

Correlações estatísticas entre velocidade de onda cisalhante e parâmetros de resistência de solos para estrutura de rejeito disposto hidraulicamente

Beatriz Saralha Friguetto 1
Engenheira Geóloga, Vale S.A., Itabira, Brasil, beatriz.friguetto@gmail.com

Luiz Rafael Pereira Santos2
Geólogo, Vale S.A., Itabira, Brasil

Nathalia De Faria Sena3
Engenheira Civil, Vale S.A., Belo Horizonte, Brasil

Maxmiliano Lopes Simão4
Geofísico, Vale S.A., Belo Horizonte, Brasil

RESUMO: Estruturas de empilhamento drenado são uma alternativa desenvolvida pela indústria de mineração afim de dispor o rejeito gerado pelo processamento mineral. As análises geotécnicas destas estruturas desempenham um papel crucial na administração de riscos e na prevenção de acidentes ligados a possíveis falhas, visto que essas estruturas podem ser susceptíveis à liquefação. Dentro desse cenário, os métodos geofísicos desempenham um papel significativo, pois sua combinação com dados geológicos e hidrogeológicos possibilita a criação de modelos representativos para avaliar as condições e saúde das estruturas. Neste estudo, serão analisados dados de uma estrutura de armazenamento de rejeito disposto hidraulicamente, como um maciço permeável, dotado de sistema de drenagem de fundo, onde foram realizadas campanhas pelos métodos geofísicos de Análise Multicanal das Ondas Superficiais (MASW) passivo, além de ensaios de Piezocone (CPTu). Estes dados foram integrados em um *software* de modelagem, onde foi realizada a análise visual das informações obtidas em profundidade, e em seguida, através da análise estatística dos dados de velocidade da onda cisalhante (V_s) obtidos pelo MASW, de resistência de ponta dos materiais (q_t), gerado pelo ensaio CPTu, e parâmetro de resistência do material (SPT N_{60}) calculado a partir de q_t , foram comparados de forma analítica por meio da linguagem de programação python, sendo gerados gráficos de correlação, a fim de caracterizar os materiais da pilha, e definido os coeficientes da função de integração. Através da análise dos dados foi possível observar que há dois principais grupos nos materiais analisados no rejeito armazenado, rejeito arenoso com comportamento expansivo e rejeito arenoso com comportamento contrátil. O primeiro grupo concentra-se em menor profundidade, com valores de V_s normalmente abaixo de 400 m/s e de SPT N_{60} em sua grande maioria abaixo de 50 golpes/30 cm, já o segundo grupo localiza-se principalmente em profundidades superiores a 75 m, com V_s consideravelmente maiores que o primeiro grupo, e com valores de SPT N_{60} normalmente acima de 50 golpes/30 cm. Os levantamentos geofísicos demonstraram ótimos resultados em relação a caracterização dos materiais da pilha, com os resultados tendo convergido em relação aos parâmetros de resistência do solo. Essa comparação permitirá que seja empregado maiores números de levantamentos sísmicos, que são mais ágeis e menos invasivos, mas necessitam de comparações com dados diretos a fim de serem calibrados. Esses dados ajudarão a refinar a superfície de fundação do projeto da estrutura e a local de maneira mais assertiva as campanhas de sondagem subsequentes.

PALAVRAS-CHAVE: Empilhamento drenado; Geofísica; MASW; CPTu; barragens; liquefação

ABSTRACT: Drained stacking structures are an alternative developed by the mining industry in order to dispose of waste generated by mineral processing. Geotechnical analyzes of these structures play a crucial role in managing risks and preventing accidents linked to possible failures, as these structures can be susceptible to liquefaction. Within this scenario, geophysical methods play a significant role, as their combination with geological and hydrogeological data makes it possible to create representative models to assess the conditions and health of structures. In this study, data from a hydraulically arranged waste storage structure will be analyzed, such as a permeable massif, equipped with a bottom drainage system, where campaigns were carried out using the passive Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) geophysical methods, in addition to tests Piezocone (CPTu). These data were integrated into modeling software, where a visual analysis of the information obtained at depth was carried out, and then, through statistical analysis of the shear wave velocity (VS) data obtained by MASW and the tip resistance of the materials (Q_t), generated by the CPTu test, were compared analytically using the python language, correlation graphs were generated in order to characterize the materials in the pile, and the coefficients of the integration function were defined. Through data analysis it was possible to observe that there are two main groups in the materials analyzed in the stored tailings, sandy tailings with expansive behavior and sandy tailings with contractile behavior. The first group is concentrated at shallower depths, with VS values normally below 400m/s and SPT N60 mostly below 50 strokes/30cm, while the second group is mainly located at depths greater than 75m, with VS considerably larger than the first group, and with SPT N60 values normally above 50 strokes/30cm. The geophysical surveys demonstrated excellent results in relation to the characterization of the pile's materials and helped to refine the foundation surface of the structure's design. By carrying out more surveys and describing the holes, it will be possible to generate a more detailed database of what compositions of waste are presenting each identified behavior.

