

Análise Paramétrica da Variação do Fator de Segurança de Estabilidade de Talude a Partir da Alteração da Geometria e Propriedades Geotécnicas do Solo

Deise Menezes dos Santos

Aluna, Universidade La Salle, Canoas, Brasil, deisemenezes@gmail.com

Alexandre Knop

Professor adjunto de graduação, Universidade La Salle, Canoas, Brasil, alexandre.knop@unilasalle.edu.br

Gabriel Luís de Cesaro

Mestrando no PPGCI, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, decesarogabriel@gmail.com

RESUMO: O dimensionamento correto e a escolha do solo adequado durante a execução de taludes de contenção, como diques, são essenciais para evitar falhas geotécnicas. Taludes existentes exigem intervenções criteriosas, baseadas em diagnósticos precisos, análises laboratoriais e técnicas específicas para cada necessidade. Esta pesquisa analisa a estabilidade de um dique de contenção na região metropolitana de Porto Alegre, cuja integridade foi questionada após os eventos climáticos extremos de 2024. O estudo se baseia na análise de uma amostra de solo, coletado com trado e caracterizada através de ensaios de Proctor e Cisalhamento Direto, nos quais foram avaliados diferentes cenários de ruptura e seus fatores de segurança. As análises, realizadas no software GeoStudio, consideraram a geometria atual e uma proposta de alteamento do dique. Os resultados indicaram que ambas as alturas apresentaram cenários com fator de segurança abaixo do normativo, especialmente na maior altura, que, devido ao aumento da inclinação, apresentou fator de segurança menor que 1. Propuseram-se intervenções via simulações, como o uso de solo-cimento e bermas de equilíbrio, que se mostraram eficazes para garantir a estabilidade e segurança, com base nos parâmetros normativos.

PALAVRAS-CHAVE: Cisalhamento, Ensaio, Proctor, Resistência, Ruptura.

ABSTRACT: Correct dimensioning and the selection of suitable soil during the construction of containment slopes, such as dikes, are essential to prevent geotechnical failures. Existing slopes require careful interventions based on accurate diagnoses, laboratory analyses, and specific techniques for each need. This research analyzes the stability of a containment dike in the Porto Alegre metropolitan region, whose integrity was questioned following the extreme climate events of 2024. The study is based on the analysis of a soil sample, collected with a hand auger and characterized through Proctor and Direct Shear tests, in which different failure scenarios and their safety factors were evaluated. The analyses, performed using GeoStudio software, considered the current geometry and a proposal to raise the dike's height. The results indicated that both heights presented scenarios with a safety factor below the standard, particularly at the greater height, which, due to the increased slope inclination, presented a safety factor of less than 1. Interventions were proposed through simulations, such as the use of soil-cement and stability berms, which proved effective in ensuring stability and safety based on normative parameters.

KEYWORDS: Shear, Test, Proctor, Resistance, Rupture.

1 INTRODUÇÃO

A engenharia geotécnica dedica-se, em grande parte, ao estudo da estabilidade de taludes para garantir a segurança de encostas e obras de contenção. Segundo Freitas, M.A.C.,(2011), a relevância deste tema foi drasticamente evidenciada pelas enchentes de maio de 2024, que impactaram quase todos os municípios do Rio Grande do Sul e resultaram em falhas de diversas estruturas de proteção contra cheias

na região metropolitana de Porto Alegre. Este evento reforçou a necessidade urgente de revisar e recuperar tais estruturas, tornando-as mais robustas.

Gerscovich, D.M.S. (2016) destaca que, a infiltração de água é um dos principais fatores que comprometem a estabilidade, pois pode reduzir a resistência do solo e desencadear escorregamentos, principalmente em condições de saturação. Diante deste contexto, este estudo tem como objetivo principal analisar o fator de segurança de uma seção de um dique de contenção, considerando as características geotécnicas de seu solo e o impacto de alterações geométricas, como o aumento de sua altura.

