

Avaliação Paramétrica da Eficiência de Energia no SPT em Sondas Mecanizadas

Rafael Cristiano Piton

Engenheiro Sênior, VALE S.A., Parauapebas, Brasil, rafael.piton@vale.com

Ezequias Oliveira

Engenheiro Master, VALE S.A., Belo Horizonte, Brasil, ezequias.oliveira@vale.com

Marieli Biondo

Gerente Padronização e Geotecnia, VALE S.A., Belo Horizonte, Brasil, marieli.biondo@vale.com

Guilherme De Freitas

Diretor Técnico, Geocontrole, Belo Horizonte, Brasil, guilhermefreitas@geocontrole.com

Helena Paula Nierwinski

Professora, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, Brasil, helena.paula@ufsc.br

RESUMO: A determinação e o controle da eficiência de energia no ensaio de SPT (*Standard Penetration Test*) são essenciais para a padronização e interpretação de resultados geotécnicos, especialmente quando estes dados subsidiam a caracterização de materiais empregados ou confinados em pilhas e barragens de rejeitos. A ABNT NBR 16796:2020 estabeleceu procedimentos para medição direta da energia transmitida às hastes, complementando os requisitos de execução da ABNT NBR 6484 e respondendo à crescente demanda por dados rastreáveis em projetos de mineração e segurança de estruturas de rejeitos. Neste estudo, medições instrumentadas de energia foram realizadas em sete sondas mecanizadas, seguindo a NBR 16796:2020, permitindo uma análise paramétrica das variáveis que controlam a eficiência de transmissão (tipo de sonda, características das hastes e do amostrador) e da resposta dinâmica. Observou-se variabilidade significativa de eficiência entre equipamentos mesmo sob condições controladas. Propaga-se essa variabilidade para as correções de energia que convertem N em N_{60} e $(N_1)_{60}$, parâmetros de entrada largamente usados em correlações de densidade relativa, ângulo de atrito efetivo e avaliação de suscetibilidade à liquefação de rejeitos arenosos e materiais de fundação — insumos críticos em análises de estabilidade de taludes e no atendimento a requisitos regulatórios de segurança de barragens/pilhas de rejeitos. Os resultados reforçam a necessidade de calibração periódica e de especificação explícita da eficiência nos relatórios de investigação geológico-geotécnica..

PALAVRAS-CHAVE: SPT, energia de cravação, sondas mecanizadas, investigação geotécnica, análise paramétrica.

ABSTRACT: The determination and control of energy efficiency in the Standard Penetration Test (SPT) are essential for the standardization and interpretation of geotechnical data, particularly when such data support the characterization of materials used or confined in mine waste piles and tailings dams. The ABNT NBR 16796:2020 standard established procedures for direct measurement of energy transmitted to the drill rods, complementing the execution requirements of ABNT NBR 6484 and responding to the increasing demand for traceable data in mining projects and tailings facility safety. In this study, instrumented energy measurements were performed on seven distinct mechanized drilling rigs, in accordance with NBR 16796:2020, enabling a parametric analysis of the variables controlling energy transfer efficiency (rig type, rod and sampler characteristics) and dynamic response. Significant efficiency variability among rigs was observed even under controlled conditions. This variability propagates to the energy corrections applied to convert N values to N_{60} and $(N_1)_{60}$, which are widely used as input parameters for correlations with relative density, effective friction angle, and liquefaction susceptibility of sandy tailings and foundation materials—critical inputs for slope stability analyses and for compliance with regulatory requirements for tailings and waste rock facilities. The



results highlight the need for periodic calibration and explicit specification of energy efficiency in geological-geotechnical investigation reports.

KEYWORDS: SPT, hammer energy, mechanized drilling rigs, geotechnical investigation, parametric analysis.

1 INTRODUÇÃO

A caracterização geotécnica de materiais de fundação e de estruturas de contenção, como pilhas de estéril e barragens de rejeitos, é um fator crítico para o projeto e para a análise de estabilidade de taludes. Entre os ensaios de campo utilizados no Brasil, o *Standard Penetration Test* (SPT) permanece como um dos métodos mais difundidos para obtenção de parâmetros indiretos de resistência e deformabilidade do solo (Schnaid e Odebrecht, 2012). Entretanto, a interpretação confiável do índice N depende da correta avaliação da energia efetivamente transmitida ao amostrador durante a cravação, uma vez que variações na eficiência do sistema podem levar a correlações incorretas de parâmetros geotécnicos, como densidade relativa (Dr), ângulo de atrito efetivo (ϕ') e resistência à liquefação (CRR) (Anbazhagan *et al.*, 2022).

