

Variabilidade espacial das propriedades mecânicas de sedimentos da Formação Barreiras do litoral leste do nordeste brasileiro

Spatial variability of the mechanical properties of sediments from the Barreiras Formation on the eastern coast of northeastern Brazil

Pedro Júlio Castro dos Santos¹; Olavo Francisco dos Santos Júnior²; Marial del Pilar Durante Ingunza³

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPCIVAM), Natal/RN, Brasil. Email: pedro.julio0820@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0940-0215>

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPCIVAM), Natal/RN, Brasil. Email: olavo.santos@ufn.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7552-6646>

³ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPCIVAM), Natal/RN, Brasil. Email: maria.ingunza@ufn.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6994-7559>

Resumo: A Formação Barreiras constitui uma das unidades geológicas mais relevantes do litoral nordeste brasileiro, sendo amplamente utilizada como suporte natural de fundações, taludes e encostas. Entretanto, sua heterogeneidade litológica e a presença variável de diferentes minerais conferem elevada variabilidade geotécnica, exigindo compreensão detalhada de seu comportamento mecânico para aplicações em engenharia. Este estudo tem como objetivo quantificar e comparar o comportamento mecânico de solos da Formação Barreiras provenientes de distintos contextos geotécnicos e geomorfológicos, bem como correlacionar a presença de óxidos de ferro com propriedades físicas e mecânicas, incluindo granulometria, compressibilidade, permeabilidade e resistência ao cisalhamento. Foram investigadas amostras de Bananeiras/PB, Caaporã/PB, Natal/RN e Tibau do Sul/RN. A metodologia envolveu ensaios de caracterização física, análises químicas e mineralógicas por FRX e DRX, além de ensaios de compactação, adensamento unidimensional, permeabilidade e compressão triaxial CU. Os resultados evidenciaram diferenças no comportamento mecânico dos solos analisados. O material de Bananeiras/PB apresentou elevado teor de óxidos de ferro, associado a alta coesão, baixa permeabilidade e comportamento sobreadensado. O solo de Caaporã/PB destacou-se pelo maior teor de argila, elevada tensão de pré-adensamento e resistência predominantemente friccional. Já os solos de Natal/RN e Tibau do Sul/RN apresentaram maior fração arenosa, maior permeabilidade e menor resistência ao cisalhamento, indicando estruturas menos cimentadas e mais suscetíveis à deformação.

Palavras-chave: Compressão triaxial; Granulometria; Adensamento; Permeabilidade; Químicas e mineralógicas; Óxidos de ferro.

Abstract: The Barreiras Formation constitutes one of the most relevant geological units along the northeastern Brazilian coast, being widely used as a natural support for foundations, slopes, and escarpments. However, its lithological heterogeneity and the variable presence of different minerals result in significant geotechnical variability, requiring a detailed understanding of its mechanical behavior for engineering applications. This study aims to quantify and compare the mechanical behavior of Barreiras Formation soils from distinct geotechnical and geomorphological contexts, as well as to correlate the presence of iron oxides with physical and mechanical properties, including grain-size distribution, compressibility, permeability, and shear strength. Soil samples were collected from Bananeiras/PB, Caaporã/PB, Natal/RN, and Tibau do Sul/RN. The methodology included physical characterization tests, mineralogical and chemical analyses by X-ray diffraction (XRD) and X-ray fluorescence (XRF), as well as compaction, one-dimensional consolidation, permeability, and consolidated undrained (CU) triaxial tests. The results revealed significant differences in the mechanical behavior of the analyzed soils. The material from Bananeiras/PB showed a high iron oxide content, associated with high cohesion, low permeability, and a pronounced overconsolidated behavior. The soil from Caaporã/PB was characterized by a higher clay content, high preconsolidation stress, and predominantly frictional strength. In contrast, the soils from Natal/RN and Tibau do Sul/RN exhibited a higher sand fraction, greater permeability, and lower shear strength, indicating less cemented structures and greater susceptibility to deformation.

Keywords: Triaxial compression; Grain size distribution; Consolidation; Permeability; Chemical and mineralogical analyses; Iron oxides.

1. Introdução

O conhecimento sobre o comportamento dos solos sempre ocupou papel central na engenharia civil e geotécnica, visto que qualquer obra depende diretamente da interação entre o solo de fundação e a estrutura implantada. Desde os primeiros estudos sistematizados por Terzaghi, no início do século XX, até os avanços contemporâneos com métodos numéricos e análises mineralógicas, a compreensão do comportamento dos solos tem se mostrado essencial para a segurança, a estabilidade e a durabilidade das construções (Wu et al., 2023; Baecher, 2023; Finno et al., 2017). A complexidade desses materiais, resultante de processos geológicos e pedogenéticos, impõe desafios constantes, demandando investigações laboratoriais e de campo capazes de quantificar parâmetros como resistência, compressibilidade e permeabilidade. Assim, destaca-se a importância de não generalizar parâmetros mecânicos de solos pertencentes a uma mesma formação geológica, que pode abranger extensas áreas de um estado, região ou país (Ku et al., 2016; Napoli et al., 2022; Rabab et al., 2024).

Uma das unidades sedimentares mais expressivas do Brasil é a Formação Barreiras, que se estende desde a região amazônica, atravessando todo o litoral norte e nordeste, até o estado do Rio de Janeiro. De idade terciária, caracteriza-se por significativa heterogeneidade textural e mineralógica, composta predominantemente por materiais clásticos de origem sedimentar, frequentemente enriquecidos por óxidos de ferro e alumínio (Nunes et al., 2011). Esses óxidos conferem colorações típicas avermelhadas ou amareladas e, em alguns casos, propriedades cimentantes que podem aumentar a rigidez e a resistência, mas, em alguns casos, podem tornar o material mais suscetível à fragilização na presença de hidróxidos de ferro, como visto em Ingunza et al. (2025), ou sob ciclos de umedecimento e secagem.

Devido à elevada variabilidade em sua constituição física e mineralógica, o termo “Barreiras” tem sido empregado na literatura geológica ora como Formação, ora como Grupo, e, anteriormente, como Série. Persistem, ainda, diversas incertezas quanto à sua caracterização geológica, especialmente no que diz respeito à idade de deposição e aos processos de gênese, o que reflete a dificuldade de consenso sobre sua denominação litoestratigráfica. Tais indefinições evidenciam lacunas de conhecimento sobre aspectos fundamentais da unidade (Moura-Fé, 2014).

A relevância da Formação Barreiras para a engenharia civil e geotécnica decorre de sua ampla distribuição e da frequência com que ocorre como suporte de fundações, taludes, falésias costeiras e encostas urbanizadas. Entretanto, sua variabilidade interna, condicionada tanto pela granulometria quanto pela mineralogia, pode resultar em comportamentos inesperados, como recalques diferenciais, dificuldades construtivas ou instabilidades, as quais têm sido observadas com maior frequência nos últimos anos ao longo do litoral nordestino, em razão da intensificação da urbanização e da erosão costeira (Santos Júnior et al., 2011; Silva et al., 2020).

Embora comumente associada às zonas litorâneas, a Formação Barreiras também se estende para áreas interioranas, como ocorre nos municípios de Caaporã/PB e Bananeiras/PB, onde os processos de intemperismo e, conseqüentemente, a espessura das camadas da formação diferem das observadas em regiões próximas à linha de praia, como Natal/RN e Tibau do Sul/RN (Barbosa et al., 2008).

Essa heterogeneidade faz com que solos pertencentes à mesma unidade geológica apresentem parâmetros mecânicos distintos, o que dificulta a generalização de resultados e reforça a necessidade de investigações geotécnicas detalhadas nos solos da Formação Barreiras no litoral leste do nordeste brasileiro. Portanto, este trabalho tem como objetivo quantificar a variabilidade espacial das propriedades mecânicas de sedimentos da Formação Barreiras do litoral leste do Nordeste brasileiro. Busca-se compreender a variabilidade das propriedades geotécnicas entre solos de quatro diferentes municípios, Bananeiras/PB, Caaporã/PB, Natal/RN e Tibau do Sul/RN.

2. Metodologia

2.1 Caracterização das áreas do estudo e coleta das amostras

A área de estudo abrange trechos do litoral leste do Nordeste brasileiro, distribuídos entre os estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte. Essa faixa litorânea caracteriza-se por um clima tipicamente tropical úmido, influenciado pela atuação dos ventos alísios e pela proximidade com o Oceano Atlântico, apresentando temperaturas médias anuais elevadas e regime pluviométrico marcado por forte sazonalidade. A vegetação predominante insere-se no domínio da Mata Atlântica e de formações litorâneas associadas, incluindo restingas, manguezais e matas de tabuleiro, compondo um ambiente ecologicamente sensível e sujeito à intensa dinâmica hidrológica (Sousa et al., 2024; Scudelari et al., 2021).

