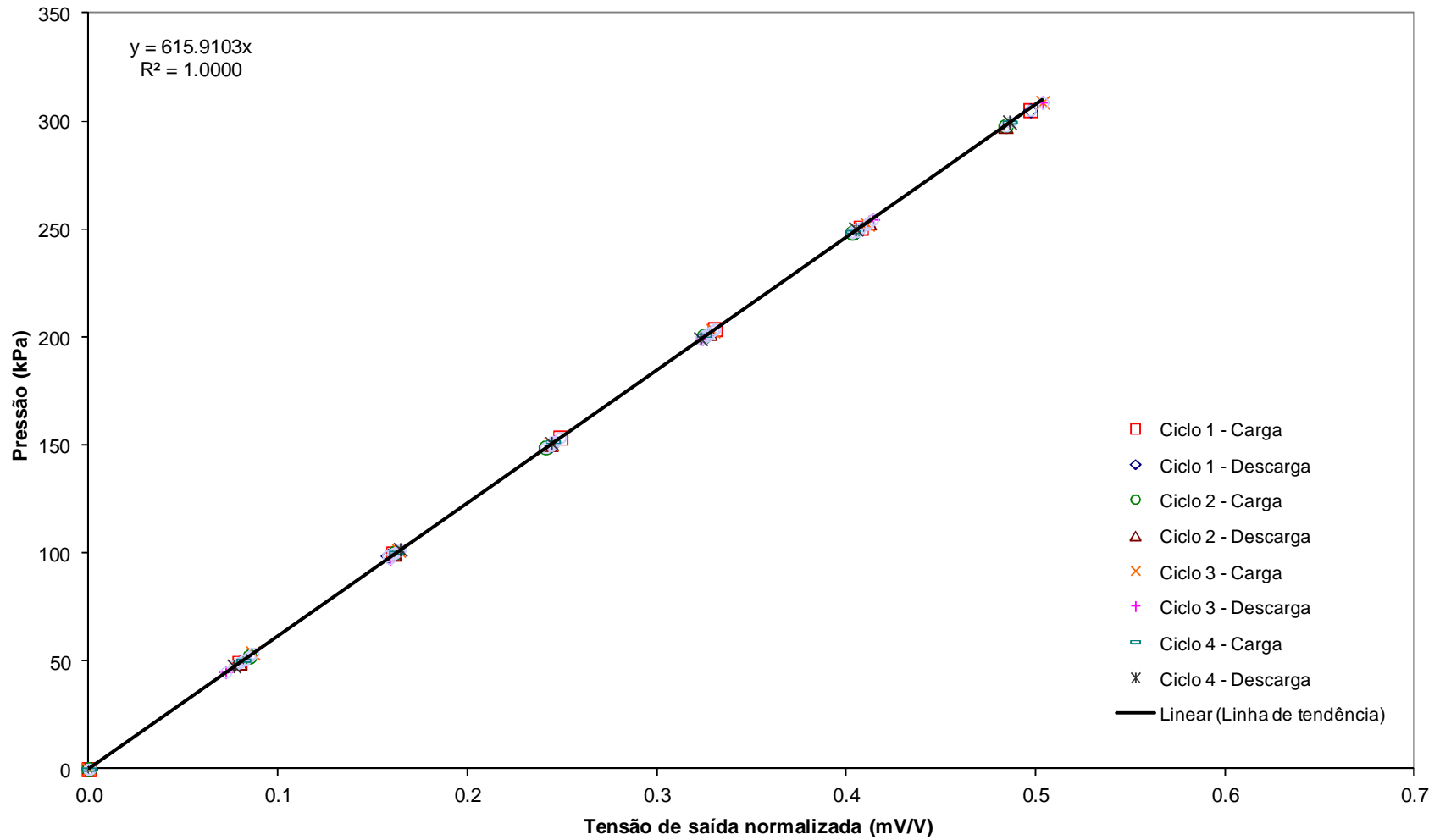


Curva de calibração do Piezocone COPPE IV - Atrito lateral

