

Ensaaios de Campo e de Laboratório na Obtenção de Parâmetros para Cálculo do Fator de Segurança de um Talude Urbano em Areia - PB

Carina Silvani

Professora, UFCG, Campina Grande-PB, Brasil, carinasilvani@gmail.com

Jucimara Cardoso da Silva

Doutoranda, UFCG, Campina Grande - PB, Brasil, jucimara.engenhariacivil@gmail.com

Milena Cristina Rocha de Souza

Doutoranda, UFPE, Recife-PE, Brasil, engmilenacrsouza@gmail.com

Samuel de Lima Lopes

Graduando, UFCG, Campina Grande - PB, samueldilopes@gmail.com

Vítor Braga de Azevedo

Doutorando, UFCG, Campina Grande-PB, Brasil, vitorba.eng@gmail.com

RESUMO: A recorrência de movimentos de massa em taludes no Brasil, principalmente em períodos chuvosos e em áreas de crescimento desordenado, gera elevados impactos socioeconômicos. Por essa razão, a análise de estabilidade de encostas é uma ferramenta imprescindível para a mitigação de riscos à população e à infraestrutura urbana. Neste sentido, o presente estudo teve como objetivo: analisar a estabilidade de um talude localizado em uma área de risco na cidade de Areia-PB. A geometria do talude foi obtida a partir de um modelo digital do terreno utilizando o software QGIS e os bancos de dados disponíveis a respeito da elevação da área de estudo. Posteriormente, realizou-se o levantamento dos parâmetros geotécnicos a serem usados nas análises. Para isso utilizou-se duas metodologias: uma baseando-se em correlações semiempíricas com o ensaio SPT e a outra a partir da medição direta através dos ensaios de cisalhamento direto em amostras coletadas *in loco*. As análises de estabilidade foram executadas considerando um cenário sobre drenada (período de estiagem) e não drenada (período de precipitação) utilizando o *software Slope W*. Os resultados indicaram que, na condição não drenada o talude apresentou instabilidade. Adicionalmente, os parâmetros obtidos em laboratório foram maiores que os obtidos por correlações com o SPT. Por essa razão, conclui-se que os ensaios laboratoriais são recomendados para uma análise mais segura e representativa do talude, podendo permitir a adoção de maiores parâmetros de resistência.

PALAVRAS-CHAVE: Encosta, Movimentos de Massa, Ensaio SPT, Ensaio de Cisalhamento Direto.

ABSTRACT: The recurrence of landslides on slopes in Brazil, particularly during rainy seasons and in areas of unplanned urban growth, results in significant socioeconomic impacts. For this reason, slope stability analysis is an essential tool for risk mitigation for the population and urban infrastructure. In this context, the present study aimed to analyse the stability of a slope located in a high-risk area in the city of Areia, PB. The slope geometry was obtained from a digital terrain model using the QGIS software and available elevation databases for the study area. Subsequently, the geotechnical parameters to be used in the analyses were determined. For this purpose, two methodologies were employed: one based on semi-empirical correlations with the SPT, and the other on direct measurement via direct shear tests on samples collected *in situ*. The stability analyses were performed using the SlopeW software, considering both a drained scenario (dry season) and an undrained scenario (rainy season). The results indicated that the slope was unstable under the undrained condition. Additionally, the parameters obtained from laboratory tests were higher than those obtained from



SPT correlations. Therefore, it is concluded that laboratory tests are recommended for a safer and more representative analysis of the slope, potentially allowing for the adoption of higher strength parameters.

KEYWORDS: Slope, Mass Movements, SPT Test, Direct Shear Test.

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por locais para construção de novas residências, somado ao grande número de famílias em situação de baixa renda, têm sido o grande responsável pelo surgimento de moradias em áreas de risco de movimentos de massa, como por exemplo a periferia brasileira. A NBR 11682 (ABNT, 2009) define essas áreas como regiões instáveis ou passíveis de serem atingidas por situações decorrentes da instabilidade de encostas, representando assim um perigo para a vida humana.