Do ponto de vista geológico, a região é amplamente marcada pela presença da Formação Barreiras, unidade sedimentar de idade Terciário–Quaternária composta por arenitos, siltitos e argilitos de origem predominantemente continental, retrabalhados por processos fluviais, marinhos e gravitacionais ao longo do tempo. Essa formação cobre grande parte dos

tabuleiros costeiros do Nordeste oriental e apresenta espessuras e graus de cimentação variados, influenciados por processos lateríticos e pela concentração de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Geomorfologicamente, predominam superfícies tabulares suavemente onduladas, falésias ativas, terraços marinhos e vales encaixados associados a bacias hidrográficas de pequeno porte. Essas características controlam a distribuição dos tipos de solo, a espessura dos perfis intempéricos e a variabilidade das condições de umidade, fatores que exercem influência direta no comportamento geotécnico dos materiais, especialmente no que se refere à erodibilidade, colapsividade e susceptibilidade à perda de resistência quando submetidos a variações de umidade (Barbosa et al., 2008).

Os locais escolhidos contemplam diferentes contextos geotécnicos e geomorfológicos, permitindo uma análise comparativa abrangente do comportamento físico-mecânico dos solos pertencentes à Formação Barreiras presentes na Paraíba e no Rio Grande do Norte. As amostras analisadas estão localizadas nos municípios de Bananeiras e Caaporã, na Paraíba, e Natal e Tibau do Sul, no Rio Grande do Norte (Figura 1).

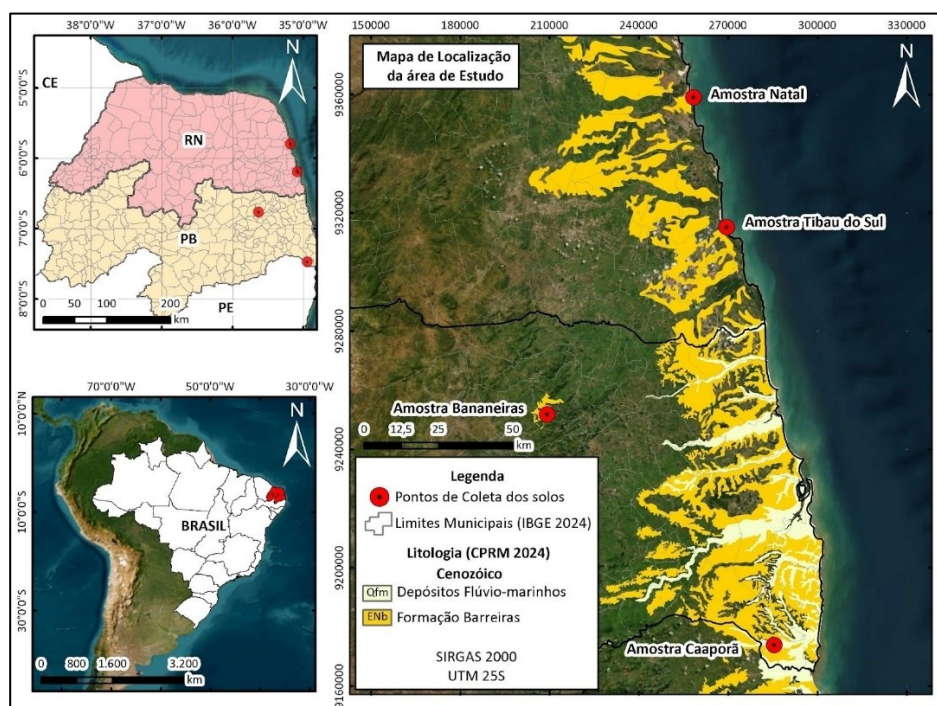


Figura 1 – Localização dos pontos de coleta e geologia.

Fonte: Autores (2026).

No município de Bananeiras/PB, a amostragem ocorreu em um talude com histórico de instabilidade. Os solos locais correspondem à Formação Barreiras, sendo constituídos predominantemente por siltitos médios, de coloração variando do branco ao avermelhado, e por arenitos argilosos mal selecionados, com intercalações conglomeráticas (Guimarães et al., 2008).

Em Caaporã/PB, o material coletado corresponde ao solo de fundação da Barragem de Cupissura. Nessa região, observa-se a presença exclusiva da Formação Barreiras como estrutura sedimentar hospedeira tanto da bacia hidráulica quanto da fundação da barragem. O barramento está localizado na bacia hidrográfica do rio Abiaí, localizado no litoral sul da Paraíba, sendo um dos principais cursos d'água da região e desempenhando papel fundamental na configuração sedimentar e ambiental do município de Caaporã/PB. O rio nasce em áreas mais elevadas do interior do estado e escoar em direção ao Oceano Atlântico, desaguando em um sistema estuarino influenciado diretamente pelo regime de marés. Ao longo de seu trajeto, atravessa diferentes unidades geológicas, incluindo áreas onde aflora a Formação Barreiras associada a sedimentos flúvio-marinhos, contribuindo para a erosão, transporte e deposição de sedimentos arenosos, siltsos e argilosos do Quaternário (CAGEPA, 2018).

Na cidade de Natal/RN, a amostragem foi realizada na praia de Areia Preta, em subsuperfície, próxima à linha de costa. O material analisado representa um solo de fundação coletado durante estudos prévios de viabilidade para implantação de

uma edificação na região, caracterizando uma condição de solo residual arenoso sujeito à influência marinha e à oscilação do lençol freático. Esses depósitos correspondem à Formação Barreiras de idade Terciário-Quaternária, recoberta por sedimentos eólicos. São compostos por arenitos praias formados a partir do retrabalhamento das falésias, com superfícies irregulares e entalhadas, encontrando-se parcialmente litificados por processos diagenéticos, associados à concentração de óxidos de ferro e material argiloso (Nunes, 2011).

Por fim, no município de Tibau do Sul/RN, o solo foi coletado no topo de uma falésia litorânea, em área sujeita à intensa ação erosiva e a processos de instabilidade gravitacional. As rochas sedimentares e os sedimentos da Formação Barreiras recobrem praticamente toda a faixa costeira da área estudada, sendo representados, da base para o topo, por rochas carbonáticas e areníticas cretácicas e terciárias da Bacia Potiguar, seguidas por depósitos areno-argilosos terciário-quaternários e culminando com acumulações quaternárias compostas por arenitos praias e sedimentos arenosos, argilosos e argilo-arenosos de ambientes fluviais, lacustres, estuarinos, dunares e praias (Severo, 2011).

As amostras indeformadas foram extraídas em blocos, de modo a preservar suas propriedades estruturais e naturais, especialmente a disposição dos poros e o grau de cimentação, aspectos fundamentais para os ensaios de compressão triaxial e adensamento unidimensional. As amostras deformadas, por sua vez, foram coletadas e acondicionadas em sacos plásticos identificados, destinadas aos ensaios de compactação e caracterização física e mineralógica. Todo o material foi devidamente catalogado, embalado e transportado ao Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), onde foram preparadas (Figura 2) pra a realização dos ensaios experimentais.

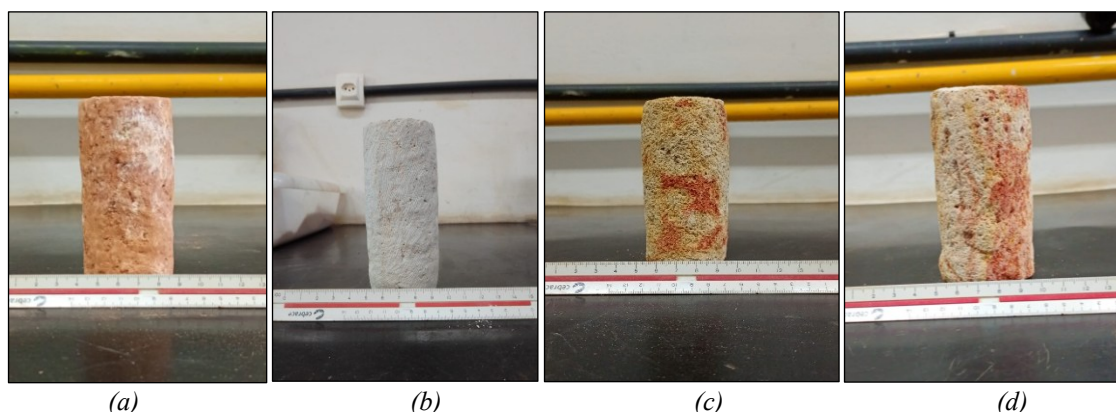


Figura 2 – Corpos de prova talhados das amostras de: (a) Bananeiras/PB; (b) Caaporã/PB; (c) Natal/RN; (d) Tibau do Sul/RN.

Fonte: Autores (2025).

