14º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2023

ESTIMATIVA DA VELOCIDADE DE ONDA CISALHANTE (Vs) POR MEIO DO ENSAIO DE CONE (CPT) EM SOLOS TROPICAIS ARENOSOS

THIAGO HENRIQUE DA SILVA COSTA[1], BRENO PADOVEZI ROCHA[2]

[1] Discente do Curso Técnico em Edificações Integrado ao Ensino Médio, Bolsista PIBIC-EM, IFSP, Câmpus Ilha Solteira, h.thiago@aluno.ifsp.edu.br.
[2] Docente do Curso Técnico em Edificações Integrado ao Ensino Médio, IFSP, Câmpus Ilha Solteira, Área: Engenharia Civil/Construção Civil, breno.rocha@ifsp.edu.br

Área de conhecimento: 3.01.03.03-7 Mecânica dos Solos

RESUMO: Com a finalidade de proporcionar obras de engenharia mais econômicas e com adequado desempenho, é essencial conhecer as propriedades mecânicas e hidráulicas assim como o perfil do subsolo. A velocidade de onda cisalhante (Vs) é um parâmetro geotécnico que vem sendo amplamente empregado em vários projetos (avaliação sísmica de edifícios, vibração de máquinas, projetos de estruturas de contenção e de fundações). A determinação de Vs pode ser feita por meio de ensaios de laboratório e de campo. Entretanto, estes ensaios não são uma prática corrente no Brasil. Deste modo, Vs vem sendo estimado a partir de correlações empíricas baseadas em ensaios de penetração, como o Ensaio de Cone (CPT), na fase preliminar de projeto. Várias correlações empíricas para estimar Vs a partir do ensaio CPT foram desenvolvidas e estão disponíveis na literatura, porém a maioria destas correlações foram estabelecidas com base na experiência com solos bem-comportados formados em zonas temperadas, que nem sempre podem ser empregados adequadamente para solos tropicais. Assim, este artigo tem como objetivo avaliar e discutir a aplicabilidade de algumas correlações para a estimativa de Vs a partir de dados de CPT em solos tropicais arenosos.

PALAVRAS-CHAVE: velocidade de onda cisalhante (Vs); ensaio de cone; solos tropicais arenosos; correlações.

ESTIMATION OF SHEAR WAVE VELOCITY (Vs) BY CONE PENETRATION TESTING (CPT) IN TROPICAL SANDY SOILS

ABSTRACT: In order to provide more economical engineering works with adequate performance, it is essential to know the mechanical and hydraulic properties as well as the soil profile. Shear wave velocity (Vs) is a geotechnical parameter that has been widely used in several projects (seismic assessment of buildings, vibration of machinery, design of retaining structures and foundations). Vs can be determined by in situ or laboratory tests. However, it isn't common practice in Brazil. Thus, Vs can be estimated from empirical correlations based on penetration tests, such as the Cone Penetration Test (CPT), at the preliminary design stage. Several empirical correlations for estimating Vs from the CPT test have been developed and are available in the literature, however most of these correlations have been established based on experience with well-behaved soils formed in temperate zones, which cannot always be used adequately for tropical soils. So, this research project aims to evaluate and discuss the applicability of some correlations for the estimation of Vs from CPT data in sandy tropical soils.

KEYWORDS: shear wave velocity; cone test; tropical sandy soils; correlations.

INTRODUÇÃO

A velocidade de onda cisalhante (Vs) é um parâmetro de entrada para as análises dinâmica e estática dos solos (Poulos, 2021, p. 4). Além disso, Vs é empregado na estimativa de curvas de degradação do módulo, classificação do solo, estimativa do parâmetro de estado, bem como identificar horizontes com comportamento colapsível (Rocha et al., 2021, p. 6).