Conforme Massad (2010) os movimentos de massa são divididos em cinco diferentes categorias: o rastejo (creep), os deslizamentos de talus, os deslocamentos de blocos de rocha, as avalanches e fluxo de detritos e, por fim, os escorregamentos verdadeiros, que correspondem às principais ocorrências de movimentos de massa no Brasil. Os taludes são definidos como qualquer superfície inclinada de solo ou rocha, podendo ser natural ou construído pelo homem. A ruptura desse tipo de formação é ocasionada, geralmente, pelo aumento da tensão cisalhante em um plano de ruptura dentro da massa de solo, até atingir o momento que a tensão resistente é ultrapassada pela tensão solicitante, ocorrendo assim, o deslizamento da massa de solo. (GERSCOVICH, 2016).

A ocorrência de deslizamentos de massa desse tipo é amplamente distribuída pelo território brasileiro, sendo intensificada em períodos de chuvas intensas, sobretudo em áreas com relevo acidentado e ocupação urbana desordenada. Na região nordeste, o levantamento realizado por Santos et al. (2018) demonstrou que a predominância desses eventos é observada nos estados de Pernambuco e Bahia, refletindo características geológicas, climáticas e socioeconômicas que favorecem a instabilidade de encostas e a vulnerabilidade das populações. Ainda que a Paraíba apresenta número oficialmente menor de registros, casos pontuais demandam atenção, especialmente em municípios do Brejo Paraibano, onde o relevo e o regime pluviométrico contribuem para o risco de escorregamentos.

A cidade de Areia possui uma população de 23.829 habitantes, com um PIB per capita de R\$ 10.216,75 e encontra-se localizada no Brejo Paraibano, em uma altitude média de 600 metros acima do nível do mar (IBGE, 2020). Conforme Sousa (2020), a Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM) realizou a identificação de quatro áreas na zona urbana de Areia susceptíveis a movimentos de massa, através de processos observatórios das condições dos locais em análise. Uma dessas áreas corresponde ao talude localizado na Rua João Lourenço, que será avaliado na presente pesquisa. Na base do talude estão construídas diversas residências atualmente habitadas, logo um movimento de massa no local traria prejuízos econômicos e humanos. Com isso, o objetivo principal desta pesquisa foi avaliar a estabilidade de um talude urbano a partir dos parâmetros de projeto obtidos de ensaios de campo e de laboratório.

2 METODOLOGIA

2.1 Identificação da área de estudo

O talude analisado neste estudo está situado às margens da Rua João Lourenço, no município de Areia, Estado da Paraíba. Inserida no bioma da Caatinga, Areia apresenta um clima caracterizado como um clima tropical chuvoso. Conforme levantamento realizado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) em 2015, os períodos de chuva nessa região tendem a se estender por um longo período do ano, tendo início nos meses de janeiro/fevereiro podendo se estender até outubro.

O desenvolvimento urbano da cidade, ocorreu sobre terrenos com relevo acidentado e encostas íngremes, favorecendo a ocupação de áreas suscetíveis à instabilidade geotécnica. Em função dessas condições, a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) identificou quatro áreas de risco para deslizamentos de massa na zona urbana do município (CPRM, 2015; Sousa, 2020).

Com base nesse diagnóstico, foi selecionada, dentre os setores de riscos, o setor 3, Figura 1-a, que abrange o talude localizado na Rua João Lourenço (JL). Essa área de risco foi formada a partir da ocupação desordenada da população, que apoiam a suas moradias em áreas de corte de taludes e aterros não compactados

(Figura 1-b). Desse processo, teve como resultado a construção de 25 moradias com quantidade de pessoas em risco em torno de 100 pessoas.



(a)

(b)

Figura 1. a) Detalhe da área de estudo b) Talude da Rua João Lourenço

Fonte: Google Maps (2021)

2.2 Levantamento topográfico da geometria do talude

Para a realização do levantamento topográfico do talude em estudo, foi desenvolvido um modelo digital do terreno com o auxílio do software de geoprocessamento de código aberto QGIS 3.2.0. Esse modelo serviu como base para a geração do perfil de elevação do talude localizado na Rua João Lourenço. A construção do modelo digital de elevação utilizou a camada vetorial referente ao Estado da Paraíba, inserida no QGIS por meio de arquivos disponibilizados pelo IBGE. O perfil de elevação foi gerado a partir dos dados altimétricos extraídos do modelo digital.

No que concerne às camadas de solo que compõem o perfil do talude, esta foi elaborada a partir de sondagens usando *Standard Penetration Test (SPT)* realizado no local de estudo por Sousa (2020). Os resultados do boletim de sondagem apontaram para um comportamento de um solo com N_{SPT} crescente com a profundidade, conforme ilustrado na Figura 2-a). Além disso, a partir da avaliação tátil visual das amostras coletadas, o solo foi classificado como um solo argiloso arenoso variando entre consistências rijas a duras.

