

Aplicação de Métodos para Caracterização Geotécnica de Solo da Formação Barreiras em Região Litorânea de Fortaleza-CE

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

Daniela de Sousa

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

Gabriela Albuquerque Porto de Aguiar

Graduanda, IFCE, Fortaleza, Brasil, gabriela.albuquerque07@aluno.ifce.edu.br

RESUMO: A Formação Barreiras estende-se por grande parte do litoral brasileiro e é composta por uma cobertura sedimentar heterogênea, com camadas intercaladas de argilitos, siltitos e arenitos, frequentemente associadas a níveis enrijecidos por cimentação ferruginosa e à presença de solos lateríticos nas porções superiores (Santos Júnior *et al.*, 2015). Embora esses materiais sejam estudados desde a década de 1980, sobretudo para aplicação em obras rodoviárias (Nogami; Villibor, 1981), ainda são limitadas as pesquisas voltadas ao seu emprego em projetos de fundações, destacando-se os trabalhos de Décourt (1999) e Décourt *et al.* (2016). Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo caracterizar amostras de solo laterítico da Formação Barreiras, avaliando seu potencial de aplicação em fundações profundas. A amostra de solo foi coletada a 12,0 m de profundidade a partir do nível do terreno em uma obra de edifício alto localizada em Fortaleza-CE, posição previamente classificada como camada laterítica com base em sondagens mistas. Foram realizados ensaios de caracterização, compactação, determinação das relações sílica-alumina e sílica-sesquióxidos conforme a DNER 030 (DNER, 1994). Os resultados confirmaram a classificação expedita de campo e contribuíram para reduzir incertezas na interpretação do comportamento geotécnico dessas camadas.

PALAVRAS-CHAVE: Formação Barreiras; Solo laterítico; Fundações; Classificação; Sondagens mistas.

ABSTRACT: The Barreiras Formation extends along a large portion of the Brazilian coastline and consists of a heterogeneous sedimentary cover, with interbedded layers of claystones, siltstones, and sandstones, frequently associated with horizons hardened by ferruginous cementation and with the presence of lateritic soils in the upper portions (Santos Júnior *et al.*, 2015). Although these materials have been studied since the 1980s, mainly for application in highway works (Nogami; Villibor, 1981), research focused on their use in foundation projects remains limited, with the studies by Décourt (1999) and Décourt *et al.* (2016) standing out. In this context, the present study aims to characterize lateritic soil samples from the Barreiras Formation, evaluating their potential application in deep foundations. The soil sample was collected at a depth of 12.0 m below ground level at the construction site of a high-rise building located in Fortaleza, Ceará, at a position previously classified as a lateritic layer based on mixed borehole investigations. Characterization and compaction tests were carried out, as well as the determination of the silica–alumina and silica–sesquioxide ratios in accordance with DNER 030 (DNER, 1994). The results confirmed the preliminary field classification and contributed to reducing uncertainties in the interpretation of the geotechnical behavior of these layers.

KEYWORDS: Formação Berreiras; Lateritic soil; Foundations; Classification; Mixed borehole investigations.

1 INTRODUÇÃO

A Formação Barreiras constitui uma das mais extensas unidades sedimentares da margem continental brasileira, ocorrendo de forma praticamente contínua ao longo do litoral do Nordeste e parte do Sudeste. Trata-se de uma cobertura de idade predominantemente miocênica a pliocênica, composta por depósitos fluviais e flúvio-marinhos submetidos, ao longo do tempo geológico, a intensos processos de intemperismo químico sob clima tropical úmido. Esse contexto favoreceu o desenvolvimento de horizontes lateríticos enriquecidos em óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, frequentemente associados à cimentação ferruginosa e à formação de estruturas pedogenéticas complexas.

Do ponto de vista geotécnico, os solos tropicais evoluídos apresentam comportamento distinto daquele observado em solos sedimentares jovens de clima temperado. Conforme discutido por Nogami e Villibor (1981), os sistemas classificatórios tradicionais, baseados essencialmente em granulometria e plasticidade, mostram-se frequentemente insuficientes para representar adequadamente o comportamento mecânico desses materiais, uma vez que não capturam o efeito da estruturação e da cimentação interna. Essa limitação torna-se particularmente relevante quando tais solos são empregados como elementos de suporte em obras de fundações.