Vs pode ser determinado por meio de ensaios de campo e de laboratório. Os principais ensaios de laboratório são: coluna ressonante e os ensaios com *bender elements*. Já para os ensaios de campo, podemos citar: ensaios *cross-hole* e *down-hole*, o cone sísmico (SCPT) e o dilatômetro sísmico (SDMT). No entanto, estes ensaios nem sempre estão disponíveis ou não podem ser executados em um programa preliminar de investigação do subsolo para projetos de engenharia. Deste modo, correlações empíricas entre Vs e dados de ensaios de penetração, como o ensaio de cone (CPT), revelam-se ferramentas interessantes para a estimativa de Vs.

A atuação dos processos intempéricos e de pedogênese proporcionaram aos solos tropicais comportamento peculiar, quando comparados com os solos sedimentares. Os solos tropicais são caracterizados por apresentar comportamento coesivo-friccional, onde fatores como estrutura, condição não saturada, cimentação, não linearidade de rigidez regem seu comportamento (Vaughan et al., 1988, p. 4). Neste sentido, os métodos de interpretação de ensaios de campo, que foram desenvolvidos para solos bem-comportados (argilas moles e/ou areias puras saturadas) podem não ser adequados e levar a previsões de comportamento não realistas quando empregadas em solos tropicais.

Neste sentido, este artigo avalia e discute a validade de expressões empíricas disponíveis para a estimativa de Vs em solos tropicais arenosos, e com base nos resultados encontrados, propõe novas expressões que permitam melhores estimativas de Vs nestes solos, possibilitando assim, obras de engenharia mais econômicas e com adequado desempenho.

MATERIAL E MÉTODOS

Ensaio de Cone

O ensaio de cone (CPT) consiste na cravação vertical de uma ponteira cônica, instrumentada com diversos tipos de sensores, onde as informações são aquisicionadas e visualizadas em tempo real, possibilitando a interpretação instantânea do ensaio realizado. A cravação depende de um sistema de reação, que pode ser um lastro ou uma ancoragem no solo. A capacidade de cravação da ponteira é função da resistência total do conjunto: sistema de reação + resistência do solo.

O CPT permite medir simultaneamente resistência de ponta (q_c) e o atrito lateral (f_s). Com o avanço da tecnologia, novos sensores foram adicionados ao cone padrão, aumentando sensivelmente o potencial como ferramenta de investigação geotécnica e geoambiental.

Locais investigados e dados compilados

Neste estudo ensaios CPT, *cross-hole* (CH), *down-hole* (DH), cone sísmico (SCPT) e Dilatômetro sísmico (SDMT) previamente realizados nos campus experimentais da Unesp de Bauru e da USP de São Carlos foram empregados para a avaliação das correlações pré-existentes para a estimativa de Vs, bem como para a proposição de novas equações para os solos tropicais investigados.

O solo que ocorre no campo experimental de Unesp de Bauru consiste em uma areia fina pouco argilosa, porosa, colapsível, cuja compacidade aumenta com a profundidade. Esta camada de areia fina apresenta comportamento laterítico até cerca de 10 m de profundidade e não laterítico a partir daí. O campo experimental da USP de São Carlos está assentado sobre rochas do Grupo São Bento, constituídas de arenitos da Formação Botucatu e magmatitos básicos da Formação Serra Geral. Sobre essas rochas ocorrem conglomerados e arenitos do Grupo Bauru e, em seguida, cobrindo toda a região, aparecem os Sedimentos Cenozóicos, que são pouco compactos, muito porosos e colapsíveis.

Para o campus da Unesp, foram reinterpretados 17 ensaios sísmicos e 17 ensaios CPT (Rocha 2018, p. 90 a 96), totalizando 499 pontos da relação Vs – q_c, sendo 260 obtidos via ensaios *down-hole*, 183 obtidos via SDMT, 34 obtidos vai SCPT e 22 obtidos via *cross-hole*. Já para o campus da USP de São Carlos, foram reinterpretados 13 ensaios sísmicos e 13 ensaios CPT (Rocha 2018, p. 120 a 126), totalizando 322 pontos da relação Vs – q_c, sendo 150 obtidos via ensaios *down-hole*, 147 obtidos via SDMT e 25 obtidos via *cross-hole*. As Figuras 1 e 2 apresentam respectivamente os resultados dos

ensaios CPT e sísmicos (CH, DH e SDMT) previamente realizados nos campus experimentais da Unesp de Bauru e da USP de São Carlos.

