

Universidade Federal do Rio de Janeiro

ANÁLISE DA ALTURA DE QUEDA E PERDAS DE ENERGIA DURANTE A QUEDA
DO MARTELO NO ENSAIO SPT

Mauro Duarte de Oliveira Neto

Setembro - 2013



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

ANÁLISE DA ALTURA DE QUEDA E PERDAS DE ENERGIA DURANTE A QUEDA DO MARTELO NO ENSAIO SPT

Mauro Duarte de Oliveira Neto

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores: Fernando Artur Brasil Danziger

Christian Matos de Santana

Rio de Janeiro

Setembro de 2013

ANÁLISE DA ALTURA DE QUEDA E PERDAS DE ENERGIA DURANTE A QUEDA
DO MARTELO NO ENSAIO SPT

Mauro Duarte de Oliveira Neto

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO
DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Aprovada por:

Prof. Fernando Artur Brasil Danziger D.Sc.

Prof. Christian Matos de Santana M.Sc.

Prof. Francisco de Rezende Lopes Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

SETEMBRO de 2013

Neto, Mauro Duarte de Oliveira.

Análise da altura de queda e perdas de energia durante a queda do martelo no ensaio SPT – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

IX, 58 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Fernando Artur Brasil Danziger *et al.*

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Civil, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 59

1. SPT. 2. Energia 3. Altura de queda I. Danziger, Fernando Artur Brasil *et al.*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil. III. Análise da altura de queda e perdas de energia durante a queda do martelo no ensaio SPT.

Agradecimentos

Gostaria primeiramente de agradecer a todas as pessoas do Laboratório de Ensaios de Campo e Instrumentação da COPPE/UFRJ.

Agradeço ao Prof. Christian Matos de Santana, meu companheiro de trabalho, por toda paciência e seu espírito de servir (o qual admiro muito) que tanto colaboraram para minha formatura bem como para a elaboração e conclusão deste presente trabalho.

Não posso deixar de agradecer de forma especial ao meu “grande mestre” Prof. Fernando Artur Brasil Danziger, uma pessoa maravilhosa com inúmeras qualidades como engenheiro, professor e principalmente como pessoa. Presente em momentos difíceis da minha jornada, atuou de forma efetiva pra me ajudar em meus problemas. Sempre com muita paciência, compreensão, bons ensinamentos e caridade.

Agradeço à minha esposa Cintia Ferreira de Oliveira por todo amor, carinho e companheirismo nessa longa trajetória. Dedico minha vitória a ela, umas das poucas pessoas que acreditou em mim dedicando sua vida em me ajudar. Agradeço também a vida da minha filha Manuela Duarte de Oliveira, principal motivação para eu conquistar meus objetivos.

Aos meus irmãos, Pedro Felipe e Juliana Felipe obrigado por sempre estarem ao meu lado e serem mais do que irmãos: meus companheiros.

Agradeço, por fim, às pessoas pelas quais tenho grande amor, gratidão e admiração: Meus pais. Responsáveis pela minha vida, nunca me deixam desamparado. Ao meu pai, Mauro Duarte Filho, exemplo de caráter e perseverança e a minha mãe, Lilian Felipe, mãezona, determinada, carinhosa, protetora; agradeço por todo o empenho em cuidar de mim e pela educação que recebi que me tornou na pessoa que sou hoje.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Análise da altura de queda e perdas de energia durante a queda do martelo no ensaio SPT

Mauro Duarte de Oliveira Neto

Setembro, 2013

Orientadores: Fernando Artur Brasil Danziger

Christian Matos Santana

Curso: Engenharia Civil

Os esforços para entendimento da questão da transferência de energia do ensaio SPT tem sido grande pela comunidade científica, pois entende-se que é um requisito importante para o aumento da confiabilidade e universalização dos resultados, ou seja, tornar o SPT uma ensaio capaz de reproduzir os mesmos números de golpes para um dado solo sob as mesmas condições de tensão, usando diferentes sistemas operacionais. Este trabalho apresenta resultados de uma análise teórico-experimental dos aspectos ligados a altura de queda do martelo e as perdas de energia imediatamente antes do choque do martelo com a cabeça de bater. Para tal foram analisados 164 golpes realizados em 14 sequências de uma campanha na região portuária do município de Itaguaí, RJ.

Palavras-chave: ensaio SPT, transferência de energia, fator de eficiência, altura de queda, velocidade de impacto.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of
the requirements for the degree of Engineer.

Analysis of drop height and the energy losses during the fall of the hammer in SPT

Mauro Duarte de Oliveira Neto

September, 2013

Advisors: Fernando Artur Brasil Danziger

Christian Matos Santana

Course: Civil Engineering

The efforts to understand the SPT practice's energy transfer question has been huge by the scientific community, because it is assumed that is an important requirement to the increase of trust worthiness and universalization of the results, that is, make the SPT practice able to reproduce the same number of strokes to a determinate kind of soil in the same tension conditions, using different operational systems. This work presents results of an theoretical-experimental analysis of the aspects combined with the drop height of the hammer and the energy losses immediately before the hammer hit the anvil. To make that study, 164 strokes were analyzed in 14 sequences made in a campaign in dockland region of Itaguaí, RJ.

Keywords: SPT test, energy transfer, efficiency factor, drop height, impact velocity.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO.....	2
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	O ENSAIO SPT	4
2.1.1	HISTÓRICO.....	4
2.1.2	SPT NO BRASIL	6
2.1.3	NORMA BRASILEIRA (NBR 6484/2001).....	7
2.2	ENERGIA DO SPT.....	8
2.2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	8
2.2.2	FATORES QUE AFETAM A ENERGIA DO SPT.....	10
2.2.2.1	Tipo do martelo	11
2.2.2.2	Uso do coxim de madeira.....	12
2.2.2.3	Altura de queda	12
2.2.2.4	Frequência dos golpes	13
2.2.2.5	Sistema de levantamento e soltura do martelo.....	14
2.2.3	ENERGIA POTENCIAL DO MARTELO	16
2.2.4	ENERGIA CINÉTICA IMEDIATAMENTE ANTES DO IMPACTO	17
3	A CAMPANHA DE ENSAIOS	19
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	19
3.2	CAMPO EXPERIMENTAL.....	19
3.3	CARACTERÍSTICAS DA EQUIPE DE SONDAÇÃO, EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO.....	19
3.4	INSTRUMENTAÇÃO	22
3.4.1	CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE.....	22
3.4.2	MIRA TOPOGRÁFICA	22
4	ANÁLISE DOS DADOS	23
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	23
4.2	METODOLOGIA	23
5	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	33
5.1	ANÁLISE DAS ALTURAS DE QUEDA.....	33
5.2	ANÁLISE DAS ENERGIAS, VELOCIDADE DE IMPACTO E O FATOR DE EFICIÊNCIA E_1^* ...	45
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	56

6.1	CONCLUSÕES	56
6.2	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

Análise da altura de queda e perdas de energia durante a queda do martelo no ensaio SPT (Standard Penetration Test)

1 Introdução

Segundo BELICANTA E CINTRA (1998), o ensaio SPT (Standard Penetration Test) tem se mostrado suficientemente eficiente nas investigações geotécnicas tornando-se um ensaio de campo de uso corrente nas obtenções de parâmetros necessários aos projetos de fundações e também aos de geotecnia em geral, não só no Brasil, mas em todo o mundo. É hoje o principal instrumento para avaliação do potencial de liquefação de materiais granulares e controle de compactação de areias e siltes arenosos. Alguns autores associam essa ampla utilização do ensaio à sua simplicidade de execução, robustez dos equipamentos, baixo custo operacional, e a fácil interpretação dos resultados (e.g., BROMS and FLODIN, 1988; DÉCOURT, 1989; CAVALCANTE, 2002).

Apesar de o SPT ser normalizado em diversos países, ocorre com frequência em sua realização o uso de procedimentos e equipamentos não descritos na norma por parte das empresas executoras, que ao longo do tempo incorporam modificações na sistemática do ensaio além dos problemas ligados à conservação e à manutenção necessária dos equipamentos originais. Essas diferenças podem ocorrer em diversas escalas: dentro de uma mesma empresa a qual possui diferentes equipes; dentro de determinada região em que existam diversas empresas exploradoras do serviço; e também em uma escala internacional, na qual existem diferenças entre normas de diferentes países. Desse modo o significado do N_{SPT} depende do equipamento e da prática de ensaio empregados.

Dada a importância do SPT para a engenharia geotécnica, a comunidade científica internacional e brasileira tem tido uma crescente preocupação com o desempenho do ensaio. Estudos têm sido realizados a fim de uniformizar o significado do N_{SPT} em termos de identificação e avaliação dos fatores que influenciam na parcela de energia efetiva que atinge o amostrador. A variabilidade da eficiência da energia do SPT passou a ser estudada especialmente a partir da década de 70, cabendo enfatizar os trabalhos de PALACIOS (1977), SCHMERTMANN e PALACIOS (1979) que empregaram a equação da onda na análise do problema e mediram aquela energia. 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.

Diversos trabalhos como TEIXEIRA (1997), BROMS and FLODIN (1988), DÉCOURT (1989), BELINCANTA e CINTRA (1998), CAVALCANTE (2002), DANZIGER ET AL (2006), apresentam os principais fatores que afetam a energia do ensaio SPT. Esses fatores geralmente são agrupados em três classes segundo HVORSLEV (1949): equipamento, procedimento e condição do solo. Neste trabalho vamos nos limitar à primeira classe, dando maior ênfase à análise da altura de queda e às perdas de energia durante a queda do martelo.

1.1 Objetivo

Ensaio SPT instrumentado foram realizados na região portuária de Itaguaí, Estado do Rio de Janeiro com o objetivo principal de aumentar o banco de dados de alturas de queda e analisar as perdas de energia durante a queda do martelo

1.2 Organização do trabalho

Segue-se a esta introdução o segundo capítulo, no qual é realizada uma revisão bibliográfica sobre o ensaio SPT, contendo uma breve análise do seu histórico no Brasil e no mundo, discorrendo sobre alguns aspectos pertinentes à norma brasileira do ensaio. Em seguida é discutida a questão da energia do SPT e os principais fatores intervenientes, dando maior enfoque aos ligados às perdas energia antes do impacto do martelo com a cabeça de bater.

No terceiro capítulo são apresentadas as principais características da área onde foi realizada a pesquisa. Também são descritas algumas características da equipe de sondagem e seu respectivo equipamento ao longo da campanha. Em seguida é apresentada a instrumentação necessária para o monitoramento da trajetória do martelo durante aplicação dos golpes: a câmera de alta velocidade e a mira topográfica.

No quarto capítulo é apresentada a metodologia de análise dos dados. São descritos os recursos utilizados e a forma com que esses dados foram trabalhados para possibilitar interpretações no capítulo seguinte.

No quinto capítulo serão mostrados os resultados obtidos das análises dos dados bem como as interpretações pertinentes. São apresentados valores de altura de

queda, velocidade de impacto, energias potencial e cinética bem como valores para o fator de eficiência e_1 .

No sexto capítulo são apresentadas algumas conclusões com base nas análises efetuadas nos capítulos anteriores além de algumas sugestões para a continuidade da pesquisa.

Compõe também o trabalho, a apresentação da lista de referências bibliográficas utilizadas.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 O ensaio SPT

2.1.1 Histórico

CAVALCANTE (2002) divide o histórico do SPT em quatro fases: a primeira, que vai de 1902 até meados de 1920, a segunda começando em 1927 e indo até o final da década de 40, com o lançamento do livro de TERZAGHI E PECK (1948). A partir daí até a segunda metade dos anos 70 caracteriza-se como a terceira fase, marcada pelas primeiras tentativas de normatização do ensaio. A quarta e última fase surge como uma evolução da terceira fase, em 1977, ano em que começa a aparecer a preocupação com a questão da energia empregada no ensaio.

A primeira fase, iniciada no ano de 1902, é marcada pelo fim do processo de obtenção de amostras por circulação d'água e o início da retirada das mesmas através de processos dinâmicos de cravação (FLETCHER 1965), possibilitando assim, a obtenção de amostras de maior qualidade, comparada ao processo de perfuração com circulação de água, na qual a estrutura natural do solo da amostra era descaracterizada.

No ano de 1927 as empresas Raymond Concrete Pile e The Gow Company desenvolvem um novo amostrador, com 51 mm de diâmetro externo e 35 mm de diâmetro interno, dando início à segunda fase do desenvolvimento do SPT. Nesta mesma época a empresa Spraghe e Henwood Incorporation (Pensilvânia), também desenvolve um amostrador com características semelhantes ao amostrador Raymond, porém com algumas diferenças de disposição e dimensões de componentes periféricos tais como válvulas de alívio de pressão e sapata cortante.

Outro modelo também foi proposto nesse mesmo período com a inserção de mecanismos específicos para o alívio de poro-pressões geradas no interior do amostrador, quando da entrada do solo. Esse tipo de amostrador, denominado Heavy Duty, possuía corpo inteiriço, diâmetro externo da sapata um pouco maior que o diâmetro do corpo e múltiplas válvulas e ventosas para o alívio da poro-pressão gerada no seu interior, por sobre a amostra.

Em meados dos anos 40, segundo FLETCHER (1965) e GEISSER (1966), devido a discussões sobre a fragilidade das hastes de 25 mm de diâmetro nominal interno (32N/m), começou a substituição dessas por hastes mais pesadas como as do tipo A (5,6 N/m) de sondagens rotativas. Acreditava-se que as hastes de menor diâmetro, quando longas e diante de grandes esforços, causariam grandes

movimentos transversais e consequentes perdas de energia durante o impacto; apesar dos trabalhos do engenheiro CUMMINGS em 1949, demonstrando que as perdas de energia em movimentos transversais eram insignificantes (BELICANTA E CINTRA, 1998; CAVALCANTE, 2002).

Um importante marco ocorre no fim dos anos 40: Terzaghi e Peck lançam o livro "Soil Mechanics in Engineering Practice" em 1948. São apresentadas as primeiras correlações do índice de resistência à penetração dinâmica N com a consistência das argilas, com a compacidade das areias e com a capacidade de carga de fundações rasas. Além disso, TERZAGHI E PECK (1948) trouxeram importantes contribuições para uma utilização mais sistemática e racional do SPT através de recomendações em relação ao procedimento e ao equipamento do ensaio. Dentre elas pode-se destacar: a fixação dos valores para altura de queda, para o peso do martelo, para o intervalo de assentamento do amostrador e para seus diâmetros, interno e externo.

Outra grande contribuição à divulgação de resultados do SPT foi HVORSLEV (1949) que apresenta uma coletânea de correlações entre a resistência à penetração e a consistência ou compacidade dos solos, ver CAVALCANTE, 2002.

A partir de meados dos anos 50 inicia-se a terceira fase da história do SPT, na qual surgem as primeiras tentativas oficiais de padronização do ensaio. JAMES D. PARSON (1954) propõe o registro do número de golpes para cada um dos três intervalos de 152 mm de penetração do amostrador. A partir desse procedimento, ele sugere que a resistência à penetração seja correspondente à menor soma entre dois dos três intervalos (CAVALCANTE, 2002). Já TERZAGHI E PECK (1948) propunham o número de golpes para as duas últimas penetrações, sendo os primeiros 152 mm correspondentes ao assentamento do amostrador.

Em meados dos anos 70, passada a etapa inicial do processo de normalização e com certa experiência adquirida com o equipamento, surge a preocupação com a questão da energia efetiva que atinge o amostrador. Inicia-se assim a quarta fase, marcada por trabalhos relevantes de PALACIOS (1977), SCHMERTMAN (1976, 1978, 1979), KOVACS e SALOMONE (1982, 1984), BROMS and FLODIN (1988), BELINCANTA e CINTRA (1998).

2.1.2 SPT no Brasil

No Brasil, o ensaio SPT foi introduzido na segunda metade da década de 30 com a criação da Seção de Solos e Fundações do IPT, após a volta de Odair Grillo de uma viagem de estudos à Harvard University. No início a consistência das argilas era estimada apenas na perfuração e no exame tátil-visual das amostras recolhidas. Todavia, este processo não era adequado principalmente quando se tratava da estimativa da compacidade das areias. Desta maneira, sentia-se a necessidade de algum método de campo menos qualitativo para a determinação destas características. (adaptado de BELINCANTA E CINTRA, 1998; CAVALCANTE, 2002).

Assim, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo desenvolveu, em 1944, um amostrador próprio e começou a medir a sua respectiva resistência à penetração. Esse amostrador, que ficou conhecido como do tipo IPT, tinha o diâmetro externo de 46 mm, corpo bipartido de comprimento de 420 mm com diâmetro interno de 38,1 mm. A sapata foi projetada com um diâmetro interno de 36,5 mm, objetivando a eficiência na amostragem.

A resistência à penetração dinâmica deste amostrador (denominada como RP) correspondia ao número de golpes de um martelo de 60 kg, caindo de uma altura de 75 cm, necessários à cravação de 30 cm do amostrador acoplado às hastes de rotativa do tipo G (3,23 kg/m).

A Geotécnica S.A, empresa fundada em 1944 por Odair Grillo, Otelo Machado e Raymundo Costa, segundo Teixeira (1974) e Costa (1993), também começou a determinar a resistência à penetração dinâmica nesta época. O amostrador utilizado por eles foi trazido dos Estados Unidos pelo engenheiro H.A MOHR. Possuía 41,2 mm de diâmetro externo e 25 mm de diâmetro interno e passou a ser conhecido como amostrador Mohr-Geotécnica.

A resistência à penetração deste amostrador, denominada IRP (Índice de Resistência à Penetração), constituiu-se pelo número de golpes de um martelo de 65 kg, caindo de uma altura de 75 cm, necessários à cravação de 30 cm do amostrador, sem assentamento inicial, sendo estes valores de IRP correlacionados tanto com a consistência das argilas quanto com a compacidade das areias.

Em 1947, a Geotécnica S.A também passa a utilizar o amostrador do tipo Raymond, utilizando a mesma metodologia de ensaio até hoje conhecida: martelo de 65 kg, caindo de 75 cm de altura, hastes de 25 mm de diâmetro (3,23 kg/m), com o índice de resistência à penetração N_{SPT} sendo igual ao número de golpes necessários

à cravação do amostrador por mais 30 cm após a cravação inicial de 15 cm (assentamento).

Porém, no começo da década de 70, segundo Teixeira (1977), a Geotécnica e o IPT passaram a usar somente o amostrador do tipo Raymond, com as devidas adaptações às condições brasileiras, principalmente quanto às hastes de cravação. Assim, os amostradores do tipo IPT e Mohr-Geotécnica, com as respectivas metodologias de ensaio, passam para a história e iniciam-se os primeiros passos rumo à normatização brasileira – Segundo BELINCANTA e CINTRA (1998)

2.1.3 Norma brasileira (NBR 6484/2001)

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

- a) Determinar os tipos de solos em suas profundidades de ocorrência;
- b) Determinação da posição do nível d'água;
- c) Determinar os índices de resistência a penetração (N_{SPT}) a cada metro.

A NBR-6484/2001 apresenta especificações relativas ao equipamento, processo de avanço da perfuração, ensaio penetrométrico e amostragem, observação do nível d'água e apresentação formal dos resultados.

Abordando aspectos relativos ao equipamento, a norma prevê o uso de dois tipos de martelo: o cilíndrico vazado e o prismático dotado de pino-guia. Difícilmente no Brasil é realizado o SPT com a utilização do martelo prismático, sendo mais comum o martelo cilíndrico maciço equipado com pino-guia perfazendo um peso total de 65 kgf, porém nem sempre com o coxim de madeira.

A cabeça de bater da composição de cravação, que vai receber o impacto direto do martelo, deve ser constituída por tarugo de aço com massa nominal entre 3,5 kg e 4,5 kg. Quanto às hastes, a norma especifica o diâmetro interno de $24,3 \pm 5$ mm e 32N/m. Quanto ao amostrador, a norma especifica o tipo Raymond, sendo este composto por três partes: cabeça com válvulas de esfera e orifícios laterais; corpo inteiro ou bipartido e sapata biselada.

