

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MATHEUS EDUARDO LUZA

**ESTUDO DA ENERGIA NO SPT MANUAL POR MEIO DA INTERPRETAÇÃO DE
VÍDEO EM ALTA VELOCIDADE**

TOLEDO-PR

2022

MATHEUS EDUARDO LUZA

**ESTUDO DA ENERGIA NO SPT MANUAL POR MEIO DA INTERPRETAÇÃO DE
VÍDEO EM ALTA VELOCIDADE**

Study of energy in manual SPT by high-speed video interpretation

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Guilherme Alan Souza Costa.

TOLEDO

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

MATHEUS EDUARDO LUZA

**ESTUDO DA ENERGIA NO SPT MANUAL POR MEIO DA INTERPRETAÇÃO DE
VÍDEO EM ALTA VELOCIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 24/novembro/2022

Guilherme Alan Souza Costa
Mestre em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Toledo

Gustavo Savaris
Doutor em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Toledo

Marcello Antonio Alves Talarico
Doutor em Física
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Toledo

TOLEDO

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, pais e irmão, pelo suporte e companheirismo destinado a mim durante toda a graduação. Aos meus pais, especialmente, pelos valores morais e confiança depositados para que eu pudesse finalizar esta etapa.

Agradeço ao meu orientador, Professor Me. Guilherme Alan Souza Costa, pelo esforço, crédito e excelente trabalho fornecido durante a orientação, o qual possibilitou que eu realizasse este trabalho de maneira adequada.

Ainda, agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, em especial ao Câmpus Toledo, pelo brilhante serviço de educação fornecido e, acima de tudo, gratuito.

Não poderia também deixar de agradecer a todos os professores que dedicaram seu tempo em compartilhar seus conhecimentos viabilizando uma formação apropriada.

Ainda, agradeço a todas as pessoas que, de alguma maneira, me influenciaram positivamente durante esta etapa e em especial aos amigos mais próximos que fiz na universidade, os quais fizeram toda esta etapa ser executada sem maiores dificuldades.

RESUMO

O SPT como ensaio amplamente empregado nacionalmente para obtenção de dados para projetos de fundações tem sido alvo de críticas quanto à sua confiabilidade devido às variedades, de equipamentos e procedimentos de execuções. Apesar do profundo conhecimento carregado por anos junto ao ensaio, os resultados obtidos podem ser ainda melhor assimilados com o entendimento das energias envolvidas, desencadeando ainda, possibilidades de interpretação dos resultados. A partir disso, este trabalho tem por objetivo geral, analisar a energia potencial máxima do martelo tipo pino guia manual e a energia cinética na iminência de impacto do martelo com a composição de hastes, definindo o fator de eficiência e_1 . Para isso, foram avaliados utilizando o *software* livre Tracker, no total, 332 golpes de três ensaios diferentes provindos de duas fontes de filmagem em alta velocidade diferentes, uma Casio EX-FH20 e um *smartphone*. Nestes golpes foram determinadas a altura de queda e velocidade de impacto para cumprimento do objetivo geral. A partir das análises, a filmadora apresentou altura de queda média de 87,09 cm e o *smartphone* 91,01 cm, com 7,63 cm e 6,57 cm de desvio padrão, respectivamente. As energias potenciais determinadas foram de 555,34 J para a filmadora e 580,32 J para o *smartphone*, sendo que somente 20,63% dos golpes para a filmadora, apresentaram energia potencial dentro dos limites normatizados, para o *smartphone* todos os golpes tiveram energia potencial superior a esse limite. As velocidades na iminência do impacto foram de 3,72 m/s para a filmadora e 3,91 para o *smartphone*, sendo que a filmadora demonstrou perda de 3,11% e o *smartphone* ganho de 1,89% em relação a velocidade normatizada. Ainda, notou-se dispersão dos resultados para o *smartphone* no ensaio 1. As respectivas energias cinéticas são de 452,26 J para a filmadora e 497,99 J para o *smartphone*, em média, apresentando desvio padrão de 58,98 J e 64,95 J respectivamente. O fator e_1 determinado, apresentou média de 0,95 para a filmadora e 1,04 para o *smartphone*, entretanto, quando utilizado a energia potencial real, o fator e_{1*} reduz e passa a ser de 0,88 para ambas as fontes de filmagem, tendo desvio padrão de 0,09 para a filmadora e 0,11 para o *smartphone*. Adicionalmente, foram observados pontos importantes para a viabilidade do uso de *software*, entre ele estão obstáculos que cruzam a trajetória do martelo, como sombras e mangueiras que podem impossibilitar a análise, bem como a filmagem de frente para o sol. Ainda, outro fator importante é uma pequena variação que pode ocorrer na determinação da altura de queda devido ao ângulo de filmagem, agravado nas filmagens do *smartphone*. Por fim, o método de análise demonstrou-se bastante consistente e eficaz, demonstrando-se válido, para ambas as fontes de filmagem, como um método prático de acompanhamento do SPT.

Palavras-chave: energia; SPT; eficiência; velocidade de impacto.

ABSTRACT

The SPT as a test widely used nationally to obtain data for foundation projects has been the target of criticism regarding its reliability due to the varieties, of equipment and execution procedures. Despite the deep knowledge carried by years with the test, the results obtained can be even better assimilated with the understanding of the energies involved, also triggering possibilities of interpretation of the results. From that, this work has as a general objective, to analyze the potential energy of the guide pipe hammer and the kinetic energy in the imminence of impact of the hammer with the assembly rods, defining the efficiency factor e_{1^*} . For that, a total of 332 blows from three different trials coming from two different high-speed filming sources, a Casio EX-FH20 and a smartphone, were evaluated using the free Tracker software. On these strokes, the drop height and impact velocity were determined to fulfill the overall objective. From the analyses, the camcorder showed an average drop height of 87.09 cm and the smartphone 91.01 cm, with 7.63 cm and 6.57 cm standard deviation, respectively. The potential energies determined were 555.34 J for the camcorder and 580.32 J for the smartphone, and only 20.63% of the hits for the camcorder presented potential energy within the standardized limits, for the smartphone all hits had potential energy above this limit. The speeds at the imminence of impact were 3.72 m/s for the camcorder and 3.91 m/s for the smartphone, with the camcorder showing a loss of 3.11% and the smartphone a gain of 1.89% in relation to the standardized speed. In addition, the results for the smartphone were scattered in test 1. The respective kinetic energies are 452.26 J for the camcorder and 497.99 J for the smartphone, on average, with standard deviations of 58.98 J and 64.95 J respectively. The factor e_1 determined, presented an average of 0.95 for the camcorder and 1.04 for the smartphone, however, when the real potential energy is used, the factor e_{1^*} reduces and becomes 0.88 for both filming sources, with a standard deviation of 0.09 for the camcorder and 0.11 for the smartphone. Additionally, important points for the feasibility of using software were observed, among them are obstacles crossing the hammer's trajectory, such as shadows and hoses that may make analysis impossible, as well as filming facing the sun. Yet another important factor is a small variation that can occur in the determination of the fall height due to the angle of filming, aggravated in smartphone filming. Finally, the analysis method proved to be very consistent and effective, proving to be valid, for both filming sources, as a practical method of monitoring SPT.

Keywords: SPT energy; SPT; efficiency in SPT; impact velocity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Etapas SPT	15
Figura 2 - Fator e_1^* em função do sistema de levantamento.....	19
Figura 3 - Fator e_2 em função da massa da cabeça de bater	20
Figura 4 - Martelo na altura de queda e momento de impacto	22
Figura 5 - Taxas de filmagem de 60, 30 e 15 qps em ordem de cima para baixo respectivamente	24
Figura 6 - Calibração da cena no Tracker	28
Figura 7 - Exemplo de modelo e correspondência para trajetória automática	28
Figura 8 - Processo de análise em andamento	29
Figura 9 - Evolução da velocidade para o objeto em queda	30
Figura 10 - Instantes a serem analisados	31
Figura 11 - Esquema de SPT do tipo pino guia.....	32
Figura 12 - Cabeça de bater na esquerda e martelo pino guia na imagem central e da direita.....	33
Figura 13 - Alturas de queda registradas pela filmadora	35
Figura 14 - Alturas de queda registradas pelo smartphone.....	35
Figura 15 - Martelo em queda com a corda tensionada	37
Figura 16 - Relação velocidade x altura de queda e desvio padrão – Ensaio 1	38
Figura 17 - Relação velocidade x altura de queda – Ensaio 2	39
Figura 18 - Relação velocidade x altura e desvios padrões – Ensaio 2	39
Figura 19 - Relação velocidade x altura de queda – Ensaio 3	40
Figura 20 - Relação velocidade x altura de queda e desvios padrões - Ensaio 3	40
Figura 21 - Distribuição do fator e_1^* para a filmadora	43
Figura 22 - Distribuição do fator e_1^* para o smartphone	43
Figura 23 - Obstáculos para rastreamento	44
Figura 24 - Cena prejudicada pela iluminação	44
Figura 25 - Variação da altura de queda	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Médias e desvios padrões das alturas de queda	34
Tabela 2 - Médias e desvios padrões das energias potenciais	36
Tabela 3 - Médias e desvios padrões das velocidades	36
Tabela 4 - Médias e desvios padrões para energia cinética	41
Tabela 5 - Médias e desvios padrões para o fator e1	41
Tabela 6 - Médias e desvios padrões para o fator e1*	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Justificativa	11
1.2	Objetivos	11
1.2.1	Objetivo geral	11
1.2.2	Objetivos específicos.....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	Contexto histórico do SPT	13
2.2	Procedimento do SPT	14
2.3	Tipos de Sistemas SPT	15
2.4	Energia no SPT	16
2.4.1	Energia que atinge a composição de hastes, <i>E_i</i>	17
<u>2.4.1.1</u>	<u>Fator de correção <i>e</i>₁</u>	<u>18</u>
<u>2.4.1.2</u>	<u>Fator de correção <i>e</i>₂</u>	<u>19</u>
<u>2.4.1.3</u>	<u>Fator de correção <i>e</i>₃</u>	<u>20</u>
<u>2.4.1.4</u>	<u>Fator de correção <i>e</i>₄</u>	<u>20</u>
2.5	Física da queda livre	21
2.6	Métodos da determinação da energia	23
2.6.1	Câmera de alta velocidade	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1	Câmeras	26
3.2	Software livre Tracker	27
3.2.1	Processo de utilização do Tracker.....	27
3.3	Processamento dos dados	30
3.4	SPT manual com martelo pino guia	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1	Altura de queda e energia potencial	34
4.2	Velocidade de queda e energia cinética	36
4.3	Fator <i>e</i>₁	41
4.4	Análise das filmagens	43
5	CONCLUSÃO	46
6	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	47
	REFERÊNCIAS	48
	APÊNDICE A – VALIDAÇÃO DO SOFTWARE TRACKER	50

1 INTRODUÇÃO

É de conhecimento geral a importância da investigação do subsolo para a geotecnia assim como para a engenharia civil, tendo em vista que a partir dessa são conhecidos o perfil estratigráfico e propriedades do solo. Para isso, o mais convencional é que sejam realizados ensaios “*in situ*”, dos quais se destaca o SPT (*Standard Penetration Test*), ainda mais no cenário nacional, dado pela sua robustez, simplicidade na execução e ainda, o baixo custo envolvido (DÉCOURT, 1989).

Contudo, apesar do ensaio manual carregar consigo um grande conhecimento empírico adquirido durante todo o tempo de sua utilização e possuir parâmetros normatizados pela NBR 6484 (ABNT, 2020), a dependência de um operador, as adaptações fora de norma em procedimentos e uma variedade muito grande de equipamentos fazem com que o SPT se torne vítima de crítica quanto à confiabilidade dos seus resultados. Ainda, mesmo com todo o conhecimento em campo acumulado, as assimilações dos resultados N_{spt} para critérios de projetos geotécnicos podem ser ainda melhoradas com o entendimento das energias envolvidas, desencadeando possibilidades de interpretação dos resultados.

Dessa maneira, iniciou-se nos anos 70, por Schmertmann e Palacios (1979), pesquisas voltadas ao estudo da energia do SPT com a finalidade de entender a ligação da energia aplicada nas hastes com os números de golpes necessários para que o amostrador penetre os 30cm finais. Os estudos buscaram associar os fatores envolvidos no processo de cravação, que pudessem interferir na transferência de energia à composição de hastes, como levantamento e soltura do martelo e partes mecânicas que compunham o ensaio. Nesse momento, as avaliações dos ensaios eram voltadas a padronizar o resultado para um valor que pudesse ser adotado internacionalmente, o qual foi considerado como 60% da energia teórica potencial do martelo na altura de queda (ISSSMFE, 1988).