Importante destacar que as diferenças observadas nos valores de q_c, f_c e Vs podem estar relacionadas variabilidade do terreno, típica de solos tropicais, bem como a sazonalidade temporal e as técnicas sísmicas empregadas neste artigo.

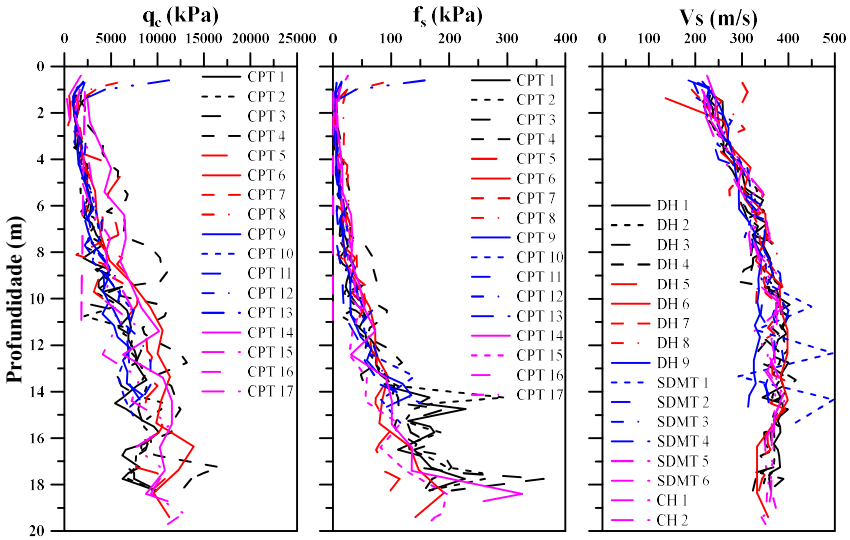

FIGURA 1. Perfis de q_c, f_s e Vs anteriormente realizados no campus experimental da Unesp de Bauru (adaptado de Rocha, 2018, p. 90 a 96).

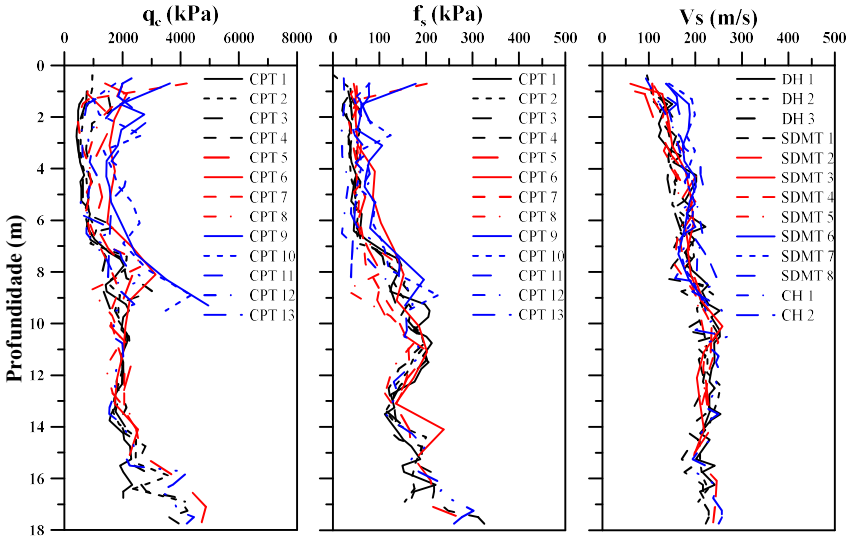

FIGURA 2. Perfis de q_c, f_s e Vs anteriormente realizados no campus experimental da USP de São Carlos (adaptado de Rocha, 2018, p. 120 a 126).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação de correlações clássicas

Como discutido, solos tropicais apresentam comportamento peculiar devido aos processos inerentes à sua formação. As metodologias tradicionais para a estimativa de parâmetros de projeto não consideram a condição não saturada, comportamento coesivo-friccional, e a influência da estrutura presentes nos solos tropicais. Deste modo, há necessidade de se avaliar a aplicabilidade das abordagens teóricas desenvolvidas para solos sedimentares a outros geomateriais, como os solos tropicais.

