

***Estudo do comportamento geomecânico compactado e indeformado de um solo residual tropical da Formação Barreiras em Bananeiras/PB***

***Study of the Geomechanical Behavior of a Compacted and Undisturbed Tropical Residual Soil from the Barreiras Formation in Bananeiras, PB***

Francisco Felinto de Lima Neto<sup>1</sup>, Olavo Francisco dos Santos Júnior<sup>2</sup>, Maria Del Pilar Durante Igunza<sup>3</sup>,  
Bruna Silveira Lira<sup>4</sup>, Osvaldo Freitas Neto<sup>5</sup>, Ricardo Nascimento Flores Severo<sup>6</sup>.

- 1 Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Unidade/Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, NATAL/RN, Brasil. Email: eng.franciscolima96@gmail.com..  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3737-2009>
- 2 Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Unidade/Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, NATAL/RN, Brasil. Email: olavo.santos@ufrn.br.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7552-6646>
- 3 Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Unidade/Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, NATAL/RN, Brasil. Email: maria.ingunza@ufrn.br.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6994-7559>
- 4 Universidade Federal do Piauí, Unidade/Departamento de Engenharia Civil, TERESINA/PI, Brasil. Email: brunaslira@gmail.com.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7690-3941>
- 5 Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Unidade/Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, NATAL/RN, Brasil. Email: osvaldo.neto@ufrn.br.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9488-4123>
- 6 Instituto Federal do Rio Grande do Norte, Unidade/Departamento de Engenharia Civil, NATAL/RN, Brasil. Email: ricardo.severo@ifrn.edu.br.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9568-860X>

**Resumo:** Os solos residuais tropicais da Formação Barreiras, apresentam grande variabilidade geotécnica. Este estudo teve como objetivo caracterizar um perfil de solo dessa formação no município de Bananeiras/PB, avaliando o comportamento do material nos estados indeformado e compactado, com foco na influência da compactação sobre suas propriedades mecânicas. O perfil, derivado de rocha arenítica, apresenta três camadas distintas analisadas por ensaios de granulometria, DRX, FRX, Crumb Test, permeabilidade, sucção, SPT, compressão edométrica, cisalhamento direto e triaxial. A primeira camada (AM-01), argila arenosa (CL), mostrou colapso instantâneo e baixo potencial expansivo; a segunda (AM-02), silte arenoso (ML), apresentou maior resistência e expansão; e a terceira (AM-03), argila (CL), revelou comportamento intermediário. Os resultados confirmam a heterogeneidade dos solos da Formação Barreiras e evidenciam que a compactação reduz significativamente a condutividade hidráulica e a instabilidade volumétrica, tornando o material mais estável e adequado a aplicações geotécnicas, apesar de eventuais perdas de resistência associadas à ruptura da cimentação natural.

**Palavras-chave:** Colapsibilidade; heterogeneidade; permeabilidade.

**Abstract:** The tropical residual soils of the Barreiras Formation, exhibit great geotechnical variability. This study aimed to characterize a soil profile from this formation in Bananeiras, PB, evaluating the behavior of the material in its natural and compacted states, with emphasis on the influence of compaction on its mechanical properties. The profile, derived from sandstone, comprises three distinct layers analyzed through grain size distribution, X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), Crumb Test, permeability, suction, Standard Penetration Test (SPT), oedometer compression, direct shear, and triaxial tests. The first layer (AM-01), a sandy clay (CL), exhibited instantaneous collapse and low swelling potential; the second (AM-02), a sandy silt (ML), showed higher strength and expansion; and the third (AM-03), a clay (CL), revealed intermediate behavior. The results confirm the heterogeneity of the Barreiras Formation Soils and demonstrate that compaction significantly reduces hydraulic conductivity and volumetric instability, making the material more stable and suitable for geotechnical applications, despite occasional strength losses associated with the breakdown of natural cementation.

**Keywords:** Collapsibility; heterogeneity; Permeability.

## 1. Introdução

Em regiões tropicais, existem muitos fatores propícios para o surgimento de perfis de solos residuais profundos, tais como o clima (temperatura e precipitação), o material de origem, o movimento de água (drenagem e topografia), a idade e a vegetação, são responsáveis pelo perfil do solo resultante. Devido à heterogeneidade dos solos residuais de clima tropical, cresce a importância de compreender o seu comportamento, impulsionando pesquisadores a se aprofundar e estabelecer as principais características encontradas em cada tipo de solo.

O solo residual é reconhecido por ter um comportamento consideravelmente diferente do solo sedimentar. Enquanto o solo sedimentar é formado pelo transporte e deposição, normalmente aumentando a resistência e a rigidez, o solo residual resulta do desgaste da rocha mãe, um processo que enfraquece e suaviza a resistência original (ZHANG, 2020). O entendimento e generalização do processo de formação de perfis de intemperismo de solos residuais revelam-se extremamente complexos, dificultando a correlação das propriedades do solo com sua rocha mãe (BLIGHT & LEONG, 2012).

Os solos da Formação Barreiras são derivados de rochas sedimentares, se estende nas costas litorâneas do Brasil que vai desde o Amapá até o Rio de Janeiro. Os estudos referentes a essa formação datam desde o começo do século XX, com o trabalho de Branner (1902). Desde então inúmeros autores têm se dedicado a compreender e fornecer informações precisas sobre essa formação (GUSMÃO FILHO et al., 1986; SANTOS JR, COUTINHO E SEVERO, 2015; MORAIS, SANTOS JR E FREITAS NETO, 2020; FREIRE et al., 2022).

Este estudo objetiva analisar o comportamento geomecânico de um solo proveniente de uma rocha arenítica, oriundo da Formação Barreiras do município de Bananeiras/PB. Buscando comparar os seus parâmetros físicos da matriz do solo sob os aspectos naturais e compactados.

### 1.1 Aspectos geológicos

A Formação Barreiras aflora em uma extensa área na porção leste do estado da Paraíba, principalmente na Bacia Paraíba. No interior do estado, sua ocorrência se dá próxima à Formação Serra dos Martins, apresentando semelhanças na base da formação. Bananeiras, município da Paraíba (Figura 1), possui unidade geológica com origem na Eon Cenozoica, relacionadas a sedimentos retrabalhados de outras rochas, caracterizada por ter planaltos como forma de relevo, coberturas arno-conglomeráticas ou siltico-argilosas associadas a superfícies de aplainamento. Esta unidade apresenta camadas horizontalizadas com boa homogeneidade geotécnica e hidráulica lateral, predominando sedimentos pouco consistentes, de baixa resistência ao corte e à penetração. Os solos residuais desses sedimentos siltico-argilosos destacam-se por sua alta porosidade e alto armazenamento de água (JOÃO, TEIXEIRA e FONSECA, 2016).

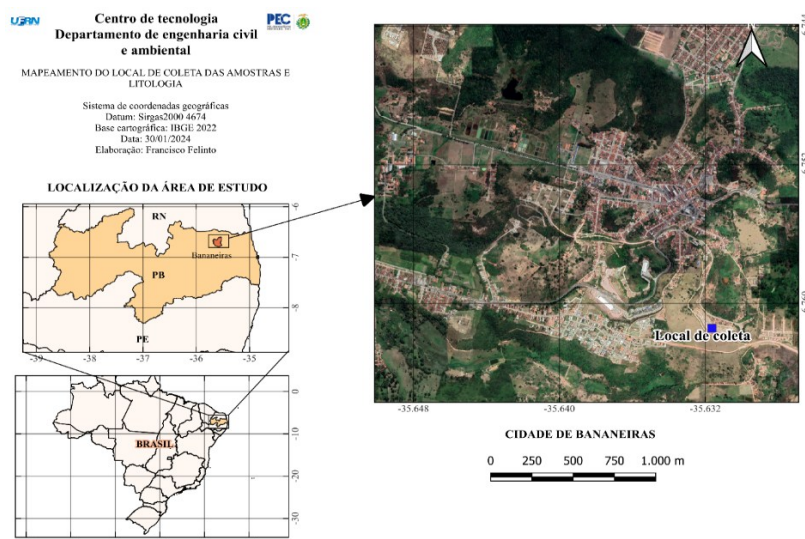


Figura 1 – Localização geográfica da área estudada. Fonte: autor (2025).

Os materiais que compõem o talude utilizado nesta pesquisa foram extraídos de sedimentos da Formação Barreiras, conforme indicado no mapa geológico da cidade de Bananeira (Figura 2). No solo da região referente ao grupo Barreiras (ENb) são apresentados arenitos argilosos e conglomeráticos, geralmente caulinizados e com aspecto friável. Nessa região, são encontrados arenitos esbranquiçados, mal selecionados, localmente conglomeráticos, ricos em caulim, homogêneos e de fácil desagregação (GUIMARÃES et al., 2008). Segundo Menezes (1999), a Formação Barreiras é composta por depósitos arenosos a areno-argilosos ou conglomeráticos, com colorações variadas (amarelo, vermelho, ocre).

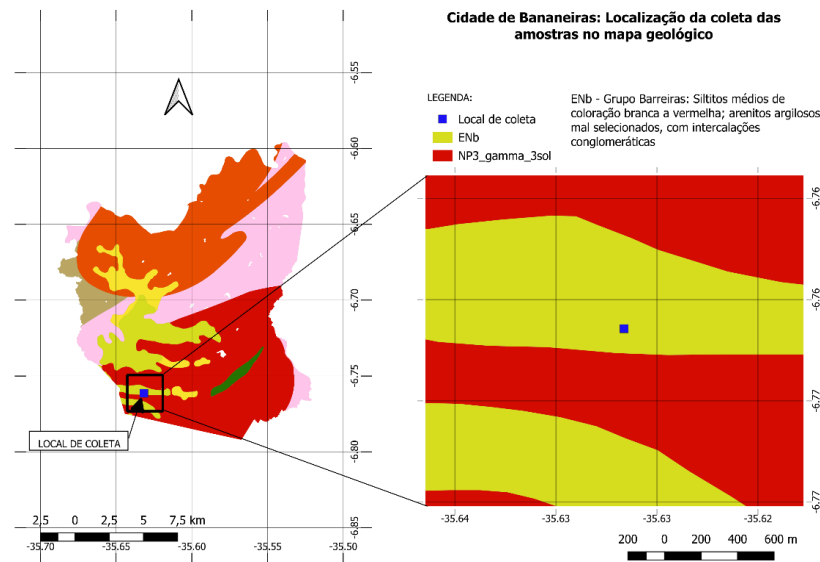


Figura 2 – Mapa geológico de Bananeiras com área de localização da coleta. Fonte: autor (2025).

## 1.2 Aspectos geotécnicos

Existem muitos parâmetros geotécnicos característicos da Formação Barreiras, consolidados por diversos pesquisadores. Autores como Coutinho e Severo (2009); Moraes, Santos Jr. e Freitas Neto (2020) e Freire et al. (2022), comprovaram que normalmente os solos dessa formação são geralmente classificados como areia compacta (SC), argila de baixa plasticidade (CL) ou silte de baixa plasticidade (ML). As atividades das frações argilosas normalmente são menores que 0,75, classificados como baixa atividade das frações argilosas. Na Tabela 1 estão descritos as pesquisas e os parâmetros geotécnicos de alguns trabalhos referentes a Formação Barreiras.