KEYWORDS: Drained stacking; Geophysics; MASW; CPTu; dams; liquefaction

1 INTRODUÇÃO

Estruturas de empilhamento drenado de rejeito são alternativas utilizadas na indústria da mineração para armazenamento de rejeito oriundo do processamento mineral. De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2019), empilhamentos drenados são estruturas construídas mecânica ou hidraulicamente com rejeitos de mineração que se configuram como um maciço permeável e dotado com um sistema de drenagem de fundo.

Após os rompimentos das barragens alteadas a montante de Fundão e Barragem 1, em Minas Gerais, a área de segurança de estruturas geotécnicas no Brasil ganhou destaque. Novas tecnologias para aquisição de dados geotécnicos estão sendo desenvolvidas, além do aumento na quantidade de dados obtidos das estruturas ter aumentado. De acordo com o Relatório de Segurança de Barragens 2022, elaborado pela Agência Nacional de Mineração (ANA), a quantidade de dados cadastrados no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) aumentou entre 2021 e 2022, apesar de ter havido redução no número de barragens em situação preocupante.

Integrar esta quantidade de informações sobre as estruturas para que possamos analisar de forma coesa o comportamento das barragens é essencial para garantir a segurança destas estruturas. Para o estudo de caso deste trabalho, será analisada um empilhamento drenado disposto hidraulicamente, com rejeito arenoso, que de acordo com a resolução de nº 13 da Agência Nacional de Mineração ANM esse tipo de estrutura sofre as mesmas obrigações legais das barragens de rejeito alteadas a montante.

Levantamentos geofísicos vem desempenhando um importante papel nos projetos de engenharia, as vantagens associadas a esse tipo de levantamento são principalmente o fato de não ser um método invasivo, a facilidade de aquisição de dados em campo, a realização de leituras em diversas profundidades e a possibilidade de varredura de grandes áreas num curto espaço de tempo (De Souza, 2012). O método *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW) foi desenvolvido por Park *et al.* (1999) e consiste em um levantamento sísmico que permite determinar a variação da velocidade de propagação das ondas de cisalhamento (VS) em função da profundidade. Esta metodologia consiste no registro das ondas de superfície (*ground-roll*) e na construção de uma imagem de dispersão destas ondas em função da frequência.

A integração de dados geofísicos e ensaios geotécnicos tem sido utilizado para calibração de parâmetros. Uma das formas utilizadas em estruturas de grande profundidade e dificuldade de perfuração é a integração

entre os dados de V_s fornecidos pelos levantamentos geofísicos e parâmetros de resistência dos materiais fornecidos pelos ensaios de piezocone.

Os ensaios de piezocone são ensaios geotécnicos de campo, largamente utilizados na mineração, que permitem a determinação de propriedades geomecânicas de solos através dos parâmetros de resistência de ponta (q_t), resistência por atrito lateral (f_s) e poropressão (u_2) (Schnaid & Odebrecht, 2012).

2 Metodologia

2.1 Levantamentos de campo

Foram realizados 10 ensaios de piezocone na estrutura e 19 levantamentos de MASW Passivo, em 2021, a localização destes pontos pode ser visto na Figura 1, enquanto as informações referentes a profundidade e cota estão na Tabela 1.

Os levantamentos geofísicos foram feitos através da técnica MASW, sendo aplicado o modo passivo em investigação 1D. Os registros foram feitos com comprimento de 240 s e com intervalo de amostragem de 8 ms. Nos pontos, foram coletados entre 25 e 37 registros, sendo que cada ponto foi feito durante no mínimo 1 hora e 40 minutos. No MASW 1D, a localização da informação obtida é definida como sendo o ponto central do arranjo linear de geofones, de modo que, a variação vertical de velocidade obtida sob o ponto investigado consiste em uma média da situação existente na abrangência do arranjo de geofones empregados.