Para isso, foram definidos como objetivos específicos: (i) caracterizar uma amostra de solo do dique por meio dos ensaios de Proctor e cisalhamento direto; (ii) realizar uma análise paramétrica de estabilidade com o software GeoStudio, modelando diferentes condições de saturação e poropressão; e (iii) propor soluções de remediação para os cenários que apresentaram menor fator de segurança. A análise se justifica pela necessidade de avaliar a segurança de diques existentes, fornecendo subsídios técnicos para projetos de recuperação e reforço.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A norma ABNT NBR 11682 (2009) estabelece os critérios para análise de estabilidade e os fatores de segurança mínimos para taludes e diques. Tais estruturas são fundamentais para o controle hídrico, e o solo coesivo é geralmente o mais indicado para sua construção, devido à sua estabilidade e resistência à pressão da água. A caracterização do solo é, portanto, uma etapa essencial.

No âmbito da caracterização de solos, destacam-se ensaios de grande importância. O ensaio de compactação Proctor, regido pelas normas ABNT NBR 6457 (2024) e ABNT NBR 7182 (2025), determina a umidade ótima e a densidade máxima do solo. Estes são parâmetros cruciais para garantir a compactação ideal em campo, o que resulta no aumento da resistência e na redução da permeabilidade da estrutura. Adicionalmente, o ensaio de cisalhamento direto, regulamentado pela norma ASTM D3080/D3080M (2023) na ausência de uma norma brasileira, é fundamental. Baseado no critério de Mohr-Coulomb, este ensaio permite obter os parâmetros de resistência do solo: a coesão e o ângulo de atrito (Domingues, R. T., et al., 2019; Universidade Federal de Ouro Preto, 2024).

Para a análise de estabilidade, softwares como o GeoStudio são amplamente utilizados, aplicando métodos de equilíbrio limite como o de Morgenstern-Price, que permite análises completas considerando diversas condições de carregamento e saturação. Para cenários críticos, técnicas de melhoria de solo podem ser necessárias. O solo-cimento é uma técnica eficaz que aumenta significativamente a coesão do solo, enquanto o uso de bermas de equilíbrio auxilia na segmentação e estabilização de taludes.

3 METODOLOGIA

Essa pesquisa teve como base a caracterização geotécnica de um solo de talude de contenção, por meio de ensaios laboratoriais e análise de estabilidade em diferentes cenários, utilizando modelagem computacional.

3.1 Coleta de Amostra

A amostra foi coletada em 28 de agosto de 2024, utilizando trado manual, conforme Figura 1, na qual foi coletado solo da profundidade de 0,6m até 2,65m. Desconsiderou-se a camada superficial tendo em vista a alta probabilidade de contaminação de matéria orgânica e demais materiais residuais, sendo o peso da amostra levada ao laboratório de 20,09 kg.



Figura 1. Amostra de solo coletada.

Fonte: O Autor (2024)

3.2 Caracterização do Solo

O solo foi caracterizado por meio do ensaio de compactação Proctor (energia normal), conforme a ABNT NBR 7182 (2025). A preparação das amostras seguiu os procedimentos da ABNT NBR 6457 (2024), incluindo secagem em estufa a 105 °C por 24 horas para determinação do teor de umidade. Os cálculos foram realizados com base nas normas ABNT NBR 7181 (2025) e NBR 6457 (2024).

3.3 Ensaio de Cisalhamento Direto

Foram moldados corpos de prova com as condições ideais de umidade e densidade obtidas no ensaio Proctor. O ensaio de cisalhamento direto, executado em equipamento manual, permitiu determinar os parâmetros de resistência do solo (coesão e ângulo de atrito), aplicando-se cargas verticais que resultaram em tensões normais de aproximadamente 70, 140 e 200 kPa. Os dados representam profundidades equivalentes a 3,5 m, 7 m e 10 m.

3.4 Análise de Estabilidade

As verificações de estabilidade e fator de segurança do talude foram realizadas no software GeoStudio (2019), obtidos pelo método de Morgenstern-Price configurado com função lateral meia-senóide e direção do movimento é variado conforme a aplicação analisada. A poropressão está representada com carga de 9,807kN/m³. Foi adotado o fator de segurança de 1,5, considerando o critério de impacto alto, tanto para o nível de segurança contra perda de vidas humanas quanto contra danos materiais e ambientais, segundo ABNT NBR 11682 (2009). Os dados de entrada utilizados foram os levantados na caracterização do solo através dos ensaios e a geometria estimada via software Google Earth. Nessa etapa foram estudados dois taludes, um com altura de 5m, representando o estado atual do talude estudado, e outro de 7m, simulando uma ampliação, ambos com 47m de base e 17m de crista, conforme observado através do recurso Google Earth, Figura 2, imagem de junho de 2024.