Mais recentemente, com o objetivo de melhorar a credibilidade do ensaio, houve pesquisas que analisaram a energia que atinge o amostrador posicionado na ponta da composição de hastes e dentre elas está a de Santana e Danziger (2016) com o uso de equipamentos como o *SPT Analyzer*, capaz de registrar as grandezas de força e velocidade nas hastes, e a câmera de alta velocidade para a determinação

de altura de queda e velocidade do martelo, como feito por Cavalcante, Danziger e Danziger (2011).

Assim, nesse mesmo cenário, este trabalho aborda a determinação de algumas das energias envolvidas no SPT, sendo elas a potencial e a cinética, a partir de gravações e posterior determinação da posição do martelo ao longo do tempo durante os golpes.

1.1 Justificativa

As principais razões para que o SPT tenha seu uso propagado há décadas são o baixo custo e dependência de poucos operadores, entretanto, mesmo normatizado, nem sempre o SPT possui a sua execução e equipamentos de acordo com os preconizados por norma (SANTANA; DANZIGER, 2016).

Portanto, faz-se importante o acompanhamento do ensaio para validação dos resultados, além de que, com o entendimento das energias envolvidas é possível novos meios para entendimento das propriedades do solo.

Também, o entendimento das energias no SPT colabora para a uniformização do número N para 60% da energia potencial teórica, tendo em vista que com a determinação das energias é possível estimar as perdas que ocorrem no processo e melhorar a compreensão dos resultados.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho busca analisar no SPT a energia potencial no momento de soltura do martelo e a energia cinética até o momento imediatamente anterior ao impacto do martelo no conjunto de hastes por meio de vídeos capturados por duas fontes distintas.

1.2.2 Objetivos específicos

Para que seja possível realizar as análises mencionadas anteriormente, os seguintes procedimentos são realizados:

1. Analisar em vídeo o deslocamento do martelo ao longo do tempo através do programa *Tracker*.
2. Determinar a altura de queda do martelo e a Energia Potencial disponível em função de tal altura.
3. Determinar a velocidade de queda do martelo imediatamente antes do impacto e a Energia Cinética respectiva.
4. Comparar as energias potenciais teórica e disponível real.
5. Comparar energia potencial real e energia cinética com objetivo de determinar a eficiência.
6. Comparar os resultados de cada fonte de gravação entre si e com os valores esperados.
7. Verificar a viabilidade do emprego desta técnica de monitoramento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Contexto histórico do SPT

O SPT (*Standard Penetration Test*), nacionalmente identificado como Sondagem de simples reconhecimento pela NBR 6484 (ABNT, 2020), foi introduzido com sondagens de exploração realizadas primordialmente pelo engenheiro Charles R. Gow em 1902. A princípio, o objetivo era a obtenção de amostras do tipo seca, *Dry Sample*, diferente daquelas que eram realizadas até o momento por circulação de água, as quais não resultavam em uma boa demonstração do tipo de solo e muito menos de suas propriedades. Inicialmente, as sondagens de simples reconhecimento consistiam-se na cravação dinâmica de um tubo metálico oco com diâmetro nominal e comprimento, respectivamente de 2,54 cm e 45 cm.

Os golpes eram aplicados com o uso de um martelo de queda que possuía massa de aproximadamente 50 kg (ROGERS, 2006; BELINCANTA, 1998). Entretanto, apesar dos dados em relação ao equipamento, o procedimento não possuía registro quanto ao controle da execução como em relação à cravação e altura de queda do martelo por exemplo, portanto, não se pode definir, já nesse período, o SPT como um ensaio (BELINCANTA, 1998).

Várias foram as modificações sofridas pelo ensaio, sendo que o primeiro amostrador bipartido, modelo utilizado até hoje, que permite a extração do solo para caracterização, foi inserido em meados dos anos 1920 por Sprague e Henwood, em nome da *Inc., of Scranton, PA*, fabricado em vários diâmetros desde 5,1 cm até 8,9 cm. (ROGERS, 2006). Entretanto, em 1927, Harry Mohr desenvolveu um novo amostrador bipartido, agora com 5,08 cm de diâmetro o qual foi adotado por Karl Terzaghi em 1947, tendo em vista todos os dados relacionados aos solos coletados por Mohr (ROGERS, 2006; SELVAM; MUKUNDAN; ALAGIRISAMY, 2020).

Apesar de todas as alterações ocorridas ao longo dos anos nas partes que compõem o SPT, a contagem no número de golpes iniciou-se somente em 1954 por James D. Parsons da Moran, Proctor, Freeman, and Mueser em Nova Iorque, com o descarte dos primeiros 15 cm e contagem dos últimos 30 cm como o número N_{spt} . A partir daí, Terzaghi e Mohr iniciaram os estudos de correlação do N_{spt} com as propriedades do solo, tais como coesão e consistência por exemplo, e perto de 1960

começaram a ser publicados estudos que estimavam a resistência do solo baseado no número N (ROGERS, 2006; SELVAM, MUKUNDAN; ALAGIRISAMY, 2020).

Com isso, o SPT foi se padronizando e passou a ser adotado por vários países e normatizado, por exemplo, em 1958, pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*) como *ASTM Standard D 1568-84* e 30 anos depois aceito pela *International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Nacionalmente, o SPT está padronizado na NBR 6484 (ABNT, 2020).

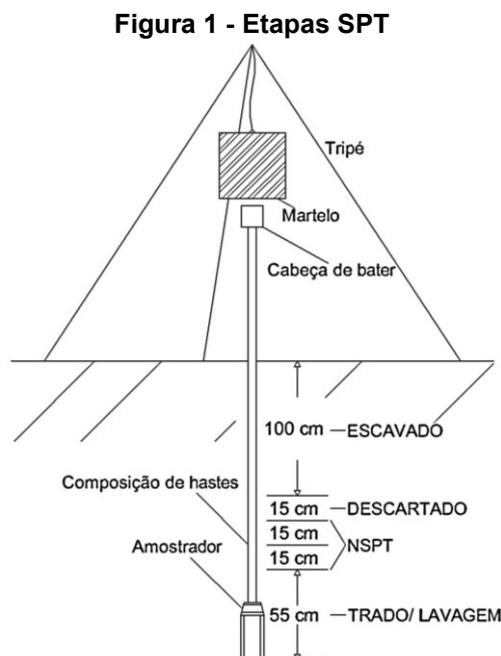
2.2 Procedimento do SPT

Atualmente, de acordo com a ABNT (2020), o amostrador-padrão possui diâmetro externo aproximado de 5,08 cm e interno de 3,49 cm, com comprimento mínimo de 50 cm. O martelo de queda tem sua massa definida em 65 kg, uma grande diferença quando comparado aos utilizados no final dos anos de 1920, que variavam sua massa entre 45,5 kg e 159 kg (ROGERS, 2006). O equipamento do SPT é apresentado no subtópico 3.4, Figura 11.

A execução do SPT se dá, de acordo com a ABNT (2020), inicialmente pela escavação e descarte do primeiro metro com emprego de um trado-concha. Seguindo, o ensaio prossegue com o levantamento do martelo até a altura normatizada de 75 cm e sua soltura em queda livre até que atinja a composição de hastes, que possui o amostrador-padrão e a cabeça de bater acoplados nas extremidades inferior e superior respectivamente. Essa repetição é realizada a cada 45 cm, sendo que os primeiros 55 cm são perfurados com a utilização de um trado helicoidal até que se encontre o nível do lençol freático ou que o avanço não ultrapasse 5 cm após 10 min, a partir daí utiliza-se a perfuração por circulação de água.

Para o registro dos golpes como o número N, ou seja, como o índice de resistência à penetração do solo, os 55 cm iniciais, escavados, são descartados. Nos seguintes 45 cm os golpes são contados para cada 15 cm de avanço do amostrador, entretanto, como no processo anterior ocorreu a escavação do solo, não se pode garantir que o solo apresente integralmente as suas propriedades nas primeiras profundidades subsequentes, por isso, dos 45 cm finais somente as duas últimas etapas, os 30 cm finais, são contabilizados como o número N_{spt} para o metro ensaiado (ABNT, 2020).

O esquema do ensaio, bem como as suas etapas, podem ser visualizados na Figura 1.



Fonte: Autor (2022)

2.3 Tipos de Sistemas SPT

Atualmente no mercado, com o aumento da popularidade de equipamentos automatizados, o SPT deixou de ser realizado somente de forma manual e ganhou espaço também o SPT mecanizado. No cenário nacional, o método manual continua sendo o mais difundido, no qual o martelo é levantado e solto por dois operadores que fazem esse processo utilizando corda (ODEBRECHT, 2003).

Diferente do manual, o sistema mecanizado passou a ser normatizado na NBR 6484 do ano de 2020, já que até o ano de 2001, o seu uso era possível somente quando a execução fosse acompanhada da correlação entre a medida da energia incidente disponível para a cravação e a energia aferida na composição de hastes, como disposto na NBR 6484 (ABNT, 2001).

No sistema mecanizado, o processo de levantamento do martelo é automatizado, não dependendo mais de operadores diretamente. Normalmente, o martelo é disposto na altura de queda por um sistema de correntes que o levantam

desde a sua altura de impacto até o seu ponto de soltura, tal processo é realizado comumente por um motor hidráulico.

Comumente para os dois tipos de SPT, a altura de queda do martelo pode variar dependendo de alguns fatores, no caso do SPT manual, a dependência de operadores pode ocasionar a liberação do martelo fora da altura padrão. Já no sistema mecanizado, é a velocidade de operação, em número de golpes por minuto, da máquina que pode fazer com que esse problema ocorra, já que quanto mais rápido é realizado o levantamento do martelo, a sua tendência é que ele continue seu movimento de subida, acarretando alturas de queda superiores a 75 cm (HOWIE *et al.*, 2003).

2.4 Energia no SPT

Durante o ensaio, a energia inicial é dada pela energia potencial quando o martelo é erguido até a altura de queda padronizada e após a sua liberação essa energia é convertida em energia cinética, até o momento de impacto do martelo com a composição de hastes quando a energia cinética é transferida para o amostrador em forma de onda longitudinal de compressão. Ainda, a energia que atinge o conjunto de hastes varia inversamente ao número de golpes N , até ao menos 50 golpes (SCHMERTMANN; PALACIOS, 1979).

A energia potencial de acordo com a *International Reference Procedure for SPT* (ISSMFE, 1989) é padronizada para um martelo de queda com massa de 63,5 kg e uma altura de queda de 76 cm, no qual resulta em uma energia igual a 473,40 J. Entretanto, a NBR 6484 (ABNT, 2020), normatiza o martelo com massa de 65 kg e altura de queda para 75 cm, resultando em energia potencial igual a 478,20 J, a qual será utilizada neste trabalho.

Ainda, como para o SPT existe uma grande variabilidade de equipamentos utilizados e na execução, como o conjunto de polias, cordas e o próprio levantamento do martelo por exemplo, fez-se necessário a padronização da energia para que se tornasse possível a comparação dos resultados de ensaios realizados em diversas localidades, ou seja, uma padronização internacional. Portanto, a padronização do número N de golpes do SPT se dá para um valor correspondente à 60% da energia de queda livre teórica do martelo, ou seja, da energia potencial quando levantado até

a sua altura de queda, valor esse utilizado de referência internacional como N_{60} . (DÉCOURT, 1989; ISSFME, 1989).

Como apontado por Santana, Danziger e Danziger (2013), o valor de N_{60} pode ser obtido por meio da Equação 1:

$$N_{60} = N_i \frac{E_i}{E_{60}} \quad (1)$$

Onde:

N_i = é o número de golpes associado à E_i ;

E_i = energia no topo da composição de hastes (J);

E_{60} = corresponde à 60% da energia normalizada (J).

2.4.1 Energia que atinge a composição de hastes, E_i

Décourt (1989) traz alguns fatores importantes que podem afetar o valor de N , ou seja, podem afetar a transferência de energia para as hastes. De acordo com o autor, os fatores que afetam o número de golpes e que serão importantes para este trabalho são: maneira de levantar e soltar o martelo, variações na altura de queda, massa do martelo fora do normalizado, falta de guia para o martelo e o não acompanhamento da correta marcação do número de golpes necessários para a cravação do martelo.