2.2 Ensaios de caracterização físico-mecânica

As amostras passaram por uma bateria de ensaios laboratoriais, incluindo os ensaios de granulometria e sedimentação conjunta (NBR 6458 e NBR 7181), determinação da massa específica dos sólidos (NBR 6508), umidade natural (NBR 6457), limites de consistência, limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) (NBR 6459 e NBR 7180), e a consequente classificação dos solos segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS). Essas etapas iniciais tiveram como finalidade a caracterização física básica das amostras e a identificação preliminar de diferenças texturais e de plasticidade entre os solos analisados.

Na sequência, realizaram-se as análises mineralógicas e químicas, por meio de difratometria de raios X (DRX) e fluorescência de raios X (FRX), com o intuito de identificar os principais minerais constituintes e quantificar os teores de óxidos, especialmente os de ferro e alumínio, cuja presença pode exercer influência direta sobre o comportamento mecânico e hidráulico dos solos da Formação Barreiras.

Os ensaios mecânicos e hidráulicos complementares compreenderam o ensaio de compactação Proctor Normal (NBR 7182), adensamento unidimensional (NBR 16853), permeabilidade com parede flexível (ASTM D5084) e compressão triaxial adensado não drenado (CU) (ASTM D4767), realizados para avaliar a densidade máxima, as deformações verticais, o comportamento do fluxo de água e a resistência ao cisalhamento das amostras estudadas, respectivamente. Os ensaios de adensamento unidimensional, permeabilidade e compressão triaxial foram realizados utilizando amostras indeformadas

previamente preparadas. A escolha desses ensaios visou integrar parâmetros físicos, químicos e mecânicos, possibilitando a correlação entre propriedades texturais, mineralógicas (físicas) e respostas de deformabilidade e resistência (mecânicas).

As amostras utilizadas nos ensaios triaxiais CU foram submetidas a tensões confinantes efetivas de 50, 100, 200 e 400 kPa, registrando-se continuamente os valores de tensão desviadora ($\sigma_1 - \sigma_3$), deformação axial (ϵ_a) e poropressão (u) ao longo da etapa de cisalhamento. Para os solos com maior teor de finos, como os de Bananeiras e Caaporã, a velocidade de cisalhamento adotada foi de 0,067 mm/min, de modo a permitir uma deformação axial de 20% da altura do corpo de prova (aproximadamente 20 mm) em cerca de 5 horas de ensaio. Essa velocidade foi determinada com base no tempo t_{50} obtido durante a fase de adensamento, garantindo que o carregamento ocorresse de forma lenta o suficiente para evitar um grande escoamento da água intersticial, mantendo o comportamento não drenado, mas não tão lenta a ponto de permitir drenagem parcial, o que alteraria a condição de ensaio.

Em contrapartida, para os solos mais arenosos, correspondentes às amostras de Natal e Tibau do Sul, foi adotada uma velocidade de cisalhamento de 0,10 mm/min, resultando em um tempo total de ensaio de aproximadamente 3 horas e 30 minutos para atingir a mesma deformação axial de 20%. A partir dos resultados experimentais foram traçadas as envoltórias de resistência de Mohr-Coulomb, determinando-se os parâmetros de coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ), fundamentais para a avaliação da resistência ao cisalhamento dos solos.

Os ensaios de permeabilidade de parede flexível também foram executados no equipamento de compressão triaxial, utilizando as mesmas amostras indeformadas logo após a etapa de saturação completa. O procedimento consistiu na aplicação de diferenciais de carga hidráulica de -5 kPa, -10 kPa e -15 kPa, permitindo o escoamento de água através do corpo de prova. A passagem de água foi monitorada por meio de um medidor de volume de alta precisão, registrando-se o volume percolado em função do tempo. Para cada diferença de potencial aplicada foi calculado o coeficiente de permeabilidade (k), e a média aritmética dos três valores obtidos foi adotada como o coeficiente representativo da amostra.

3. Resultados e discussão

3.1 Caracterização física

A análise granulométrica (Figura 3) evidenciou uma expressiva variabilidade textural entre os solos das quatro localidades estudadas, refletindo as diferentes condições deposicionais e de intemperismo da Formação Barreiras. O solo proveniente de Bananeiras/PB foi classificado como silte de baixa compressibilidade (ML), com predominância da fração siltosa (62%) e presença moderada de areia média a fina (21%), o seu elevado teor de finos pode acarretar em baixos valores de permeabilidade. Em Caaporã/PB, observou-se um material de natureza intermediária entre argilosa e arenosa, classificado como argila de baixa compressibilidade (CL), composto por 45% de argila e 42% de areia, uma configuração que pode conferir ao solo comportamento coesivo moderado e elevado ângulo de atrito. O solo de Natal/RN foi enquadrado como areia argilosa (SC), contendo cerca de 45% de areia média a fina e 29% de argila, o que indica uma estrutura granular com finos suficientes para proporcionar certa coesão e reduzir a permeabilidade. Por sua vez, o solo de Tibau do Sul/RN, coletado na porção superior da falésia, foi classificado como areia siltosa (SM), apresentando 58% de areia média a fina e 23% de silte, o que pode refletir em um comportamento predominantemente friccional.

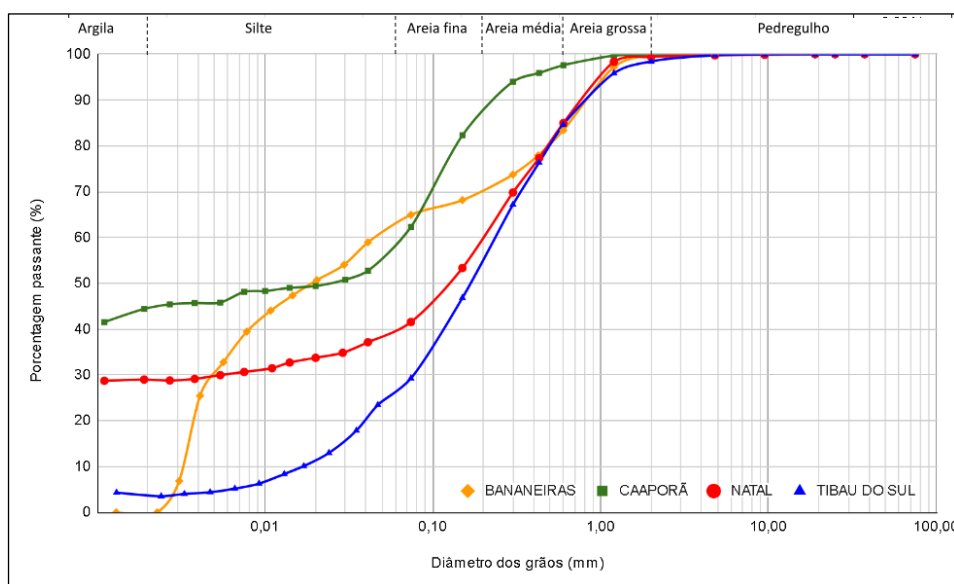


Figura 3 – Curvas granulométricas.

Fonte: Autores (2025).

No que se refere à plasticidade, o solo de Caaporã, que apresentou o maior teor de argila, também registrou o maior índice de plasticidade ($IP = 21\%$), enquanto Bananeiras, com maior teor de finos, exibiu um IP de 11% (Tabela 1). A razão entre o índice de plasticidade e o teor de argila (atividade) para o solo de Caaporã foi inferior a $0,75$, classificando-o como uma argila inativa, característica compatível com materiais caulíníticos e solos residuais de regiões tropicais, nos quais a mineralogia e o grau de intemperismo reduzem o potencial de expansão e a sensibilidade à variação de umidade.

A análise mineralógica por difratometria de raios X (DRX) (Figura 4) confirmou a presença predominante de quartzo (SiO_2) e caulinita ($Al_2Si_2O_5$) em todas as amostras, além de teores variáveis de hematita (Fe_2O_3), anatásio (TiO_2) e zircão ($ZrSiO_4$) e a possível presença de goethita ($FeO(OH)$) na amostra de Caaporã. Verificou-se, com base nos resultados de fluorescência de raios X (FRX) (Tabela 2), que os solos de Bananeiras e Tibau do Sul apresentaram maiores porcentagens de ferro, o que pode indicar, inicialmente, maior grau de cimentação por óxido de ferro e, consequentemente, maior rigidez estrutural em comparação as amostras de Caaporã e Natal.

Em contrapartida, o solo de Caaporã destacou-se por apresentar o maior teor de argila entre as amostras, indicando um grau mais avançado de alteração mineral, evidenciado pela presença de caulinita, também identificada em Bananeiras, com picos mais intensos neste último. Ademais, a menor concentração de óxidos de ferro observada em Caaporã sugere um estágio mais evoluído de decomposição dos minerais primários, que implica em uma possível redução da cimentação interparticular.

Tabela 1 – Dados da caracterização granulométrica conjunta.