Embora os solos da Formação Barreiras tenham sido amplamente investigados para aplicações rodoviárias e para uso como materiais de empréstimo, sua caracterização sob a perspectiva do desempenho em fundações profundas ainda é relativamente pouco explorada. Estudos conduzidos por Décourt (2016) ressaltam que solos estruturados podem apresentar rigidez inicial elevada e resistência de ponta superior à estimada por correlações convencionais com o SPT, sobretudo quando há contribuição significativa da cimentação pedogenética. Nesse contexto, a correta identificação do grau de laterização passa a ser fundamental para reduzir incertezas de projeto.

O presente estudo tem como objetivo caracterizar geotécnica e quimicamente uma amostra de solo da Formação Barreiras coletada a 12,0 m de profundidade em obra de edifício alto localizada em Fortaleza-CE, avaliando seu grau de laterização e discutindo implicações para o comportamento em fundações profundas.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 Contexto Geológico da Formação Barreiras

A Formação Barreiras constitui uma das principais unidades sedimentares da margem continental brasileira, distribuindo-se de forma extensa ao longo do litoral do Nordeste e parte do Sudeste do país, como ilustrado na figura 1, a seguir. Essa unidade é atribuída ao Mioceno-Plioceno e caracteriza-se por depósitos continentais predominantemente fluviais e flúvio-marinhos, compostos por intercalações de argilitos, siltitos e arenitos, frequentemente apresentando variações laterais e verticais significativas (Santos Júnior *et al.*, 2015).

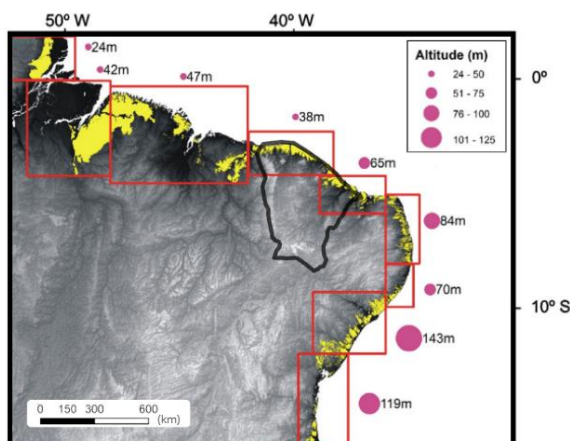


Figura 1. Distribuição das camadas do Oligo-Mioceno e do Mioceno (áreas amarelas) ao longo da margem continental do Brasil com suas respectivas altitudes.

A heterogeneidade litológica da Formação Barreiras reflete condições deposicionais variáveis e episódios de retrabalhamento sedimentar associados a oscilações climáticas e eustáticas. Em regiões litorâneas do Nordeste, como Fortaleza-CE, essa unidade encontra-se recoberta por solos fortemente intemperizados, nos quais processos pedogenéticos tropicais atuaram de forma intensa, promovendo a transformação mineralógica e a reorganização estrutural do material original (Bigarella, Becker e Santos, 2003).

Do ponto de vista geotécnico, a relevância dessa formação está associada à presença de camadas endurecidas por cimentação ferruginosa e horizontes lateríticos estruturados, que podem ocorrer em diferentes profundidades e influenciar diretamente o desempenho de fundações profundas. A variabilidade estratigráfica e o grau de intemperismo tornam necessária uma caracterização integrada, que vá além da simples descrição litológica.

2.2 Processos de Laterização

A laterização é um processo pedogenético típico de regiões tropicais úmidas, caracterizado por intenso intemperismo químico e forte lixiviação de sílica, resultando no enriquecimento residual em óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Segundo Tardy (1997), sob condições de elevada pluviosidade e temperaturas médias altas, ocorre dissolução progressiva dos silicatos primários, com remoção da sílica em solução e concentração relativa de sesquióxidos.

