

Universidade Federal do Rio de Janeiro

MEDIÇÃO DE ALTURA DE QUEDA E VELOCIDADE DE IMPACTO DO
MARTELO NO SPT

Edimar dos Santos da Silva

Julho de 2015



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

MEDIÇÃO DE ALTURA DE QUEDA E VELOCIDADE DE IMPACTO DO MARTELO NO SPT

Edimar dos Santos da Silva

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.

Orientador: Christian Matos de Santana

Co-orientador: Fernando Artur Brasil Danziger

Rio de Janeiro

Julho de 2015

MEDIÇÃO DE ALTURA DE QUEDA E VELOCIDADE DE IMPACTO DO
MARTELO EM ENSAIOS SPT

Edimar dos Santos da Silva

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 PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Aprovada por:

Prof. Christian Matos de Santana, D.Sc.

Prof. Fernando Artur Brasil Danziger, D.Sc.

Dr^a. Graziella Maria Faquim Jannuzzi, D.Sc.

Prof. Gustavo Vaz de Mello Guimarães, D.Sc.

Rio de Janeiro

Julho de 2015

Silva, Edimar dos Santos da

Medição de Altura de Queda e Velocidade de Impacto do Martelo no SPT – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2015.

XII, 60 p. 29,7 cm.

Orientadores: Christian Matos de Santana

Co-orientador: Fernando Artur Brasil Danziger

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/
Curso de Engenharia Civil, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 55-60.

1. SPT. 2. Altura de queda. 3. Velocidade de impacto do martelo. 4. Energia.

I. Santana, Christian Matos de *et al.*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil. III. Medição de Altura de Queda e Velocidade de Impacto do Martelo em Ensaio SPT.

AGRADECIMENTOS

A meus pais, por todo o apoio que me foi dado ao longo desses anos, por todo o carinho e compreensão nas dificuldades, por todas as condições que tive ao longo de minha vida, sem eles isso não seria possível.

Ao meu irmão Eduardo pelo apoio e suporte quando mais precisei.

A minha esposa Juliana, por sempre acreditar em mim, mesmo em momentos que desacreditei. Por todo o apoio e companheirismo incondicional, por ter me dado meu filho Davi, minha razão de viver.

Aos meus amigos e familiares, pelo apoio de forma direta ou indireta.

Aos meus colegas de curso, que tornaram todas as jornadas de estudos mais agradáveis, pelo companheirismo em todas as horas.

Aos professores que tive ao longo da graduação, por compartilharem os seus conhecimentos.

Ao Professor Christian Matos de Santana por todo o apoio, dedicando seu tempo e orientação mesmo quando não possível.

Ao Professor Fernando Danziger pela sua generosidade e disposição em ajudar sempre.

Aos Professores Graziella Jannuzzi e Gustavo Guimarães pelas sugestões com o objetivo de melhorar este trabalho.

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

Medição da Altura de Queda e Velocidade de Impacto do Martelo em Ensaios SPT

Edimar dos Santos da Silva

Julho/2015

Orientadores: Christian Matos de Santana

Co-orientador: Fernando Artur Brasil Danziger

Curso: Engenharia Civil

O Standard Penetration Test (SPT) é atualmente o sistema de investigação mais popular do mundo para a obtenção de informações do subsolo. Embora o grande esforço empreendido para padronizar os procedimentos do SPT, a variabilidade é um fato nos procedimentos atuais. As pesquisas têm mostrado que um dos fatores de grande importância que afeta os valores medidos de N , representa a quantidade de energia transferida às hastes.

O objetivo deste trabalho é medir a altura de queda do martelo e sua velocidade na iminência do impacto com a cabeça de bater, a fim de compreender sua influência nas perdas de energias do ensaio e com esses dados obter os valores dos fatores de eficiência e_1^* e e_1 . Para isso, foram analisados 74 golpes distribuídos em 8 sequências de uma campanha realizada no Campo Experimental de Sarapuí II, em Duque de Caxias, RJ. Para a captação dos vídeos foi utilizada uma câmera de alta velocidade.

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

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

Measurement the drop height and hammer impact velocity in SPT

Edimar dos Santos da Silva

July/2015

Advisor: Christian Matos de Santana

Co-advisor: Fernando Artur Brasil Danziger

Course: Civil Engineering

The Standard Penetration Test (SPT) is currently the most popular in-situ test in obtaining subsurface information. Although great effort has been put into standardizing the SPT procedure, variability is inherent in present procedures. Research has shown that one of the very important factors that affect the measured values N is the amount of energy transferred to the rods.

The objective of this study is to measure the hammer drop height and speed on the verge of impact with the head hit, in order to understand their influence on energy losses of the test and the values of e_1^* and e_1 . For this, we analyzed 74 strokes over 8 sequences of a campaign in Experimental Field Sarapuí II, in Duque de Caxias, RJ. To capture the videos a high-speed camera was used.

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

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS E OBJETIVOS.....	1
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	2
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	O SPT.....	3
2.2	EQUIPAMENTOS	4
2.3.1.	Tipos de martelos	4
2.3.2.	Sistemas de elevação do martelo.....	5
2.3.3.	Sistemas de Liberação do Martelo	5
2.3	EXECUÇÃO DO ENSAIO	6
2.3.1	Prescrições da NBR 6484/2001 - Amostragem e SPT	7
2.4	NORMAS DE REFERÊNCIA	9
2.5	FATORES INTERVENIENTES AO ENSAIO SPT.....	10
2.5.1	Altura de queda do martelo	11
2.5.2	Tipo de martelo	12
2.5.3	Excentricidade do martelo em relação às hastes.....	12
2.5.4	Erros de contagem e medidas	13
2.5.5	Uso ou supressão do coxim de madeira.....	13
2.5.6	Tipo, idade e diâmetro da corda	13
3.	ENERGIA DO ENSAIO SPT	15
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	15
3.2	ENERGIA POTENCIAL TEÓRICA	16
3.3	ENERGIA CINÉTICA TEÓRICA.....	17
3.4	AS PERDAS DE ENERGIA NO ENSAIO.....	20
3.5	SISTEMAS PARA MEDIDAS DE VELOCIDADE DE IMPACTO DO MARTELO SPT	22
4.	EXECUÇÃO DO ENSAIO	28

4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	28
4.2	CARACTERÍSTICAS DA EQUIPE DE SONDAAGEM E EQUIPAMENTOS.....	28
4.3	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	29
4.3.1	Câmera de alta velocidade.....	29
4.3.2	Mira topográfica.....	31
4.4	METODOLOGIA.....	32
5.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	37
5.1	ANÁLISE DAS ALTURAS DE QUEDA.....	37
5.2	ANÁLISE DAS ENERGIAS, VELOCIDADE DE IMPACTO E OS FATORES DE EFICIÊNCIA e_1 E e_1^*	47
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	52
6.1.	CONCLUSÕES	52
6.2.	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Tipos de martelo usados no SPT, ODEBRECHT (2003).

Figura 2.2 - Gatilhos Manuais. (A) Sistema Argentina (IRELAND, 1966); (B) Sistema Japonês (CLAYTON, 1990); (C) Sistemas de Furnas, ODEBRECHT (2003).

Figura 3.1 - Aumento da altura de queda gerado por aumento de velocidade de realização do ensaio em um sistema automático (KOVACS 1979). Adaptado de DANZIGER et al. (2008).

Figura 3.2 - Altura de queda versus eficiência da energia cinética em relação à energia potencial nominal (474,4 J) no sistema americano de tambor e corda, com duas voltas na corda. Dados reunidos por RIGGS et al. (1983) de pesquisas de GOBLE & RUCHTI (1981) e KOVACS et al. (1982), CAVALCANTE (2002).

Figura 3.3 - Detalhes das faixas reflexivas (tarjetas) usadas para que os “scanners” registrem a velocidade de impacto do martelo (KOVACS et al., 1978), CAVALCANTE (2002).

Figura 3.4 - Sistema de registro de velocidade de impacto baseado em “scanners” idealizados por KOVACS & SALOMONE (1982), CAVALCANTE (2002).

Figura 3.5 - Sistema de medida de velocidade de impacto concebido por MATSUMOTO et al. (1982).

Figura 3.6 - Foto do equipamento HPA, SANTANA (2011).

Figura 3.7 - Tela do programa HPA 2.0, SANTANA (2011).

Figura 4.1 - Perfil geotécnico do Campo Experimental de Sarapuí II (adaptado de JANNUZZI, 2009).

Figura 4.2 – Cabeça de bater utilizada no ensaio, SANTANA (2015).

Figura 4.3 - Medição da altura de queda do martelo utilizando o software AutoCad.

Figura 4.4 - Altura de queda do martelo em função do tempo (obtidos de filmagens), SANTANA (2011).

Figura 4.5 - Mira topográfica similar à utilizada durante a campanha.

Figura 4.6.a,b,c,d,e,f - Imagens capturadas da trajetória do martelo até a iminência do impacto com a cabeça de bater.

Figura 4.7 - Utilização do AutoCAD na obtenção e análise de dados de um quadro retirado com o auxílio do software Windows Live Movie Maker.

Figura 4.8 - Linha de tendência e sua função horária.

Figura 5.1 - Alturas de queda x Golpes da Sequência 1.

Figura 5.2 - Alturas de queda x Golpes da Sequência 2.

Figura 5.3 - Alturas de queda x Golpes da Sequência 3.

Figura 5.4 - Alturas de queda x Golpes da Sequência 4.

Figura 5.5 - Alturas de queda x Golpes da Sequência 5.

Figura 5.6 - Alturas de queda x Golpes da Sequência 6.

Figura 5.7 - Alturas de queda x Golpes da Sequência 7.

Figura 5.8 - Alturas de queda x Golpes da Sequência 8.

Figura 5.9 - Alturas de queda média pelo número de golpes de cada sequência.

Figura 5.10 - Alturas de queda máxima pelo número de golpes de cada sequência.

Figura 5.11 - Alturas de queda média pela frequência de golpes por minuto de cada sequência.

Figura 5.12 – Frequência média pelo número de golpes de cada sequência.

Figura 5.13 – Desvio padrão versus frequência de cada sequência

Figura 5.14 - Distribuição percentual dos golpes em função da altura de queda do martelo para as 8 sequências de golpes do SPT.

Figura 5.15 – Distribuição de frequências de alturas de queda.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Características dos martelos apresentados para a cravação do amostrador, ODEBRECHT (2003).

Tabela 2.2 - Quadro resumo das várias características dos tipos de martelos usados no mundo, CAVALCANTE (2002).

Tabela 2.3 - Quadro resumo dos vários fatores que podem afetar os resultados do SPT. Adaptado de Cavalcante (2002).

Tabela 3.1 - Valores de altura de queda medidos em sistema brasileiro de SPT (CAVALCANTE 2002, CAVALCANTE et al. 2008b), DANZIGER et al. (2008).

Tabela 5.1–Número de golpes e altura de queda média e máxima para cada sequência.

Tabela 5.2 – Sequências, horário de realização dos ensaios, número de golpes, altura de queda média, frequência.

Tabela 5.3 – Sequências, horário de realização dos ensaios, número de golpes máximos fixados em cinco, altura de queda média, frequência.

Tabela 5.4 – Resumo dos resultados das 8 sequências.

Tabela 5.5 – Comparação com outros resultados da literatura.

Tabela 5.6 - Valores Médios de altura de queda, velocidade de impacto e perdas de velocidade.

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS E OBJETIVOS

O SPT (Standard Penetration Test) é o sistema de investigação mais popular, rotineiro e econômico utilizado em todo o mundo. Esse ensaio também é utilizado como medida de resistência à penetração dinâmica. No âmbito da engenharia geotécnica, principalmente na engenharia de fundações, o amplo emprego deste ensaio deve-se à sua simplicidade, robustez e facilidade de aplicação de seus resultados (BROMS e FLODIN, 1988; DÉCOURT, 1989; BELINCANTA, 1998; CAVALCANTE, 2002; LUKIANTCHUKI, 2012).

Mesmo o SPT sendo normalizado em muitos países, os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios variam de acordo com o país, e até mesmo dentro de um país, interferindo na quantidade de energia transferida ao conjunto de hastes. Dessa forma, o valor do índice de resistência à penetração, N_{SPT} , varia com o tipo de equipamento utilizado. Essa variedade de equipamentos e de procedimentos aliada à dependência do operador provocam uma grande dispersão nos resultados, sendo, portanto, alvo de críticas.

Com a popularização do método e a evolução das pesquisas nas últimas décadas, novos conhecimentos foram incorporados em termos de identificação e avaliação dos fatores que influenciam na parcela de energia efetiva que realmente atinge o amostrador. Essa energia é responsável pelo número de golpes (N_{SPT}) medido para um determinado solo. O número de golpes, por sua vez, é diretamente usado de forma empírica ou semi-empírica como parâmetro chave no cálculo da capacidade de suporte e recalque das fundações, representando o fator de maior importância no projeto, responsável pelo sucesso (inclusive financeiro) do empreendimento (CAVALCANTE, 2002).

Diante deste quadro, surgem conflitos relativos a aspectos extrapolativos. Segundo CAVALCANTE (2002) e SCHNAID (2000), os resultados do SPT realizados em um mesmo local podem apresentar dispersão significativa se os sistemas de SPT usados em ambos não têm a mesma configuração. Além dos sistemas utilizados, os fatores de ordem humana também estão envolvidos em alguns casos (FLETCHER, 1965).

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} , mostrado em diversos trabalhos (SCHMERTMANN,

1976; PALACIOS, 1977; SCHMERTMANN E PALACIOS, 1979; ROBERTSON et al., 1983; ABOU-MATAR E GOBLE, 1997; BELINCANTA, 1998; CAVALCANTE, 2002; ODEBRECHT, 2003).

Dentre os diversos fatores que interferem nos resultados do ensaio SPT, já discutidos em trabalhos como HVORSLEV (1949), FLETCHER (1965), CAVALCANTE (2002) e ODEBRECHT (2003), estão os fatores relacionados com o controle da altura de queda do martelo SPT e as perdas de energia durante a sua queda.

O presente trabalho tem como principal objetivo melhorar a compreensão da influência controle da altura de queda do martelo SPT e das perdas de energia durante a sua queda no processo de transmissão de energia às hastes.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Após esta introdução, no Capítulo 2, é feita uma revisão bibliográfica sobre o ensaio SPT, sendo realizada análise resumida de seu histórico no Brasil e no mundo, analisando a execução do ensaio segundo a norma, desvios e fatores que influenciam e afetam seu estado.

No Capítulo 3 é apresentada a questão da energia e seu processo de transferência durante o ensaio e suas respectivas perdas.

No Capítulo 4 é descrito o processo de execução do ensaio, a instrumentação utilizada no processo e a metodologia de análise de dados.

No Capítulo 5 são apresentados e analisados os resultados.

No Capítulo 6 estão incluídas as conclusões.

Finalmente, são apresentadas as Referências Bibliográficas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O SPT

O Standard Penetration Test, SPT, é um ensaio in situ tradicional. Seu aparecimento data do início do século XX. Atualmente, é a investigação mais utilizada na prática de engenharia de fundações. Sua utilização é mais frequente na avaliação da capacidade de carga dos terrenos de fundação e na definição de zoneamentos geotécnicos.

O ensaio SPT consiste na cravação de um amostrador padronizado por ação da queda de um martelo normalizado (ver NBR 6484/2001), o que permite a avaliação da compacidade dos solos granulares e da consistência dos solos coesivos e mesmo de rochas brandas. Por ser um ensaio relativamente fácil, sua robustez e baixo custo do equipamento utilizado, aliados a um valor numérico de ensaio que pode ser relacionado com regras empíricas de projeto e à vasta experiência acumulada, faz do SPT o ensaio mais requerido no Brasil para o reconhecimento geotécnico de terrenos.

CAVALCANTE (2002) faz um relato do processo de desenvolvimento do SPT. Por considerar o trabalho citado bem amplo em relação ao histórico do processo de desenvolvimento do SPT e por considera-lo bem abrangente, não será feito nesse trabalho um histórico do ensaio.

A partir da década de 1970, visando a padronização do ensaio e devido às limitações impostas pelo ensaio foram desenvolvidos estudos voltados para a medição de energia. Diversos estudos desenvolvidos (SCHMERTMANN, 1976, PALACIOS, 1977, BELINCANTA, 1985, 1998, KOVACS, 1979, 1981, CAVALCANTE, 2002, ODEBRECHT, 2003, HOWIE et al., 2003, LOBO, 2009, dentre outros) procuraram identificar as influências que ocorrem na determinação do índice N_{SPT} . Isto porque este índice é afetado diretamente pela variação da energia transmitida ao conjunto de hastes utilizadas na cravação do amostrador SPT, ocasionando resultados discrepantes (LUKIANCHUKI, 2012).

O trabalho de BELINCANTA (1998) foi pioneiro no Brasil ao retratar a influência de diferentes fatores que afetam o resultado do SPT. Esses fatores influenciam diretamente na energia transferida durante a primeira onda de compressão incidente. Dentre vários fatores, pode-se destacar o tipo de martelo, procedimentos executivos, uso do cabo de aço, estado de composição de hastes, utilização ou ausência do coxim de madeira e massa da cabeça de bater. BELINCANTA (1998) destaca ainda que as empresas de sondagem incorporam

mudanças nos procedimentos de ensaios que acabam alterando o método proposto pela norma, sendo assim fundamental a avaliação e a quantificação dos fatores intervenientes no ensaio (LUKIANCHUKI, 2012).

2.2 EQUIPAMENTOS

O equipamento é constituído por um amostrador, martelo, hastes, sistemas de elevação e liberação do martelo, cabeça de bater, entre outros instrumentos. A seguir serão descritos os vários elementos que constituem o ensaio.

2.3.1. Tipos de martelos

Na literatura encontram-se diferentes tipos de martelos utilizados para a cravação do amostrador. A Figura 2.1 apresenta alguns destes martelos e a Tabela 2.1 cita as suas características.

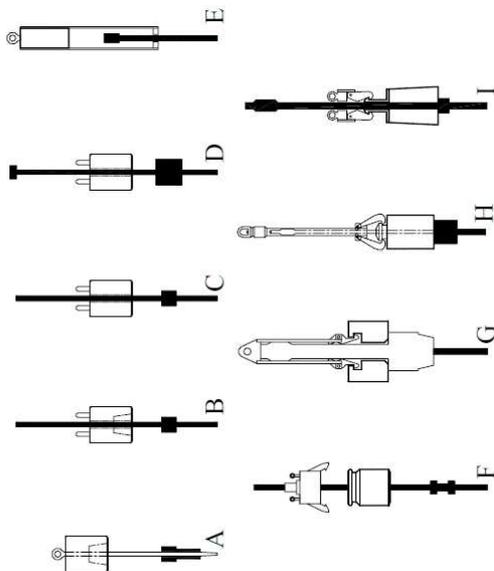


Figura 2.1 - Tipos de martelo usados no SPT, ODEBRECHT (2003).