A energia ENTRHU (E_i), definida por Schmertmann e Palacios (1979) como a energia que atinge a composição de hastes, pode ser calculada pela Equação 2 definida por Décourt (1989).

$$E_i = e_1 e_2 e_3 E_T \quad (2)$$

Na qual, E_T é a energia teórica potencial do martelo na sua altura de queda e os fatores e_i são fatores de correção que variam entre 0 e 0,99. Ainda, um quarto fator e_4 não definido por Décourt (1989), é introduzido à Equação 2 por alguns autores, o qual é tratado em 2.4.1.4.

2.4.1.1 Fator de correção e_1

O fator e_1 , como traz Décourt (1989) relaciona a maneira com que o martelo é levantado e solto. Santana, Danziger e Danziger (2013) afirmam que e_1 relaciona a energia cinética imediatamente antes do impacto com a energia potencial teórica. A partir de e_1 pode-se dizer que a energia do martelo quando atinge a haste é dada pela Equação 3:

$$E_c = e_1 E_T \quad (3)$$

Na qual:

E_T = energia potencial teórica (J);

E_c = energia cinética imediatamente antes do impacto (J).

A fim de se obter o fator e_1 que corresponde à realidade, é apresentada a determinação do fator utilizando a energia potencial real, utilizando a altura de queda medida em campo. Por tanto o fator e_1 passa a ser e_{1^*} , como demonstrado na Equação 4:

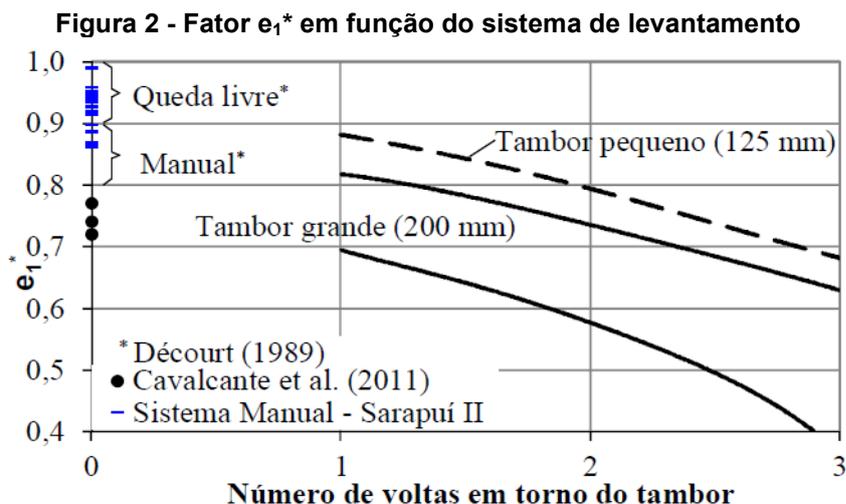
$$e_{1^*} = \frac{E_c}{E^*} \quad (4)$$

Na qual:

E^* = energia potencial real (J);

E_c = energia cinética imediatamente antes do impacto (J).

Santana e Danziger (2016) apresentam, o fator e_{1^*} , com dados nacionais, em relação aos métodos de levantamento do martelo conforme Figura 2.



2.4.1.2 Fator de correção e_2

Já o fator e_2 , como descrito por Santana, Danziger e Danziger (2013) e Santana e Danziger (2016), é a relação entre a energia no topo da composição de hastes e a energia cinética imediatamente anterior ao impacto, conforme Equação 5. Como apontado por Décourt (1989), o principal fator que influencia e_2 é a massa do martelo.

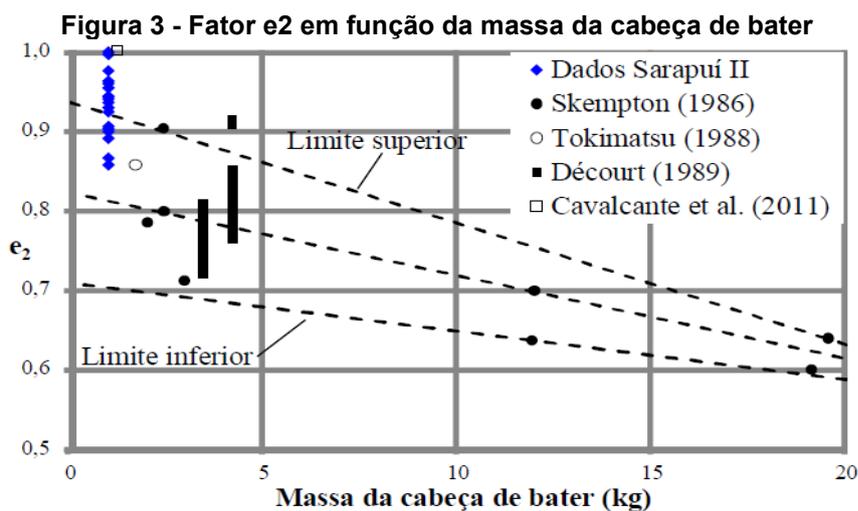
$$e_2 = \frac{E_i}{E_c} \quad (5)$$

Na qual:

E_i = energia medida no topo da composição de hastes (J);

E_c = energia cinética imediatamente antes do impacto (J).

Valores de e_2 demonstrados por Santana e Danziger (2016) são apresentados na Figura 3.



Fonte: Adaptado por Santana e Danziger (2016), de Décourt (1989) e Cavalcante *et al.* (2011)

2.4.1.3 Fator de correção e_3

O fator de correção e_3 está relacionado com o comprimento do conjunto de hastes e e_3 possui várias afirmações quanto ao seu valor (ODEBRECHT, 2003; SANTANA; DANZIGER; DANZIGER, 2013; CAVALCANTE; DANZIGER; DANZIGER, 2011). De acordo com Schmertmann e Palacios (1979), a energia transmitida às hastes somente seria realizada de maneira integral quando as hastes possuísem um comprimento mínimo crítico, sendo esse comprimento atingido quando as hastes possuírem a mesma massa que o martelo (DÉCOURT, 1989).

Entretanto, como apontado por Santana, Danziger e Danziger (2013), estudos recentes como o de Odebrecht (2003), indicam que a energia em questão é independente do comprimento, logo e_3 deveria ser tomado como 1.

2.4.1.4 Fator de correção e_4

Além dos três fatores, alguns autores como Danziger, Danziger e Cavalcante (2008) trazem um quarto fator e_4 , tendo em vista que a energia que chega ao amostrador não é a que atinge a composição de hastes, portanto, e_4 seria a correção dessas duas energias. Por isso, a energia que chega ao amostrador é representada pela Equação 6:

$$E_a = e_1 e_2 e_3 e_4 E_T \quad (6)$$

Contudo, como para o fator em questão são poucos os resultados existentes, principalmente devido à dificuldade de determinação desse fator, ainda não é possível assumir um valor para ele. Cavalcante (2002) demonstrou que para composição de hastes com comprimento entre 2 e 9 metros o fator seria cerca de 12%, entretanto, os valores obtidos não são claros o suficiente conforme aumento da composição de hastes (DANZIGER; DANZIGER; CAVALCANTE, 2008).

2.5 Física da queda livre

A energia durante o SPT pode ser dividida em partes. Inicialmente, o martelo quando em sua altura de queda possui toda a energia em forma de energia potencial e quando em queda livre, toda a energia deveria ser convertida em energia cinética ao longo da queda até o momento de impacto (HOWIE *et al.*, 2003). A separação do SPT em altura de queda e momento de impacto pode ser visualizado, respectivamente, ao lado esquerdo e direito da Figura 4.

Logo, a energia que atinge a composição de hastes deve ser dada pela energia cinética na iminência do impacto, ou seja, quando o martelo possui a velocidade máxima. Sendo a energia cinética dada conforme Equação 7:

$$E_c = \frac{m V_i^2}{2} \quad (7)$$

Sendo que:

m = massa do martelo (kg);

V_i = velocidade teórica no instante imediatamente anterior ao impacto (m/s).

E a energia potencial dada pela Equação 8:

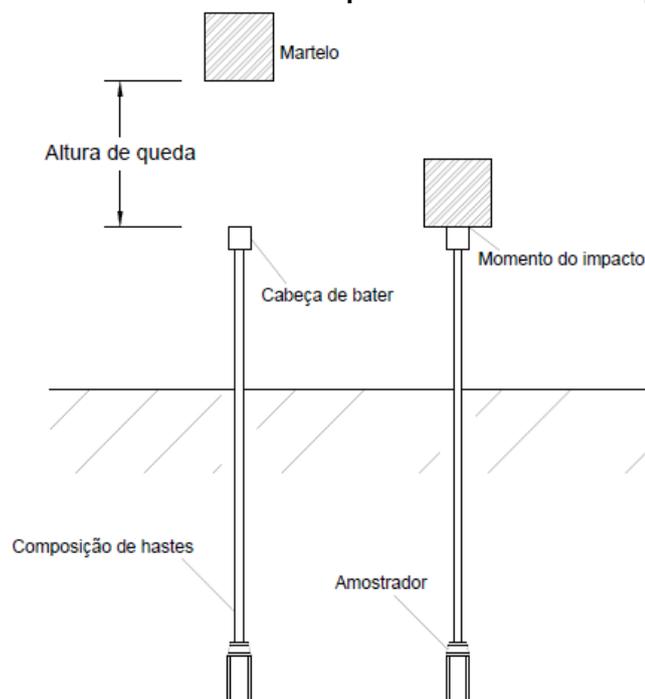
$$E_p = mgh \quad (8)$$

Sendo que:

g = aceleração da gravidade (m/s²);

h = altura de queda (m).

Figura 4 - Martelo na altura de queda e momento de impacto



Fonte: Autor (2022)

Assim, para que seja possível determinar a velocidade teórica de impacto do martelo, basta igualar as equações das energias cinética (7) e potencial (8) (HOWIE *et al.*, 2003). Dessa maneira, a velocidade teórica de impacto (V_i) é dada pela Equação 9:

$$V_i = \sqrt{2gh} \quad (9)$$

Portanto, para um ensaio com equipamento e execução de acordo com as recomendações da NBR 6484 (ABNT, 2020), a velocidade de impacto apresentada pelo martelo, como um objeto em queda livre sujeito à aceleração da gravidade, na iminência do impacto seria de 3,87 m/s ou 13,90 km/h. A partir da V_i é possível estipular as perdas no sistema quando conhecida a velocidade real de impacto do martelo, que neste trabalho será realizado por meio da avaliação de quadro a quadro de gravações.

Entretanto, todo sistema estudado terá perdas por atrito, e por isso, quando determinada velocidade real de impacto essa terá de ser inferior à teórica.

2.6 Métodos da determinação da energia

Atualmente, para o registro da energia durante o ensaio, o método mais empregado e consagrado consiste no uso de hastes instrumentadas com sensores de deformação (*strain gauges*) e acelerômetros, como utilizado por Santana e Danziger (2016). Além disto, existem alguns trabalhos que utilizam câmeras de alta velocidade para analisar o fenômeno previamente ao impacto entre martelo e cabeça de bater.

2.6.1 Câmera de alta velocidade

A partir das imagens de vídeo registradas por câmera pode-se estimar o tempo decorrido para passagem de um objeto do ponto A ao ponto B (CAVALCANTE; DANZIGER; DANZIGER, 2011; MENDES, 2007)

O fundamento presente na determinação do tempo por gravação é que as gravações fornecem uma taxa de registro de quadros, como por exemplo 60 *fps* (*frames per second*) ou quadros por segundo (qps), ou seja, cada segundo de gravação possui 60 imagens ou quadros. A partir do dado de taxa de gravação, é possível conhecer o intervalo de tempo decorrido a cada quadro pela seguinte maneira:

Supondo uma taxa de gravação de 60 qps.

$$\delta t = \frac{1}{60} = 0,0167 \text{ s/quadro}$$

Portanto, para o intervalo de tempo, basta conhecer a quantidade de quadros, supondo um intervalo de 360 quadros, tem-se que:

$$\Delta t = 0,0167 \times 360 \cong 6\text{s}$$

Como pode-se observar, o intervalo de tempo é inversamente proporcional à taxa de gravação e que, quanto menor o intervalo decorrido entre um quadro e outro, maior a precisão do rastreio do movimento. Por isso, quando comparado às taxas convencionais de gravação, as quais estão entre 30 e 60 qps, as filmagens em alta velocidade são capazes de fornecer registros em torno de 120 a 240 quadros por segundo como no caso de *smartphones* por exemplo ou ainda 1000 quadros por segundo em caso de filmadoras

Logo, com um registro de 240 quadros por segundo, o intervalo de tempo entre os quadros é de:

$$t = \frac{1}{240} = 0,00417s$$

A partir gravação em alta velocidade é possível realizar a análise quadro a quadro e determinar a posição de um objeto ao longo do tempo bem como, posteriormente, a sua velocidade.