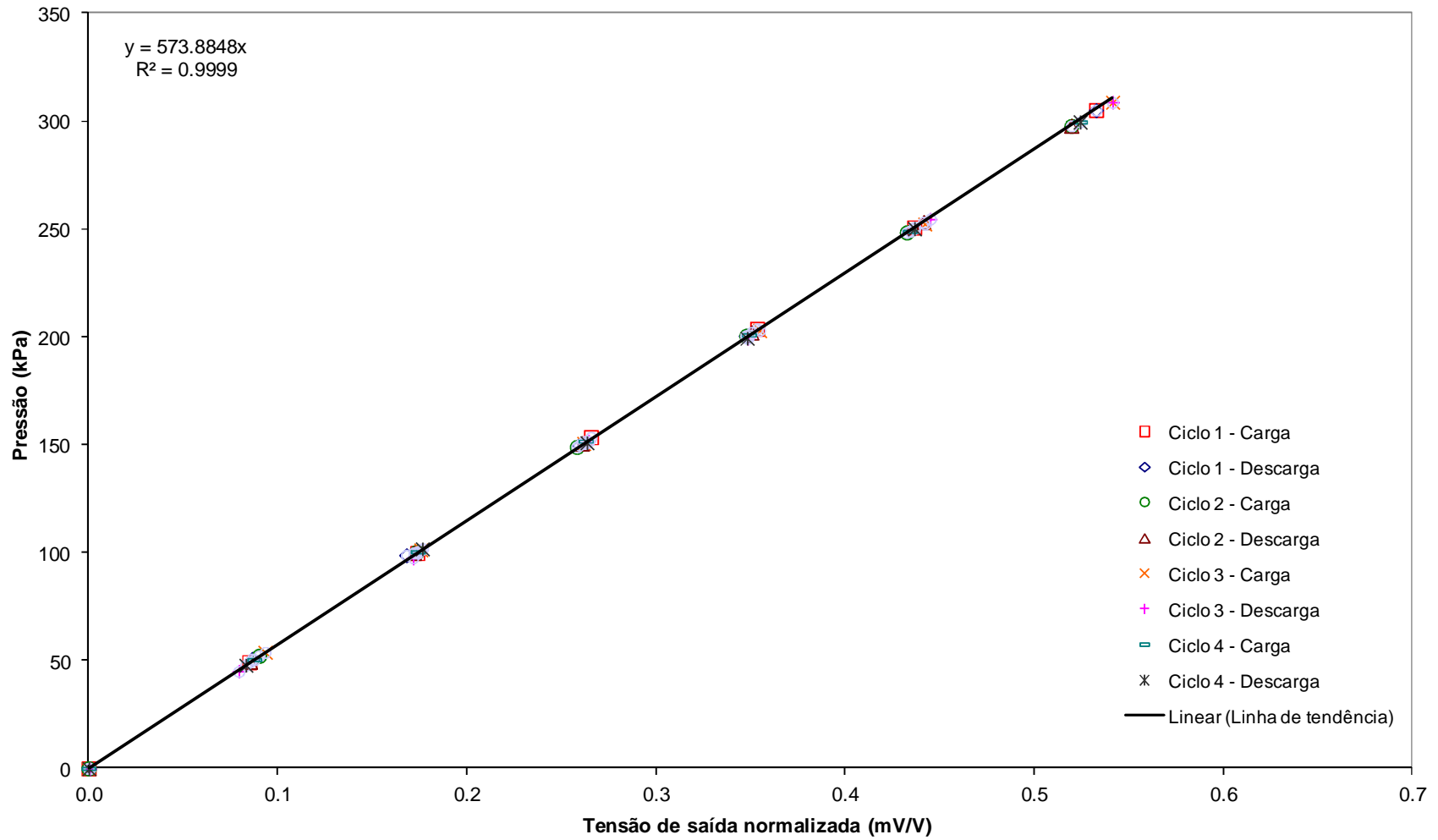


ANEXO 2 – CURVAS DE CALIBRAÇÃO
DAS CÉLULAS DE TENSÃO TOTAL DO
