

# Análise Estatística de Ensaios a Percussão (SPT) e Geofísicos em Solos Lateríticos da Formação Barreiras Aplicada a Projetos de Fundações

Daniela de Sousa

Graduanda, IFCE, Fortaleza, Brasil, sousa.daniela63@aluno.ifce.edu.br

Marcos Fábio Porto de Aguiar

Professor Associado, IFCE, Fortaleza, Brasil, marcosporto@ifce.edu.br

Luiz Kauã Grangeiro Barata

Graduando, IFCE, Fortaleza, Brasil, luiz.kaua09@aluno.ifce.edu.br

Marina Albuquerque Porto de Aguiar

Graduanda, IFCE, Fortaleza, Brasil, marina.porto07@aluno.ifce.edu.br

**RESUMO:** A Formação Barreiras, amplamente distribuída no litoral brasileiro, tem em sua composição, além de argilitos, siltitos e arenitos, solos lateríticos cujas propriedades geotécnicas ainda demandam estudos aprofundados, especialmente quanto à sua aplicação em projetos de fundações, ressaltando-se os trabalhos de Décourt (1999) e Décourt *et al.* (2016). Este trabalho visa a análise de correlação entre o número de golpes ( $N_{SPT}$ ), obtido no ensaio de penetração padrão (SPT), e a velocidade das ondas de cisalhamento ( $V_s$ ), obtida em ensaios *crosshole*, em obras de prédios altos localizados na cidade de Fortaleza, no estado do Ceará. Observou-se valores discrepantes de  $N_{SPT}$  e  $V_s$  nas interfaces entre camadas lateríticas e não lateríticas, sendo esses desconsiderados na mesma profundidade, bem como 1,0 m acima e abaixo da interface, para minimizar distorções nos resultados. Os dados foram então submetidos a uma análise estatística por meio de regressão linear, avaliando a qualidade do modelo pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Os resultados evidenciaram uma boa correlação entre  $N_{SPT}$  e  $V_s$ , indicando também a necessidade da continuidade do estudo para um melhor entendimento e aplicação dos resultados de ensaios geofísicos, tendo como referência o ensaio a percussão.

**PALAVRAS-CHAVE:** Formação Barreiras; Solos lateríticos; Ensaios geofísicos; Ensaio a percussão; Fundações.

**ABSTRACT:** The Formação Barreiras, widely distributed along the Brazilian coast, contains claystones, siltstones, and sandstones, as well as lateritic soils whose geotechnical properties still require further study, especially regarding their application in foundation projects, as highlighted in the works of Décourt (1999) and Décourt *et al.* (2016). This study aims to analyze the correlation between the number of blows ( $N_{SPT}$ ), obtained in the standard penetration test (SPT), and the shear wave velocity ( $V_s$ ), obtained in crosshole tests, in high-rise buildings located in the city of Fortaleza, in the state of Ceará. The discrepant values of  $N_{SPT}$  and  $V_s$  at the interfaces between lateritic and non-lateritic layers were analyzed, disregarding measurements taken at the same depth, as well as 1.0 m above and below the interface, to minimize distortions in the results. The data were then subjected to statistical analysis using linear regression, evaluating the quality of the model by the coefficient of determination ( $R^2$ ). The results showed a good correlation between  $N_{SPT}$  and  $V_s$ , also indicating the need for further study to better understand and apply the results of geophysical tests, using the percussion test as a reference.

**KEYWORDS:** Formação Barreiras; Lateritic soils; Geophysical methods; Percussion testing; Foundations.

## 1 INTRODUÇÃO

Nas grandes cidades litorâneas brasileiras, observa-se um crescimento expressivo no número de edificações de múltiplos pavimentos, as quais impõem elevadas cargas ao subsolo. O desempenho adequado dessas estruturas está diretamente relacionado ao dimensionamento das fundações, o que exige a caracterização confiável tanto das ações estruturais quanto das condições geológico-geotécnicas da subsuperfície.