Abordando aspectos com relação ao procedimento, a norma determina que a perfuração para a colocação do amostrador deve ser feita com trado helicoidal até o nível do lençol freático e com circulação d'água abaixo do mesmo. Para garantir a

estabilidade do furo, a norma recomenda a utilização de tubos de revestimento. Estes devem ser de aço, com diâmetro nominal interno 63,5 mm ($D_{ext} = 76,1 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ e $D_{int} = 68,8 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$), podendo ser emendados por luvas, com comprimentos de 1,00 m e/ou 2,00 m. Em casos especiais a norma permite a substituição parcial do revestimento pelo uso de lama bentonítica (ou alguns casos, por questões ambientais, utiliza-se materiais a base de polímeros).

O ensaio SPT, segundo a norma, é executado com a cravação do amostrador por 45 cm no solo, sob ação do choque entre o martelo e a composição de hastes com uma altura de queda de 75 cm. Registra-se o número de golpes para cada um dos 15 cm de penetração. A resistência à penetração do SPT (N_{SPT}) é definida então pelo número de golpes necessários para os últimos 30 cm de penetração.

2.2 Energia do SPT

2.2.1 Considerações iniciais

O SPT é um ensaio de referência e de rotina na prática da engenharia de fundações, por isso, dada a sua importância, diversos autores têm estudado a questão da energia a fim de uniformizar o significado do N_{SPT} . A pesquisa desenvolvida por PALACIOS (1977) e SCHMERTMANN E PALACIOS (1979) representa um marco na análise quantitativa do ensaio. Esses estudos mostraram que o valor do N_{SPT} , é inversamente proporcional à energia que chega ao topo da composição de hastes, ao menos para N_{SPT} até 50 golpes. Utiliza-se a equação abaixo para correção do valor do N_{SPT} em função da energia:

$$N_1 E_1 = N_2 E_2 \quad (2.1)$$

Sendo:

E_i = Energia medida no topo da composição de hastes

N_i = Número de golpes para uma energia E_i

Após discussões a respeito da energia a ser utilizada como referência no ensaio (KOVACS E SALOMONE 1982, ROBERTSON ET AL. 1983, SEED ET AL. 1985, SKEMPTON 1986), a ISSMFE (1989) estabeleceu 60% da energia potencial

teórica como a referência internacional ($E^* = 474$ J, considera altura de queda de 76 cm e peso do martelo de 63,5 kgf). Desse modo, $E_{60} = 0,60 \times 0,74 = 284,4$ J. Assim os resultados de um ensaio SPT com uma dada energia (E) devem ser convertidos para N_{60} através de:

$$N_{60} = N_{SPT} \frac{E}{E_{60}} \quad (2.2)$$

Cabe salientar que a energia potencial no sistema brasileiro (igual a 478,2 J, correspondente a um martelo de 65 kgf caindo de uma altura de 0,75 m) tem uma diferença de apenas 1 % em relação à correspondente internacional (DANZIGER ET AL, 2008).

O valor do N_{60} também pode ser calculado em função da eficiência de um sistema SPT (η), que é dada pela razão entre a energia medida e a energia padrão. CAVALCANTE (2002) encontrou um valor médio de eficiência $\eta = 82\%$ para o sistema SPT brasileiro, em pesquisa envolvendo sondagens nos Estados do Rio de Janeiro e Paraíba (SANTANA, 2011).

$$N_{60} = N_{SPT} \frac{\eta(\%)}{60\%} \quad (2.3)$$

A partir da energia potencial, ocorrem várias perdas até que a energia chegue ao amostrador. DÉCOURT (1989) e KULKAWY E MAYNE (1990) resumiram os fatores que influenciam a transmissão de energia até o topo da composição de hastes (portanto abaixo da cabeça de bater). De acordo com DÉCOURT (1989), a energia que chega até o topo da composição de hastes, E_i , pode ser obtida através da expressão (DANZIGER ET AL, 2006):

$$E_i = e_1 e_2 e_3 E^* \quad (2.4)$$

Sendo:

e_1 , e_2 e e_3 fatores de eficiência ou de correção

E^* a energia potencial teórica.

O fator de eficiência e_1 está relacionado com a energia cinética imediatamente antes do impacto do martelo com a cabeça de bater. Esse fator é influenciado pela maneira como o martelo é levantado e deixado cair. O fator e_2 quantifica as perdas de energia durante o impacto entre o martelo e a cabeça de bater. Já o fator e_3 está relacionado com o comprimento da composição de hastes.

Levando em conta que a energia que chega a composição de hastes pode não ser a mesma que chega ao amostrador, DANZIGER ET AL (2008) propõe um novo fator de eficiência e_4 , que quantifica as perdas de energia ao longo da composição de hastes e dessa forma é sugerida a expressão para a energia que atinge o amostrador:

$$E_i = e_1 e_2 e_3 e_4 E^* \quad (2.5)$$

Apesar da existência de 4 fatores de eficiência, este presente trabalho terá como objetivo principal aprimorar a compreensão dos principais fatores que podem influenciar no valor do fator de eficiência e_1 . Segue maior detalhamento nos próximos itens.

2.2.2 Fatores que afetam a energia do SPT

Como citado na introdução, HVORSLEV (1949) agrupa os fatores intervenientes no ensaio em três classes: equipamento, procedimento e condição do solo. Dentro dessas três classes existem inúmeros fatores que influenciam o resultado do ensaio.

Dentre alguns fatores podemos citar: o tipo do martelo, o dispositivo para queda livre, o uso de roldana móvel, a massa da cabeça de bater, o estado de conservação da composição das hastes, o uso ou não do coxim de madeira, comprimento das hastes e seu respectivo estado conservação, imperfeições no amostrador, resistência do solo, compactidade ou a consistência, entre outros.

Trabalhos como o de BELICANTA (1998), BELINCANTA E CINTRA (1998), são suficientemente claros e abrangentes com relação a esses fatores intervenientes no ensaio SPT. Desta forma, a seguir serão apresentados apenas aspectos relevantes sobre os fatores intervenientes no ensaio SPT, que estão relacionados à variação de energia durante a queda do martelo SPT. São eles: tipo do martelo, uso ou supressão do coxim de madeira, altura de queda, frequência de golpes e sistema de levantamento e soltura do martelo.

2.2.2.1 Tipo do martelo

Há vários tipos de martelos sendo utilizados para o ensaio SPT no mundo todo, cada um mantendo a característica particular que convém à sua prática, sendo que essas diferenças podem diminuir ou aumentar as perdas de energia. No Brasil, é muito comum o uso do martelo maciço operado manualmente, do tipo pino-guia, corda sisal deslizando em roldana fixa e, em alguns casos, uso de tambor em rotação. A NBR-6484/2001 também admite a utilização do martelo vazado. Abaixo, a Figura 2.1 ilustra os dois tipos de martelos estabelecidos pela norma.

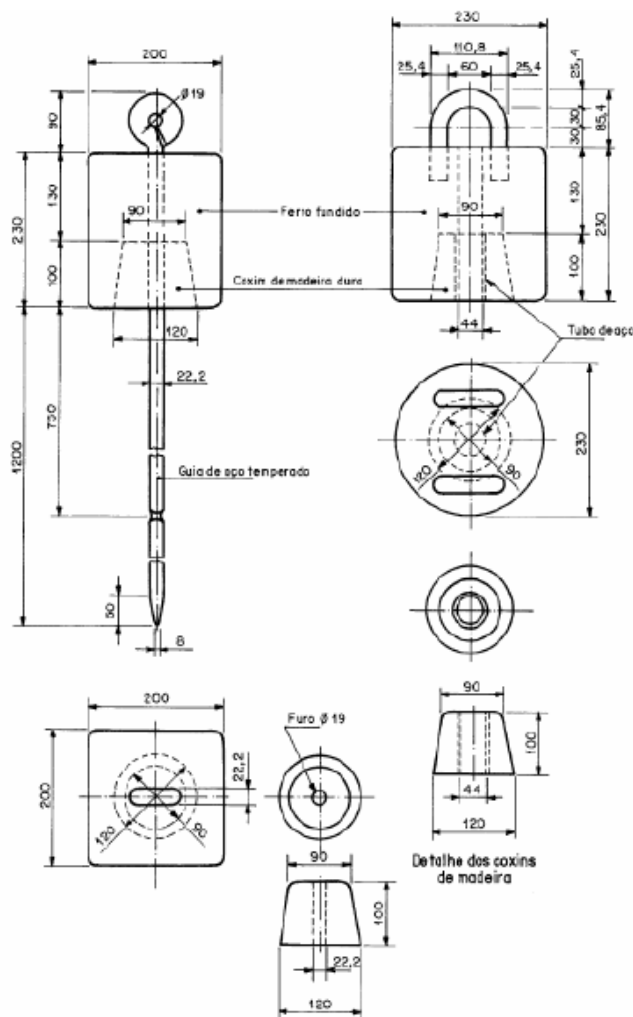


Figura 2.1 - Tipos de martelos maciço (à esquerda) e vazado (à direita), (NBR -6484/2001)

Cabe ressaltar que estudos realizados por BELINCANTA e CINTRA (1998) mostram que o primeiro tipo de martelo é mais eficiente que o segundo. Os mesmos autores também citam a introdução, na prática brasileira (especialmente no Estado de São Paulo), do martelo com gatilho disparador de funcionamento simples desenvolvido por Furnas Centrais Elétricas S.A. O mecanismo de acionamento desse tipo de martelo é apresentado abaixo na Figura 2.2.

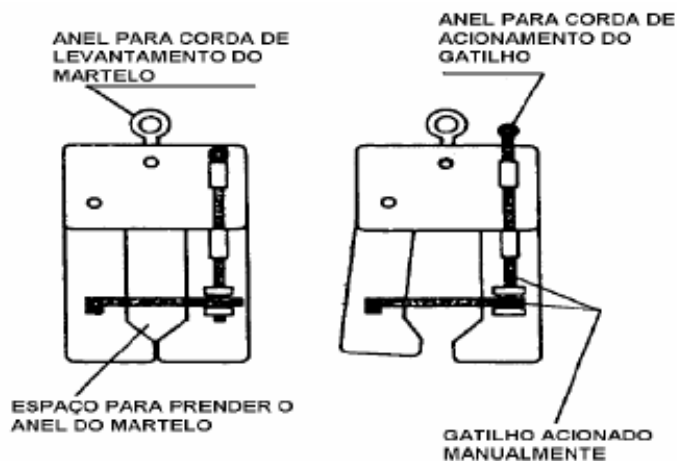


Figura 2.2 - Sistema de martelo com gatilho

Um possível problema envolvendo martelos numa sondagem está na diferença de massa em relação ao padrão estabelecido pela NBR-6484/2001. Por isso, há necessidade de uma periódica verificação, visto que, com constantes impactos, é possível a perda de massa por parte do martelo (SANTANA, 2011).

2.2.2.2 Uso do coxim de madeira

Como visto em itens anteriores a NBR-6484/2001 recomenda a utilização de um coxim de madeira na base do martelo. Este acessório melhora as condições de contato do martelo com a cabeça de bater, evitando o contato de aço-aço, conseqüentemente, reduzindo vibrações no sistema.

BELINCANTA (1998) verificou o uso ou não do coxim de madeira tem apenas pequena influência nos valores de N_{SPT} , podendo, inclusive, ser desprezada.

2.2.2.3 Altura de queda

O controle ineficiente da altura de queda é um problema comum em ensaios de SPT que utilizam martelos operados manualmente. É natural uma variação na altura de queda do martelo ao longo do dia, justificada pelo cansaço da equipe de sondagem. CAVALCANTE (2002) pondera que há uma tendência natural de que no início da jornada os operadores levem o martelo mais que necessário, e que o oposto ocorra ao final do dia.

Além do cansaço, existe outro aspecto: algumas empresas trabalham com sistema de produtividade para remunerar seus funcionários pelos ensaios realizados, dessa forma a atenção dos operadores em aplicar a correta altura de queda é prejudicada, tendo em vista que fazem o ensaio apressadamente. Além disso, existe o fato de que o controle da altura de queda do martelo geralmente é feito apenas com uma marcação no pino guia, o que compromete a acurácia dessa operação. DANZIGER ET AL (2008) citam casos em que a marca deixa de se tornar nítida, por sujeiras na haste, e não é refeita, ou até mesmo casos em que não existe a marca sob a suposta alegação de que o operador e a equipe “possuíam muita experiência e não havia, portanto necessidade da marca”.

O martelo caindo de uma altura de queda maior que a estabelecida terá uma velocidade maior na iminência do impacto e,consequentemente, haverá uma maior transmissão de energia cinética para as hastes, podendo reduzir o N_{SPT} e a indicação de capacidade de suporte desse solo. Já no caso em que a altura de queda é menor, o solo pode ser tido como mais resistente do que se apresenta de fato podendo implicar em projetos geotécnicos contra a segurança.

Alguns trabalhos como CAVALCANTE, (2002) e SANTANA ET AL (2012) comprovam, a tendência de se levantar o martelo significativamente acima da altura padrão. Neste presente trabalho, analisaremos dados pertinentes a alturas de quedas praticadas em ensaios SPT.

2.2.2.4 **Frequência dos golpes**

A frequência dos golpes é um fator que na prática é desprezado pelas empresas de sondagem, porém tem certa relevância. KOVACS (1979) estudou este efeito usando um martelo de queda livre do tipo BORROS e observou que a altura de queda tende a aumentar à medida que aumenta a frequência dos golpes.

É importante ressaltar que o sistema automatizado pode também conduzir a alturas de queda significativamente maiores, justamente por estar associado à aumento da velocidade de realização do ensaio. (e.g., KOVACS, 1979), ver Figura 2.3.

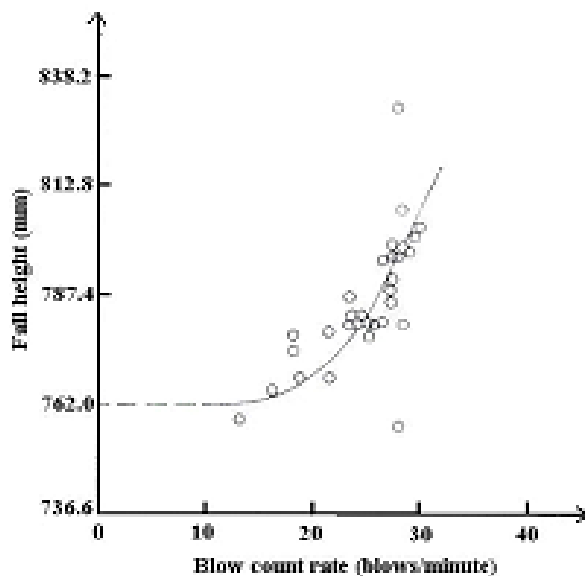


Figura 2.3 – Aumento da altura de queda gerado pelo aumento da velocidade de realização do ensaio em um sistema automático

A partir da análise do gráfico acima KOVACS (1979), não recomenda frequência maior de 15 golpes por minuto. DECOURT E TAL (1988) e o ISSMFE (1989) dissertam a esse respeito recomendando uma média de 30 golpes por minuto para o SPT padrão. SKEMPTON (1986) mostra que uma frequência média de 35 golpes por minuto torna desnecessária a correção em N devido a este efeito (apenas em areias).

2.2.2.5 Sistema de levantamento e soltura do martelo

A energia cinética na iminência do impacto é menor que a energia potencial de soltura do martelo. Portanto, há perda de energia ao longo do processo de soltura do martelo até o instante imediatamente anterior ao choque com a cabeça de bater.

Essa perda de energia deve principalmente por conta do atrito que ocorre em algumas das etapas ao longo do processo, são elas: o atrito entre a roldana e o cabo utilizado para erguer o martelo; em sistemas automáticos o número de voltas em torno do tambor também pode aumentar o atrito (ver figura 2.4; e.g. KOVACS 1977); pode haver atrito entre o pino-guia e a composição de hastes, devido, por exemplo, à excentricidade do martelo em relação às hastes; o estado de lubrificação da roldana; o tipo de cabo utilizado (diâmetro e sua idade) também tem influência direta na eficiência do ensaio SPT, (ver figura 2.5; e.g. KOVACS 1977).

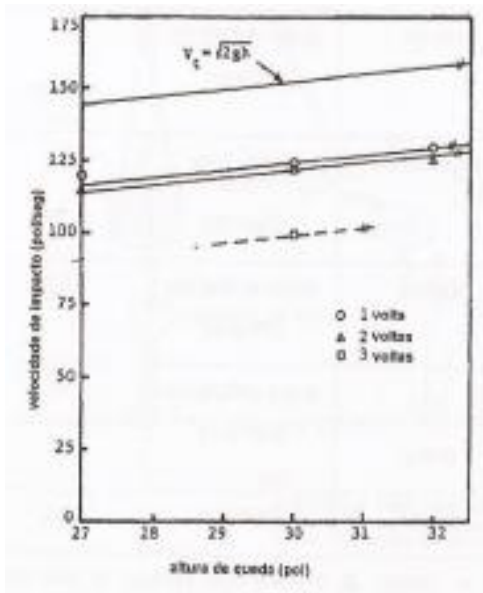


Figura 2.4— Influência da altura de queda e do número de voltas da corda em torno do tambor do sistema “cathead” na velocidade de impacto do martelo (adaptado de KOVACS ET AL, 1997)

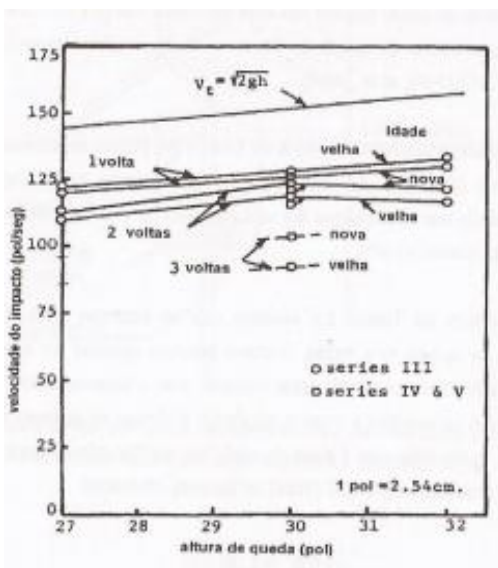


Figura 2.5 – Influência da altura de queda e do número de voltas da corda em torno do tambor do sistema “cathead” e da corda na velocidade de impacto do martelo (adaptado de KOVACS ET AL, 1997)

Os tipos mais comuns de cabos utilizados são cordas de nylon, de sisal e cabos de aço, sendo que o uso do cabo de aço está em desacordo com a NBR-6484/2001, apesar de existirem diversos registros de seu uso em ensaios 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.

2.2.3 Energia potencial do martelo

A energia inicialmente disponível e utilizada para transferência de energia ao amostrador durante o ensaio SPT é a energia potencial do martelo, representada pela equação:

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad (2.6)$$

Sendo:

m = massa do martelo

g = aceleração da gravidade

h = altura de queda do martelo

Considerando a utilização do martelo descrito na NBR-6484/2001, com peso de 65 kgf, e uma altura de queda de 75 cm, obtemos uma energia potencial teórica de aproximadamente 478J.

Como visto anteriormente, quanto à altura de queda podem existir diferenças significativas em relação à padronizada. RIGGS ET AL (1983) reuniram dados de KOVACS ET AL (1975), para o emprego de sistema com tambor e corda, e GOBLE E RUCHTI (1981) os quais realizaram uma pesquisa envolvendo a medida de velocidade de impacto e alturas de queda em mais de 1500 golpes realizados por quinze experientes sondadores. Os resultados mostraram que todos os operadores levantaram o martelo mais do que os 76,2 cm preconizados, sendo a média da altura de queda igual a 81,7 cm. Os dados obtidos nas duas pesquisas podem ser visto abaixo, na figura 2.8.