Com a publicação da norma ABNT NBR 16796:2020, que estabelece diretrizes para a medição e avaliação da energia no SPT, a calibração e a quantificação da eficiência de energia (ER%) passaram a desempenhar papel central na padronização dos resultados. Essa exigência é especialmente relevante para sondas mecanizadas, cada vez mais utilizadas em investigações de engenharia devido à maior produtividade e repetibilidade, mas que podem apresentar diferenças significativas na transferência de energia devido a variações no sistema de acionamento, no acoplamento das hastes e no mecanismo de queda do martelo.

No contexto de obras geotécnicas envolvendo pilhas e barragens de rejeitos, a precisão na determinação de N_{60} e $(N_1)_{60}$ é fundamental, pois esses parâmetros são amplamente utilizados em correlações empíricas para a determinação da densidade relativa de areias e rejeitos arenosos, na estimativa do ângulo de atrito efetivo e, principalmente, na avaliação da suscetibilidade à liquefação (Seed & Idriss, 1971; Robertson & Wride, 1998). Qualquer subestimação ou superestimação do índice N, decorrente de erros na medição da eficiência energética, pode impactar diretamente nas análises de estabilidade de taludes e na definição de fatores de segurança dessas estruturas.

Além disso, diretrizes internacionais para segurança de barragens de mineração, como a *Global Industry Standard on Tailings Management* (GISTM) e recomendações da ANCOLD (2019), reforçam a necessidade de programas de investigação geotécnica baseados em dados confiáveis e rastreáveis. A integração de medições instrumentadas de energia no SPT está alinhada a essas exigências, contribuindo para projetos mais seguros e para a mitigação de riscos associados ao colapso ou instabilidade de estruturas de rejeitos.

O presente estudo analisa medições de energia em sete sondas mecanizadas, utilizando sistemas instrumentados conforme ABNT NBR 16796:2020, com o objetivo de realizar uma análise paramétrica das variáveis que influenciam a eficiência de transmissão de energia. Além disso, discute-se como a variabilidade da eficiência afeta a correção dos valores N para N_{60} e $(N_1)_{60}$, e consequentemente a definição dos parâmetros de resistência utilizados no projeto e na avaliação de taludes de pilhas e barragens de rejeitos.

2 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo consistiu em três etapas principais: (i) caracterização dos equipamentos de sondagem, (ii) medições instrumentadas da energia transmitida durante o ensaio SPT, e (iii) análise paramétrica das variáveis que influenciam a eficiência energética (ER%) e seu consequente impacto nos parâmetros de projeto derivados do índice N.

2.1 Equipamentos e Condições de ensaio

Foram avaliadas sete sondas mecanizadas de diferentes fabricantes, modelos e com configurações de sistema de percussão, representativas das principais tecnologias utilizadas em investigações geotécnicas no Brasil. As sondas operaram com martelo mecânico automático de 64,9 a 65 kg, altura de queda nominal de 750 mm, e amostrador padrão, conforme a ABNT NBR 6484:2020. As características das hastes (diâmetro,

comprimento, peso linear e tipo de acoplamento) foram previamente levantadas, considerando que essas variáveis podem afetar a eficiência de transmissão de energia. A Tabela 1 demonstra a nomenclatura que será utilizada para cada sonda avaliada, ano de execução do ensaio e país de origem da sonda. As marcas comerciais das sondas foram omitidas por questões de sigilo.

Tabela 1. Informações gerais das sondas instrumentadas

ID	Ano do ensaio	Marca	Modelo	País de Origem
1	2023	A	1	EUA
2	2024	A	2	EUA
3	2024	B	1	Itália 2
4	2024	B	2	Itália 2
5	2024	B	2	Itália 2
6	2024	B	3	Itália 2
7	2024	C	1	Brasil 3

2.2 Medição Instrumentada de Energia

A energia de cravação foi medida por meio de um sistema instrumentado, conforme recomendações da ABNT NBR 16796:2020, composto por célula de carga e acelerômetro instalados em uma seção intermediária da haste. Os sinais de força e aceleração foram adquiridos em alta frequência (≥ 10 kHz) e integrados para determinar a velocidade e o deslocamento do sistema.