Figura 2. Vista aérea do talude.

Fonte: Google Earth (2024).

As diferentes condições de saturação e poropressão foram simuladas no software através da definição de superfícies piezométricas em diferentes elevações. Nos cenários de saturação total ou parcial, a poropressão foi calculada a partir da coluna d'água acima de cada ponto, enquanto nos cenários sem

poropressão (condição drenada), o nível d'água foi omitido do modelo.

O talude original sofre variação geométrica em toda a sua extensão, sendo os fatores de segurança estudados somente do local apontado na Figura 1, mesmo ponto em que foi feita a coleta de amostra do solo utilizado para caracterização. A Figura 3 é a representação de ambas as geometrias, onde com altura de 5m tem-se uma proporção de inclinação de 1:3 e com altura de 7m, proporção de inclinação de 1:2,14. Apresenta-se também as variações do entorno, com um canal hídrico de 6m de largura, com revestimento de concreto na espessura de 0,2m e do outro lado, um canal hídrico natural, com largura aproximada de 25m.

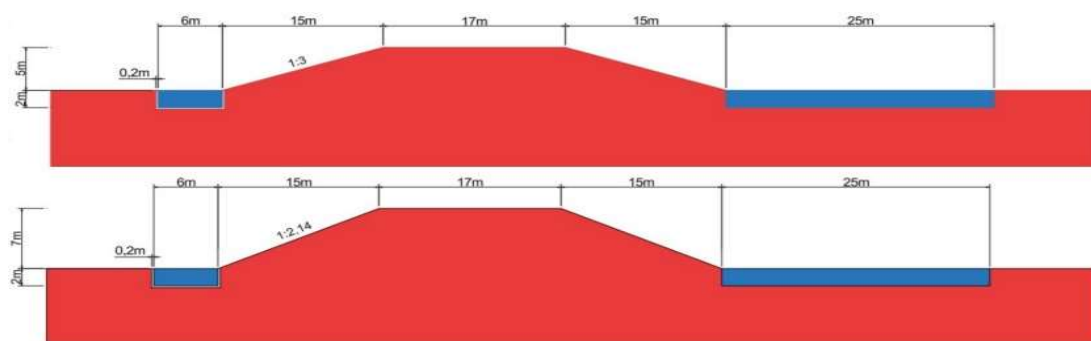


Figura 3. Geometria dos Taludes.

Fonte: O Autor (2024)

Ressalta-se que todos os cenários analisados nesta pesquisa foram testados em ambas as geometrias.

A partir da metodologia descrita, realizou-se a caracterização geotécnica do solo por meio de ensaios laboratoriais e posterior simulação numérica no software GeoStudio, visando avaliar o fator de segurança em diferentes condições de saturação e altura do talude.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaio de Proctor

Os ensaios de compactação do tipo Proctor, com energia normal, permitiram identificar os parâmetros fundamentais de compactação do solo estudado. Com esses dados foi possível encontrar a curva entre densidade máxima e umidade ótima, conforme Figura 4.

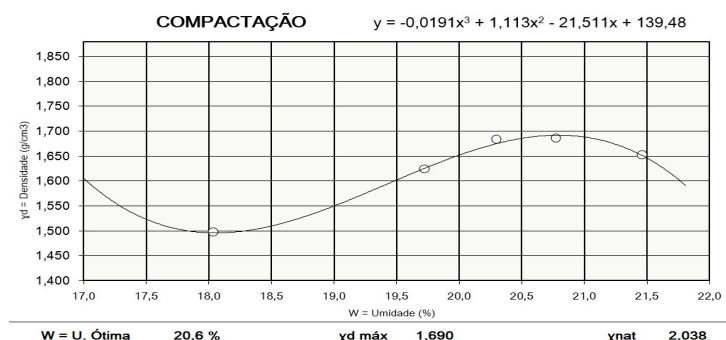


Figura 4. Dados de ensaio de Proctor.

Fonte: O Autor (2024)

Os valores de densidade máxima seca e umidade ótima estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados ensaio de Proctor em compactação de 100%.