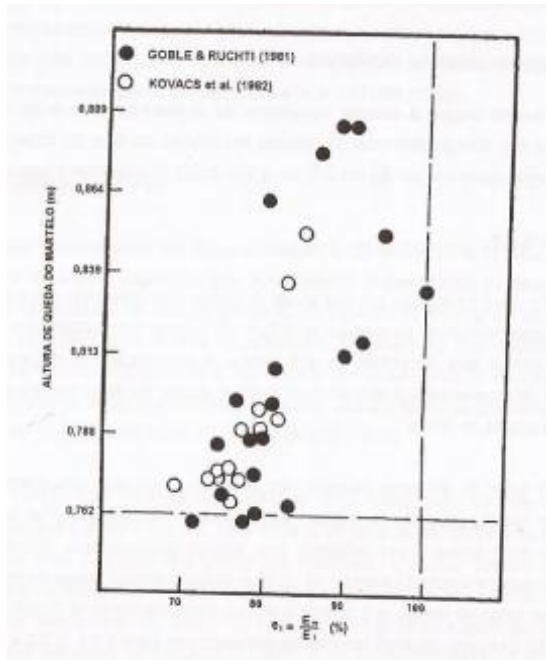


Figura 2.6 – Altura de queda versus eficiência da energia cinética em relação à energia potencial nominal (474,7J) no sistema americano de tambor e corda, com duas voltas na corda.

2.2.4 Energia cinética imediatamente antes do impacto

Como citado em item anterior, a energia cinética na iminência do impacto é menor que a energia potencial de soltura do martelo, o que não ocorreria caso não houvesse o atrito (a energia potencial seria totalmente transformada em energia cinética). A velocidade de queda livre seria representada pela equação:

$$v = \sqrt{2gh} \quad (2.7)$$

Sendo:

g = aceleração da gravidade (9,81m/s²)

h = altura de queda do martelo

Para essa hipótese, segundo as especificações da NBR-6484/2001, o sistema brasileiro forneceria uma velocidade de impacto de 3,84m/s. Porém já foi visto que durante a queda existem perdas de energia e a velocidade de impacto pode sofrer uma redução.

Devido às perdas de energia em função de atrito (citados no item 2.2.2.5), pode-se definir um fator de eficiência que relaciona a energia teórica (ou velocidade) à

energia (ou velocidade) imediatamente antes do impacto do martelo com a cabeça de bater. Esse fator foi designado por DECOURT (1989) como fator de eficiência e_1 , definido pela seguinte expressão:

$$e_1 = \frac{E_m}{E_T} \quad (2.8)$$

Sendo:

E_m = Energia disponível imediatamente antes do impacto

E_T = Energia teórica

A energia disponível pode ser determinada a partir da velocidade máxima alcançada pelo martelo (v_0) e da massa do martelo (m_m), conforme expresso na equação 2.9:

$$E_m = \frac{m_m \cdot v_0^2}{2} \quad (2.9)$$

A figura 2.9 apresenta o fator de eficiência de e_1 para vários sistemas de SPT, inclusive utilizados no Brasil (adaptado por DÉCOURT, 1989 de SKEMPTON, 1986)

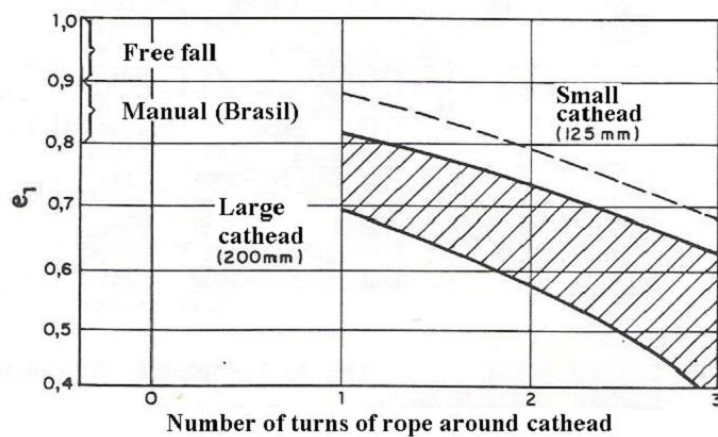


Figura 2.7 - Fator de eficiência e_1 em função do sistema de acionamento do martelo do SPT (adaptado por Décourt1989 de Skempton 1986)

3 A Campanha de ensaios

3.1 Considerações iniciais

Neste capítulo são apresentados os resultados da monitoração da energia em ensaios SPT realizados na área portuária de Itaguaí, Rio de Janeiro. Foi monitorado um total de 164 golpes de uma sondagem com profundidade máxima de 22 m. Através desse monitoramento foi possível o registro dos valores das alturas de queda, bem como a velocidade de impacto do martelo.

Vale ressaltar que o monitoramento foi realizado a cada dois metros de avanço da sondagem e não ao longo de toda a metragem do furo, o que nos forneceu um total de dados coletados de 14 sequências de golpes.

3.2 Campo experimental

O local escolhido para a campanha está localizado na região portuária do município Itaguaí no Estado do Rio de Janeiro. O solo do local possui perfil geotécnico com camadas de variados materiais, tendo uma camada superficial de aproximadamente 13 metros de aterro hidráulico.



Figura 3.1 - Localização da área de realização dos ensaios em Itaguaí/RJ (GoogleEarth) Figura 3.1 –

3.3 Características da equipe de sondagem, equipamento e procedimento

A equipe de sondagem foi praticamente a mesma durante todo o SPT. Foi composta por um sondador chefe e 3 operadores auxiliares.

O martelo utilizado mostrado na figura 3.2, com coxim de madeira, normalizada por NBR 6484/2001, foi utilizado durante toda a campanha. A massa nominal do martelo, incluindo os acessórios fixados, é 65 kg, porém este valor não foi verificado.



Figura 3.2 – Padrão de martelo utilizado na campanha

A cabeça de bater mostrada na figura 3.3, também foi utilizada durante toda a campanha. O peso desta, fornecido pelo Setor de Controle de Qualidade da empresa responsável pelo ensaio foi de 4 kgf. De acordo com a NBR 6484/2001, o valor deve estar compreendido entre 3,5 kg e 4,5 kg.



Figura 3.3 – Padrão de martelo utilizado na campanha

Foi utilizado um sistema mecanizado de levantamento e soltura do martelo, com duas voltas da corda em torno do tambor, como mostrado na Figura 3.4.

Deve ressaltar que o uso deste tipo de sistema não é registrado pela NBR 6484 (ABNT, 2001), no entanto, foi decidida pela empresa responsável a utilização do mesmo nos testes. Já a corda utilizada era nova, feita de sisal (como sugerido pela norma).



Figura 3.4 – Sistema corda-guincho usado para levantar e lançar o martelo: (a) vista frontal, (b) vista lateral.

O amostrador SPT descrito na NBR 6484/2001 é semelhante ao descrito por ISSMFE (1989), exceto pelo comprimento. O comprimento do amostrador na NBR 6484 é 809,6 milímetros, enquanto que em ISSMFE (1989) é de 680 mm (aproximadamente). O comprimento do amostrador usado na campanha é de 648 milímetros.

As hastes utilizadas foram as previstas pela norma brasileira com uma massa de 3,23 kg / m, enquanto ISSMFE (1989) sugere que um valor mínimo de 4,33 kgf / m. Para a garantia da estabilidade do furo ao longo do ensaio foi utilizada a bentonita.

Durante a campanha nenhuma interferência foi feita no sentido de alterar os procedimentos de rotina da equipe que colaborou na pesquisa, porém foram detectados alguns procedimentos realizados pela equipe de sondagem que não estão de acordo com a norma. Dentre eles os mais significativos foram a contagem errada no número de golpes e remarcação dos intervalos de 150 mm durante o ensaio.

A contagem do número de golpes na prática do SPT brasileiro é feita pelo operador principal, sem a ajuda de qualquer dispositivo. Em outras palavras, os golpes são contados, memorizados e, em seguida, anotados. Foi observado na campanha que, em certo número de casos, o número de golpes não foi anotado corretamente, fato que é comum em outras séries de SPT no Brasil, devido ao procedimento utilizado.

Também foi observado que quando a penetração foi maior do que 150 mm de um intervalo, as marcas utilizadas para definir cada 150 mm foram alteradas com base

no intervalo anterior, o que resultou em alguns casos, em uma penetração total maior do que 450 mm, o que está em desacordo com a NBR-6484/2001.

Apesar desses problemas, como já citado, não houve nenhuma interferência nos procedimentos, a fim de traduzir fielmente a prática de sondagem SPT.

3.4 Instrumentação

3.4.1 Câmera de alta velocidade

Durante toda a campanha, a análise das alturas de queda do martelo foi realizada com a utilização de uma câmera de alta velocidade Casio EX-FH20, capaz de gravar imagens com até 1000 quadros por segundo. Além de determinar a altura de queda do martelo SPT, através dela é possível a determinação da velocidade de impacto com maior acurácia.

3.4.2 Mira topográfica

Para auxílio na determinação da posição do martelo durante seu processo de levantamento e soltura, foi utilizada, como referência, uma mira topográfica graduada ao lado do conjunto SPT, como apresentado na figura abaixo:



Figura 3.5 – (a) mira topográfica, (b) utilização na campanha

4 Análise dos dados

4.1 Considerações iniciais

Como citado no capítulo anterior foi utilizado um sistema formado por câmera e mira de referência para o monitoramento da altura de queda e velocidade de impacto do martelo durante o ensaio. Neste capítulo apresentaremos a forma com que esses dados foram trabalhados para posterior obtenção de informações importantes para o desenvolvimento da pesquisa e suas possíveis conclusões.

4.2 Metodologia

Durante a realização do ensaio SPT, a cada dois metros de avanço do furo, foi realizada a filmagem do procedimento do ensaio com a câmera de alta velocidade.

Analisa-se quadro a quadro o processo de levantamento e soltura do martelo ao longo do ensaio. Identificando o ponto de altura máxima de levantamento (altura de queda), capturam-se as imagens da trajetória de descida do martelo até o instante bem próximo ao choque com a cabeça de bater. Podemos ver esse processo de captura de imagens na figura 4.1.

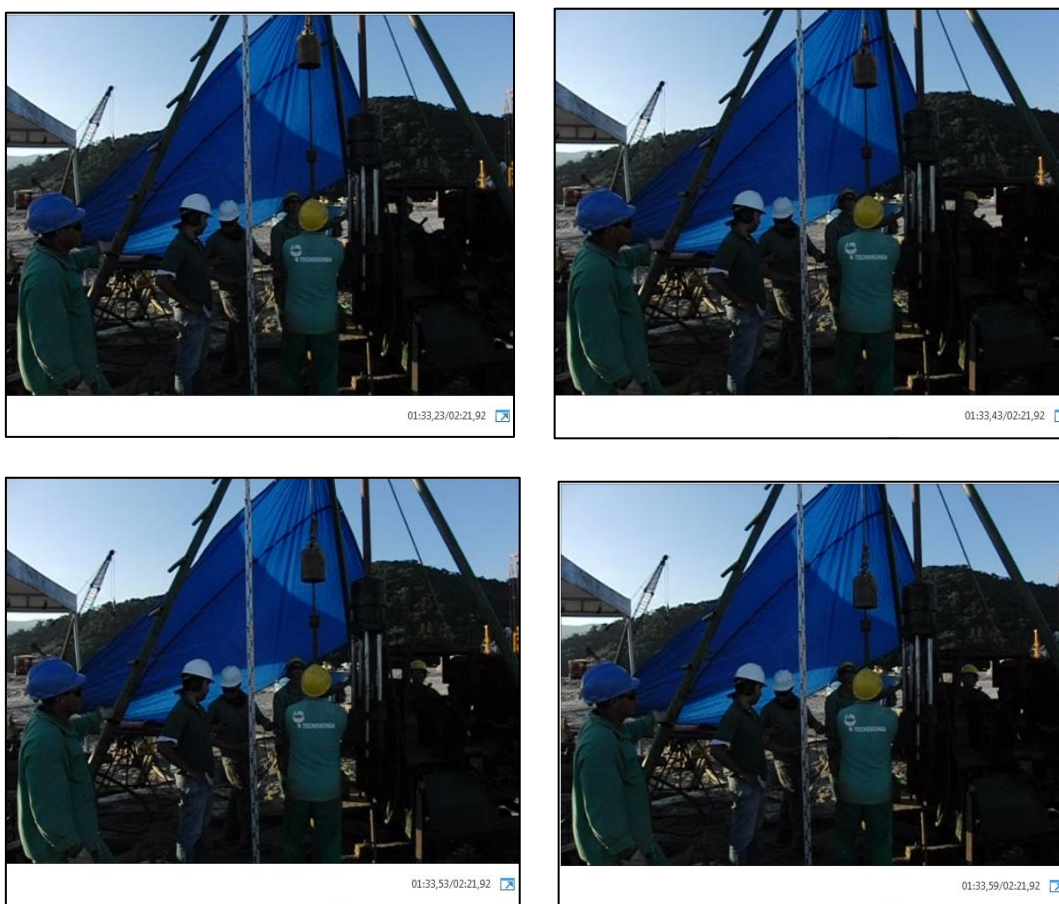


Figura 4.1 – Imagens capturadas da trajetória do martelo antes do impacto

Esse processo de captura de imagens foi aplicado em todos os golpes filmados, sendo que cada golpe registrado produz uma quantidade de aproximadamente 15 quadros até o instante do impacto. Vale ressaltar que além da imagem do martelo também é possível obter o instante de cada quadro, o que nos possibilitará a análise da velocidade de impacto, mais adiante.

Após a captura das imagens, exportam-se os quadros para o software AutoCAD para análise das alturas de queda de cada golpe. Como referência é utilizada a mira topográfica graduada, que foi colocada ao lado da haste do SPT. Através de marcações nela contidas obtemos uma referência de comprimento que depois é aplicada ao pino guia, de modo que seja possível identificar com erro mínimo a altura máxima que o martelo é erguido e os instantes subsequentes (até momento do impacto entre o martelo e a cabeça de bater). A figura 4.2 exemplifica esse processo de medida utilizando o AutoCAD.

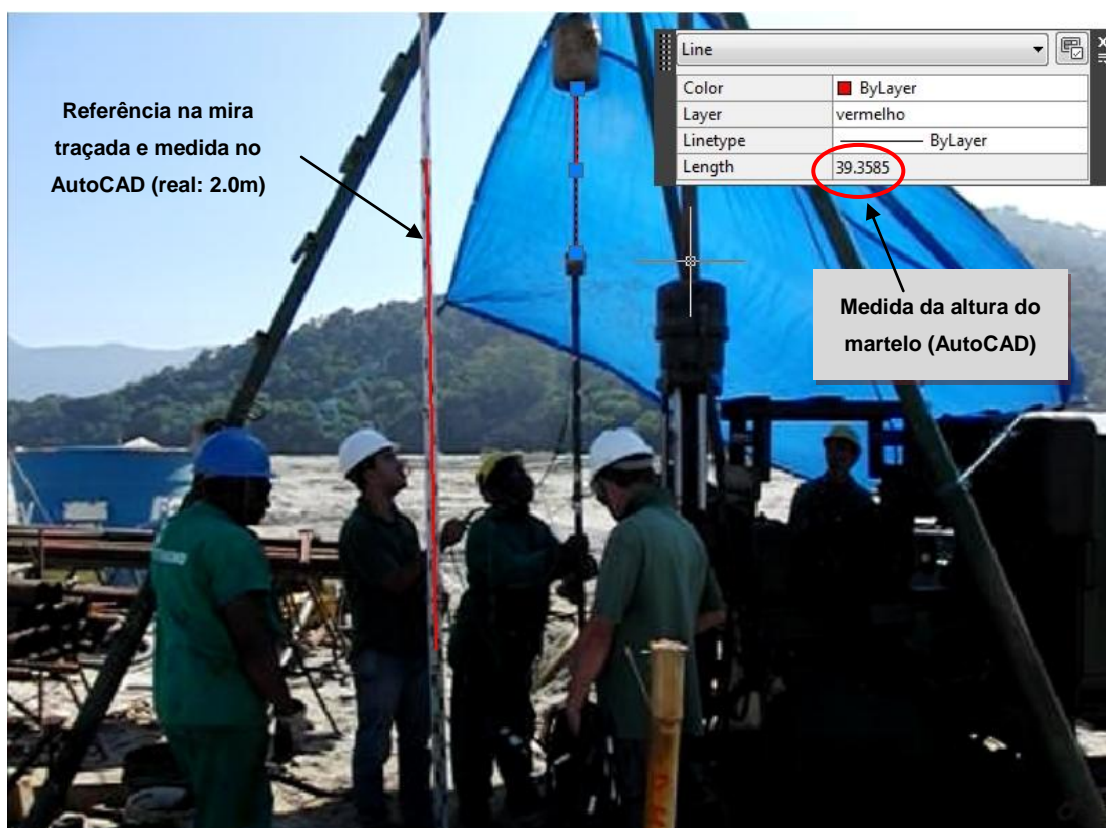


Figura 4.2 – Processo de medida das alturas de queda utilizando o AutoCAD

A medida real da mira é conhecida, através da graduação nela existente, e realiza-se a medida correspondente no AutoCAD. Por uma regra de três simples podemos obter o comprimento real da altura de queda do martelo através da medida do pino obtida no programa como mostrado na figura 4.2. Assim, foi possível registrar

a altura de queda de todos os golpes das sequências monitoradas, para posterior análise de comportamento.

A análise da altura de queda do martelo no ensaio do SPT é um dos enfoques desse trabalho. Um segundo enfoque está relacionado com o entendimento das perdas energia durante a queda do martelo até o instante do impacto com a cabeça de bater. Essa perda de energia está ligada à relação entre a energia potencial e a energia cinética durante o movimento de queda, a qual é traduzida pelo fator de eficiência e_1 , apresentado no item 2.2.4 deste trabalho.

Para uma análise das energias e por consequência do fator eficiência e_1 é fundamental o conhecimento do movimento do martelo desde sua soltura até o impacto. Para tal, foi medida no programa AutoCAD a altura do martelo em cada um dos quadros, relativos a determinado golpe. As medidas de comprimento foram registradas e colocadas em uma planilha do software Excel para serem trabalhadas e assim obter informações de toda a trajetória do martelo até atingir a cabeça de bater (posição e tempo). A figura 4.3 apresenta a planilha utilizada.

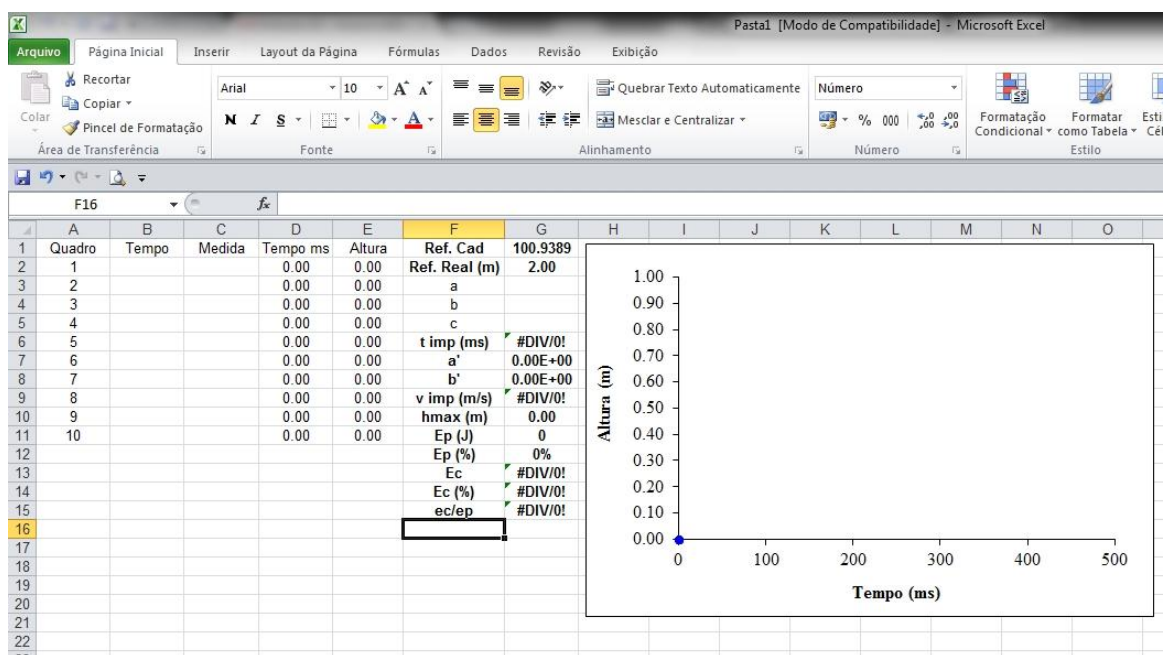


Figura 4.3 – Planilha Excel utilizada para trabalhar os dados

Coluna B: A ser preenchida com os tempos de ocorrência de cada quadro de imagem (em segundos).