A energia transferida (E_v) foi calculada pela integração do produto da força axial Ft pela velocidade vt ao longo do tempo (Eq. 1):

$$E_v = \int_{t_2}^{t_1} F(t) \cdot v(t) dt \quad (1)$$

A energia teórica (E_t) foi definida pela energia potencial gravitacional do martelo antes do impacto (Eq. 2):

$$E_t = m \cdot g \cdot h \quad (2)$$

onde: t_1 é o instante inicial de contato, t_2 é o instante em que a velocidade da haste se aproxima de zero, m é a massa do martelo, g é a aceleração da gravidade e h é a altura de queda.

A eficiência normalizada de energia ($ER\%$) foi então calculada por (Eq. 3):

$$E_r = \left(\frac{E_v}{E_t} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

Cada ponto de teste foi avaliado a partir de cinco impactos consecutivos, sendo o valor final de $ER\%$ a média dessas cinco medições.

2.3 Análise paramétrica

Com os valores de $ER\%$ obtidos para cada sonda, foram avaliadas as principais variáveis que influenciam a transmissão de energia, como: tipo e configuração da sonda, comprimento de hastes, características geométricas e de acoplamento do amostrador e comportamento dinâmico (impacto e energia).

4 RESULTADOS

As medições de eficiência energética realizadas nas sete sondas mecanizadas estão apresentadas na Tabela 2, enquanto a Tabela 3 reúne as informações referentes às principais características dos equipamentos utilizados.

Tabela 2. Medições de energia

ID	Marca	Modelo	Medidas de energia							
			1	2	3	4	5	média	des- vio	golpes/ min
1	A	1	58	62	62	63	64	62	2.04	-
2	A	2	75	84	77	77	78	78	3.06	15
3	B	1	72	80	71	75	69	73	3.83	24
4	B	2	71	71	66	70	74	70	2.58	27
5	B	2	64	69	62	63	62	64	2.61	28
6	B	3	59	56	62	61	61	60	2.14	27
7	C	1	68	73	75	74	75	73	2.61	17

Tabela 3. Informações dos equipamentos

Tabela 3: Informações dos Equipamentos							
ID	Marca	Modelo	Peso da haste instr.	Diâmetro da haste instr. (cm)	Batente (cm)	Obs. Hastes (massa por trecho)	Obs. rápidas
1	A	1	7	4,5	5,20	Hastes leves (~9,5–9,7 kg).	Ensaio histórico (2023); ER% baixo.
2	A	2	7	4,5	5,20	Primeiras hastes pesadas (~18 kg), demais ~9,6 kg (mistura pesada+leve).	Maior ER% dentre as sondas avaliadas.
3	B	1	7	4,5	~4,00 (batente menor)	Hastes leves (~9,6–10 kg).	Variabilidade maior entre golpes.
4	B	2	7	4,5	5,20	Hastes leves (~9,6–10 kg por segmento).	ER% intermediário.
5	B	2	8	4,5	5,20	Hastes leves (~9,6–10 kg).	ER% moderado-baixo.
6	B	3	7	4,5	~5,00	Hastes leves (~9,4–9,9 kg).	Menor ER% do conjunto.
7	C	1	7	4,5	5,20	Conjunto de hastes padrão (~6–9 kg)	ER% alto-intermediário.

4.1 Análise dos resultados

Os dados das Tabelas 2 e 3 evidenciam uma variabilidade significativa na eficiência de energia ($ER\%$), mesmo sob condições de ensaio controladas. Os valores médios variaram entre 60% e 78%, dependendo do mecanismo de percussão, da condição de manutenção da sonda, das características das hastes e da qualidade do acoplamento. Destaca-se que até mesmo equipamentos da mesma marca e modelo apresentaram diferenças perceptíveis de eficiência. A Figura 1 apresenta o boxplot da eficiência de energia ($ER\%$) para cada sonda, considerando os cinco golpes monitorados. Observa-se que algumas sondas, como a ID 2 ($ER\% = 78\%$), apresentaram dispersão relativamente baixa, indicando boa repetibilidade entre os golpes. Em contraste, sondas como a ID 3 ($ER\% = 73\%$) apresentaram maior variabilidade (amplitude entre 69% e 80%), o que pode estar associado a ajustes inadequados de altura de queda ou acoplamentos menos rígidos.