Neste sentido, após a definição e reinterpretação dos perfis de Vs, estes serão comparados com os perfis de Vs estimados por correlações disponíveis na literatura, desenvolvidas para solos convencionais, típicos de regiões de clima temperado, buscando verificar a validade destas equações

para os solos tropicais arenosos investigados. Na Tabela 1 são apresentadas as correlações empíricas empregadas na estimativa de Vs por meio do ensaio CPT. Figura 3 apresenta a comparação entre os valores de Vs medidos e estimados para os campos experimentais estudados. Nesta análise considerou-se um ensaio SDMT e um ensaio *down-hole* para ambos os campos experimentais.

TABELA 1. Algumas correlações empíricas empregadas na estimativa de Vs pelo ensaio CPT.

Tipo de solo	Correlação	Referência	Observações
Areia	$Vs = 277 \cdot q_t^{0,13} \cdot \sigma'_{v0}{}^{0,27}$	Baldi et al. (1989)	q_t e σ'_{v0} em MPa
Areia	$Vs = 13,18 \cdot q_t^{0,192} \cdot \sigma'_{v0}{}^{0,179}$	Hegazy e Mayne (1985)	q_t e σ'_{v0} em kPa
Areia	$Vs = 12,02 \cdot q_t^{0,319} \cdot f_s^{-0,0466}$	Trevor et al. 2010	q_t e σ'_{v0} em kPa
Diferentes solos	$Vs = [(10^{0,55.Ic + 1,68}).((q_t - \sigma_{v0})/p_a)]^{0,5}$	Roberson (2009)	q_t e σ'_{v0} em MPa, e p_a em kPa

qt foi considerado igual a qc; σ'v0: tensão vertical efetiva; σv0: tensão vertical efetiva total; Ic: índice de comportamento do solo; pa: pressão atmosférica.

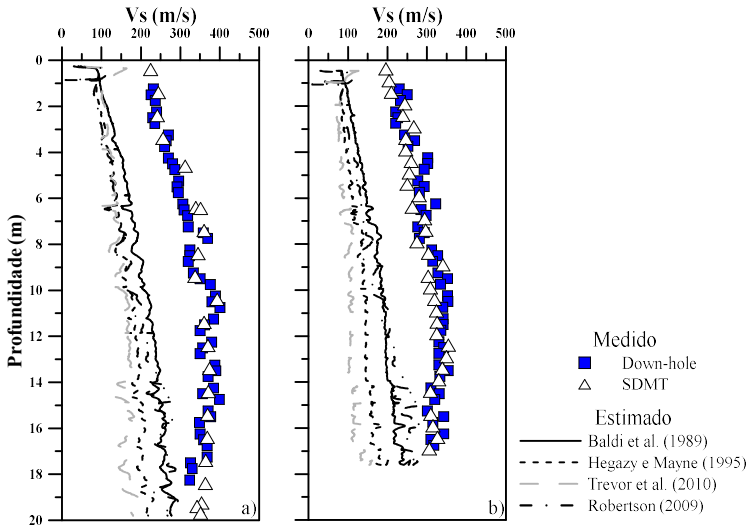

FIGURA 3. Valores de Vs medidos e estimados para os campus experimentais da Unesp de Bauru (a) e para a USP de São Carlos (b).