Com base nas características do terreno e nas informações do perfil do subsolo, foi possível traçar um perfil geotécnico representativo do talude da rua João Lourenço (JL), ilustrado na Figura 2-b). O talude apresenta altura aproximada de 3,0 metros e inclinação de $71,6^\circ$, sendo constituído por três camadas de solo com características distintas.

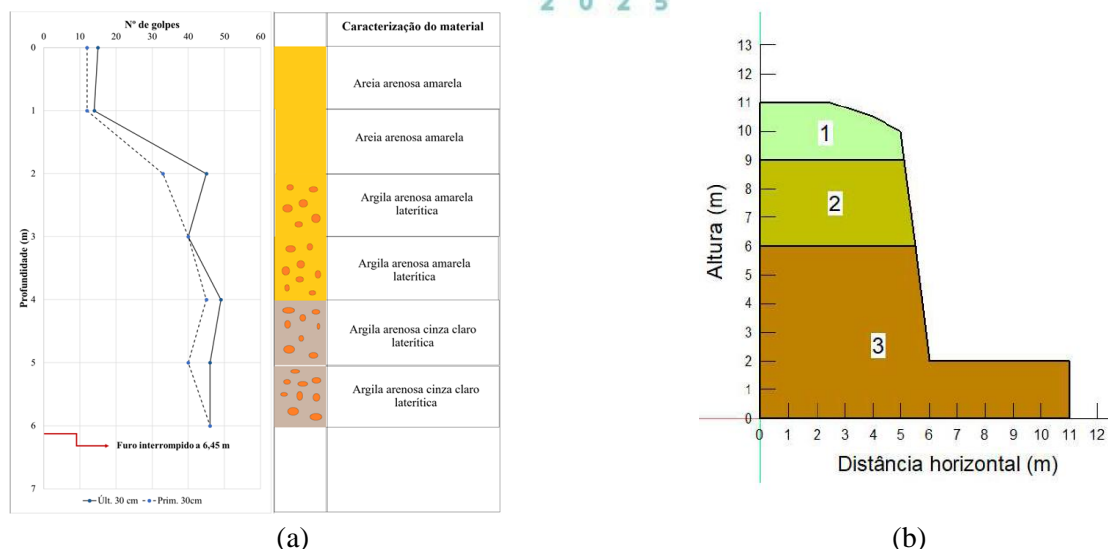


Figura 2. a) Estratigrafia da área de estudo Boletim da sondagem SPT b) Perfil do talude da Rua João Lourenço

Fonte: Adaptado de Lira (2022)

2.3 Obtenção dos parâmetros do solo

A determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento para cada uma das camadas do perfil estratigráfico do talude foi realizada por meio de duas abordagens metodológicas: (i) resultados experimentais obtidos em ensaios de cisalhamento direto conduzidos em laboratório seguindo os procedimentos normativos da ABNT NBR 12004 (1990), conforme dados disponibilizados por Sousa (2020); e (ii) aplicação de correlações empíricas consagradas na literatura a partir dos valores do índice de resistência à penetração (N_{SPT}), oriundos do ensaio SPT executado em campo.

De posse dos resultados do ensaio SPT executado em campo foram obtidos valores do índice de resistência à penetração (N_{SPT}) na ordem de 15, 40 e 46 respectivamente, para as camadas 1, 2 e 3 do talude estudado. As correlações efetuadas para estimativa do peso específico são inferências tabeladas por Godoy (1972), as quais dizem que para solos argilosos de consistência rija a dura para um N_{SPT} entre 11 e 19 pode-se adotar $\gamma=19 \text{ kN/m}^3$ e para N_{SPT} acima de 20 adota-se $\gamma=21 \text{ kN/m}^3$. Já para estimativa do ângulo de atrito do solo as correlações realizadas a partir do N_{SPT} foram obtidas pela aplicação da equação 1 encontrada em Teixeira e Godoy (1996).