Coluna C: A ser preenchida com as medidas de altura de queda em cada quadro (da trajetória do martelo), obtidas por medições no AutoCAD.

Coluna D: Foi formulada para converter automaticamente os tempos dispostos na coluna B, em intervalos de tempo em milissegundos (ms).

Célula G1: A ser preenchida com a medida de referência da mira no AutoCAD.

Célula G2: A ser preenchida com medida real de referência da mira.

Coluna D: Transforma automaticamente as medidas feitas no AutoCAD e dispostas na coluna C em comprimentos reais do pino guia em cada quadro. Essa conversão é feita com base nas referências especificadas nas células **G1 e G2**

Para continuar com a descrição da aplicação das outras células da planilha, é necessário primeiramente abordar alguns aspectos referentes ao gráfico a ser traçado, o que facilitará o posterior entendimento da planilha por completo.

Ao preencher os campos de tempo (**coluna B**) e medida (**coluna C**) com as respectivas informações, torna-se possível o traçado do gráfico de deslocamento do martelo em função do tempo, apresentado na figura 4.4.

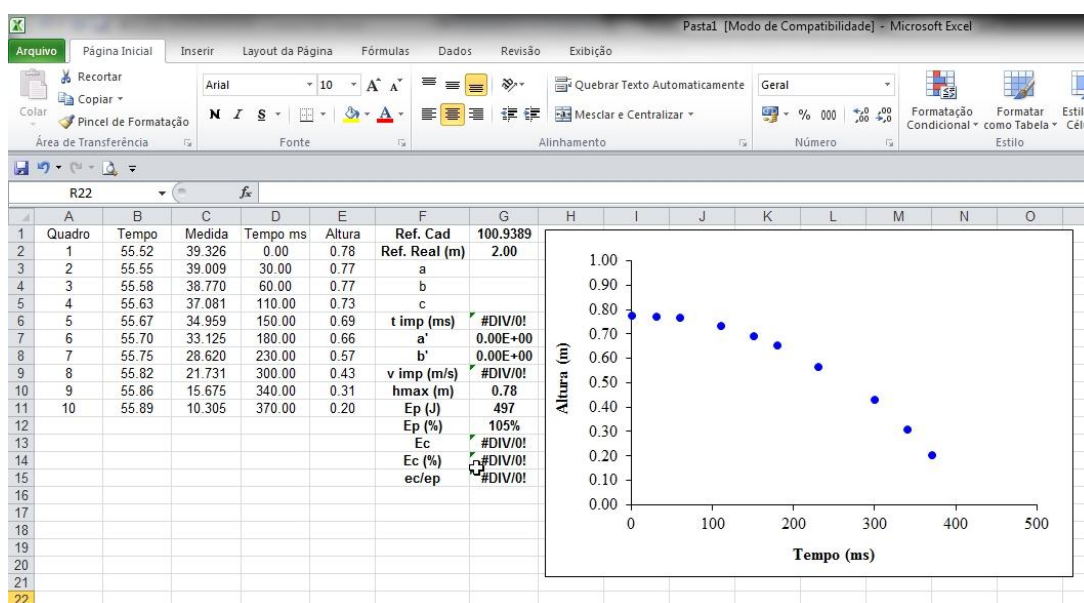


Figura 4.4 – Planilha Excel preenchida com valores de tempo e alturas

O movimento de queda do martelo é um movimento uniformemente variado (em virtude da aceleração da gravidade g). Desta forma, o gráfico do deslocamento x tempo deve ser uma parábola. A função horária do movimento uniformemente variado é representada pela expressão 4.1.

$$S(t) = \frac{a_c t^2}{2} + v_0 t + S_0 \quad (4.1)$$

Sendo:

S – posição atual do corpo em determinado instante t

t – tempo

a_c – aceleração

S_0 – posição inicial onde começa o movimento

V_0 – velocidade inicial do corpo

Através do traçado da curva da posição do martelo ao longo do tempo de queda, foi possível determinar a função que descreve este movimento. Para tal fim foi utilizada uma das ferramentas do Excel que permite a adição de uma curva de tendência que se aproxime do comportamento dos pontos plotados.

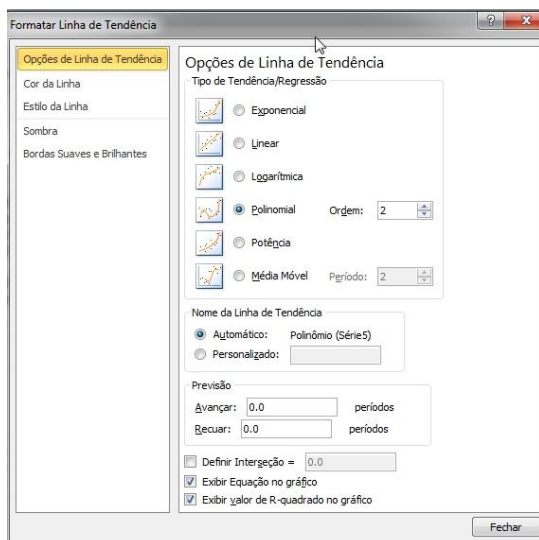


Figura 4.5 – Planilha Excel preenchida com valores de tempo e alturas

A figura 4.5 mostra que foi escolhida a linha de tendência do tipo polinomial de ordem 2, o que nos fornece uma parábola descrita por uma função do 2º grau. Nesta caixa também é possível optar que a equação da linha de tendência seja calculada e apresentada no gráfico bem como seu coeficiente de determinação R-quadrado (R²).

O coeficiente de determinação R² é uma medida de ajustamento de um modelo estatístico. Seu valor varia entre 0 e 1, indicando, em percentagem, a correlação entre os valores medidos e a equação utilizada. Quanto mais próximo de 1, melhor a correlação, ou seja, melhor o ajuste da equação à amostra.

Na figura 4.6 é possível ver a linha de tendência traçada e a respectiva função determinada pelo Excel. Os coeficientes da função apresentada são utilizados para preencher as **células G3, G4 e G5** respectivamente.

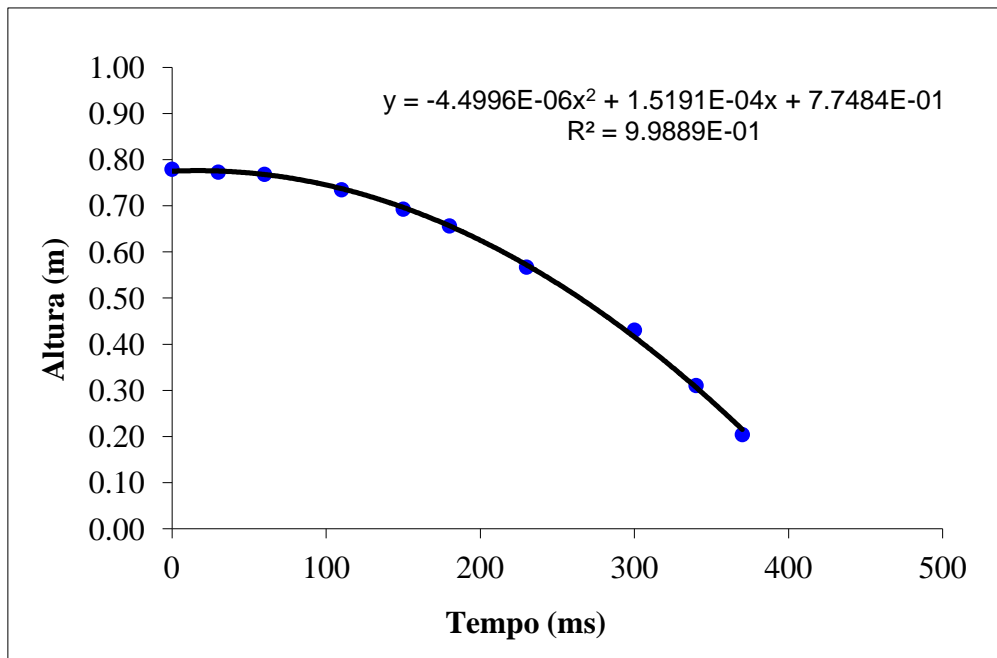


Figura 4.6 – Linha de tendência e sua respectiva função horária

A função estabelecida pelo Excel está no formato:

$$y(x) = ax^2 + bx + c \tag{4.2}$$

Sendo x a variável correspondente ao tempo e y ao deslocamento vertical podemos rescrever 4.2 da seguinte forma:

$$S(t) = at^2 + bt + c ; \tag{4.3}$$

Igualando (4.1) a (4.3) temos:

$$S(t) = at^2 + bt + c = \frac{a_c t^2}{2} + v_0 t + S_0$$

$$\text{logo: } a = \frac{a_c}{2}; \quad b = v_0; \quad c = S_0 \quad (4.4)$$

Um dos objetivos deste trabalho é determinar a relação entre a energia cinética imediatamente antes do impacto do martelo e a energia potencial teórica de soltura do martelo (fator de eficiência e_1), descrita pela expressão 2.8 (DECOURT; 1989).

$$e_1 = \frac{E_m}{E_T} \quad (2.8)$$

Sendo:

E_m = Energia disponível imediatamente antes do impacto

E_T = Energia potencial teórica de soltura do martelo

A energia teórica segundo a proposta de DECOURT (1989) é a energia potencial de um martelo com massa de 65 kg ao atingir sua altura queda de 75cm (NBR-8464/2001), obtendo assim, uma energia potencial teórica de aproximadamente 478 J. Porém, como já citado anteriormente, não é verdade que todos os golpes têm mesma altura de queda igual a altura padrão. Por diversos motivos (equipamento, operacional, entre outros) existe uma variação da altura de levantamento ao longo do ensaio, o que implica também na variação da energia potencial disponível. Portanto seguindo a proposta de SANTANA ET AL (2012), também será realizado neste trabalho o estudo do fator de eficiência e_1^* , o qual levará em consideração a altura de queda real e não a altura teórica de 75 cm. O fator e_1^* pode ser representado pela expressão (4.5).

$$e_1^* = \frac{E_m}{E_p} \quad (4.5)$$

Sendo

E_m = Energia cinética (imediatamente antes do impacto)

E_p = Energia potencial (levando em conta a altura de queda real)

A **célula G10** é formulada para fornecer automaticamente o valor da altura de queda, para que assim seja possível calcular a energia potencial utilizando a expressão 2.6. Porém, para o cálculo de e_1^* , também é necessário a determinação da energia cinética. Esse valor pode ser obtido através da expressão 2.9, mas para isso é necessário que seja conhecido o valor da velocidade do martelo na iminência do impacto com a cabeça de bater (chamada de velocidade de impacto).

É possível determinar uma função que nos forneça a velocidade em função do tempo derivando a expressão 4.3.

$$V(t) = \frac{ds}{dt} = 2at + bt \quad (4.6)$$

De posse da expressão 4.6, é possível calcular a velocidade de impacto mediante o conhecimento do instante (t) em que ocorre esse choque. O movimento em questão é de descida do martelo, por isso, na função exposta no gráfico da figura 4.6 encontramos o valor de 'a' negativo. Trata-se de um movimento acelerado e retrogrado.

Podemos afirmar que no instante do choque a posição do martelo será $S(t) = 0$, logo podemos determinar o instante t de impacto calculando a raiz da função (4.3).

$$S(t) = at^2 + bt + c = 0 \rightarrow t_{imp} = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (4.7)$$

(sendo $a < 0$, teremos um valor de $t > 0$).

Essa expressão foi incluída na célula **G6** para a obtenção automática do instante de impacto, após o preenchimento dos coeficientes a, b e c nas **Células G3, G4 e G5**.

As células **G7 e G8** são correspondentes à aceleração e velocidade inicial respectivamente. Esses valores são obtidos utilizando as afirmativas 4.4.

$$a = \frac{a_c}{2} \rightarrow a_c = a' = 2a; \quad b = v_0 = b'$$

A célula **G9** foi formulada com a equação 4.6 para nos fornecer a velocidade de impacto no instante t_{imp} apresentado na célula **G6**. Desta forma, agora é possível a determinação da energia cinética na iminência do choque, representada pela equação 2.9. De posse da energia cinética e da potencial já calculada anteriormente, determina-se o fator e_1^* , de valor apresentado na célula **G15**.

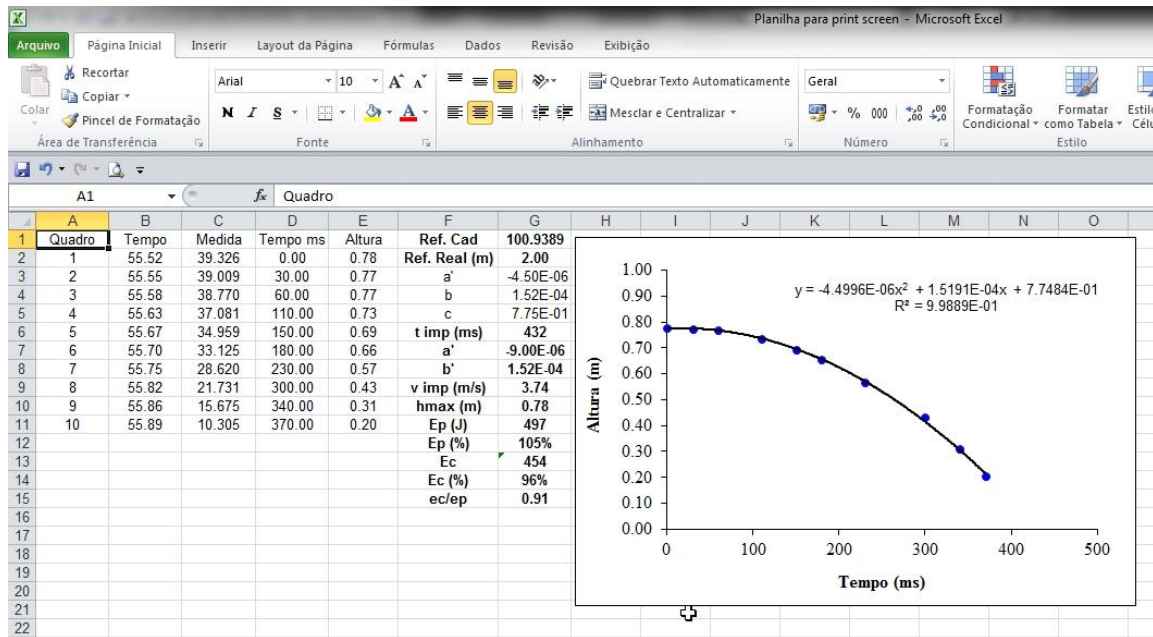


Figura 4.7 – Planilha preenchida e com os dados calculados por completo

Os dados trabalhados foram exportados para uma “planilha resumo” na qual são apresentados os valores de altura de queda, da energia potencial real, da velocidade de impacto, da energia cinética, de e_1 e de e_1^* ; para cada golpe da sequência. Além disso, também é traçado um gráfico plotando pontos relativos às alturas de queda de cada golpe. Na figura 4.9 é apresentada a planilha resumo e o gráfico em questão.

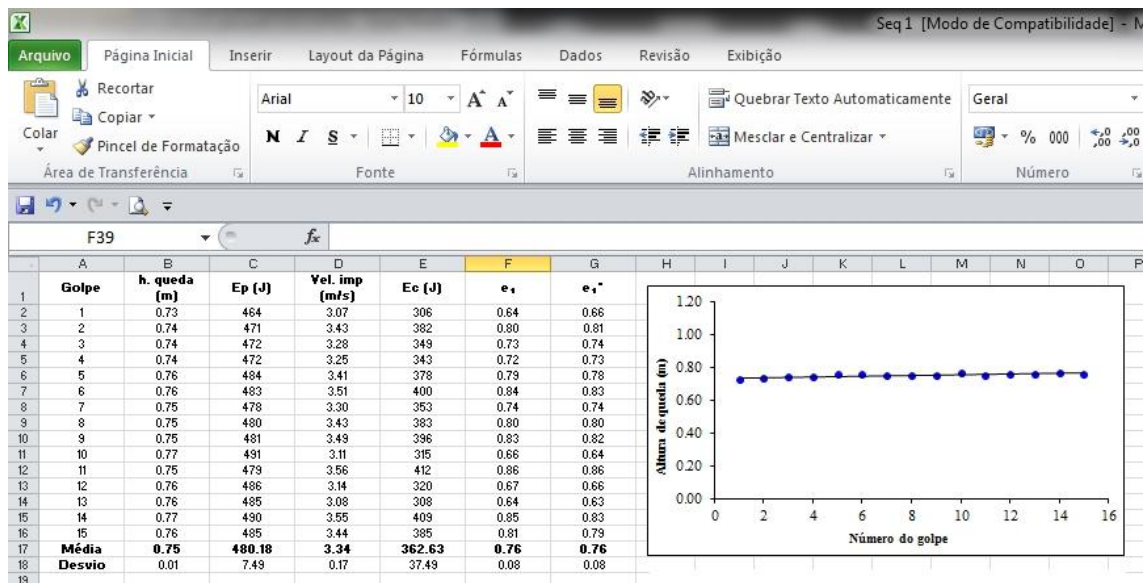


Figura 4.8 – Planilha resumo

A metodologia de análise dos dados descrita neste capítulo foi empregada para todos os golpes de cada uma das 14 seqüências monitoradas em campo, gerando dados importantes para as interpretações que realizadas no próximo capítulo.

5 Apresentação e discussão dos resultados

5.1 Análise das alturas de queda

Como citado no capítulo 3, o processo de levantamento e soltura do martelo da campanha, foi realizado com um sistema mecanizado com duas voltas da corda no tambor. Um dos aspectos que serão analisados é o comportamento da variação da altura de queda para esse sistema (apesar de não ser previsto pela NBR-6484/2011).

