

Estudo da Energia Potencial e Cinética no SPT com Martelo Operado Manualmente

Matheus Eduardo Luza

Engenheiro Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cascavel-PR, Brasil, matheusluza@alunos.utfpr.edu.br

Guilherme Alan Souza Costa

Professor Adjunto, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Brasil, guilhermecosta@utfpr.edu.br

Eduardo Oliveira Muguet

Engenheiro Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, eduardomuguet@gmail.com

Flávia Sampaio Cabral

Engenheira Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, flavia.scabral@gmail.com

Fernando Artur Brasil Danziger

Professor Titular, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, danziger@coc.ufjf.br

RESUMO: O SPT tem sido alvo de críticas quanto à confiabilidade devido às variáveis de equipamentos e procedimentos executivos. Assim, a interpretação do ensaio através da compreensão das energias envolvidas se faz necessária para avaliar os resultados. Este artigo analisa a energia potencial máxima e a energia cinética de um martelo tipo pino guia erguido manualmente na iminência do impacto com a cabeça de bater, fator de eficiência e_I . Para isso, foram analisados um total de 332 golpes de três ensaios SPT utilizando o *software* livre Tracker, provenientes de duas fontes de filmagens, um *smartphone* e uma filmadora Casio EX-FH20. Nestes golpes foram determinadas a altura de queda e a velocidade de impacto. O resultado obtido foi: altura de queda e velocidade médias de 87,1 cm e 3,72 m/s para a filmadora e de 91,0 cm e 3,91 m/s para o *smartphone*. Obteve-se um fator e_I de 0,95 para a filmadora e de 1,04 para o *smartphone*, sendo que o fator e_I^* foi igual a 0,88 para ambas as fontes. Vale apontar que o método de análise, utilizando o *software*, apresenta limitações como sombras e objetos que cruzam a trajetória do martelo. Finalmente, as análises demonstraram-se válidas e práticas como um método de acompanhamento.

PALAVRAS-CHAVE: SPT, Eficiência, Energia Potencial, Energia Cinética, Altura de Queda, Velocidade de Impacto.

ABSTRACT: The SPT has been criticized for its reliability due to variable equipment and executive procedures. Therefore, the interpretation of the test through understanding the energies involved is necessary to evaluate the results. This article aims to analyze the maximum potential energy and kinetic energy of a hand lifted and released pinweight hammer at the imminence of impact against the anvil, efficiency factor e_I . To achieve this objective, a total of 332 blows from three SPT were analyzed using Tracker, a free software, from two filming sources, a smartphone and a Casio EX-FH20 camcorder. The drop height and velocity at the point of impact were determined for these blows. The experimental result obtained was: average drop height and velocity of 87.09 cm and 3.72 m/s for the camcorder and 91.01 cm and 3.91 m/s for the smartphone. An e_I factor of 0.95 was obtained for the camcorder and 1.04 for the smartphone, with the e_I^* factor being equal to 0.88 for both sources. It is worth pointing out that the analysis method, using Tracker software, has limitations such as shadows and objects crossing the hammer's path. Finally, the analysis proved to be valid and practical as a monitoring method.

KEYWORDS: SPT, Efficiency, Potential Energy, Kinetic Energy, Drop Height, Impact Velocity.

1 INTRODUÇÃO

As investigações do subsolo têm papel fundamental no projeto, execução e desempenho de qualquer tipo de estrutura, a partir delas se determinam as propriedades básicas do material explorado e, portanto, assim se define a estratigrafia do subsolo. Para tal, é prática comum a realização de ensaios *in situ*, entre os quais destaca-se o SPT (*Standard Penetration Test*), principalmente no cenário nacional, devido a sua robustez, simplicidade de execução e ainda, baixo custo envolvido (DÉCOURT, 1989). Contudo, apesar do ensaio possuir diretrizes normatizadas pela NBR 6484 (ABNT, 2020), a dependência do operador, adaptações fora de norma em procedimentos e variações nos equipamentos fazem com o que o SPT seja alvo de críticas quanto à confiabilidade dos resultados, principalmente ao valor tomado como índice de resistência à penetração (N_{SPT}), determinado pelo número de golpes necessários para penetração de 30 cm do amostrador no solo.