Ao longo de extensos trechos do litoral brasileiro, especialmente na região Nordeste, destaca-se a ocorrência da Formação Barreiras, unidade sedimentar amplamente distribuída e constituída por intercalações de argilas, siltes e areias, frequentemente com presença de níveis cimentados por óxidos de ferro (Mabessone et al., 1972). Essa heterogeneidade litológica exerce influência significativa no comportamento mecânico dos solos e, conseqüentemente, no desempenho das fundações.

No Brasil, a principal fonte de informações do subsolo para projetos de fundações é o ensaio de penetração padrão (SPT), entretanto, a literatura técnica tem discutido limitações do uso exclusivo do  $N_{SPT}$  para estimativas de parâmetros de deformabilidade, especialmente em solos estruturados e cimentados (Schnaid e Odebrecht, 2012).

Décourt (1999) destaca que correlações empíricas baseadas no  $N_{SPT}$ , quando aplicadas a solos com estruturação natural ou cimentação, podem conduzir a interpretações inadequadas da rigidez do material. Posteriormente, Décourt et al. (2016) reforçam que estimativas de módulo de deformabilidade obtidas exclusivamente a partir de correlações com  $N_{SPT}$  devem ser utilizadas com cautela, sendo recomendável a complementação com ensaios que permitam avaliação mais direta da rigidez, como ensaios sísmicos de campo. Segundo Schnaid e Odebrecht (2012), a determinação do módulo de cisalhamento em pequenas deformações por meio de técnicas sísmicas apresenta maior confiabilidade para a caracterização da rigidez inicial do solo.

Diante desse contexto, o presente estudo propõe a análise de uma correlação empírica entre o índice  $N_{SPT}$  e a velocidade de onda de cisalhamento ( $V_s$ ), obtida por ensaio *crosshole*, a partir de dados de campo coletados em obras realizadas na cidade de Fortaleza-CE, contribuindo para a estimativa de parâmetros de deformabilidade em solos associados à Formação Barreiras.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Formação Barreiras

O Grupo Barreiras é composto por uma sequência de sedimentos detríticos, siliciclásticos, de origem fluvial e marinha (Arai, 2006), pouco ou não consolidados, mal selecionados, de cores variegadas (Vilas Boas, 1996), variando de areias finas a grossas, predominando grãos angulosos, argilas cinza-avermelhadas, com matriz caulínica e ocorrência escassa de estruturas sedimentares (Mabessone et al., 1972).

Ao longo da costa brasileira são encontrados depósitos sedimentares da Formação Barreiras, se estendendo desde o Amapá até o Rio de Janeiro. Essa formação preenche bacias sedimentares que tiveram origem durante a separação entre o continente africano e a América do Sul (Rossetti et al., 2013). No seu topo encontra-se um horizonte de solo lateríticos recoberto, em algumas localidades, por sedimentos denominados de Pós-Barreiras, que representam grande parte do Quaternário costeiro do Brasil (Bezerra et al., 2006). A sedimentação Barreiras obedeceu a um conjunto de fatores ambientais que envolveram, principalmente, mudanças climáticas, oscilações do nível do mar e movimentos tectônicos, que ocorreram em uma sequência de eventos determinantes à elaboração da configuração atual do litoral brasileiro (Costa Júnior, 2008).

### 2.2 Solo Laterítico

Para o Comitê de Solos Tropicais da Associação Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações (ISSMEF, 1985), solos lateríticos são solos pertencentes aos horizontes A e B de perfis drenados, que se desenvolvem sob a influência do clima tropical úmido. Esses solos têm predisposição a possuir grande parte de sua granulometria com diâmetro menor que 2 mm, embora em alguns locais possam apresentar agregados lateríticos denominados lateritas.