Para uma boa visualização da variação da altura de queda ao longo do ensaio foram plotados gráficos de cada sequência de golpes com suas respectivas alturas de queda. Para facilitar a interpretação desses gráficos foi adicionada uma linha de tendência (linear) permitindo detectar algum comportamento característico. Seguem abaixo os gráficos obtidos (na ordem das sequências):

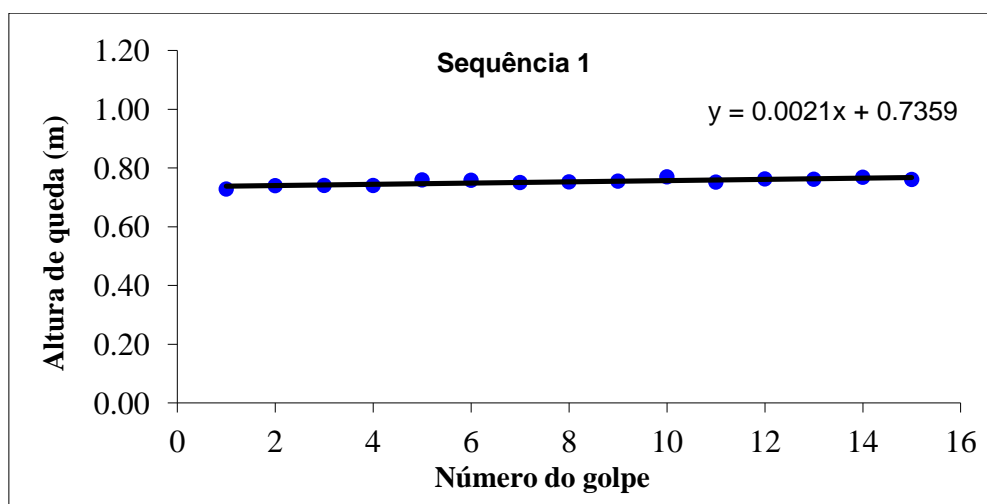


Figura 5.1 – Alturas de queda dos golpes da Sequência 1

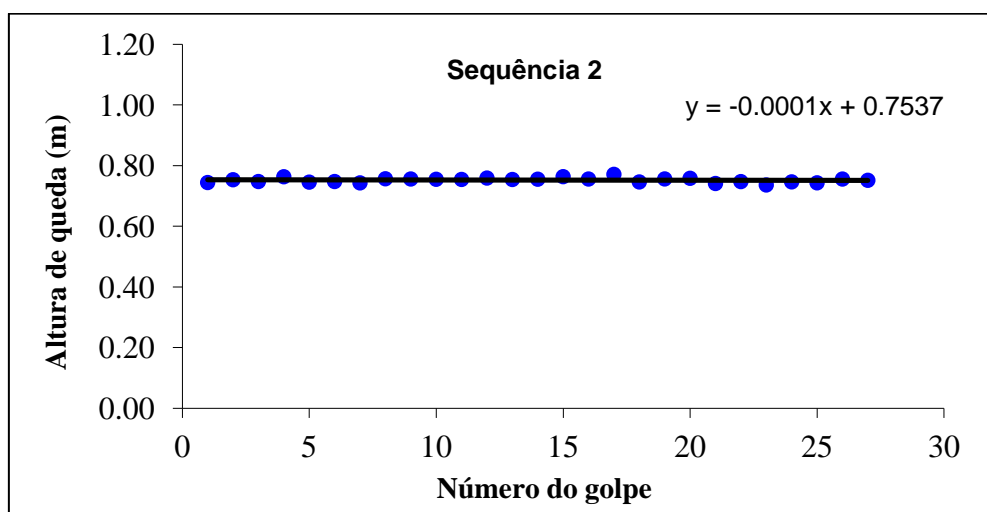


Figura 5.2 – Alturas de queda dos golpes da Sequência 2

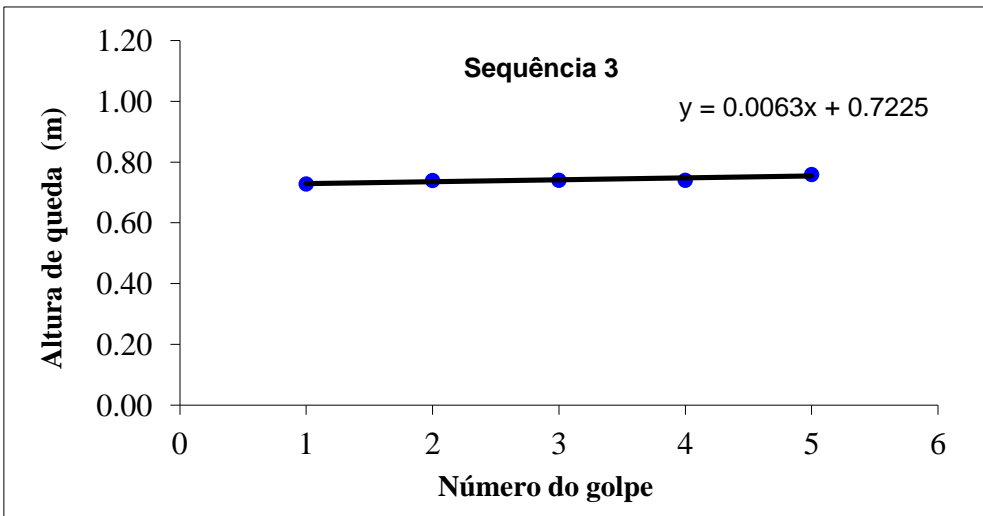


Figura 5.3 – Alturas de queda dos golpes da Sequência 3

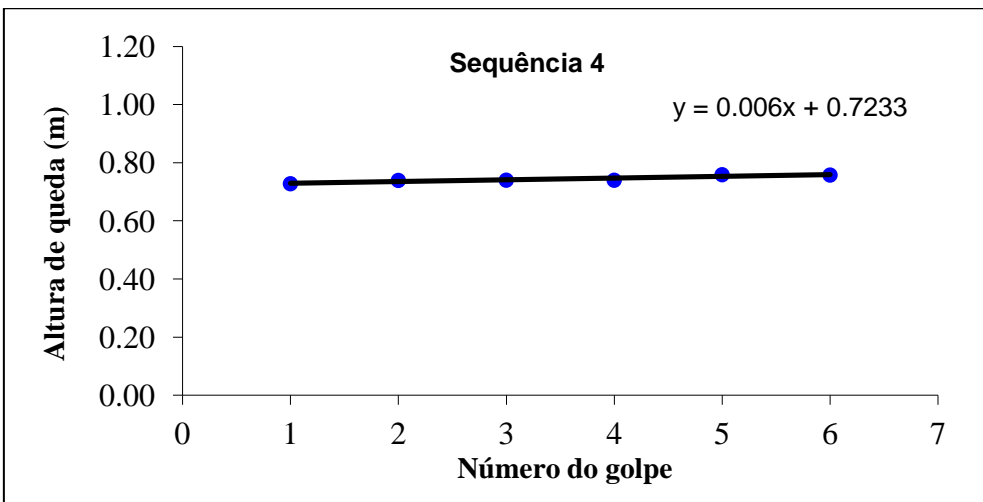


Figura 5.4 – Alturas de queda dos golpes da Sequência 4

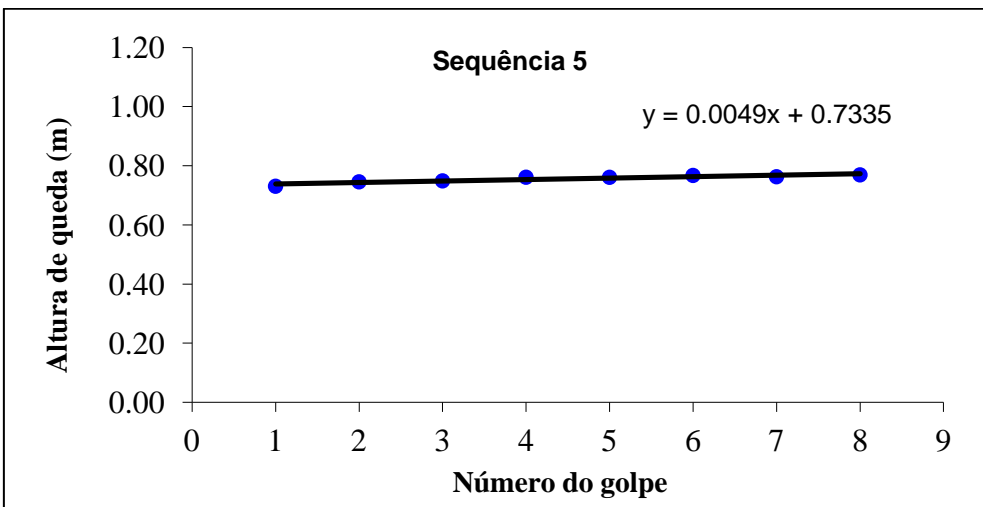


Figura 5.5 – Alturas de queda dos golpes da Sequência 5

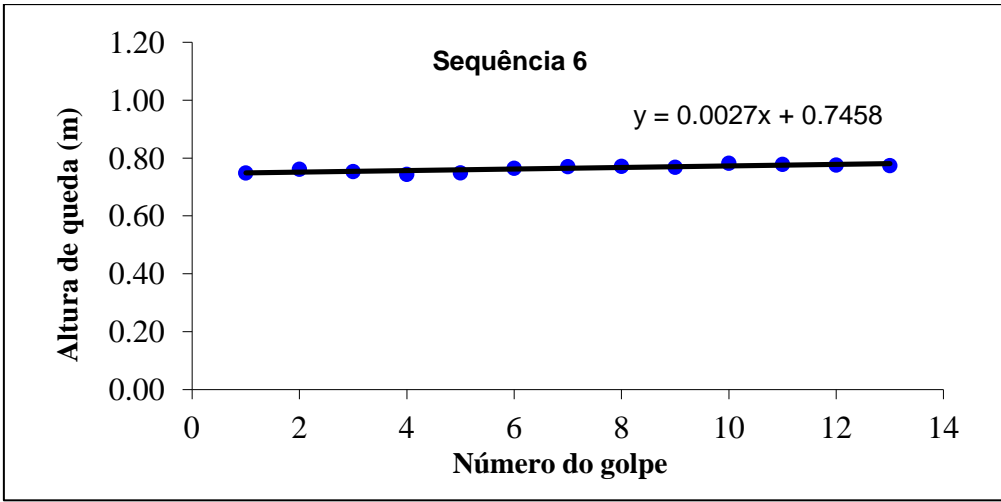


Figura 5.6 – Alturas de queda dos golpes da Sequência 6

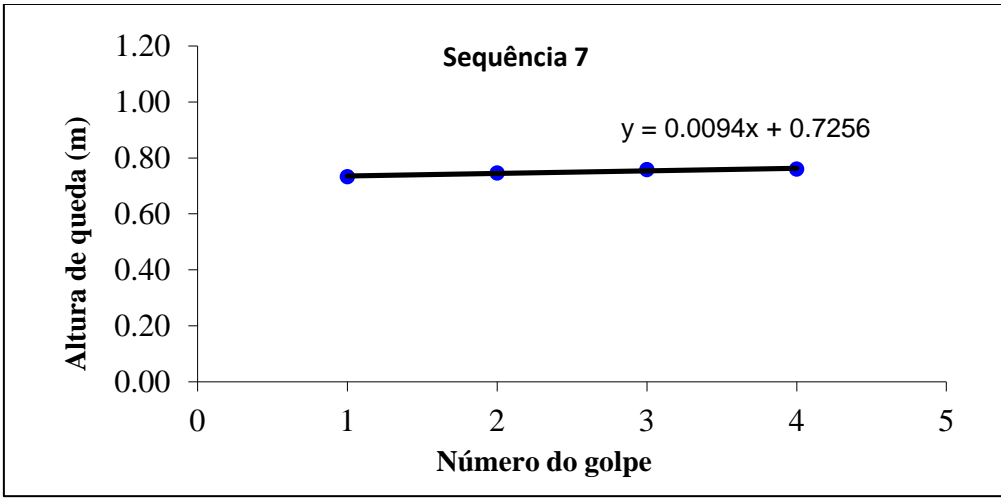


Figura 5.7 – Alturas de queda dos golpes da Sequência 7

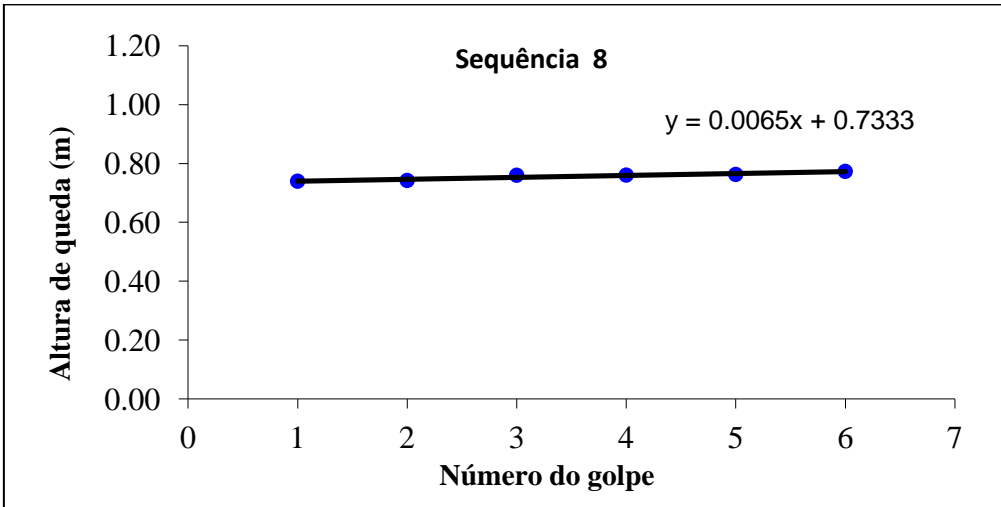


Figura 5.8 – Alturas de queda dos golpes da Sequência 8

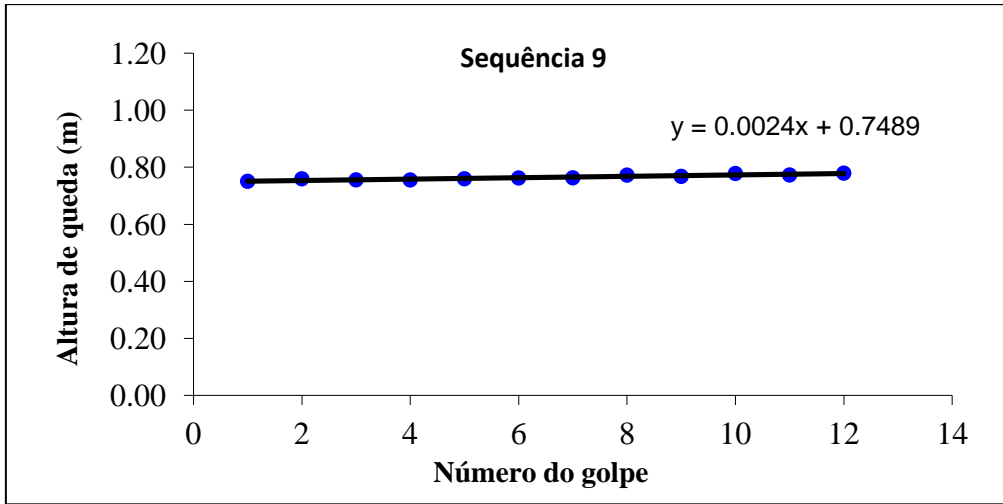


Figura 5.9 – Alturas de queda dos golpes da Sequência 9

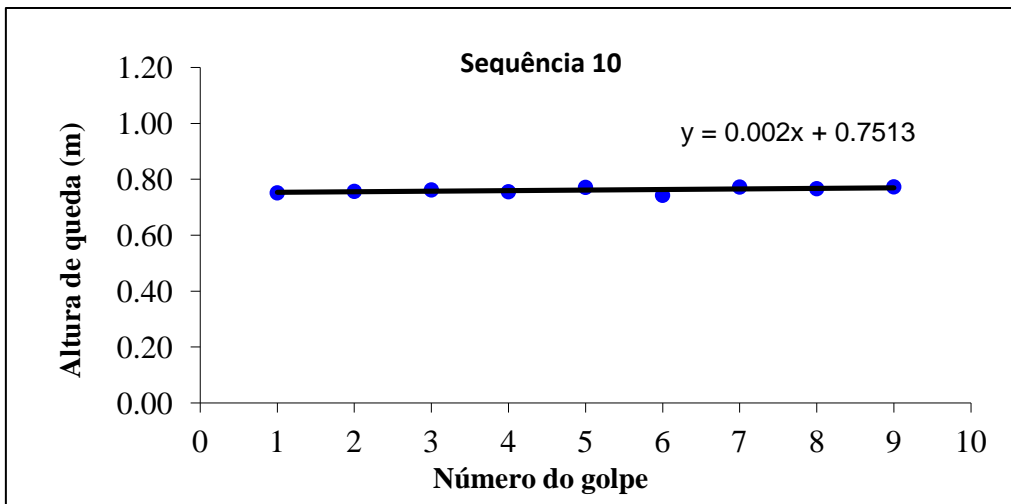


Figura 5.10 – Alturas de queda dos golpes da Sequência 10

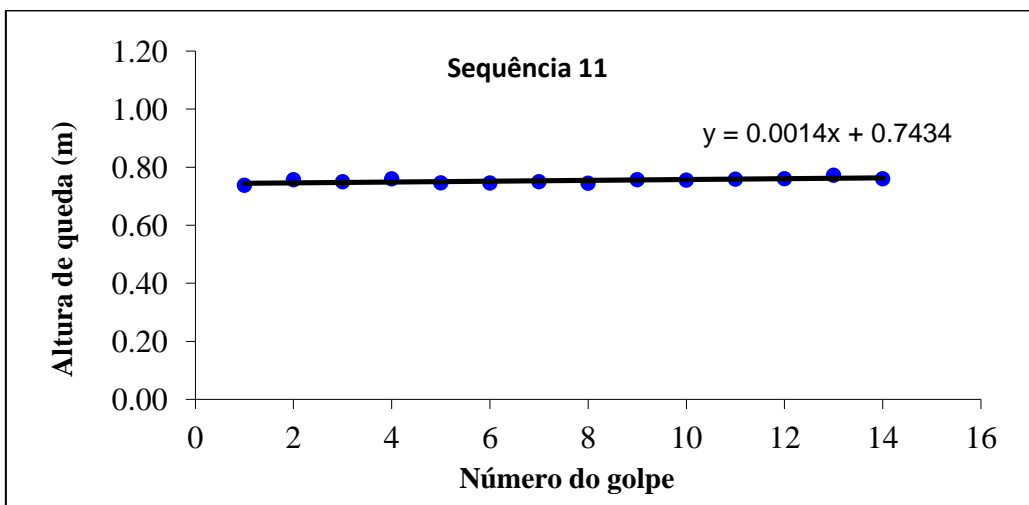


Figura 5.11 – Alturas de queda dos golpes da Sequência 11

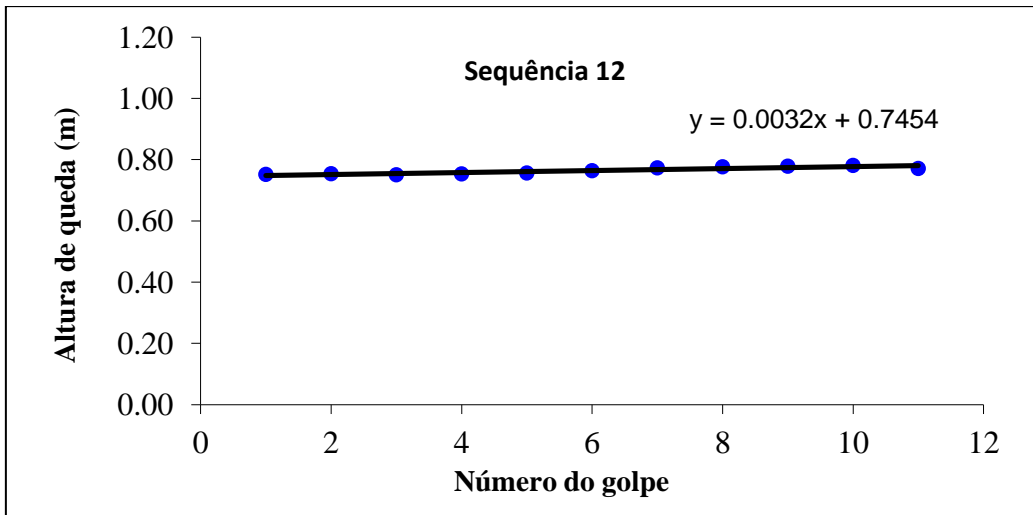


Figura 5.12 – Alturas de queda dos golpes da Sequência 12

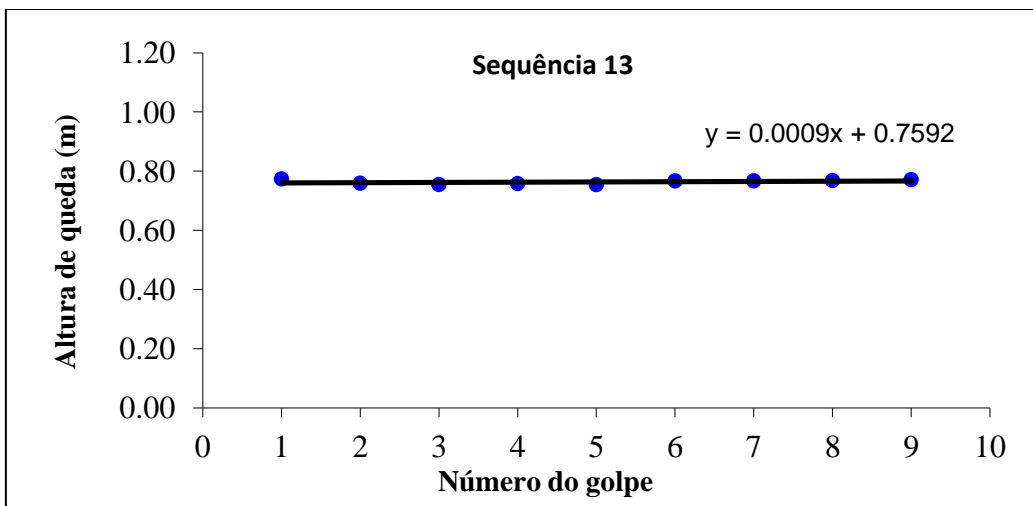


Figura 5.13 – Alturas de queda dos golpes da Sequência 13

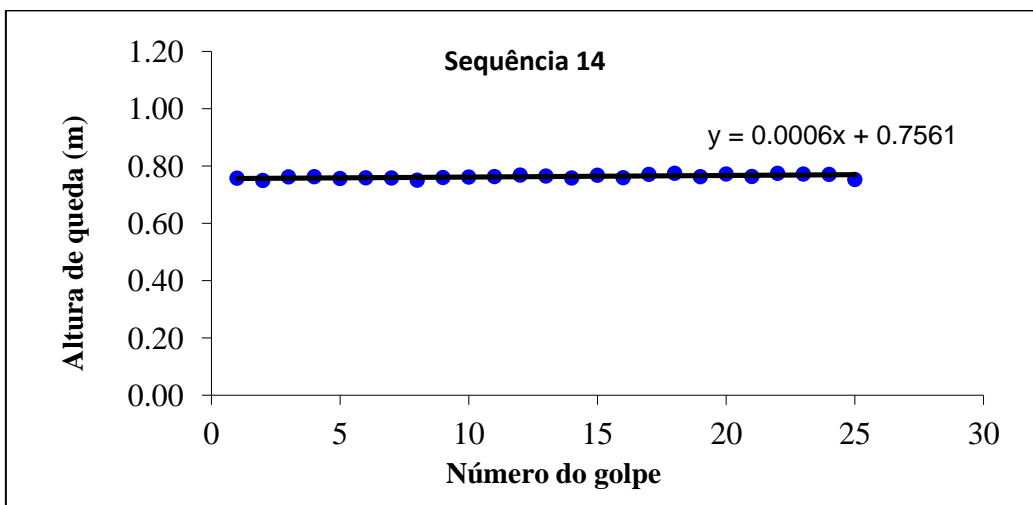


Figura 5.14 – Alturas de queda dos golpes da Sequência 14

Observando os gráficos apresentados, é possível notar, primeiramente que mesmo utilizando um sistema mecanizado, o qual oferece um melhor controle no levantamento, existe uma tendência de se levantar o martelo numa altura de queda superior a 75cm (padrão), comportamento que ratifica resultados de outras pesquisas como as de CAVALCANTE (2002) e SANTANA ET AL (2012). Em quase a totalidade das sequências percebe-se visualmente nos gráficos um aumento da altura de queda ao longo da aplicação dos golpes. Comportamento mostrado pelas equações das linhas de tendência, que apresentam coeficiente angular positivo (na maioria das sequências).

Porém, existe um aspecto curioso referente aos gráficos das sequências 2 e 14. A sequência 2 fornece uma linha de tendência com coeficiente angular negativo, ou seja, a altura de queda tendeu a diminuir ao longo da aplicação dos golpes. Na sequência 14 o coeficiente angular não chega a ser negativo, porém, depois da sequência 2 é a sequência que apresentou o coeficiente angular mais próximo de zero. Este fato pode estar ligado ao número de golpes das sequências. Parece existir uma tendência de que a altura de queda diminua ao fim de sequências que possuem maior número de golpes (aparentemente maior que 20 golpes). A figura 5.15 apresenta as alturas de queda média de cada sequência em função do número de golpes.

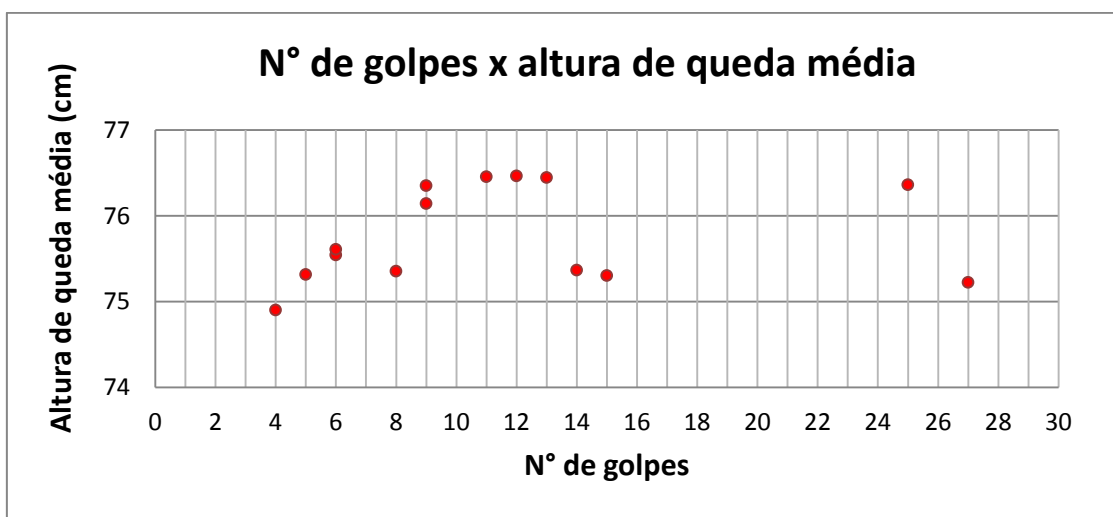


Figura 5.15 – Alturas de queda média versus nº de golpes de cada sequência

Percebe-se que até aproximadamente 13 golpes as alturas de queda média aumentam conforme aumenta o número de golpes da sequência, porém, a partir de 13 golpes em diante a altura de queda média diminui com o aumento do número de golpes.

A figura 5.16 apresenta as alturas de queda máxima de cada sequência em função do número de golpes.

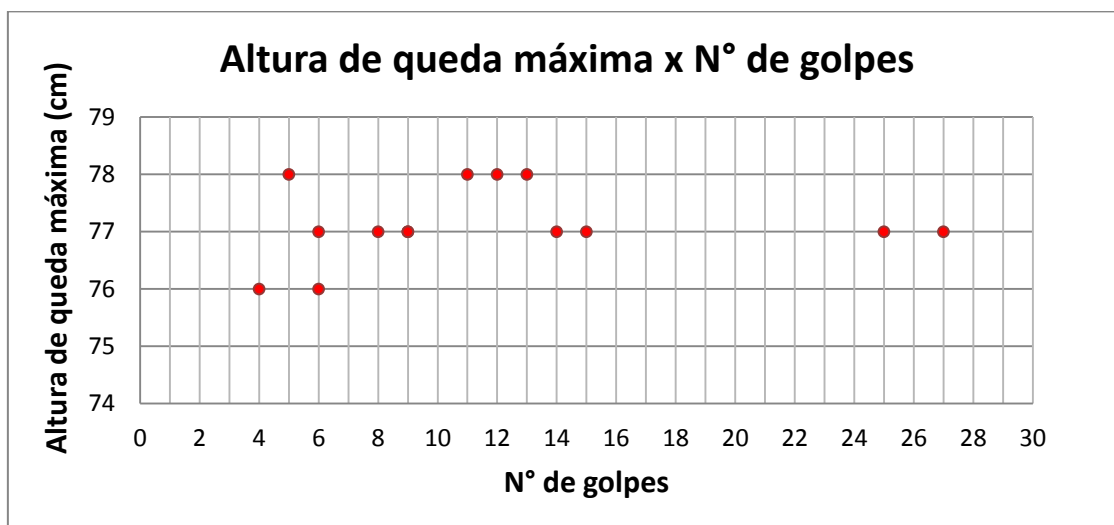


Figura 5.16 – Alturas de queda máxima versus o nº de golpes de cada sequência

Com um comportamento próximo ao da figura 5.15, a figura 5.16 mostra uma tendência de aumento da altura de queda máxima com o aumento do número de golpes, para valores até aproximadamente 13 golpes. A partir de 13 golpes a altura de queda máxima diminuiu, porém tendeu a ficar constante com o aumento do número de golpes.