$$\varphi = 15^\circ + \sqrt{20N_{SPT}} \quad (1)$$

Conforme indicado no boletim de sondagem, o talude JL não apresentou nível de lençol freático no seu perfil. Para simular os efeitos que a água tem sobre a estabilidade do maciço, buscou-se analisar a estabilidade a partir de duas condições: uma não saturada, simulando as condições naturais do talude; e a outra na condição saturada, proveniente de momento de precipitações intensas. Os parâmetros para representar esta última condição foram obtidos a partir dos resultados no ensaio de cisalhamento direto na condição inundada e também por correlações com o ensaio SPT. Os parâmetros utilizados nas análises de estabilidade, obtidos por meio das abordagens descritas, estão compilados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados nas análises de estabilidade

Camada do talude	Ensaio	Condição	Parâmetros		
			γ (kN/m ³)	ϕ (°)	C (kPa)
Camada 1	SPT	NS	19	32,32	-
		S	20	32,32	-
	CD	NS	25,5	31,3	169
		S	20	31,2	0
Camada 2	SPT	NS	21	43,28	-
		S	20	43,28	-
	CD	NS	26,58	55	111
		S	20	32,4	0
Camada 3	SPT	NS	21	45,33	-
		S	20	45,33	-
	CD	NS	25,2	51,5	130
		S	20	32,9	0

2.4 Análise da estabilidade do talude

A partir da geometria da seção e dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais identificados, definiram-se os critérios para a realização das análises de estabilidade. As análises foram conduzidas de forma determinística, com base no Método de Equilíbrio Limite (MEL), utilizando-se o método das fatias. Para o cálculo do fator de segurança, adotaram-se os métodos de Bishop e Spencer. As simulações foram realizadas no software *Slope/W (versão estudante)*, desenvolvido pela empresa *GeoSlope*. Quanto aos cenários de análises, os estudos foram conduzidos a fim de verificar a estabilidade do talude na condição saturada e não saturada. A representação de como foi modelado o talude para cada condição encontra-se ilustrado na Figura 3.

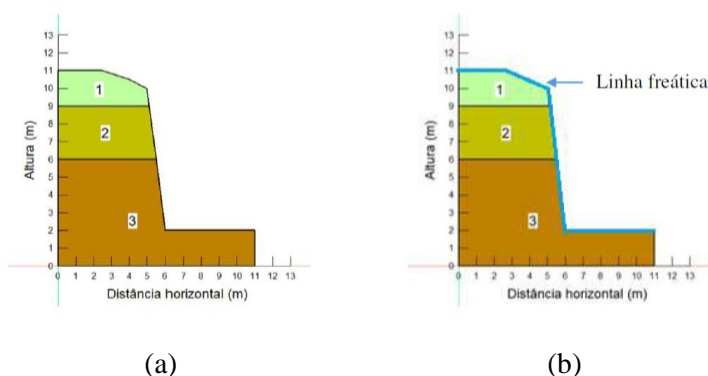


Figura 3. a) Representação do talude não saturado e b) saturado

3 RESULTADOS

3.1 Análise da estabilidade a partir dos parâmetros do SPT

A Tabela 2 expõe as análises da estabilidade saturada e não saturada considerando os parâmetros de resistência obtido por correlação com o SPT, com os métodos Bishop e Spencer. Observa-se na situação mais crítica (solo saturado) os fatores de segurança (FS) ficaram próximo de 0,2, substancialmente abaixo de 1,0, que seria o mínimo para que o talude mantenha sua integridade. Na condição não saturada (situação mais comum ao longo do ano), o FS obtido ficou em torno de 0,5, também, bem abaixo de 1,0. Ademais, não foi



identificada uma divergência significativa entre as respostas obtidas pelos métodos de Bishop (não rigoroso) e Spencer (rigoroso).

Tabela 2. Fatores de segurança obtidos com os parâmetros do SPT

Fonte dos parâmetros de resistência	Método de estabilidade	Condição	Fator de Segurança
Correlação com SPT	Bishop	Saturado	0,194
		Não saturado	0,516
	Spencer	Saturado	0,193
		Não saturado	0,517

3.2 Análise da estabilidade a partir dos parâmetros do cisalhamento direto

A Tabela 3 ilustra a análise de estabilidade do talude na condição saturada e não saturada com os parâmetros obtidos no ensaio de cisalhamento direto, pelas metodologias Bishop e Spencer. Na situação saturada o talude apresentou instabilidade, com um FS abaixo de 0,2. Na condição não saturada, apresentou FS acima de 3,7, sendo considerado um talude seguro contra ruptura. Ademais, não foi identificada uma divergência significativa entre as respostas obtidas pelos métodos de Bishop e Spencer.