Os solos lateríticos são solos tropicais que apresentam valores elevados de resistência. O processo de formação desse tipo de solo é físico-químico, apresentado pela laterização avançada típica de climas quentes e úmidos que se caracteriza pela decomposição de feldspatos e de minerais ferro-magnesianos, pela lixiviação da sílica e de bases e pela concentração de hidróxidos e óxidos de ferro e alumínio. A laterização consiste na perda de cátions como cálcio, magnésio e potássio, além da acumulação de alumínio e ferro, gerando solos intemperizados de coloração vermelha, cinza ou amarela, e de baixa plasticidade (Décourt, 2022).

O processo de laterização tem três etapas: lixiviação, concentração e transformação. Na lixiviação, a percolação da água da chuva remove significativamente os nutrientes e cátions do solo, elevando a acidez do mesmo. Em seguida, há a concentração eluvial dos óxidos de ferro e alumínio na superfície do solo, resultando na formação de uma camada endurecida e altamente intemperizada, conhecida como crosta laterítica. Por fim, os óxidos de ferro e alumínio são transformados em formas mais cristalinas e estáveis, como a goethita, hematita e gibbsita (Fagundes *et al.*, 2015).

### 2.3 Aplicação em Projetos de Fundações

Resultados apresentados por Décourt (1999) demonstram que as elevadas características de rigidez das argilas lateríticas não são adequadamente captadas por ensaios de penetração usuais, como o SPT. A partir de uma extensa campanha de ensaios de campo e de laboratório, realizada no sítio do edifício Rimini, foi possível identificar um tipo de argila cuja rigidez se mostrou significativamente superior à de outras argilas que apresentavam valores equivalentes de  $N_{SPT}$ . Essa constatação possui implicações diretas no projeto de fundações, uma vez que parâmetros obtidos exclusivamente a partir do SPT podem conduzir a avaliações excessivamente conservadoras da rigidez do maciço, afetando estimativas de recalque e o comportamento deformacional das fundações.

De acordo com Pinto (2006), os solos lateríticos apresentam características geotécnicas particularmente favoráveis à engenharia de fundações, destacando-se o aumento da capacidade de suporte após a compactação, a ausência de comportamento expansivo mesmo na presença de água e a inexistência de retração significativa associada à perda de umidade. Essas propriedades contribuem para um desempenho estrutural mais estável das fundações, desde que corretamente caracterizadas.

### 2.4 Ensaio de Penetração Padrão

Terzaghi e Peck (1948) propuseram uma técnica para obtenção das características da estratigrafia da subsuperfície *in situ*. Esses autores nomearam esse procedimento de *Standard Penetration Test* (SPT), afirmando que, devido às informações relevantes que fornece com um esforço adicional mínimo, deveria ser adotado sempre que possível. O SPT pode ser classificado como um ensaio de campo por percussão e destaca-se como um dos métodos mais empregados na caracterização de solos. No Brasil, o ensaio segue as diretrizes da norma NBR 6484 (ABNT, 2020), e fornece informações, como: tipos de solos e suas respectivas profundidades de ocorrência; indicação da posição do nível de água (quando ocorrer) durante a execução de cada sondagem, e o índice de resistência à penetração ( $N_{SPT}$ ).

### 2.3 Ensaio Crosshole

O ensaio de refração sísmica com técnica *crosshole*, até o presente momento, possui normativa técnica brasileira, mas é normatizado pela norma internacional ASTM D4428 (2007) e tem como objetivo principal a determinação em profundidade das velocidades de propagação das ondas de compressão ( $V_p$ ) e de cisalhamento ( $V_s$ ). Porém, o valor medido é de apenas uma camada, ou parte dela, pois a onda gerada se distribui por uma trajetória direta.

Na técnica *crosshole* é necessário captar por meio de um geofone (receptor), ondas geradas por um gerador de ondas que fica na mesma profundidade do receptor, ou seja, em um furo serão geradas as ondas sísmicas e em outro, as mesmas serão captadas pelo receptor, como ilustrado na Figura 1.