AMOSTRADOR INSTRUMENTADO

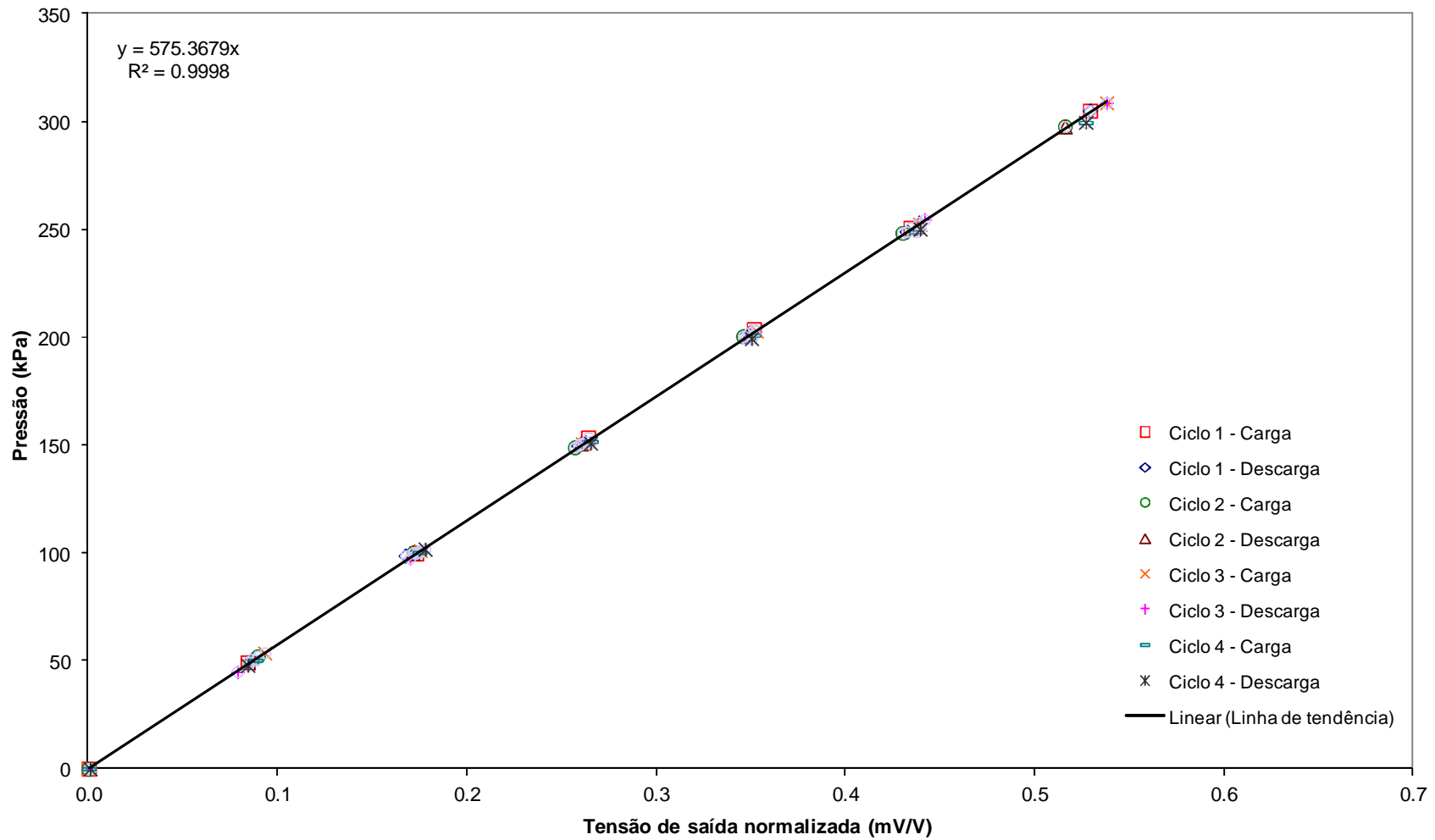
Curva de calibração da célula de tensão total CTT-1