	Bananeiras	Caaporã	Natal	Tibau do Sul
Pedregulho	0,2%	0,1%	0,6%	1,6%
Areia grossa	16,4%	2,3%	14,4%	13,8%
Areia média	13,4%	11,4%	26,1%	31,1%
Areia fina	7,6%	28,0%	19,2%	27,4%
Silte	62,4%	13,7%	10,7%	22,4%
Argila	0,0%	44,5%	29,0%	3,8%
LL	43%	43%	29%	30%
LP	33%	22%	21%	24%
IP	11%	21%	8%	6%
Massa específica dos sólidos (g/cm³)	2,658	2,676	2,623	2,585
Classificação SUCS	ML - Silte de Baixa Compressibilidade	CL - Argila de Baixa Compressibilidade	SC - Areia Argilosa	SM - Areia Siltosa

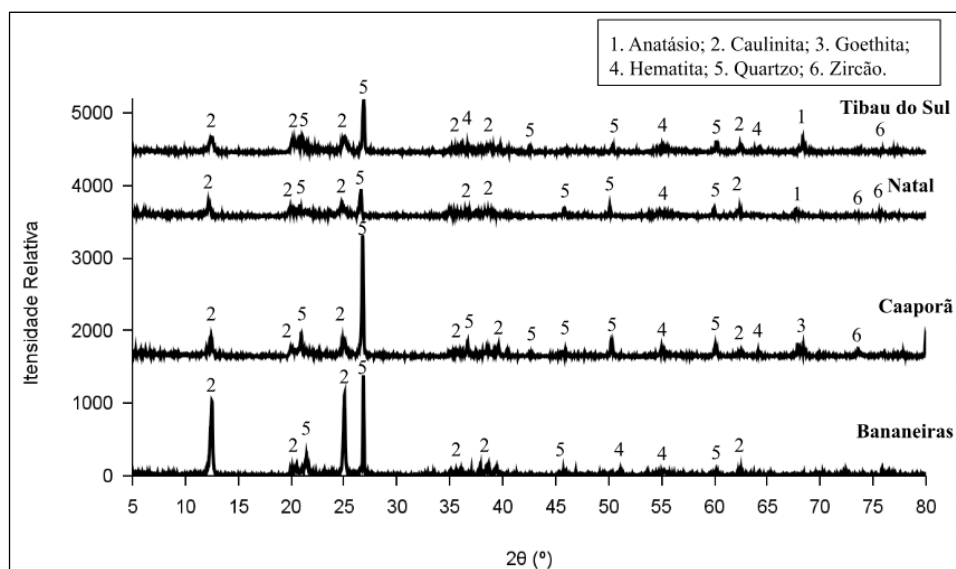
Fonte: Autores (2025).*Figura 4 – Difrátogramas de raios X.**Fonte: Autores (2025).*

Tabela 2 – Fluorescência de raios X.

Óxidos (%)	Bananeiras	Caaporã	Natal	Tibau do Sul
Fe ₂ O ₃	35,254	5,099	22,222	29,135
Al ₂ O ₃	34,229	40,590	34,477	32,821
SiO ₂	25,613	44,209	29,240	27,032
TiO ₂	2,061	2,073	6,526	3,063
ZrO ₂	2,051	4,515	6,370	6,936
SrO	0,463	0,223	-	-
K ₂ O	0,165	0,376	0,232	0,128
V ₂ O ₅	0,075	-	-	-
MnO	0,057	-	-	-
PdO	0,032	-	-	-
Ag ₂ O	-	1,717	-	-
MgO	-	1,280	-	0,756
SO ₃	-	0,070	0,032	0,027
Nb ₂ O ₅	-	-	0,441	-
Cr ₂ O ₃	-	-	0,218	0,102
Ga ₂ O ₃	-	-	0,137	-
CaO	-	-	0,104	-

Fonte: Autores (2025).

Nos solos de Caaporã, Natal, Tibau do Sul e Bananeiras foram identificados picos de hematita, confirmando a presença de óxidos de ferro evidenciada pelas análises de FRX. No solo de Bananeiras, não foram detectados picos de goethita. Em contraste, o solo de Caaporã apresentou pico de goethita, revelando uma maior diversidade nas formas cristalinas do ferro. Essa variação mineralógica pode exercer influência direta sobre o comportamento mecânico do solo, uma vez que a presença de hidróxidos de ferro pode reduzir a coesão interparticular, resultando em menor resistência ao cisalhamento, como visto em Ingunza et al. (2025). Adicionalmente, nos solos de Caaporã, Natal e Tibau do Sul foram observados picos característicos de zircão, coerentes com os teores de óxido de zircônio (ZrO₂) identificados nas análises químicas. Nos solos de Natal e Tibau do Sul, também foi constatada a presença de anatásio, forma cristalina do dióxido de titânio (TiO).

O índice de laterização (Ki) entre óxidos de silício e óxidos de alumínio desses solos indica que todas as apresentam relativo enriquecimento em alumínio, isto é, maior grau de laterização. (Tabela 3).

Tabela 3 – Índice de laterização dos solos.

Local	Ki = SiO ₂ /Al ₂ O ₃
Bananeiras/PB	0,75
Caaporã/PB	1,09
Natal/RN	0,85
Tibau do Sul/RN	0,82

Fonte: Autores (2025).

3.2 Caracterização mecânica

Nos resultados dos ensaios de compactação (Figura 5), foram obtidos valores de peso específico seco máximo variando entre 16,5 e 17,6 kN/m³, com umidades ótimas situadas na faixa de 17,2% a 19,6%. Ao correlacionar o desempenho mecânico dos ensaios com a granulometria das amostras, verificou-se que o solo de Caaporã, de textura mista entre argila e areia, obteve o maior peso específico seco máximo, enquanto o solo de Bananeiras, contendo o maior teor de finos entre as amostras, apresentou o menor valor (Tabela 4).

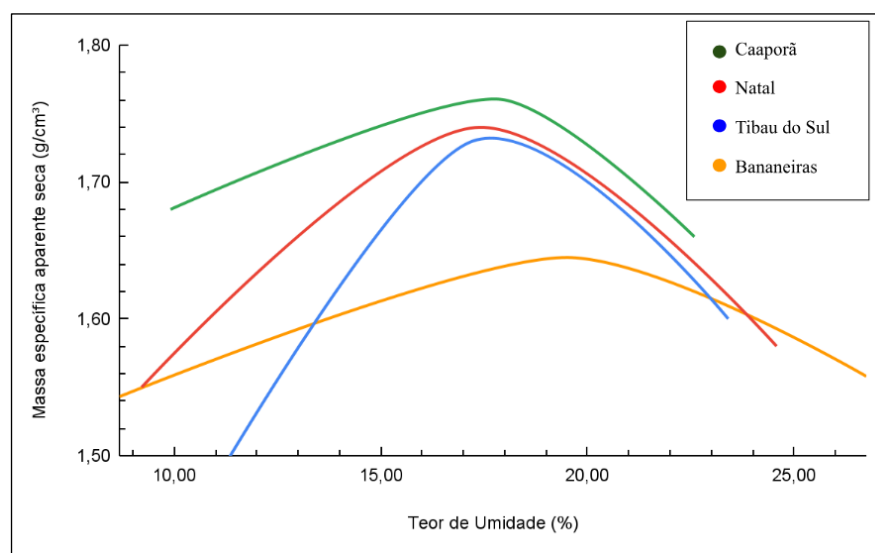


Figura 5 – Curvas dos ensaios de compactação.

Fonte: Autores (2025).

Tabela 4 – Resultados das compactações.

Local	Peso específico seco máximo (kN/m³)	Umidade ótima (%)
Bananeiras/PB	16,5	19,6
Caaporã/PB	17,6	17,7
Natal/RN	17,4	17,2
Tibau do Sul/RN	17,3	17,4

Fonte: Autores (2025).

Nos ensaios de adensamento unidimensional, a tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}) variou entre 50 e 500 kPa, sendo os maiores valores observados nas amostras de Bananeiras e Caaporã (350 e 250 kPa, respectivamente). Esse comportamento pode indicar que essas amostras se encontram em estado sobreadensado, resultado de processos de cimentação natural e endurecimento promovidos pelo intemperismo, além do recobrimento das camadas superficiais por solos mais intemperizados. Por outro lado, as amostras de Natal e Tibau do Sul apresentaram valores mais baixos de σ'_{vm} (aproximadamente 150 kPa) (Tabela 5), o que pode ser característico de solos mais suscetíveis à deformação volumétrica (Figura 6).

Tabela 5 – Dados do adensamento.

	Bananeiras	Caaporã	Natal	Tibau do Sul
σ'_{vm} (kPa)	405	410	310	205
C_c	0,23	0,35	0,18	0,36
C_R	0,05	0,08	0,05	0,06
C_s	0,05	0,06	0,02	0,02

Fonte: Autores (2025).