Os ensaios de piezocone (CPTu) ultrapassaram 70 m de profundidade no empilhamento drenado. Através da avaliação de suscetibilidade à liquefação com base no critério de Olson e Stark (2003), se observa que o rejeito da estrutura apresentou comportamento contrátil a partir de maiores profundidades, com tensões efetivas maiores que 200 kPa.

Tabela 1: Dados dos ensaios CPTu e levantamentos MASW utilizados

MASW PASSIVO						CPTU		
ID	Profundidade (m)	Cota (m)	ID	Profundidade (m)	Cota (m)	ID	Profundidade (m)	Cota (m)
Ponto 1	115,719	930,25	Ponto 11	131,1	909,81	GST-CPTU-01	38,95	841,27
Ponto 2	125,4	920,04	Ponto 12	155,952	899,8	GST-CPTU-02	43,2	859,14
Ponto 3	133,479	931,36	Ponto 13	150,48	934,21	GST-CPTU-03	75,54	899,61
Ponto 4	122,731	859,05	Ponto 14	94,763	895,2	GST-CPTU-04	76,25	900,18
Ponto 5	138,201	892	Ponto 15	250,8	821,75	GST-CPTU-05	17,7	883
Ponto 6	173,653	898,65	Ponto 16	104,738	896,01	GST-CPTU-06	57,85	925
Ponto 7	122,147	909,12	Ponto 17	175,331	926,12	GST-CPTU-07	73,6	876,119
Ponto 8	162,757	915,81	Ponto 18	171	912,91	GST-CPTU-08	77,3	890,402
Ponto 9	94,763	923,97	Ponto 19	177,242	918,57	GST-CPTU-09	47,8	936,624
Ponto 10	125,4	930,89				GST-CPTU-10	62,41	919,985