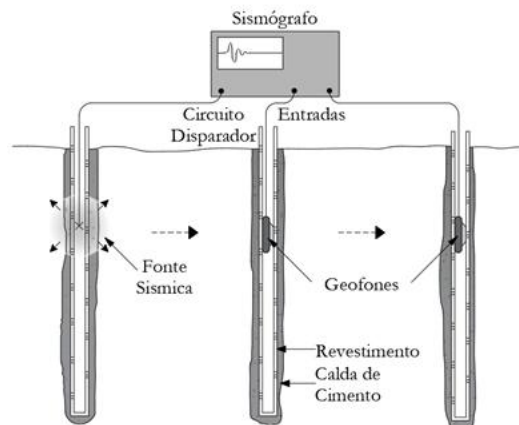


Figura 1. Processo da transmissão direta (Aguiar, 2020).

### 3 ESTUDO DE CASO

Para o desenvolvimento deste estudo, foram utilizados resultados de investigações geotécnicas realizadas em três empreendimentos de prédios altos situados na região litorânea da cidade de Fortaleza, Ceará, conforme apresentado na Figura 2. O conjunto de dados compreende ensaios de penetração padrão (SPT) e ensaios sísmicos do tipo *crosshole*.

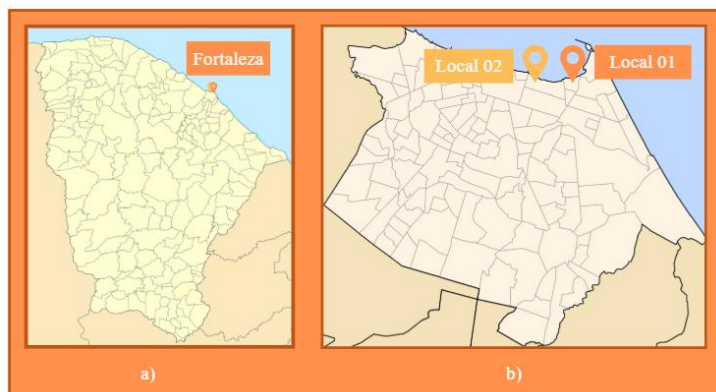


Figura 2. Localização das obras:

(a) Localização de Fortaleza no estado do Ceará; (b) Localização das obras em Fortaleza.

No Local 01, localizado no bairro Meireles, os dados foram obtidos a partir de campanhas executadas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas e pela empresa Solotrat Nordeste (2022). Para o Local 03, situado no bairro Meireles, foram considerados resultados de sondagens realizadas pela empresa Alta Resolução em parceria com a Normatel Incorporações (2024).

Para fins de análise, foram selecionados pares de valores correspondentes de  $V_s$  e  $N_{SPT}$  nas mesmas profundidades, restritos às camadas de argila classificadas como lateríticas nos boletins de sondagem a percussão. Com o objetivo de minimizar interferências associadas a zonas de transição estratigráfica, foram desconsiderados os valores situados nas extremidades das camadas, especificamente na interface exata e nas faixas de 1,0 m acima e abaixo dessas transições.

As Figuras 3 e 4, a seguir, mostram um perfil simplificado com a estratigrafia dos terrenos obtidas nas diferentes sondagens SPT realizadas e valores de  $V_s$  obtidos nos ensaios *crosshole*, destacando em azul os valores utilizados e em vermelhos os *outliers* descartados.