Outro aspecto analisado é a possível influência da velocidade de ensaio (chamada de frequência e medida em golpes por minuto) na variação da altura de queda. No item 2.2.2.4 da revisão bibliográfica é citado o trabalho de KOVACS (1979), o qual estuda este efeito para um sistema com um martelo de queda livre do tipo BORROS. Ele observou que a altura de queda tende a aumentar à medida que aumenta a frequência dos golpes.

A tabela 5.1 mostra os dados utilizados para o cálculo da frequência média de ensaio para cada sequência de golpes. Os tempos iniciais e finais preenchidos na planilha foram obtidos na análise dos quadros capturados no software “Windows Live Movie Maker” na etapa de manipulação dos dados.

Tabela 5.1 – Cálculo das frequências médias de ensaio

Seq	t inicial (s)	t final (s)	Δt (min)	n° golpes	freq (golpes/min)
1	3,76	75,96	1,20	15	12,5
2	4,26	137,11	2,21	27	12,2
3	4,57	54,83	0,84	5	6,0
4	2,87	60,62	0,96	6	6,2
5	3,31	67,63	1,07	8	7,5
6	3,06	65,30	1,04	13	12,5
7	4,11	91,39	1,45	4	2,7
8	3,91	78,96	1,25	6	4,8
9	4,29	175,21	2,85	12	4,2
10	3,74	46,86	0,72	9	12,5
11	88,07	146,87	0,98	14	14,3
12	3,18	49,38	0,77	11	14,3
13	1,94	35,92	0,57	9	15,9
14	1,48	132,05	2,18	25	11,5

Os valores de frequência dos golpes em função da altura de queda são apresentados na figura 5.17.

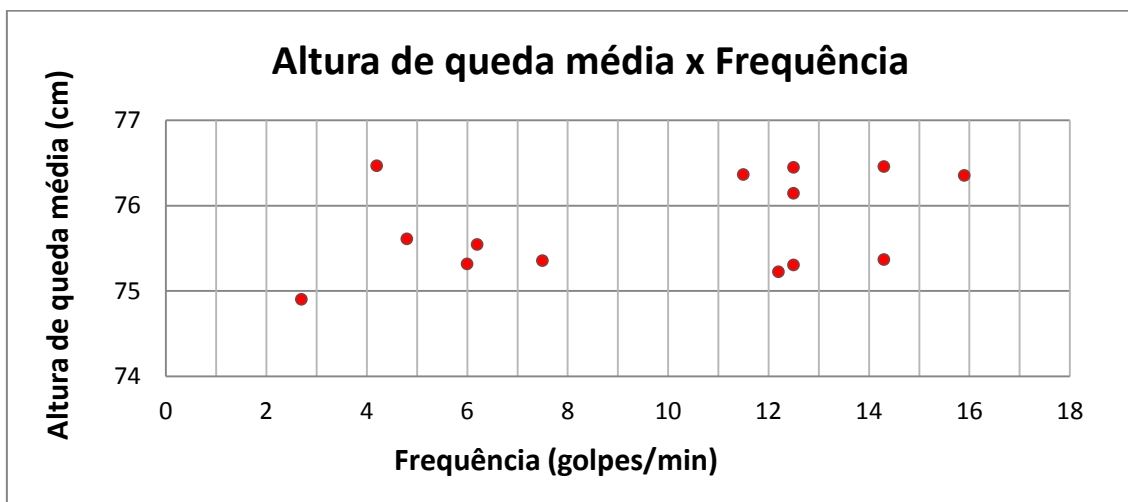


Figura 5.17 – Alturas de queda máxima versus o n° de golpes de cada sequência

Nos pontos plotados na figura 5.17 não há tendência clara de comportamento da frequência em função da altura de queda.

Em solos mais resistentes o número de golpes para cravação do amostrador é maior do que em solos de baixa resistência e como consequência dessa dificuldade no avanço do amostrador o operador teria uma tendência de acelerar o processo, aumentando assim a frequência de aplicação dos golpes. Para testar essa hipótese, foi traçado o gráfico de frequência média dos golpes de cada sequência versus o número de golpes como apresentado na figura 5.18.

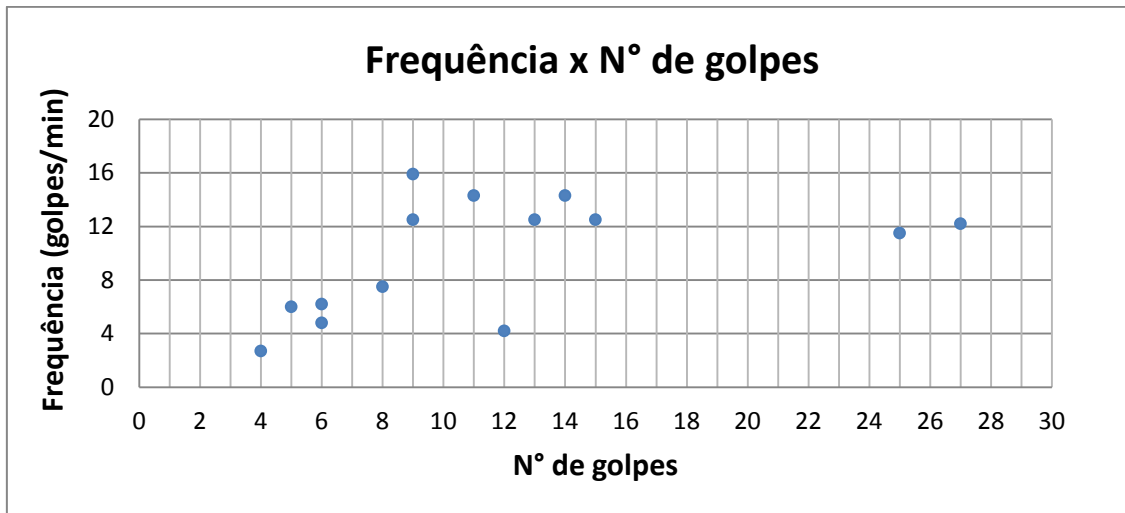


Figura 5.18 – Alturas de queda máxima versus o nº de golpes de cada sequência

Percebe-se que há tendência de aumento da frequência com o aumento do número de golpes para sequências com até N=8 golpes. Após esse valor o comportamento dos pontos plotados não mostra uma tendência muito clara.

Outra observação sobre a frequência de aplicação dos golpes, está associada ao desvio padrão da altura de queda, conforme pode ser visto na figura 5.19.

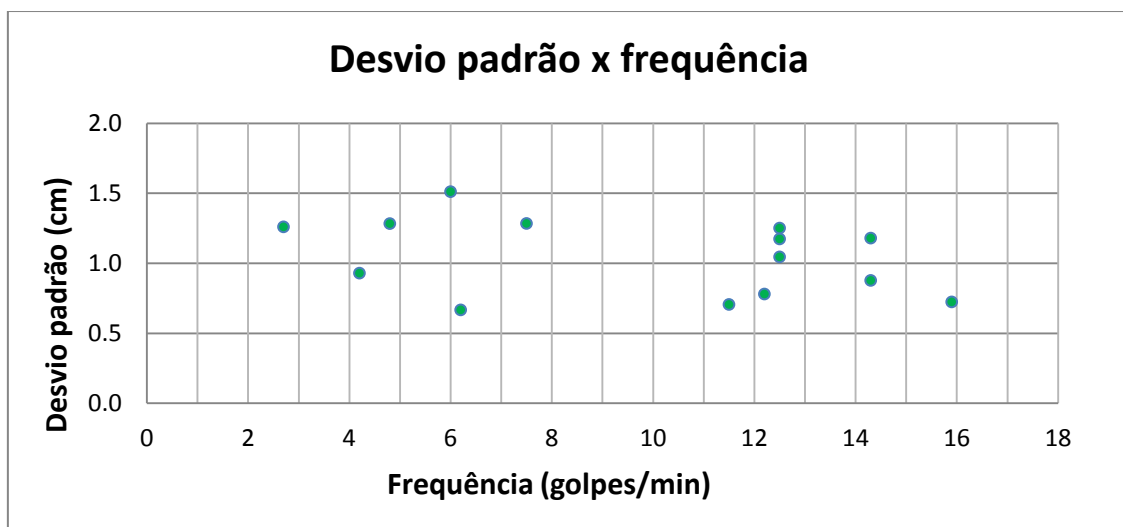


Figura 5.19 – Desvio padrão versus a frequência média de cada sequência

Observando os pontos no gráfico podemos afirmar que o desvio padrão está variando entre valores de 0.5 a 1.5 cm, porém, com comportamento independente da frequência. A constância desses valores pode ser explicada pela utilização do sistema mecanizado. Nesse sistema o controle do levantamento do martelo é melhor, desta forma, mesmo que haja uma tendência de variação na altura de queda, não chega a apresentar valores tão dispersos. O que leva a conclusão de que o tipo de levantamento e soltura do martelo tem maior influência nos valores de desvio padrão do que a frequência de aplicação dos golpes.

O SPT nitidamente é um ensaio no qual o resultado tem grande dependência do operador. Serão abordados agora aspectos que podem interferir no procedimento do ensaio e que estão ligados a questões pessoais do operador, como: fome, cansaço e pressa para o fim da jornada. Para tal serão analisados a variação das alturas de quedas e de frequência ao longo de uma jornada de trabalho para assim tentar identificar algum comportamento padrão.

Para auxílio da análise dividi-se a jornada de trabalho em quatro períodos: início da manhã (começo da jornada), fim da manhã (próximo ao almoço), início da tarde (pós-almoço) e fim da tarde (final da jornada). Será analisado o comportamento dos golpes ao longo do dia, separando os gráficos por dia de campanha.

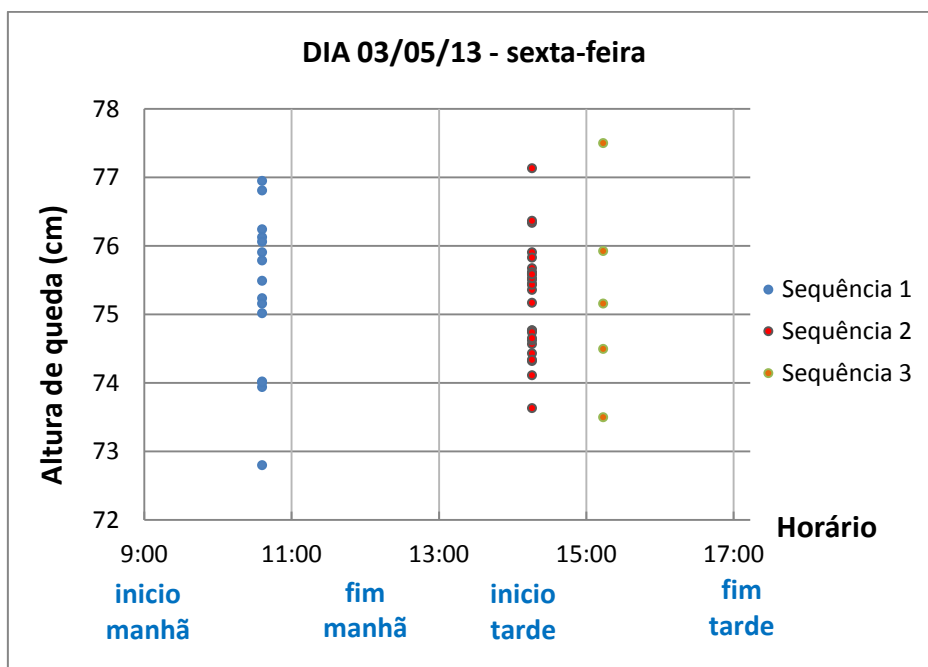


Figura 5.20 – Alturas de queda das sequências 1,2 e 3 ao longo da jornada de trabalho.