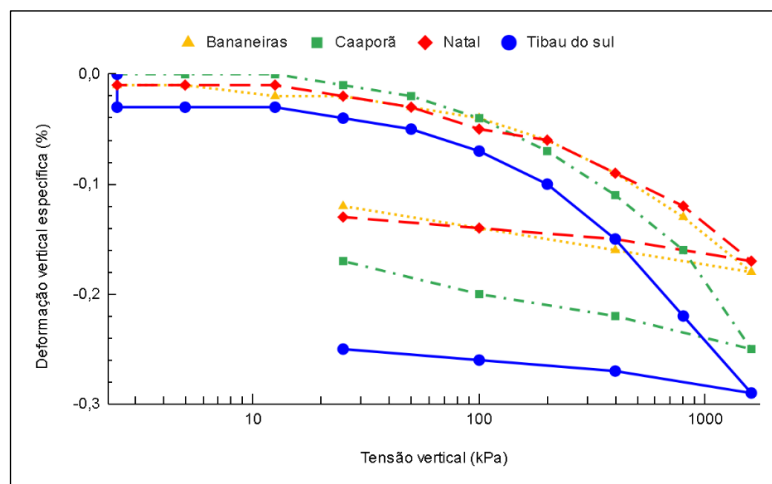
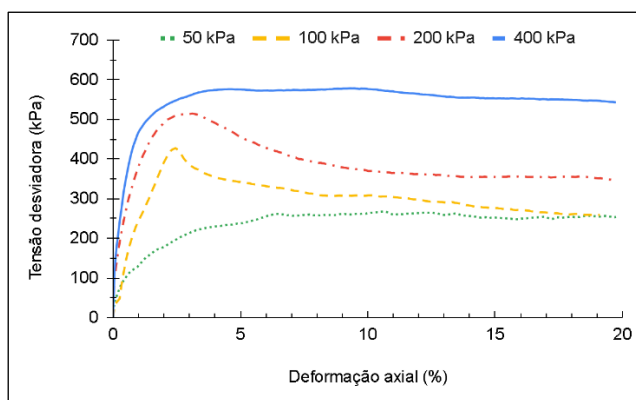


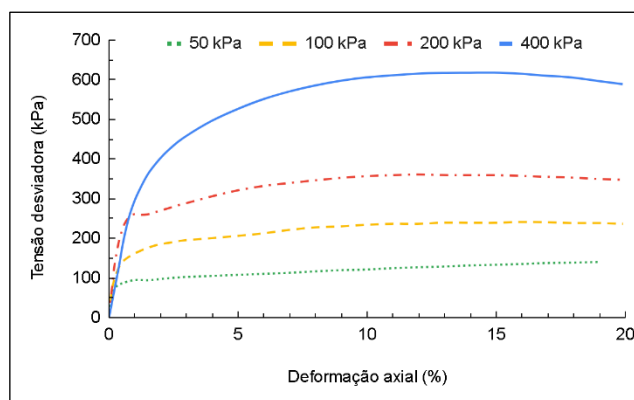
Figura 6 – Curvas deformação vertical específica $\times$ logaritmo da tensão vertical.

Fonte: Autores (2025).

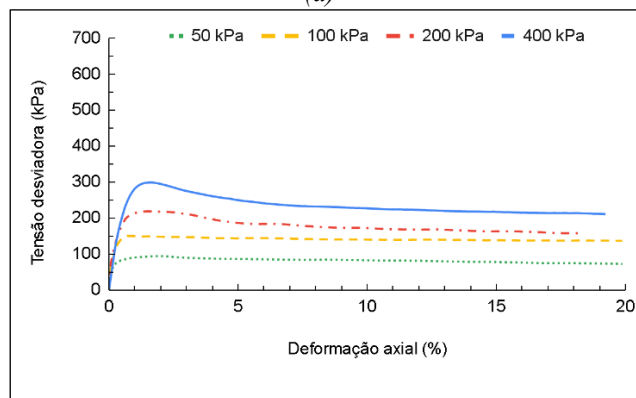
Nas curvas tensão desviadora $\times$ deformação axial dos ensaios triaxiais (Figura 7), o solo de Caaporã, cuja resposta não evidenciou picos de resistência bem definidos, apresentou as maiores tensões desviadoras entre todas as amostras, seguido de Bananeiras. Em contrapartida, os solos de Natal e Tibau do Sul exibiram comportamento mais rúptil em todos os níveis de tensão e menores valores de tensão desviadora máxima.



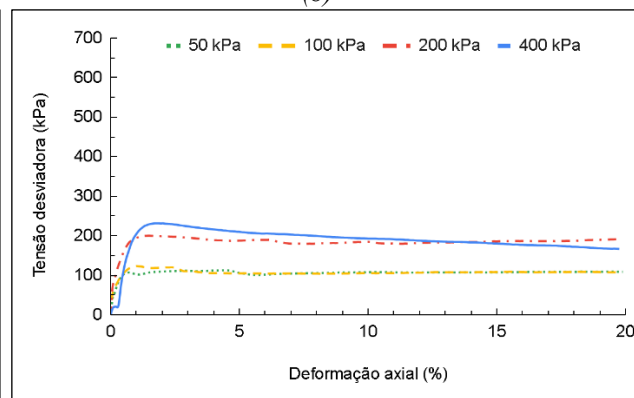
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7 – tensão desviadora x deformação axial do solo de: (a) Bananeiras/PB; (b) Caaporã/PB; (c) Natal/RN; (d) Tibau do Sul/RN.
Fonte: Autores (2025).

O solo de Bananeiras alcançou valores negativos de poropressão para todos os níveis de tensão. No solo de Caaporã, as tensões de 50 e 100 kPa também geraram poropressões negativas e não houve estabilização da poropressão no final do ensaio para ambas as tensões. As amostras de Natal e Tibau do Sul apresentaram comportamentos semelhantes entre si, com geração de poropressões positivas e eventual estabilização das poropressões no final do ensaio (Figura 8).

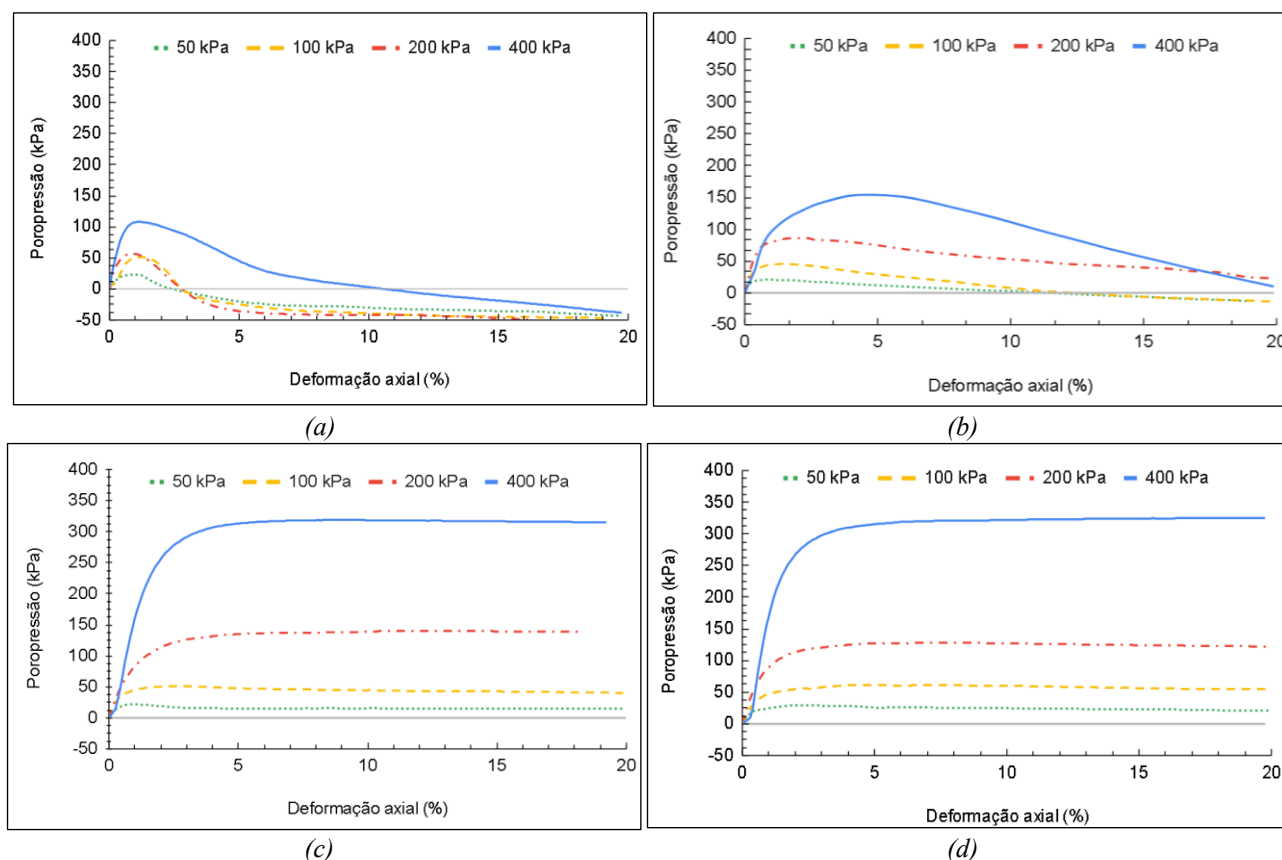


Figura 8 – Poropressão x deformação axial do solo de: (a) Bananeiras/PB; (b) Caaporã/PB; (c) Natal/RN; (d) Tibau do Sul/RN.