A diferenciação entre as taxas de gravação fica mais clara quando visualizada a Figura 5, a qual traz, em uma foto de um quadro, a comparação das diferentes taxas de filmagem entre 15 e 60 quadros por segundo, possibilitando o entendimento da precisão da posição do objeto proporcional ao aumento de qps.

Figura 5 - Taxas de filmagem de 60, 30 e 15 qps em ordem de cima para baixo respectivamente



Fonte: *Frames-per-second* (2016)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a determinação da energia no SPT, inicialmente foram analisadas duas filmagens por ensaio, sendo realizadas por uma câmera e outra por *smartphone*. Os dois métodos são capazes de fornecer filmagens com taxas de gravação entre 100 e 1000 qps. As filmagens são eventos, realizados anteriormente a esse trabalho, de queda de martelo em ensaios reais executados em Toledo-PR, utilizando o mesmo equipamento com 3 operadores, os quais não necessariamente são os mesmos.

Para cumprimento dos objetivos propostos, foram avaliados três ensaios, que totalizam 332 golpes. O montante dos golpes estão separados em 20 filmagens sendo que cada uma delas refere-se a um metro ensaiado. Assim, as filmagens serão organizadas por objetivo, como demonstrado no Quadro 1.

Quadro 1 – Organização das filmagens

Descrição			Objetivo		
Ensaio	Filmagem	Nº Golpes registrados	Energia Potencial	Energia Cinética	Fator e1
1	1-SN1	6	X		
	1-SN2	8	X		
	1-SN3	13	X	X	X
	1-SN4	17	X	X	X
	1-SN5A	25	X		
	1-SN6B	21	X		
	1-SN7C	18	X		
	1-SN8D	19	X		
	1-SN9E	11	X		
	1-FN1A	25	X		
	1-FN2B	21	X		
	1-FN3C	18	X		
	1-FN4D	19	X		
	1-FN5E	11	X		
	2	2-SN1A	14	X	X
2-SN2B		24	X	X	X
2-FN1A		24	X	X	X
2-FN2B		26	X	X	X
3	3-SN1A	6	X	X	X
	3-FN1A	6	X	X	X

S = *smartphone*; F = Filmadora; X = objetivo realizado para a filmagem.
A,B = correspondentes para a filmagem do mesmo ensaio;
Exemplo: 1-SN5A = Fonte: *Smartphone*, filmagem nº 5 da fonte no ensaio 1, correspondente à 1-FN1A.

Fonte: Autor (2022)

Portanto, para determinação da energia cinética e fator e_1 130 golpes são utilizados, sendo que 100 deles utilizou-se para comparação entre si para validação do uso de *smartphone* já que possuem correspondência entre as fontes de filmagem. Para a energia potencial, determinada a partir da altura de queda, o montante total de 332 golpes foram empregados.

Para obtenção das informações necessárias, altura e velocidade de queda bem como a trajetória ao longo do tempo do martelo é utilizado o *software* livre *Tracker*. Com auxílio do *software* é realizado a marcação do martelo a partir do ponto de soltura, como objeto a ser rastreado, e o programa fornece os dados de posição ao longo do tempo por meio de gráfico. Os procedimentos para utilização do *software* podem ser compreendidos em maiores detalhes em 3.2.1.

3.1 Câmeras

Para o registro do movimento do martelo, são utilizadas duas câmeras, a primeira é a de alta velocidade Casio EX-FH20, a mesma empregada por Santana, Danziger e Danziger (2013), capaz de registrar até 1000 quadros por segundo. A segunda, é a câmera de *smartphone*, capaz de filmar imagens com até 240 quadros por segundo. O uso da câmera de celular se dá pelo fato de que esses aparelhos são ferramentas cada vez mais poderosas e acessíveis, portanto, caso seja validado seu uso, a determinação de energia no SPT será mais facilmente aplicada.

As imagens das câmeras foram utilizadas para a determinação da altura de queda e velocidade do martelo na iminência do impacto na composição de hastes com auxílio do *Tracker*. Há na filmadora, uma limitação na qualidade de imagem fornecida quando a taxa qps é muito alta, portanto, as filmagens em campo foram realizadas com 210 qps. A relação de qualidade por taxa está explícito no apêndice A.

A técnica de análise de filmagens é encontrada em Cavalcante, Danziger e Danziger (2011) com o registro da posição do martelo durante a queda e o tempo decorrido respectivamente, assim como a altura de queda que, de acordo com os autores, com um intervalo de imagens de 0,033 s foi possível estimá-la com precisão. A mesma técnica do uso da câmera para análise dos quadros foi empregada por Santana, Danziger e Danziger (2013), os quais, além da altura de queda, também utilizaram as imagens para a determinação da velocidade de impacto do martelo.

As câmeras são posicionadas de maneira que os operadores não são influenciados, ou seja, que o ensaio ocorra da maneira com que é realizado usualmente.

3.2 Software livre *Tracker*

Para análise das imagens é utilizado o *Tracker*, o *software* é capaz, de acordo com Mendes (2007), de analisar e armazenar a trajetória, posição e tempo para o objeto estudado. Para isso é necessária a calibração da cena com medidas de referência, para o trabalho em questão é a altura do martelo de 22 cm, e definição do eixo bem como a determinação do objeto a ser rastreado.

A altura do martelo permite a calibração da cena já que, como afirmado por Mendes (2007), o *software Tracker* adota para análise o plano cartesiano, portanto, a partir da determinação de pontos de referência na cena ou gravação, o *software* é capaz de determinar a posição do objeto quadro a quadro.

3.2.1 Processo de utilização do *Tracker*

O primeiro ajuste a ser realizado é a calibração da cena dentro do *software* por meio do uso de um bastão de calibração que é colocado em pontos os quais possuem a sua distância conhecida. Nas análises as marcações foram realizadas no martelo, que possui altura de 22 cm.

Ainda, nesse momento são adicionados os eixos para que o *software* consiga fornecer a posição do objeto de estudo ao longo do tempo como em um plano cartesiano. É importante ressaltar que o *Tracker* permite verificar a inclinação do bastão e eixos, possibilitando deixá-los em 90°. O bastão de calibração e os eixos podem ser visualizados na Figura 6.

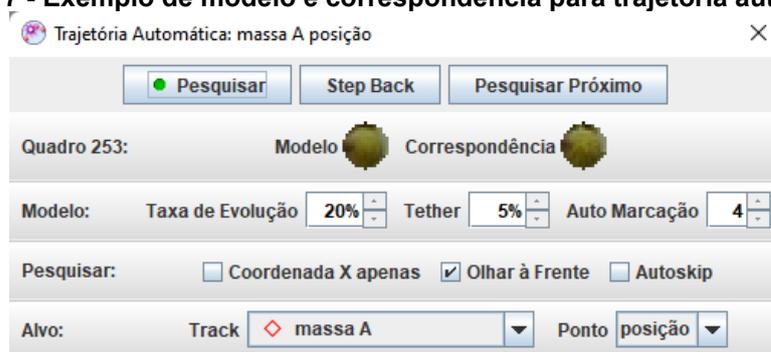
Figura 6 - Calibração da cena no Tracker



Fonte: Autor (2022)

Finalizado a calibração da cena, é definido o objeto a ser rastreado, nesse caso o martelo. O *software* é capaz, resumidamente, de auto rastrear o objeto selecionado a partir do modelo definido pelo usuário e consecutivas correspondências ao decorrer da filmagem. As correspondências são encontradas por meio da menor diferença de cores entre modelo e correspondência analisada. A definição para trajetória automática está exemplificada na Figura 7.

Figura 7 - Exemplo de modelo e correspondência para trajetória automática



Fonte: Autor (2022)

Logo após a determinação do modelo são definidos os quadros de imagem que marcam o início e fim da queda do martelo, correspondentes à altura de queda do martelo e iminência de impacto na composição de hastes.

Finalmente, é iniciado a análise quadro a quadro, sendo essa realizada entre os quadros definidos anteriormente. O processo de análise é visualizado na Figura 8.

Vale ressaltar que a disposição do esquema de filmagem não está alinhado em 90° em relação nem à posição inicial quanto à final do objeto em queda e, portanto, deverão ser observadas alturas registradas com pequena diferença da real. Contudo, para o estudo em questão tais diferenças não afetarão significativamente as grandezas dos valores para as comparações futuras.

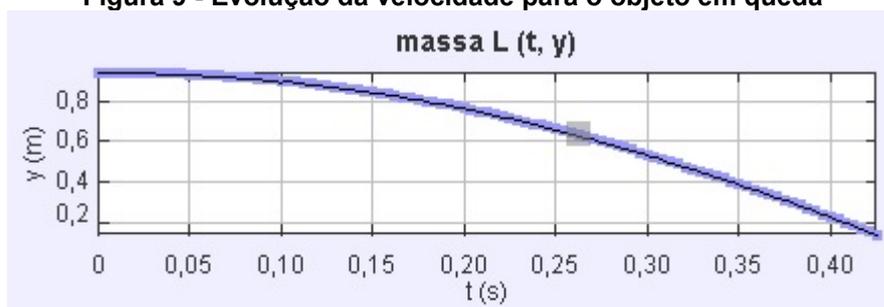
Figura 8 - Processo de análise em andamento



Fonte: Autor (2022)

A partir do processo de análise das filmagens, o *Tracker* é capaz de fornecer a evolução da posição do objeto ponto a ponto da sua queda, conforme demonstrado na Figura 9.

Figura 9 - Evolução da velocidade para o objeto em queda



Fonte: Autor (2022)

3.3 Processamento dos dados

A partir dos dados fornecidos pelo *software*, pelo gráfico de trajetória foi estipulada uma equação polinomial de grau 2 que melhor representasse o movimento. O uso desse tipo de equação se dá pelo fato de que Santana e Danziger (2016) demonstraram ser capaz de construir um bom ajuste ao movimento, para a determinação da posição pelo tempo. A partir da derivada da equação da trajetória obtém-se a de velocidade ao longo do tempo.

As equações de posição e velocidade, respectivamente Equações 10 e 11, são da seguinte disposição:

$$x(t) = At^2 + Bt + C \quad (10)$$

Sendo que:

$x(t)$ = posição do martelo em um instante (t) da queda (m);

t = instante (t) analisado (s);

A, B e C = constantes encontradas no ajuste da equação à trajetória.

Para a velocidade portanto:

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = 2At + B \quad (11)$$

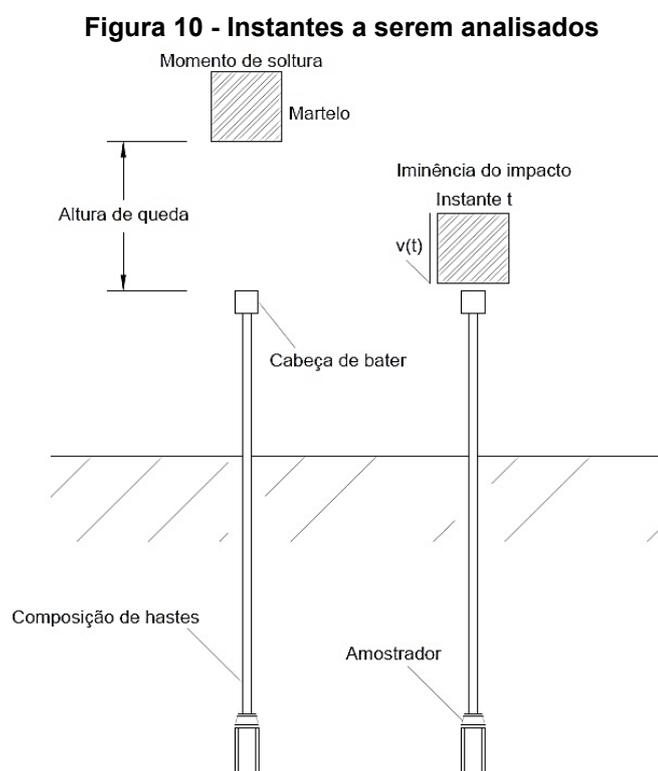
Sendo que:

$v(t)$ = velocidade do martelo em um instante (t) da queda (m/s).