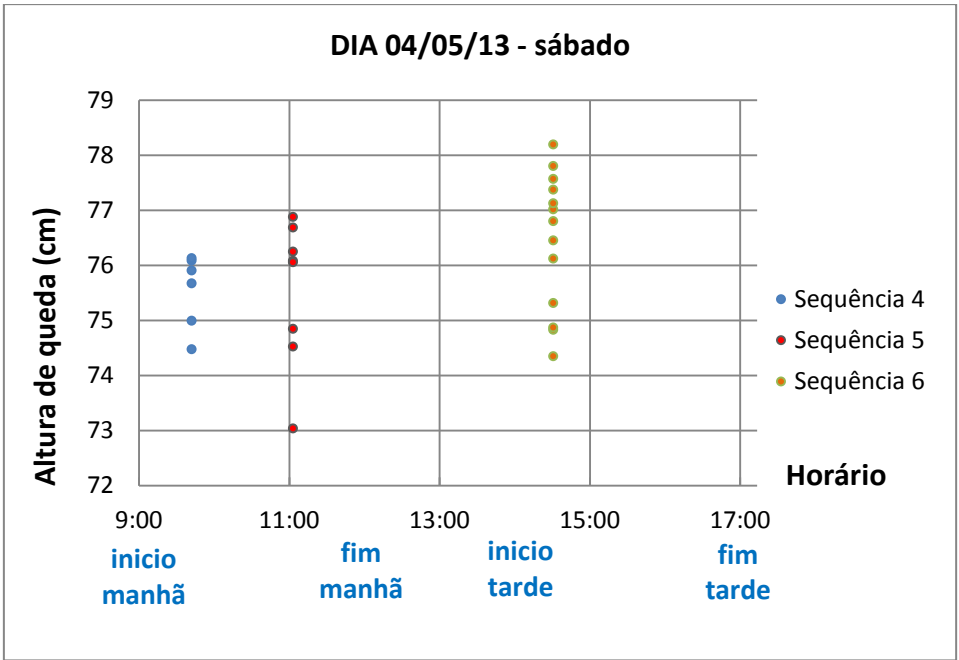


Figura 5.21 – Alturas de queda das sequências 4, 5 e 6 ao longo da jornada de trabalho.

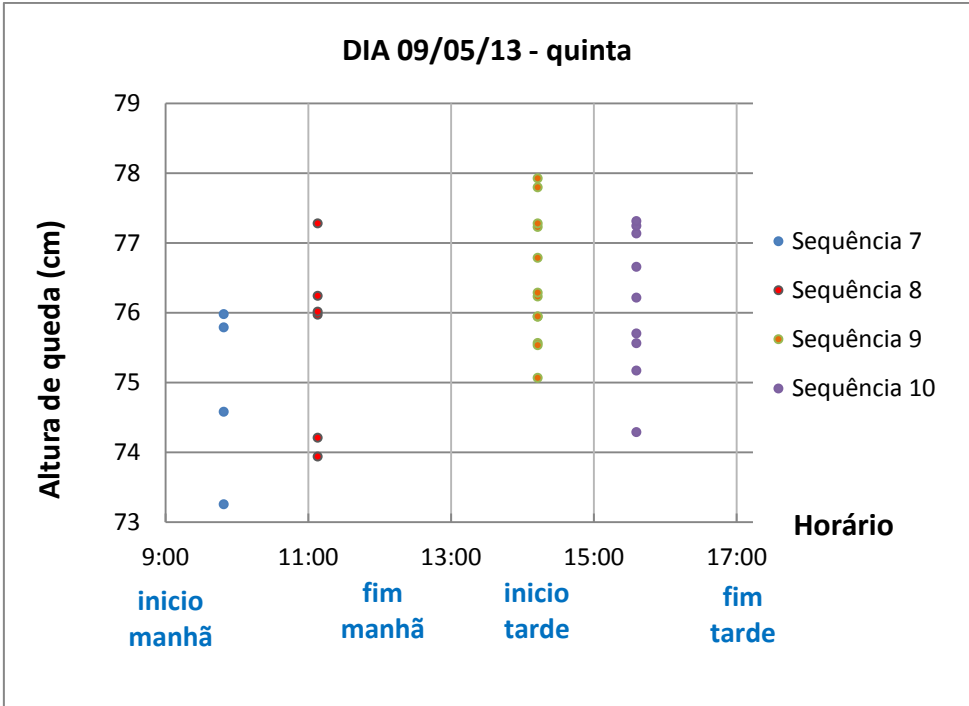


Figura 5.22 – Alturas de queda das sequências 7, 8,9 e 10 ao longo da jornada de trabalho.

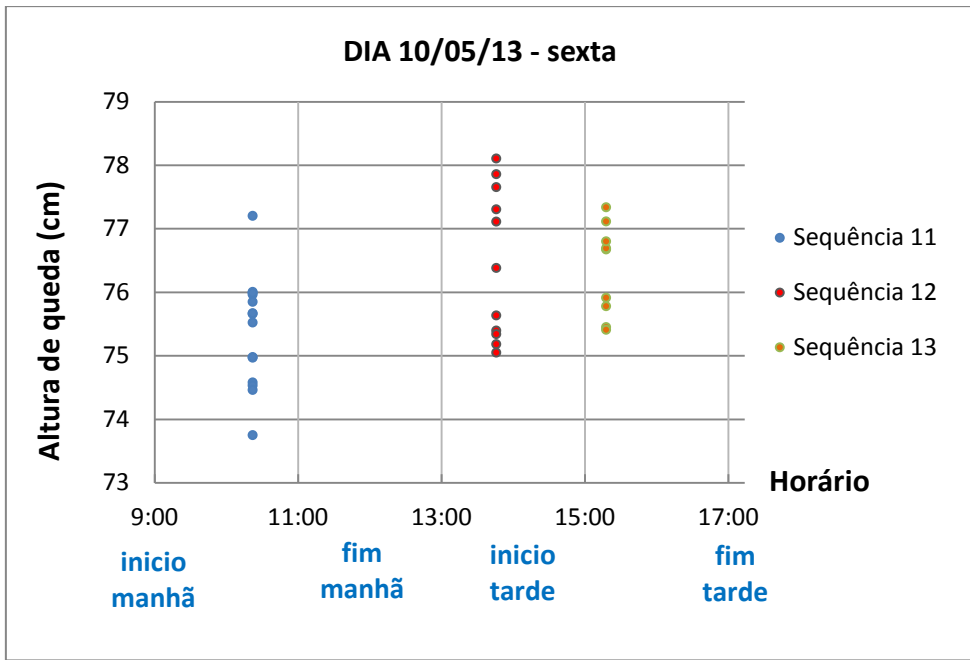


Figura 5.23 – Alturas de queda das sequências 11, 12 e 13 ao longo da jornada de trabalho.

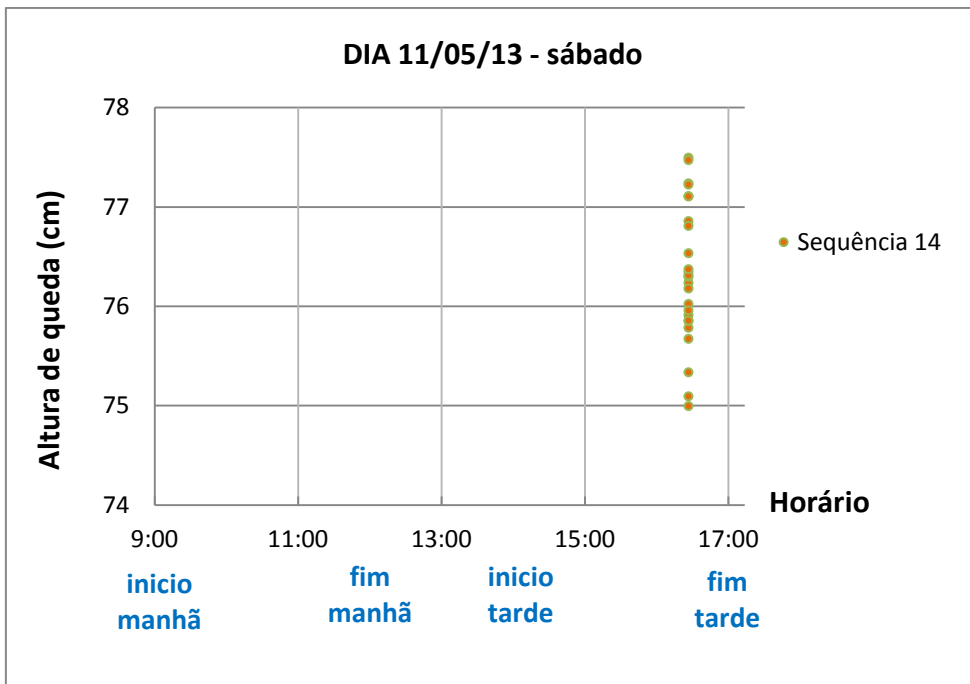


Figura 5.24 – Alturas de queda da sequência 14 ao longo da jornada de trabalho

É possível observar nos gráficos de altura de queda em diferentes horários ao longo da jornada de trabalho que há uma tendência de aumento da altura de queda em função do horário. Porém percebe-se nos gráficos 5.20, 5.22, 5.23, uma tendência de que em sequências ocorridas após as 15:00, os valores de altura de queda diminuam. Isso pode estar relacionado ao cansaço da equipe de operadores tendo em vista que estão próximos ao fim da jornada de trabalho.

Nas figuras 5.22 e 5.23 também é possível fazer outra constatação importante, só que relacionada ao horário de almoço. O horário de almoço da equipe de sondagem ocorria as 11h30min, e se observarmos as sequências 5 e 8 as quais ocorrem após as 11:00min existe uma dispersão maior entre os pontos de altura de queda. Essa dispersão pode estar relacionada à distração do operador ao perceber que está próximo do horário de almoço (fome, por exemplo).

Com os dados trabalhados foi possível observar diversos aspectos em relação à variação da altura de queda ao longo do ensaio. Lembrando que esses resultados são pertinentes ao ensaio de SPT realizado com levantamento do martelo com sistema mecanizado com duas voltas no tambor. Sistema esse não previsto pela NBR-8464/2001, mas que parece apresentar algumas vantagens, como por exemplo, maior controle no processo de levantamento do martelo.

5.2 Análise das energias, velocidade de impacto e o fator de eficiência e_1^*

Interpretadas algumas questões com relação ao processo de levantamento do martelo, no item anterior, pode-se neste item analisar a questão da energia e o fator de eficiência e_1 . A seguir serão apresentadas tabelas com os valores de energia potencial e cinética para todos os golpes de cada sequência bem como os valores de e_1 e e_1^* , calculados com base na metodologia apresentada no item 4.2.

Tabela 5.2 – Valores de altura de queda, velocidade de impacto e de energias potencial e cinética, obtidos a partir da campanha em Itaguaí. (Sequência 1)

Seq	Golpe	h. queda (m)	Ep (J)	Vel. imp (m/s)	Ec (J)	e ₁	e ₁ *
1	1	0.73	464	3.07	306	0.64	0.66
	2	0.74	471	3.43	382	0.80	0.81
	3	0.74	472	3.28	349	0.73	0.74
	4	0.74	472	3.25	343	0.72	0.73
	5	0.76	484	3.41	378	0.79	0.78
	6	0.76	483	3.51	400	0.84	0.83
	7	0.75	478	3.30	353	0.74	0.74
	8	0.75	480	3.43	383	0.80	0.80
	9	0.75	481	3.49	396	0.83	0.82
	10	0.77	491	3.11	315	0.66	0.64
	11	0.75	479	3.56	412	0.86	0.86
	12	0.76	486	3.14	320	0.67	0.66
	13	0.76	485	3.08	308	0.64	0.63
	14	0.77	490	3.55	409	0.85	0.83
	15	0.76	485	3.44	385	0.81	0.79
	Média	0.75	480.18	3.34	362.63	0.76	0.76
	Desvio	0.012	7.49	0.17	37.49	0.08	0.08

Tabela 5.3 – Valores de altura de queda, velocidade de impacto e de energias potencial e cinética, obtidos a partir da campanha em Itaguaí. (Sequência 2)

Seq	Golpe	h. queda (m)	Ep (J)	Vel. imp (m/s)	Ec (J)	e ₁	e ₁ *
2	1	0.74	475	3.17	327	0.68	0.69
	2	0.75	481	3.06	305	0.64	0.63
	3	0.75	477	3.31	356	0.74	0.75
	4	0.76	487	3.29	351	0.73	0.72
	5	0.75	475	3.11	314	0.66	0.66
	6	0.75	477	3.19	331	0.69	0.69
	7	0.74	474	3.50	399	0.83	0.84
	8	0.76	483	3.33	360	0.75	0.75
	9	0.76	482	3.20	332	0.69	0.69
	10	0.76	481	3.07	307	0.64	0.64
	11	0.75	481	3.36	366	0.77	0.76
	12	0.76	484	3.27	347	0.73	0.72
	13	0.75	481	3.49	397	0.83	0.82
	14	0.76	482	3.25	342	0.72	0.71
	15	0.76	487	3.57	414	0.87	0.85
	16	0.76	482	3.13	319	0.67	0.66
	17	0.77	492	3.39	373	0.78	0.76
	18	0.75	476	3.28	350	0.73	0.74
	19	0.76	482	3.25	343	0.72	0.71
	20	0.76	484	3.11	314	0.66	0.65
	21	0.74	473	3.34	363	0.76	0.77
	22	0.75	477	3.18	329	0.69	0.69
	23	0.74	470	3.33	360	0.75	0.77

	24	0.75	476	-	-	-	-
	25	0.74	474	3.25	344	0.72	0.73
	26	0.76	482	3.23	338	0.71	0.70
	27	0.75	479	3.42	379	0.79	0.79
	Média	0.75	479.67	3.27	348.47	0.73	0.73
	Desvio	0.0078	4.98	0.13	28.28	0.06	0.06

Tabela 5.4 – Valores de altura de queda, velocidade de impacto e de energias potencial e cinética, obtidos a partir da campanha em Itaguaí. (Sequência 3)

Seq	Golpe	h. queda (m)	Ep (J)	Vel. imp (m/s)	Ec (J)	e ₁	e ₁ *
3	1	0.74	469	3.47	392	0.82	0.84
	2	0.75	479	3.38	372	0.78	0.78
	3	0.74	475	3.29	352	0.74	0.74
	4	0.78	494	3.28	349	0.73	0.71
	5	0.76	484	3.23	339	0.71	0.70
	Média	0.75	480.26	3.33	360.79	0.75	0.75
	Desvio	0.02	9.64	0.10	21.25	0.04	0.06

Tabela 5.5 – Valores de altura de queda, velocidade de impacto e de energias potencial e cinética, obtidos a partir da campanha em Itaguaí. (Sequência 4)

Seq	Golpe	h. queda (m)	Ep (J)	Vel. imp (m/s)	Ec (J)	e ₁	e ₁ *
4	1	0.74	475	3.29	353	0.74	0.74
	2	0.76	483	3.50	397	0.83	0.82
	3	0.75	478	3.27	348	0.73	0.73
	4	0.76	485	3.34	362	0.76	0.75
	5	0.76	484	3.48	394	0.82	0.81
	6	0.76	485	3.27	347	0.72	0.71
	Média	0.76	481.71	3.36	366.73	0.77	0.76
Desvio	0.01	4.26	0.11	23.17	0.05	0.05	

Tabela 5.6 – Valores de altura de queda, velocidade de impacto e de energias potencial e cinética, obtidos a partir da campanha em Itaguaí. (Sequência 5)

Seq	Golpe	h. queda (m)	Ep (J)	Vel. imp (m/s)	Ec (J)	e ₁	e ₁ *
5	1	0.73	466	3.37	369	0.77	0.79
	2	0.75	475	3.44	385	0.81	0.81
	3	0.75	477	3.44	384	0.80	0.80
	4	0.76	485	3.43	382	0.80	0.79
	5	0.76	485	3.42	379	0.79	0.78
	6	0.77	489	3.40	376	0.79	0.77
	7	0.76	486	3.46	390	0.82	0.80
	8	0.77	490	3.43	383	0.80	0.78

	Média	0.75	480.50	3.42	380.72	0.80	0.79
	Desvio	0.013	8.19	0.03	6.83	0.01	0.01

Tabela 5.7 – Valores de altura de queda, velocidade de impacto e de energias potencial e cinética, obtidos a partir da campanha em Itaguaí. (Sequência 6)

Seq	Golpe	h. queda (m)	Ep (J)	Vel. imp (m/s)	Ec (J)	e ₁	e ₁ *
6	1	0.75	477	3.34	362	0.76	0.76
	2	0.76	485	3.56	412	0.86	0.85
	3	0.75	480	3.35	364	0.76	0.76
	4	0.74	474	3.23	339	0.71	0.72
	5	0.75	477	3.45	386	0.81	0.81
	6	0.76	488	3.64	431	0.90	0.88
	7	0.77	491	3.43	382	0.80	0.78
	8	0.77	492	3.41	378	0.79	0.77
	9	0.77	490	3.45	386	0.81	0.79
	10	0.78	499	3.34	362	0.76	0.73
	11	0.78	496	3.36	368	0.77	0.74
	12	0.78	495	3.59	420	0.88	0.85
	13	0.77	493	3.47	390	0.82	0.79
	Média	0.76	487.47	3.43	383.12	0.80	0.79
	Desvio	0.013	7.98	0.11	25.74	0.05	0.05

Tabela 5.8 – Valores de altura de queda, velocidade de impacto e de energias potencial e cinética, obtidos a partir da campanha em Itaguaí. (Sequência 7)

Seq	Golpe	h. queda (m)	Ep (J)	Vel. imp (m/s)	Ec (J)	e ₁	e ₁ *	
7	1	0.73	467	3.31	356	0.74	0.76	
	2	0.75	476	3.44	384	0.80	0.81	
	3	0.76	483	3.44	385	0.80	0.80	
	4	0.76	484	3.50	398	0.83	0.82	
		Média	0.75	477.61	3.42	380.79	0.80	0.80
	Desvio	0.013	8.04	0.08	17.75	0.04	0.03	

Tabela 5.9 – Valores de altura de queda, velocidade de impacto e de energias potencial e cinética, obtidos a partir da campanha em Itaguaí. (Sequência 8)

Seq	Golpe	h. queda (m)	Ep (J)	Vel. imp (m/s)	Ec (J)	e ₁	e ₁ *
8	1	0.74	471	3.48	395	0.83	0.84
	2	0.74	473	3.53	406	0.85	0.86
	3	0.76	484	3.60	421	0.88	0.87
	4	0.76	485	3.60	421	0.88	0.87
	5	0.76	486	3.63	429	0.90	0.88
	6	0.77	493	3.38	371	0.78	0.75

	Média	0.76	482.13	3.54	406.87	0.85	0.84
	Desvio	0.013	8.19	0.09	21.53	0.05	0.05

Tabela 5.10 – Valores de altura de queda, velocidade de impacto e de energias potencial e cinética, obtidos a partir da campanha em Itaguaí. (Sequência 9)

Seq	Golpe	h. queda (m)	Ep (J)	Vel. imp (m/s)	Ec (J)	e ₁	e ₁ *
9	1	0.75	479	3.66	435	0.91	0.91
	2	0.76	484	3.58	417	0.87	0.86
	3	0.76	482	3.68	439	0.92	0.91
	4	0.76	482	3.65	434	0.91	0.90
	5	0.76	484	3.57	415	0.87	0.86
	6	0.76	486	3.65	433	0.91	0.89
	7	0.76	486	3.66	436	0.91	0.90
	8	0.77	492	3.64	432	0.90	0.88
	9	0.77	490	3.72	449	0.94	0.92
	10	0.78	496	3.49	396	0.83	0.80
	11	0.77	493	3.51	401	0.84	0.81
	12	0.78	497	3.61	424	0.89	0.85
	Média	0.76	487.59	3.62	425.90	0.89	0.87
	Desvio	0.009	5.93	0.07	15.89	0.03	0.04