Tabela 1 – Parâmetros de resistência de pico, classificação e plasticidade de solo provenientes da Formação Barreiras.

| Referência/ Local                                                   | Ensaio        | Classificação       | IP (%) | Condição do corpo de prova | c (kPa) | $\Phi$ (°) |
|---------------------------------------------------------------------|---------------|---------------------|--------|----------------------------|---------|------------|
| Gusmão Filho et al. (1986)/ Olinda -PE                              | Triaxial (CU) | Areia argilosa (SC) | 31-40  | Inundado                   | 20–50   | 20-24      |
| Coutinho et al. (1999); Santos (2001) - Horto Dois Irmãos Recife/PE | Cis. Direto   | Areia argilosa (SC) | 10-16  | Natural                    | 13      | 31         |
|                                                                     |               |                     |        | Inundado                   | 0       | 30         |
| Lafayette (2000) - Alto do Reservatório Recife/PE                   | Cis. Direto   | Areia argilosa (SC) | 11-18  | Natural                    | 7–13    | 24–26      |
|                                                                     |               |                     |        | Inundado                   |         |            |
| Lima (2002) - Alto do Reservatório Recife/PE                        | Cis. Direto   | Areia argilosa (SC) | 16     | Natural                    | 28      | 31         |
|                                                                     |               |                     |        | Inundado                   | 10      | 32         |
| Silva (2003) - Tibau do Sul/RN                                      | -             | -                   | -      | Natural                    | 193–318 | 43–52      |

|                                                                              |               |                                                |           |                    |               |            |
|------------------------------------------------------------------------------|---------------|------------------------------------------------|-----------|--------------------|---------------|------------|
|                                                                              | Cis. Direto   |                                                |           | Inundado           | 45–53         | 27–29      |
| Lafayette et al. (2003; 2005) - Cabo de S. Agostinho/PE                      | Cis. Direto   | Areia argilosa (SC)                            | 9-13      | Natural            | 33–56         | 33–36      |
|                                                                              |               |                                                |           | Inundado           | 1,5-1,8       | 33–35      |
| Bandeira et al. (2004) - Camaragibe/PE                                       | Cis. Direto   | Silte arenoso (ML)                             | 14-16     | Natural            | 12            | 29         |
| Silva (2005) - Camaragibe/PE                                                 | Cis. Direto   | Areia argilosa (SC)                            | 12-13     | Natural            | 43–46         | 31–45      |
|                                                                              |               |                                                |           | Inundado           | 0-3,7         | 31–35      |
| Severo (2005)                                                                | Cis. Direto   | -                                              | -         | Inundado           | 45,4-109,7    | 27,7-48,3  |
| Severo et al. (2006) - Tibau do Sul/RN                                       | Cis. Direto   | Argila baixa plasticidade (CL)                 | 7-19      | Natural            | 116–192       | 27–32      |
|                                                                              |               |                                                |           | Inundado           | 23–54         | 26–30      |
| Silva (2007) – Camaragibe/PE                                                 | Cis. Direto   | Areia argilosa (SC)                            | 12-14     | Natural            | 45–47         | 31–44      |
|                                                                              |               |                                                |           | Inundado           | 0-3,7         | 31–34      |
| Santos Jr. et al. (2008) - Tibau do Sul/RN                                   | Cis. Direto   | Argila de baixa plasticidade (CL)              | 6,3-18,6  | Natural            | 233–384       | 27–32      |
|                                                                              |               |                                                |           | Inundado           | 16,9-109,7    | 26–59      |
| Meira (2008)                                                                 | Cis. Direto   | Areia argilosa (SC)                            | 7,9-9,2   | Natural            | 1-4,2         | 28–34      |
|                                                                              |               |                                                |           | Inundado           | 0,4-3,5       | 23–26      |
| Severo (2011) – Ponta do Pirambu/RN                                          | Triaxial (CD) | Areia argilosa                                 | 5-11,3    | Compactada natural | 6,5~8,3–110,5 | 28~29,4–33 |
| Souza Jr. (2013) e Santos Jr., Coutinho, Severo (2015) Barra de Tabatinga/RN | Cis. Direto   | Areia argilosa (SC)                            | 16,6-36,6 | Inundado           | 16,9- 59,9    | 29,5-33,6  |
| Barbosa (2017); Taquez (2017) – Barreira do Inferno/RN                       | Triaxial (CW) | Areia Silto argilosa (SC) – Areia mal graduada | 0-18      | Natural            | 97,6–192,1    | 30,88–36,4 |
| Barbosa (2017); Taquez (2017) – Barreira do Inferno/RN                       | Triaxial (CU) | Areia Silto argilosa (SC) – Areia mal graduada | 0-18      | Saturada           | 16,7-60,6     | 12,1-28,9  |
| Souza (2018) - Zona oeste de Natal/RN                                        | Cis. Direto   | Areia Siltosa (SM)                             | 4 – 9     | Natural            | 0,5-206,2     | 19,5-43    |
|                                                                              |               |                                                |           | Inundado           | 0             | 32,9–36,9  |
| Souza (2018) - Zona oeste de Natal/RN                                        | Cis. Direto   | Areia argilosa (SC)                            | 17-20     | Natural            | 148,6–306,8   | 37,6–58,1  |
|                                                                              |               |                                                |           | Inundado           | 17,5–106,7    | 27,2–33,6  |
| Morais, Santos Jr., Coutinho, Freitas Neto (2020) – RN                       | CD e CU       | Solo 1: areia silto-argilosa (SM-SC)           | 6         | Inundado           | 17,8          | 30,16      |
| Morais, Santos Jr., Freitas Neto (2020) – Barra de Tabatinga/RN              | CD e CU       | Solo 2: areia siltosa (SM)                     | 3         | Inundado           | 12,01         | 29,67      |
| Morais, Santos Jr., Freitas Neto (2020) - Barra de Tabatinga/RN              | CD e CU       | Solo 1: areia mal graduada (SP)                | -         | Inundado           | 4,65          | 30,71      |

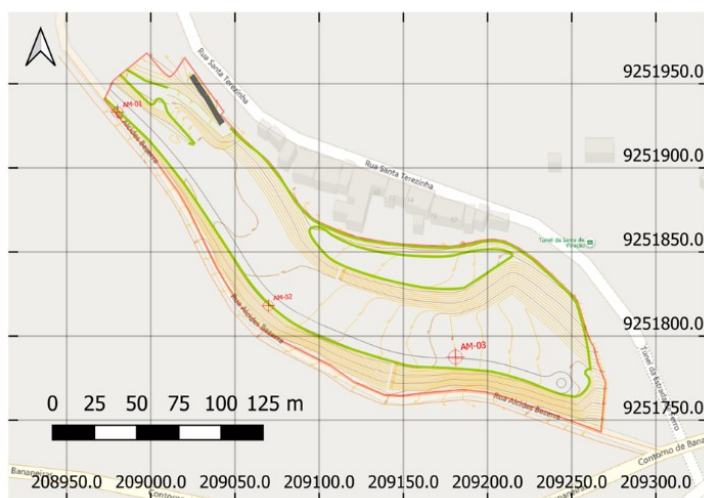
Fonte: autor (2025)

## 2. Metodologia

O programa experimental consistiu em definir os locais de coleta das amostras no talude dentro da região do solo da Formação Barreiras (Figura 3a). Foram retiradas 3 amostras de solos (AM-01, AM-02 e AM-03), com suas respectivas localizações (Tabela 2 e Figura 3b).



a) Camadas de solo no talude.



b) Curvas de nível do talude com local de coleta das amostras.

Figura 3 – Local de coleta das amostras. Fonte: autor (2025).

Tabela 2 – Localização geográfica das amostras.

| Solo  | Latitude    | Longitude  | Profundidade (m) |
|-------|-------------|------------|------------------|
| AM-01 | -35.632336° | -6.760796° | 1 - 2            |
| AM-02 | -35.631640° | -6.761489° | 5 - 7            |
| AM-03 | -35.631215° | -6.761652° | 7 - 9            |

Fonte: autor (2025)

Para determinar a resistência à penetração do solo e caracterizar as camadas do subsolo, foi realizado o ensaio de SPT (Standard Penetration Test), conforme a NBR 6484 (ABNT, 2020). O relatório inclui 17 ensaios de Sondagem a Percussão, designados como SP-06, SP-07, SP-08, SP-10, SP-11, SP-12, SP-13, SP-14, SP-15, SP-16, SP-17, SP-18, SP-19, SP-20, SP-21 e SP-22. Os pontos de sondagem escolhidos para avaliação dessa pesquisa foram baseados nos pontos de coletas das amostras, que foi o SP-06. O ensaio de granulometria com sedimentação foi feito com secagem prévia pelo processo 1 da NBR 6457 (ABNT, 2024) e NBR 7181 (ABNT, 2025). Os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade foram feitos com base na NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016). A densidade real ou massa específicas dos grãos foi determinada de acordo com a NBR 6458 (ABNT, 2016) e a DNER-ME 093 (ABNT, 1994).

A norma utilizada para o ensaio de compactação foi a NBR 7182 (ABNT, 2016). Os ensaios foram feitos com reuso, com cilindro pequeno e de energia normal. Foi feito o ensaio de dispersão rápida (*Crumb Test*) para verificar a dispersibilidade dos solos em água. Baseado na NBR 13601 (ABNT, 2020).

Para caracterização mineralógica e química, foram realizados ensaios de difração de raios X (DRX) e de Fluorescência de Raios-X (FRX), respectivamente. Posteriormente foi estimado o grau de intemperismo segundo a EMBRAPA (1997) para as três amostras definidas.

Os ensaios de permeabilidade dos CP compactados foram feitos baseadas na NBR 14545 (ABNT, 2021), pelo método “B”, de parede rígida. As amostras indeformadas foram ensaiadas pelo método da parede flexível, baseado em HEAD (1986) e na ASTM D5084 (ASTM, 2016a).



Os ensaios de compressão edométrico seguiram as diretrizes da ASTM D2435/D2435m (ASTM, 2011) e NBR 16853 (ABNT, 2020). As tensões normais aplicadas em cada corpo de prova foram de: 5 kPa, 12,5 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, 800 kPa e 1600 kPa. Cada carregamento foi aplicado em um período de 24 horas. O descarregamento foi feito em estágios de tensões com 400 kPa, 100 kPa e 25 kPa. Cada descarregamento foi aplicado em um período de 24 horas.

O ensaio de cisalhamento direto, foi baseado na ASTM D3080 (ASTM, 2004) e ASTM D2435/2435m (ASTM, 2011). As tensões normais aplicadas foram de: 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa e 200 kPa. Todas as amostras foram inundadas em todas as etapas do procedimento de ensaio. Na Figura 4 pode ser observado o solo compacto e indeformado.

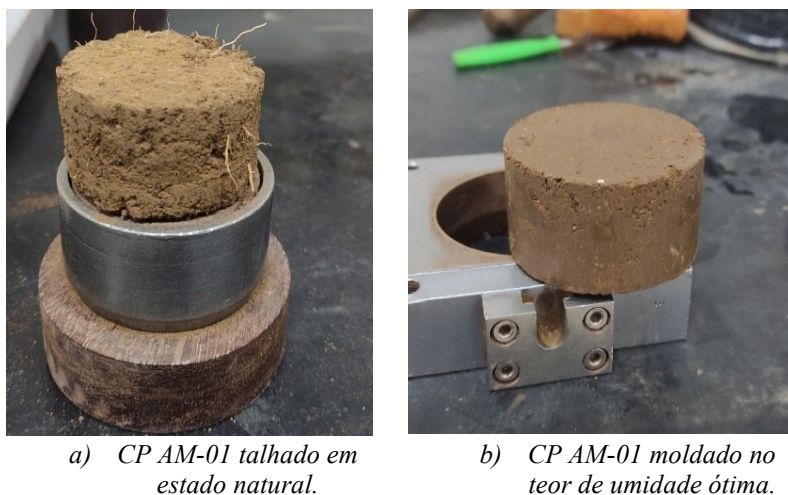


Figura 4 – CP moldados para cisalhamento direto. Fonte: autor (2025).