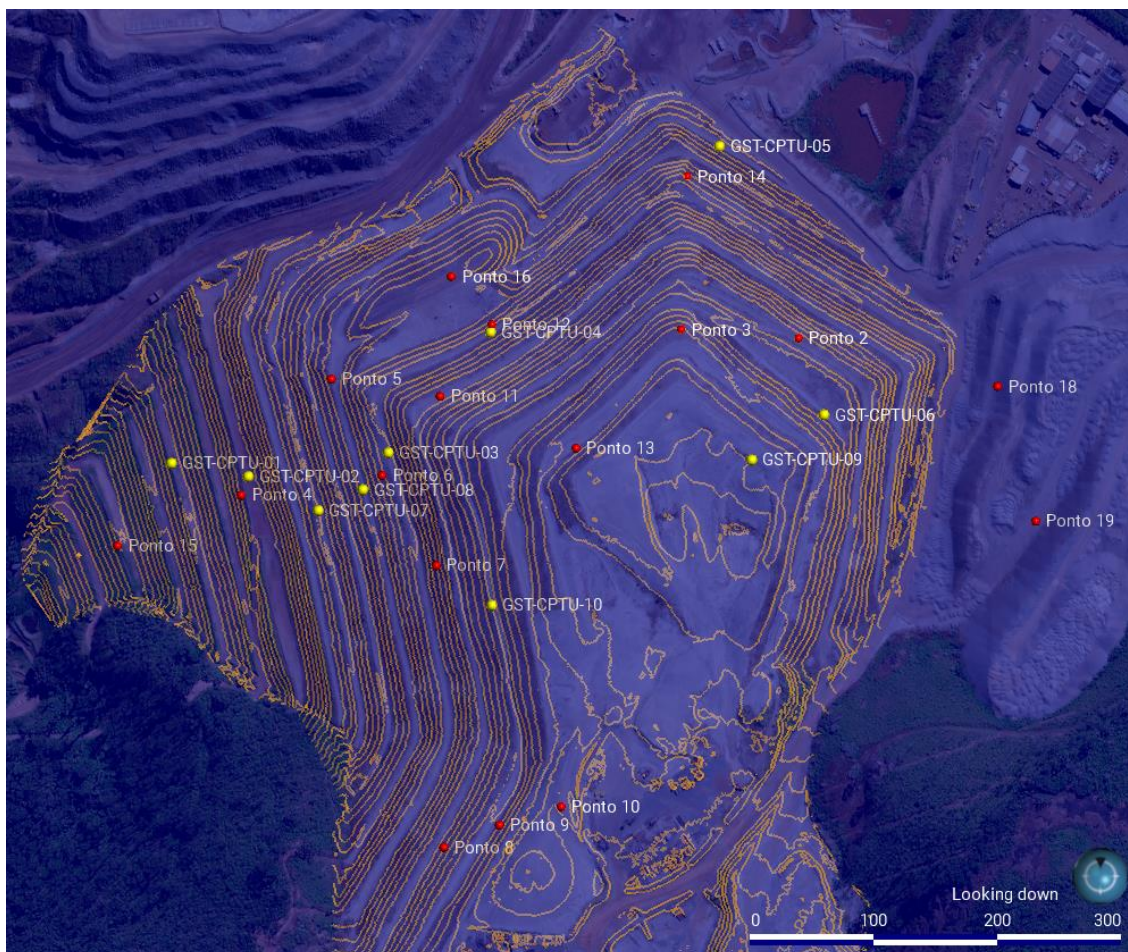


Figura 1: Em amarelo a localização dos testes de CPTu realizados, em vermelho os pontos de coleta de MASW Passivo.

2.2 Parâmetros de resistência utilizados

Os dados CPTu são usados para calcular um grande número de parâmetros derivativos, normalmente limitado por relações empíricas, um desses parâmetros é o ‘Soil behaviour type’ (Robertson, 2010), também expresso como SBT. Neste estudo será utilizado o SBTn, parâmetro não normalizado, cujo índice (I_c) é dado pela seguinte equação:

$$I_c = [(3,47 - \log(qt/pa))^2 + (\log R_f + 1,22)^2]^{0,5} \quad (1)$$

Onde R_f (razão de atrito) = $(f_s/qt)100\%$ e p_a = pressão atmosférica. Este parâmetro define os tipos de comportamento de solo de acordo com a seguinte classificação:

Tabela 2 - Proposta de classificação SBTn alterado de Robertson (2016).

Tipo de comportamento do solo	
1	CCS Argila - Contrátil - Sensível
2	CC Argila - Contrátil
3	CD Argila - Expansiva
4	TC Transição - Contrátil
5	TD Transição - Expansiva
6	SC Areia - Contrátil
7	SD Areia - Expansiva

Mesmo com uma deficiência em sua padronização, os ensaios SPT (*Standard Penetration Test*) é um dos testes *in situ* mais comumente usados em muitas partes do mundo, devido ao seu baixo custo e simplicidade (Wotherspoon & Haycock, 2015), esse fator levou os pesquisadores estudarem a correlação dos resultados deste teste com o ensaio de CPTu (Eslami, et al., 2019). A relação entre CPT e SPT é geralmente especificada pela relação qt/N_{spt} (qt : resistência da ponta do cone; N_{SPT} : contagens de golpes de SPT) (Eslami et al., 2019).

A contagem de golpes do SPT corrigida (N_{60}) é um parâmetro calculado modificando o valor bruto do NSPT levando em consideração a energia do martelo, comprimento da haste e diâmetro interno do amostrador (Jafari, et al. 2002). Valores SPT N_{60} podem ser calculados utilizando o I_c , conforme definido por Robertson (2009), como dado pela fórmula a seguir:

$$N_{60} = \left(\frac{q_c}{P_a} \right) \cdot \frac{1}{10^{1.1268 - 0.2817 I_c}} \quad (2)$$

Na literatura a relação estatística entre a resistência dinâmica ao cisalhamento (V_s) e o teste de resistência à penetração em solos foi estudada por vários autores de forma empírica (Dikmen, 2009). A integração entre o MASW e o SPT foram obtidas usando regressão não linear baseado pelo método Levenberg-Marquardt (Dikmen, 2009), cuja equação pode ser dada por:

$$V_s = aN_{60}^K \quad (3)$$

Para este estudo serão gerados os gráficos de correlação entre os valores de V_s medidos pelo MASW e os valores de qt obtidos a partir do CPTu e N_{60} , calculados a partir dos parâmetros de CPTu, além da equação empírica para a base de dados aqui analisada. Estas correlações serão feitas através da linguagem de programação python, utilizando as bibliotecas *numpy*, *matplotlib* e *pandas*.