Tabela 5.11 – Valores de altura de queda, velocidade de impacto e de energias potencial e cinética, obtidos a partir da campanha em Itaguaí. (Sequência 10)

Seq	Golpe	h. queda (m)	Ep (J)	Vel. imp (m/s)	Ec (J)	e ₁	e ₁ *	
10	1	0.75	479	3.69	444	0.93	0.93	
	2	0.76	483	3.41	378	0.79	0.78	
	3	0.76	486	3.29	353	0.74	0.73	
	4	0.76	482	3.27	347	0.72	0.72	
	5	0.77	492	3.49	395	0.83	0.80	
	6	0.74	474	3.36	367	0.77	0.77	
	7	0.77	493	3.31	357	0.75	0.72	
	8	0.77	489	3.45	387	0.81	0.79	
	9	0.77	493	3.26	346	0.72	0.70	
		Média	0.76	485.54	3.39	374.63	0.78	0.77
	Desvio	0.010	6.67	0.14	31.27	0.07	0.07	

Tabela 5.12 – Valores de altura de queda, velocidade de impacto e de energias potencial e cinética, obtidos a partir da campanha em Itaguaí. (Sequência 11)

Seq	Golpe	h. queda (m)	Ep (J)	Vel. imp (m/s)	Ec (J)	e ₁	e ₁ *
11	1	0.74	470	3.55	409	0.86	0.87
	2	0.76	482	3.32	359	0.75	0.74

3	0.75	478	3.27	348	0.73	0.73
4	0.76	484	3.36	366	0.77	0.76
5	0.75	476	3.30	355	0.74	0.75
6	0.75	475	3.52	403	0.84	0.85
7	0.75	478	3.36	367	0.77	0.77
8	0.74	475	3.34	363	0.76	0.77
9	0.76	483	3.45	386	0.81	0.80
10	0.76	482	3.26	346	0.72	0.72
11	0.76	484	3.25	343	0.72	0.71
12	0.76	485	3.41	378	0.79	0.78
13	0.77	492	3.37	369	0.77	0.75
14	0.76	485	3.44	384	0.80	0.79
Média	0.75	480.58	3.37	369.80	0.77	0.77
Desvio	0.01	5.60	0.09	20.23	0.04	0.05

Tabela 5.13 – Valores de altura de queda, velocidade de impacto e de energias potencial e cinética, obtidos a partir da campanha em Itaguaí. (Sequência 12)

Seq	Golpe	h. queda (m)	Ep (J)	Vel. imp (m/s)	Ec (J)	e ₁	e ₁ *
12	1	0.75	479	3.58	416	0.87	0.87
	2	0.75	481	3.54	407	0.85	0.85
	3	0.75	479	3.54	408	0.85	0.85
	4	0.75	480	3.50	399	0.83	0.83
	5	0.76	482	3.48	394	0.82	0.82
	6	0.76	487	3.54	408	0.85	0.84
	7	0.77	493	3.74	455	0.95	0.92
	8	0.78	495	3.50	397	0.83	0.80
	9	0.78	496	3.58	416	0.87	0.84
	10	0.78	498	3.59	420	0.88	0.84
	11	0.77	492	3.53	405	0.85	0.82
Média	0.76	487.53	3.56	411.40	0.86	0.84	
Desvio	0.01	7.52	0.07	16.57	0.03	0.03	

Tabela 5.14 – Valores de altura de queda, velocidade de impacto e de energias potencial e cinética, obtidos a partir da campanha em Itaguaí. (Sequência 13)

Seq	Golpe	h. queda (m)	Ep (J)	Vel. imp (m/s)	Ec (J)	e ₁	e ₁ *
13	1	0.77	493	3.48	393	0.82	0.80
	2	0.76	484	3.53	404	0.85	0.84
	3	0.75	481	3.53	406	0.85	0.84
	4	0.76	483	3.58	417	0.87	0.86
	5	0.75	481	3.55	410	0.86	0.85
	6	0.77	489	3.58	416	0.87	0.85
	7	0.77	489	3.50	399	0.83	0.81
	8	0.77	490	3.41	379	0.79	0.77
	9	0.77	492	3.51	401	0.84	0.82

	Média	0.76	486.87	3.52	402.69	0.84	0.83
	Desvio	0.01	4.62	0.05	11.70	0.02	0.03

Tabela 5.15 – Valores de altura de queda, velocidade de impacto e de energias potencial e cinética, obtidos a partir da campanha em Itaguaí. (Sequência 14)

Seq	Golpe	h. queda (m)	Ep (J)	Vel. imp (m/s)	Ec (J)	e ₁	e ₁ *
14	1	0.76	483	3.69	442	0.92	0.91
	2	0.75	478	3.43	382	0.80	0.80
	3	0.76	486	3.41	377	0.79	0.78
	4	0.76	487	3.35	364	0.76	0.75
	5	0.76	483	3.39	374	0.78	0.78
	6	0.76	484	3.42	380	0.79	0.78
	7	0.76	484	3.49	397	0.83	0.82
	8	0.75	479	3.31	357	0.75	0.74
	9	0.76	485	3.25	343	0.72	0.71
	10	0.76	486	3.42	379	0.79	0.78
	11	0.76	487	3.27	347	0.73	0.71
	12	0.77	490	3.39	372	0.78	0.76
	13	0.77	488	3.22	337	0.70	0.69
	14	0.76	484	3.44	384	0.80	0.79
	15	0.77	490	3.26	345	0.72	0.70
	16	0.76	484	3.56	412	0.86	0.85
	17	0.77	492	3.38	372	0.78	0.76
	18	0.77	494	3.29	353	0.74	0.71
	19	0.76	487	3.53	404	0.84	0.83
	20	0.77	493	3.48	395	0.83	0.80
	21	0.76	487	3.52	403	0.84	0.83
	22	0.77	494	3.38	371	0.78	0.75
	23	0.77	492	3.36	366	0.77	0.74
	24	0.77	492	3.47	392	0.82	0.80
	25	0.75	480	3.67	439	0.92	0.91
	Média	0.76	486.94	3.40	377.00	0.79	0.77
	Desvio	0.01	4.40	0.11	24.55	0.05	0.05

Esses resultados são uma grande contribuição para aumento do banco de dados do ensaio SPT. Para ter uma melhor visualização desses resultados será apresentada abaixo uma tabela resumo com a média dos valores em cada sequência e assim poder realizar algumas interpretações.

Tabela 5.16 – Valores de altura de queda, velocidade de impacto e de energias potencial e cinética, obtidos a partir da campanha em Itaguaí. (Média de cada sequência)

Sequência	h. queda (m)	Ep (J)	Vel. imp (m/s)	Ec (J)	e ₁	e ₁ *	e ₁ /e ₁ *
1	0.75	480.18	3.34	362.63	0.76	0.76	1.00
2	0.75	479.67	3.27	348.47	0.73	0.73	1.00
3	0.75	480.26	3.33	360.79	0.75	0.75	1.00
4	0.76	481.71	3.36	366.73	0.77	0.76	0.99
5	0.75	480.50	3.42	380.72	0.80	0.79	1.00
6	0.76	487.47	3.43	383.12	0.80	0.79	0.98
7	0.75	477.61	3.42	380.79	0.80	0.80	1.00
8	0.76	482.13	3.54	406.87	0.85	0.84	0.99
9	0.76	487.59	3.62	425.90	0.89	0.87	0.98
10	0.76	485.54	3.39	374.63	0.78	0.77	0.99
11	0.75	480.58	3.37	369.80	0.77	0.77	1.00
12	0.76	487.53	3.56	411.40	0.86	0.84	0.98
13	0.76	486.87	3.52	402.69	0.84	0.83	0.98
14	0.76	486.94	3.40	377.00	0.79	0.77	0.98

Observa-se é que as alturas de queda média nas sequências ficaram entre 75 e 76 cm, logo a energia potencial real do martelo antes de começar seu processo de queda é próxima da energia potencial teórica (478J), assim, para esse sistema, os valores de e₁ e e₁* ficaram muito próximos. A última coluna da tabela 5.16 apresenta valores referentes à razão entre e₁ e e₁*, mostrando uma diferença entre eles de 1 a 2% apenas.

Para uma altura de queda próxima a padrão (75 cm) a velocidade de impacto deveria apresentar valores no entorno de 3.84 m/s, caso não houvesse perdas de energia. Porém vimos no item 2.2.2.5 da revisão bibliográfica, que durante o processo existem perdas de energia por atrito (roldana, estado de conservação da corda, entre outros), ocorrendo assim, redução da velocidade de impacto. Segue adiante a tabela 5.17 com os valores em porcentagem da perda de velocidade em relação à velocidade de impacto teórica (3.84 m/s) e as perdas em relação à velocidade de impacto considerando uma altura real de queda de cada golpe ($v = \sqrt{2gh}$).

Tabela 5.17 – Valores de altura de queda, velocidade de impacto e de energias potencial e cinética, obtidos a partir da campanha em Itaguaí. (Média de cada sequência)

Golpe	h. queda (m)	Vel. imp (m/s)	perdas (3.84m/s)	perdas ($\sqrt{2gh}$)
1	0,75	3,34	13,1%	13,2%
2	0,75	3,27	14,8%	14,8%
3	0,75	3,33	13,3%	13,4%
4	0,76	3,36	12,6%	12,8%
5	0,75	3,42	10,9%	11,0%
6	0,76	3,43	10,6%	11,4%
7	0,75	3,42	10,9%	10,7%
8	0,76	3,54	7,9%	8,2%
9	0,76	3,62	5,7%	6,6%
10	0,76	3,39	11,6%	12,2%
11	0,75	3,37	12,2%	12,3%
12	0,76	3,56	7,4%	8,2%
13	0,76	3,52	8,3%	9,1%
14	0,76	3,40	11,4%	12,1%

As perdas de velocidade em relação à velocidade de impacto teórica são praticamente as mesmas das perdas calculadas considerando a altura de queda real ($\sqrt{2gh}$). Quando diferentes, o valor em percentagem da diferença é de no máximo 1%, explicada pelo fato das alturas médias das sequências terem valor próximo a da altura de queda padrão.

A ordem de grandeza dos valores de perda de velocidade encontrada nesta campanha se mostra razoável, sendo 14.8% o maior valor de perda de velocidade (Sequência 2). Esses valores são próximos aos encontrados por CAVALCANTE (2002), apesar de que a comparação não pode ser feita a fundo, pela diferença no sistema de levantamento do martelo entre as duas campanhas. Em seu trabalho CAVALCANTE (2002), foram realizadas três séries de sondagens com monitoramento de altura de queda e velocidade de impacto, sendo o levantamento do martelo realizado pelo sistema manual sem tambor. Nesta ocasião CAVALCANTE (2002) encontra para sua primeira série, valores da ordem de 14,3% em relação à velocidade teórica e 15,9% considerando a altura de queda média real. Para a segunda série, apresenta valores da ordem de 8,8% e 10,5% respectivamente. E por fim, em sua terceira série são encontrados valores de perdas de velocidade de 9% e 11,4%.

Neste trabalho apesar de serem apresentados resultados para o fator de eficiência e_1 , será dado maior enfoque ao e_1^* por entender que o fator e_1 não representa de fato a eficiência desta parte do ensaio, de vez que a energia cinética é dividida pela energia potencial teórica, não sendo utilizado o valor real de altura de

queda (e a energia potencial correspondente) empregada no ensaio. A figura 5.25 apresenta o registro dos valores de eficiência para todos os golpes de cada sequência.

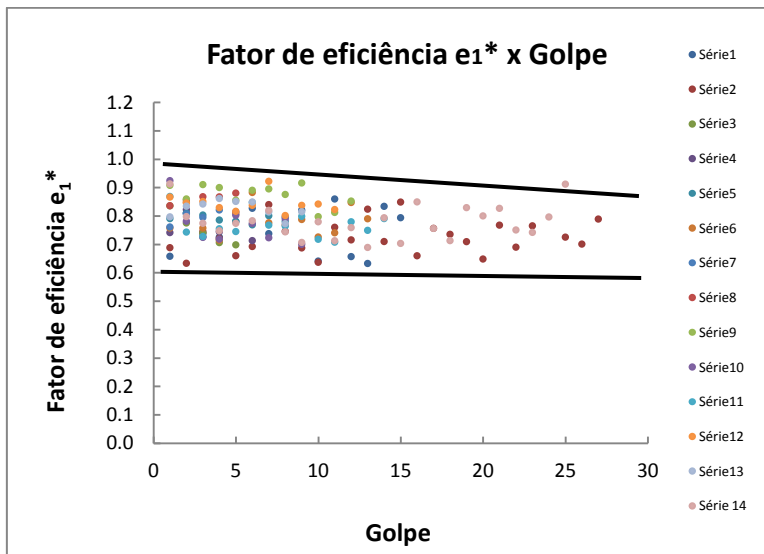


Figura 5.25 – Fator de eficiência e_1^* relativo aos golpes de todas as sequências

Nota-se que os valores de eficiência e_1^* encontram-se numa faixa de valores entre 0,6 a 1,0, porém a maior quantidade de pontos parece se concentrar entre os valores 0,7 e 0,9. A figura 5.26 apresenta os valores da média de e_1^* para cada sequência.

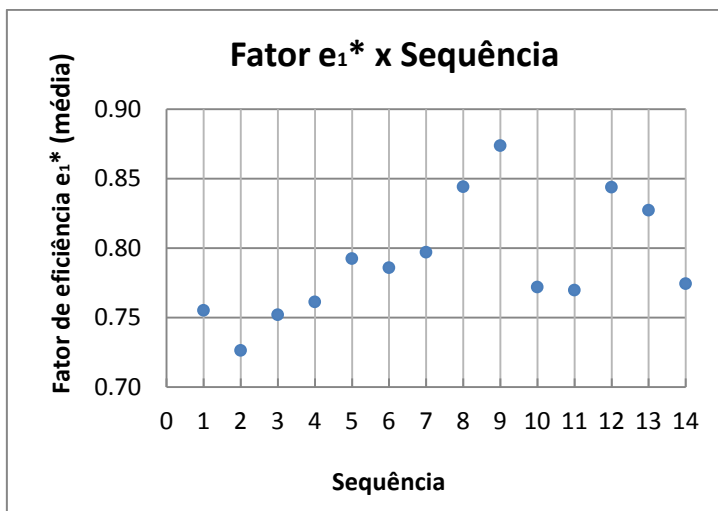


Figura 5.25 – Média do fator de eficiência e_1^* de cada sequência.

Na figura 5.26, os valores da média do fator de eficiência $e1^*$ estão entre 0,7 e 0,9, mostrando que de fato, para a maioria dos golpes, os valores de eficiência estão então dentro desta faixa.

6 Conclusões e sugestões para futuras pesquisas

6.1 Conclusões

As conclusões mais importantes deste trabalho são apresentadas a seguir:

- 1) É comum que haja por parte de equipes de sondagem, a utilização de procedimentos não prescritos pela norma que inclusive podem interferir nos resultados. Nessa campanha, foram detectados erros na contagem de golpes e a remarcação dos trechos utilizados para definir os 3 intervalos de penetração, quando da penetração maior que 150mm, o que implicou em alguns casos no avanço de mais de 450mm do amostrador.
- 2) O sistema para monitoramento com câmera de alta velocidade e mira topográfica se mostrou suficiente para obtenção de alturas de queda com erros insignificantes à análise.
- 3) Existe uma tendência natural de que ao longo de uma sequência ocorra aumento das alturas de queda concomitante a aplicação dos golpes.
- 4) Há também uma tendência que a alturas de queda aumentem ao longo de uma jornada de trabalho. Ou seja, a altura média das sequências vai aumentando ao longo do dia.
- 5) Em horários especiais, como por exemplo, próximo ao almoço a atenção do operador é afetada e ocorre maior dispersão nos valores de altura de queda durante aplicação dos golpes.
- 6) O sistema mecanizado de levantamento e soltura do martelo, com duas voltas da corda em torno do tambor, apesar de não ser previsto pela NBR-8464/2001, apresenta vantagem com relação ao controle do levantamento do martelo, que por consequência fornece valores pequenos de desvio-padrão entre os golpes possibilitando o levantamento do martelo com altura de queda muito próxima à padrão (75cm).

- 7) O número de golpes de uma sequência pode influenciar na frequência de realização do ensaio. Houve uma tendência de que quanto maior o número de golpes de uma sequência, maior é a frequência do ensaio para sequências com até 8 golpes.
- 8) A campanha apresentou uma frequência média de ensaio de aproximadamente 10 golpes/min e um valor máximo de 16 golpes/min de frequência.
- 9) Como os valores de altura de queda foram muito próximos a padrão, os valores de perda energia com relação a velocidade teórica (3,84 m/s) e a real ($\sqrt{2gh}$) tiveram diferença de no máximo 1%. Para o sistema utilizado encontramos um valor de perda de velocidade máximo durante a queda do martelo da ordem de 14,8%.
- 10) Os valores do fator de eficiência e_1^* se encaixam faixa com valores que variam de 0,7 a 0,9. Lembrando que o sistema utilizado foi o sistema de levantamento mecânico corda-guincho (corda nova) com tambor de rotação (2 voltas)

6.2 Sugestões para futuras pesquisas

- 1) Realização de novas campanhas de ensaios com utilização de cordas em diferentes estados de conservação, para avaliar as diferenças no fator de eficiência e_1 .
- 2) Medição do ângulo de excentricidade do martelo em relação à vertical para analisar as perdas de energia por atrito do pino-guia com a composição de hastes e tentar encontrar alguma correlação da perda de energia em função da excentricidade.

Referências Bibliográficas

BELINCANTA, A. (1998) “Avaliação de Fatores Intervenientes no Índice de Resistência à Penetração do SPT”, Tese de Doutorado, EESC/USP.

BELINCANTA, A. E 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.

BROMS, B. B. E FLODIM, N. (1988) “History of Soil Penetration Testing”, Penetration Testing – ISOPT-1, J. De Ruiter Ed., pp. 178-186, Orlando.

CAMPANELLA, R. G. E SY, A. (1994) “Recent Developments in Energy Calibration of Penetration Tests at UBC”, XII ICSMFE, vol. pp. 151-156, New Delhi.

CAVALCANTE, E.H. (2002) “Investigação Teórico - Experimental Sobre o SPT”, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ. 77

CAVALCANTE, E. H., DANZIGER, F.A.B. E DANZIGER, B.R. (2006) “O SPT e Alguns Desvios da Norma Praticados no Brasil”. XIII COBRAMSEG, vol. 2, pp. 583-588, Curitiba.

DANZIGER, F. A. B., DANZIGER, B. R. E CAVALCANTE, E. H. (2006) “Discussion of Review of Standard Penetration Test Short Rod Corrections by Chris R. Daniel, John A. Howie, R. Scott Jackson, and Brian Walker”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, vol. 132, No. 12, p. 1634-1637.

DANZIGER, F. A. B., DANZIGER, B. R. E 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.

DÉCOURT, L. (1989) “The Standard Penetration Test – State-of-the-art Report”, XII ICSMFE, Rio de Janeiro, Vol. 4, pp. 2405-2416.

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.

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. E VARGAS, M. (1970), “The Dynamic Penetration Test: A Standard that is not Standardized”, *Géotechnique*, vol. 20, n. 2, pp. 185-92.

KOVACS, W. D. (1979) “Velocity Measurement of Free-Fall SPT Hammer”, *Journal of Geotechnical Engineering Division – ASCE – vol.105, n. GT1*, pp. 1-10.

NBR 6484 (2001) – Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT. Método de ensaio, ABNT.

ODEBRECHT, E. (2003) “Medidas de Energia no Ensaio SPT”, Tese de Doutorado, UFRGS.