Tabela 2.1 - Características dos martelos apresentados para a cravação do amostrador, ODEBRECHT (2003).

Figura	Nome	País	Massa (kg)	Massa do conjunto (kg)	Massa da cabeça de bater (kg)	Fabricante	Elevação do Martelo	Liberação do Martelo	Coxim de Madeira
A	Com Pino Guia	Brasil	65,0	-	3.8	-	Manual	Manual	Sim
B	Martelo Cilindro Vazado	Brasil	65,0	-	3.8	-	Manual	Manual	Sim
C	Donut Hammer	USA / outros	63,5	-		-	Mecanizada	Manual / Cathead	Não
D	Safe T-Driver	USA / outros	63,5	-			Mecanizada	Manual / Cathead	Não
E	Safety Hammer	USA / outros		-			Mecanizada	Manual / Cathead	Não
F	Booros Co. Ltda darp Hammer	USA / outros	63,5			Booroe Co. Ltda Drap Hammer	Mecanizada	Gatilho Mecânico	Não
G	Pilcon Trip Monkey	USA / outros	63,5			Pilcon	Mecanizada	Gatilho Mecânico	Não
H		Ingraterra	63,5	114,70	32.2		Mecanizada	Gatilho Mecânico	Não
I		Japão	63,5				Mecanizada	Gatilho Mecânico	Não

2.3.2. Sistemas de elevação do martelo

Segundo ODEBRECHT (2003), os sistemas de elevação do martelo podem ser divididos basicamente em dois grupos: o manual e o mecanizado. O manual é o sistema mais utilizado na prática brasileira, onde dois auxiliares de sondagem levantam o peso, com auxílio de uma corda, que passa por uma roldana fixa posicionada na parte superior do tripé de sondagem. O sistema mecanizado geralmente utiliza uma polia (tambor) que gira continuamente, a uma determinada velocidade, na qual é enrolado o cabo, que após passar pela roldana fixa na parte superior do tripé, está conectada ao martelo. O operador ao puxar a corda enrolada na polia, aumenta o atrito da corda com a polia, e com isso eleva o martelo; ao soltar a corda o atrito é reduzido e o martelo cai.

2.3.3. Sistemas de Liberação do Martelo

Os sistemas apresentados na Figura 2.2 A e B são utilizados na Argentina (IRELAND, 1966) e no Japão (CLAYTON, 1990) e são de uso correntemente.

No Brasil atualmente há a disponibilidade de um gatilho de concepção muito simples, desenvolvido por Furnas-Centrals Elétricas S.A., apresentado na Figura 2.2 C (BELINCANTA, 1998).

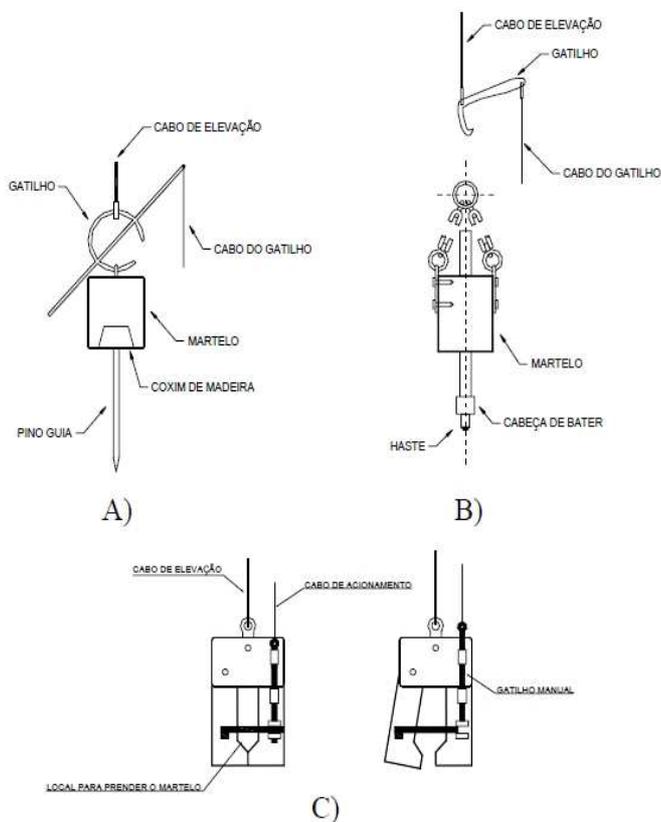


Figura 2.2 - Gatilhos Manuais. (A) Sistema Argentina (IRELAND, 1966); (B) Sistema Japonês (CLAYTON, 1990); (C) Sistemas de Furnas, ODEBRECHT (2003).

2.3 EXECUÇÃO DO ENSAIO

O ensaio SPT é um ensaio de execução relativamente simples, sendo dividido em duas fases. A primeira consiste na cravação inicial do amostrador, através da queda de um martelo cuja massa é de 65 kg de uma altura de 75 cm, até que se atinja uma profundidade de 15 cm. Essa primeira fase com a cravação dos primeiros 15 cm tem como objetivo ultrapassar o solo possivelmente perturbado, imediatamente abaixo do fundo do furo. Logo o número de pancadas desta fase tem importância meramente informativa.

A segunda fase do ensaio tem como objetivo a obtenção do número de golpes para a cravação de 30 cm, sendo que esta fase é realizada em duas partes de 15 cm cada. O resultado do ensaio, N_{SPT} , é traduzido pelo número de quedas do martelo na cabeça de bater necessários para que se atinja essa profundidade de cravação.

2.3.1 Prescrições da NBR 6484/2001 - Amostragem e SPT

Segundo a NBR 6484/2001:

- Deve ser coletada, para exame posterior, uma parte representativa do solo colhido pelo trado-concha durante a perfuração, até 1 metro de profundidade.
- A cada metro de perfuração, a partir 1 m de profundidade, devem ser colhidas amostras dos solos por meio do amostrador padrão, com execução de SPT.
- O amostrador padrão deve ser conectado à composição de cravação e descer livremente no furo de sondagem até ser apoiado suavemente no fundo.
- Após o posicionamento do amostrador padrão conectado à composição de cravação, coloca-se a cabeça de bater e, utilizando-se o tubo de revestimento como referência, marca-se na haste, com giz, um segmento de 45 cm divididos em três trechos iguais de 15 cm.
- Em seguida, o martelo deve ser apoiado suavemente sobre a cabeça de bater, anotando-se eventual penetração do amostrador no solo.
- Não tendo ocorrido penetração maior ou igual a 45 cm, prossegue-se a cravação do amostrador padrão até completar os 45 cm de penetração por meio de impactos sucessivos do martelo padronizado caindo livremente de uma altura de 75 cm, anotando-se, separadamente, o número de golpes necessários à cravação de cada segmento de 15 cm do amostrador padrão.

Na prática, é registrado o número de golpes empregados para uma penetração imediatamente superior a 15 cm, registrando o comprimento penetrado (por exemplo, três golpes para a penetração de 17 cm). A seguir, conta-se o número adicional de golpes até a penetração total ultrapassar 30 cm e em seguida o número de golpes adicionais para a cravação atingir 45 cm, ou, com o último golpe, ultrapassar este valor.

O registro é expresso pelas frações obtidas nas três etapas.

Exemplo:

3/17 – 4/14 – 5/15.

As penetrações parciais ou acumuladas devem ser medidas com erro máximo de 5 mm.

- A cravação do amostrador padrão, nos 45 cm previstos para a realização do SPT, deve ser contínua e sem aplicação de qualquer movimento de rotação nas hastes.
- A elevação do martelo até a altura de 75 cm, marcada na haste guia, é feita normalmente por meio de corda flexível, de sisal, com diâmetro de 19 mm a 25 mm, que se encaixa com folga no sulco da roldana da torre.
- Precauções especiais devem ser tomadas para que, durante a queda livre do martelo, não haja perda de energia de cravação por atrito, principalmente nos equipamentos mecanizados, os quais devem ser dotados de dispositivo disparador que garanta a queda totalmente livre do martelo.
- A cravação do amostrador padrão é interrompida antes dos 45 cm de penetração sempre que ocorrer uma das seguintes situações:
 - a) Em qualquer dos três segmentos de 15 cm o número de golpes ultrapassar 30;
 - b) Um total de 50 golpes tiver sido aplicado durante toda a cravação; e
 - c) Não se observar avanço do amostrador padrão durante a aplicação de cinco golpes sucessivos do martelo.
- Quando a cravação atingir 45 cm, o índice de resistência à penetração N é expresso como a soma do número de golpes requeridos para a segunda e terceira etapas de penetração de 15 cm, anotando-se os números obtidos nestas etapas mesmo quando a penetração não tiver sido de exatos 15 cm.
- A penetração obtida quando se apoia suavemente o martelo na cabeça de bater corresponde a zero golpes.
- Quando, com a aplicação do primeiro golpe do martelo, a penetração for superior a 45 cm, o resultado da cravação do amostrador deve ser expresso pela relação deste golpe com a respectiva penetração.

Exemplo: 1/58.

- Quando a cravação for incompleta, o resultado da cravação do amostrador é expresso pelas relações entre o número de golpes e a penetração para cada 15 cm de penetração.

Exemplo:

12/16

- Quando a penetração do amostrador padrão com poucos golpes exceder significativamente os 45 cm ou quando não puder haver distinção clara nas três penetrações parciais de 15 cm, o resultado da cravação do amostrador padrão deve ser expresso pelas relações entre o número de golpes e a penetração correspondente.

2.4 NORMAS DE REFERÊNCIA

No Brasil, a norma que prescreve o método de execução de sondagem de simples reconhecimento é a NBR 6484/2001. Porém, como o SPT é considerado um dos mais importantes ensaios “in situ” do mundo é natural que ele seja normatizado em outros países e/ou regiões. As normas mais utilizadas para este ensaio são a ASTM D 1586-84 e o International Reference Test Procedure IRTP/ISSMFE que é uma instituição internacional de referência.

Entretanto, como o ensaio é muito simples, do ponto de vista executivo e também interpretativo, aumentou o número de entidades que passaram a utilizar o ensaio SPT em todo o mundo como ensaio de caracterização. Isso fez e faz com que por um lado, as referências bibliográficas tenham aumentado exponencialmente, devido à grande experiência prática adquirida, originando correlações empíricas com outros parâmetros geotécnicos (SCHMERTMANN, 1970; SCHMERTMANN et al., 1978; AOKI-VELLOSO, 1975; DÉCOURT e QUARESMA, 1978; BURLAND e BURDIDGE, 1985), incluindo identificação e classificação de solos ensaiados (TERZAGHI e PECK, 1948; HVORSLEV, 1949), LOPES (2008).

A popularização do ensaio não trouxe apenas aspectos positivos. Em todo o mundo apareceram alterações relativas à execução do ensaio. Surgiram também equipamentos com configurações diferentes das inicialmente estabelecidas sendo que tal fato é justificado por NIXON (1982) como sendo fruto de cada país possuir eventualmente norma própria e usar as configurações que lhe convier (CAVALCANTE, 2002).

Essas alterações e modificações de equipamento criaram, e ainda criam muitos conflitos, quando se compara resultados do ensaio em diferentes entidades, recomendando-se cautela na interpretação, sobretudo quando se trata de países diferentes, avaliando, sobretudo que todos os componentes do ensaio poderão ser diferentes (tipo de furação, tipo de martelo, massa do martelo, altura de queda do martelo, tipo de batente, etc.), LOPES (2008).

Tendo em vista estas dificuldades, BELINCANTA (1998), apontou as vertentes que podem ser seguidas para tornar o SPT um ensaio padronizado:

- O estabelecimento de norma rígida sem permissões de alterações no equipamento;
- Criação de uma norma flexível ou semi-flexível com tentativa de padronização de resultados a partir do estabelecimento de um procedimento de referência.

A primeira alternativa parece muito difícil de ser praticada devido ao grande número de usuários do SPT e também pelo fato de que os operadores do equipamento são, na grande maioria, de baixo nível de escolaridade. Além disso, parece também difícil encontrar um fiscal de sondagem (engenheiro) acompanhando os trabalhos. Quando presente, talvez não esteja plenamente consciente ainda dos fatores que podem afetar os resultados e que devem ser fiscalizados (CAVALCANTE, 2002).

Entretanto, a segunda alternativa tem mais chance de se estabelecer com maior sucesso em virtude da grande quantidade de equipamentos com configurações mais diversas. Contudo, não se deve abrir mão de um procedimento que seja tomado como referência para os demais (CAVALCANTE, 2002).

2.5 FATORES INTERVENIENTES AO ENSAIO SPT

Até o início dos anos 1970 o SPT era alvo de desconfiança. Alguns pesquisadores se referiam ao ensaio como não padronizado (IRELAND et al., 1970). Mesmo assim ele continuou sendo o método de investigação mais utilizado em todo o mundo.

Os fatores que influenciam no resultado do SPT são os mesmos que afetam outros tipos de ensaio de campo ou de laboratório. Na maioria dos ensaios esses fatores podem ser classificados como sendo de três naturezas: humana, de equipamento e de procedimento (BELINCANTA et al., 1994).

A eficiência do ensaio SPT é afetada diretamente pelos fatores descritos acima. A eficiência ideal não é aquela que se aproxima de 100%, mas é aquela que é igual à média da prática local, no qual os métodos de cálculo de fundações foram baseados (NEVES, 2004). Segundo DÉCOURT (1989), a eficiência média brasileira está em torno de 72% e, segundo CAVALCANTE (2002), em torno de 82%, para martelos do tipo “Pinweight”.

Abaixo estão relacionados os principais fatores que interferem no valor da eficiência do ensaio SPT.

2.5.1 Altura de queda do martelo

Os sistemas de elevação do martelo podem ser divididos em duas categorias: o manual e o mecanizado. No Brasil o manual é o sistema utilizado com mais frequência, onde basicamente, dois auxiliares de sondagem suspendem o peso, com o auxílio de uma corda, que passa por uma roldana fixa posicionada na parte superior do tripé de sondagem. No sistema mecanizado geralmente utiliza-se uma polia (tambor) que gira continuamente, a uma determinada velocidade, onde é enrolado a corda de sisal, que após passar pela roldana, que é fixa na parte superior do tripé, conecta-se na parte superior do martelo através da alça superior.

No sistema de elevação do martelo com acionamento manual, há grande influência dos operadores nos resultados do ensaio, pois se eles levantarem o martelo além do necessário, o martelo cairá com maior velocidade e haverá provavelmente uma maior transmissão de energia cinética para as hastes, reduzindo o valor do N do SPT. Se ocorrer o contrário, ou seja, os operadores levantarem o martelo aquém do necessário, haverá uma menor transmissão de energia para as hastes, aumentando o N do SPT.

Segundo CAVALCANTE (2002), o sistema de martelo acionado por corda com tambor em rotação ou qualquer outro tipo de martelo que dependa de uma marca na haste para controle da altura de queda, tem resultado em altura de queda maior do que a pré-determinada.

De acordo com MELLO (1971) um erro de $\pm 7,5\text{cm}$ na altura de queda pode induzir a erros na energia total transmitida às hastes da ordem de $\pm 10\%$.

Investigações foram realizadas por KOVACS et al. (1977) para avaliar o efeito da experiência dos operadores na altura de queda do martelo. Foi concluído que, na média, tanto o operador inexperiente quanto o operador experiente convergiam para o mesmo valor de altura de queda pré-determinada, CAVALCANTE (2002).

2.5.2 Tipo de martelo

Como mostrado na Figura 2.1, o tipo do martelo e os procedimentos para sua utilização interferem consideravelmente na eficiência do ensaio, ver Tabela 2.2. Segundo NEVES (2004), esta é uma das principais dificuldades encontradas na transposição de experiência entre diferentes países.

Tabela 2.2 - Quadro resumo das várias características dos tipos de martelos usados no mundo, CAVALCANTE (2002).

País	Martelo	Mecanismo	Eficiência média (%)	Referência
Argentina	Donut	Cathead	45	A
Brasil	Pino – guia	Manual	72 – 73	C; F
China	Automático	Queda livre	60	A
	Donut	Manual	55	B
	Donut	Cathead	50	A
Colômbia	Donut	Cathead	50	C
Japão	Donut	Tombi	78 – 85	A; D
	Donut	Duas voltas no cathead	65 – 67	A; B
Inglaterra	Automático	Queda livre	73	E
Estados Unidos	Safety	Duas voltas no cathead	55 – 60	A; B
	Donut	Duas voltas no cathead	45	A
Venezuela	Donut	Cathead	43	C

Autores: A) SEED et al. (1985); B) SKEMPTON (1986); C) DÉCOURT (1989); D) RIGGS (1986); E) CLAYTON (1990); F) BELINCANTA (1988).

2.5.3 Excentricidade do martelo em relação às hastes

Quando existe excentricidade do martelo em relação às hastes, haverá maior atrito entre a guia e o conjunto de hastes (para martelos com pino guia) ou atrito entre o martelo e a guia (para martelos vazados), ocorrendo a diminuição da velocidade de impacto e um contato irregular do martelo com a cabeça de bater. Isso contribuirá para uma redução no valor da energia cinética e provavelmente na energia transferidas às hastes, aumentando consequentemente o N do SPT (CAVALCANTE, 2002).

Segundo KOVACS et al. (1975) para ângulos de inclinação de até 3^0 com a vertical nos há influência significativa na velocidade de queda do martelo.

2.5.4 Erros de contagem e medidas

A contagem dos golpes é feita pelo operador como na maioria dos ensaios, e é natural que por distração ou cansaço depois de uma jornada de trabalho ocorram erros na contagem e nas medidas.

2.5.5 Uso ou supressão do coxim de madeira

Segundo BELINCANTA e CINTRA (1998), tem sido decorrente o uso de martelo sem o coxim de madeira dura, apesar de estar em desacordo com a norma vigente da ABNT.

O uso do coxim de madeira influencia diretamente as condições de contato entre o martelo e a cabeça de bater, evitando o choque do aço com o aço, reduzindo assim, as vibrações no sistema.

Entretanto, segundo BELINCANTA (1998), registra pequena influência nos valores do N_{SPT} para o uso ou não do coxim de madeira.

2.5.6 Tipo, idade e diâmetro da corda

Diferentes tipos de corda provocam diferentes tipos de perda de atrito na roldana superior do aparelho de sondagem. Os tipos mais comuns de cordas utilizadas no ensaio são a de nylon (fibra sintética) e a de sisal, sendo esta última a mais utilizada no Brasil.