Foi verificado a resistência ao cisalhamento utilizando o compressor triaxial. O ensaio foi executado com os corpos de prova saturados, adensados e com drenagem durante a ruptura (CID), conforme a ASTM D7181 (ASTM, 2020). Os CP foram comprimidos com tensões confinantes efetivas de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa.

Por último, para mensurar o potencial de sucção do solo foi feito um ensaio de sucção pelo método do papel filtro com base na ASTM D5298 (ASTM, 2016) e no trabalho de Marinho (1994).

### 3. Resultados e discussão

#### 3.1 Análise Química e Mineralógica

No ensaio de FRX (Tabela 3) são observadas elevadas concentrações de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), considerados os principais constituintes do processo de laterização (BASTOS, 1999; ARAÚJO et al., 2023). Os elementos químicos ferro, alumínio e sílica correspondem, em média, a 97,18% do total presente nas amostras, evidenciando o elevado grau de laterização dos solos.

A coloração amarelada e avermelhada característica dos solos lateríticos está associada à presença de ferro e alumínio (ARAÚJO et al., 2023), o que pode explicar a textura observada nas amostras AM-01 e AM-02. A baixa concentração de ferro na AM-03 justifica sua coloração esbranquiçada.

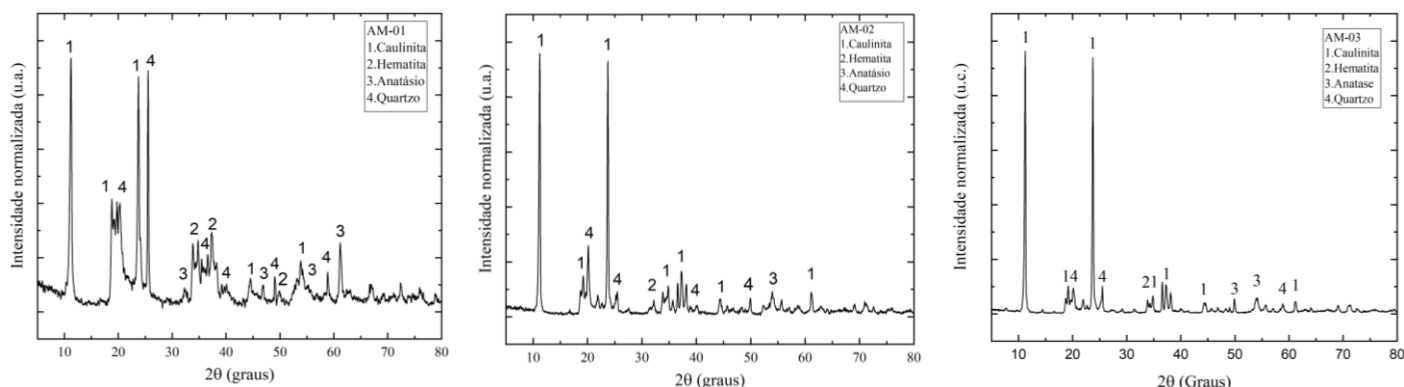
Tabela 3 – Ensaio de FRX das amostras.

| Composto químico        | AM-01 (%) | Composto químico        | AM-02 (%) | Composto químico        | AM-03 (%) |
|-------------------------|-----------|-------------------------|-----------|-------------------------|-----------|
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 39,88     | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 40,38     | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 47,92     |
| $\text{SiO}_2$          | 37,99     | $\text{SiO}_2$          | 36,34     | $\text{SiO}_2$          | 47,07     |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 18,36     | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 21,14     | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 2,47      |
| $\text{TiO}_2$          | 3,06      | $\text{TiO}_2$          | 1,52      | $\text{TiO}_2$          | 1,14      |
| $\text{ZrO}_2$          | 0,23      | $\text{K}_2\text{O}$    | 0,18      | $\text{K}_2\text{O}$    | 0,93      |

|                                |      |                                |      |                                |      |
|--------------------------------|------|--------------------------------|------|--------------------------------|------|
| K <sub>2</sub> O               | 0,21 | ZrO <sub>2</sub>               | 0,11 | ZrO <sub>2</sub>               | 0,31 |
| CaO                            | 0,09 | Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,1  | Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,08 |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,05 | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,1  | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,04 |
| MnO                            | 0,02 | SrO                            | 0,06 | SrO                            | 0,02 |
| SrO                            | 0,02 | MnO                            | 0,04 | MnO                            | 0,02 |
| Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,02 | Ir <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,03 | Ir <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,12 |
| CuO                            | 0,02 | CoO                            | 0,02 |                                |      |
| ZnO                            | 0,02 |                                |      |                                |      |
| NbO                            | 0,01 |                                |      |                                |      |
| Br                             | 0,01 |                                |      |                                |      |

Fonte: autor (2025).

Para a identificação dos minerais, presentes nas frações passantes da peneira #200, foi realizado o ensaio de Difração de Raio X (DRX). Os difratogramas desta pesquisa indicaram que os principais minerais foram: Caulinita, Hematita, Anatásio (dióxido de titânio) e Quartzo (Figura 6). Segundo Biswal et al. (2018) e Araújo et al. (2023), os principais minerais presentes em amostras de solos lateríticos são caulinita, quartzo, hematita e goethita.



a) AM-01.

b) AM-02.

c) AM-03.

Figura 5 – Difratogramas das amostras. Fonte: autor (2025).

Como a sílica possui maior facilidade de lixiviação, estima-se que esse seja o motivo pelo qual a camada inferior (AM-03) apresenta a maior concentração de sílica. Como todas as camadas de solo apresentaram valores de Ki e Kr semelhantes, com leve atenuação na AM-02, infere-se que todos os solos possuem grau de laterização semelhante, característica típica desse tipo de material (Tabela 4).

Tabela 4 – Grau de intemperismo dos solos.

| SOLO | AM-01 (%) | AM-02 (%) | AM-03 (%) |
|------|-----------|-----------|-----------|
| Ki   | 1,69      | 1,53      | 1,67      |
| Kr   | 1,25      | 1,15      | 1,62      |

Fonte: autor (2025)

### 3.2 Caracterização Geotécnica

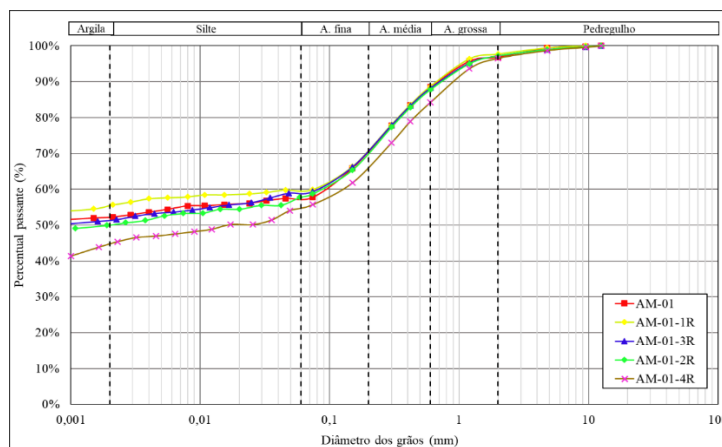
Foram realizados 5 ensaios de caracterização física da AM-01 (Tabela 5), 4 ensaios da AM-02 (Tabela 6) e 4 ensaios da AM-03 (Tabela 7).

A amostra 01 possui baixa plasticidade, sendo classificado como um silte de baixa compressibilidade (ML). Possui baixa atividade das argilas, com valores variando de 0,16 até 0,24 (Tabela 5). Sua curva granulométrica está apresentada na Figura 6.

*Tabela 5 – Caracterização física da AM-01.*

| Solo                          |                  | AM-01          | AM-01-1R       | AM-01-2R       | AM-01-3R       | AM-01-4R       |
|-------------------------------|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Granulometria                 | Pedregulhos (%)  | 3,1            | 2,3            | 2,81           | 2,81           | 3,50           |
|                               | Areia grossa (%) | 8,4            | 9,0            | 9,38           | 8,96           | 12,28          |
|                               | Areia média (%)  | 18,7           | 18,4           | 18,42          | 18,12          | 18,70          |
|                               | Areia fina (%)   | 12,2           | 10,4           | 11,55          | 10,97          | 10,75          |
|                               | Silte (%)        | 5,4            | 4,4            | 7,80           | 7,78           | 10,09          |
|                               | Argila (%)       | 52,1           | 55,5           | 50,04          | 51,36          | 44,68          |
| Limite de consistência        | LL (%)           | 35             | 34             | 33             | 33             | 34             |
|                               | IP (%)           | 12             | 8              | 8              | 8              | 19             |
| Class. SUCS                   |                  | CL             | ML             | ML             | ML             | CL             |
| Class. granulométrica         |                  | Argila Arenosa | Argila Arenosa | Argila arenosa | Argila arenosa | Argila arenosa |
| $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> ) |                  | 2,74           | 2,76           | 2,70           | 2,70           | 2,74           |
| HRB                           |                  | A – 6          | A – 4          | A – 4          | A – 4:         | A – 6          |
| Atividade das argilas         |                  | 0,24           | 0,15           | 0,17           | 0,16           | 0,16           |

*Fonte: autor (2025).*



*Figura 6 – Curva granulométrica AM-01. Fonte: autor (2025).*

A AM-02 é classificada como um ML. Apresentou plasticidade média, e alta atividade das argilas. Suas curvas granulométricas podem ser observadas na Figura 7.

*Tabela 6 – Caracterização física da AM-02.*

| Solo          |                  | AM-02 | AM-02-1R | AM-02-2R | AM-02-3R |
|---------------|------------------|-------|----------|----------|----------|
| Granulometria | Pedregulhos (%)  | 1,2   | 0,3      | 0,17     | 0,17     |
|               | Areia grossa (%) | 12,4  | 12,9     | 16,43    | 14,48    |
|               | Areia média (%)  | 12,2  | 12,1     | 13,99    | 13,62    |
|               | Areia fina (%)   | 7,2   | 7,1      | 9,13     | 8,993    |
|               | Silte (%)        | 64,4  | 64,3     | 60,48    | 62,26    |
|               | Argila (%)       | 2,6   | 3,2      | 0,39     | 0,53     |



|                               |        |               |               |               |               |
|-------------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Limite de consistência        | LL (%) | 41            | 43            | 43            | 43            |
|                               | IP (%) | 13            | 19            | 11            | 11            |
| Class. SUCS                   |        | ML            | CL            | CL            | ML            |
| Class. granulométrica         |        | Silte Arenoso | Silte Arenoso | Silte Arenoso | Silte arenoso |
| $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> ) |        | 2,76          | 2,77          | 2,70          | 2,68          |
| HRB                           |        | A – 4         | A – 7 – 5     | A-7-5         | A-7-5         |
| Atividade das argilas         |        | 5,18          | 6,44          | 28,20         | 20,75         |

Fonte: autor (2025).