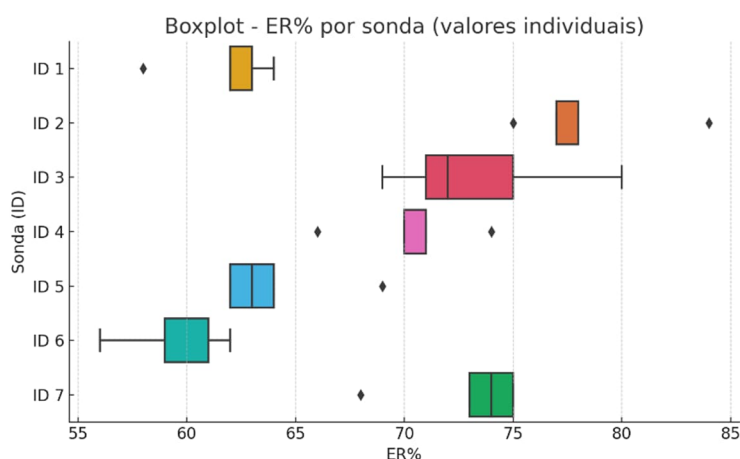


Figura 1. Box-plot de $ER\%$ por sonda avaliada.

Observa-se uma tendência inversa entre $ER\%$ e a velocidade de cravação (golpes/min): sondas com frequências mais elevadas (27–28 golpes/min) apresentaram, em geral, $ER\%$ menores (60–64%), enquanto a sonda com maior $ER\%$ (78%) operou a 15 golpes/min. Esse comportamento pode estar associado a efeitos dinâmicos, como vibrações adicionais e maior atrito interno em altas velocidades. A Figura 2 mostra a relação entre a eficiência média de energia ($ER\%$) e a frequência de golpes por minuto. Nota-se uma tendência de redução da eficiência com o aumento da frequência de golpes, possivelmente relacionada ao aumento do atrito e das perdas dinâmicas no sistema de percussão. Por exemplo, a sonda ID 5, com 28 golpes/min, apresentou $ER\%$ média de apenas 64%, enquanto a sonda ID 2, com 15 golpes/min, atingiu 78%.

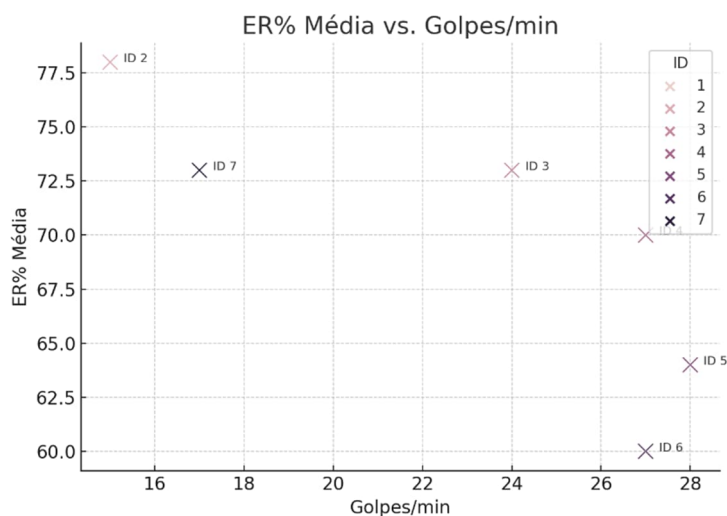


Figura 2. $ER\%$ média versus golpes/min

Outro ponto relevante é que a sonda equipada com hastes iniciais mais pesadas (ID 2) apresentou a maior $ER\%$ média (78%), sugerindo que uma maior inércia do sistema de hastes favorece a transferência de energia ao amostrador.

Os resultados indicam que diferenças de até 25% na energia efetiva transferida ao amostrador podem ocorrer entre sondas mecanizadas distintas, impactando diretamente os valores do índice N . A Tabela 4 apresenta os valores corrigidos de N_{60} para três cenários típicos de campo ($N = 10, 20$ e 30 golpes), calculados a partir da eficiência média ($ER\%$) de cada sonda. Nota-se que, para um mesmo N medido, a variação de N_{60} entre sondas pode ser significativa. Por exemplo, para um ensaio com $N = 20$ golpes, a correção para N_{60} pode resultar em valores entre 15,4 golpes ($ER=78\%$) e 20 golpes ($ER=60\%$), dependendo da eficiência da sonda. Esta variação, quando propagada para correlações geotécnicas, pode gerar diferenças relevantes na estimativa de parâmetros de resistência, como o ângulo de atrito efetivo (ϕ') e a densidade relativa (Dr).