A interpretação dos valores de N_{SPT} para critérios de projetos geotécnicos podem ser aprimoradas com o entendimento das energias envolvidas. Dessa maneira, mais recentemente, com o objetivo de compreender como se dá a transferência de energia durante o ensaio, algumas pesquisas tem analisado o movimento do martelo para determinação da Energia Potencial e Energia Cinética no impacto, como Cavalcante et al. (2011), Santana e Danziger (2016) e Oliveira et al. (2020).

Nesse mesmo contexto, este trabalho aborda a determinação das energias potencial imposta ao sistema, (altura de queda do martelo), e a energia cinética na iminência do impacto do martelo com a composição de hastes, analisando filmagens em alta velocidade registradas em campo por duas fontes distintas, um *smartphone* e uma filmadora Casio EX-FH20 para um sistema com martelo pino-guia erguido e liberado manualmente.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Energias no SPT

Durante a realização do SPT a energia imposta ao sistema vai sendo transmitida até o momento em que o amostrador crava no solo. Em dois estágios a energia é teoricamente conhecida (energias potencial e cinética) e pode ser medida. A energia potencial máxima se dá quando o martelo atinge a altura máxima e após a liberação, aquela é convertida em energia cinética até o momento do impacto do martelo contra a cabeça de bater, quando é transferida para o conjunto de hastes e, finalmente, ao amostrador em forma de onda longitudinal de compressão. Na prática brasileira (ABNT, 2020), o martelo possui massa igual a 65 kg e altura de queda de 75 cm, resultando em uma energia potencial igual a 478,2 J.

Considerando variações às quais o ensaio está sujeito, é necessário padronizar o número de golpes N do SPT necessários para cravar os 30 cm finais, correspondente à 60% da energia de queda livre teórica do martelo, valor utilizado de referência internacional como N_{60} (DÉCOURT, 1989), conforme Equação 1.

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

Onde:

N_i = número de golpes associado à E_i ;

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

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

Segundo Décourt (1989), a energia ENTHRU (E_i) como a energia que atinge a composição de hastes e pode ser calculada pela Equação 2.

$$E_i = e_1 e_2 e_3 E^* \quad (2)$$

Na qual “ e_n ” são fatores de correção que associam as perdas de energia desde o início do evento até uma seção de haste logo abaixo da cabeça de bater. O fator de e_1 , conforme Décourt (1989) relaciona a maneira com que o martelo é erguido e liberado e pode ser obtido pela razão entre a energia cinética (E_k) e a energia

potencial nominal (E^*), ver Equação 3. Ainda, esse fator pode ser corrigido para valores reais e passa a ser denominado de e_1^* (SANTANA, DANZIGER, 2016), desde que se substitua a energia potencial nominal pela real (E_p), Equação 4.

$$e_1 = \frac{E_k}{E^*} \quad (3)$$

$$e_1^* = \frac{E_k}{E_p} \quad (4)$$

Já o fator e_2 , como descrito por Santana et al. (2013) e Santana e Danziger (2016), é a razão entre a energia medida no topo de composição de hastes (E_i) e a energia cinética imediatamente anterior ao impacto (E_k), e está relacionado com a massa da cabeça de bater. Por fim, o fator e_3 relaciona-se ao comprimento do conjunto de hastes e como citado por Santana et al. (2014) estudos (como os de Cavalcante, 2002; Odebrecht, 2003 e Daniel et al., 2005) têm mostrado que a energia transmitida às hastes é independente do comprimento, logo e_3 deveria ser tomado como 1.