Fonte: Autores (2025).

A trajetória de tensões (Figura 9) revelou que os solos de Bananeiras e Caaporã mantiveram comportamento sobreadensado ($OCR > 1$), mesmo para o maior nível de tensão (400 kPa). Os solos de Natal e Tibau do Sul apresentaram transição de comportamento, passando de sobreadensados para normalmente adensados com o aumento da tensão efetiva líquida de 50 kPa para 100 kPa.

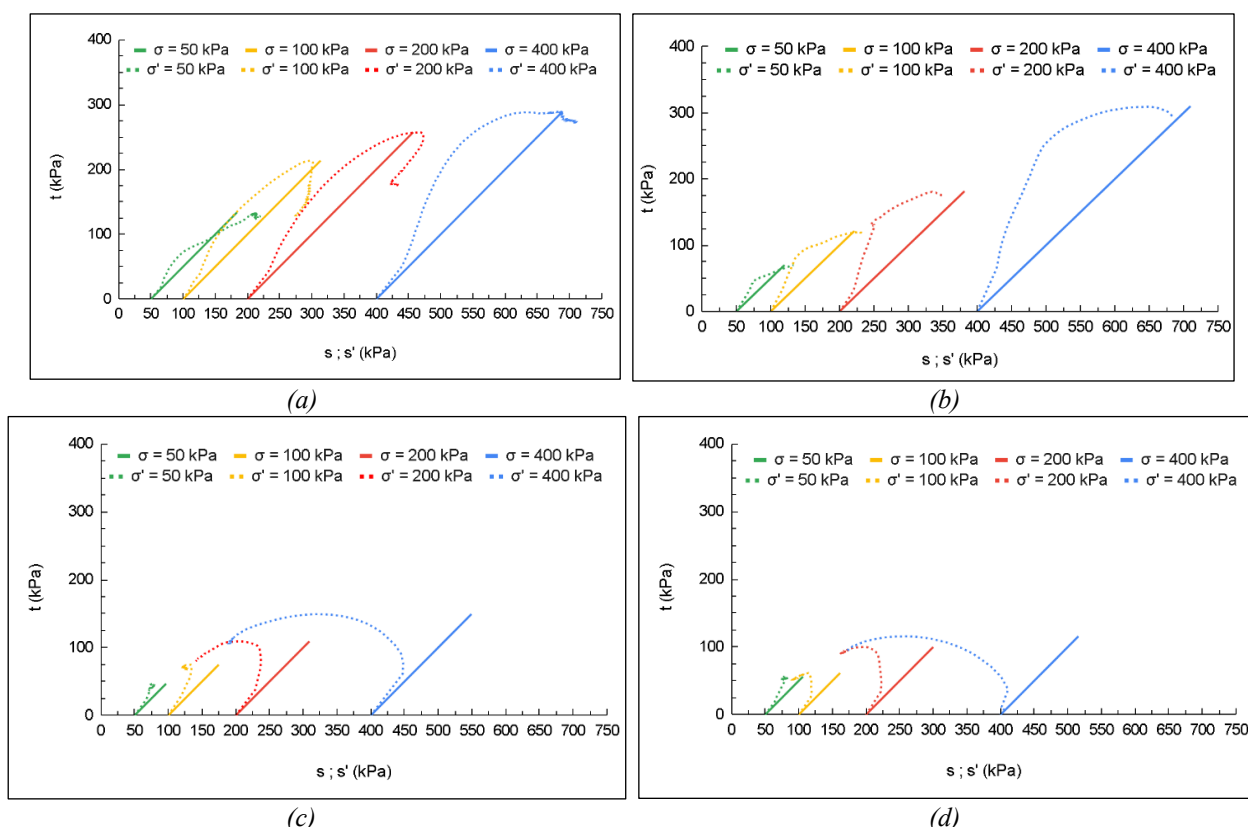
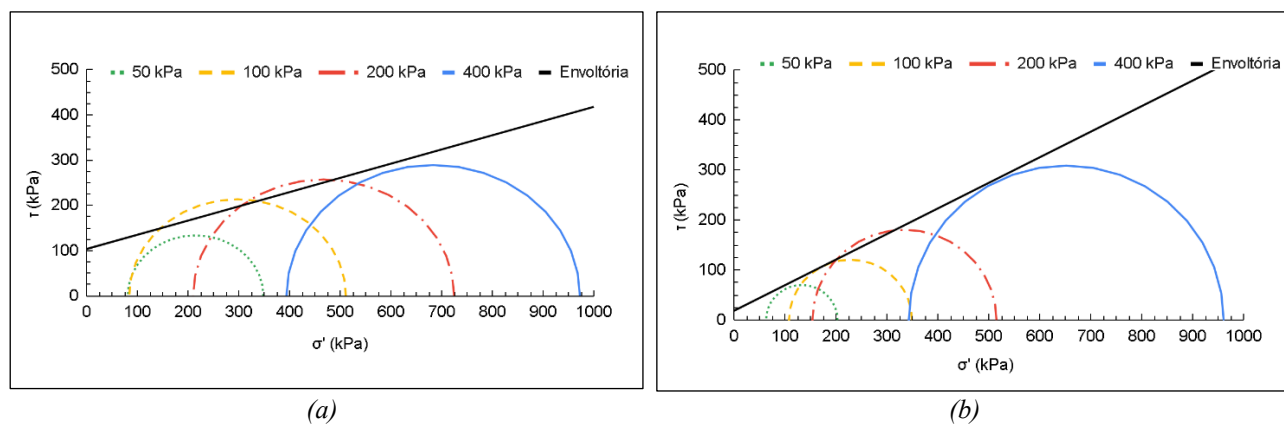


Figura 9 – Trajetória de tensões totais e efetivas das amostras de: (a) Bananeiras/PB; (b) Caaporã/PB; (c) Natal/RN; (d) Tibau do Sul/RN.
Fonte: Autores (2025).

Os diagramas $s \times t$ e as envoltórias de resistência de Mohr-Coulomb (Figura 10) indicaram ângulos de atrito interno (ϕ) variando entre 18° e 27° e coesões (c) entre 19 e 104 kPa (Tabela 6). Os valores mais elevados de coesão foram observados nas amostras com maiores teores de óxidos de ferro, notadamente a amostra de Bananeiras, que apresentou coesão de 104 kPa, cerca de 189% superior à de Tibau do Sul (36 kPa). Esses resultados confirmam a correlação entre a mineralogia ferruginosa e o ganho de resistência.