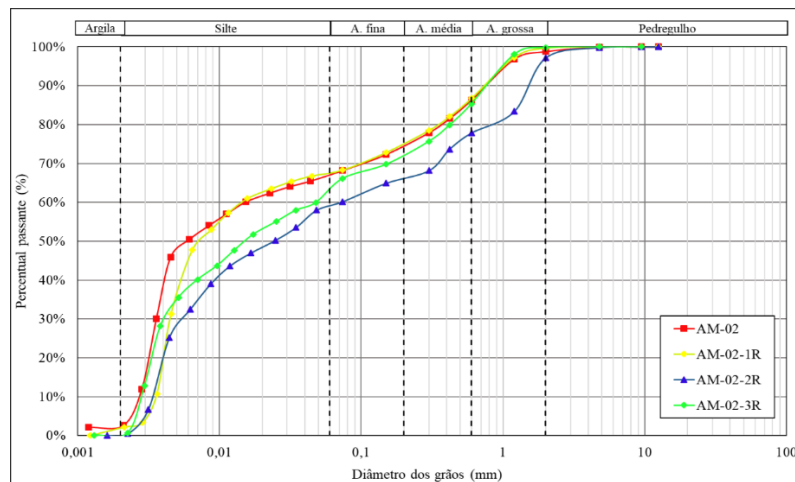


Figura 7 – Curva granulométrica AM-02. Fonte: autor (2025).

De acordo com a classificação SUCS, todas as caracterizações da amostra 03 foram consideradas como argilas de baixa compressibilidade (CL). A atividade das argilas da AM-03 é considerada alta. Na Figura 8 é observado as suas curvas granulométricas.

Tabela 7 – Caracterização física da AM-03.

| Solo          |                  | AM-03 | AM-03-1R | AM-03-2R | AM-03-3R |
|---------------|------------------|-------|----------|----------|----------|
| Granulometria | Pedregulhos (%)  | 3,4   | 4,2      | 3,91     | 3,91     |
|               | Areia grossa (%) | 22,4  | 24,7     | 25,08    | 25,99    |
|               | Areia média (%)  | 17,1  | 15,3     | 12,24    | 12,16    |
|               | Areia fina (%)   | 5,0   | 4,9      | 5,52     | 5,92     |
|               | Silte (%)        | 42,8  | 46,8     | 51,39    | 49,66    |
|               | Argila (%)       | 9,2   | 4,1      | 1,86     | 2,36     |

|                               |               |               |               |               |               |
|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Limite de consistência        | LL (%)        | 33            | 33            | 33            | 33            |
|                               | IP (%)        | 15            | 14            | 14            | 14            |
| Class. SUCS                   | CL            | CL            | CL            | CL            | CL            |
| Class. granulométrica         | Areia Siltosa | Silte arenoso | Silte arenoso | Silte arenoso | Silte arenoso |
| $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,77          | 2,77          | 2,65          | 2,65          | 2,65          |
| HRB                           | A – 7 – 5     | A – 6         | A-6           | A-6           | A-6           |
| Atividade das argilas         | 1,67          | 3,43          | 7,53          | 5,93          | 5,93          |

Fonte: autor (2025).

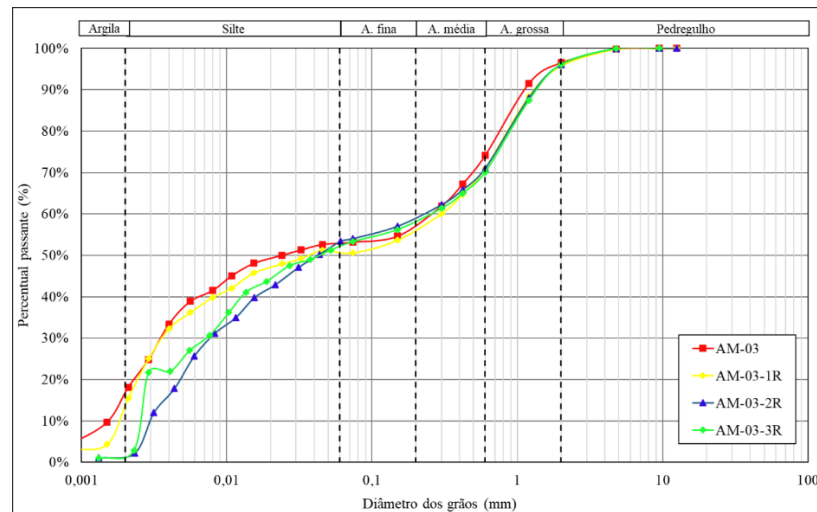
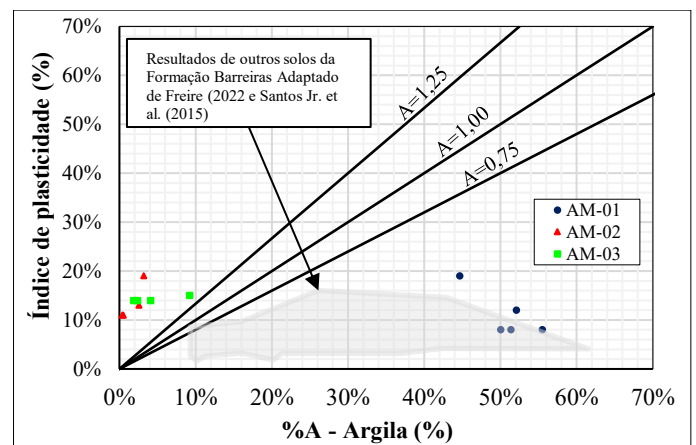
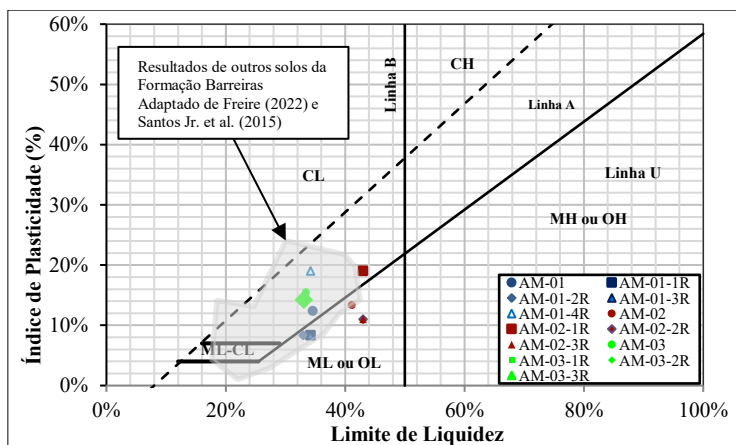


Figura 8 – Curva granulométrica AM-03. Fonte: autor (2025).

Ensaio de limites de consistência foram realizados em pesquisas anteriores sobre a Formação Barreiras por Cunha (1992), Silva (2003), Pereira (2004), Severo (2005, 2011), Pereira (2012), Souza Jr. (2013) e Freire et al. (2022). Em todos esses estudos, os sedimentos da Formação Barreiras apresentaram baixa a média plasticidade, conforme evidenciado na Figura 9a. De acordo com Freire et al. (2022) e Santos Jr. et al. (2015), solos da Formação Barreiras apresentam baixa atividade das argilas (Figura 9b). A AM-01 mostra-se condizente com a literatura, todavia a AM-02 e AM-03 possui uma alta atividade das argilas, não estando de acordo com o que foi apresentado por outros autores.



a) Carta de plasticidade.

b) Atividade das argilas.

Figura 9 – Carta de plasticidade e atividade das argilas das amostras da Formação Barreiras. Fonte: adaptado de Freire (2022) e Santos Jr. et al (2025).

Os resultados da dispersividade do solo são vistos na Tabela 8. A amostra AM-01 foi classificado como não dispersivo, a amostra AM-02 apresentou comportamento moderadamente dispersivo, a AM-03 se comportou como grau 2 de dispersividade, sendo considerada comportamento levemente dispersivo.

Para Duikier et al (2003), a estabilidade dos agregados do solo resulta da interação entre minerais de carga variável, como óxidos de ferro e alumínio, e a matéria orgânica, que possui cargas predominantemente negativas. Lollo (2008) afirma que a dispersibilidade dos solos é um indicador de colapsibilidade.

Tabela 8 – Resultado do grau de dispersibilidade do solo pelo ensaio do torrão (Crumb Test).

| Tempo (min) | Grau de dispersibilidade |       |       |
|-------------|--------------------------|-------|-------|
|             | AM-01                    | AM-02 | AM-03 |
| 1           | 1                        | 3     | 1     |
| 2           | 1                        | 3     | 3     |
| 15          | 1                        | 3     | 2     |
| 30          | 1                        | 3     | 2     |
| 60          | 1                        | 3     | 2     |

Fonte: autor (2025).

### 3.3 Compactação

Na sondagem foi evidenciado que nos primeiros 5,00 m a AM-01, uma argila arenosa, muito rijo, com  $N_{SPT}$  médio superior a 19 e coloração variegada. Entre 5,00 e 6,60 m, a AM-02, um silte arenoso com pouca argila,  $N_{SPT}$  entre 10 e 12, solo medianamente compacto e coloração avermelhada. Já de 6,60 m até o impenetrável, a AM-03, uma areia siltosa, com  $N_{SPT}$  entre 12 e 43, indicando consistência de medianamente compacta a muito rija. As classificações tátil-visual e granulométrica mostraram boa concordância.

A Figura 10 apresentam os resultados de compactação das amostras AM-01, AM-02 e AM-03. A AM-01, apesar de argilosa, apresentou comportamento semelhante a um solo siltoso, com  $w_{ót}$  de 16,37% e  $\rho_{dmáx}$  de 1,76 g/cm<sup>3</sup>. A AM-02 a maior  $w_{ót}$  de 1,69% e  $\rho_{dmáx}$  de 1,69 g/cm<sup>3</sup>, enquanto a AM-03 apresentou características de solo arenoso, com  $w_{ót}$  de 13,38% e  $\rho_{dmáx}$  de 1,87 g/cm<sup>3</sup>, coerentes com suas classificações granulométricas.

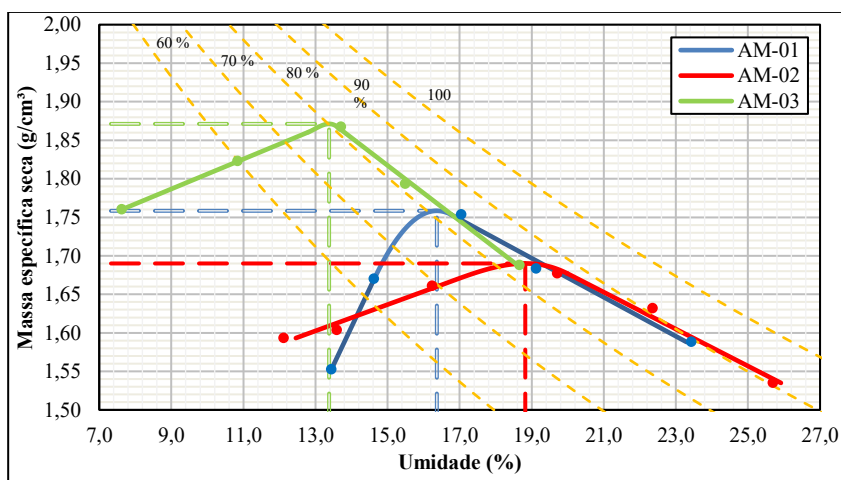


Figura 10 – Curva de compactação das 3 amostras. Fonte: autor (2025).

### 3.4 Permeabilidade

Os resultados dos ensaios referentes à permeabilidade pelo método de parede flexível para CP indeformados e parede rígida para os solos compactados na umidade ótima estão dispostos na Tabela 9.