No SPT, o martelo supostamente entra em regime teórico de queda livre a partir do momento de sua soltura, quando a energia potencial acumulada na altura máxima de queda se transforma em energia cinética até o momento de impacto. Logo, ao considerar um sistema perfeito, a energia cinética na iminência do impacto deve ser igual à energia potencial máxima. Assim, determina-se que a velocidade de impacto teórica é dada pela Equação 5, onde V_i é a velocidade de impacto, g é a aceleração da gravidade e h representa a altura de queda do martelo.

$$V_i = \sqrt{2gh} \quad (5)$$

3 METODOLOGIA

Para a determinação das energias potencial e cinética, foram analisadas filmagens de três ensaios distintos com o mesmo equipamento SPT e três operadores, os quais não necessariamente foram os mesmos. Esse equipamento consiste em sistema convencional, composto por tripé, roldana fixa no topo e martelo tipo pino-guia erguido e liberado manualmente com auxílio de cabo de aço. As filmagens foram eventos práticos reais executados no município de Toledo, no estado do Paraná.

3.1 Material

A captura da trajetória do martelo durante a queda foi conduzida a partir de duas câmeras: uma filmadora Casio EX-FH20 e um *smartphone*. A primeira foi a mesma empregada por Santana et al. (2013), capaz de registrar até 1.000 fps (*frames* por segundo) e a segunda fornece filmagens de 240 fps em alta resolução. O uso do *smartphone* se fundamenta pelo fato de tal equipamento ser uma ferramenta poderosa, acessível e prática para o cotidiano. Há na filmadora uma limitação na qualidade de imagem fornecida quando a taxa de aquisição é muito alta, portanto, as filmagens em campo foram realizadas com 210 fps.

A avaliação da trajetória do martelo foi realizada com o *software* Tracker, capaz, de acordo com Mendes (2007), de analisar e armazenar a trajetória, posição e tempo para o objeto estudado. Assim, essa ferramenta é utilizada para a determinação da altura de queda e posição do martelo ao longo do tempo até o momento imediatamente anterior ao impacto. O *software* realiza o rastreamento de um determinado ponto utilizando a menor diferença de cores (dos pixels) entre os pontos da cena. Para utilização do programa, é necessária a calibração da cena com medidas de referência, para o trabalho em questão essa referência foi a altura de 22 cm do martelo pino guia utilizado. Na Figura 1 se ilustra a tela do programa onde se observa a medida usada como calibração da cena. Na direita desta figura é visível a evolução do deslocamento do ponto rastreado ao longo do tempo.

A critério do usuário, os dados podem ser analisados no próprio programa ou exportados para qualquer planilha eletrônica. Vale destacar que é necessário informar ao programa a velocidade de registro do vídeo, em fps, para que o intervalo de tempo entre duas posições consecutivas seja computado corretamente.

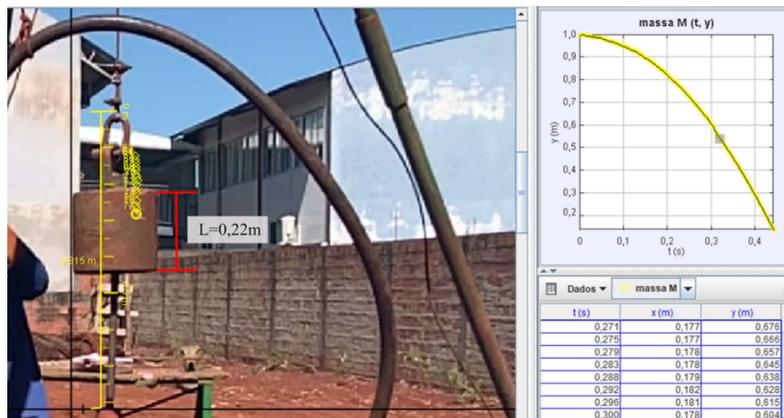


Figura 1. Tela do programa Tracker com análise de um golpe típico.

3.2 Processamento dos dados

A partir dos dados obtidos pela análise no *software*, (posição x tempo), estipulou-se uma equação polinomial de grau 2, para cada golpe, que melhor representasse o movimento de queda do martelo. O uso desse tipo de equação é corroborado pelo fato de que Santana e Danziger (2016) demonstraram ser possível construir um bom ajuste ao movimento para a determinação da posição pelo tempo.