Percentual Compactação	Volume Cilindro (cm³)	γd máx. (g/cm³)	W U. Ótima (%)	γnat (g/cm³)	Solo seco (g)	Água (ml)	Peso Final (g)
100%	988,186	1,690	20,6	2,038	1670,04	344,03	2014,06

Fonte: O Autor (2024)

A forma da curva obtida (Figura 4), associada à análise visual das características da amostra (Figura 1) e aos resultados apresentados na Tabela 1, o solo estudado aparenta características típicas de materiais argilosos de origem laterítica, com textura coesa e coloração avermelhada. A presença de manchas esbranquiçadas pode indicar ocorrência de compostos cimentantes ou minerais secundários. Para uma identificação precisa do tipo de solo, recomenda-se a realização de ensaios complementares, como análise granulométrica, limites de Atterberg, e eventual caracterização mineralógica ou química.

4.2 Ensaio de Cisalhamento Direto

Com base nos parâmetros ótimos de compactação obtidos no ensaio Proctor, foram moldados corpos de prova e posteriormente submetidos ao ensaio de cisalhamento direto.

Os resultados das leituras de tensão encontram-se na Tabela 2, enquanto a envoltória de resistência gerada está representada graficamente na Figura 5.

Tabela 2. Valores de leitura do ensaio de cisalhamento direto.

Percentua Compactação - Carga aplicada	Leitura do Anel Dinamométrico LAD	Deformação ΔL (mm) ΔH - (LAD / 100)	Defletômetro ΔH (mm)	Área A (cm ²) 5,08 x [5,08 - (ΔL / 10)]	Carga F (kgf) conforme equação de calibração	Tensão de Cisalhamento τ (kgf/cm ²) F / A
100% - 70Kg	0,130	3,299	3,300	24,131	6,432	0,267
100% - 140Kg	0,250	3,958	3,960	23,796	12,847	0,540
100% - 200Kg	0,405	4,096	4,100	23,726	21,076	0,888

ASTM D3080/D3080M:2023: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions

Fonte: O Autor (2024)

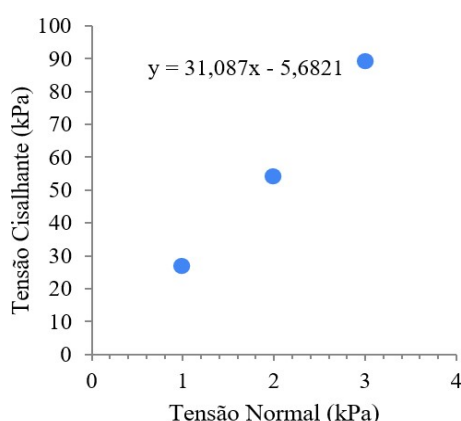


Figura 5. Envoltória de Resistência.

Fonte: O Autor (2024)

A partir da regressão da envoltória de ruptura, foram determinados os parâmetros de resistência ao cisalhamento: ângulo de atrito interno (ϕ) de 25,56° e coesão (c') de 5,68 kPa.

4.3 Verificação de Estabilidade - GeoStudio

Utilizando os parâmetros geomecânicos obtidos experimentalmente, foram realizados modelos de estabilidade no software GeoStudio (2019), por meio do método de Morgenstern-Price. As análises consideraram duas geometrias de taludes: uma de 5m (condição atual) e outra com 7m de altura (condição ampliada). As simulações compreenderam 20 cenários, variando as condições de saturação e poropressão, bem como o lado do talude em que a água incide.

A Tabela 3 apresenta os fatores de segurança obtidos nos diferentes cenários simulados.

Tabela 3. Fatores de Segurança Encontrados.