Esse processo conduz à formação de horizontes lateríticos, nos quais partículas finas se encontram agregadas por cimentação ferruginosa, conferindo ao solo estrutura estável e comportamento distinto daquele observado em solos sedimentares pouco evoluídos. Nogami e Villibor (1981) destacam que solos lateríticos não devem ser interpretados apenas como argilas de alta plasticidade, pois seu comportamento mecânico é fortemente influenciado pela estrutura pedogenética e pela presença de ligações interparticulares associadas a óxidos de ferro.

A intensidade da laterização depende de fatores como drenagem, posição topográfica, mineralogia original e tempo de exposição ao intemperismo. Em depósitos da Formação Barreiras, a combinação entre material sedimentar pré-existente e condições climáticas tropicais favoreceu a formação de perfis evoluídos, com transição gradual entre material saprolítico e horizontes lateríticos estruturados.

2.3 Classificação Geotécnica de Solos Tropicais

Os sistemas tradicionais de classificação geotécnica, como o *Unified Soil Classification System* (SUCS) e o *Transportation Research Board* (TRB) de acordo com USACE (1953) e HRB (1945), baseiam-se predominantemente na distribuição granulométrica e nos limites de consistência. Embora amplamente consolidados na prática da engenharia geotécnica, tais sistemas não incorporam explicitamente parâmetros relacionados à evolução pedogenética ou à estrutura interna do solo, podendo, portanto, não representar adequadamente o comportamento de solos tropicais altamente intemperizados (Nogami e Villibor, 1981).

Em solos desenvolvidos sob clima tropical úmido, como aqueles associados à Formação Barreiras, a presença de cimentação por óxidos de ferro e alumínio pode conferir comportamento mecânico distinto daquele esperado com base apenas em índices físicos convencionais. Assim, um solo classificado como argiloso de média plasticidade segundo o SUCS pode apresentar rigidez e resistência superiores devido à estruturação interna.

Diante dessas limitações, a caracterização geotécnica de solos tropicais pode ser aprimorada por meio da integração entre parâmetros físicos tradicionais e indicadores químicos de laterização, como as relações sílica-alumina (K_i) e sílica-sesquióxidos (K_r), determinadas conforme a norma DNER-ME 030 (DNER, 1994). Essa abordagem permite avaliar simultaneamente o comportamento granulométrico e o grau de evolução pedogenética, fornecendo base mais consistente para interpretação do desempenho geotécnico, especialmente em aplicações envolvendo fundações profundas.

2.4 Indicadores Químicos de Laterização

A avaliação do grau de laterização pode ser realizada por meio de indicadores químicos que relacionam os teores de sílica, alumina e óxidos de ferro presentes no solo. Entre os parâmetros mais utilizados destacam-se a relação molecular sílica-alumina (K_i) e a relação sílica-sesquióxidos (K_r), determinadas conforme procedimentos estabelecidos pelo DNER (1994).

Valores reduzidos de K_i indicam maior grau de dessilicificação e, portanto, estágio mais avançado de intemperismo. De forma semelhante, valores baixos de K_r refletem maior concentração relativa de sesquióxidos de ferro e alumínio, característica típica de solos fortemente laterizados (Tardy, 1997).

A utilização desses índices permite integrar a caracterização geoquímica à análise geotécnica, contribuindo para uma interpretação mais abrangente do comportamento do solo. Em materiais da Formação Barreiras submetidos a intenso intemperismo tropical, tais indicadores são particularmente relevantes, pois evidenciam processos que não são capturados por ensaios físicos convencionais.

2.5 Comportamento Geotécnico

O comportamento geotécnico de solos lateríticos é fortemente influenciado pela estrutura interna desenvolvida durante o processo de laterização. A presença de ligações interparticulares associadas a óxidos de ferro pode conferir elevada rigidez inicial e resistência aparente superior à prevista por modelos baseados apenas em parâmetros granulométricos (Nogami, Villibor, 1981).