Dessa maneira a energia cinética foi medida na iminência do impacto, ou seja, no quadro da filmagem anterior ao quadro do impacto, o qual aconteceu em um tempo (t) que foi utilizado para definir a velocidade nesse instante e assim, a energia cinética

é definida pela Equação 7, somente substituindo a velocidade teórica pela real $v(t)$. A energia potencial é avaliada pela análise quadro a quadro de levantamento do martelo por meio do uso de comandos como *slow motion* e *pause* de mesmo modo que realizado por Cavalcante, Danziger e Danziger (2011) e Santana, Danziger e Danziger (2013), sendo que o quadro no instante de soltura marca a altura de queda e dessa forma, com a massa do martelo e a aceleração da gravidade, a energia potencial foi determinada pela Equação 8. Os instantes descritos que foram analisados são demonstrados na Figura 10.

Com a determinação das energias reais (potencial e cinética) foram realizadas as comparações com as respectivas energias teóricas, assim como as comparações entre os resultados de cada filmagem. O objetivo das comparações foi de determinar a eficiência do sistema além do fator de correção (e_1) e (e_{1^*}) conforme Equações 3 e 4. Além da eficiência e fator de correção, as comparações foram utilizadas para validar a técnica de monitoramento da energia por filmagem no SPT.



Fonte: Autor (2022)

3.4 SPT manual com martelo pino guia

Os ensaios analisados neste trabalho são com sistema manual que emprega o martelo tipo pino guia, o qual possui uma barra central que durante o levantamento e a queda, permanece dentro da composição das hastes a fim de que esses se mantenham alinhados e o martelo atinja o centro da cabeça de bater. O esquema do ensaio pode ser visualizado na Figura 11.

Figura 11 - Esquema de SPT do tipo pino guia



Fonte: Foto do autor (COSTA, 2022b)

Os ensaios, objetos de estudo, seguiram os procedimentos preconizados na NBR 6484 (ABNT, 2020), portanto, como o martelo não teve a sua massa aferida, presumiu-se que tenha 65 kg. O martelo pino guia e a cabeça de bater são visualizados em detalhes na Figura 12.

Figura 12 - Cabeça de bater na esquerda e martelo pino guia na imagem central e da direita



Fonte: Foto do autor (COSTA, 2022a)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Altura de queda e energia potencial

As alturas de quedas registradas para os três ensaios apresentaram altura máxima registrada pela filmadora Casio de 103,10 cm e para o *smartphone* de 106,70 cm. Já as alturas mínimas, para a filmadora foi de 71,60 cm e para o *smartphone* foi de 75,60 cm. Os valores máximos, que ultrapassaram um metro de altura, já eram esperados, tendo em vista os resultados apresentados por Santana, Danziger e Danziger (2013), os quais também registraram quedas de até 99 cm.

As alturas médias determinadas, analisando o total dos golpes, pelas filmagens do *smartphone* ficou em 91,01 cm com desvio padrão de 6,57 cm e pela filmadora foi de 87,09 cm com desvio padrão de 7,63 cm. Desvios padrões próximos aos apresentados por Santana, Danziger e Danziger, (2013) e Santana e Danziger (2016). Na Tabela 1 é possível visualizar os resultados resumidos.

Apesar de próximas, a diferença nas alturas de queda apresentada pelas duas fontes de filmagem está atribuída à calibração da cena realizada dentro do *software* Tracker, já que essa é a parte fundamental para determinação de medidas dentro desta ferramenta.

Tabela 1 - Médias e desvios padrões das alturas de queda

Ensaio	Filmadora		Smartphone	
	Média (cm)	Desvio padrão (cm)	Média (cm)	Desvio padrão (cm)
1	92,17	4,64	93,14	5,56
2	79,69	4,29	83,76	3,93
3	89,47	7,83	87,60	7,91
Total	87,09	7,63	91,01	6,57

Fonte: Autor (2022)

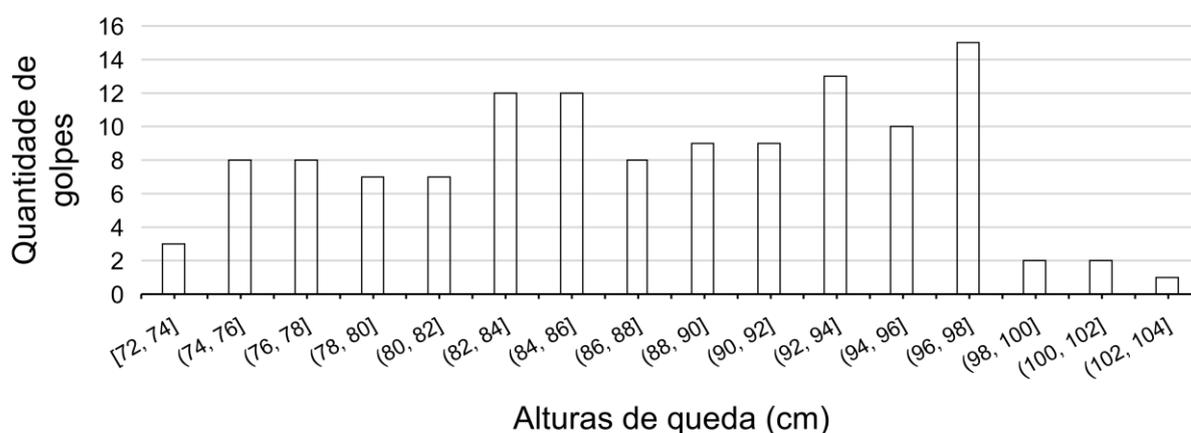
Os altos registros obtidos para a altura de queda podem ser relacionados à maneira de levantamento do martelo, no qual observou-se que os operadores tendem a utilizar o peso do corpo, realizando um impulso desproporcional acima do necessário para levantamento do martelo.

Ainda, tal comportamento faz com que o ensaio não esteja de acordo com os procedimentos normatizados na NBR 6484 (ABNT, 2020). Como consequência, a energia aplicada à composição de hastes, superior à 478,20 J, reduz o número de

golpes necessários para a penetração do amostrador. Assim, o Nspt registrado propenderá a ser menor que o real, induzindo o boletim a representar um solo menos resistente, impactando, finalmente, no projeto de fundações.

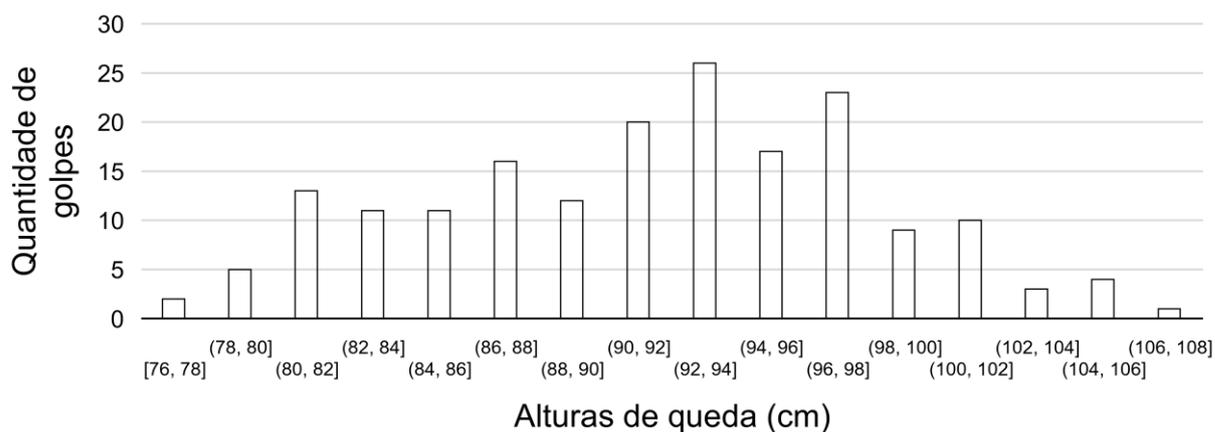
Ademais, as alturas estão próximas às observadas por Santana e Danziger (2016) e Cavalcante, Danziger e Danziger (2011), com mínimas de 70 cm e 74 cm respectivamente. A distribuição das alturas de quedas registradas por meio das filmagens da filmadora e *smartphone* podem ser visualizadas nas Figura 13 e 14 respectivamente.

Figura 13 - Alturas de queda registradas pela filmadora



Fonte: Autor (2022)

Figura 14 - Alturas de queda registradas pelo smartphone



Fonte: Autor (2022)

Quando analisados os ensaios individualmente, pode-se observar que o avanço do ensaio, ou seja, o aumento da profundidade, não fez com que ocorresse redução na altura de queda, ao contrário do que foi observado por Santana, Danziger e Danziger (2013), os quais atribuíram o fenômeno ao cansaço da equipe de

operadores. A ausência de redução da altura queda nos ensaios analisados neste trabalho pode ser justificada com o rodízio da equipe para o levantamento do martelo, restringindo o efeito de cansaço.

As energias potenciais calculadas variaram entre 459,56 J e 657,42 J para a filmadora com média de 555,34 J e desvio padrão de 48,63 J. Já para o *smartphone* as energias potenciais variaram entre 482,06 J e 680,37 J, apresentando média de 580,32 J e desvio padrão de 41,88 J. Os resultados apresentados para as energias potenciais, por serem determinadas pela Equação 8, são proporcionais às suas alturas de queda e podem ser visualizados, resumidamente, na Tabela 2.

Tabela 2 - Médias e desvios padrões das energias potenciais

Ensaio	Filmadora		Smartphone	
	Média (J)	Desvio padrão (J)	Média (J)	Desvio padrão (J)
1	587,75	29,56	593,90	35,47
2	508,16	27,35	534,12	25,07
3	570,48	49,93	558,58	50,46
Total	555,34	48,63	580,32	41,88

Fonte: Autor (2022)

De maneira geral, as quedas analisadas pela filmadora e pelo *smartphone* demonstraram, na média, superioridade de 16,13% e 21,36%, respectivamente, em relação ao normatizado de 478,20 J (ABNT, 2020).

4.2 Velocidade de queda e energia cinética

As velocidades, imediatamente anteriores ao impacto, observadas variaram entre 4,14 m/s e 3,12 m/s para a filmadora com desvio padrão de 0,25 m/s e média geral de 3,72 m/s, já para o *smartphones* as velocidades ficaram entre 4,50 m/s e 2,93 m/s, com desvio padrão de 0,26 m/s e média geral de 3,91 m/s, como demonstrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Médias e desvios padrões das velocidades

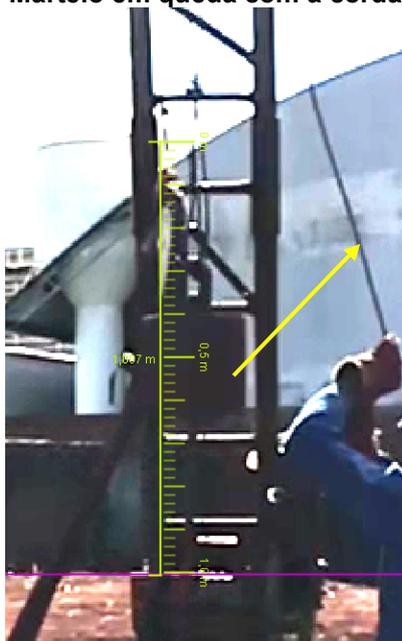
Ensaio	Filmadora		Smartphone	
	Média (m/s)	Desvio padrão (m/s)	Média (m/s)	Desvio padrão (m/s)
1	-	-	3,96	0,33
2	3,71	0,25	3,92	0,16
3	3,79	0,24	3,56	0,19
Total	3,72	0,25	3,91	0,26

Fonte: Autor (2022)

As velocidades determinadas variaram em uma faixa mais ampla que as apresentadas por Santana, Danziger e Danziger (2013) com as médias próximas em relação ao *smartphone* e superior em relação à filmadora, ressaltando que os autores utilizaram a mesma filmadora Casio deste trabalho. Ainda, quando comparado as velocidades médias em relação à normatizada, pela Equação 8, a filmadora apresentou perda de 3,11% e as filmagens do *smartphone* apresentaram ganho de 1,89% (ABNT, 2020).

Notou-se durante as análises, que as velocidades não são, em todos os golpes, proporcionais às alturas de quedas. Um motivo para isso é a maneira de soltura do martelo, não liberando totalmente a corda e impedindo que ele tenha queda livre total, manipulando a velocidade final. Essa ocorrência pode ser observada na Figura 15.