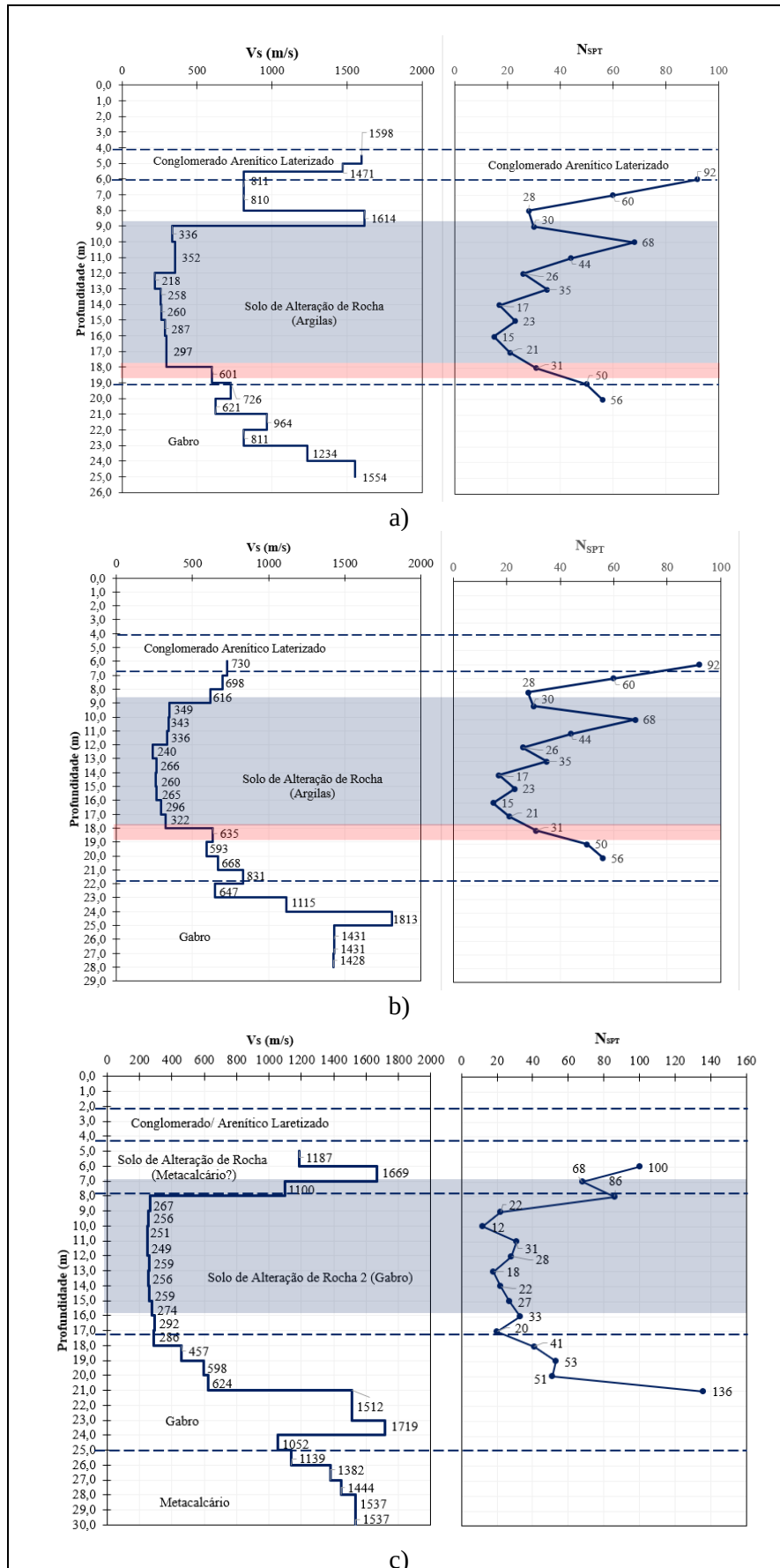


Figura 3. Perfis de sondagem simplificado | Local 01.