3 Resultados

Os ensaios de CPTu e os levantamentos de MASW não foram realizados exatamente nos mesmos pontos, para realizar a comparação entre os perfis foram analisadas as distâncias entre os pontos e a diferença de cota. Os pontos considerados neste estudo foram levantamentos localizados a menos de 50 m de distância na superfície, e para os levantamentos com mais de 1 m de diferença de cota foi realizada a correção na base de dados testada, considerando apenas os no mesmo nível de profundidade.

Os dados de V_s e de qt comparados foram relacionados em profundidade, sendo agrupados os valores de N_{60} , calculados a partir do qt , de acordo com a V_s medida.

Foram correlacionados portanto 7 ensaios de CPTu com os levantamentos MASW mais próximos, o resultado desta correlação pode ser vista da Figura 2 e Figura 3, onde também foi gerada a curva de regressão não linear utilizando a equação 3.

Para os ensaios de CPTu analisados foram classificados trechos de material com os grupos areia contrátil (6) e areia expansiva (7), propostos por Robertson (2016), conforme Tabela 2.

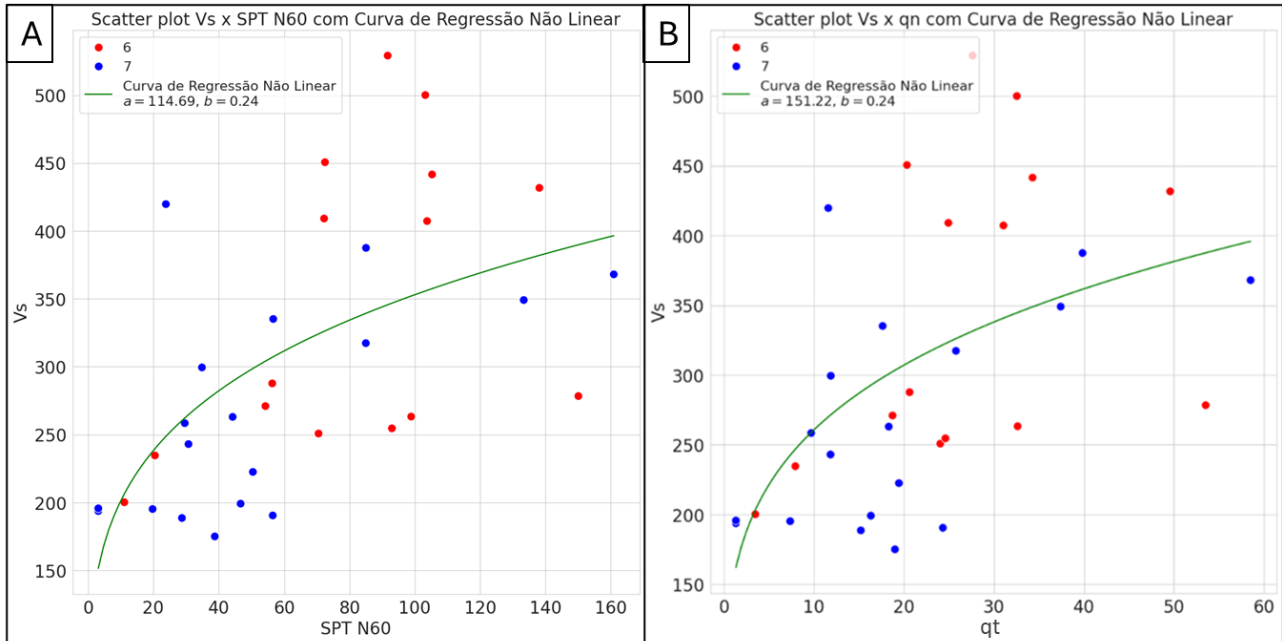


Figura 2: A) Gráfico de pontos com a relação da V_s e SPT N₆₀ B) Gráfico de pontos com a relação da V_s e qt. Ambos os gráficos referem-se as 7 amostras analisadas, em verde a linha de regressão não linear dada pelo método Levenberg-Marquardt. A cor dos pontos indica a classificação do tipo de solo de acordo com Robertson (2016).