Figura 15 - Martelo em queda com a corda tensionada

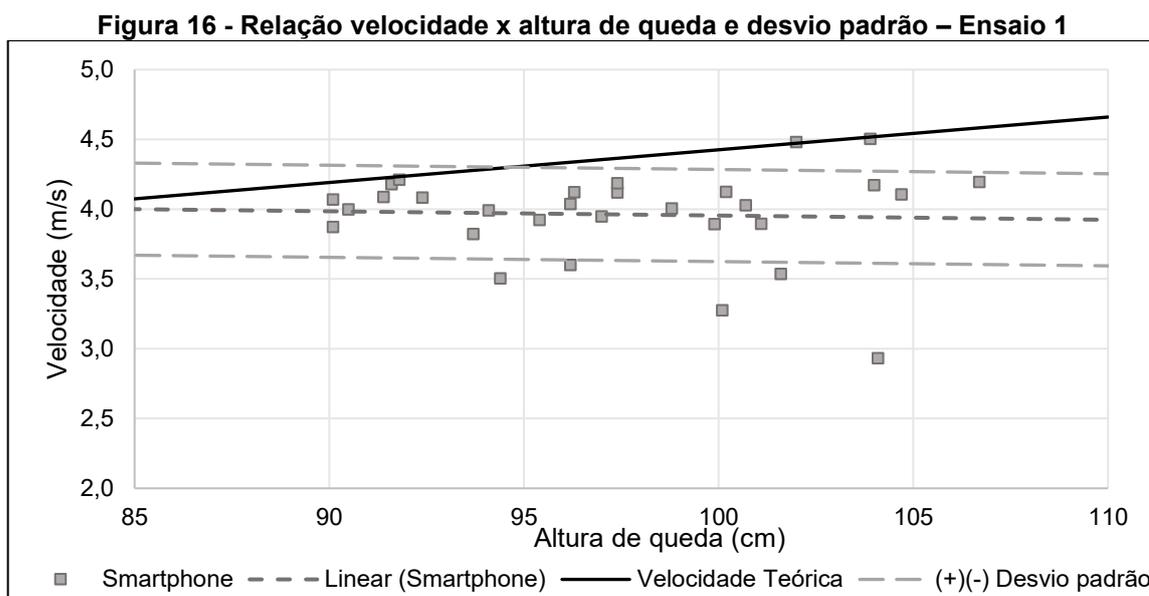


Fonte: Autor (2022)

Entretanto, apesar de não apresentarem uma relação sempre direta com a altura de queda, as velocidades seguiram, em média, a lógica de aumentar conforme aumento da altura de queda. Ainda, observou-se que as velocidades analisadas nas filmagens do *smartphone* apresentaram uma amplitude maior com o aumento da altura de queda. Pode-se observar no ensaio 1 a tendência, como demonstrado na Figura 16 por meio da regressão, da redução da velocidade com o aumento da altura de queda. Entretanto como para esse ensaio não houve comparação com a filmadora

não é possível afirmar como erro de leitura ou inconsistência e sim, somente como resultado não convencional para a amostra analisada.

Soma-se a isso, ainda, o fato de que para esse ensaio, foram analisados somente 29 golpes, uma amostra pequena que não representa o ensaio como um todo, confirmado pelo fato de que 24,13% dos golpes não se enquadraram no desvio padrão.

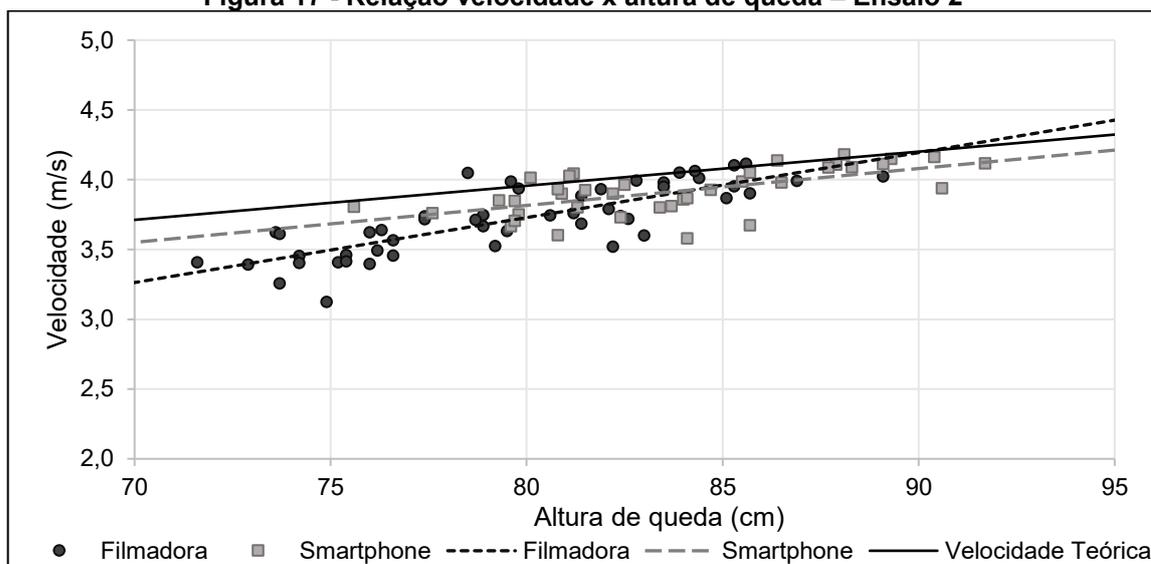


Fonte: Autor (2022)

Para o ensaio 2, a Figura 17 complementada com a Figura 18 representam os resultados obtidos com sua respectiva regressão, demonstrando além do comportamento crescente da velocidade com a altura de queda, um bom agrupamento ao redor da regressão e do desvio padrão, com 10% dos golpes da filmadora fora da faixa representada pelo desvio padrão e 15,79% para o *smartphone*.

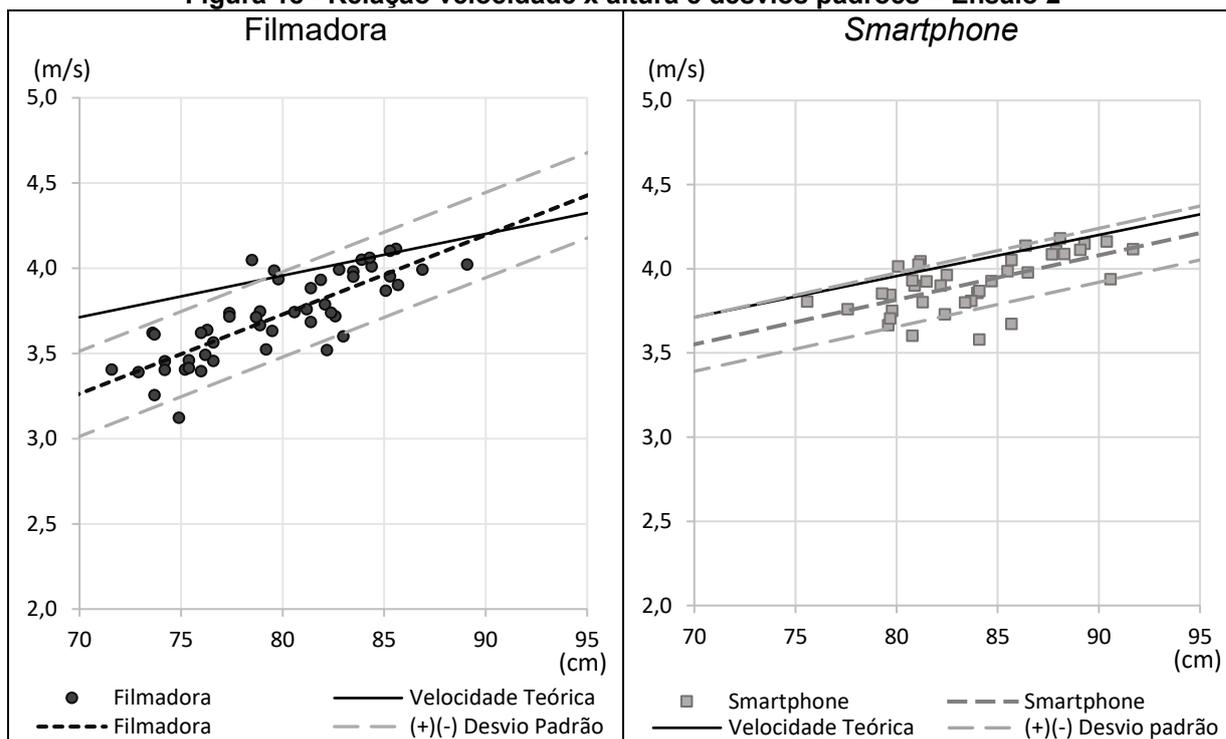
É notável a elevada inclinação da regressão apresentada pela filmadora, a qual ultrapassa a velocidade teórica se extrapolado, contudo, quando visualizado a amostra na faixa de domínio de interesse os resultados são satisfatórios.

Figura 17 - Relação velocidade x altura de queda – Ensaio 2



Fonte: Autor (2022)

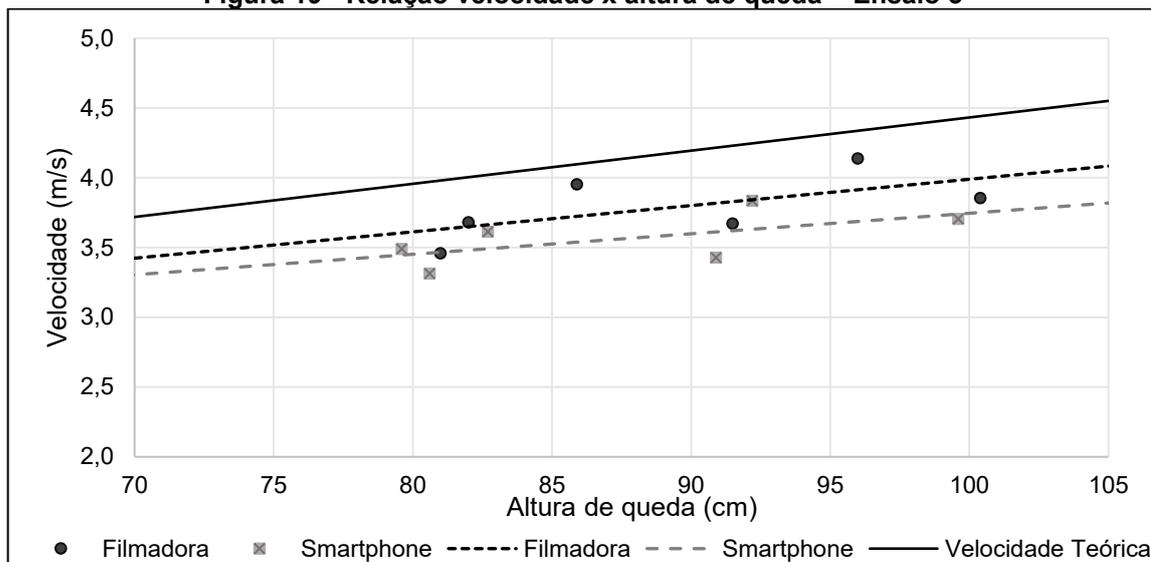
Figura 18 - Relação velocidade x altura e desvios padrões – Ensaio 2



Fonte: Autor (2022)