Curva de calibração da célula de tensão total CTT-3

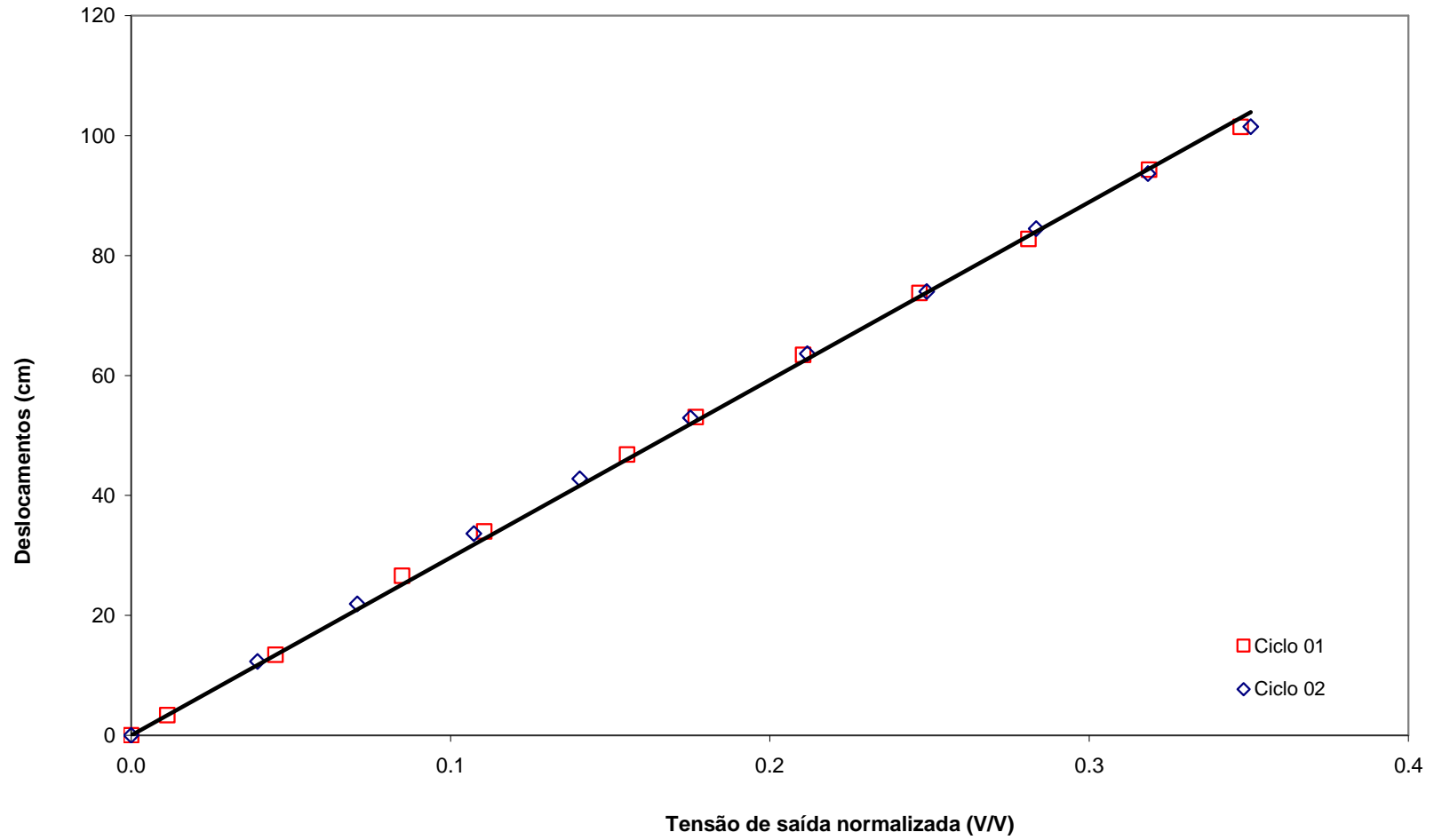


Curva de calibração da célula de tensão total CTT-4