A partir da Figura 3 é possível observar a grande discrepância entre os valores medidos e estimados de Vs. Em toda a análise comparativa, os valores de Vs estimados foram inferiores aos medidos, sendo observado um erro relativo (ER) médio de aproximadamente 40 e 36%, respectivamente para o campo experimental da Unesp de Bauru e da USP de São Carlos. Este comportamento pode estar relacionado ao fato de os solos tropicais apresentarem comportamento coesivo-friccional, onde fatores como estrutura (cimentação, envelhecimento), condição não saturada, não linearidade de rigidez e gênese, irão reger seu comportamento. Além disso, presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio nos solos desses campos experimentais, agregam e cimentam as partículas do solo, o que provoca um aumento nos valores de Vs, uma vez que o efeito da cimentação é mais pronunciado em parâmetros determinados a pequenas deformações (Vs), do que naqueles medidos ou interpretados para médias a grandes deformações (como a resistência de ponta do cone). Logo, torna-se necessário o desenvolvimento de correlações empíricas que possam ser empregadas para a estimativa de Vs em solos não convencionais, como os solos tropicais investigados.

Correlações propostas para os solos tropicais arenosos investigados

A Figura 4 apresenta os ajustes linear (equação 1) e potência (equação 2) para os dados de q_c e Vs anteriormente apresentados e discutidos (Figura 1 e 2).

$$Linear: Vs = (0,011 * q_c) + 273,7 \quad R^2 = 0,651 \tag{1}$$

$$Potência: Vs = 100,8 * q_c^{0,143} \quad R^2 = 0,753 \tag{2}$$

em que,
Vs – velocidade de onda cisalhante, m/s;
q_c – resistência de ponta do cone, kPa

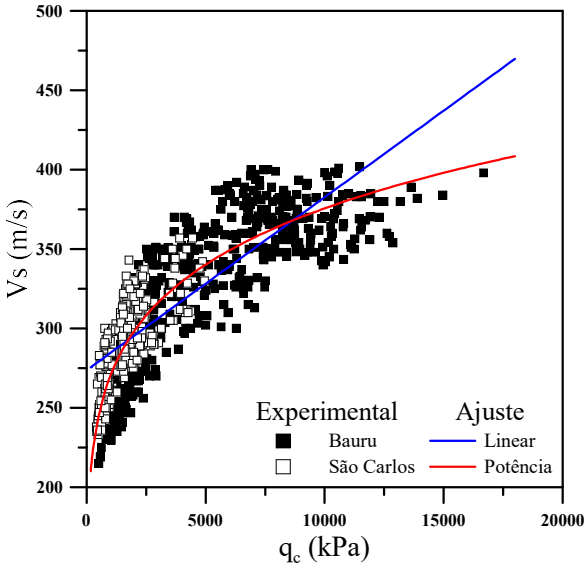

FIGURA 4. Ajustes linear e potência para a estimativa de Vs por meio de q_c para os campos experimentais estudados.

Visando avaliar as equações propostas, novas campanha de ensaios CPT e *down-hole* foram realizadas neste campo experimental (Braus, 2023, p. 89). Foram realizados dois ensaios CPT e dois ensaios DH no campo experimental da Unesp de Bauru, e um ensaio CPT e dois ensaios DH para o campo experimental da USP de São Carlos. A Figura 5 apresenta a análise comparativa entre os valores de Vs medidos na nova campanha de ensaios, bem como os perfis de Vs estimados pelas novas correlações propostas. Observa-se a boa concordância entre os perfis, demonstrando assim a necessidade de se empregar correlações representativas do local investigado para a estimativa de parâmetros de projeto.

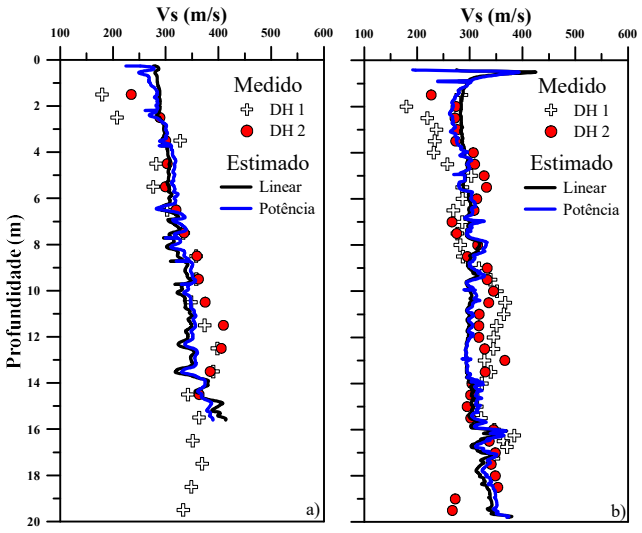

FIGURA 5. Valores de Vs medidos e estimados para os campus experimentais da Unesp de Bauru (a) e USP de São Carlos (b) a partir das novas campanhas de ensaios e novas correlações propostas.