A representação matemática da posição em função do tempo é dada pela Equação 6 onde $x(t)$ expressa a posição do martelo em um instante de tempo t do evento, e A , B e C são as constantes determinadas no ajuste da equação à trajetória obtida experimentalmente. A avaliação da velocidade se dá com a Equação 7, onde $v(t)$ é a derivada da Equação 6 em relação a t (velocidade instantânea do martelo no instante de tempo t da queda).

$$x(t) = At^2 + Bt + C \quad (6)$$

$$\dot{x}(t) = v(t) = \frac{dx}{dt} = 2At + B \quad (7)$$

Na Figura 2 é apresentada a tela de análise de dados, no próprio Tracker. Na direita constam os pares ordenados que deram origem ao gráfico. Na parte inferior da figura estão os parâmetros (A , B e C) conforme Equação 6. A velocidade foi calculada com a Equação 7, neste caso para o tempo t de 0,442 s (última linha da tabela do lado direito inferior da figura), o que leva a uma velocidade de impacto calculada igual a 3,92 m/s (o valor negativo da equação significa que o movimento é descendente).

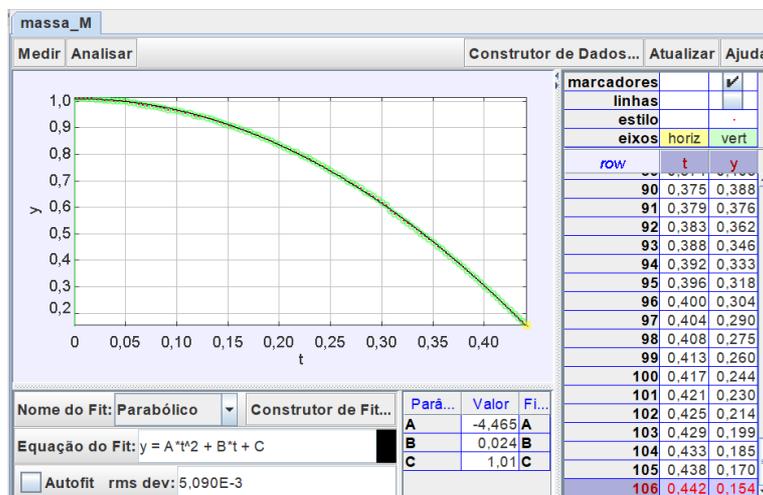


Figura 2. Análise da curva de ajuste no Tracker – golpe típico.

Assim, a energia cinética foi medida na iminência do impacto, ou seja, no quadro de filmagem anterior ao impacto o qual aconteceu em um tempo t , que foi utilizado para definir a velocidade nesse instante e consequentemente a energia cinética. Ainda, a energia potencial foi determinada pela análise quadro a quadro do levantamento do martelo por meio do uso de comandos como *slow motion* e *pause* de mesmo modo que realizado por Cavalcante et al. (2011) e Santana et al. (2013), sendo que o quadro no instante de soltura marca a altura de queda utilizada para a determinação da energia potencial.

Com a determinação das energias reais (potencial e cinética) foram realizadas as comparações com as respectivas energias nominais e avaliados os coeficientes de correção e_I e e_I^* , conforme as Equações (3) e (4).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para determinação das energias potencial e cinética e fatores de correção e_I e e_I^* foram analisados um total de 332 golpes de três ensaios distintos. Destes, 130 foram utilizados para determinação da energia cinética e fatores e_I e e_I^* , já para a energia potencial, todos os 332 golpes foram empregados.

4.1 Altura de queda

As alturas de queda registradas, para toda a série analisada, apresentaram valor máximo pela filmadora Casio de 103,1 cm e para o *smartphone* de 106,7 cm. Já a altura mínima, para a filmadora foi de 71,6 cm e para o *smartphone* foi de 75,6 cm. Elevações de aproximadamente 1,0 m de altura já eram esperadas, tendo em vista o acompanhamento de campo bem como resultados reportados na literatura para sistemas manuais como em Santana et al. (2013) e Oliveira et al. (2020), os quais registraram alturas de 99 cm e 94 cm, respectivamente.