Décourt (1999) destaca que solos estruturados podem apresentar resposta tensão-deformação marcada por comportamento inicialmente elástico-rígido, seguido de ruptura relativamente abrupta quando ocorre degradação da estrutura. Em fundações profundas, essa característica pode resultar em valores de resistência de ponta superiores aos estimados por correlações empíricas baseadas exclusivamente no SPT, especialmente quando a estrutura pedogenética permanece íntegra.

Entretanto, a perda de estrutura por amolgamento, saturação ou carregamentos elevados pode reduzir significativamente a resistência e alterar o comportamento deformacional. Assim, a correta identificação do grau de laterização e da presença de cimentação é fundamental para interpretação adequada dos parâmetros de projeto e para redução das incertezas associadas ao dimensionamento de fundações em regiões de ocorrência da Formação Barreiras.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada consistiu na caracterização física, mecânica e química de amostra representativa de solo da Formação Barreiras coletada em obra de edifício alto localizada na região litorânea de Fortaleza, no estado do Ceará, aproximadamente nas coordenadas 3,72333° S e 38,50519° W. A amostra foi obtida a 12,0 m de profundidade em relação ao nível do terreno natural, em camada previamente identificada em sondagens mistas como horizonte de possível comportamento laterítico, como ilustrado na figura 2, a seguir.

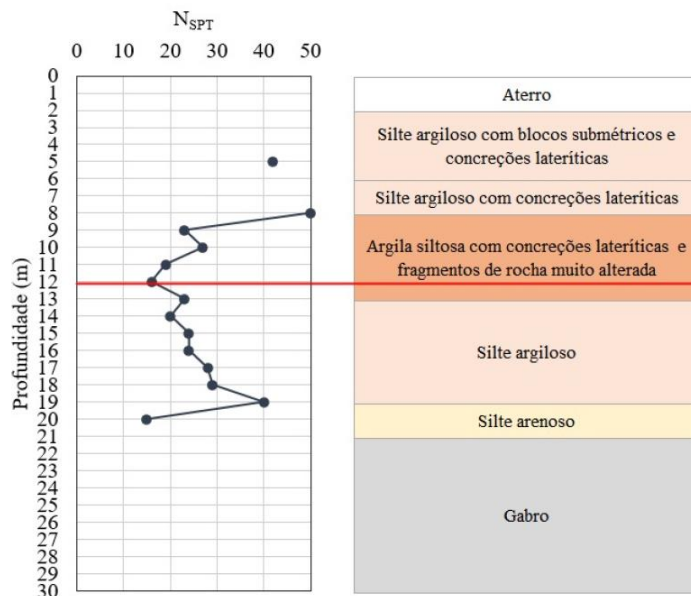


Figura 2. Resumo do relatório de sondagem mista | SE-07 (adaptado de Fundsolo, 2024).

Após a coleta, o material foi encaminhado ao laboratório e submetido aos procedimentos de preparação conforme a NBR 6457 (ABNT, 2025). Inicialmente, foram realizados ensaios de caracterização geotécnica convencional, compreendendo análise granulométrica por peneiramento e sedimentação conforme a NBR 7181 (ABNT, 2025), determinação do limite de liquidez segundo a NBR 6459 (ABNT, 2025) e limite de plasticidade conforme a NBR 7180 (ABNT, 2025). A partir desses resultados, foi determinado o índice de plasticidade (IP) e realizada a classificação do solo segundo os sistemas SUCS e TRB.

Foi determinada ainda a densidade real dos grãos, conforme a norma NBR 6458 (ABNT, 2025), parâmetro necessário para análise do comportamento físico do material. Com base nos resultados granulométricos e índices de consistência, avaliou-se preliminarmente a natureza textural e o grau de plasticidade do solo.