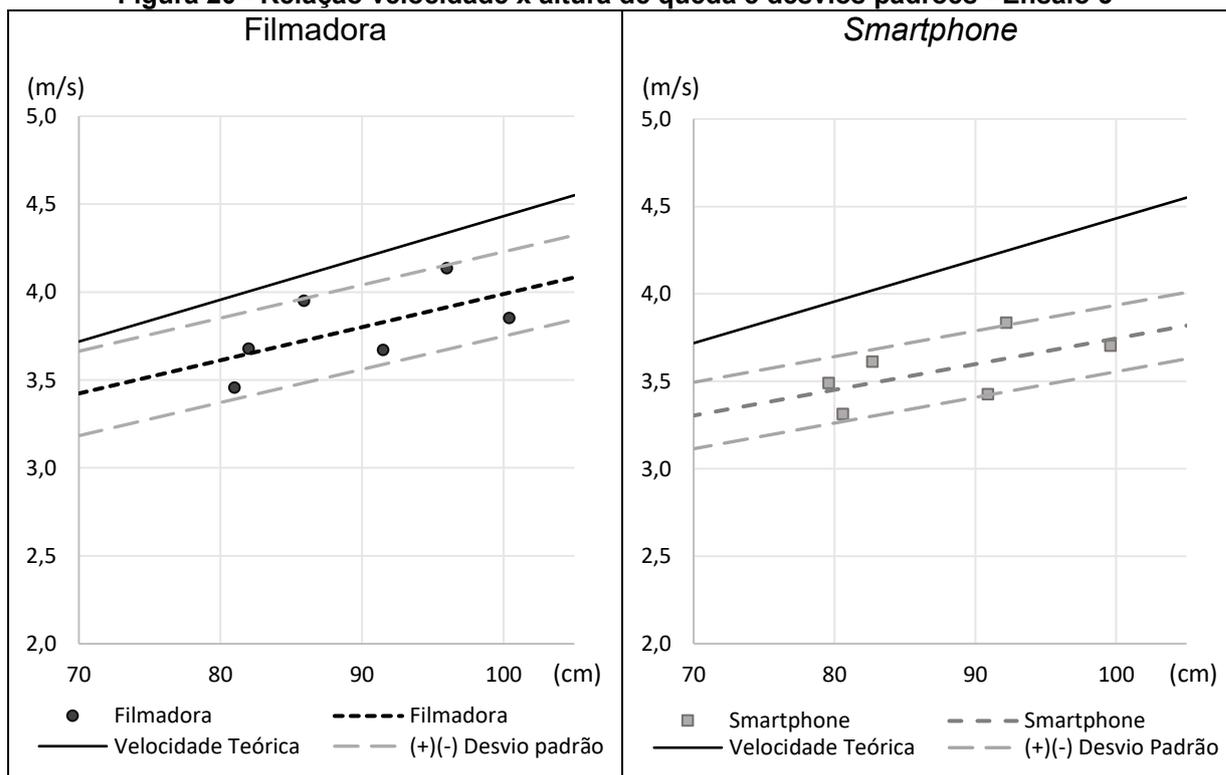
Para o ensaio 3, as Figuras 19 e 20 exibem os resultados que acompanham a regressão e com todos os pontos dentro do intervalo definido pelo desvio padrão. Diferentemente do ensaio 2, as fontes, principalmente a filmadora, demonstraram-se mais equilibradas, com regressão que nitidamente não tende a ultrapassar a velocidade teórica.

Figura 19 - Relação velocidade x altura de queda – Ensaio 3



Fonte: Autor (2022)

Figura 20 - Relação velocidade x altura de queda e desvios padrões - Ensaio 3



Fonte: Autor (2022)

Pode-se notar também a tendência das velocidades se manterem abaixo da teórica, resultado positivo, já que a velocidade teórica representa o valor esperado para um sistema perfeito, sem interferências como o atrito. Contudo, constatou-se pontos acima da velocidade teórica, os quais foram reavaliados e não demonstraram alteração. Esses valores, acima da teórica, devem estar relacionadas às condições

de filmagem como qualidade, bem como ao *software* utilizado que pode ter apresentado má interpretação do ponto a ser rastreado.

Quanto às energias cinéticas, os ensaios apresentaram valores máximos de 555,69 J para a filmadora e 659 J para o *smartphone* com mínimos de 316,77 J e 279,39 J para a filmadora e *smartphone*, respectivamente. As médias ficaram em 452,26 J para a filmadora e 497,99 pelo *smartphone*, com desvios padrões de 58,98 J pela filmadora e 64,95 J para o *smartphone*, como demonstrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Médias e desvios padrões para energia cinética

Ensaio	Filmadora		Smartphone	
	Média (J)	Desvio padrão (J)	Média (J)	Desvio padrão (J)
1	-	-	513,55	79,51
2	450,32	59,25	499,04	41,80
3	468,47	59,21	413,58	44,52
Total	452,26	58,98	497,99	64,95

Fonte: Autor (2022)

Os valores obtidos para ambas as fontes estão abaixo da média apresentada por Santana, Danziger e Danziger (2013) e dentro da faixa determinada por Santana e Danziger (2016). Os resultados entre as fontes de filmagem deste trabalho apresentaram valores próximos, sendo que, desconsiderando-se o ensaio 1 da análise do *smartphone*, as médias se diferenciam em somente 36,27 J, com a nova média do *smartphone* sendo de 488,53 J.

4.3 Fator e_1

O fator e_1 determinado a partir do videomonitoramento resultou em média de 0,95 com desvio padrão de 0,12. Para o *smartphone*, o fator de eficiência obteve média de 1,04, para um desvio padrão de 0,14, como visualizados na Tabela 5.

Tabela 5 - Médias e desvios padrões para o fator e_1

Ensaio	Filmadora		Smartphone	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
1	-	-	1,07	0,16
2	0,94	0,12	1,04	0,09
3	0,98	0,12	0,86	0,09
Total	0,95	0,12	1,04	0,14

Fonte: Autor (2022)

Já quando analisado o fator e_{1^*} , os valores reduzem consideravelmente e as médias de ambas as fontes de filmagem se igualam à 0,88, com desvio padrão de 0,09 para a filmadora e 0,11 para o *smartphone*, conforme Tabela 6. Caso o ensaio 1 não seja considerado para o *smartphone*, sua média geral seria de 0,91 para e_{1^*} , com desvio padrão de 0,09.

Tabela 6 - Médias e desvios padrões para o fator e_{1^*}

Ensaio	Filmadora		Smartphone	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
1	-	-	0,83	0,13
2	0,88	0,08	0,93	0,06
3	0,82	0,08	0,74	0,07
Total	0,88	0,09	0,88	0,11

Fonte: Autor (2022)

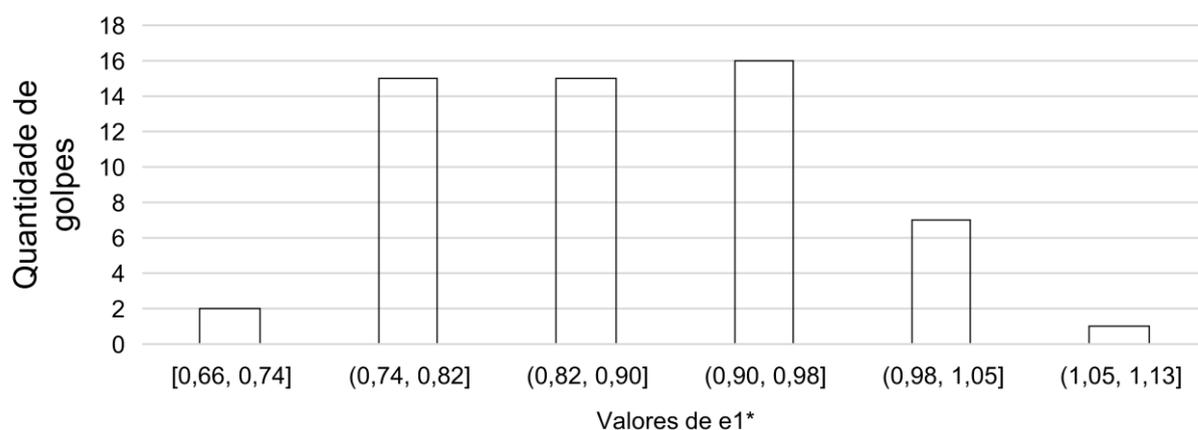
Apesar de e_{1^*} ser obtido por meio da energia potencial real, o que impediria valores maiores que 1, esses valores foram observados. Para a filmadora, e_{1^*} alcançou valor de 1,06 e para o *smartphone* chegou a 1,03.

Como todos os golpes foram analisados sob as mesmas condições e metodologias e, também, não foram notados nesses golpes, mudanças na soltura ou trajetória de queda do martelo, os quais poderiam gerar aceleração do sistema, uma possibilidade para essa ocorrência está na coleta de dados realizada pelo próprio *software* Tracker. Vale ressaltar que nessas ocasiões os golpes foram analisados mais de uma vez e os valores não se alteraram consideravelmente.

Os altos valores determinados para e_1 eram esperados a partir da análise das elevadas alturas de queda encontradas, fazendo com que o martelo adquira velocidade final acima daquela pré-estabelecida para igualar a energia cinética à energia potencial normatizada. Nota-se que, a partir da determinação desse fator, pode-se utilizá-lo como parâmetro de execução do ensaio, sendo que quando encontrados valores acima de 1 é sinal de que o martelo está sendo levantado acima da altura de queda normatizada e a execução deve ser avaliada.

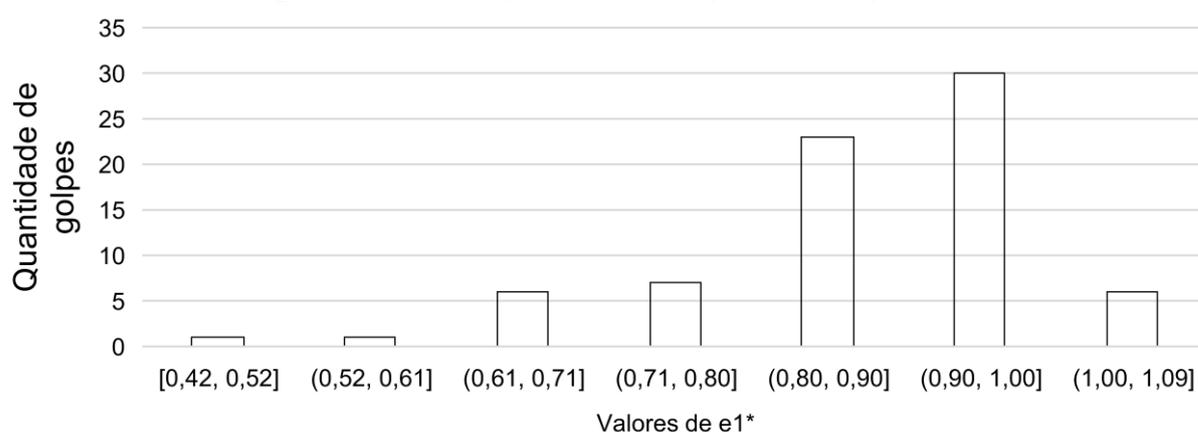
Os valores encontrados para e_{1^*} estão, satisfatoriamente, dentro do intervalo esperado, acima do encontrado por Cavalcante, Danziger e Danziger (2011), porém na mesma faixa apresentada por Santana, Danziger e Danziger (2016) e Santana e Danziger (2013). A distribuição do fator e_{1^*} pelas fontes de filmagem podem ser visualizados nas Figuras 21 e 22.

Figura 21 - Distribuição do fator e1* para a filmadora



Fonte: Autor (2022)

Figura 22 - Distribuição do fator e1* para o smartphone



Fonte: Autor (2022)

4.4 Análise das filmagens

Durante as análises realizadas, notou-se diversos pontos que devem ser levantados para avaliação da empregabilidade da técnica de monitoramento.

Primeiramente, é perceptível certa dificuldade, e até impossibilidade, de rastreamento por parte do *software* quando existem obstáculos que cruzam a trajetória de queda do martelo, fazendo com que alguns pontos tenham que ser realizados manualmente. Na Figura 23 é possível visualizar os obstáculos como mangueiras e sombras.

Figura 23 - Obstáculos para rastreamento

Fonte: Autor (2022)

Ainda, outro problema encontrado é a iluminação, filmagens realizadas de frente para o sol ficam impossibilitadas de serem analisadas, já que toda a cena fica escura e o martelo não é localizado pelo software, tendo em vista que ele trabalha por diferença de cor que nesses casos não existe. Em algumas dessas ocasiões, nem mesmo a altura de queda do martelo é possível ser determinada por não conseguir localizar a cabeça de bater como referência. A cena prejudicada pela iluminação pode ser visualizada na Figura 24.

Figura 24 - Cena prejudicada pela iluminação

Fonte: Autor (2022)

Além desses pontos, existe outro fator importante que é a variação na determinação da altura de queda dado pela angulação da filmagem. Esse fato ocorre

em ambas as fontes de filmagem, mas é agravado no *smartphone*. A variação é piorada quando o martelo atinge alturas elevadas, fazendo com que seja possível visualizar toda a sua parte de baixo e a partir daí, a altura de queda pode variar, em média, $\pm 2,5$ cm para a filmadora e $\pm 3,5$ cm para o *smartphone* aproximadamente.

A variação é agravada por filmagens que tendem a ter ângulos de filmagens maiores, caso do *smartphone*, e pode ser minimizado com o posicionamento do equipamento de filmagem em um nível acima da cabeça de bater até metade da altura de queda do martelo. Mesmo assim, como o ensaio consiste na cravação do amostrador e o sistema de filmagem possui um ponto fixo, sempre haverá a variação entre o ponto de impacto e de filmagem.