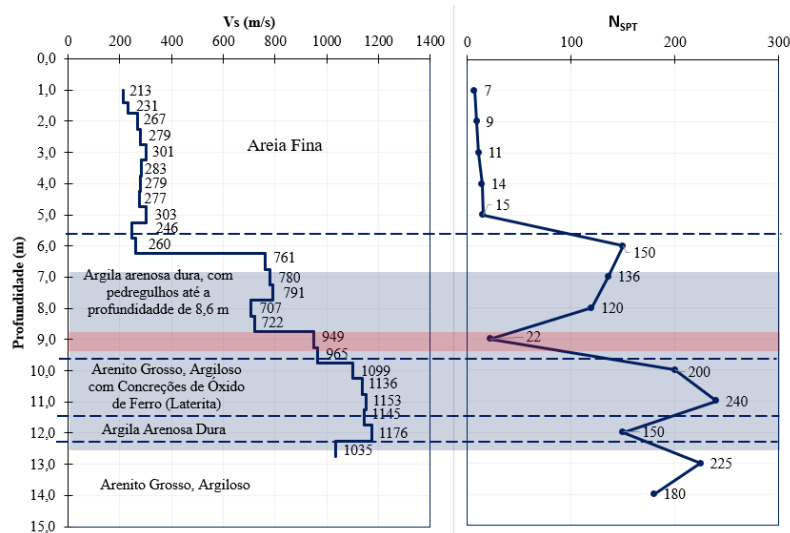


Figura 4. Perfil de sondagem simplificado | Local 02.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise estatística dos dados de sondagens realizadas em duas obras na localizadas na região litorânea de Fortaleza-CE permitiu avaliar a relação entre o número de golpes do ensaio SPT ( $N_{SPT}$ ) e a velocidade de propagação das ondas de cisalhamento ( $V_s$ ). A partir dos pares de valores obtidos, foi elaborado um gráfico de dispersão com  $N_{SPT}$  na abscissa  $V_s$  na ordenada, ilustrado na Figura 5, possibilitando a visualização do comportamento dos dados.

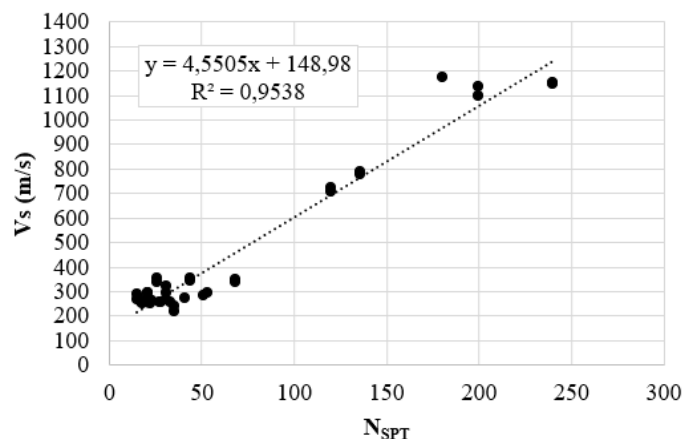


Figura 5. Gráfico do  $N_{SPT}$  pela velocidade de cisalhamento ( $V_s$ ).

A análise concentrou-se nos dados dos locais 01 e 02, excluindo os *outliers*. A identificação desses pontos influentes foi realizada por meio do método estatístico da distância de Cook, adotando o critério da distância maior que 4 dividido por o número total de observações. A regressão realizada para esses locais indicou que a relação entre  $N_{SPT(72)}$  e  $V_s$  é melhor representada por uma função do tipo linear. A partir do ajuste do modelo, foram determinados o coeficiente linear e o coeficiente angular, resultando na Equação 1.

$$V_s = 4,5505 \cdot N_{SPT(72)} + 148,98 \quad (1)$$

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi de aproximadamente 0,95, evidenciando que a equação é capaz de representar satisfatoriamente a tendência dos dados analisados. A comparação entre os valores de  $V_s$  estimados pela equação e aqueles obtidos por ensaios *crosshole* revelou que, em diversos casos, os resultados apresentaram boa concordância, especialmente para valores intermediários de  $N_{SPT}$ .



Os resultados apresentados na Tabela 1 evidenciam que, embora a equação de correlação reproduza adequadamente a tendência média dos dados, existem discrepâncias pontuais entre valores medidos e estimados. Essas diferenças reforçam que a relação empírica obtida não captura integralmente a complexidade do comportamento geotécnico dos solos analisados, sendo influenciada por aspectos como heterogeneidade estratigráfica e limitações inerentes ao ensaio SPT.