Saturação	Poropressão	Direção Ruptura	Cenário	Altura (m)	Fator de Segurança
Parcial Lado Direito	Lado Direito	Direita para Esquerda	01	05	2,034
			02	07	1,611
		Esquerda para Direita	03	05	2,169
			04	07	1,714
Parcial Lado Esquerdo	Lado Esquerdo	Direita para Esquerda	05	05	2,950
			06	07	2,070
		Esquerda para Direita	07	05	1,664
			08	07	1,306
Total	Bilateral	Direita para Esquerda	09	05	2,915
			10	07	2,055
		Esquerda para Direita	11	05	2,173
			12	07	1,676
Parcial Lado Direito	Inexistente	Direita para Esquerda	13	05	2,034
			14	07	1,620
		Esquerda para Direita	15	05	1,150
			16	07	0,827
Parcial Lado Esquerdo	Inexistente	Direita para Esquerda	17	05	1,464
			18	07	0,990
		Esquerda para Direita	19	05	1,499
			20	07	1,189

Fonte: O Autor (2024)

Todos os cenários foram avaliados em ambas as geometrias (5 m e 7 m de altura), mantendo-se constante a largura da base (47 m) e da crista (17 m), conforme definido na modelagem e observado na geometria do talude (Figura 3). As análises foram concentradas no ponto de coleta da amostra (Figura 2), garantindo coerência entre os dados experimentais e os parâmetros de entrada nos modelos computacionais.

Com o aumento da altura do talude de 5m para 7 m, observou-se uma redução média de 25% no fator de segurança (FS). Na altura de 5m, todos os cenários apresentaram FS acima de 1,0, sendo o menor valor 1,150 no cenário 15.

Cenários com solo saturado e ausência de poropressão apresentaram FS abaixo do exigido pela ABNT NBR 11682 (2009), refletindo situações críticas como enchentes seguidas de rebaixamento rápido do nível d'água.

Com a ampliação do talude, é necessário estudar o aumento da base, Com a ampliação do talude, é necessário estudar o aumento da base, pois o aumento da inclinação afeta negativamente o FS. Isso ocorre porque ao elevar a altura de 5 m (inclinação 1:3) para 7 m (inclinação 1:2,14) sem alargar a base, o talude se torna mais íngreme, reduzindo sua estabilidade. Os piores cenários simulados foram os, Cenário 16 (FS 0,827) e o Cenário 18 (FS 0,990), ambos com 7m de altura, solo parcialmente saturado e poropressão inexistente.

Para melhorar a estabilidade, foi simulado o uso de solo-cimento (peso específico 20 kN/m³, coesão 100 kPa, ângulo de atrito 40°) nas regiões 3, 5, 6 e 7, conforme Figura 6. A região 3 recebeu uma berma de 10m, e as regiões 5 a 7 uma camada de 2m de espessura. A geometria final do talude passou a ser de 47m de base, 7m de altura e 17m de crista.



Figura 6. Intervenções Sugeridas.

Fonte: O Autor (2024)

Na região 4, onde há um canal de concreto, foi necessária a inclusão de carga com material granular (rachão) na extremidade esquerda, para corrigir um ponto frágil, com carga até 14 kN/m^3 , onde assim se conseguiu simular e evidenciar o aumento dos fatores de segurança, para mais de 1,5. As Figuras 7 e 8 apresentam respectivamente a distribuição dos valores de pressão neutra ("Pressure Head") e as superfícies potenciais de ruptura.

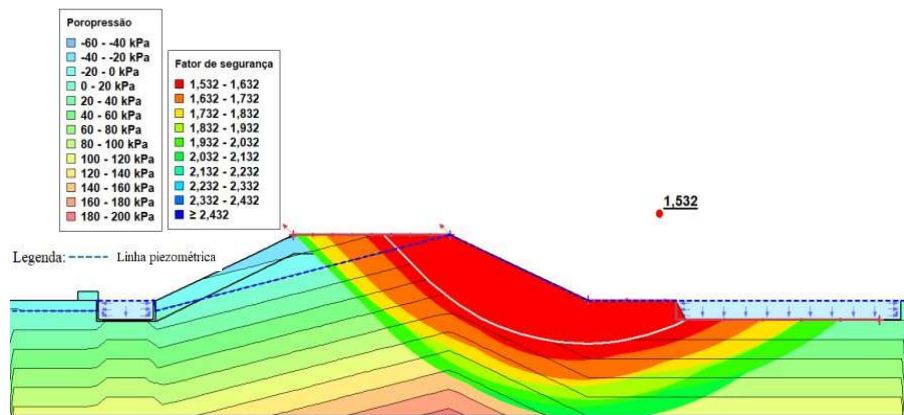


Figura 7. Verificação de Fator de Segurança Cenário 16, com intervenções.