Tabela 3. Fatores de segurança obtidos com os parâmetros do cisalhamento direto

Fonte dos parâmetros de resistência	Método de estabilidade	Condição	Fator de Segurança
Cisalhamento direto	Bishop	Saturado	0,129
		Não saturado	3,729
	Spencer	Saturado	0,134
		Não saturado	3,849

3.3 Comparação entre as análises de estabilidade

A saturação do talude implicou na redução expressiva de sua estabilidade, em ambas as análises feitas, corroborando com os resultados de Souza (2020). Essa desestabilização ocorre devido a perda da parcela de sucção, presente quando se tem a interface solo-água-ar no interior do solo. Essa interface gera uma força de coesão entre as partículas, aumentando a resistência ao cisalhamento. Quando o solo sofre saturação a interface se desfaz, dissipando a sucção e perdendo essa parcela de resistência (Fredlund e Rahardjo, 1993).

Tradicionalmente, a avaliação da estabilidade de taludes é conduzida por meio de correlações com o ensaio SPT. O presente trabalho demonstrou que essa metodologia gerou FS substancialmente mais baixos, implicando numa menor estabilidade para o talude em questão. Observou-se que, tanto sob condições saturadas (simulando precipitação intensa) quanto não saturadas (períodos de estiagem), os valores de FS calculados foram inferiores a 1,0, indicando uma condição de instabilidade que, na prática, não se confirma pela observação do talude em campo, em períodos de estiagem. Essa discordância ressalta a limitação das correlações empíricas de SPT em capturar adequadamente a contribuição da sucção na resistência ao cisalhamento do solo, um componente crítico para a estabilidade em solos não saturados. Além disso, as correlações derivadas do SPT, em geral, foram estabelecidas para cálculo de fundações, podendo conduzir a



2 0 2 5

uma estimativa errônea da resistência intrínseca do solo. Então, para a situação analisada, a abordagem exclusiva via SPT se mostrou estar a favor da segurança.

Porém, para uma maior representatividade dos parâmetros de resistência do solo, o ideal é a realização de ensaios específicos em laboratório com amostras indeformadas. As análises feitas a partir dos parâmetros do cisalhamento direto tendem a estar mais próximas da realidade e serem mais confiáveis. No caso em estudo, os FS se mostraram maiores com a utilização dos dados do ensaio laboratorial, em relação às correlações via SPT. Na condição saturada o talude ainda se mostrou instável, com FS abaixo de 1, porém na condição não saturada o FS obtido foi bem acima do 1,5 recomendado pela NBR 11682 (ABNT, 2009). Ademais, constata-se que, a realização do ensaio laboratorial permitiu a utilização de parâmetros maiores de resistência do solo e com mais segurança. Representando, na prática, uma otimização de recursos e redução de custos na implementação de uma obra de estabilização da encosta ou obras geotécnicas em geral na área do talude.

Como evidenciado em ambas as análises feitas, o talude se mostrou instável na condição de precipitação intensa. Considerando a proximidade de conjuntos habitacionais adjacentes à base do talude, a implementação de uma intervenção geotécnica é recomendada para assegurar a estabilidade em condição saturada. As soluções propostas podem incluir: alterações geométricas (retaludamento ou a inserção de bermas de equilíbrio), contenções estruturais visando restringir as deformações do maciço (muros de arrimo ou estruturas em gabião) ou sistemas de drenagem para reduzir a infiltração de água no solo ou acelerar a dissipação da umidade no maciço, prevenindo a saturação do material.

Cabe destacar que a saturação completa do talude é uma situação pouco provável em campo, representando de tal forma um cenário extremamente conservador, porém, foi adotada nesta pesquisa no intuito de avaliar o desempenho do maciço em uma situação-limite de risco geotécnico. E ainda, é válido ressaltar que, a metodologia empregada apresenta limitações, as análises foram conduzidas de forma determinística, sem considerar a variabilidade natural dos parâmetros do solo e os resultados obtidos em laboratório e em campo estão sujeitos a incertezas decorrentes de diversos fatores como: amostragem, condições de coleta, preparação e execução dos ensaios. Essas restrições podem influenciar a representatividade dos parâmetros utilizados nas análises numéricas e, consequentemente, os fatores de segurança obtidos.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho consistiu no estudo de estabilidade de um talude localizado na cidade de Areia/PB. O estudo foi desenvolvido buscando comparar a utilização de ensaios de campo e de laboratório na obtenção dos parâmetros a serem utilizados na análise de estabilidade. Além disso, também realizou-se a comparação entre métodos de análise rigorosos e não rigorosos, nas condições saturada e não saturada. A partir dos estudos realizados pode-se concluir que:

- O talude apresentou características de instabilidade na condição saturada, o que indica que o solo presente no local em estudo apresenta grande sensibilidade à presença de água, uma vez que o maciço se torna altamente instável quando considera-se a condição saturada. Entretanto, a saturação completa representa um cenário extremo e conservador, devido à baixa probabilidade de ocorrência em campo.
- Ao analisar os fatores de segurança obtidos pelos métodos de Bishop (não rigoroso) e Spencer (rigoroso), chega-se à conclusão que não houve influência do tipo de método utilizado para o estudo de estabilidade, uma vez que não houve variações significativas entre os valores dos fatores de segurança obtidos por ambos os métodos.
- Os resultados obtidos com os parâmetros do cisalhamento direto apresentaram maior representatividade, quando comparados aos resultados obtidos a partir do N_{SPT} . A utilização do SPT na análise de estabilidade de taludes deve ser feita com os devidos cuidados, uma vez que pode não representar a condição real de estabilidade do solo.

Por fim, a partir dos resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que, para que seja garantida a estabilidade do talude, com consequente garantia de segurança para os moradores na Rua João Lourenço, faz-se necessário a adoção de medidas corretivas no local, seja por meio de atividades de terraplanagem, que realizem a diminuição da inclinação do talude, como também por meio da construção de estruturas de contenção, como os muros de arrimo gabiões, paredes atirantadas e a implementação de sistemas de drenagem eficientes que reduzam a infiltração de água no maciço.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de Encostas*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1990). NBR 12004: *Solo – Ensaio de cisalhamento direto*. Rio de Janeiro.
- CPRM – Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais – *Serviço Geológico do Brasil*. “*Ação Emergencial para Delimitação de Áreas em Alto e Muito Alto Risco a Inundações e Movimentos de Massa - Areia – PB*”. Ministério de Minas e Energia; Departamento de Gestão Territorial, Paraíba, Brasil. 2015.
- Fredlund, D. G.; Rahardjo, H. *Soil Mechanics for Unsaturated soils*. New York: Wiley, 1993.
- Gerscovich, D. M. S. *Estabilidade de taludes: com exercícios resolvidos*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 192 p.
- Godoy, N. S. *Fundações: Notas de Aula, Curso de Graduação*. Escola de Engenharia de São Carlos/ USP, São Carlos, 1972.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Brasil). *Cidades – Panorama: Areia [2501104], PB*. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/areia/panorama>. Acesso em: junho, 2025.
- Lira, B. S. (2022) *Estudo das características geotécnicas e análise de estabilidade de taludes de solos residuais em Areia-PB*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Departamento de Geotecnia, Universidade Federal de Campina Grande / UFCG ,205 p.
- Massad, F. *Obras de Terra: curso básico de geotecnia. Curso básico de Geotecnia*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 216 p.
- Moreira, F. D., Moraes, C. G. M. S. M. O desenvolvimento urbano de Areia/PB: contribuição aos estudos de morfologia e história urbana no Brasil. *Revista de Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo*, [s. l], p. 133-225, 2009.
- Santos, C. L.; Listo, F. L. R.; Silva, O. G.; Reis, R. B. (2018) Análise metodológica de estudos referentes a eventos de movimentos de massa e erosão ocorridos na região Nordeste do Brasil. *Caderno de Geografia*. v. 28, n. 55, p. 959-979.
- Santos, C. R. (2004). *Análise paramétrica da infiltração e sua influência na estabilidade de taludes em solo não saturado*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos / USP, 118 p.
- Sousa, M. N. M. (2020) *Caracterização Geotécnica dos solos de áreas de risco do município de Areia - PB*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Departamento de Geotecnia, Universidade Federal de Campina Grande / UFCG,147 p.
- Taquez, D. E. D (2017) *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*. 216f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte/ UFRN, 216 p.
- Teixeira, A. H.; Godoy, N. S. (1996) *Fundações: Teoria e prática*. São Paulo, Pini.