Os resultados indicam que o solo AM-01 apresenta elevada porosidade, com índice de vazios de 1,11, característica que está associada ao seu potencial de colapsibilidade. Esse comportamento está relacionado à lixiviação de minerais solúveis nas camadas superficiais, sendo a AM-01 justamente a camada de topo. Já a camada imediatamente inferior, AM-02, apresenta um “enriquecimento” em minerais, o que justifica sua menor permeabilidade quando em estado indeformado.

A AM-02 apresentou menor permeabilidade em comparação à AM-03, mesmo possuindo maior índice de vazios. No entanto, avaliar apenas esse parâmetro não é suficiente. É necessário considerar também o grau de conectividade entre os vazios, bem como o grau de saturação obtido após o ensaio.

Segundo Blight (1997), para solos residuais tropicais, generalidades dos valores de permeabilidade devem ser evitadas para determinado tipo de solo. Ou seja, não há especificação técnica que estabeleça uma regularidade de valores entre solos com a mesma mineralogia ou grau de intemperismo. Os solos residuais tropicais possuem forma, tamanho, interação dos grãos, porosidade, mineralogia, grau de fissuração e as características das fissuras se diferenciam em direção e profundidade (HUAT, SEW e ALI, 2012).

*Tabela 9 – Índices físicos e coeficiente de permeabilidade do solo.*

|                                 | Solo                          | AM-01                 |                       | AM-02                 |                       | AM-03                 |                       |
|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                 | Estado                        | Indeformado           | Compactado            | Indeformado           | Compactado            | Indeformado           | Compactado            |
| Índices físicos antes do ensaio | $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )   | 1,31                  | 1,94                  | 1,65                  | 1,90                  | 1,77                  | 2,07                  |
|                                 | $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,29                  | 1,65                  | 1,64                  | 1,61                  | 1,76                  | 1,85                  |
|                                 | e                             | 1,11                  | 0,59                  | 0,66                  | 0,72                  | 0,54                  | 0,47                  |
|                                 | w (%)                         | 1,51                  | 18,04                 | 0,40                  | 18,61                 | 0,31                  | 12,24                 |
|                                 | Sr (%)                        | 3,71                  | 83,72                 | 1,66                  | 70,76                 | 1,55                  | 70,84                 |
| Índices físicos após o ensaio   | $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )   | 1,68                  | 1,99                  | 2,02                  | 2,00                  | 2,05                  | 2,14                  |
|                                 | $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,29                  | 1,65                  | 1,64                  | 1,61                  | 1,76                  | 1,85                  |
|                                 | e                             | 1,11                  | 0,59                  | 0,66                  | 0,72                  | 0,54                  | 0,47                  |
|                                 | w (%)                         | 30,74                 | 20,43                 | 22,81                 | 24,09                 | 16,43                 | 15,84                 |
|                                 | Sr (%)                        | 75,59                 | 90,63                 | 94,40                 | 91,60                 | 82,86                 | 91,67                 |
|                                 | K (cm/s)                      | $1,58 \times 10^{-3}$ | $2,41 \times 10^{-7}$ | $2,48 \times 10^{-5}$ | $6,95 \times 10^{-7}$ | $1,68 \times 10^{-4}$ | $4,72 \times 10^{-7}$ |

*Fonte: autor (2025).*

### 3.5 Ensaio edométrico

Foram conduzidos ensaios edométricos duplos realizados nas amostras de solos compactadas e indeformadas (Figura 11), nas condições não inundada e inundada, para obtenção do par de curvas de compressão conforme o método proposto por Jennings & Knight (1957).

A AM-01 em sua umidade natural apresentou uma pequena redução na sua compressibilidade, quando esteve inundada, apresentou grande compressibilidade. Isso ocorre porque os solos residuais exibem alta compressibilidade quando inundados, devido à diminuição da sucção matricial, à redução da resistência aparente e ao amolecimento das ligações cimentantes (MITCHELL. SOGA, 2005).

Ao consultar a Tabela 10, observa-se que a tensão de pré-adensamento da amostra AM-01 indeformada em condição saturada foi de 81,8 kPa, enquanto a tensão de pré-adensamento para a amostra do mesmo solo em sua condição natural foi de 459,8 kPa, representando um aumento de 562,1% em relação à amostra saturada.

Barksdale e Blight (2012) afirmam que esses solos não apresentam um trecho de reta virgem bem definido devido ao seu comportamento de pré-adensamento. Blight (1997) afirma que frequentemente, os solos residuais se comportam como se estivessem sobre-adensados, apresentando baixa compressibilidade em baixos níveis de tensão. Quando a tensão de escoamento limite é atingida, a compressibilidade é aumentada. No geral, solos que apresentam grande potencial de colapso, exibem grandes deformações quando inundados.

Segundo Fooke (1997), quando compactado, o solo residual depende exclusivamente da distribuição granulométrica, dos argilominerais presentes e da densidade obtida pela compactação.

Observa-se que nenhuma das amostras compactadas apresentaram ponto de escoamento bem definido. Como dito por Barksdale & Blight (2012), os gráficos de deformação versus tensão de solos residuais nem sempre apresentam ponto de escoamento bem definido, em vez disso podem apresentar aumento constante na rigidez à medida que a tensão aumenta.

O solo natural residual quando compactado, perde a estrutura da sua matriz que foi formada ao longo de milhares de anos sob processos naturais de intemperismo químico e físico. Quando compactados, o solo passa a ter menor índice de vazios e maior densidade. O controle causado pela compactação gera modelos de solo com índices físicos parecidos e espera-se que sob cargas estáticas, dinâmicas, com fluxo ou não de água, ele se deforme de maneira comedida.

O solo quando saturado, espera-se uma redução na sua resistência, porém se o material estiver bem compactado na sua umidade ótima com densidade aparente máxima, ou bem próximo do ideal, a água presente durante o ensaio não afetará o corpo de prova de maneira significativa.

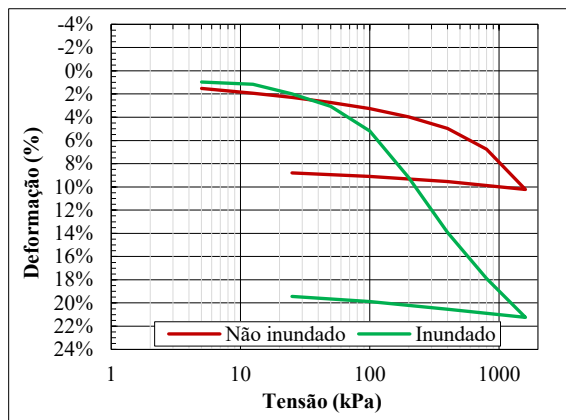
É evidente que, em todas as amostras compactadas, quando inundadas, ocorreram menores recalques. Ao observar as tensões de pré-adensamento, nota-se que, em todas as amostras, a maior tensão foi a das que foram umedecidas durante os ensaios. Esse comportamento evidencia a eficácia da compactação em limitar a compressibilidade do solo, especialmente em condições de saturação, reduzindo, potencialmente, os recalques em futuras aplicações de carga.

Foi avaliado o colapso dos solos sob a mesma tensão (400 kPa). Foi observado um colapso de 9,44% para a AM-01, uma expansão de aproximadamente 1% para a AM-02 e um colapso de 5,10% para a AM-03. De acordo com Vargas (1978), valores superiores a 2% indicam potencial de colapsibilidade. Assim, as amostras AM-01 e AM-03 podem ser classificadas como colapsíveis, enquanto a AM-02 não se enquadra, visto que apresentou uma pequena expansão.

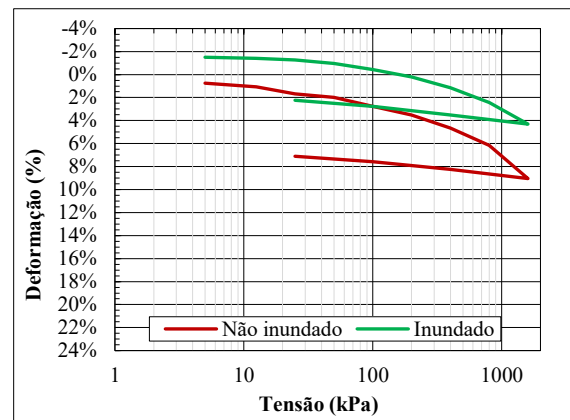
Tabela 10 – Parâmetros dos ensaios de compressibilidade do solo indeformado e compactado.

| Solo  | Estado   | Indeformado       |       |       |       |                     | Compactado        |       |       |       |
|-------|----------|-------------------|-------|-------|-------|---------------------|-------------------|-------|-------|-------|
|       |          | $\sigma'_v$ (kPa) | $c_c$ | $c_r$ | $c_d$ | Colapso (%)         | $\sigma'_v$ (kPa) | $c_c$ | $c_r$ | $c_d$ |
| AM-01 | INUND.   | 81,8              | 0,48  | 0,01  | 0,03  | 9,44                | 265,0             | 0,15  | 0,01  | 0,03  |
|       | N. INUN. | 459,8             | 0,33  | 0,03  | 0,02  |                     | 409,0             | 0,23  | 0,02  | 0,03  |
| AM-02 | INUND.   | 188,0             | 0,21  | 0,02  | 0,05  | -1,00<br>(expansão) | 301,3             | 0,20  | 0,01  | 0,06  |
|       | N. INUN. | 331,4             | 0,19  | 0,02  | 0,01  |                     | 361,2             | 0,20  | 0,02  | 0,03  |
| AM-03 | INUND.   | 113,1             | 0,19  | 0,04  | 0,02  | 5,10                | 148,8             | 0,08  | 0,01  | 0,02  |
|       | N. INUN. | 188,6             | 0,11  | 0,01  | 0,03  |                     | 378,0             | 0,15  | 0,01  | 0,04  |

Fonte: autor (2025).



a) AM-01 – Indeformado.



b) AM-01 – Compactado.