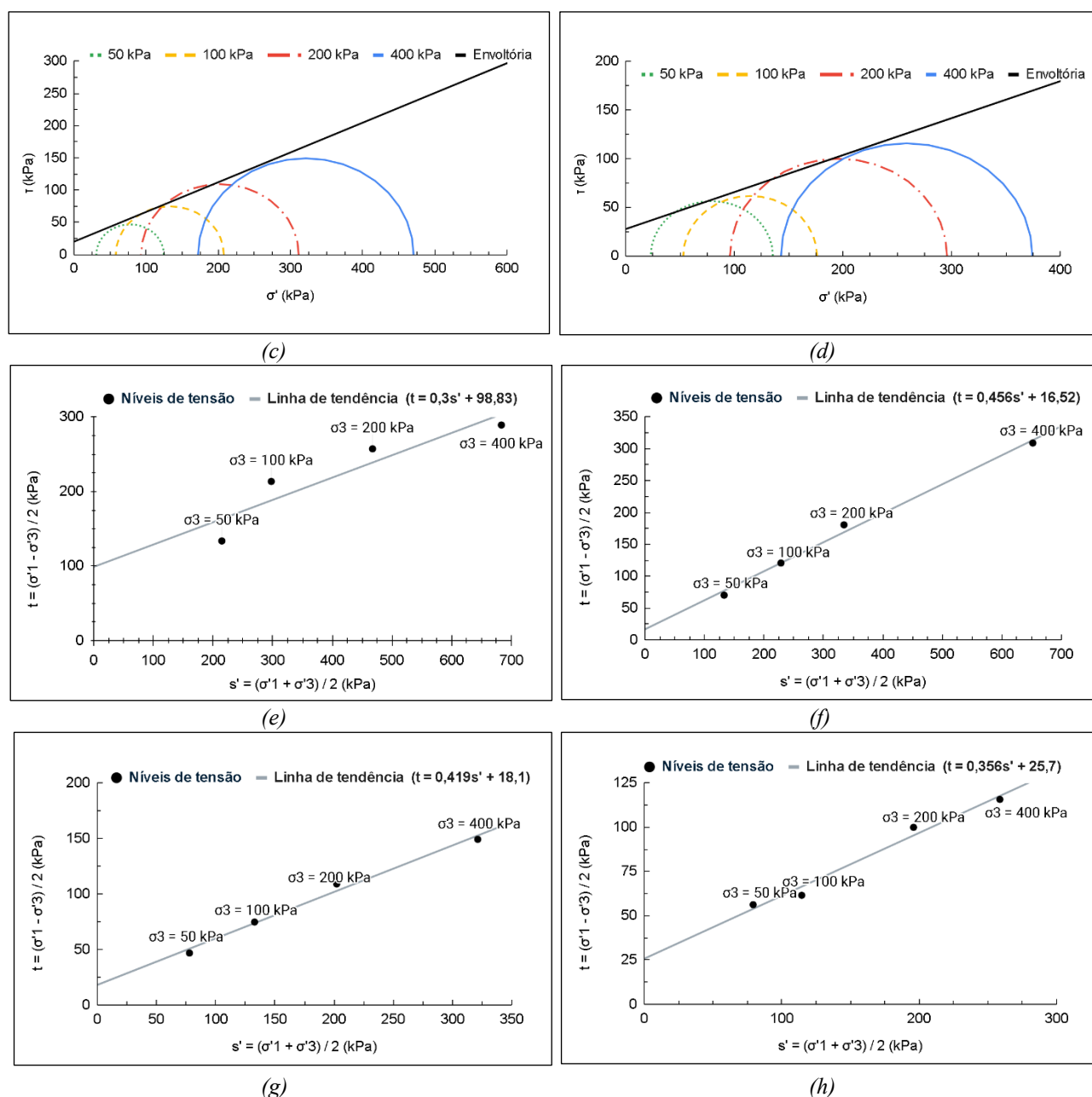


Figura 10 – Círculos de Mohr-Coulomb e envoltórias de resistência ao cisalhamento de: (a) Bananeiras/PB; (b) Caaporã/PB; (c) Natal/RN; (d) Tibau do Sul/RN; e Digramas $s' \times t$, para tensão desviadora máxima, das amostras de: (e) Bananeiras/PB; (f) Caaporã/PB; (g) Natal/RN; (h) Tibau do Sul/RN.

Fonte: Autores (2025).

Tabela 6 – Parâmetros do cisalhamento.

Local	Ângulo de atrito	Coesão
Bananeiras/PB	18°	104 kPa
Tibau do Sul/RN	19°	36 kPa
Natal/RN	25°	20 kPa

Caaporã/PB

27°

19 kPa

Fonte: Autores (2025).

A análise comparativa dos resultados revela uma tendência exponencial entre a coesão do solo e os teores de óxidos. Observa-se que o aumento do teor de óxidos de ferro está associado a um acréscimo exponencial na coesão, comportamento coerente com o papel cimentante desempenhado por esses compostos nas ligações interparticulares (Figura 11). Em contrapartida, o enriquecimento em óxido de silício (SiO₂), representativo da fração quartzosa do solo, mostra uma tendência inversa, indicando redução da resistência por coesão e intensificação da resistência por atrito entre as partículas, caso observado no solo de Caaporã.

Os ensaios de permeabilidade com parede flexível confirmaram a variação esperada entre os solos analisados: o material proveniente de Bananeiras apresentou o menor coeficiente de permeabilidade, seguido por Caaporã, Natal e Tibau do Sul (Tabela 7). Essa sequência reflete a influência direta da textura sobre a condutividade hidráulica. Solos com maiores teores de finos, como o de Bananeiras, podem apresentar estrutura mais fechada e poros de menor tamanho efetivo, reduzindo a passagem de água. Por outro lado, materiais mais arenosos, como no caso das amostras de Tibau do Sul e Areia Preta, exibem maiores coeficientes de permeabilidade devido à predominância de macroporos interconectados. Dessa forma, os resultados obtidos reforçam a correlação inversa entre a fração fina e a condutividade hidráulica formando uma linha de tendência, também exponencial, da relação entre coeficiente de permeabilidade (m/s) e teor de finos dessas amostras (%) (Figura 12).

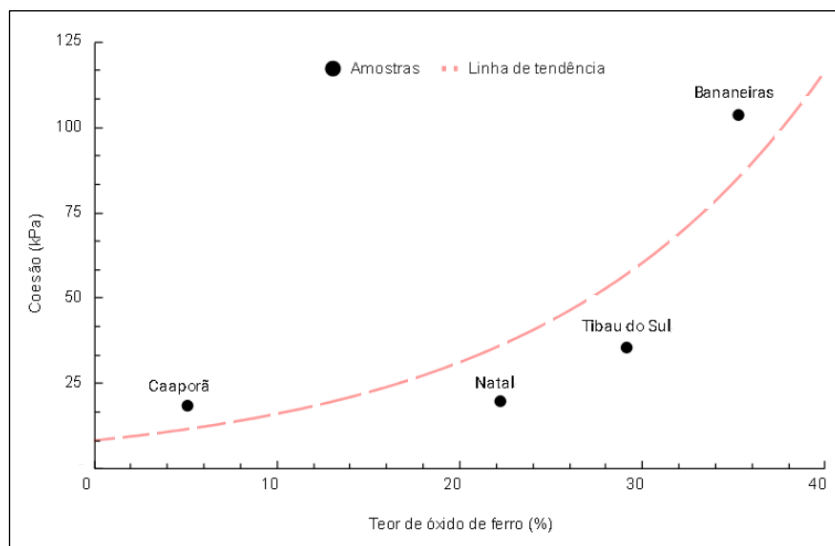


Figura 11 – Coesão (kPa) x Teores de Óxido de Ferro (%).

Fonte: Autores (2025).

Tabela 7 – Coeficientes de permeabilidade obtidos no ensaio de parede flexível.

Local	Coeficiente de Permeabilidade (m/s)
Bananeiras/PB	$1,84 \cdot 10^{-6}$
Caaporã/PB	$2,34 \cdot 10^{-5}$
Natal/RN	$2,14 \cdot 10^{-4}$
Tibau do Sul/RN	$5,18 \cdot 10^{-4}$

Fonte: Autores (2025).

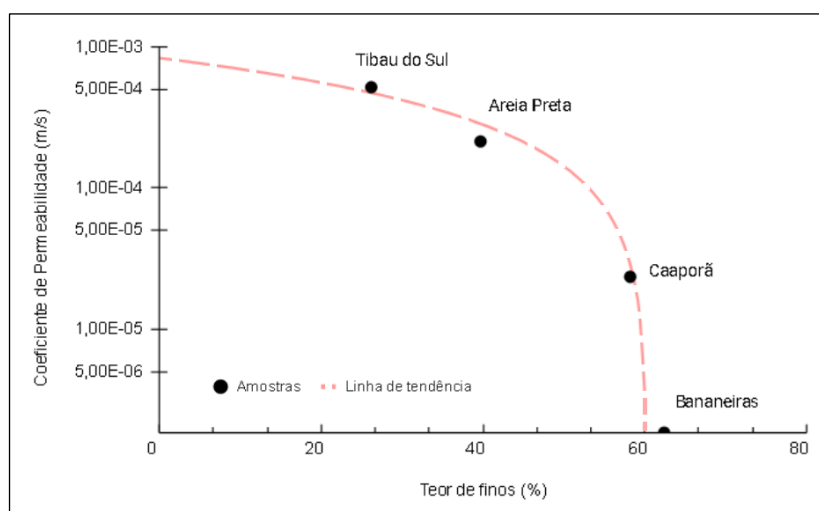


Figura 12 – Coeficiente de permeabilidade (m/s) x Teor de finos (%).
Fonte: Autores (2025).

3.3 Comentários gerais

O material de Bananeiras/PB destacou-se pela elevada fração siltosa, baixa compressibilidade e reduzida permeabilidade, além de apresentar elevados valores de coesão e resistência ao cisalhamento, atributos que podem estar associados a cimentação do ferro, mas que a granulometria, predominantemente siltosa, exerceu forte influência. O solo de Caaporã/PB, embora composto por proporções similares entre areia e argila, apresentou resposta sobreadensada, possivelmente decorrente do possível endurecimento relacionado a processos de intemperismo.