Tabela 4. Informações gerais das sondas instrumentadas

ID	$ER\%$ média	N_{60} ($N=10$)	N_{60} ($N=20$)	N_{60} ($N=30$)
1	62	9,7	19,4	29,0
2	78	7,7	15,4	23,1
3	73	8,2	16,4	24,7
4	70	8,6	17,1	25,7
5	64	9,4	18,8	28,1
6	60	10,0	20,0	30,0
7	73	8,2	16,4	24,7

Para avaliar o efeito prático dessa variabilidade, considerou-se um cenário de rejeitos arenosos com correlação típica entre N_{60} e ϕ' . A diferença de energia observada entre sondas poderia representar uma variação de até 3° no valor estimado de ϕ' e alterações superiores a 10% na densidade relativa, implicando mudanças consideráveis no fator de segurança calculado em análises de estabilidade de taludes.

Esses resultados reforçam a importância da calibração periódica das sondas mecanizadas e da especificação explícita da eficiência de energia nos relatórios de investigação geotécnica, de forma a garantir que os valores de N utilizados em projetos de barragens e pilhas de rejeitos sejam comparáveis e confiáveis.

5 CONCLUSÕES

O estudo realizado permitiu avaliar de forma paramétrica a eficiência de energia ($ER\%$) em sondas mecanizadas, com base em medições instrumentadas realizadas conforme a ABNT NBR 16796:2020. A partir da análise dos resultados, as seguintes conclusões podem ser destacadas:

- Variabilidade de eficiência: Observou-se uma variação significativa na eficiência de energia entre as sete sondas mecanizadas analisadas, com valores de $ER\%$ médios variando de aproximadamente 60% a 78%, mesmo sob condições de ensaio controladas.
- Impacto nos parâmetros derivados: As diferenças de energia resultaram em variações expressivas nos valores corrigidos de N_{60} e $(N_1)_{60}$, podendo gerar alterações de até 3° no ângulo de atrito efetivo (ϕ') e mais de 10% na densidade relativa (Dr). Essas variações podem afetar diretamente as análises de estabilidade de taludes em pilhas e barragens de rejeitos.
- Influência da configuração do equipamento: O tipo de sistema, a velocidade (golpes/min) e as características das hastes foram identificados como os principais fatores que controlam a eficiência de energia.
- Relevância para segurança de estruturas de rejeitos: A correta determinação e correção da energia transmitida ao amostrador é fundamental para garantir parâmetros geotécnicos confiáveis e reduzir incertezas em projetos de mineração. A inclusão sistemática do valor de $ER\%$ nos relatórios de



investigação é uma prática recomendada, especialmente para estudos voltados à avaliação de liquefação e estabilidade de taludes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Vale S.A. e à Geocontrole pelo fornecimento dos dados de campo utilizados neste estudo. Agradecemos também ao PPGE e à UFSC pelo apoio institucional e pela análise dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANCOLD – *Australian National Committee on Large Dams*. (2019). *Guidelines on Tailings Dams*. Canberra: ANCOLD.
- Anbazhagan, P., Ayush, K., Yadhunandan, M.E. Siriwanth, K., Suryanarayana, K., Sahodar, G. (2022). Effective Use of SPT: Hammer Energy Measurement and Integrated Subsurface Investigation. *Indian Geotech J* 52, 1079–1096 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40098-022-00609-z>.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16796. *Solo — Método padrão para avaliação de energia em SPT*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 6484. *Solo — Sondagem de simples reconhecimento com SPT — Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- ICMM – *International Council on Mining and Metals* (2020). *Global Industry Standard on Tailings Management* (GISTM). Londres: ICMM.
- Robertson, P. K. and Wride, CE (Fear). (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*. 35(3): 442-459. <https://doi.org/10.1139/t98-017>.
- Schnaid, F.; Odebrecht, E. (2012). *Ensaio de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971). Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, v.97 (9), 1249-1273, <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001662>.