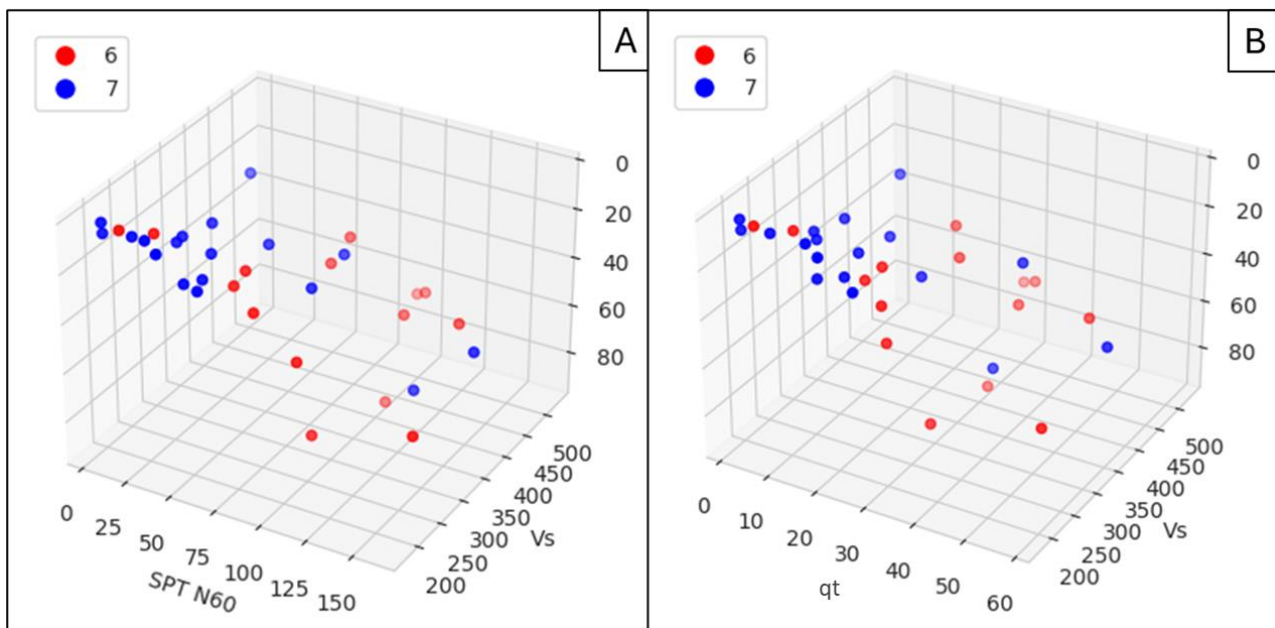


Figura 3: A) Gráfico em 3 dimensões com a relação da V_s pelo parâmetro SPT N₆₀ em profundidade. B) Gráfico em 3 dimensões com a relação da V_s pelo parâmetro qt em profundidade

É possível observar através da Figura 2 que a V_s possui uma relação direta de proporcionalidade com os parâmetros qt e SPT N₆₀, ou seja, quanto maior a resistência do material maior a velocidade da onda de cisalhamento, apesar desta correlação não ser linear. Os valores de qt e SPT N₆₀ possuem alta correlação direta, como demonstrado nos gráficos das figuras 2 e 3, pelo fato da bibliografia padronizar correlações de V_s mais comumente com SPT, para as próximas análises iremos utilizar os valores de SPT N₆₀.

Os coeficientes para função não linear de correlação da V_s e SPT N_{60} , conforme equação 3, encontrados para esta base de dados foi de $a=45.71$ e para $k=0.49$, portanto a equação encontrada é dada por:

$$V_s = 45,71 \cdot N_{60}^{0,49} \quad (4)$$

Na figura 3 observa-se também que para os materiais classificados com SBTn no grupo de areias contrateis (6) tendem a possuir maiores V_s , resistência à penetração e resistência de ponta do que os materiais definidos como areias expansivas (7).

Através da análise dos dados foi possível observar que há dois principais grupos nos materiais analisados no rejeito armazenado, rejeito arenoso com comportamento expansivo e rejeito arenoso com comportamento contrátil. O primeiro grupo concentra-se em menor profundidade, com valores de V_s normalmente abaixo de 400m/s e de SPT N_{60} em sua grande maioria abaixo de 50 golpes/30cm, já o segundo grupo localiza-se principalmente em profundidades superiores a 75 m, com V_s consideravelmente maiores que o primeiro grupo, e com valores de SPT N_{60} normalmente acima de 50 golpes/30cm.