A idade da corda de sisal influencia nos resultados do ensaio SPT. A corda velha tende a diminuir a velocidade de queda do martelo para duas e três voltas, contrariamente ao registrado quando apenas uma volta é dada (KOVACS et al, 1977).

Em relação ao diâmetro da corda, BELINCANTA (1998) aponta uma redução de eficiência do sistema SPT se o diâmetro é aumentado de 12 mm para 18 mm.

Na Tabela 2.3 é apresentado um resumo dos fatores de influência.

Tabela 2.3 - Quadro resumo dos vários fatores que podem afetar os resultados do SPT. Adaptado de Cavalcante (2002).

Causas	Efeito	Influência no valor de N
Altura de queda inadequada	Energia varia	Aumenta ou diminui
Massa do martelo inadequada	Energia varia	Aumenta ou diminui
Sistema de golpeio excêntrico	Redução de energia	Aumenta
Queda do martelo condicionada	Redução de energia	Aumenta

3. ENERGIA DO ENSAIO SPT

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A década de 1970 foi de grande importância para o ensaio SPT, porque nessa época, principalmente nos EUA, surgiram os primeiros trabalhos de pesquisa a fim de uniformizar o significado de N_{SPT} , através da medição da energia efetivamente transferida à composição de hastes. Os principais trabalhos foram os desenvolvidos por SCHMERTMANN (1976), PALACIOS (1977) e SCHMERTMANN e PALACIOS (1979) que estimularam outros pesquisadores a dar continuidade ao entendimento cada vez mais racional da dinâmica do SPT (e.g., ROBERTSON et al., 1983, ABOU-MATAR e GOBLE, 1997, BELICANTA, 1998, CAVALCANTE, 2002, ODEBRECHT, 2003), de modo que se possa conhecer e considerar a influência de vários fatores nos resultados do ensaio, tornando dessa forma o SPT mais confiável no meio geotécnico.

A eficiência do sistema SPT é função das perdas por atrito e da própria dinâmica de transmissão de energia do conjunto. No Brasil, onde é comum o uso de sistemas manuais para a liberação de queda do martelo, é aplicada uma energia da ordem de 80% da energia teórica (CAVALCANTE, 2002; ODEBRECHT, 2003 e SANTANA, 2012). Na Europa e EUA onde o sistema é mecanizado, a energia liberada é da ordem de 60%. Atualmente, a prática internacional sugere normalizar o número de golpes com base no padrão americano de N_{60} , SCHNAID (2000). Desta forma, previamente ao uso de uma correlação formulada nos EUA, deve-se majorar o valor medido de N_{SPT} obtido em uma sondagem brasileira em 10 a 20% (VELLOSO e LOPES, 2004).

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. Desse modo tem-se:

$$N_1 \cdot E_1 = N_2 \cdot E_2 \quad (3.1)$$

Onde N_1 representa o valor de N_{SPT} e E_1 a energia medida. Por sua vez, E_2 representa a energia de referência e N_2 o valor de N_{SPT} relativo a esta, LOPES (2008).

A ISSMFE (1989) estabeleceu como energia de referência internacional 60% da energia potencial teórica ($E^* = 474$ J). Então, o valor de N_{SPT} para uma eficiência de 60%

(N_{60}) é calculado pela expressão (3.2), que considera a razão entre a energia medida (E_i) e 60% da energia teoricamente disponível (E_{60}^*), isto multiplicando pelo número de golpes realizados no ensaio (N_i).

$$N_{60} = \frac{E_i}{E_{60}^*} \cdot N_i \quad (3.2)$$

O valor de 60% foi estabelecido com base em diversos trabalhos relativos à questão da eficiência do ensaio, entre eles, os de TERZAGHI (1948) e SCHMERTMANN e PALACIOS (1979), entre outros. Entretanto, deve-se observar que o valor de N_{SPT} deverá ser o correspondente a energia de referência e não a energia medida.

Por exemplo, um ensaio realizado em território brasileiro, segundo a NBR 6484/2001, com acionamento manual do martelo, fornecendo uma medida de energia de 72% da energia teórica de queda livre, teria seu valor de N_{SPT} igual a 25 golpes convertido em um valor de

$$N_{60} = \frac{25 \cdot 0,72}{0,60} = 30, \text{ ou seja, } N_{60} = 30.$$

Como relatado anteriormente, desde o final dos anos 70 se tem assistido uma evolução contínua desse assunto, sendo que atualmente se consegue avaliar a eficiência do ensaio com um elevado grau de rigor (CAVALCANTE, 2002).

3.2 ENERGIA POTENCIAL TEÓRICA

Quando o martelo está na altura de queda de padrão do ensaio, este possui uma energia denominada energia potencial gravitacional ou teórica (E^*). Esta energia é dada pelo produto da massa do martelo (m) pela aceleração da gravidade (g) e a altura de queda do martelo (h).

$$E^* = m \cdot g \cdot h \quad (3.3)$$

Pelos valores designados pela NBR 6484/2001 para a altura de queda (75 cm), massa do martelo (65 kg) e aceleração gravitacional (9,81 m/s²), a energia potencial do ensaio SPT deverá ser de 478,24 J.

Como qualquer outro equipamento de impacto, o martelo sofre desgaste ao longo do tempo, devido às inúmeras pancadas efetuadas. Entretanto, CAVALCANTE (2002) afirma que não encontrou nenhuma referência acerca de erros em relação ao peso do martelo, talvez,

segundo ele, não seja difícil se conseguir os martelos com pesos muito próximos aos valores padronizados. Ainda segundo CAVALCANTE (2002), vale salientar que o impacto do martelo na cabeça de bater produz desgaste com perda de massa ao longo do tempo, e é conveniente que periodicamente se façam verificações a respeito.

A altura de queda é outro item de grande importância a ser controlado. A altura de queda preconizada pela norma brasileira é de 75 cm, caso essa seja, por exemplo, 74 cm a energia potencial passará de 478,24 J para 471,86 J. Ou seja, uma diferença de apenas 1 cm na altura de queda do martelo provoca uma diferença de energia superior a 6 J.

Esta diminuição da altura de queda do martelo poderá ser causada por uma diminuição da frequência de aplicação de golpes, por exemplo, já que, KOVACS (1979) apresentou dados (Figura 3.1), nos quais o aumento da frequência aumentava a altura de queda do martelo num sistema automático (LOPES, 2008).

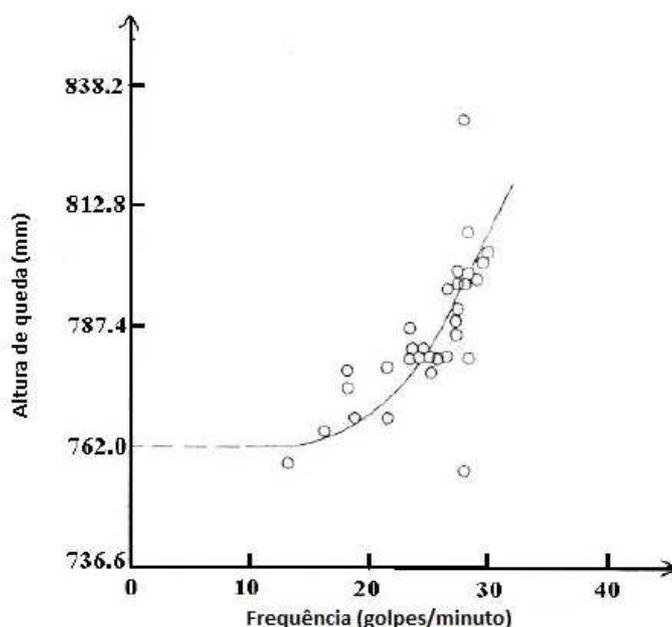


Figura 3.1 - Aumento da altura de queda gerado por aumento de velocidade de realização do ensaio em um sistema automático (KOVACS 1979). Adaptado de DANZIGER et al. (2008).

3.3 ENERGIA CINÉTICA TEÓRICA

Quando o martelo cai da altura de queda determinada teoricamente, a energia potencial do martelo (E^*) deveria ser transformada totalmente em energia cinética (E_c). Na realidade, isto não ocorre devido às perdas de energia. A energia cinética antes do impacto é inferior à

energia potencial gravitacional. Considerando os valores recomendados pela norma, a energia cinética antes do impacto seria 478,24 J e conseqüentemente a velocidade de queda do martelo seria de 3,84 m/s, já que:

$$E_c = \frac{m \cdot V^2}{2} \quad (3.4)$$

e

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (3.5)$$

Este valor não corresponde à realidade devido às perdas de energia existentes. Dependendo do mecanismo usado para levantar e soltar o martelo, podem ocorrer perdas de energia durante a queda e, por isso, a velocidade no momento do impacto pode sofrer uma redução. Também podem ocorrer variações em relação à altura de queda teórica e em relação à massa do martelo.

A energia disponível imediatamente antes do impacto (E_c) é determinada a partir da velocidade máxima alcançada pelo martelo (V_0) e da massa do martelo (m), conforme expresso pela equação 3.6.

$$E_c = \frac{m \cdot V_0^2}{2} \quad (3.6)$$

Existe um fator de eficiência que relaciona a energia teórica à energia medida imediatamente antes do impacto martelo-cabeça de bater, quantificando as perdas de origem friccional (seja entre a haste-guia do martelo e a cabeça de bater, entre a haste-guia e a haste padrão do SPT, entre a corda e a roldana, ou entre a corda e o tambor) decorrentes das operações durante a fase de levantamento e queda do martelo, que levam a uma redução da velocidade de impacto com a cabeça de bater. Esse fator de eficiência, designado por DECOURT (1989), é expresso como:

$$e_1 = \frac{E_c}{E^*} \quad (3.7)$$

Existem diversos fatores que influenciam no e_1 . Entre eles estão a idade da corda, o diâmetro do tambor, o diâmetro da corda, o número de voltas no tambor e o mecanismo de acionamento do martelo.

Segundo DANZIGER et al. (2008), cabe ressaltar 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 para se obter o valor de e_1 , não sendo utilizado o valor real de altura de queda (e a energia potencial correspondente) empregada no ensaio.

Já o fator e_1^* é dado pelo quociente da energia cinética na iminência do impacto pela energia potencial real de soltura do martelo, representando melhor as perdas de energia durante a queda do martelo, sem influência da altura de queda.

No sistema brasileiro, o levantamento do martelo geralmente é feito manualmente e com isso, a dependência dos operadores para a aplicação da correta altura de queda do martelo é muito grande. No sistema manual, o martelo é do tipo pino-guia, onde o operador só libera o martelo em queda livre após o aparecimento da marca no pino que indica a altura de queda de 75 cm.

Segundo DANZIGER et al. (2008), os próprios autores já tiveram a oportunidade de verificar casos em que a marca deixa de se tornar nítida, por sujeiras na haste, e não é refeita, e mesmo casos em que não existia a marca sob a suposta alegação de que o operador e a equipe “possuíam muita experiência e não havia portanto necessidade da marca”. Ainda de acordo com estes autores, são muito poucos os casos da literatura em que a altura de queda foi medida no sistema brasileiro, porque o sistema existente não torna esta medição muito simples.

CAVALCANTE (2002) realizou a medida de altura de queda em três séries de ensaios no Rio de Janeiro, e obteve os valores relacionados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Valores de altura de queda medidos em sistema brasileiro de SPT (CAVALCANTE 2002, CAVALCANTE et al. 2008b), DANZIGER et al. (2008).

Prof. nominal do ensaio (m)	Número de golpes	Altura de queda medida (m)	
		média	desvio padrão
23	22	0,78	0,01
24	57	0,78	0,04
25	50	0,79	0,03

Os dados da tabela acima apresentam valores muito próximos aos estipulados pela norma brasileira, mas segundo DANZIGER et al. (2008) os valores devem ser vistos com cuidado, pois o operador responsável pelo ensaio, octogenário, possuía muita experiência.

Cabe ressaltar que segundo os autores mencionados, os resultados constantes na Tabela 3.1 podem ser obtidos em ensaios executados com cuidado.

Os autores citados acima tiveram a oportunidade de estimar a altura de queda de ensaios em algumas situações. Embora de forma visual, baseado em referências grosseiras, as indicações foram de alturas de queda significativamente maiores (até cerca de 90 cm) que os valores nominais.

DANZIGER et al. (2008) ainda ressaltam que sistemas automatizados podem também conduzir a alturas de queda significativamente distintas da altura de queda nominal. Tais diferenças estão associadas à velocidade de realização do ensaio (e.g., KOVACS, 1979), ver Figura 3.2.

3.4 AS PERDAS DE ENERGIA NO ENSAIO

A energia potencial teórica do sistema brasileiro é de 478,24 J (considerando uma altura de queda de 75 cm e massa do martelo de 65 kg), valor apenas 1% superior à referência internacional.

A partir da energia potencial, várias perdas ocorrem 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). Segundo DÉCOURT (1989), a energia no topo da composição de hastes (E_i) pode ser obtida através da seguinte equação:

$$E_i = e_1 \cdot e_2 \cdot e_3 \cdot E^* \quad (3.8)$$

Sendo e_1 , e_2 e e_3 fatores de eficiência descritos abaixo.

O fator e_1 está relacionado com a energia cinética imediatamente antes do impacto do martelo com a cabeça de bater. Esse fator é influenciado pelas perdas de energia associado ao sistema de levantar e soltar o martelo. Este fator pode variar de 0,4 até praticamente 1. O fator e_2 quantifica as perdas de energia durante o impacto entre o martelo e a cabeça de bater. Está relacionado à massa da cabeça de bater. O fator e_3 está relacionado com o comprimento da composição das hastes.

A energia que chega à composição de hastes pode não ser a mesma que chega ao amostrador, e que finalmente ocasiona certo valor de penetração, associada ao valor de N_{SPT} que é utilizado num projeto geotécnico. Por esta razão, DANZIGER et al. (2008) sugerem que a energia que atinge o amostrador, E_s , seja dada pela seguinte expressão:

$$E_s = e_1 \cdot e_2 \cdot e_3 \cdot e_4 \cdot E^* \quad (3.9)$$

O fator e_4 quantifica as perdas de energia ao longo da composição de hastes. Apesar da existência dos 4 fatores de eficiência, este trabalho tem como principal objetivo aprimorar a compreensão dos principais fatores que podem influenciar no valor de eficiência e_1 .

Em relação à altura de queda, podem existir diferenças significativas em relação à altura de queda padronizada, dependendo do equipamento e do modo de operação. Por exemplo, segundo CAVALCANTE (2002), RIGGS et al. (1983) reuniram dados de GOBLE e RUCHTI (1981) e KOVACS et al. (1975), para o emprego de sistema com tambor e corda, onde duas voltas da corda foram empregadas. Segundo RIGGS et al. (1983), a pesquisa de GOBLE e RUCHTI (1981) envolveu a medida de velocidade de impacto e da altura de queda em mais de 1500 golpes. Quinze experientes operadores (sondadores) empregando vários equipamentos participaram da pesquisa. Os resultados mostraram que todos os operadores levantaram o martelo mais do que os 76,2 cm preconizados pela ISSMFE (1989), sendo a média da altura de queda igual a 81,7 cm. A média de eficiência, tomada a partir da velocidade de impacto medida e da altura de queda nominal (padronizada) foi de 86%. Se essa eficiência fosse tomada em relação à altura de queda medida, o valor seria naturalmente menor. Os dados obtidos nas duas pesquisas encontram-se resumidos na Figura 3.2. BELINCANTA (1998) e BELINCANTA et al. (1984, 1994) encontraram valores médios de eficiência na faixa entre 65% e 80% de energia teórica. Já CAVALCANTE (2002) encontrou um valor médio de eficiência de $\eta = 82\%$.

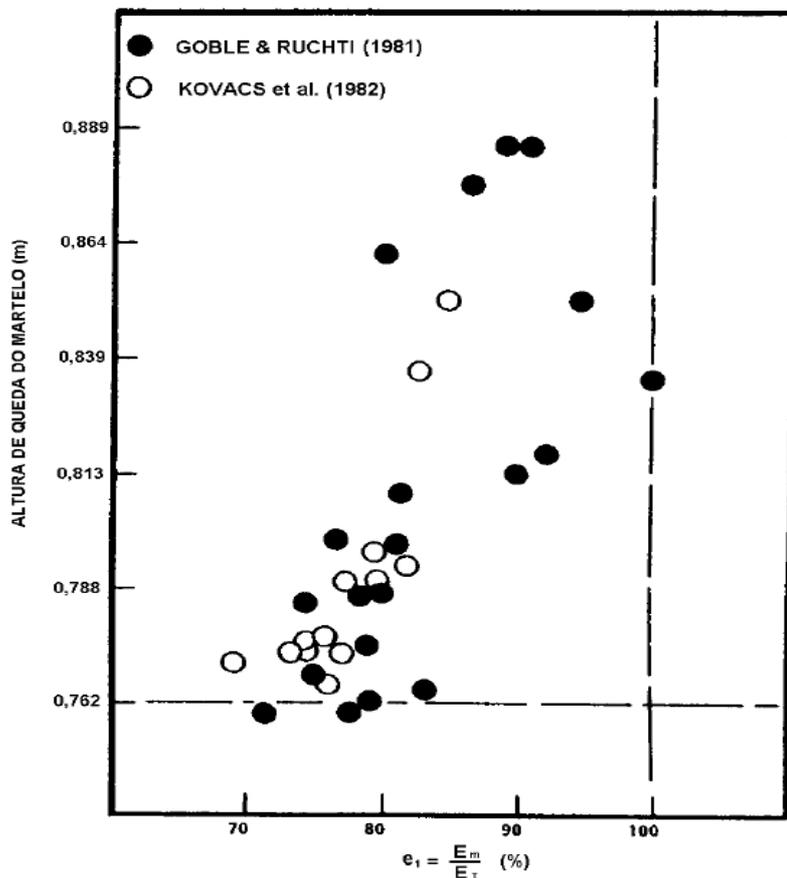


Figura 3.2 - Altura de queda versus eficiência da energia cinética em relação à energia potencial nominal (474,4 J) no sistema americano de tambor e corda, com duas voltas na corda. Dados reunidos por RIGGS et al. (1983) de pesquisas de GOBLE & RUCHTI (1981) e KOVACS et al. (1982), CAVALCANTE (2002).

3.5 SISTEMAS PARA MEDIDAS DE VELOCIDADE DE IMPACTO DO MARTELO SPT

As primeiras medições de velocidade do martelo do SPT imediatamente antes da sua queda no topo da composição de hastes foram feitas em meados da década de 1970 (CAVALCANTE, 2002).