CONCLUSÕES

Os solos tropicais são caracterizados por apresentar comportamento peculiar, onde fatores como comportamento coesivo-friccional, cimentação, condição não saturada e não linearidade de rigidez,

regem seu comportamento. Neste sentido, os métodos de interpretação de ensaios de campo, que foram desenvolvidos para solos convencionais (argila mole e areia pura sem cimentação), sempre saturadas, podem não ser adequados e levar a previsões de comportamento não realistas para os solos tropicais.

Neste sentido, este artigo apresenta duas correlações empíricas para a estimativa da velocidade de onda cisalhante (Vs) através da resistência de ponta do Cone (q_c), para dois perfis de solos tropicais (Unesp de Bauru e USP de São Carlos). Valores de Vs estimados pelas correlações foram comparadas com valores de Vs medidos em duas campanhas realizadas recentemente e apresentaram boa concordância. Para solos não convencionais, como os solos tropicais estudados, há necessidade de se validar as correlações clássicas para a estimativa de parâmetros visando projetos seguros e econômicos.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

T.H.S.C e B.P.R atuaram na redação do trabalho, curadoria e análise dos dados, bem como procederam a metodologia empregada na pesquisa.

Todos os autores contribuíram com a revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de iniciação científica ao ensino médio (PIBIC-EM) concedida e ao IFSP - Campus Ilha Solteira pela disponibilidade do laboratório de informática para a elaboração de planilhas eletrônicas (LibreOffice Cal) para o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

BALDI G.; BELLOTI R.; CHIONNA V. N.; JAMIOLKOWSKI M.; LOPRESTI D. C. F. (1989) Modulus of sands from CPTs and DMTs. In: 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, Rio de Janeiro, Brazil, 13-18 August, p. 165 – 170.

BRAUS, G. B. (2023). **Atualização e desenvolvimento de um sistema para ensaios down-hole em conjunto com piezocone**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Bauru. ***No prelo***.

HEGAZY, Y. A; MAYNE P. W. (1995) Statistical correlations between vs and CPT data for different soil types. In: 1st International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'95), Vol. 2, Swedish Geotechnical Society, Linköping, Sweden, 4-5 October, p. 173 – 178.

POULOS, H. G. Use of Shear Wave Velocity for Foundation Design. **Geotechnical and Geological Engineering,** 40(4), 1921-1938, 2022. https://doi.org/10.1007/s10706-021-02000-w.

ROBERTSON, P. K. Interpretation of cone penetration tests — a unified approach. **Canadian Geotechnical Journal**, 46 (11), 1337–1355, 2009. https://doi.org/10.1139/T09-065.

ROCHA, B. P., RODRIGUES, C. A. L., RODRIGUES, R. A., GIACHETI, H. L. Using a Seismic Dilatometer to Identify Collapsible Soils. **International Journal of Civil Engineering,** 20 (7), 857-867, 2021. https://doi.org/10.1007/s40999-021-00687-9

ROCHA, B. P. (2018) **Caracterização geotécnica de solos tropicais não saturados por meio de ensaios de campo**. São Carlos, 240p. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

TREVOR F., PAISLEY J. M., MAYNE P. W. (2010) Cone penetration tests at active earthquake sites. In.: 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'10), Vol. 2, Huntington Beach, CA, USA, 9-10 May, p. 519 – 526.

VAUGHAN, P. R., MACCARINI, M., MOKHTAR, S. M. (1988). Indexing the engineering properties of residual soil. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, 21, 69-84. https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1988.021.01.05