Para analisar onde ocorre a maior variação de V_s em relação aos mesmos valores de SPT N_{60} para o empilhamento como um todo foi gerado o gráfico de boxplot da Figura 4, que demonstra em que intervalo de resistência dos materiais ocorre a maior variação da velocidade de ondas cisalhantes.

A tabela 3 descreve os valores encontrados no gráfico, sendo possível observar que os maiores desvios padrões estão nas amostras de SPT N_{60} intermediárias, na zona onde começa a ocorrer a mudança do comportamento expansivo do solo para contrátil.

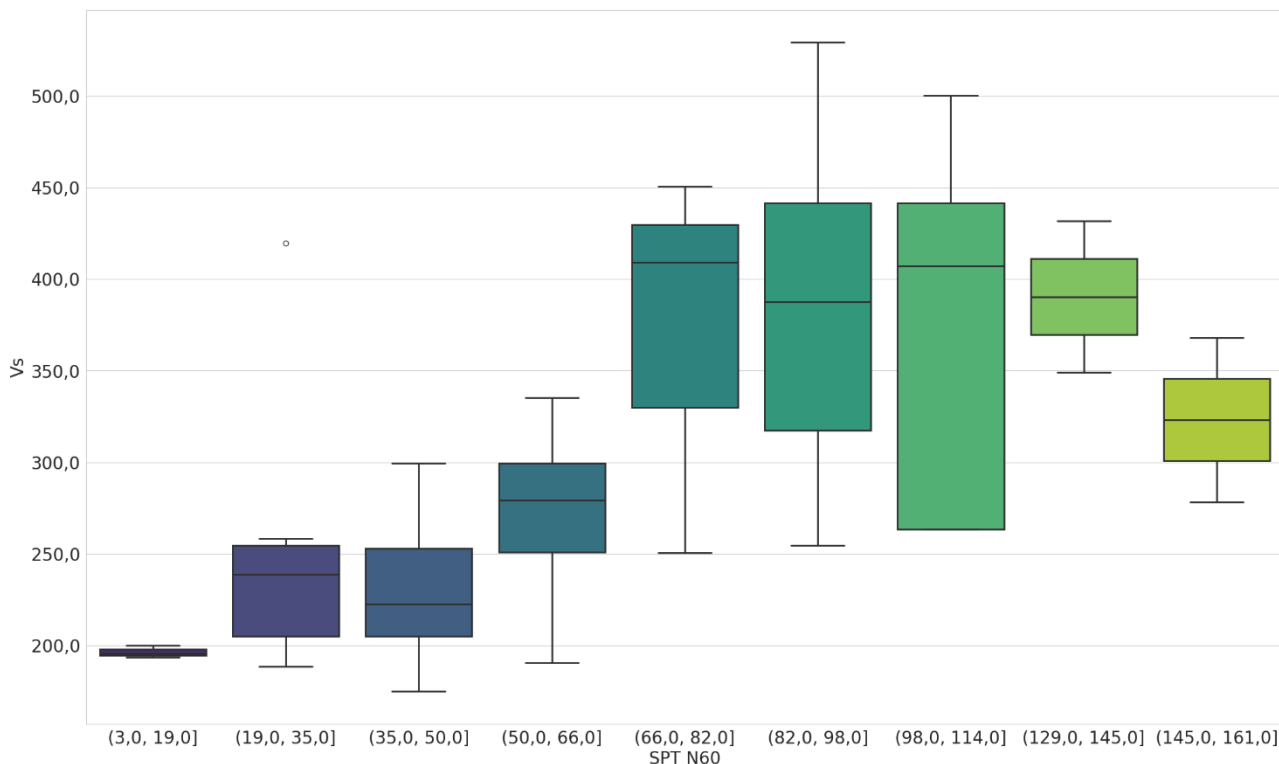


Figura 4: Boxplot para distribuição da V_s em relação ao parâmetro SPT N_{60}

Tabela 3: Tabela com a descrição dos valores encontrados no boxplot mostrado na Figura 4.