Segundo CAVALCANTE (2002), os sistemas empregados até então para medir a velocidade de impacto em martelos SPT eram: (i) baseados em “scanners” focalizando tarjetas luminosas colocadas estrategicamente no martelo (KOVACS et al., 1977, KOVACS et al., 1978, KOVACS, 1979, KOVACS et al., 1981, KOVACS & SALOMONE, 1982); (ii) geração de um pulso elétrico em fios paralelos espaçados por uma distância conhecida, que registra a passagem do martelo e o tempo gasto no percurso entre os fios (MATSUMOTO et

al., 1992): (iii) o uso de tecnologia de radar com sistema de registro baseado no efeito “Doppler” (MORGANO & LIANG, 1992, ABOU-MATAR & GOBLE, 1997).

As Figuras 3.3 e 3.4 mostram detalhes do sistema de registro de velocidade de impacto do martelo com a utilização de “scanners” e faixas reflexivas (tarjetas) de cores contrastantes (preta e branca) colocadas no martelo modelo Donut (KOVACS et al., 1978, 1982). Ainda segundo CAVALCANTE (2002), MATSUMOTO et al. (1992) criou um sistema elétrico bastante simples, o qual utiliza três fios elétricos espaçados de 20 mm, colocados próximos da cabeça de bater (ver Figura 3.5). Cada fio representa um circuito elétrico que gera um pulso toda vez que o martelo toca um deles. Conhecida a distância entre os fios e o tempo que o martelo leva para percorrê-la, obtém-se a velocidade imediatamente antes do choque com a cabeça de bater do SPT.

NAKAO (1981) utilizou filmadoras de alta velocidade (acima de 60 quadros) que permitiram a filmagem do martelo durante a sua queda, medindo o deslocamento do topo de uma estaca durante a sua cravação. Na campanha complementar de ensaios para a tese de CAVALCANTE (2002), foi concebido um sistema para ser utilizado em conjunto com uma filmadora, com o objetivo de estimar a altura de queda real do martelo, bem como de sua velocidade imediatamente antes do impacto. A partir do vídeo gravado em fita VHS, foi possível fazer uma análise quadro a quadro do evento de subida e descida do martelo para em seguida determinar-se tanto a altura de queda quanto a velocidade de impacto.

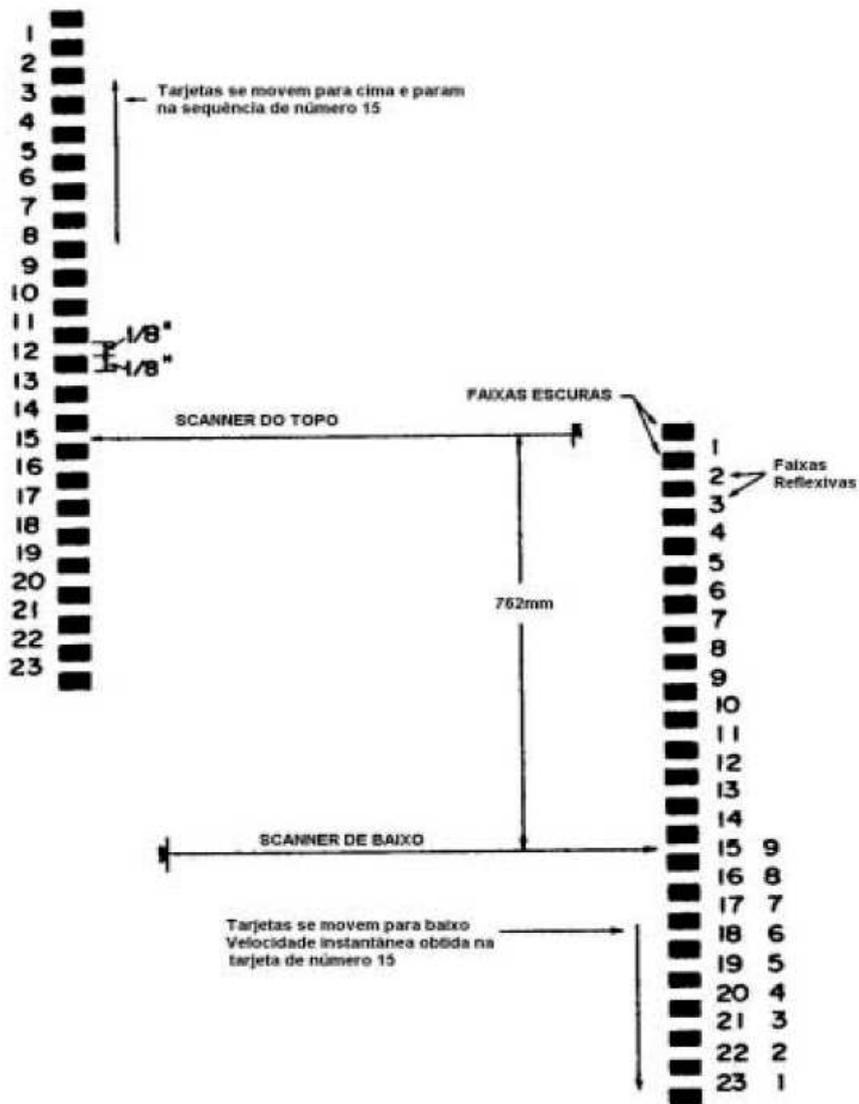


Figura 3.3 - Detalhes das faixas reflexivas (tarjetas) usadas para que os "scanners" registrem a velocidade de impacto do martelo (KOVACS et al., 1978), CAVALCANTE (2002).

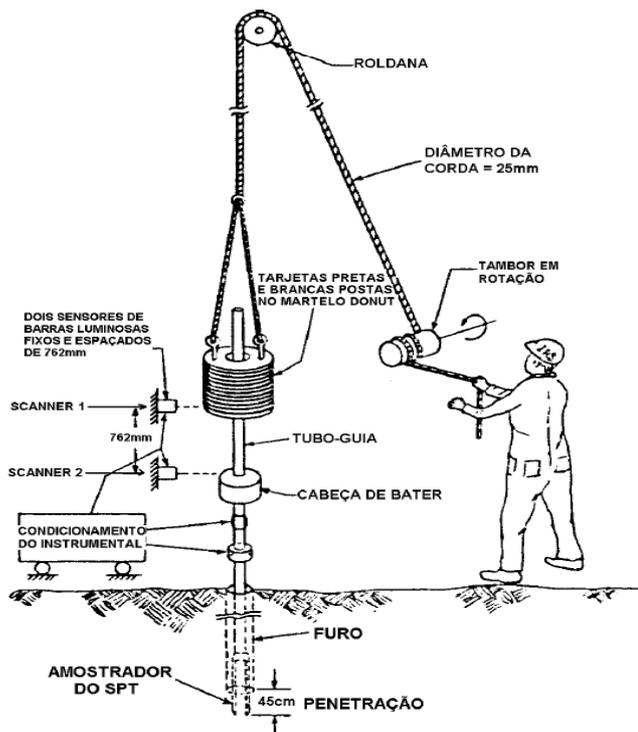


Figura 3.4 - Sistema de registro de velocidade de impacto baseado em "scanners" idealizados por KOVACS & SALOMONE (1982), CAVALCANTE (2002).

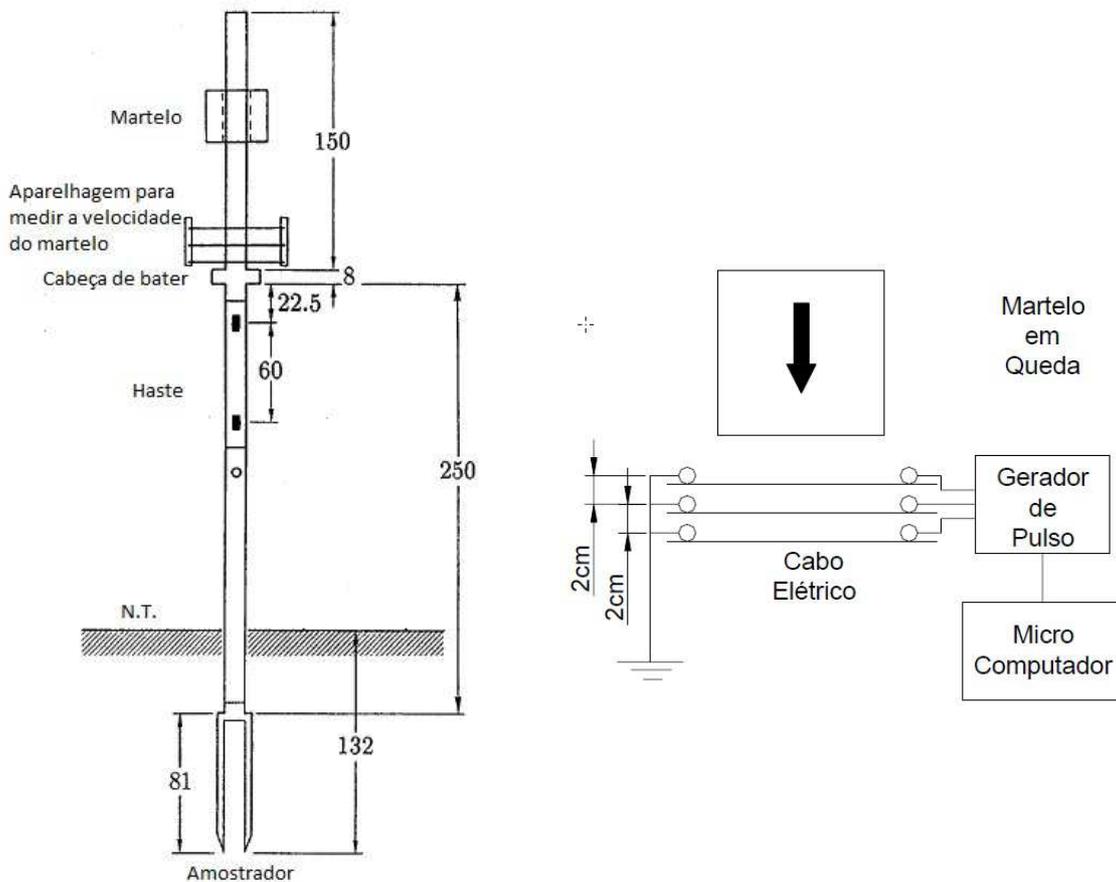


Figura 3.5 - Sistema de medida de velocidade de impacto concebido por MATSUMOTO et al. (1982).

Outro sistema mais sofisticado tem sido utilizado recentemente, o HPA (Hammer Performance Analyzer – Analisador de desempenho de martelos), que é um dispositivo que permite medir a velocidade de impacto e de pico dos martelos, além de contar o número de golpes aplicados. Esse equipamento, que é produzido pela empresa Pile Dynamics Inc (PDI), utiliza tecnologia de radar para monitorar a queda do martelo, velocidade de impacto e as energias correspondentes.

O equipamento é composto de antena Doppler, condicionador de sinal e diapasão para aferição (Ver Figura 3.6). Durante as medições é necessário apontar a antena para o alvo. O condicionador de sinal converte o registro da antena e o envia para um computador, além de servir como bateria para a antena. O HPA necessita estar conectado a um computador com o programa HPA 2.0 instalado, para fornecer registros de velocidade em tempo real (ver Figura 3.7).

Um diapasão com frequência de ressonância conhecida permite avaliar o perfeito funcionamento do equipamento, SANTANA (2011).



Figura 3.6 - Foto do equipamento HPA, SANTANA (2011).

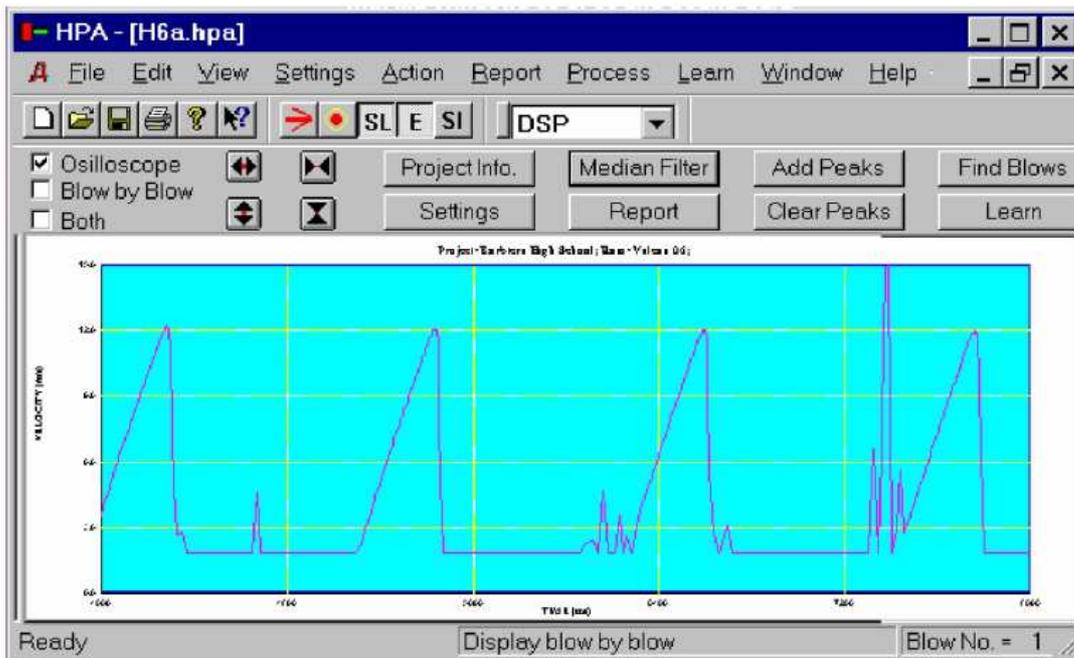


Figura 3.7 - Tela do programa HPA 2.0, SANTANA (2011).

Os resultados são automaticamente armazenados em um computador portátil e com o auxílio de programa específico é feita a análise estatística dos dados.

4. EXECUÇÃO DO ENSAIO

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nessa campanha foram monitorados ensaios SPT realizados no Campo Experimental de Sarapuí II, que fica localizado às margens da Rodovia Washington Luiz, na área da Estação Rádio da Marinha do Brasil, município de Duque de Caxias. Esse campo experimental foi caracterizado por FRANCISCO (2004) e ALVES (2004), e posteriormente, por JANNUZZI (2009).

Segundo JANNUZZI (2009), o perfil geotécnico da região é formado por uma camada de argila muito mole com espessura típica de 7,5m a 8,0m, seguida de camadas menores de: argila, areia, silte e novamente argilas. O nível d'água é coincidente com o nível do terreno (SANTANA, 2011). A Figura 4.1 mostra o perfil geotécnico da região.

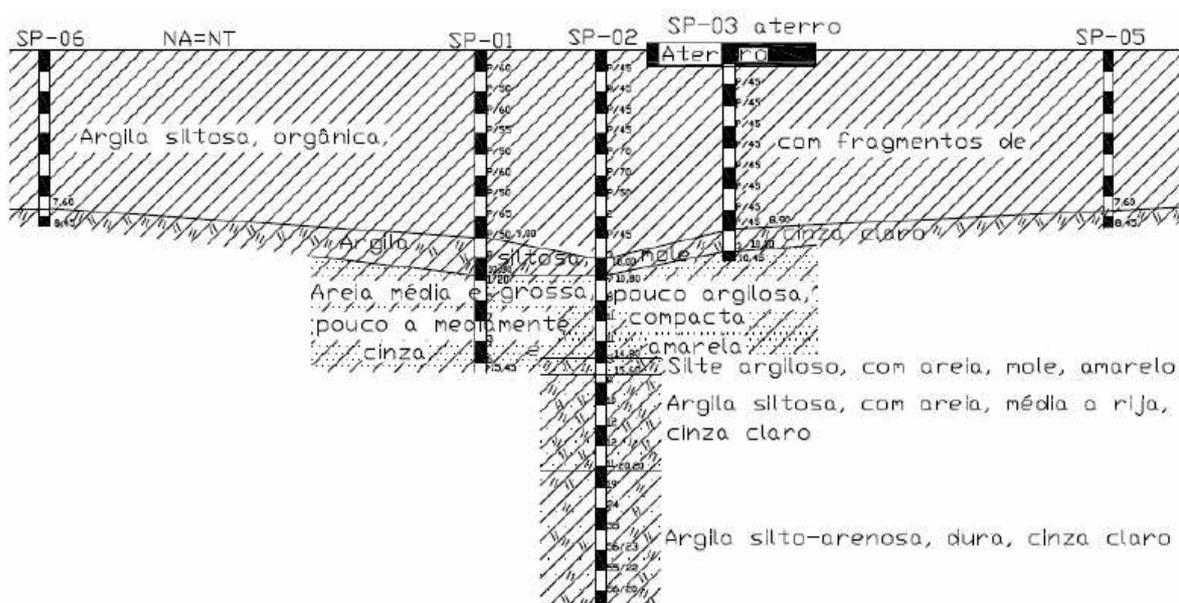


Figura 4.1 - Perfil geotécnico do Campo Experimental de Sarapuí II (adaptado de JANNUZZI, 2009).

As profundidades nominais do ensaio SPT variavam de 9,0 a 20,0 metros, com a realização de medição de altura de queda do martelo, e da sua velocidade de impacto.

4.2 CARACTERÍSTICAS DA EQUIPE DE SONDAGEM E EQUIPAMENTOS

A equipe de sondagem era composta por um sondador e três auxiliares. A massa da cabeça de bater utilizada era de 977 gf (Figura 4.2), estando em não conformidade com a NBR 6484/2001 que estabelece que a massa deva ter entre 3,5 kgf e 4,5 kgf.



Figura 4.2 – Cabeça de bater utilizada no ensaio, SANTANA (2015).

O sistema de levantamento e soltura era manual e acionamento era feito por corda de sisal. O martelo era dotado de haste guia e coxim de madeira. A massa do martelo não foi verificada, entretanto, foi informado pela empresa de sondagem que a verificação é feita periodicamente. O controle de altura de queda foi feito visualmente, a partir de marcação na haste guia (SANTANA, 2015).

As hastes possuíam diâmetro externo de 33 mm e seu peso não foi verificado.

4.3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

4.3.1 Câmera de alta velocidade

A altura de queda do martelo foi medida através dos registros de uma câmera filmadora de alta velocidade, Casio EX-FH20, com capacidade de 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, resultando numa resolução máxima de 480 x 360 pixels. A câmera foi fixada num tripé nas proximidades do ensaio. Para auxiliar na determinação da posição do martelo, foi fixada uma mira topográfica ao lado do equipamento de sondagem.

Após os ensaios, os registros da câmera foram transferidos para um microcomputador, separados quadro a quadro, como fotos, com o auxílio do programa Windows Live Movie Maker e analisados em outro software, o AutoCAD, de modo que foi possível definir com erro mínimo a altura máxima de erguimento do martelo em cada golpe (Figura 4.3).



Figura 4.3 - Medição da altura de queda do martelo utilizando o software AutoCad.