Em relação às alturas médias para todo o universo de dados, obteve-se 91,0 cm para o *smartphone* com desvio padrão de 6,6 cm e de 87,1 cm com desvio padrão de 7,6 cm para a filmadora. Desvios estes em acordo com os relatados por Santana et al. (2013), Santana e Danziger (2016) e Oliveira et al. (2020).

Na Figura 3 são ilustradas todas as alturas de queda medidas, nela é possível notar que foram majoritariamente superiores à nominal. Em termos médios, as alturas de queda analisadas pela filmadora e pelo *smartphone* demonstraram superioridade de 16,1% e 21,4%, respectivamente em relação ao normatizado de 75 cm (ABNT, 2020).

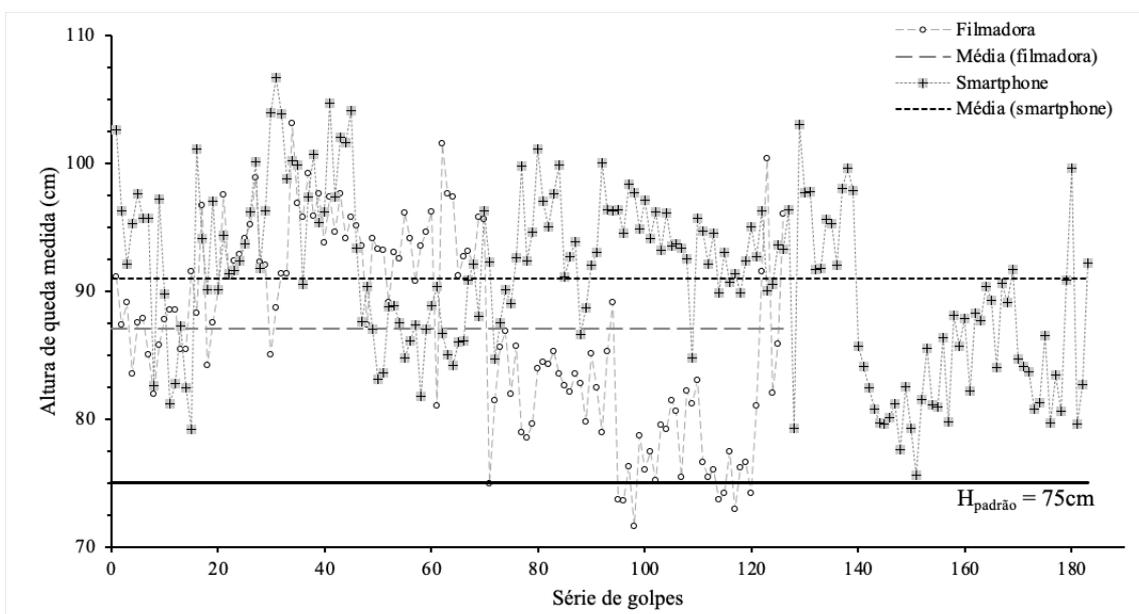


Figura 3. Variação das alturas de queda medidas.

Embora nem todas as alturas de queda tenham sido monitoradas simultaneamente e estes dados não estejam representados na Figura 3, é possível afirmar que a diferença nas medidas apresentadas pelas duas fontes de filmagem está atribuída à calibração da câmera realizada dentro do *software* Tracker. Isto devido ao posicionamento das filmadoras (por mais próximas que estejam, há diferença no ângulo de visada) e também pelas distintas especificações das lentes, como ângulo de abertura por exemplo, ocasionando diferenças nas calibrações.