Tabela 1. Resumo dos valores utilizados para a correlação.

| Local 01 (CH-01   SE-18) |                |                          | Local 01 (CH-02   SE-18) |                |                | Local 01 (CH-03   SE-43) |                |                          | Local 02 (SPT-T   SR-1) |                |                          |
|--------------------------|----------------|--------------------------|--------------------------|----------------|----------------|--------------------------|----------------|--------------------------|-------------------------|----------------|--------------------------|
| N <sub>SPT</sub>         | V <sub>s</sub> | V <sub>s</sub> calculado | N <sub>SPT</sub>         | V <sub>s</sub> | V <sub>s</sub> | N <sub>SPT</sub>         | V <sub>s</sub> | V <sub>s</sub> calculado | N <sub>SPT</sub>        | V <sub>s</sub> | V <sub>s</sub> calculado |
| 68                       | 336            | 460                      | 68                       | 349            | 460            | 31                       | 267            | 290                      | 136                     | 780            | 768                      |
| 44                       | 352            | 349                      | 44                       | 343            | 349            | 28                       | 256            | 276                      | 136                     | 791            | 768                      |
| 26                       | 352            | 267                      | 26                       | 336            | 267            | 18                       | 251            | 231                      | 120                     | 707            | 695                      |
| 35                       | 218            | 308                      | 35                       | 240            | 308            | 22                       | 249            | 249                      | 120                     | 722            | 695                      |
| 17                       | 258            | 226                      | 17                       | 266            | 226            | 27                       | 259            | 272                      | 200                     | 1099           | 1059                     |
| 23                       | 260            | 254                      | 23                       | 260            | 254            | 33                       | 256            | 299                      | 200                     | 1136           | 1059                     |
| 15                       | 287            | 217                      | 15                       | 265            | 217            | 20                       | 259            | 240                      | 240                     | 1153           | 1241                     |
| 21                       | 297            | 245                      | 21                       | 296            | 245            | 41                       | 274            | 336                      | 240                     | 1145           | 1241                     |
| 31                       | 297            | 290                      | 31                       | 322            | 290            | 53                       | 292            | 390                      | 180                     | 1176           | 968                      |
| -                        | -              | -                        | -                        | -              | -              | 51                       | 286            | 382                      | 180                     | 1035           | 968                      |

## 5 CONCLUSÕES

Este estudo abordou a correlação entre os números de golpes de SPT ( $N_{SPT}$ ) e as velocidades de propagação das ondas de cisalhamento ( $V_s$ ) em solos lateríticos da Formação Barreiras, na região litorânea de Fortaleza, Ceará. A análise realizada demonstrou que, embora a equação proposta tenha fornecido uma relação útil entre os dois parâmetros, a correlação apresentou limitações associadas à variabilidade natural dos solos aos resultados reais em todas as situações.

Para os Locais 01 e 02, foi possível ajustar uma relação linear com coeficiente de determinação em torno de 0,95, indicando boa representação da tendência média dos dados, especialmente para valores intermediários de  $N_{SPT(72)}$ . A variabilidade observada nos dados pode ser atribuída a fatores como a heterogeneidade dos solos e a influência das condições de teste, que são comuns em estudos geotécnicos.

A equação obtida é adequada como ferramenta auxiliar em análises preliminares, devendo ser aplicada com cautela e, sempre que possível, complementada por ensaios geofísicos diretos para uma caracterização mais confiável do comportamento do solo. A dispersão observada, especialmente para valores elevados de  $N_{SPT}$ , está de acordo com as observações de Décourt (1999) e Décourt et al. (2016), que destacam que solos lateríticos apresentam rigidez significativamente superior àquela sugerida por ensaios de penetração. Dessa forma, correlações baseadas exclusivamente no  $N_{SPT}$  tendem a apresentar limitações estatísticas, refletidas no aumento dos erros e na redução da capacidade preditiva do modelo para solos mais rígidos.