De modo similar, foi estimada a velocidade de impacto do martelo, analisando a sua altura quadro a quadro, desde o momento da soltura (altura máxima de erguimento) até a iminência do impacto (último quadro antes do martelo ter contato com a cabeça de bater). Assim foi possível ajustar uma função que descreva a relação entre a altura do martelo e o tempo, conforme exemplificado na Figura 4.4.

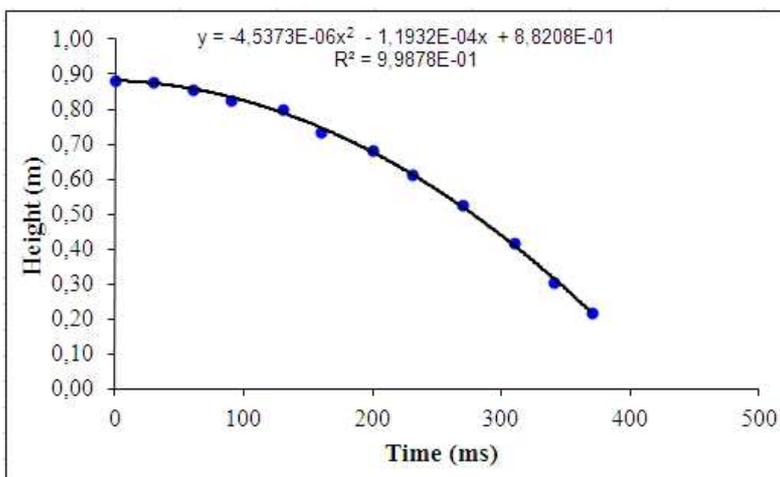


Figura 4.4 - Altura de queda do martelo em função do tempo (obtidos de filmagens), SANTANA (2011).

Segundo SANTANA (2011), durante sua pesquisa de iniciação científica foi verificado que funções polinomiais de grau 2 produziam excelente ajuste.

4.3.2 Mira topográfica

Com o objetivo de auxiliar na determinação da altura de queda do martelo durante seu processo de levantamento e soltura, foi utilizada, como referência, uma mira topográfica graduada durante a execução do ensaio SPT.



Figura 4.5 - Mira topográfica similar à utilizada durante a campanha.

4.4 METODOLOGIA

Durante a queda do martelo, foram capturadas as imagens da sua trajetória de descida, desde a soltura até a iminência ao choque com a cabeça de bater. Na Figura 4.6 é possível ver esse processo de captura de imagens.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.6.a,b,c,d,e,f - Imagens capturadas da trajetória do martelo até a iminência do impacto com a cabeça de bater.

Durante a queda do martelo, foi realizada uma análise quadro a quadro das imagens. Utilizou-se como referência uma mira topográfica graduada, que foi colocada ao lado da haste do SPT, de modo que foi possível determinar com erro mínimo a altura máxima em que o martelo é erguido e os demais instantes, até o momento da iminência do impacto do martelo com a cabeça de bater. A Figura 4.7 exemplifica este procedimento.



Figura 4.7 - Utilização do AutoCAD na obtenção e análise de dados de um quadro retirado com o auxílio do software Windows Live Movie Maker.

A análise da altura de queda do martelo e o entendimento das perdas de energia durante a queda do martelo são os dois focos de estudo deste trabalho. Essa perda de energia pode ser expressa através da relação entre a energia cinética de impacto e a energia potencial de soltura, dada pelo fator e_1^* , apresentado no item 3.3 deste trabalho.

No presente trabalho assumiu-se que o movimento de queda do martelo é descrito por uma parábola, ou seja, movimento uniformemente variado. A equação horária 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 do martelo em determinado instante t;

t: Tempo;

a_c : Aceleração da gravidade;

S_0 : Posição de início do movimento.

v_0 : Velocidade inicial do martelo;

Através da posição do martelo em determinado instante t foi possível obter o traçado da curva ao longo do tempo de queda e desta forma, determinar a função que descreve o movimento. A Figura 4.8, mostra o gráfico da altura de queda em função do tempo. Ainda na Figura 4.8, é mostrado o coeficiente de determinação R^2 que é uma medida de ajustamento de um modelo estatístico, com seu valor variando de 0 a 1, indicando 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 (NETO, 2013).

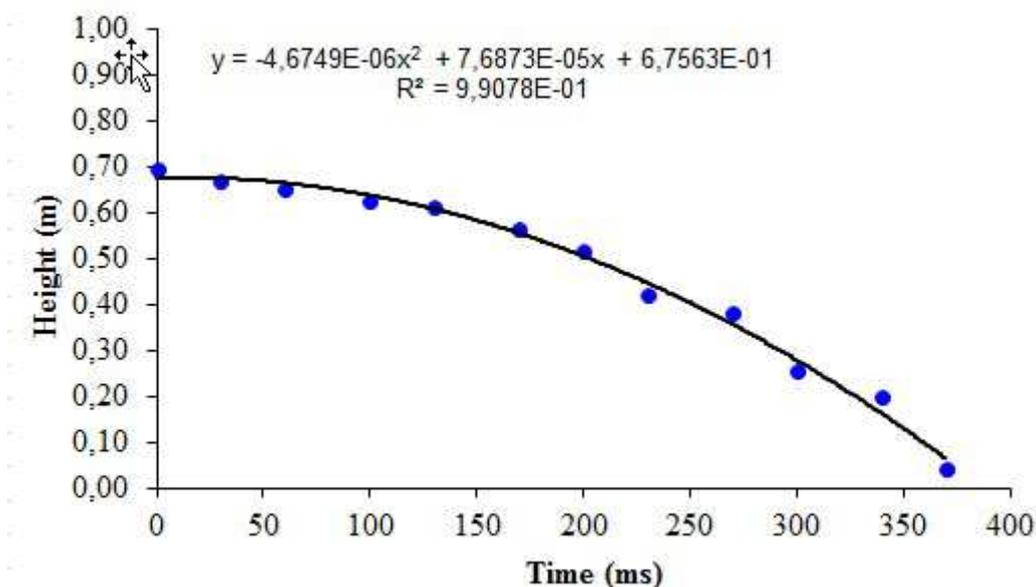


Figura 4.8 - Linha de tendência e sua função horária.

A função apresentada no gráfico anterior é da forma:

$$y(x) = ax^2 + bx + c \quad (4.2)$$

Sendo x a variável correspondente ao tempo e y ao deslocamento vertical, a equação (4.2) pode ser escrita da seguinte forma:

$$S(t) = at^2 + bt + c \quad (4.3)$$

Igualando as equações (4.1) a (4.3) tem-se:

$$S(t) = at^2 + bt + c = \frac{a_c t^2}{2} + v_0 t + S_0 \quad (4.4)$$

Então:

$$a = \frac{a_c}{2}; \quad b = v_0; \quad c = S_0$$

Um dos objetivos deste trabalho é determinar a relação entre energia cinética imediatamente antes do impacto do martelo com a cabeça de bater e a energia potencial teórica de soltura do martelo, descrita pela expressão 3.7.

$$e_1 = \frac{E_C}{E^*} \quad (4.5)$$

Sendo:

E_C = Energia de queda imediatamente antes do impacto do martelo com a cabeça de bater;

E^* = Energia potencial teórica de soltura do martelo.

O fator e_1^* pode ser representado pela seguinte expressão:

$$e_1^* = \frac{E_C}{E_P} \quad (4.6)$$

Sendo:

E_C = Energia cinética imediatamente antes do impacto do martelo com a cabeça de bater;

E_P = Energia Potencial considerando a altura de queda real do martelo.

A energia cinética pode ser obtida pela expressão 3.6, mas para isso é necessário que se conheça previamente o valor da velocidade do martelo na iminência do impacto com a cabeça de bater.

A função que fornece a velocidade em função do tempo pode ser obtida derivando a expressão (4.3).

$$V(t) = \frac{dS}{dt} = 2at + bt \quad (4.7)$$

A partir da expressão (4.7), torna-se possível calcular a velocidade de impacto, mediante o conhecimento do instante (t) em que ocorre esse choque. Esse movimento é de descida do martelo. Por esta razão, a função mostrada no gráfico da Figura 4.7 possui o valor de “a” negativo. Trata-se de um movimento acelerado e retrogrado, OLIVEIRA NETO (2013).

No instante do choque a posição do martelo será $S(t) = 0$, com isso pode-se determinar o instante t de impacto calculando a raiz da função (4.3).

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

(Quando $a < 0$, teremos $t > 0$).

Esses valores são obtidos utilizando as conclusões expressas pela expressão (4.4).

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

A metodologia para a análise dos dados descrita neste capítulo foi empregada para todos os golpes de cada uma das 8 sequências monitoradas em campo, gerando dados que serão interpretados no próximo capítulo.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 ANÁLISE DAS ALTURAS DE QUEDA

Foram produzidos gráficos apresentados nas Figuras 5.1 a 5.8, para cada sequência de golpes com suas respectivas alturas de queda. A fim de facilitar a análise dos gráficos, foi adicionada uma linha de tendência (linear). A seguir estão apresentados os gráficos.

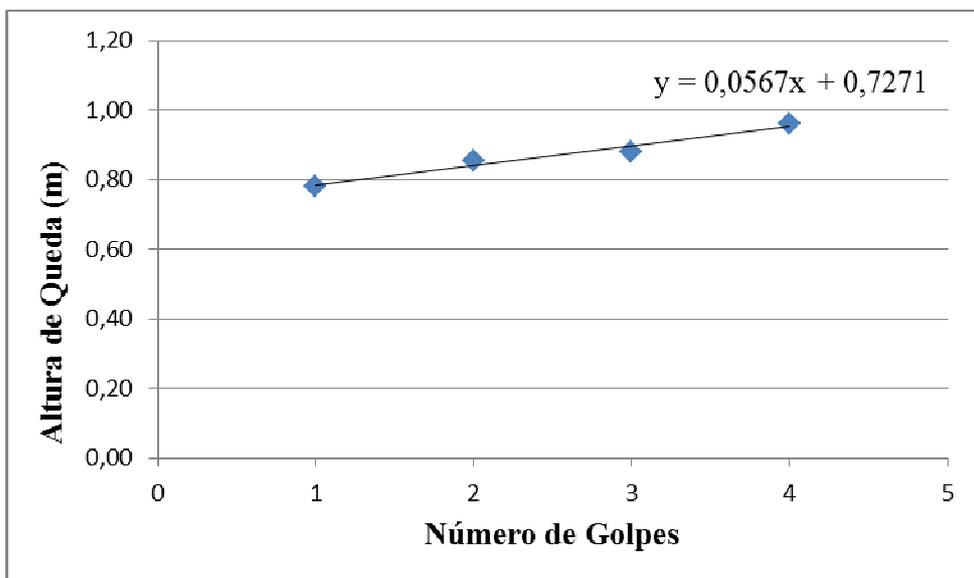


Figura 5.1 - Alturas de queda x Golpes da Sequência 1.

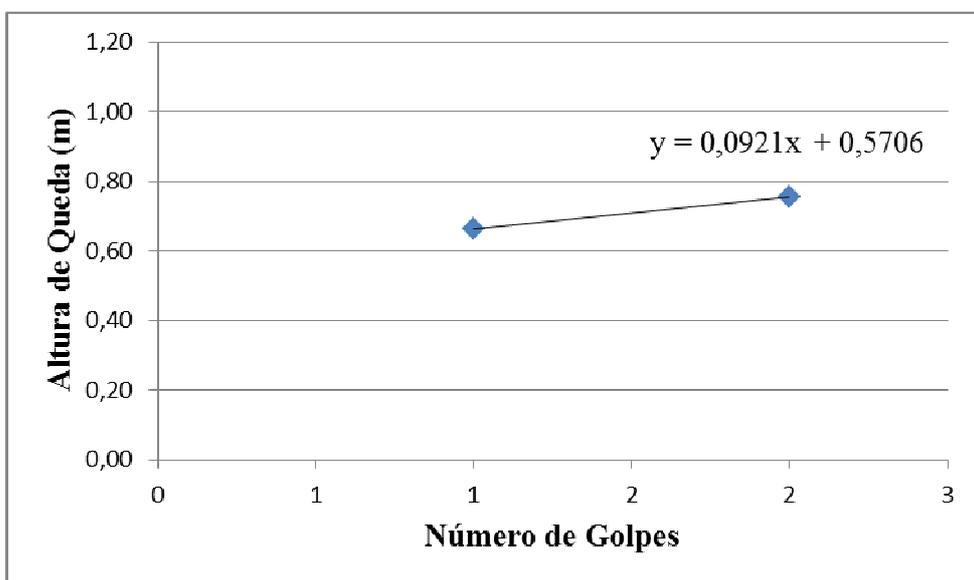


Figura 5.2 - Alturas de queda x Golpes da Sequência 2.

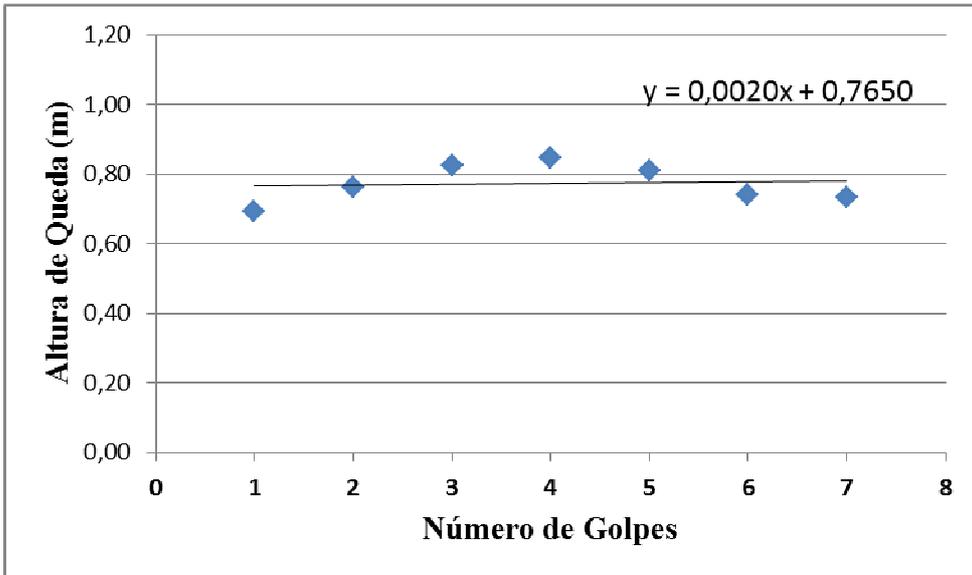


Figura 5.3 - Alturas de queda x Golpes da Sequência 3.

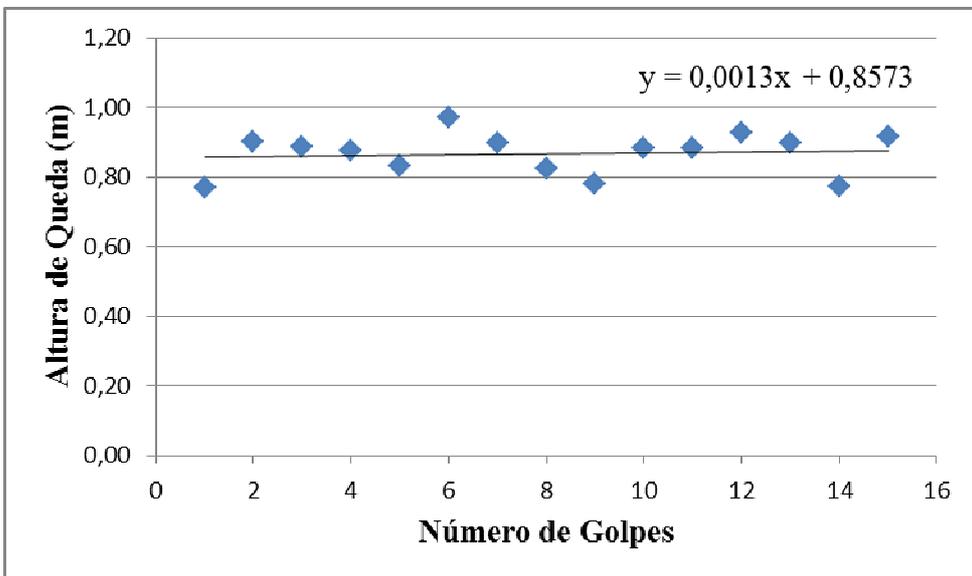


Figura 5.4 - Alturas de queda x Golpes da Sequência 4.

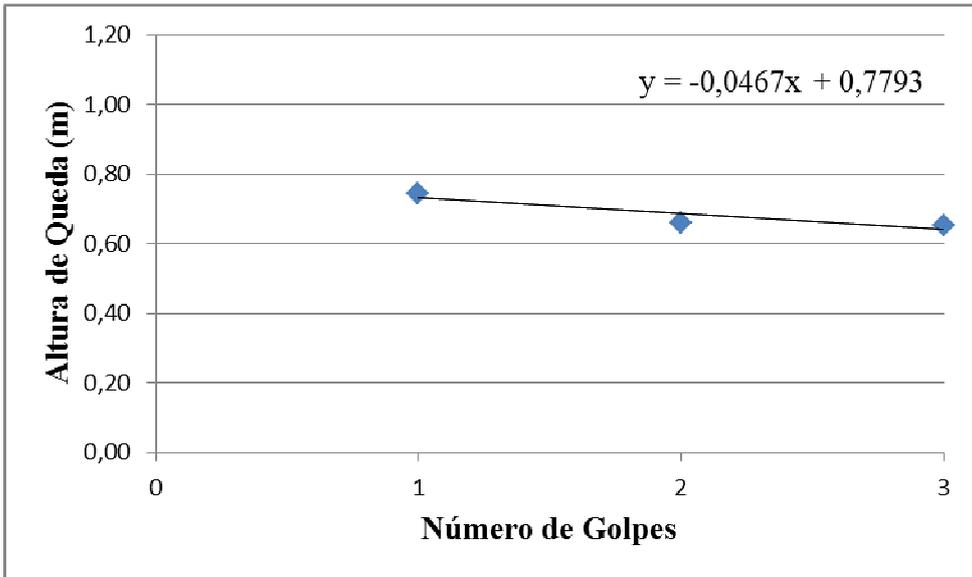


Figura 5.5 - Alturas de queda x Golpes da Sequência 5.