Com o objetivo de investigar o comportamento mecânico sob diferentes condições de umidade, realizaram-se dois ensaios de compactação com energia Proctor normal, conforme a NBR 7182 (ABNT, 2016). A partir das curvas de compactação obtidas, determinaram-se a umidade ótima (w_{ot}) e a massa específica aparente seca máxima ($\gamma_{d,máx}$). Utilizando-se os três primeiros pontos do ramo seco das curvas, foi calculado o índice de laterização (L) proposto por Ignatius (1991), empregando-se a variação do peso específico seco ($\Delta\gamma_d$) e do teor de umidade (Δw), conforme equação específica do método.

Para avaliação do grau de laterização sob o ponto de vista químico, foram determinadas as porcentagens de sílica (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), segundo os procedimentos estabelecidos na norma DNER-ME 030 (DNER, 1994), com alguns dos materiais utilizados apresentados na figura 3, a seguir. A partir desses resultados, calcularam-se as relações moleculares sílica-alumina (K_i) e sílica-sesquióxidos (K_r), amplamente empregadas na identificação de solos lateríticos.



Figura 3. Soluções utilizadas para as determinações.

Por fim, procedeu-se à análise integrada dos resultados físicos, mecânicos e químicos, permitindo avaliar o grau de laterização do material e discutir suas implicações para aplicação em fundações profundas em depósitos da Formação Barreiras.

4 RESULTADOS

Os ensaios de caracterização indicaram que o solo coletado a 12,0 m de profundidade apresenta predominância de frações granulares, com elevados teores de pedregulho e areia, além de conteúdo moderado de finos. Os limites de consistência resultaram em $LL = 30\%$, $LP = 18,47\%$ e $IP = 11,53\%$, indicando plasticidade média. A densidade real dos grãos foi de $2,62 \text{ g/cm}^3$. Pelos sistemas tradicionais, o material foi classificado como SC pelo SUCS e A-2-6 pelo TRB, caracterizando-o como solo granular com presença de finos argilosos.

Foram realizados dois ensaios de compactação com energia Proctor normal, obtendo-se valores de $\gamma_{d,m\acute{a}x}$ entre $1,83 \text{ g/cm}^3$ e $1,86 \text{ g/cm}^3$ e umidade ótima próxima de 17% , conforme apresentado nos gráficos das figuras 4(a) e 4(b). A aplicação do índice de laterização proposto por Ignatius resultou em $L = 0,61$ e $L = 0,49$, valores superiores ao limite de $0,30$, comprovando valores admitidos para solos lateríticos.

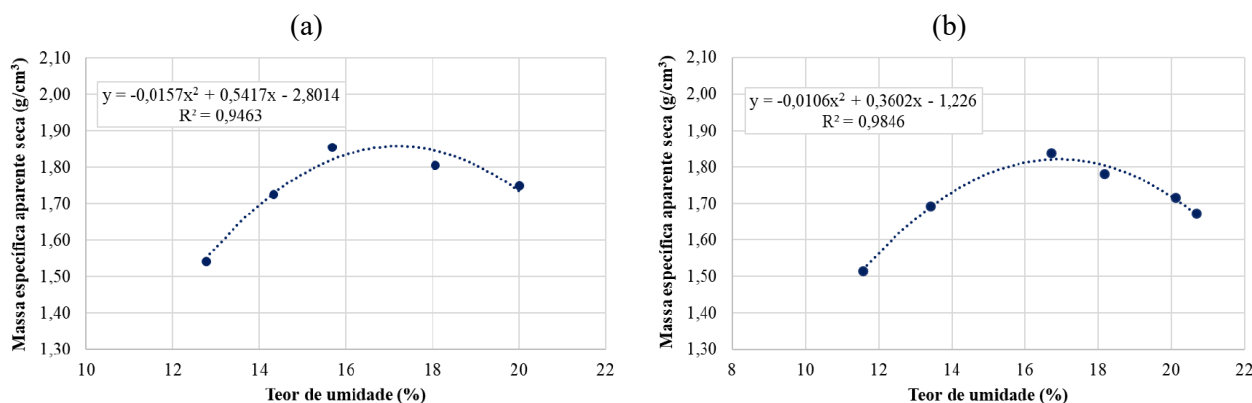


Figura 4. Curvas de compactação: (a) Ensaio 01 e (b) Ensaio 02.