Vale ressaltar que, para este trabalho, todas as alturas foram determinadas a partir do centro do martelo, como demonstrado na Figura 25, evitando variações (Δh) que afetassem significativamente os resultados, além de manter o padrão para as análises.

Figura 25 - Variação da altura de queda



Fonte: Autor (2022)

Por último, como observação, é importante levar em conta o tempo necessário para realizar as análises, dado importante para aplicação desta técnica de monitoramento. Os golpes que não apresentaram nenhum obstáculo levaram em média 5 minutos. Já os golpes que necessitaram de ajustes manuais, chegaram a levar 10 minutos.

5 CONCLUSÃO

A partir dos 332 golpes analisados para os três ensaios, define-se que as alturas de queda médias determinadas, tanto da filmadora como para o *smartphone*, estão acima da preconizada pela ABNT (2020) e estão atreladas à maneira de levantamento do martelo. As energias potenciais, proporcionais às alturas de queda, também demonstram extrapolação da altura normatizada.

As velocidades apresentaram leve distorção em relação à velocidade teórica de queda de 75 cm de altura, acompanhadas das energias cinéticas, as quais ficaram na mesma faixa apresentada por Santana, Danziger e Danziger (2013) e, no estudo de Santana e Danziger (2016).

O fator e_1 apresentou, como esperado devido às alturas elevadas, valores altos muito próximos a 1. Já quando analisado o fator e_{1^*} , foram determinados, satisfatoriamente, valores de 0,88 para a filmadora e 0,91 para o *smartphone*.

Por último, vale ressaltar a viabilidade do emprego desta técnica de monitoramento tendo em vista que se demonstrou eficaz, útil e pouco intrusivo para análises de ensaios que são executados diariamente, possibilitando maior conhecimento dos dados obtidos. Ainda, o uso de *smartphone* para tal também é válido, levando em consideração que demonstrou resultados satisfatórios das análises.

6 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A partir do exposto, é interessante pontuar algumas questões as quais podem ser úteis para pesquisas futuras relacionadas ao tema do trabalho, que seguem:

1. Cuidados com a filmagem: iluminação, obstáculos e angulação da imagem.
2. Uso de aparato no martelo para melhorar a diferença de cor em relação à cena e, conseqüentemente, a qualidade de rastreamento.
3. Realizar comparação, também, entre diferentes *smartphones*.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6484**: Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

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

BELINCANTA, A. **Avaliação de fatores intervenientes no índice de resistência à penetração do SPT**. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos em Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

BELINCANTA, A.; FERRAZ, R. L. Fundamentals and methods of dynamic energy measurements in SPT. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 22, p. 1473-1482, 13 maio, 2000.

CASIO Computer CO., LTD. Manual de instruções Casio Exilim EX-FH20. **Manual de instruções**. [20--]. Disponível em: https://support.casio.com/storage/en/manual/pdf/EN/001/EXFH20_EN.pdf. Acesso em: 25 maio 2022.

CAVALCANTE, E. H.; **Investigação teórico-experimental sobre o SPT**. 2002. Tese (Doutor em Ciências em Engenharia Civil) – Pós-graduação de Engenharia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

CAVALCANTE, E. H.; DANZIGER, B. R.; DANZIGER, F. A. B.; Measurement of Drop Height and Impact Velocity in the Brazilian SPT System. **Soils and Rocks**, São Paulo, v. 1, p. 207-218, dez. 2011.

COSTA, G. A. S. Fotos – equipamento SPT manual. Mensagem recebida por: matheusluza@alunos.utfpr.edu.br em 20 maio 2022a.

COSTA, G. A. S. Trabalho de Conclusão de Curso para 2022. Mensagem recebida por: matheusluza@alunos.utfpr.edu.br em 21 fev 2022b.

DANZIGER, F. A. B.; DANZIGER, B. R.; CAVALCANTE, E. H.. Reflexões sobre a Energia no SPT e o Significado do Valor de N em Circunstâncias Particulares. In: XIV COBRAMSEG, 2008, Búzios. p. 2214-224.

DÉCOURT, L. SPT, CPT, pressuremeter testing and recent developments in in-situ testing – Part 2: The standard penetration test, state-of-the-art report. **International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE)**, Rio de Janeiro, n. 12, p. 2405-2416, 1989.

Frames-per-second. Frames per second web tool. 07 de novembro de 2016. Disponível em: <http://frames-per-second.appspot.com>. Acesso em: 07 maio 2022.

HOWIE, A. J.; et al. **Comparison of Energy Measurement Methods in the Standard Penetration Test**. Geotechnical Research Group - Department of Civil Engineering em University of British Columbia, Vancouver, 2003.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. **ISSMFE 1989**: Technical Committee on Penetration Testing of Soils – TC 16 with Reference Test Procedures. Linköping: ISSMFE. 1989.

MENDES, E. **Cálculo de Velocidade Baseado em Imagem de Vídeos Através de Software Livre**. 2017. (Pós-graduação Lato Sensu) – Especialização em Perícia de Acidentes - Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

ODEBRECHT, E. **Medidas de Energia no Ensaio SPT**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia – Programa de Pós-Graduação em – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

ROGERS, D. J. Subsurface Exploration Using the Standard Penetration Test and the Cone Penetrometer Test, **The Geological Society of America**, Missouri, p. 161-179, maio 2006.

SANTANA, C. M.; DANZIGER, F. A. B.; DANZIGER, B. R.. The measurement of energy reaching the sampler in SPT. **Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4**, London, v. 1, p. 921-926, jan. 2013.

SANTANA, C. DANZIGER, F. Monitoramento da Energia em Ensaio SPT Realizados no Estado do Rio de Janeiro. In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. 10., 2016, Belo Horizonte. Belo Horizonte: DNIT; UFRJ, 2016.

SCHMERTMANN, J; PALACIOS, A. Energy Dynamics of SPT, **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, New York, v. 105, p. 909-926.

SELVAM, S.; MUKUNDAN, M.; ALAGIRISAMY, S. Standard Penetration Test (SPT) Pitfalls and Improvements. In: PROCEEDING OF INDIAN GEOTECHNICAL CONFERENCE 2020, 12., 2020, Visakhapatnam. Visakhapatnam: Andhra University, 2020. p. 391-400.

APÊNDICE A – Validação do *software Tracker*

A VALIDAÇÃO DO SOFTWARE TRACKER

Para validação do uso do *Tracker*, foi realizado em laboratório, filmagens de um objeto em queda livre em uma altura de 80 cm. No ensaio em questão foram filmadas um total de 3 quedas utilizando a Casio EX-FH20 à uma taxa de 210 qps.

A.1 Materiais Utilizados

A.1.1 Objeto de estudo

Para objeto de estudo buscou-se uma forma esférica que é capaz de ter queda livre sem que a sua rotação influencie na análise e, por isso, utilizou-se uma bola de tênis.

A.1.2 Câmera

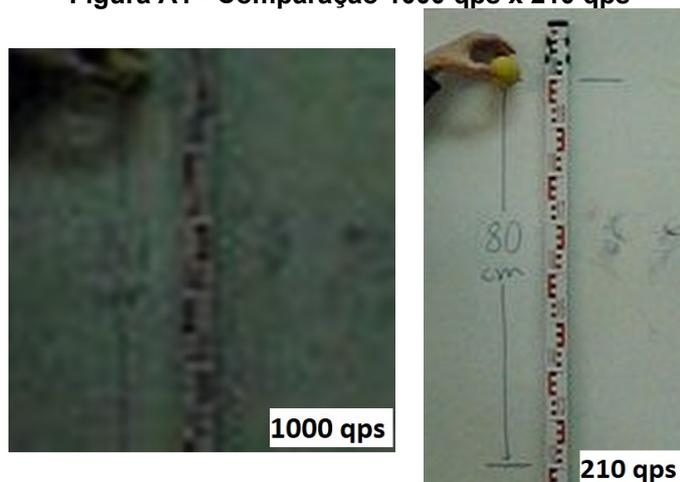
No estudo utilizou-se a filmadora Casio EX-FH20, a mesma utilizada para as filmagens em campo dos SPTs. A câmera possui capacidade de 1000 qps, entretanto, a qualidade de imagem é prejudicada além de possuir uma amplitude de filmagem reduzido, impossibilitando a análise tendo em vista que o software não é capaz de identificar corretamente o objeto a ser rastreado. Logo, realizou-se filmagens com 210 qps e qualidade de 450x360 pixels, conforme demonstrado na Tabela A1.

Em suma, por não fazer parte do escopo de pesquisa deste trabalho, quanto menor o número de pixels disponíveis pior a qualidade de imagem, a comparação da qualidade fornecida e amplitude reduzida pode ser visualizada na Figura A1.

Tabela A1 - Relação qualidade x taxa qps

Taxa qps	Tamanho de imagem (Pixels)
210	450 x 360
420	224 x 268
1000	224 x 56

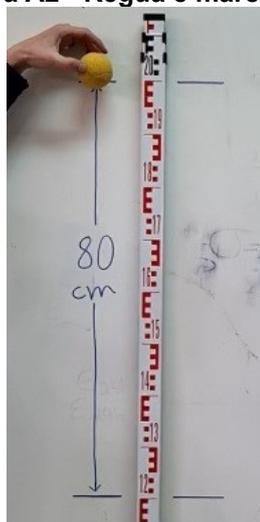
Fonte: Adaptado de Casio (s.d.)

Figura A1 - Comparação 1000 qps x 210 qps

Fonte: Autor (2022)

A.1.3 Mira topográfica

Para marcação da altura de queda do objeto de estudo utilizou-se uma mira topográfica que foi disposta verticalmente com marcações em 2,0 m e 1,2 m. A mira e as marcações podem ser observadas na Figura A2.

Figura A2 - Régua e marcações

Fonte: Autor (2022)

A.1.4 Software livre Tracker

Para as análises das filmagens utilizou-se o *Tracker*, o mesmo que será utilizado para estudar os SPTs, tema de estudo deste trabalho.

A.2 Esquema e processo de análise do ensaio

Para a filmagem da queda livre posicionou-se um tripé à 1,90 m da cena, composta pela mira topográfica e as marcações, no qual foi disposto a câmera. O esquema é demonstrado na Figura A3.

Figura A3 - Esquema para registro de queda



Fonte: Autor (2022)

O processo de análise dos ensaios para obtenção dos resultados e validação, utilizou-se o mesmo descrito em 3.2.1.

A.4 Resultados

Com as análises obteve-se os seguintes resultados de posição inicial e velocidade final, na passagem da bola de tênis pela marca de 1,20 m da mira e o respectivo instante t. Os resultados são demonstrados na Tabela A2.

Tabela A2 - Resultados das análises no Tracker

Queda	Câmera	Taxa (qps)	Altura de queda (m)	Velocidade teórica para altura de queda (m/s)	Velocidade final (m/s)
1	Filmadora Casio	210	0,819	4,009	3,991
2			0,807	3,979	3,932
3			0,802	3,967	4,060

Fonte: Autor (2022)

Ainda, realiza-se primeiramente a comparação das velocidades obtidas com a velocidade teórica, a qual pode ser determinada pela Equação 8. Sendo que a velocidade teórica para a altura de 0,8 m é a seguinte:

$$V_i = \sqrt{2 \times 9,81 \times 0,8}$$

$$V_i = 3,961 \text{ m/s}$$

A comparação é apresentada na Tabela A3.

Tabela A3 - Comparação das velocidades reais e teórica

Velocidade (m/s)	Velocidade teórica (m/s)	Diferença (%)	Desvio Padrão
3,991	3,961	0,752	0,064
3,932		0,738	
4,060		2,438	

Fonte: Autor (2022)

A.5 Discussões e conclusão

A partir do exposto, nota-se que as velocidades obtidas são compatíveis com a velocidade teórica. A velocidade número 3 apresenta uma diferença destoante em relação às demais que pode ter ocorrido devido à maneira de soltura da bola de tênis, devido a um pequeno impulso para baixo, involuntário, durante o movimento, por exemplo.

Pode-se destacar também, que entre as velocidades, o *software* apresenta constância nos valores determinados, já que estas estão compatíveis com a altura de soltura determinada, evidenciando esse fato no caso das velocidades 1 e 2, nas quais a primeira apresenta uma altura de queda maior (1,49% maior) e logo, velocidade maior em relação à segunda.

Portanto, pode-se afirmar que o *software* é capaz de realizar as análises pretendidas para este trabalho de maneira satisfatória.