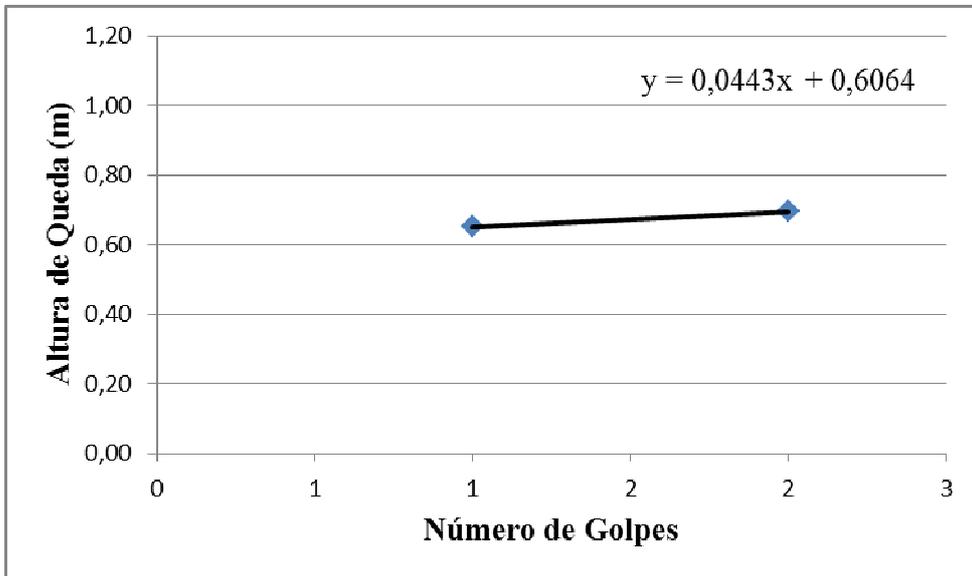


Figura 5.6 - Alturas de queda x Golpes da Sequência 6.

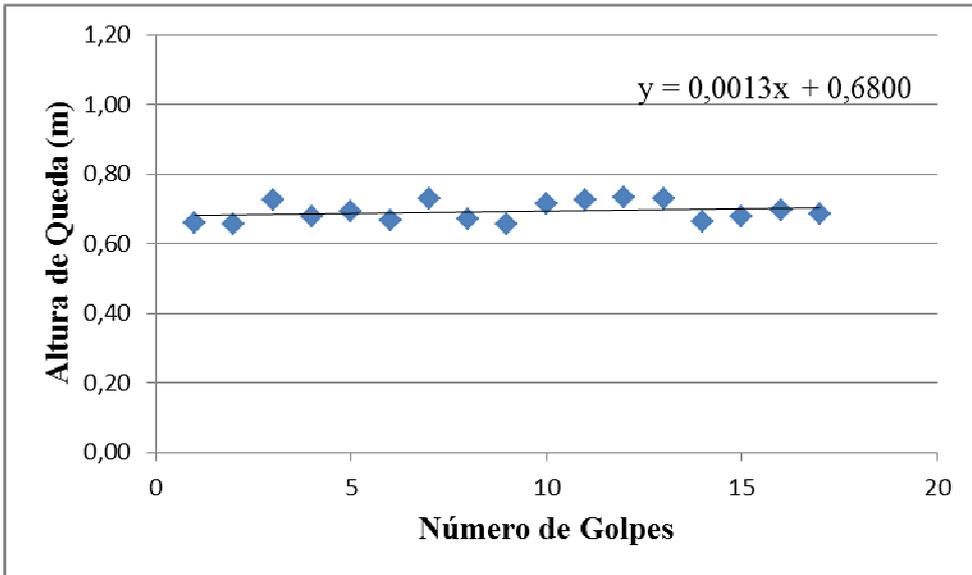


Figura 5.7 - Alturas de queda x Golpes da Sequência 7.

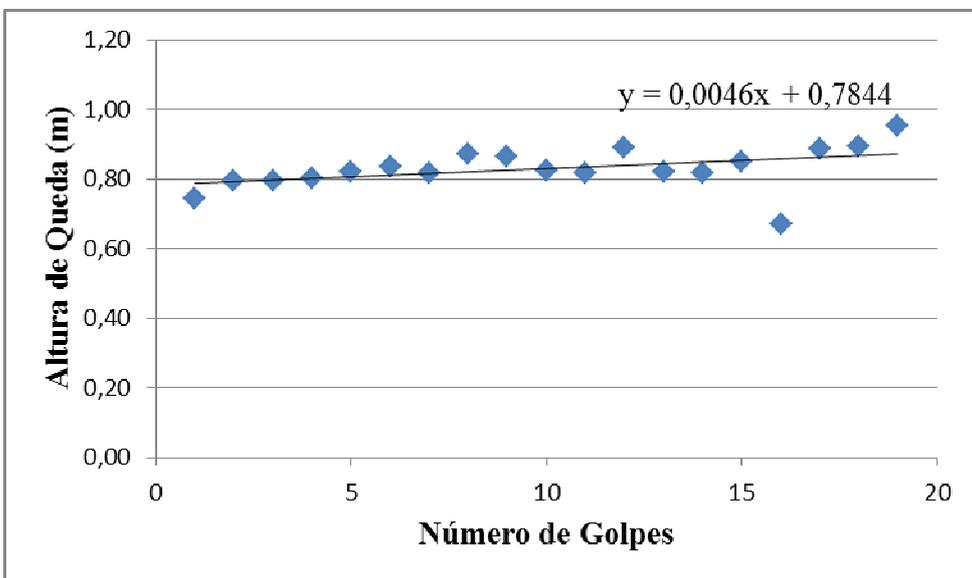


Figura 5.8 - Alturas de queda x Golpes da Sequência 8.

As equações das linhas de tendências mostram que sete das oito sequências apresentam coeficiente angular positivo. Esse fato revela uma forte tendência de se levantar o martelo acima da altura padronizada ao longo da aplicação dos golpes. Este comportamento corrobora os resultados obtidos por CAVALCANTE (2002) e SANTANA et al. (2012).

Além disso, todas as sequências, com exceção da Sequência 5, apresentam coeficiente angular positivo indicando uma tendência de aumento da altura de queda ao longo da sequência, comportamento já observado por SANTANA (2015).

Apenas a sequência 5 apresentou uma linha de tendência com o coeficiente angular negativo, que mostra a tendência da altura de queda diminuir ao longo da aplicação dos golpes. Cabe salientar que a sequência 5 teve somente três golpes.

Verificou-se em seqüências com 5 golpes ou mais um aumento significativo na altura de queda média, com exceção da seqüência 7 que apresentou, juntamente com a seqüência 5, a segunda menor altura de queda média, conforme Tabela 5.1 e Figura 5.9.

Tabela 5.1 – Número de golpes e altura de queda média e máxima para cada seqüência.

Seqüências	Número de golpes	Altura de queda média (m)	Altura de queda máxima (m)
1	5	0,87	0,96
2	2	0,71	0,75
3	8	0,77	0,85
4	15	0,87	0,97
5	3	0,69	0,75
6	4	0,68	0,70
7	18	0,69	0,73
8	19	0,83	0,95

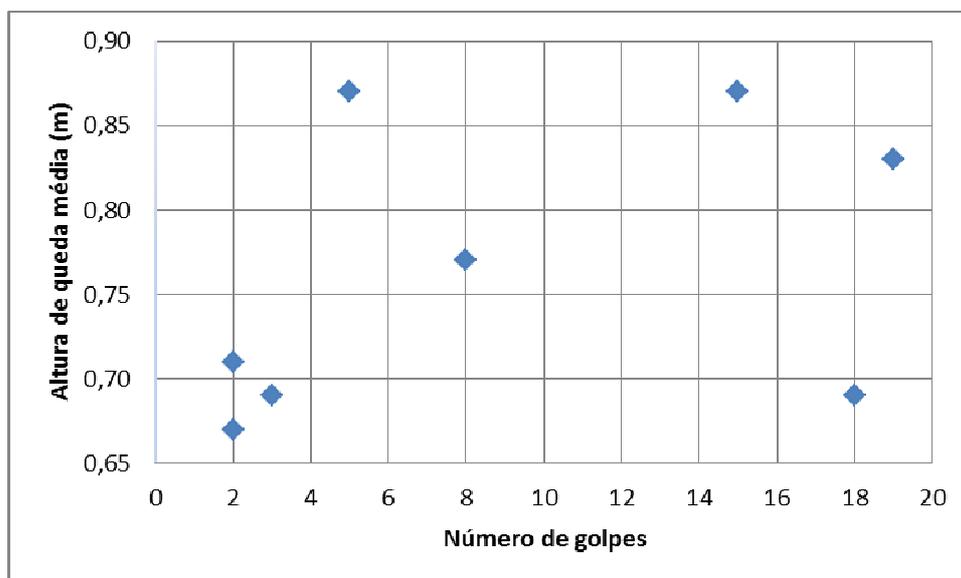


Figura 5.9 - Alturas de queda média pelo número de golpes de cada seqüência.

A Figura 5.10 apresentam as alturas de queda máximas de cada seqüência em função do número total de golpes de cada uma.

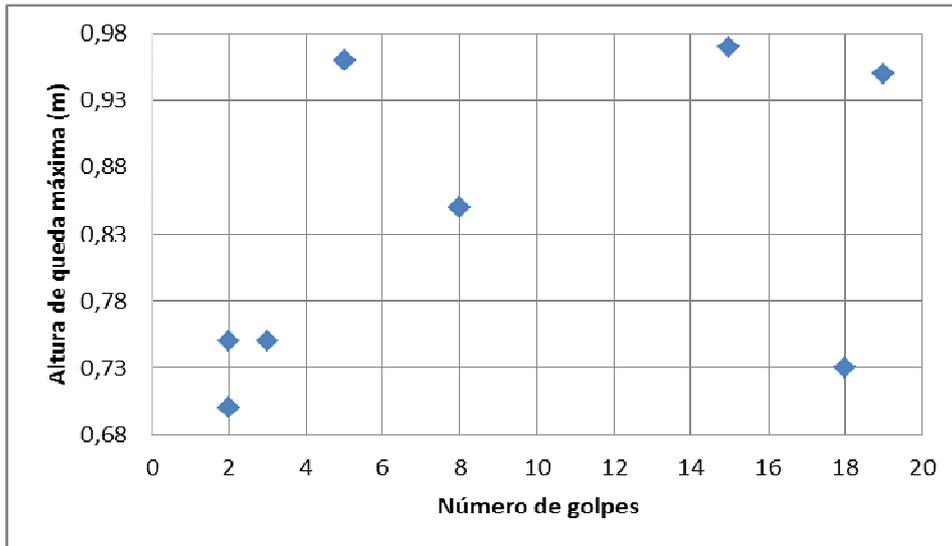


Figura 5.10 - Alturas de queda máxima pelo número de golpes de cada sequência.

De forma semelhante à Figura 5.9, na Figura 5.10 percebe-se maiores alturas de queda máximas para sequências com 5 golpes ou mais, com exceção da sequência 7. Desse modo, quanto menor o número de golpes, maiores são as chances de controlar a altura a que se levanta o martelo.

No item 3.2 deste trabalho é mencionado o trabalho de KOVACS (1979), que estudou a influência do aumento da velocidade do ensaio no aumento da altura de queda do martelo em um sistema automático com um martelo do tipo BORROS. Análise semelhante a esta será realizada logo a seguir.

A Tabela 5.2 apresenta o número de golpes, a altura de queda média e a respectiva frequência de golpes de cada sequência.

Tabela 5.2 – Sequências, horário de realização dos ensaios, número de golpes, altura de queda média, frequência.

Sequências	Horário de realização dos ensaios (h)	Nº golpes	Altura de queda média (m)	Frequência (golpes/min)
1	16-18	5	0,87	32,1
2	10-12	2	0,71	31,3
3	10-12	8	0,77	22,8
4	14-16	15	0,87	29,0
5	14-16	3	0,69	-
6	14-16	4	0,68	39,7
7	10-12	18	0,69	27,2
8	14-16	19	0,83	24,0

A campanha apresentou uma frequência média de ensaio de 29,4 golpes/min, um valor máximo de 39,7 golpes/min e um valor mínimo de 22,8 golpes/min. As séries com menores números de golpes foram as que apresentaram as maiores frequências e as com maiores números de golpes foi a que apresentaram as menores frequências. Este resultado foi coerente, pois para ensaios com maior número de golpes, neste trabalho acima de 8, a equipe de sondagem fica mais propícia ao cansaço.

O horário em que as sequências foram executadas parece não ter influenciado a altura de queda, posto que sequências executadas em diferentes horários apresentaram dispersões semelhantes em torno da altura de queda padrão.

Na Figura 5.11 são apresentados os valores da altura de queda média em função da frequência dos golpes.

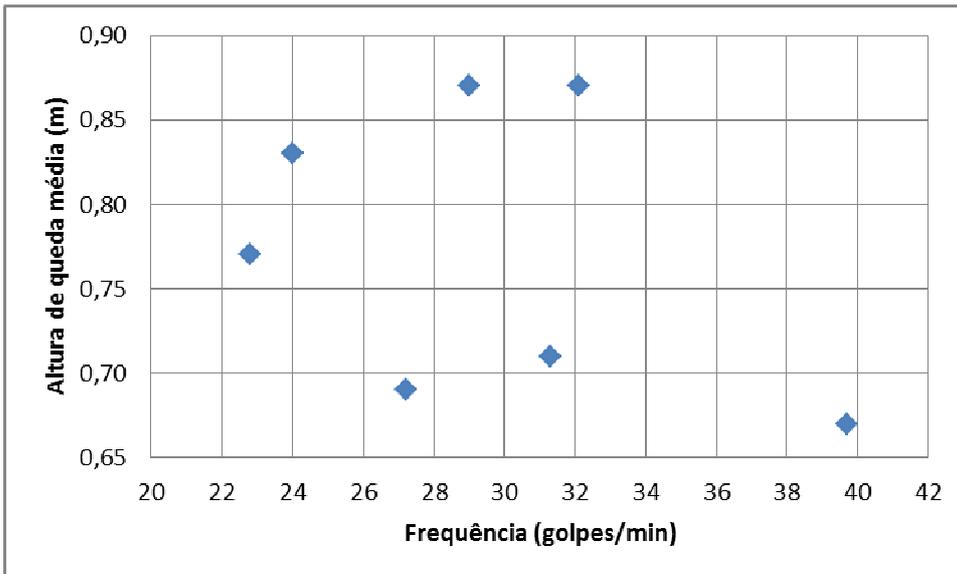


Figura 5.11 - Alturas de queda média pela frequência de golpes por minuto de cada sequência.

Através da análise do gráfico da Figura 5.11 não foi possível identificar uma tendência clara de variação da altura de queda em função da frequência, contrariando os resultados obtidos por KOVACS (1979). Entretanto, cabe salientar, que o sistema de levantamento utilizado por KOVACS (1979) era automático e o deste trabalho é um sistema manual de levantamento e soltura do martelo.

Assim como OLIVEIRA NETO (2013) fez, também foi plotado um gráfico de frequência média dos golpes versus o número de golpes (Figura 5.12). Em seu trabalho, OLIVEIRA NETO (2013) verificou 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. Neste trabalho, para as oito séries analisadas, verificou-se que há uma tendência de diminuição da frequência com o aumento do número de golpes para sequência com até N=8 golpes. Esse resultado pode estar relacionado ao cansaço da equipe de execução do ensaio. Exatamente o inverso verificado por OLIVEIRA NETO (2013). Entretanto, cabe ressaltar a diferença existente entre os sistemas de levantamento do martelo para o trabalho de OLIVEIRA NETO (2013) e para este trabalho. Para este, foi utilizado um sistema de levantamento manual do martelo e para aquele foi utilizado um sistema mecanizado de levantamento e soltura do martelo, com duas voltas em torno do tambor.

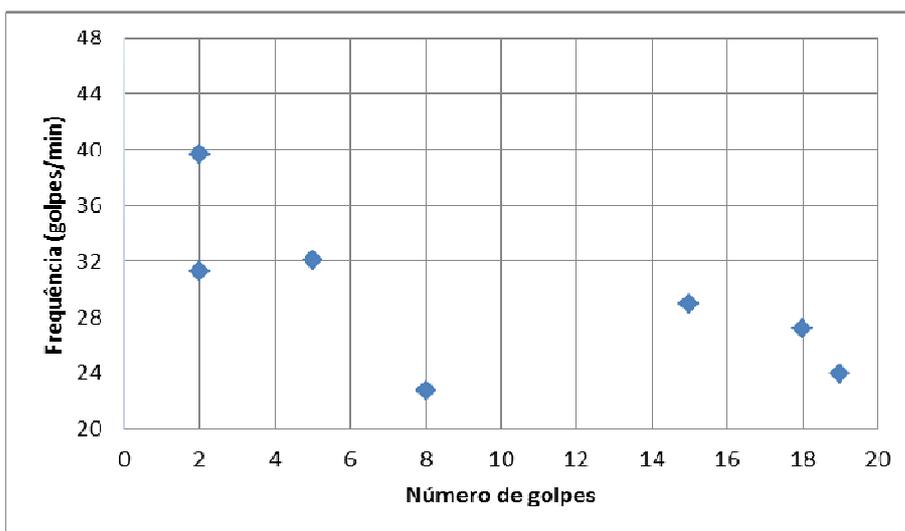


Figura 5.12 – Frequência média pelo número de golpes de cada sequência.

Com o objetivo de verificar a influência do aumento do número de golpes na diminuição da frequência de aplicação dos golpes e no controle da altura de queda do martelo foi elaborada a Tabela 5.3, semelhante à Tabela 5.2. Entretanto, foram analisados os cinco primeiros golpes, para as sequências com número de golpes acima de cinco, para que se pudesse verificar o comportamento mencionado acima e a influência do cansaço da equipe com o aumento do número de golpes.

Tabela 5.3 – Sequências, horário de realização dos ensaios, número de golpes máximos fixados em cinco, altura de queda média, frequência.

Sequências	Horário de realização dos ensaios (h)	Nº golpes	Altura de queda média (m)	Frequência (golpes/min)
1	16-18	5	0,87	32,1
2	10-12	2	0,71	31,3
3	10-12	5	0,75	24,4
4	14-16	5	0,85	32,6
5	14-16	3	0,69	-
6	14-16	4	0,68	39,7
7	10-12	5	0,68	31,7
8	14-16	5	0,79	28,5

Verificou-se que a frequência dos golpes e a altura de queda média para as quatro sequências que tiveram os cinco primeiros golpes analisados, as sequências 3, 4, 7 e 8, aumentaram e reduziram, respectivamente. Este resultado indica que o aumento do número de golpes faz com que a frequência de aplicação dos mesmos diminua por causa do cansaço da equipe que realizou o ensaio.

Verificou-se também que para essas quatro sequências, houve uma diminuição da altura de queda média entre 1 e 4 cm. Este resultado indica que quanto menor o número de golpes, mais fácil é para controlar a altura em que se ergue o martelo.

Foi realizada outra observação sobre a frequência de aplicação dos golpes agora em relação ao desvio padrão da altura de queda, conforme a Figura 5.13.