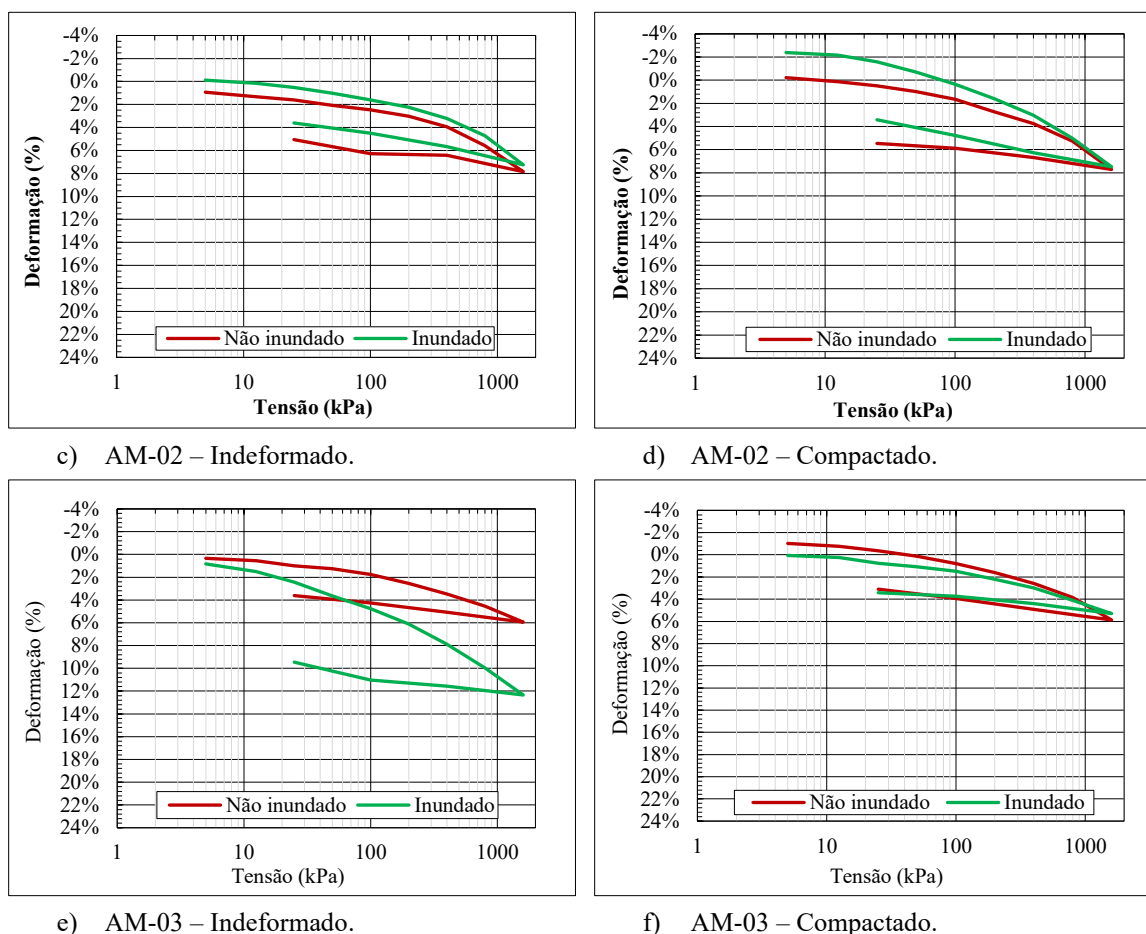


Figura 11 – Curva de deformação  $\times$  tensão de todas as amostras inundadas e não inundadas. Fonte: autor (2025).

### 3.6 Ensaios de cisalhamento direto

No ensaio de cisalhamento direto do solo AM-01, na condição indeformada e compactada, foi apresentado um comportamento dúctil sob todas as tensões aplicadas (Figura 12 - a). As amostras indeformadas mostraram redução de volume, devido ao alto índice de vazios do solo mesmo após a etapa de adensamento. Esse comportamento reflete sua natureza compressível quando está no estado natural.

As variações que podem ser observadas nos resultados presentes nas amostras indeformadas especialmente nos deslocamentos verticais versus os deslocamentos horizontais, podem ser indicativas das heterogeneidades das amostras indeformadas (SALIH, 2012), enquanto na amostra compactadas foram obtidos resultados com menor índice de variabilidade devido ao seu modelo com índices físicos controlados.

Para amostra AM-02 em condições naturais, o solo apresentou um comportamento rúptil observado na Figura 12 - C. Enquanto na amostra compacta, mostrou comportamento dúctil. A diferença de resistência foi nítida, e isso pode ser devido a cimentação ferruginosa presente em solos residuais lateríticos enriquecidos por ferro. Essa constatação é observada no *Crumb Test*, visto que o solo apresentou uma dificuldade para se desestruturar no meio aquoso.

Inicialmente a AM-03A (indeformada) apresentou um comportamento dúctil (Figura 12 - E), com as repetições dos resultados, a amostra apresentou um comportamento rúptil. Isso se deve a heterogeneidade do solo, essa amostra apresentava estrutura diferente de acordo com o local de coleta das amostras.

Todas as amostras compactas apresentaram variação volumétrica comedida em comparação ao seu estado indeformado sob as mesmas condições (Figura 13).



As amostras indeformadas apresentaram ângulo de atrito maiores no pico quando comparadas com os estados compactos (Tabela 11).

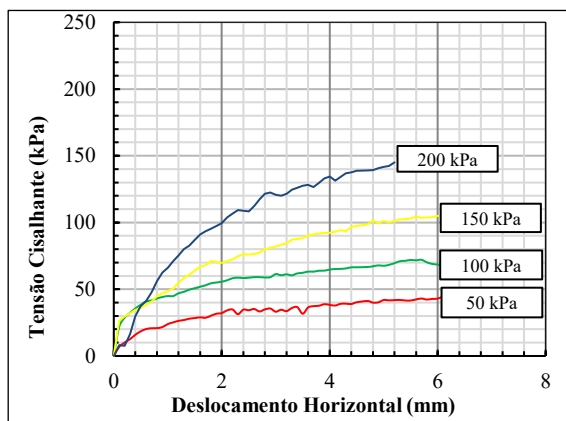
Tabela 11 – Ângulo de atrito e coesão das amostras indeformadas e compactadas.

| Solo  | Estado   | Indeformado  |         | Compactado   |         |
|-------|----------|--------------|---------|--------------|---------|
|       |          | $\phi^\circ$ | c (kPa) | $\phi^\circ$ | c (kPa) |
| AM-01 | Pico     | 33,8         | 4,48    | 33,1         | 22,52   |
|       | Residual | 33,9         | 7,82    | 33,6         | 11,79   |
| AM-02 | Pico     | 46,2         | 23,83   | 25,7         | 11,95   |
|       | Residual | 37,8         | 0       | 21,4         | 12,72   |
| AM-03 | Pico     | 29,7         | 45,22   | 36,4         | 4,38    |
|       | Residual | 34,6         | 7,22    | 32,2         | 0       |

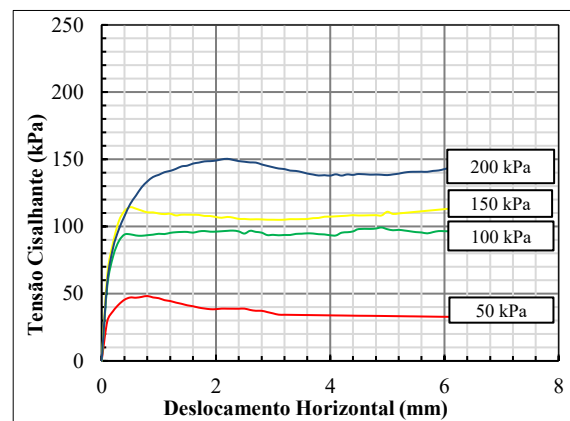
Fonte: autor (2025).

Como a AM-03 apresentou a maior incerteza em relação à sua resistência no ensaio de cisalhamento direto, conforme ilustrado na Figura 13, foi de grande relevância concluir o resultado com um ensaio triaxial dessa amostra (Figura 14). No triaxial as amostras apresentaram comportamento rúptil em todas as tensões aplicadas, com ruptura ocorrendo entre 1% e 2% de deformação axial. Sob todas as tensões, a amostra apresentou comportamento dilatante durante o ensaio de compressão triaxial.

Sob este ensaio, a amostra AM-03 chegou ao resultado de  $\phi' = 39,24^\circ$  e  $c' = 68,2$  kPa, coincidente com o apresentado na repetição dos ensaios dessa amostra.



a) AM-01 – Indeformado.



b) AM-01 – Compactado.

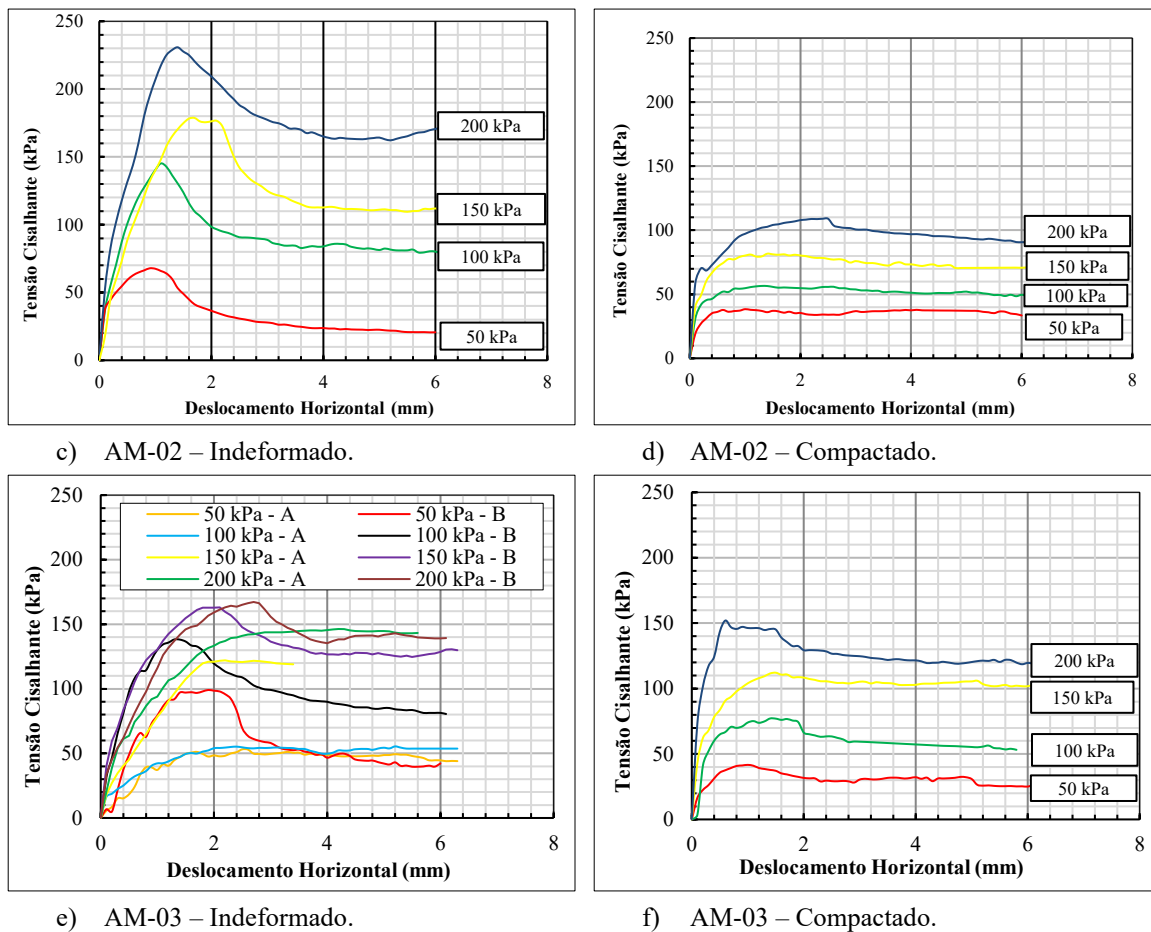
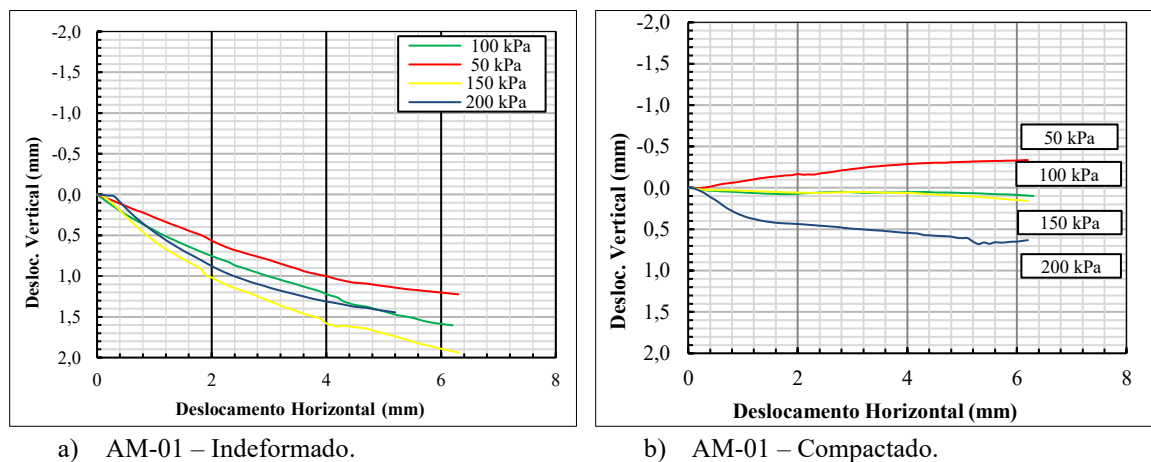


Figura 12 – Cisalhamento direto das amostras, tensão cisalhamento x Desl. Horizontal. Fonte: autor (2025).