Diante disso, recomenda-se a realização de estudos adicionais, com um número maior de amostras e diferentes condições de solo, para aprimorar a confiabilidade das correlações. Essa continuidade da pesquisa permitirá um melhor entendimento das características dos solos locais e contribuirá para a otimização dos métodos de avaliação geotécnica em futuras obras. A importância de validações adicionais para aumentar a precisão dos modelos de correlação é uma consideração fundamental para garantir a segurança e a eficácia dos projetos de fundação.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio e suporte financeiro por meio da concessão de bolsas de iniciação científica. Agradecem, também, ao Grupo de Pesquisa em Geotecnia e Infraestrutura de Transportes (GPGE) do Instituto Federal do Ceará (IFCE) - Campus Fortaleza, pelo suporte técnico prestado ao desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alta Resolução. Relatório do ensaio crosshole. Fortaleza, 2024. Relatório técnico.

- American Society For Testing And Materials (ASTM). ASTM D4428/D4428M-07: Standard test methods for crosshole seismic testing. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2007.
- Arai, M. A grande elevação eustática do Mioceno e sua influência na origem do Grupo Barreiras. *Geologia USP – Série Científica*, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 1–6, 2006.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (2020). NBR 6484: Execução de sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. Rio de Janeiro.
- Associação Internacional De Mecânica Dos Solos E Engenharia De Fundações (ISSMEF). Comitê de Solos Tropicais. 1985.
- Bezerra, F. H. R.; Mello, C. L.; Suguio, K. A Formação Barreiras: recentes avanços e antigas questões. *Geologia USP – Série Científica*, São Paulo, v. 6, n. 2, 2006.
- Costa Júnior, M. P. Interações morfo-pedogenéticas nos sedimentos do Grupo Barreiras e nos leques aluviais pleistocênicos no litoral norte da Bahia – município de Conde. 2008. 247 f. Tese (Doutorado em Geologia Costeira e Sedimentar) – Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- Décourt, L. Behavior of foundations under working load conditions. In: *Proceedings of the XI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Foz do Iguaçu, 1999. v. 4.
- Décourt, L. et al. Maximum shear modulus of a Brazilian lateritic soil from in situ and laboratory tests. In: *Proceedings of the International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterisation*. Australia: Geomechanics Society, 2016. p. 547–551.
- Décourt, L. Fundações em solos lateríticos: 30 anos de pesquisas (1992–2022). In: *XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica e XI Congresso Luso-Brasileiro de Geotécnica*. São Paulo, 2022. Apresentação em slides.
- Fagundes, L. S. et al. Laterização. In: FERREIRA, M. E. et al. *Dicionário brasileiro de ciência do solo*. 3. ed. Viçosa: SBCS, 2015. p. 527–531.
- Instituto De Pesquisas Tecnológicas (Ipt). Relatório do ensaio crosshole. Fortaleza, 2022. Relatório técnico.
- Mabesoone, J. M.; Campos, E.; Silva, A.; Beurlen, K. Estratigrafia e origem do Grupo Barreiras em Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 2, p. 173–190, 1972.
- Normatel Incorporações. Relatório de sondagem mista. Fortaleza, 2024. Relatório técnico.
- Pinto, C. S. Curso básico de mecânica dos solos: com exercícios resolvidos. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- Rossetti, D. F.; Bezerra, F. H. R.; Dominguez, J. M. L. Late Oligocene–Miocene transgressions along the equatorial and eastern margins of Brazil. *Earth-Science Reviews*, v. 123, p. 87–112, 2013.
- Schnaid, F.; Odebrecht, E. Ensaio de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- Solotrat Nordeste. Relatório de sondagem mista. Fortaleza, 2022. Relatório técnico.
- Terzaghi, K.; PECK, R. B. Soil mechanics in engineering practice. New York: John Wiley & Sons, 1948.
- Vilas Boas, G. S. Sedimentos terciários e quaternários do interior. In: *Texto explicativo para o mapa geológico do Estado da Bahia*. Salvador: Secretaria da Indústria, Comércio e Mineração; Superintendência de Geologia e Recursos Minerais, 1996.