A partir do gráfico pode-se afirmar que o desvio padrão varia de 2,9 a 7,5 cm. Diferentemente dos resultados obtidos por OLIVEIRA NETO (2013), esses valores apresentaram grande variação. Isso se deve ao sistema de levantamento do manual do martelo, onde a dependência dos operadores para a correta altura de queda é muito grande (DANZIGER et al., 2008). Nesse sistema há uma grande tendência de variação de altura de queda com grande dispersão dos valores obtidos. Isso corrobora com a afirmação de OLIVEIRA NETO (2013) 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.

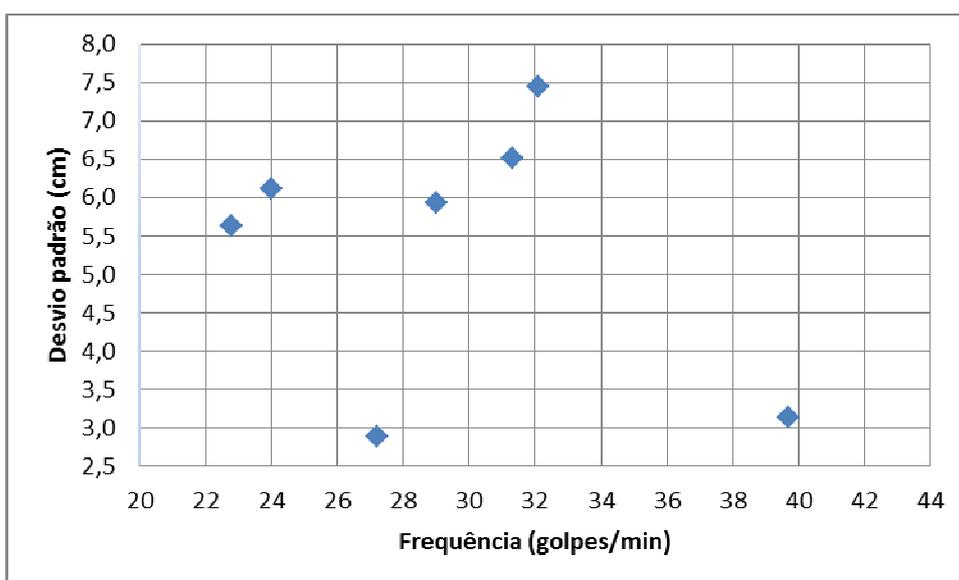


Figura 5.13 – Desvio padrão versus frequência de cada sequência

5.2 ANÁLISE DAS ENERGIAS, VELOCIDADE DE IMPACTO E OS FATORES DE EFICIÊNCIA e_1 E e_1^*

Para este trabalho foram analisadas oito sequências de SPT, totalizando 74 golpes. Essa análise teve como foco a medida dos valores de altura de queda (h) e velocidade de impacto do martelo SPT (V_{imp}). A partir disso, foi possível calcular a energia potencial de soltura do martelo (E_p) e a energia cinética de impacto (E_c), além dos fatores de eficiência e_1 e e_1^* . Também serão analisados a variação da altura de queda e seu comportamento para o sistema utilizado.

Na Tabela 5.4 são apresentados os números de golpes para a penetração dos 45 cm (N), a altura de queda média, a energia potencial e cinética média, a velocidade de impacto média, os fatores e_1 e e_1^* e a relação entre eles. Para esta tabela, nos valores da altura de queda, foram utilizados três dígitos para que seja possível entender porque alturas de queda iguais, quando são utilizados dois dígitos, possuem energias potenciais diferentes.

Tabela 5.4 – Resumo dos resultados das 8 sequências.

Sequência	N	$H_{queda}(m)$		$E_p(J)$		$E_c(J)$		$V_{imp}(m/s)$		$e_1 = E_c/E^*$	$e_1^* = E_c/E_p$	e_1/e_1^*
		M	DP	M	DP	M	DP	M	DP			
1	5	0,869	0,07	554,0	47,5	478,2	40,5	3,83	0,16	1,00	0,86	1,16
2	2	0,709	0,07	451,9	41,5	405,7	-	3,53	-	0,85	0,90	0,94
3	8	0,773	0,06	492,8	35,9	423,9	18,6	3,61	0,08	0,89	0,86	1,03
4	15	0,868	0,06	553,4	37,8	525,8	40,0	4,02	0,15	1,10	0,95	1,16
5	3	0,686	0,05	437,4	32,8	380,2	60,7	3,41	0,27	0,80	0,87	0,92
6	4	0,673	0,03	429,1	20,0	371,6	5,9	3,38	0,03	0,78	0,87	0,90
7	18	0,692	0,03	441,1	18,4	436,9	21,7	3,67	0,09	0,91	0,99	0,92
8	19	0,830	0,06	529,4	39,0	458,0	33,5	3,75	0,14	0,96	0,87	1,10

Sendo:

N= números de golpes das sequências;

M= média;

DP= desvio padrão;

E_p = energia potencial real do martelo em sua altura máxima de erguimento;

E_c = energia cinética do martelo no momento imediatamente anterior ao impacto;

V_{imp} = velocidade de impacto do martelo SPT.

A Figura 5.14 apresenta um gráfico semelhante ao feito por CAVALCANTE (2002), relacionando o percentual de golpes com a altura de queda, por faixas de valores. Porém este se refere aos golpes das 8 seqüências. Também foi plotado um gráfico semelhante ao feito por SANTANA (2015) com a distribuição de frequências de alturas de queda.

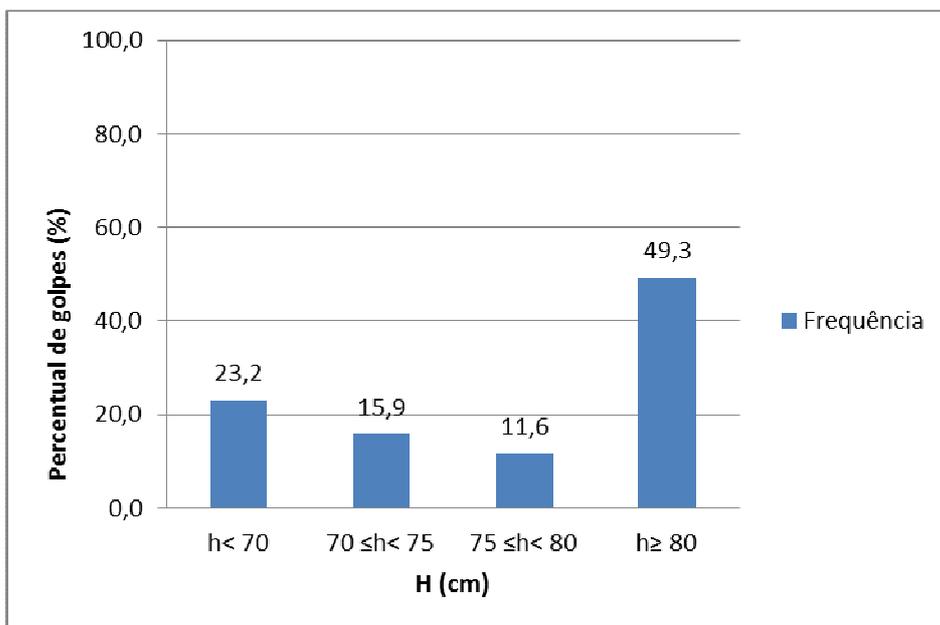


Figura 5.14 - Distribuição percentual dos golpes em função da altura de queda do martelo para as 8 seqüências de golpes do SPT.

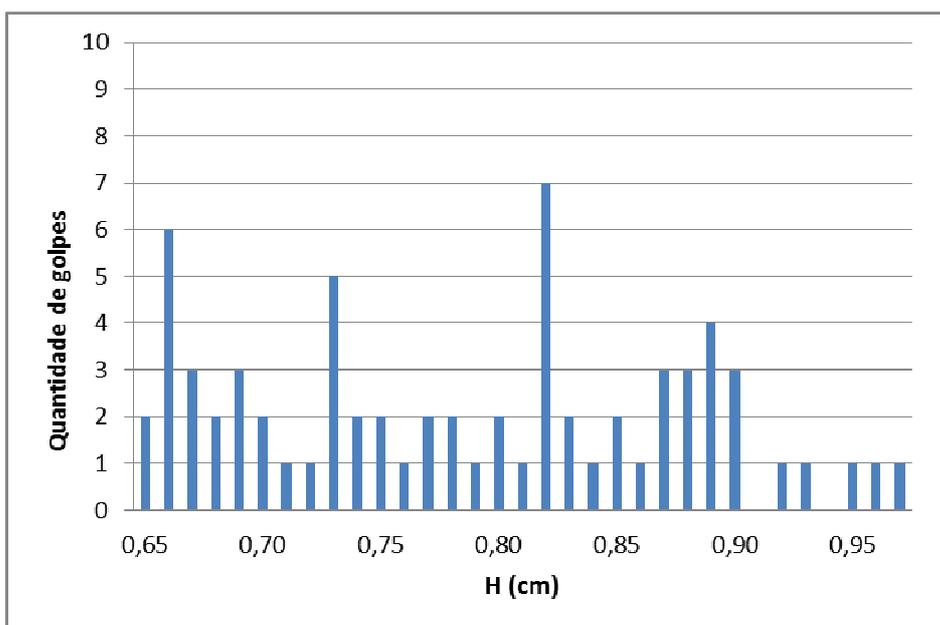


Figura 5.15 – Distribuição de frequências de alturas de queda.

Dos 69 golpes analisados, 23,2% dos golpes foram efetuados de uma altura de queda inferior a 70 cm. Em 15,9% dos golpes, o martelo foi levantado a uma altura de queda entre 70 cm e 74 cm. Esses dados informam que em 39,1% dos golpes o martelo foi levantado abaixo da altura de queda padrão. Em 11,6% dos golpes, o martelo foi levantado a uma altura de queda entre 75 cm e 79 cm, sendo que, em apenas 2,9% (2 golpes) o martelo foi erguido a 75 cm. Em 49,3% dos golpes, o martelo foi erguido acima de 80 cm. Conclui-se que 58,0% dos golpes foram executados de uma altura de queda superior a 75 cm.

A altura média considerando todos os golpes para as oito sequências foi de 79 cm com desvio padrão de 9 cm. Dentre os golpes analisados, a maior altura de queda foi de 97 cm e a menor foi de 65 cm.

Através da Tabela 5.4 pode-se visualizar que as sequências 1 e 4 foram as que apresentaram maior média de altura de queda, 87 cm, ou seja, 12 cm acima da altura de queda padronizada. Apresentaram um desvio padrão de 7 e 6 cm, respectivamente. A sequência 6 apresentou a menor altura de queda média, 68 cm, com desvio padrão de 4 cm. A sequência 3 apresentou a altura de queda média de 77 cm, que foi a mais próxima da altura de queda padrão. Esta sequência teve um desvio padrão de 6 cm. Observa-se também que das oito séries analisadas, metade apresentou altura de queda média acima da padronizada e a outra metade, abaixo. Isso demonstra que apesar de existir uma tendência dos operadores levantarem o martelo acima da altura de queda padronizada, eles também são influenciados pelo cansaço.

Como discutido anteriormente há uma diferença de 20 cm entre a série com a maior média de altura de queda e a com menor altura de queda média. Esses dados revelam como ensaio é influenciado diretamente pelos operadores. Tal fato provocou uma grande variação entre a energia potencial do martelo na iminência do processo de queda e fez com que esses valores ficassem muito discrepantes em relação à energia potencial teórica (478,24 J). As energias potenciais variaram entre 429,1 J e 554,0 J. Já as energias cinéticas variaram entre 371,6 J e 552,8 J. Desta forma, os valores de e_1 e e_1^* foram bastantes discrepantes. A Tabela 5.5 apresenta um resumo dos valores médios de e_1 , e_1^* e velocidade de impacto de alguns trabalhos presentes na literatura.

Tabela 5.5 – Comparação com outros resultados da literatura.

Autor	Sistema de levantamento do martelo	H_{queda} (m)	e₁	e₁*
DÉCOURT (1989)	Manual	-	0,80 - 0,90	-
CAVALCANTE et al. (2011)	Manual	0,79	0,74	0,70
SANTANA et al. (2012)	Manual	0,86	0,94	0,92
OLIVEIRA NETO (2013)	Mecanizado	0,76	0,73 – 0,89	0,73 – 0,87
SANTANA (2015)	Manual	0,76	0,87 – 1,08	0,91 - 0,96
SANTANA (2015)	Mecanizado	0,75	0,71 – 0,90	0,72 – 0,89
SILVA (2015)	Manual	0,79	0,78 – 1,10	0,86 – 0,99

Os valores de SANTANA (2015) analisados neste trabalho para o sistema manual de levantamento do martelo foram obtidos pela análise da Sondagem 2, realizadas no Campo Experimental de Sarapuí II, e para o sistema mecanizado, pela análise das sondagens realizadas na área portuária de Itaguaí.

Os valores de e_1 variaram entre 0,78 e 1,10. O valor médio de e_1 obtido a partir da média dos 69 golpes apresentou um fator de eficiência médio de 92%. Esse valor está bem acima do valor de CAVALCANTE et al. (2011) que foi de 74% obtidos durante a campanha complementar. Entretanto, esse valor está na faixa superior dos valores sugeridos por DÉCOURT (1989). Esse valor é próximo à eficiência obtida por SANTANA et al. (2012) e dentro da faixa obtida por SANTANA (2015) para o sistema manual de levantamento e soltura do martelo.

O fator de eficiência e_1 obtido por OLIVEIRA NETO (2013) variou de 73% a 89%. Calculando-se a eficiência média do fator e_1 nas 14 séries analisadas por ele, obteve-se um fator $e_1=80\%$, ou seja, valor bem abaixo do obtido neste trabalho. Vale ressaltar que este trabalho e o de OLIVEIRA NETO (2013), diferem-se pelo tipo de levantamento e soltura do martelo.

Contudo, o fator e_1 não representa a eficiência desta parte do ensaio e que no sistema brasileiro, onde o levantamento do martelo é feito manualmente, a dependência dos operadores para a aplicação da correta altura de queda é muito grande, fazendo com que influenciem de maneira significativa nos resultados do ensaio.

De fado, o fator e_1^* representa a eficiência desta parte do ensaio. Quando se analisa a eficiência das séries pelo fator e_1 desconsidera-se o valor real da altura de queda, desconsiderando-se a energia potencial empregada no ensaio. Isso resulta na obtenção de

eficiências subestimadas ou superestimadas. Pode-se perceber esse fato ao se analisar a Tabela 5.4.

Nas sequências 1, 3,4 e 8 o martelo foi levantado acima dos 75 cm. Nessas séries os valores de e_1 sempre foram superiores aos valores de e_1^* , isso porque o fator e_1 desconsidera, como mencionado anteriormente, que o martelo pode ser levantado a uma altura de queda superior a 75 cm, produzindo uma maior energia potencial. Nesses casos, a fixação da energia potencial teórica (478,24 J) atua como um fator que aumenta a eficiência do ensaio. Vide que para as sequências mencionadas o fator e_1 foi de 1,00, 0,89, 1,10 e 0,96, respectivamente.

O oposto ocorre quando o martelo é levantado abaixo de 75 cm. A fixação da energia potencial teórica atua como um limitador de eficiência do ensaio, visto que, a energia potencial e cinética de queda do martelo é menor. Assim, quando se compara a energia cinética do martelo com a energia de 478,24 J, obtêm-se valores menores dos que seriam encontrados quando se compara com a energia potencial real, vide as séries 2,5,6 e 7 na Tabela 5.4.

Os valores médios de e_1^* variaram entre 0,86 e 0,99. O valor médio de e_1^* deste trabalho foi de 0,90, considerando a média para os 69 golpes. Este valor é muito distante do obtido por CAVALCANTE et al. (2011) é muito próximo ao obtido por SANTANA et al. (2012) que foi de 0,92, está acima dos resultados obtidos por OLIVEIRA NETO (2013) e apresenta valores dentro da faixa obtida por SANTANA (2015). Embora os sistemas de levantamento e soltura do martelo seja o mesmo para este trabalho e os dois primeiros, os resultados obtidos por CAVALCANTE et al. (2011) devem ser vistos com cuidado, como mencionado no item 3.3, uma vez que o sondador responsável pelo ensaio, octogenário, possuía vastíssima experiência, e um grande orgulho de sua profissão, tendo trabalhado na antiga empresa Geotécnica (DANZIGER et al., 2008). Para ilustrar a excepcionalidade desses resultados, CAVALCANTE et al. (2011) relata que foram executados três ensaios, sendo que no primeiro deles que teve 22 golpes, recebeu uma atenção especial em relação à altura média de queda do martelo. Essa altura média foi de 78 cm, com desvio padrão de 1 cm. Em nenhum momento o martelo caiu de uma altura inferior a 75 cm. Depois foi pedido para que o grupo se comportasse mais naturalmente nas duas próximas séries, que tiveram 57 e 50 golpes, respectivamente. Embora a altura de queda média tenha aumentado somente 1 cm (79 cm), o desvio padrão foi mais elevado, aumentou para 3 cm. Esses resultados muito bons podem ser atribuídos à experiência do grupo e não podem ser considerados valores típicos da prática brasileira, entretanto, eles podem ser conseguidos na prática, observando os procedimentos e

cuidados apropriados que devem ser vistos como um objetivo a ser perseguido (CAVALCANTE et al., 2011).

As medições de velocidade imediatamente antes do impacto revelaram velocidades de queda média inferiores a 3,84 m/s em sete das oito sequências. Essa seria a velocidade para uma altura de queda de 75 cm. Contudo, ocorrem perdas de energia por atrito, ocorrendo desta forma, a redução da velocidade de impacto. Segue adiante a Tabela 5.6, onde são apresentadas as perdas, em porcentagem, da velocidade em relação à velocidade de impacto teórica (3,84 m/s) e as perdas em relação à velocidade de impacto considerando a altura de queda real de cada golpe ($v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$).

Tabela 5.6 - Valores Médios de altura de queda, velocidade de impacto e perdas de velocidade.