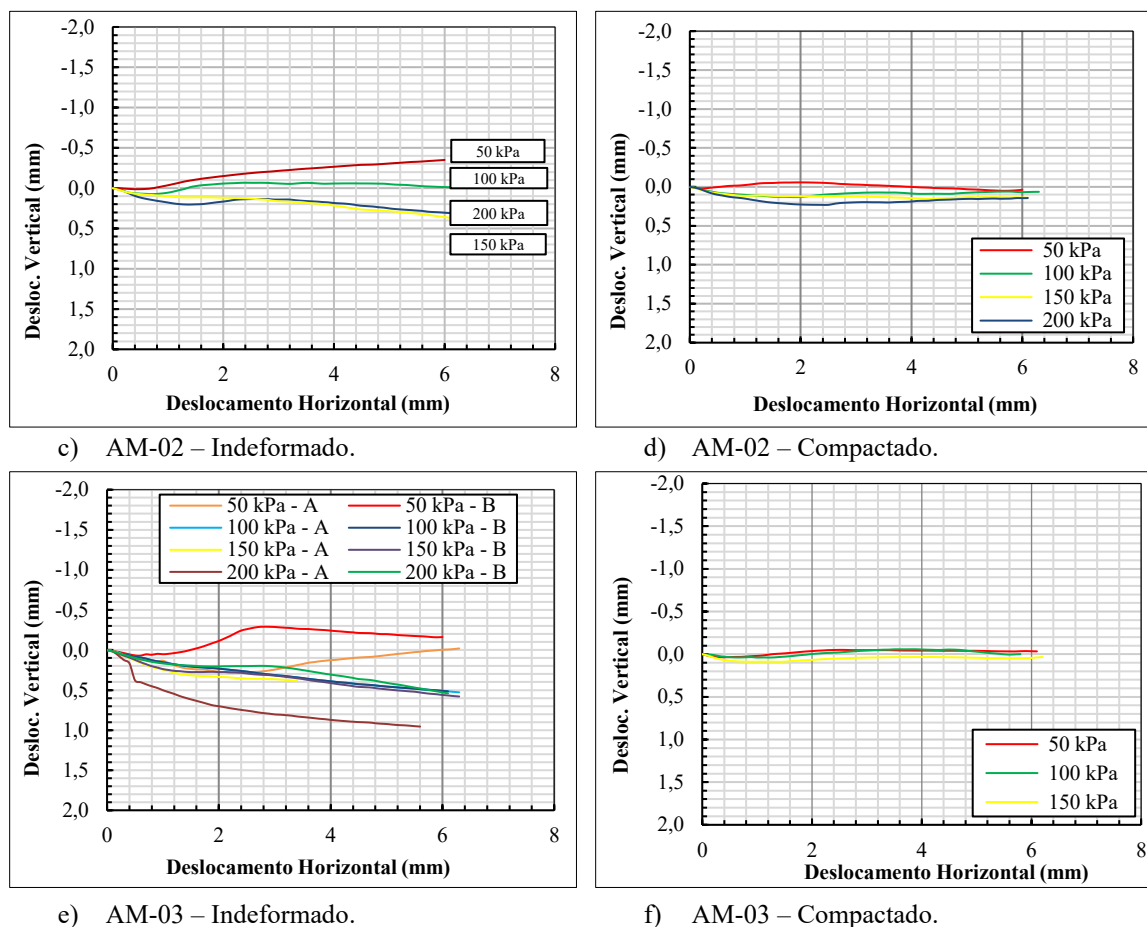


Figura 13 – Cisalhamento direto das amostras, Desl. vertical x Desl. Horizontal. Fonte: autor (2025).

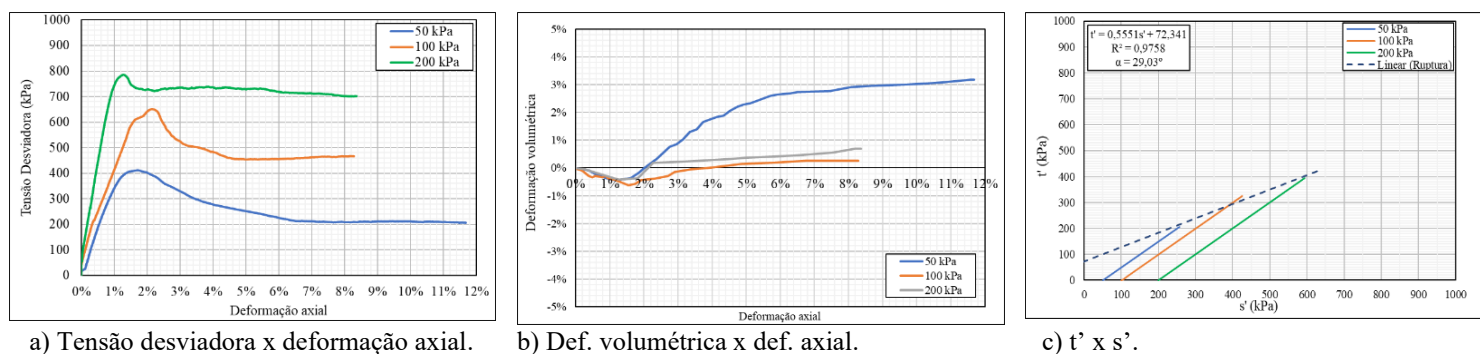


Figura 14 – Compressão triaxial da amostra AM-03. Fonte: autor (2025)

### 3.7 Ensaio de sucção

O ajuste das curvas de retenção das amostras AM-01, AM-02 e AM-03 foi realizado pelo método de Fredlund & Xing (1994), conforme ilustrado na Figura 15. Todas as curvas representadas, possuem apenas um valor de entrada de ar.

De acordo com Fredlund & Xing (1994), a curva da amostra AM-01 apresenta semelhança com a de um silte, enquanto a AM-02 se assemelha à curva de retenção de uma argila. Já a curva da AM-03 se aproxima do comportamento característico de uma areia. Se assemelhando ao comportamento do solo na curva de compactação.

Solos com diferentes granulometrias tendem a reter água de formas distintas: quanto mais o solo se comporta como uma argila, maior tende a ser sua capacidade de retenção, em função da plasticidade; por outro lado, solos arenosos apresentam baixa retenção de água (Blight, 2012). Analisando-se as curvas obtidas nesta pesquisa, observa-se que a amostra mais plástica (AM-02) apresentou comportamento compatível com o modelo de argila descrito por Fredlund & Xing.

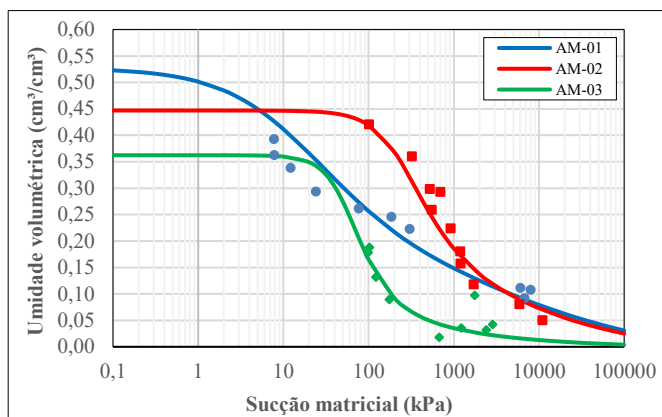


Figura 15 – Curva de retenção de água para as amostras indeformadas. Fonte: autor (2025).

#### 4. Considerações finais

O presente trabalho desenvolveu uma caracterização geotécnica a partir de amostras de solo residual obtidas em Bananeiras/PB. As amostras, identificadas como AM-01, AM-02 e AM-03, foram coletadas de camadas de solo presentes em um talude na região. Os solos foram classificados como argila de baixa compressibilidade (CL) e silte de baixa compressibilidade (ML).

Nos ensaios de FRX, os solos apresentaram elevadas concentrações de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), considerados os principais constituintes associados ao processo de laterização. As análises de DRX indicaram a presença de fases cristalinas correspondentes à caulinita, hematita, anatásio e quartzo. Não foram identificados argilominerais expansivos.

A granulometria conjunta indicou uma grande heterogeneidade entre as amostras da Formação Barreiras, característica comum em solos residuais tropicais. Embora as amostras apresentem diferenças quanto às dimensões das partículas, coloração e textura, todas possuem o mesmo grau de laterização, com pequenas variações nos índices  $K_r$  e  $K_i$ .

Foi observado que a permeabilidade dos solos residuais não segue uma característica genérica de acordo com o tipo de material, visto que os fatores que influenciam esse parâmetro estão relacionados a diversas variáveis independentes, não fornecendo dados precisos para correlacioná-los. A compactação revelou-se um fator determinante na alteração da condutividade hidráulica. Enquanto no estado natural o solo apresentou coeficiente de permeabilidade relativamente alto, em seu estado compactado resultou em valores baixos. Esse resultado sugere que o solo arenítico da Formação Barreiras pode ser plenamente utilizado em sistemas de revestimento de aterros sanitários e barragens de terra.

A camada de solo superior (AM-01), o mais laterizado, exibiu colapso quase instantâneo quando indeformado e submetido à inundação. A aplicação da energia de compactação foi eficaz em mitigar essa instabilidade volumétrica, transformando o comportamento do material para um estado apenas ligeiramente expansivo, eliminando o risco de colapso.

A influência da compactação nos parâmetros de resistência efetiva foi observada como variável e dependente da litologia. A AM-02 no estado natural apresentou um alto ângulo de atrito e um pico de ruptura, enquanto, após a compactação, foi drasticamente reduzido e sem pico de ruptura, indicando a quebra da cimentação natural presente no solo indeformado. Em contraste, a amostra AM-03 apresentou um ângulo de atrito aumentado pela compactação, apesar da perda do pico de resistência. Essa divergência ressalta a importância da microestrutura e o impacto diferenciado da compactação.

A compactação se mostrou um tratamento geotécnico efetivo para converter um solo de alto risco (AM-01) em um material excelente para uso em diversas obras de engenharia, estável e com baixa permeabilidade.

Esses resultados evidenciam a relevância da compactação como técnica de melhoria geotécnica, capaz de transformar solos residuais da Formação Barreiras em materiais adequados e estáveis para uso em obras de engenharia civil, como revestimentos de aterros e barragens de terra, contribuindo para o aproveitamento sustentável e seguro de materiais locais em projetos de infraestrutura.