4.2 Velocidade de impacto

As velocidades de impacto calculadas variaram entre 3,12 m/s e 4,14 m/s para a filmadora com desvio padrão de 0,25 m/s e média de 3,72 m/s. Para o *smartphone*, as velocidades ficaram entre 2,93 m/s e 4,50 m/s, com desvio padrão de 0,26 m/s e média de 3,91 m/s.

É possível visualizar as distribuições das velocidades para os ensaios na Figura 4. Nesta figura constam as curvas teóricas da velocidade, conforme Equação 5 e as curvas de tendência das séries.

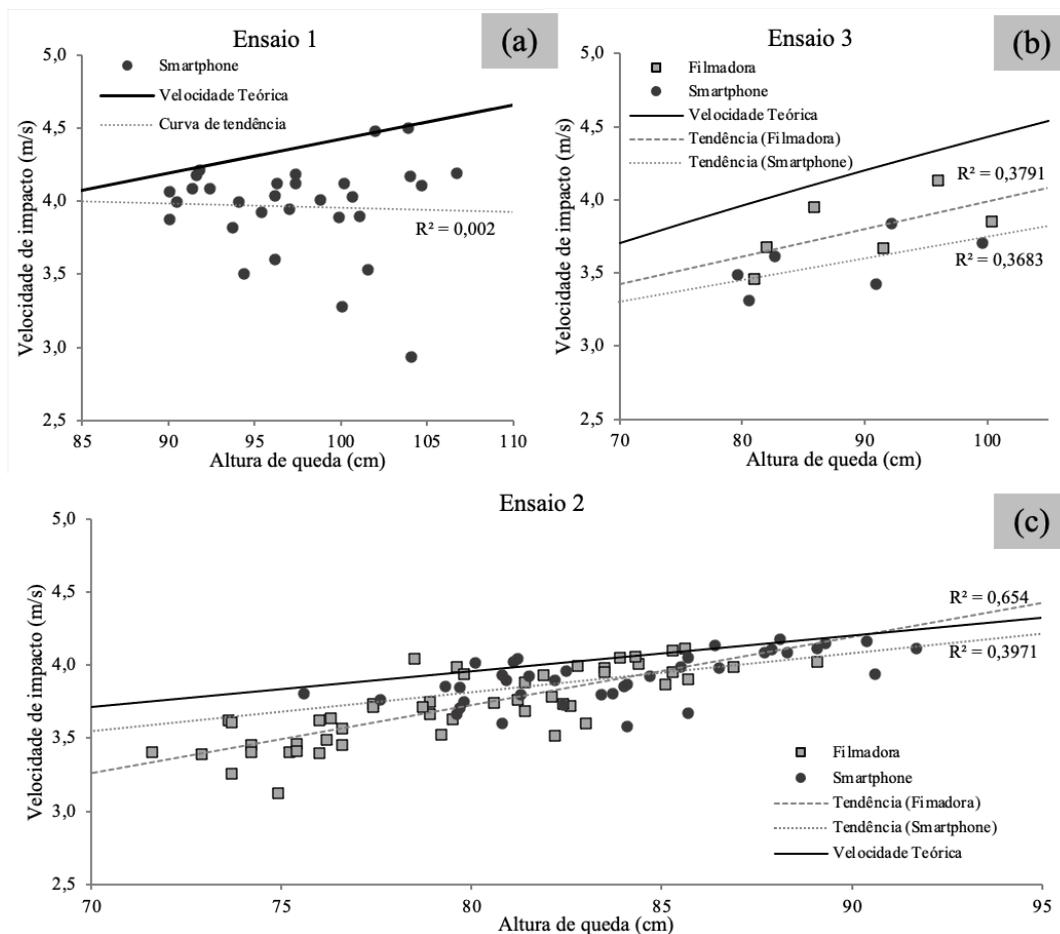


Figura 4. Relação velocidade x altura de queda. (a) Ensaio 1, (b) Ensaio 3, (c) Ensaio 2.