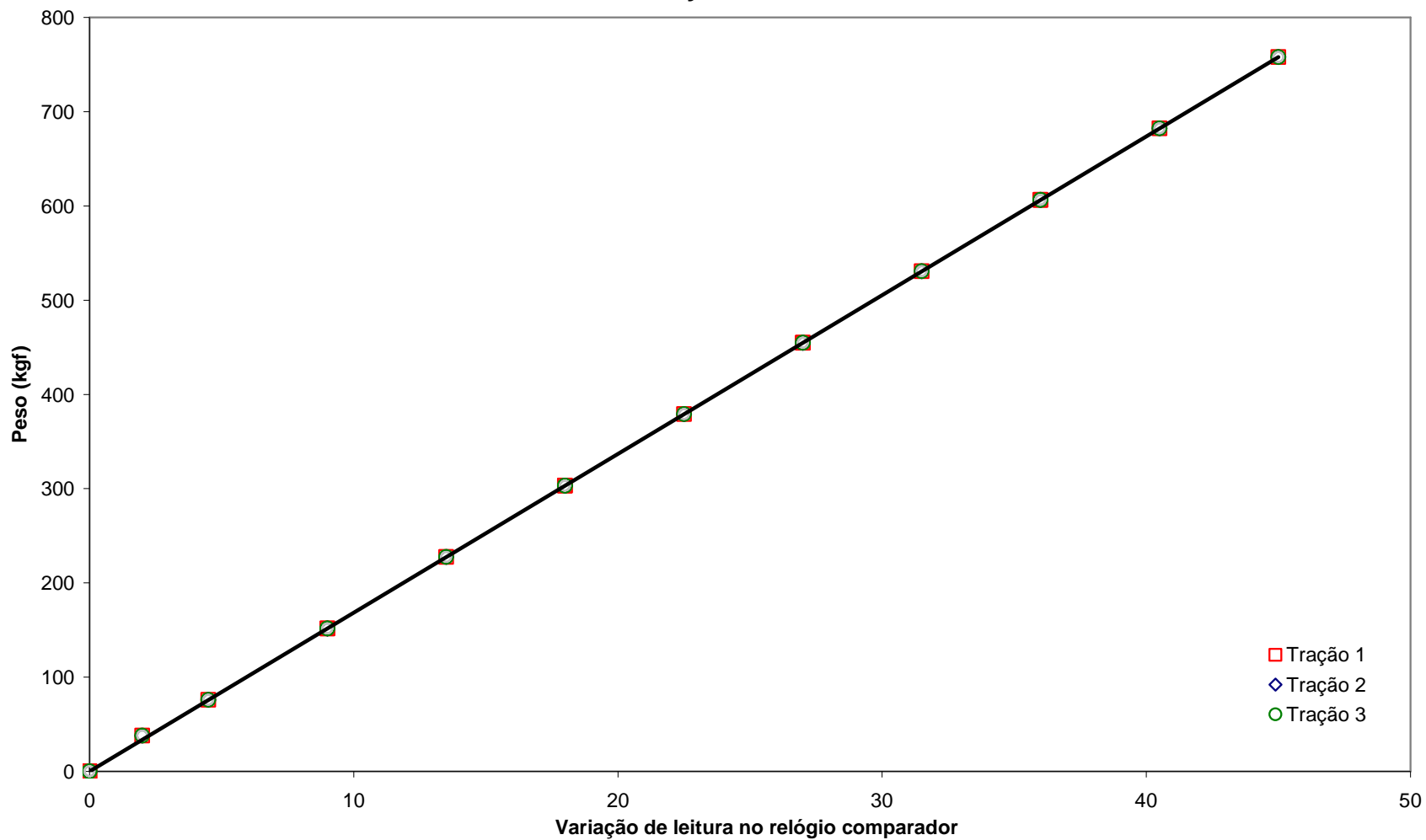
ANEXO 3 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO
MEDIDOR DE PROFUNDIDADE