#### Agradecimentos

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

#### Referências

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, 2004. ASTM 3080: *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. In annual book os ASTM Standards, 2004.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, 2011. ASTM D2435/2435m: *Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidations Properties of Soils Using Incremental Loading*. In annual book os ASTM Standards, 2011.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, 2016. ASTM D5084-16a: *Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Qall Permeameter*. In annual book os ASTM Standards, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, 2016. ASTM D5298: *Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper*. In annual book os ASTM Standards, 2016
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, 2020. ASTM D7181: *Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils*. In annual book os ASTM Standards, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016. NBR 6458: *Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016. NBR 6459: *Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016. NBR 7180: *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016. NBR 7182: *Solo – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018. NBR 7181: *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020. NBR 13601: *Solo – Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (crumb test)*. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020. NBR 6484: *Solo – Sondagens de simples reconhecimentos com SPT*. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020. NBR 16853: *Solo – Ensaio de adensamento unidimensional*. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021. NBR 14545: *Solo – determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável*. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2024. NBR 6457: *Solos – Preparação de amostras para*

- ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade*. Rio de Janeiro, 2024.
- ARAÚJO, Manoel Leandro et al. Análise da aplicabilidade de Sistema de Classificação Universal para solos lateríticos utilizados em camadas de pavimentos. *TRANSPORTES*, v. 31, n. 1, 2750-2750, 2023. Disponível em: <https://10.58922/transportes.v31i1.2750>.
- BANDEIRA, A. P. N. *Mapa de Risco de Erosão e Escorregamento das Encostas Ocupadas do Município de Camaragibe-PE*. Recife, Pernambuco. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). CTG. Engenharia Civil, Recife-PE. 2003.
- BARBOSA, Nathalia Marinho. *Estabilidade das falésias da barreira do inferno - RN*. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.
- BARKSDALE, R. D.; BLIGHT, G. E. Compressibility, settlement and heave of residual soils. *Mechanics of Residual Soils*, 2ª Ed. v. 149, 2012.
- BASTOS, Cezar Augusto Burkert. *Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados*. Porto Alegre, Rio Grande do Sul. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999.
- BISWAL, Dipti Ranjan; SAHOO, Umesh Chandra; DASH, Suresh Ranjan. Mechanical characteristics of cement stabilised granular lateritic soils for use as structural layer of pavement. *Road Materials and Pavement Design*, v. 21, n. 5, p. 1201-1223, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1545687>.
- BLIGHT, Geoffrey E.; LEONG, Eng Choon (Ed.). *Mechanics of residual soils*. CRC Press, 2012.
- BLIGHT, Geoffrey E. *Mechanics of residual soils*. CRC Press, 1997.
- BRANNER, John C. Geology of the northeast coast of Brazil. *Bulletin of the Geological Society of America*, v. 13, n. 1, p. 41-98, 1902. Disponível em: <https://doi.org/10.1130/GSAB-13-41>.
- COUTINHO, R. Q.; SEVERO, R. N. F. Conferência Investigação geotécnica Para Projeto de Estabilidade de Encostas. 5ª *conferência Brasileira de estabilidade de Encostas*, COBRAE, São Paulo. 55f, 2009.
- COUTINHO, R. Q. et al. Estudo da Erosão da Encosta do Horto de Dois Irmãos-PE. In: *9o Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia*. ABGE, Novembro, São Paulo-SP. 1999.
- CUNHA, José Eduardo Vilar. *Solos Lateríticos Estabilizados com Cimento Através da Metodologia da ABCP*. Campina Grande, Paraíba 138f. Dissertação (Mestrado de Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, 1992.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994. DNER – ME 093: *Solo – determinação da densidade real*. Rio de Janeiro, 1994.
- DUIKER, Sjoerd W. et al. Iron (hydr) oxide crystallinity effects soil aggregation. *Soil Science Society of America Journal*, v. 67, n. 2, 606-611, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.6060>.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Manual de métodos de análise de solos*. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 3ª ed. Rio de Janeiro, EMBRAPA, 524f. 1997.
- FREDLUND, D. G.; XING, Anqing; HUANG, Shangyan. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 31, n. 4, 533-546, 1994.
- FREIRE, Lisyanne Vasconcelos et al. Caracterização química, mineralógica e geotécnica de sedimentos da formação barreiras e pós-barreiras-litoral sul do Rio Grande do Norte, Brasil. *Geociências do Nordeste*, v. 8, n. 2, 76-90, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2022v8n2ID23638>.
- FOOKES, Peter G. *Tropical residual soils: A Geological Society Engineering Group working party revised report*. The

- Geological Society. CRC Press. 1997.
- GUIMARÃES, Ignez de Pinho et al. Geologia da folha Solânea SB. 25-YA-IV. CPRM, 2008
- GUSMÃO FILHO, J. A. et al. Parâmetros Geomecânicos dos Solos dos Morros de Olinda. In: *VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações-COBRAMSEG*. 199-210. 1986.
- HEAD K. H. *Manual of soil laboratory testing*. London: John Wiley & Sons, v.3, 1986.
- HUAT, Bujang BK; SEW, See Gue; ALI, Faisal Haji (Ed.). *Tropical residual soils engineering*. Crc Press, 2004.
- JENNINGS, JE & KNIGHT, K. Recent experiences with the consolidation test as a means of identifying conditions of heaving or collapse of foundations on partially saturated soils. *Civil Engineering*. Siviele Ingenieurswese, v. 1957, n. 2, 121-124, 1957.
- JOÃO, X. S. J.; TEIXEIRA, S. G.; FONSECA, D. D. F. Geodiversidade do estado da Paraíba: Programa geologia do Brasil. Levantamento da Geodiversidade. *Serviço Geológico do Brasil-CPRM*. Recife, 124f. 2016.
- LAFAYETTE, Kalinny Patrícia Vaz. *Comportamento geomecânico de solos de uma topossequência na Formação Barreiras em uma encosta na área urbana do Recife-PE*. Recife, Pernambuco, 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, 2000.
- LAFAYETTE, Kalinny Patrícia Vaz; COUTINHO, R. Q.; CAVALCANTI, B. C. H. Avaliação da erosão no Cabo de Santo Agostinho/PE-Parque Metropolitano Armando de Holanda Cavalcante. In: *50 Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental*. 2003.
- LAFAYETTE, Kalinny Patrícia Vaz.; COUTINHO, R. Q.; QUEIROZ, J. R. S. Avaliação da erodibilidade como parâmetro no estudo de sulcos e ravinas numa encosta no Cabo de Santo Agostinho-PE. In: *Conferência Brasileira sobre estabilidade de encostas*. 387-399. 2005.
- LIMA, A. F. *Comportamento geomecânico e análise de estabilidade de uma encosta da formação barreiras na área urbana da cidade do Recife*. 2002. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco, 2002.
- LOLLO, José Augusto. Solos Colapsíveis-Identificação, comportamento, impactos, riscos e soluções tecnológicas. *Editora Cultura Acadêmica*. São Paulo: Unesp, Ilha solteira, 2008.
- MARINHO, F. A. M. Medição de sucção com o método do papel filtro. In: *X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*. 1994. 515-522.
- MEIRA, Frankslale Fabian Diniz Andrade. *Estudo do processo erosivo em encostas ocupadas*. Recife, Pernambuco. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, 2008.
- MENEZES, M. R. F.. *Estudos sedimentológicos e o contexto estrutural da formação Serra do Martins, nos platôs de Portalegre, Martins e Santana/RN*. Natal, Rio Grande do Norte. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 1999.
- MITCHELL, J. K.; SOGA, K. *Fundamentals of Soil Behavior*. 3. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. 560f. v. 1.
- MORAIS, A. D.; SANTOS JR, O. F.; FREITAS NETO, O. Geotechnical properties of the Barreiras Formation sediments in the cliffs of Barra de Tabatinga, eastern coast of rio grande do norte/brazil. *HOLOS*, v. 7, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.15628/holos.2020.9560>.
- PEREIRA, I. C. B. B. A. *Contribuição ao Conhecimento do Meio Físico da Região do Complexo Estuarino-Lagunar Nísia Floresta-Papeba-Guarairas*. Natal, Rio Grande do Norte. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária. Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária-Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2004.



- PEREIRA, Kiev Luiz de Araújo. *Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos*. Natal, Rio Grande do Norte. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2012.
- SALIH, A. G. AND KASSIM, K. A. Effective Shear Strength Parameters of Remoulded Residual Soil. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17:243-253. 2012.
- SANTOS, L. M. *Caracterização Geotécnica e Estudo da Erodibilidade Associado à Sucção de um Solo da Formação Barreiras-Horto Dois Irmãos/PE*. Recife, Pernambuco. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Civil, 2001.
- SANTOS JR, O. F.; COUTINHO, R. Q.; SEVERO, R. N. F. Propriedades geotécnicas dos sedimentos da formação barreiras no litoral do Rio Grande do Norte-Brasil. *Geotecnia*, v. 134, 87–108, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.24849/j.geot.2015.134>.
- SANTOS JR, O. F. et al. Processos de instabilização em falésias: estudo de um caso no Nordeste do Brasil. *Geotecnia*, n. 114, 71-90, 2008. Disponível em: [https://doi.org/10.14195/2184-8394\\_114\\_4](https://doi.org/10.14195/2184-8394_114_4).
- SANTOS JR, O. F.; LACERDA, Willy A.; EHRlich, Mauricio. Effects of cyclic variations of pore pressure on the behaviour of a gneiss residual soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 38, n. 5, p. 5201-5212, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10706-020-01356-9>.
- SEVERO, R. N. F. *Análise da estabilidade das falésias entre Tibau do Sul e Pipa – RN*. 139f. Natal, Rio Grande do Norte. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária). Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2005.
- 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*. Recife, Pernambuco. 280f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, 2011.
- SEVERO, R. N. F.; SANTOS JR, O. F.; FREITAS NETO, O. Propriedades geotécnicas de sedimentos da formação barreiras no litoral do Rio Grande do Norte. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA*. 2006.
- SILVA, William de Souza e. *Estudo da Dinâmica Superficial e Geotécnica das Falésias do Município de Tibau do Sul – Litoral Oriental do RN*. Natal, Rio Grande do Norte. 132f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária). Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2003.
- SILVA, M. M. et al. Caracterização geológica—geotécnica de um deslizamento numa encosta em Camaragibe, Pernambuco. In: *IV COBRAE, Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas*. 345-360. 2005
- SILVA, M. M.; COUTINHO, R. Q.; LACERDA, W. A. Geotechnical characterization of the calcareous soil from a landslide in Pernambuco, Brazil. In: *XIII Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (PCSMGE)*. Margarita, Venezuela. 208-213. 2007.
- SOUZA JR., Carlos de. *Análise de estabilidade de falésias na zona costeira de Baía Formosa-RN*. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2013.
- SOUZA, Ray de Araujo. **Resistência e compressibilidade de solos da formação barreiras da região de Natal/RN**. Natal, Rio Grande do Norte. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018.
- TAQUEZ, David Esteban Diaz. *Susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa e avaliação da estabilidade de falésias sob condição não saturada: Estudo de caso no Centro de Lançamentos da Barreira do Inferno – Brasil*. Natal, Rio Grande do Norte. 216f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2017.

---

VARGAS, M. Introdução à Mecânica dos Solos. *McGRAW - HILL do Brasil*. São Paulo. Vol.1, 509, 1978.

ZHANG, Xianwei et al. Engineering geology of residual soil derived from mudstone in Zimbabwe. *Engineering Geology*, v. 277, p. 105785, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105785>.