Seq.	Golpes	Alt.queda (m)	Desvio padrão (m)	Vel.imp. (m/s)	Desvio padrão (m/s)	Perdas (3,84 m/s)	Perdas ($\sqrt{2gh}$)
1	5	0,87	0,07	3,83	0,16	0,3%	7,3%
2	2	0,71	0,06	3,53	-	8,1%	5,4%
3	8	0,77	0,06	3,61	0,08	6,0%	7,1%
4	15	0,87	0,06	4,02	0,16	-4,7%	2,7%
5	3	0,69	0,06	3,41	0,27	11,2%	7,3%
6	4	0,68	0,04	3,38	0,03	12,0%	7,5%
7	18	0,69	0,03	3,67	0,09	4,4%	0,3%
8	19	0,83	0,06	3,75	0,13	2,3%	7,1%

As maiores perdas de velocidade foram apresentadas pela sequência 6, apresentando uma perda de 12,0%, quando comparado com a velocidade para a altura de queda teórica, e de 7,5%, quando comparada com a velocidade para a altura de queda real. Esses valores são satisfatórios quando comparados com os valores obtidos por OLIVEIRA NETO (2013) que obteve uma perda de velocidade máxima de 14,8%. Comparando esses valores com os de CAVALCANTE (2002) também se mostram razoáveis. Nas três séries analisadas por ele, com monitoramento de altura de queda e velocidade de impacto, onde o levantamento do martelo era realizado pelo sistema manual sem tambor, encontra para sua primeira série uma perda de velocidade da ordem de 14,3% considerando uma altura de queda padrão de 75 cm e

de 15,9% considerando-se a altura de queda média. Na segunda série, apresenta valores 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% (NETO, 2013).

CAVALCANTE (2002) menciona que as medições de velocidade de impacto realizadas por KOVACS et al. (1977), utilizando um sistema de “scanners”, com sistema de corda e tambor em rotação, mostraram perda de velocidade de até 34,3%. Ficou evidenciada a influência da idade da corda e do seu número de voltas no tambor. No trabalho de CAVALCANTE (2002), para duas voltas e utilizando corda velha, a perda de velocidade foi de 19,3%. Assim, como mencionado por CAVALCANTE (2002), não dá para comparar aqueles resultados com os obtidos neste trabalho, pelo fato do sistema utilizado nesta campanha não ser semelhante ao utilizado por KOVACS et al. (1977).

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

6.1. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram monitoradas oito sequências de ensaio SPT com o intuito de contribuir na compreensão da influência da altura de queda do martelo e as perdas de energia durante sua queda no processo de transmissão de energia às hastes. Com o objetivo de conhecer as perdas de energia durante o levantamento e soltura do martelo, foram medidas a energia potencial em cada golpe e a energia cinética na iminência do impacto.

A instrumentação utilizada composta por câmera de alta velocidade e mira topográfica apresentou resultados satisfatórios, com erros considerados insignificantes à análise. Entretanto, alguns vídeos apresentaram problemas, apresentando quadros onde não foi possível realizar a leitura da altura máxima de queda para alguns golpes.

A monitoração dos golpes para todas as sequências, totalizando 69 golpes apresentou os seguintes resultados: 58,0% dos golpes foram executados de altura de queda superiores a 75 cm. Em apenas 2,9% dos golpes o martelo foi levantado até a altura padrão, e 39,1% abaixo dela. Esses dados revelam a tendência do operador de levantar o martelo mais que a altura padrão.

A altura média para todos os 69 golpes analisados foi de 79 cm, com desvio padrão de 9 cm. Esses dados revelam a tendência do operador de levantar o martelo mais que a altura padrão, uma tendência já verificada por outras pesquisas, inclusive com outros sistemas SPT.

Todas as sequências, com exceção de uma, apresentaram a tendência do aumento da altura de queda ao longo da série.

Foi verificado também que nas séries com 5 golpes ou mais, houve um aumento significativo na altura de queda média, com exceção de uma. Quando analisados os 5 primeiros golpes das sequências com que possuem 5 golpes ou mais, foi verificado que houve uma diminuição da altura de queda média entre 1 e 4 cm. Constatou-se a ocorrência de maiores alturas de queda máximas para sequências com cinco golpes ou mais. Este resultado indica que quanto menor o número de golpes, maiores serão as chances de se controlar a altura em que se ergue o martelo.

Verificou-se que a frequência dos golpes e a altura de queda média para as quatro sequências que tiveram os cinco primeiros golpes analisados, as sequências 3, 4, 7 e 8, aumentaram e reduziram, respectivamente. Este resultado indica que o aumento do número de

golpes faz com que a frequência de aplicação dos mesmos diminua por causa do cansaço da equipe que realizou o ensaio

O desvio padrão médio variou de 2,9 a 7,5 cm. Esses valores apresentam variação bastante significativa. Tal fato se deve ao sistema de levantamento manual do martelo, onde a dependência dos operadores para a correta altura de queda é muito grande. Nesse sistema há uma enorme tendência de variação de altura de queda com grande dispersão dos valores obtidos. Foi constatado então 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.

A campanha apresentou uma frequência média de ensaio de 29,4 golpes/min, um valor máximo de 39,7 golpes/min e um valor mínimo de 22,8 golpes/min. A série com menor número de golpes foi a que apresentou a maior frequência e a com maior número de golpes foi a que apresentou a menor frequência. Quando analisados os 5 primeiros golpes das sequências com que possuem 5 golpes ou mais, foi verificado que houve um aumento da frequência média de aplicação dos golpes para essas séries. Este resultado foi coerente, pois para ensaios com maior número de golpes, a equipe de sondagem fica mais propícia ao cansaço.

O horário em que as sequências foram executadas parece não ter influenciado a altura de queda, posto que sequências executadas em diferentes horários apresentaram dispersões semelhantes em torno da altura de queda padrão.

Os valores de e_1 variaram entre 0,78 e 1,10. Esses valores foram bem próximos aos obtidos por SANTANA (2015) que variou entre 0,87 e 1,08. O valor médio, considerando todos os golpes, foi de 0,92. Esse valor foi muito próximo à eficiência obtida por SANTANA et al. (2012), que foi de 0,94. Entretanto, foi muito superior à eficiência obtida por CAVALCANTE (2002) durante sua campanha complementar e por OLIVEIRA NETO (2013) que foram de 0,74 e 0,80, respectivamente. Contudo, no trabalho de OLIVEIRA NETO (2013), o sistema de levantamento e soltura do martelo era mecanizado e neste trabalho foi o manual.

O valor médio do fator e_1^* , que representa a eficiência desta parte do ensaio, foi de 0,90, considerando a média para os 69 golpes analisados. Os valores médios de e_1^* variaram entre 0,86 e 0,99. A eficiência média foi muito próxima ao obtido por SANTANA et al. (2012) que foi de 0,92. O limite superior é bem maior que os valores apresentados por DÉCOURT (1989) e por OLIVEIRA NETO (2013), e extrapola os valores obtidos por SANTANA (2015), para o sistema manual de levantamento e soltura do martelo. Este

resultado foi muito superior ao obtido por CAVALCANTE (2011) que foi de 0,70, porém com a ressalva de que esse resultado foi obtido graças à experiência do grupo de sondadores e não podem ser considerados valores típicos da prática brasileira. Contudo, podem ser conseguidos na prática, observando os procedimentos e cuidados apropriados que devem ser vistos como um objetivo a ser perseguido. Isso mostra que no sistema brasileiro, em que o levantamento do martelo é feito manualmente, a dependência dos operadores para aplicação da correta altura de queda é muito grande (DANZIGER et al., 2008).

As maiores perdas médias de velocidade ocorreram na sequência 6, apresentando uma perda de 12,0%, quando comparado com a velocidade para a altura de queda teórica, e de 7,5%, quando comparadas com a velocidade para a altura de queda real. Esses resultados são considerados satisfatórios, pois CAVALCANTE (2002), em suas três séries onde foram monitorados a altura de queda e velocidade de impacto, encontrou uma perda máxima de velocidade de 14,3% em relação à velocidade teórica, e de 15,9% considerando a velocidade para a altura de queda média real. OLIVEIRA NETO (2013) encontrou uma perda máxima de velocidade de 14,8% nas duas situações mencionadas anteriormente.

6.2. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Realizar a medição da excentricidade do martelo em relação às hastes para analisar as perdas de energia por atrito do pino-guia com as hastes com o objetivo de tentar encontrar alguma correlação entre a perda de energia em função da excentricidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOU-MATAR, H. E GOBLE, G.G., 1997, “SPT Dynamic Analysis and Measurements”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering – ASCE –* vol. 123, n.10, pp. 921-928.
- AOKI, N., VELLOSO, D. A., 1975, “An approximated method to estimate the bearing capacity of piles. In: *Proceedings of the V Panamerican Conference on Soil and Foundation Engineering*”, Vol.5, p. 367 – 377, Buenos Aires.
- ALVES, A.M.L., 2004, *A influência da Viscosidade do Solo e do Tempo após a Cravação na Interação Dinâmica Estaca-solo em Argilas*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ASTM D1586, 1984, “Standard Method for Penetration Test and Split-Barrel Sampling of Soils”, In: *Annual Book of Standard*, Philadelphia.
- BELINCANTA, A., ALVIN, F.M., NAVAJA, S.S., RAMIRES SOBRINHO, R., 1984, “Métodos para Medida de Energia Dinâmica no SPT”. *Revista Solos e Rochas*, ABMS, v. 17, n. 2, pp. 93-110.
- BELINCANTA, A., 1985, *Energia Dinâmica no SPT – Resultados de uma Investigação Teórico-Experimental*. Dissertação de M.Sc., EPUSP, São Paulo, SP, Brasil.
- BELINCANTA, A., 1998, *Avaliação de Fatores Intervenientes no Índice de Resistência à Penetração do SPT*. Tese de D.Sc., EESC/USP, São Carlos, SP, Brasil.
- 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.
- BELINCANTA, A., DIONISI, A., MACHADO, J.R.A. et al., 1994a, “Medidas da Energia Dinâmica no Ensaio SPT, Sistema IPT”, In: *Anais do X COBRAMSEF*, vol. 1, pp. 507-514.
- BELINCANTA, A., NAVAJAS, S. e SOBRINHO, R.R., 1994b, “Métodos para Medida de Energia Dinâmica no SPT”, *Revista Solos e Rochas*, ABMS, vol 17, n. 2, pp. 93-110.
- BROMS, B.B & FLODIM, N., 1988, “History of Soil Penetration Testing”, In: *Proceedings of the Penetration Testing – ISOPT-1*, J. DE RUITER Ed., pp. 178-186, Orlando.
- BURLAND, J. B. AND BURBIDGE, M. C., 1985, “Settlements of Foundations on Sand and Gravel”, In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol. 78, Part 1, pp. 1329 – 1386.

- CAVALCANTE, E. H., 2002, *Investigação Teórico-Experimental sobre o SPT*. Tese de D.Sc, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- 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.
- CLAYTON, C.R.I., 1990, “SPT Energy transmission: Theory Measurement and Significance”, *Ground Engineering*, vol. 23, n. 10, pp. 35-43.
- 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”. In: *XIV COBRAMSEG*, pp. 2214-2224, Búzios.
- DÉCOURT, L.; QUARESMA, A. R., 1978, “Capacidade de carga de estacas a partir de valores do SPT.” In: *Anais do VI COBRAMSEF*, pp. 45–53, Rio de Janeiro.
- DÉCOURT, L., 1989, “The Standard Penetration Test – State of Art Report”. In: *XII ICSMFE*, vol. 4, Rio de Janeiro.
- FLETCHER, G.F.A., 1965, “Standard Penetration Test: Its Uses and Abuses”, *Closure at Discussion, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, vol.93, n. SM3, p.159.
- FRANCISCO, G. M., 2004, *Estudo dos Efeitos do Tempo em Estacas de Fundação em Solos Argilosos*. Tese de D.Sc., COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- GOBLE, G.G. & RUCHTI, P., 1981, *Measurements of Impact Velocity on Penetration Testing Systems*, Report, Department of Civil, Enviromental, and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder, C.O., October (citados por RIGGS et al., 1983).
- HOWIE, J.A., DANIEL, C.R., JACKSON, R.S. and WALKER, B., 2003, *Comparison of energy measurement methods in the standard penetration test*, Report prepared for the U.S. Bureau of Reclamation. Geotechnical Research Group, Department of Civil Engineering. The University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- HVORSLEV, M.J., 1949, “Sampling Methods and Requirements”, *Subsurface Exploration and Sampling of Soils for Civil Engineering Purpose*, 1 ed., Chapter 4, Vicksburg, Mississipi, USA, Waterways Experiment Station.

- IRELAND, H.O., 1966 , Discussion of “standard penetration test: its uses and abuses”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, v.92, n.SM2, p. 189-190.
- IRELAND, H.O., MORETTO, O. & VARGAS, M., 1970, “The Dynamic Penetration Test: A Standard that is not Standardized”, *Géotechnique*, vol. 20, n. 2, pp. 185-192.
- ISSMFE, 1989, *International Reference Test Procedure for the Standard Penetration Test (SPT)*, In: Report of the ISSMFE – TC 16 – Technical Committee on Penetration Testing of Soils, with Reference Test Procedures – CPT – SPT – DP – WST – pp. 17-19.
- JANNUZI, G.M.F., 2009, *Caracterização do Depósito de Solo Mole de Sarapuí II Através de Ensaio de Campo*, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- KOVACS, W.D., EVANS, J.C. & GRIFFITH, A.W., 1975, “A Comparative Investigation of the Mobile Drilling Company’s Safe-T-Driver with the Standard Cathead with Manila Rope for the Performance of the Standard Penetration Test”, *Report of the Geotechnical Engineering*, Purdue University, W. Lafayette, August, 127p. (citados por KOVACS et. al., 1977).
- KOVACS, W.D., EVANS, J.C. & GRIFFITH, A.H., 1977, “Towards a More Standardized SPT”, In: *Proceedings of the IX ICSMFE*, vol.2, pp. 269-276, Tokyo.
- KOVACS, W.D., GRIFFITH, A.H. & EVANS, J.C., 1978, “An Alternative to the Cathead and Rope for the Standard Penetration Test”, *Geotechnical Testing Journal*, vol. 1, n. 2, pp. 72-81.
- KOVACS, W.D., 1979, “Velocity Measurement of Free-Fall SPT Hammer”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division – ASCE – vol. 105, n. GT1, pp. 1-10.*
- KOVACS, W.D., 1981, “Results and Interpretation of SPT Practice Study”, *Technical Note on Geotechnical Testing Journal – ASTM – vol. 4, n. 3, pp. 126-129.*
- KOVACS, W.D. & SALOMONE, L.A., 1982, “SPT Hammer Energy Measurement”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division – ASCE – vol. 108, n. GT4, pp. 599-620.*
- KULHAWY, F.H. e MAYNE, P.W., 1990, “Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design”, *Electric Power Research Institute*, EPRI EL-6800, pp. 4-53 à 4-56.
- LOBO, B.O., 2009, Mecanismo de penetração dinâmica em solos granulares, Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

- LOPES, M.S., 2008, *Avaliação da eficácia energética no ensaio SPT*, Dissertação de M.Sc., Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- LUKIANCHUKI, J. A., 2012, *Interpretação de resultados do ensaio SPT com base em instrumentação dinâmica*, Tese de D.Sc, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos.
- MATSUMOTO, T., SIKIGUSHI, H. & YOSHIDA, H., 1992, “Significance of Two Point Strain Measurement in SPT”, *Soils and Foundation – JSSMFE* – vol. 32, n. 2, pp. 67-82.
- MELLO, V.F.B., 1971, “The Standard Penetration Test”, In: *Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 4, Porto Rico. Proceedings, v. 1, pp. 1-87.
- MORGANO, C.M. & LIANG, R., 1992, Energy Transfer in SPT – Rod Length Effect, In: *Proceedings of the fourth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*, vol. 1, pp. 121-127, Netherlands.
- NAKAO, R., 1981, *Aplicação da Equação da Onda na Análise do Comportamento de Estacas Cravadas*, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- NBR 6484/2001, “Solo – Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT – Método de Ensaio” – ABNT, 17p.
- NEVES, L. F. S., 2004, *Metodologia para a Determinação da Eficiência do Ensaio SPT Através de Prova de Carga Estática Sobre o Amostrador Padrão*, Dissertação de M.Sc., Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, Brasil.
- NIXON, I.K., 1982, “Standard Penetration Test State-of-the-Art Report”, In: *Proceedings of the ESOPT-2, Penetration Testing*, vol.1, p.3-24, Amsterdam.
- ODEBRECHT, E., 2003, *Medidas de Energia no Ensaio SPT*, Tese de Doutorado, PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- OLIVEIRA NETO, M. D. de, 2013, *Análise da altura de queda e perdas de energia durante a queda do martelo no ensaio SPT*, Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- PALACIOS, A., 1977, *Theory and Measurements of Energy Transfer During Standard Penetration Test Sampling*, Ph.D. Thesis, University of Florida, Gainesville, USA.

- RIGGS, C.O., SCHMIDT, O.N. & RASSIEUR, C.L., 1983, “Reproducible SPT Hammer Impact Force with an Automatic Free Fall SPT Hammer System”, *Geotechnical Testing Journal* – ASTM – vol. 6, n. 3, pp. 201-209.
- ROBERTSON, P.K., CAMPANELLA, R.G. and WIGHTMAN, A., 1983, “SPT-CPT Correlations”. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 109(11): 1449-1459.
- SANTANA, C.M., 2011, *SPT Instrumentado em Câmara de Calibração*, Exame de Qualificação Acadêmica para obtenção do título de D.Sc, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SANTANA, C.M., DANZIGER, F.A.B. & DANZIGER, B.R., 2012, “The Measurement of Energy Reaching the Sampler in SPT”, *ISC 4*, Porto de Galinhas, Pernambuco, Brasil.
- SANTANA, C.M., 2015, SANTANA, C.M., 2011, *SPT Instrumentado em Câmara de Calibração*, Tese de D.Sc, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SCHMERTMAN, J.H., 1970, “Static Cone to Compute Settlement over Sand”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division* – ASCE – vol. 96, n.SM3, p.1011 – 1043.
- SCHMERTMAN, 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 (citado por SCHMERTMAN, 1978).
- SCHMERTMAN, J.H., SMITH, T., HO, R., 1978, “Example of an energy calibration report on a standard penetration test (ASTM standard D 1586-67) drill rig. *Geotechnical testing Journal*, American society for testing and materials, Vol. 1, N^o1, p.57 – 61.
- SCHMERTMAN, J.H. & PALACIOS, A., 1979, “Energy Dynamics of SPT”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division* – ASCE – vol. 105, n.GT8, pp. 909-926.
- SCHNAID, F., 2000, *Ensaio de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações*. 1 ed. São Paulo, Oficina de Textos.
- TERZAGHI, & PECK, R. B., 1948, “Soil Exploration”, *Soils Mechanics in Engineering Practice*, 1^a ed., Chapter 7, New York, John Willey & Sons, Inc.
- VARGAS, M., 1989, “Heritage Lecture: Soil Mechanics in Brazil”, In: *Proceedings of the XII ICSMFE*, vol. 4, pp. 2289-2299, Rio de Janeiro.

VELLOSO, D.A. e LOPES, F.R. 2004, *Fundações, Nova edição, São Paulo, Oficina de Textos.*