Para o ensaio 1, a princípio percebe-se a tendência de redução da velocidade com o aumento da altura de queda, contudo, o R^2 da curva de regressão ajustada (Figura 4.a) foi igual a 0,002, o que significa que há uma grande dispersão de dados, não havendo uma tendência bem definida. Como para esse ensaio não houve registro com a filmadora, não é possível afirmar como erro de leitura ou inconsistência do método, assim, o resultado pode ser assumido como não convencional para amostra analisada.

Para os ensaios 2 e 3 (Figuras 4.b e 4.c), as velocidades determinadas apresentaram comportamento de acordo com o esperado, na maioria dos casos abaixo da velocidade teórica e proporcional à altura de queda. Em relação aos pontos que superaram a velocidade teórica (Figura 4.c), estes foram reavaliados no programa Tracker e os resultados se mantiveram. Tendo em vista que não há como o martelo descer acelerado no sistema

em questão, a conclusão para estes dados é de que as condições de filmagem influenciaram a interpretação da trajetória ao longo do tempo. Sendo condicionantes como resolução, iluminação e temperatura influentes na aquisição das imagens e, conseqüentemente, na capacidade de rastreamento do programa computacional.

4.3 Energia Potencial e Cinética

A energia potencial é diretamente proporcional à altura de queda ($E_p = mgh$), no entanto, a velocidade de impacto se relaciona com a energia cinética através do seu quadrado ($E_k = 0,5mv^2$). Na Tabela 1 são apresentadas as energias potencial e cinética em termos de valores médios e também de desvio padrão (DP). A influência da variação das velocidades é evidente ao se observar a magnitude dos desvios padrões na energia cinética.

Tabela 1. Energia Potencial e Cinética – Martelo pino-guia erguido manualmente.

| Ensaio | Quantidade de dados | | Energia Potencial (J) | | Energia Cinética (J) | |
|--------------|---------------------|------------|-----------------------|------------|----------------------|------------|
| | | | média (DP) | | média (DP) | |
| | Filmadora | smartphone | Filmadora | smartphone | Filmadora | smartphone |
| 1 | 94 | 139 | 588 (30) | 594 (35) | - | 513 (79) |
| 2 | 50 | 38 | 508 (27) | 534 (25) | 450 (59) | 499 (42) |
| 3 | 6 | 6 | 570 (50) | 559 (50) | 468 (59) | 414 (44) |
| Toda a série | 150 | 183 | 555 (49) | 580 (42) | 452 (59) | 498 (65) |

Em termos médios, a energia potencial disponível no sistema foi sempre superior ao normatizado (478 J). Analisando toda a série, no instante do impacto, houve para a filmadora uma perda de 5,4% e para o smartphone um aumento de 4,2% em relação a energia potencial teórica. Tal aumento consiste na superelevação do martelo. Destaca-se que estes dados médios não podem ser comparados diretamente, afinal não foram todos capturados simultaneamente pelas duas câmeras.

4.4 Fatores de correção e_l e e_l^*

A partir das magnitudes de E_p e E_k é possível determinar os fatores e_l e e_l^* , os quais constam na Tabela 2. Como previamente exposto, para e_l não há necessidade de medir a altura de queda tendo em vista que esse fator considera a energia potencial nominal.

Tabela 2. Fatores e_l e e_l^* – Martelo pino-guia erguido manualmente.

| Ensaio | Quantidade de dados | | Fator e_l | | Fator e_l^* | |
|--------------|---------------------|------------|-------------|-------------|---------------|-------------|
| | | | média (DP) | | média (DP) | |
| | Filmadora | smartphone | Filmadora | smartphone | Filmadora | smartphone |
| 1 | 0 | 30 | - | 1,07 (0,17) | - | 0,83 (0,13) |
| 2 | 50 | 50 | 0,94 (0,12) | 1,04 (0,09) | 0,88 (0,08) | 0,93 (0,06) |
| 3 | 6 | 6 | 0,98 (0,12) | 0,85 (0,09) | 0,82 (0,08) | 0,74 (0,07) |
| Toda a série | 56 | 86 | 0,95 (0,12) | 1,04 (0,14) | 0,88 (0,08) | 0,88 (0,11) |

É possível notar que para e_l foram obtidos valores elevados (superiores a 1,0 em alguns casos). Tal fato já era esperado após a avaliação das alturas de queda que superaram o recomendado por norma. Esta superelevação permite que o martelo adquira velocidade final acima daquela pré-estabelecida para igualar a energia cinética à energia potencial normatizada.