Calibração do medidor de profundidade

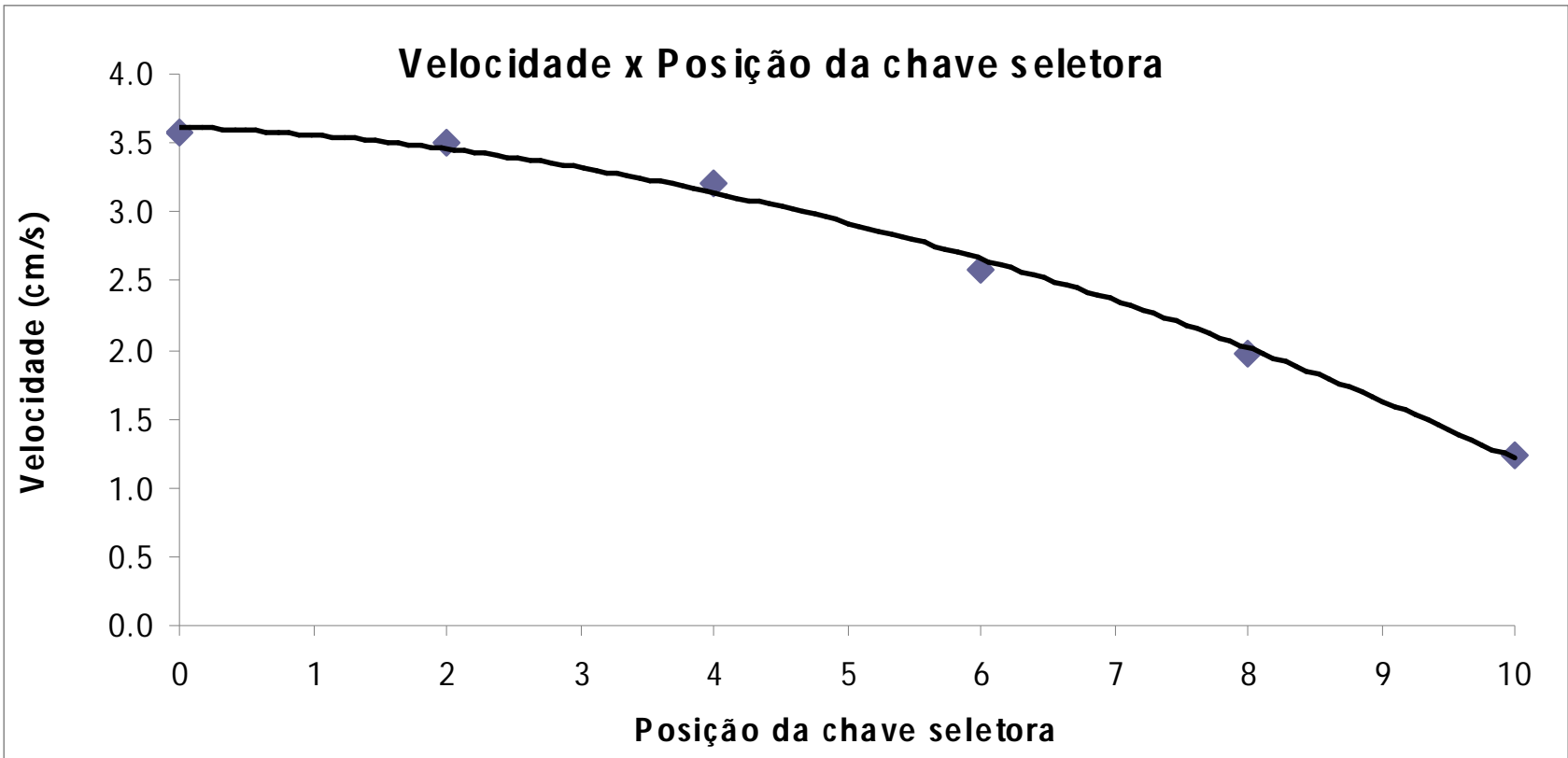


ANEXO 4 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO DINAMÔMETRO

Curva de calibração do dinamômetro



**ANEXO 5 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO
SISTEMA DE CRAVAÇÃO DA CÂMARA**



ANEXO 6 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DA
CÉLULA DE CARGA DO SISTEMA DE
CRAVAÇÃO

Curva de calibração - Célula de carga LUK-A-50kN