A análise química realizada, conforme a norma DNER-ME 030 (DNER, 1994), indicou valores médios de $K_i \approx 1,17$ e $K_r \approx 0,97$. De acordo com os critérios de Vargas (1977), valores de K_r inferiores a 2 caracterizam solos lateríticos. Os baixos valores obtidos evidenciam elevado grau de intemperismo, com concentração relativa de sesquióxidos, confirmando o estágio avançado de laterização do material.

5 CONCLUSÕES

A partir dos ensaios de caracterização geotécnica convencionais, o solo foi classificado como SC pelo SUCS e como A-2-6 pelo sistema TRB. Essa classificação evidencia um material granular com teor significativo de finos plásticos, condição típica de depósitos sedimentares da Formação Barreiras submetidos a processos tropicais de alteração.

Entretanto, a classificação tradicional não é suficiente para identificar o comportamento laterítico do material, uma vez que esses sistemas baseiam-se fundamentalmente em granulometria e plasticidade. A avaliação química, realizada segundo a norma DNER-ME 030 (1994), resultou em valores de K_r inferiores a 2 e índices K_i de 1,18 e 1,16. Conforme discutido por Vargas (1977), valores de K_r menores que 2 são indicativos de solos lateríticos, refletindo elevado grau de

concentração relativa de sesquióxidos. Medina (1974) destaca que tais relações moleculares evidenciam estágio avançado de evolução pedogenética, associado a estruturação característica de solos tropicais altamente intemperizados.

Complementarmente, a aplicação do índice de laterização (L), conforme metodologia proposta por Ignatius (1991), permitiu avaliar o comportamento do material sob o ponto de vista mecânico-estrutural. Os valores obtidos, superiores a 0,3 em ambos os ensaios, enquadram o solo como laterítico segundo o critério estabelecido pelo autor.

A análise integrada dos resultados físicos, químicos e mecânicos confirma que, embora classificado como areia argilosa pelos sistemas convencionais, o solo apresenta comportamento tipicamente laterítico. Esse resultado reforça a importância da utilização de métodos complementares de caracterização em solos tropicais, especialmente quando destinados à aplicação em fundações, nas quais o grau de estruturação pode influenciar significativamente a resposta geotécnica do maciço.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Modelagem Geotécnica (LMG) e Grupo de Pesquisa em Geotecnia e Infraestrutura de Transportes (GPGeo) do Instituto Federal do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza, pelo suporte técnico prestado ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7181. Solo — Análise granulométrica. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 6459. Solo — Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7180. Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 6458. Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7182. Solo — Ensaio de compactação. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). DNER-ME 030. Solos — Determinação das relações sílica-alumina e sílica-sesquióxidos. Rio de Janeiro.
- Bigarella, J.J.; Becker, R.D.; Santos, G.F. (2003). Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. Florianópolis: Editora da UFSC.
- Décourt, L. *et al.* (2016). 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. p. 547–551.
- Highway Research Board. Classification of Highway Subgrade Materials. *Proceedings of the 25th Annual Meeting of the Highway Research Board*, Vol. 25, pp. 376-392. Washington, D.C. 1945.
- Ignatius, S.G. (1991). Laterite soil classification using compaction characteristics. Transportation Research Record.
- Medina, J. (1974). Mecânica dos solos tropicais. Rio de Janeiro: LTC.
- Nogami, J.S.; Villibor, D.F. (1981). Pavimentação com solos lateríticos. São Paulo: Associação Brasileira de Pavimentação.
- Santos Júnior, E.A.; et al. (2015). Caracterização geológica e geotécnica da Formação Barreiras no Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia.
- Tardy, Y. (1997). Petrology of laterites and tropical soils. Rotterdam: A.A. Balkema.

XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF



U.S. Army Corps of Engineers. The Unified Soil Classification System. *Technical Memorandum No. 3-357*,
Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi. 1953.

Vargas, M. (1977). Introdução à mecânica dos solos. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil.

Fundsolo (2024). Relatório de sondagem mista - SE-07. Fortaleza.