Os valores de e_l^* estão, satisfatoriamente, dentro do intervalo esperado, acima do encontrado por Cavalcante et al. (2011), que foi de 0,70, porém na mesma faixa apresentada por Santana et al. (2013) e Santana e Danziger (2016). A Tabela 3 apresenta os valores obtidos neste trabalho e as contribuições de outros autores.

Tabela 3. Fatores e_I e e_I^* para sistemas manuais – valores médios.

| Referência | e_I | e_I^* |
|---------------------------|-------------|-------------|
| Cavalcante et al. (2011) | 0,74 | 0,70 |
| Santana et al. (2013) | 1,06 | 0,92 |
| Santana e Danziger (2016) | 0,78 a 1,10 | 0,86 a 0,99 |
| Presente artigo | 0,95 a 1,04 | 0,88 |

5 CONCLUSÕES

A partir dos 332 golpes analisados, 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 (sistema manual). Consequentemente, as respectivas energias potenciais também extrapolam o limite normatizado.

As velocidades de impacto apresentaram leve distorção em relação à velocidade teórica de queda de 75 cm, acompanhadas das energias cinéticas, as quais ficaram na mesma faixa apresentada por Santana et al. (2013) e Santana e Danziger (2016).

O fator e_I apresentou valores elevados, em alguns casos, superiores a 1,0. Já quando analisado o fator e_I^* , obteve-se valor médio de 0,88 para ambas as fontes de aquisição de vídeo. Sendo assim, para o sistema manual em questão (martelo pino-guia erguido manualmente com roldana fixa) este fator pode ser considerado representativo para avaliar a relação das perdas entre energia potencial e cinética.

Finalmente, vale ressaltar a viabilidade do emprego desta técnica de monitoramento tendo em vista que se demonstrou eficaz, útil e pouco intrusiva para análises de ensaios que são executados diariamente, possibilitando maior conhecimento dos dados obtidos. Ainda, o uso de *smartphone* nesse processo também é válido, levando em consideração sua portabilidade, qualidade de imagem e os resultados obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 6484. *Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- 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*, 34(3), 207-218.
- Décourt, L. (1989) SPT, CPT, pressuremeter testing and recent developments in in-situ testing – Part 2: The standard penetration test, state-of-the-art report. In: *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE)*, Rio de Janeiro. 12, 2405-2416.
- Mendes, E. (2017) *Cálculo de Velocidade Baseado em Imagem de Vídeos Através de Software Livre*. Monografia (Pós-graduação Lato Sensu) – Especialização em Perícia de Acidentes - Instituto Federal de Santa Catarina, 77 p.
- Oliveira, T.C.F., Lorenzi, V., Bogorni, J., Lorenzi, G.A. (2020) O Efeito da Automatização no Processo de Sondagem SPT – Uma Nova Perspectiva Sobre Equipamentos Mecanizados In: XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Campinas. Anais... ABMS. 4551-4558. <http://doi.org/10.4322/cobramseg.2022.0573>
- Santana, C.M., Danziger, F.A.B., Danziger, B.R. (2013) The measurement of energy reaching the sampler in SPT. *Proc. 4th Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4*, Porto de Galinhas, p. 921-926.
- Santana, C.M., Danziger, B.R., Danziger, F.A.B. (2014) Energy Measurement in the Brazilian SPT System. *Soils and Rocks*, 37(3), 243-255. <https://doi.org/10.28927/SR.373243>
- Santana, C.M., Danziger, F.A.B. (2016) Monitoramento da Energia em Ensaios SPT Realizados no Estado do Rio de Janeiro. In: *XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Belo Horizonte. Anais... ABMS. v. 1, 221-245.