Por outro lado, as amostras provenientes de Natal/RN e Tibau do Sul/RN exibiram comportamento mais frágil e menor resistência. Ambas apresentaram tendência ao sobreadensamento em baixos níveis de tensão e resposta tipicamente normalmente adensada em tensões elevadas, com destaque para o solo de Tibau do Sul, que mostrou elevada compressibilidade nos ensaios de adensamento. Esses resultados indicam maior suscetibilidade a deformações volumétricas e ao desenvolvimento de mecanismos de ruptura sob carregamentos acima de 100 kPa, reforçando a necessidade de cautela na utilização desses materiais em campo.

Na relação entre o teor de óxidos de ferro e a resistência ao cisalhamento, verificou-se que as amostras com maior concentração desses compostos apresentaram maiores valores de coesão, corroborando o papel desses óxidos como agentes cimentantes. As análises mineralógicas (DRX), conjuntamente com os resultados químicos (FRX), confirmaram a presença de quartzo, caulinita e hematita nas amostras, além da ocorrência atípica de goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) no solo de Caaporã. A predominância desse hidróxido de ferro, associado a ambientes úmidos, pode explicar o menor valor de coesão do material, uma vez que a estrutura da goethita contém grupos hidroxila capazes de interagir facilmente com moléculas de água, favorecendo processos de umedecimento, perda de estrutura e redução da rigidez, efeito não observado de forma tão intensa na hematita (Fe_2O_3), mineral mais denso e estruturalmente estável. A influência da dinâmica fluvial no local reforça a possibilidade de formação preferencial desses hidróxidos, contribuindo para a maior instabilidade estrutural do solo.

4. Considerações finais

Os resultados obtidos confirmam que a heterogeneidade da Formação Barreiras impõe grandes desafios ao dimensionamento e à previsão de desempenho geotécnico em obras civis. A variação do ambiente de sedimentação resulta em solos com texturas, estruturas e composições mineralógicas distintas. Essa diversidade torna complexa a correlação direta entre parâmetros físicos, químicos e mecânicos, dificultando a definição de tendências generalizáveis. Assim, mesmo materiais pertencentes a uma mesma unidade geológica podem apresentar comportamentos geotécnicos diferentes, o que reforça a importância de investigações locais e detalhadas para o adequado dimensionamento de fundações, taludes, obras de contenção e sistemas de drenagem em áreas formadas por esses solos residuais.

Conclui-se, portanto, que a caracterização integrada, envolvendo aspectos físicos, químicos, mineralógicos, mecânicos e espaciais, é fundamental para a compreensão da variabilidade das propriedades mecânicas dos solos da Formação Barreiras. A pesquisa demonstrou que pequenas variações mineralógicas e texturais, reflexo da variabilidade espacial, podem resultar em diferenças expressivas do desempenho mecânico, afetando diretamente a segurança e a durabilidade das estruturas.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Referências

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16853:2020 – Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 2020.
- ABNT. NBR 6457:2024 – Amostragem e preparação de amostras de solo para ensaios de compactação e caracterização. Rio de Janeiro, 2024.
- ABNT. NBR 6458:2025 – Determinação da granulometria de solos por peneiramento. Rio de Janeiro, 2025.
- ABNT. NBR 6459:2017 – Determinação do limite de liquidez de solos. Rio de Janeiro, 2017.
- ABNT. NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.
- ABNT. NBR 7180:2016 – Determinação do limite de plasticidade de solos. Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT. NBR 7181:2018 – Análise granulométrica de solos. Rio de Janeiro, 2018.
- ABNT. NBR 7182:2016 – Ensaio de compactação de solos. Rio de Janeiro, 2016.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D4767:2020 - *Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils*. West Conshohocken, PA, 2020.
- ASTM. ASTM D5084-21 - *Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.
- BAECHER, G. B. . 2021 Terzaghi Lecture: Geotechnical Systems, Uncertainty, and Risk. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 149, n. 3, 2023. DOI: 10.1061/JGGEFK.GTENG-10201.
- BARBOSA, J. A.; LIMA FILHO, M.; NEUMANN, V.; MORAES, M.; SOUZA, E. M. Estratigrafia da faixa costeira Recife–Natal (Bacia da Paraíba e Plataforma de Natal), NE Brasil. 2008.
- CAGEPA. Estudo de Impacto Ambiental – EIA: Implantação da Barragem Cupissura, Caaporã – Paraíba. Volume I – Caracterização do meio físico. 2018. Disponível em: <https://www.cagepa.pb.gov.br/obra-barragem-cupissura/>. Acesso em: 28 de outubro de 2025.
- FINNO, R. J.; ZHANG, Y.; BUSCARNERA, G. Experimental validation of Terzaghi's effective stress principle for gassy sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 143, n. 12, 2017. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001797.
- GUIMARÃES, I. P.; BITTAR, S. M. B.; SILVA, J. M. R.; SILVA, F. M. J. V.; ARAÚJO, D. B.; ARRUDA, S. D. A.; ALCÂNTARA, V. C. Geologia da folha Solânea SB.25-Y-A-IV: escala 1:100.000. Brasília: CPRM, 2008.
- INGUNZA, M. P. D.; PEROBA, P.; ROLEMBERG, G. L. M.; SANTOS JÚNIOR, O. F. A influência da mineralogia secundária no comportamento mecânico de um solo residual granítico no semiárido brasileiro = The influence of secondary mineralogy on the mechanical behavior of a granitic residual soil in the semiarid region of Brazil. *Revista*

-
- de Geociências do Nordeste / Northeast Geosciences Journal*, v. 11, n. 2, p. 151-164, 2025. DOI: 10.21680/2447-3359.2025v11n2ID39986.
- KU, T.; MOON, S.; GUTIERREZ, B. J. Advanced application of seismic cone penetration test at complex ground conditions. *Engineering Geology*, v. 210, p. 140–147, 2016. DOI: 10.1016/j.enggeo.2016.06.009.
- MOURA-FÉ, M. M. Barreiras: série, grupo ou formação?. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 07, n. 06, p. 1055-1061, 2014.
- NAPOLI, M. L.; FESTA, A.; BARBERO, M. Practical classification of geotechnically complex formations with block-in-matrix fabrics. *Engineering Geology*, v. 301, n. 106595, 2022. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106595.
- NUNES, F. C.; SILVA, E. F.; VILAS BOAS, G. S. Grupo Barreiras: características, gênese e evidências de neotectonismo. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 31 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 194. ISSN 1678-0892).
- NUNES, L. S. Dinâmica costeira entre as praias de Areia Preta e do Forte, Natal/RN. Dissertação (Mestrado em Geografia) — Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.
- RABAB, C.; LAOUAR, M. S.; FERNANE, A.; MESSAST, S. Experimental investigation of collapsible soils under oedometric loading: effect of internal erosion. *South Florida Journal of Development*, v. 5, 2024. DOI: 10.46932/sfjdv5n9-012.
- SANTOS JÚNIOR, O. F.; SEVERO, R. N. F.; SCUDELARI, A. C.; AMARAL, R. F. PROCESSOS DE INSTABILIZAÇÃO EM FALÉSIAS: ESTUDO DE UM CASO NO NORDESTE DO BRASIL. *Geotecnia*. n. 114, [s. l], p. 71-90, 2011. DOI: 10.14195/2184-8394_114_4.
- SCUDELARI, A. C.; MATOS, M. F. A.; AMARO, V. E.; CAMARA, M. R.; CAVALCANTE, A. C. C. AVALIAÇÃO DE CURTO PRAZO DA RETRAÇÃO DAS FALÉSIAS DE TIBAU DO SUL-RN. *Revista de Geociências do Nordeste*, [S.L.], p. 202-2014, 22 set. 2021. Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN. DOI: 10.21680/2447-3359.2021v7n2ID21272.
- SEVERO, R. N. F. Caracterização geotécnica da falésia da Ponta do Pirambu em Tibau do Sul — RN considerando a influência do comportamento dos solos nos estados indeformado e cimentado artificialmente. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 04 ago. 2011.
- SILVA, B. M. F.; SANTOS JÚNIOR, O. F.; FREITAS NETO, O.; SCUDELARI, A. C. Erosão em falésias costeiras e movimentos de massa no Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 39, n. 2, p. 447–461, 17 jul. 2020. DOI: 10.5016/geociencias.v39i2.14233.
- SOUSA, A. F. N.; FRANÇA, L. R. C.; LACERDA, M. C.; BATISTA, G. S. Caracterização dos sistemas ambientais de municípios em colapso hídrico no estado da Paraíba. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 10, n. 2, 2024. DOI: 10.21680/2447-3359.2024v10n2ID36500.
- WU, W.; WANG, Z.; ZHANG, Y.; EL NAGGAR, M. H.; WU, T.; WEN, M. Semi-analytical solution for negative skin friction development on deep foundations in coastal reclamation areas. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 241, 2023. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107981.