Intervalo de SPT N_{60}	Número de amostras	Média de V_s encontrada	Desvio padrão para V_s medida
(3,0; 19,0]	3	196,56	3,32
(19,0; 35,0]	6	256,63	84,47
(35,0; 50,0]	6	230,30	44,73

(50,0; 66,0]	4	271,11	60,22
(66,0; 82,0]	3	370,19	105,44
(82,0; 98,0]	4	386,04	106,70
(98,0; 114,0]	6	375,10	107,32
(129,0; 145,0]	2	390,42	58,41
(145,0; 161,0]	2	323,22	63,37

4 Conclusão

O ensaio de CPTu e os levantamentos de MASW apresentaram uma grande correlação, com resultados convergentes, atingindo o principal objetivo do estudo que era comprovar que os dados obtidos por ambos os métodos podem ser relacionados. Os levantamentos de MASW passivo são menos invasivos, requerem menos tempo para ser executados, além atingirem maiores profundidades, porém por serem um método indireto carecem de informações diretas, como ensaios de piezocone, para serem calibrados. A partir deste estudo, e da equação de correção de V_s com SPT N_{60} obtida, será possível obter mais informações da estrutura através de um método mais ágil e com uma abrangência maior.

O estudo de caso deste artigo demonstra de maneira empírica que para maiores profundidades da pilha, o material apresentou-se com comportamento mais contrátil, com maiores valores de velocidade para ondas cisalhante e com parâmetros de resistência mais elevados, comportamento já esperado para estruturas de rejeito dispostas hidráulicamente.

Notou-se também que para a estrutura como todo os valores intermediários de SPT N_{60} , entre 66 e 114 golpes/30cm, são os que apresentam maiores variações de V_s . Este fato ocorre provavelmente por este intervalo conter uma combinação de amostras com sbtn classificadas como grupo 6 e 7, enquanto as extremidades, valores mais baixos e mais altos de SPT N_{60} , predominar apenas uma classificação.

Para os próximos passos desta pesquisa espera-se incorporar dados de litologia coletados através das campanhas de sondagem, além dos dados de MASW ativo 2D, a fim de comparação com os dados de V_s medidos pelo MASW passivo aqui utilizado. Prevê-se também incrementar o banco de dados utilizados realizando ensaios de CPTU nos mesmos locais de coleta do MASW, para então ser gerado seções 2D de parâmetros de resistência para o empilhamento.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a VALE pela disponibilização dos dados e fornecimento de auxílio para realização deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- De Souza, L. A. P. (2012). Métodos geofísicos em geotecnia e geologia ambiental. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT
- Dikmen U. Statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance for soils. Journal of Geophysics and Engineering 2009; 6(1):61–72.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. RESOLUÇÃO Nº 13, DE 8 DE AGOSTO DE 2019. Diário Oficial da União. 2019. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-13-de-8-de-agosto-de-2019-210037027>. Acesso em: 27 set. 2021.
- Park, C.B., Miller, R. D. & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of Surface waves, Geophysics, 64 (3): 800-808.
- Schnaid, F., & Odebrecht, E. (2012). Ensaios de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações: 2ª edição. Oficina de Textos.
- Robertson, P. K. (2010, May). Soil behaviour type from the CPT: an update. In 2nd International symposium on cone penetration testing (Vol. 2, No. 56, p. 8). Huntington Beach: Cone Penetration Testing Organizing Committee.

- Robertson, P. K. (2009). Interpretation of cone penetration tests—a unified approach. *Canadian geotechnical journal*, 46(11), 1337-1355.
- Wotherspoon, L. M., Li, Z., & Haycock, I. (2015). Assessment of SPT-CPT correlations using Canterbury site investigation database. In Proc. 12th Australia New Zealand Conference on Geomechanics.
- Jafari, K. M., Shafiee, A., Razmkhah, A. Dynamic properties of fine grained soil sin south of Tehran. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering* 2002;4(1):25–35.
- Eslami, A., Moshfeghi, S., Molaabasi, H., & Eslami, M. M. (2019). Piezocone and cone penetration test (CPTu and CPT) applications in foundation engineering. Butterworth-Heinemann.
- Wotherspoon, L. M., Orense, R. P., Bradley, B. A., Cox, B. R., Wood, C. M., & Green, R. A. (2015). Soil profile characterisation of Christchurch central business district strong motion stations. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 48(3), 146-156.
- Verweerd, Arre. (2023, April). Tailings and Industrial waste ENGINEERING (Taileng), Lecture 4: field and laboratory investigations FOR WASTE STORAGE FACILITIES, Geophysical testing: methods and interpretation.