Fonte: O Autor (2024)

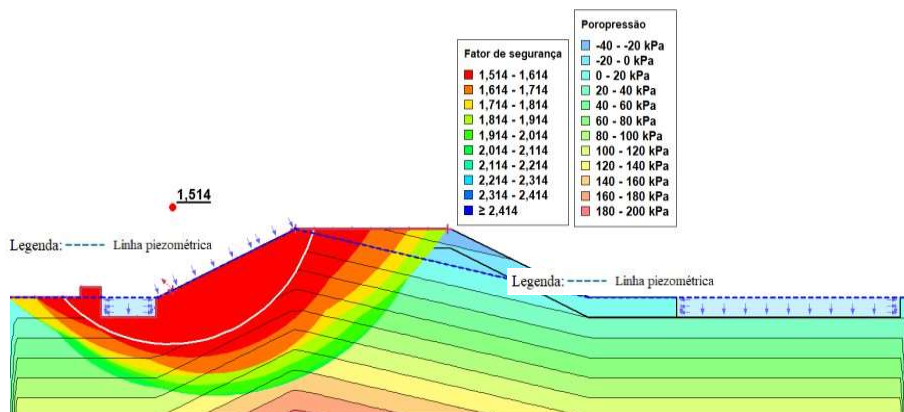


Figura 8. Verificação de Fator de Segurança Cenário 18, com intervenções.

Fonte: O Autor (2024)

Investimentos em monitoramento contínuo e a aplicação rigorosa das normas técnicas são essenciais para garantir a estabilidade e durabilidade dos taludes. Em qualquer intervenção ou remediação, é imprescindível avaliar previamente tanto a caracterização do solo existente quanto do solo a ser incorporado, além da geometria da estrutura, visto que modificações pontuais podem gerar novas fragilidades. Este estudo identificou dificuldades que podem ter impactado a precisão dos dados (Tabela 4), indicando a necessidade de investigações adicionais.

Tabela 4: Alternativas para maior precisão no levantamento de dados.

Etapas	Método Utilizado	Dificuldades	Consequências	Alternativas
Coleta da Amostra	Trado; Amostra deformada.	Tempo; Recurso financeiro; Acesso ao local.	Imprecisão na caracterização do solo.	Coleta indeformada com utilização de Shelby Tube.
Ensaio Compactação.	Proctor com amostra trabalhada.	Pouco volume de amostragem.	Inconsistência na homogeneização da água.	Realizar de ensaio com amostra inalterada; Verificar densidade in loco via método Frasco de areia; Verificar umidade do solo com Speedy Test.

Etapa	Método Utilizado	Dificuldades	Consequências	Alternativas
Ensaio de Cisalhamento Direto.	Equipamento manual e analógico.	Tempo; Técnica.	Inconsistência na velocidade aplicada; Precisão na leitura dos extensômetros.	Uso de equipamento digital devidamente calibrado e com acreditação.
Levantamento Geométrico.	Google Earth; Visita ao local.	Tempo; Acesso ao local.	Poucos pontos de análise; Imprecisão nas dimensões.	Levantamento topográfico com análise do entorno; Estudo das dimensões; Análise geométrica dos córregos laterais.

Fonte: O Autor (2024)

Recomenda-se, como continuidade, a realização de um levantamento topográfico, ensaios complementares de permeabilidade, módulo de resiliência, CBR e expansão, além da reavaliação do fator de segurança das soluções propostas nos diferentes cenários descritos na Tabela 3.

5 CONCLUSÃO

A análise demonstrou que intervenções em taludes de contenção, como o alteamento de diques, exigem uma criteriosa avaliação geotécnica. O estudo revelou que o aumento da altura do dique de 5 m para 7 m, sem a devida compensação em sua base, levou a um aumento da inclinação do talude, resultando em uma queda crítica do fator de segurança (FS) para valores abaixo de 1,0 em cenários de saturação, indicando um risco iminente de ruptura.

Este resultado sublinha a importância de caracterizar o solo existente, pois ele constitui a fundação para qualquer alteração geométrica. As simulações das medidas corretivas, que incluíram o uso de solo-cimento em camadas de reforço e a adição de uma berma de equilíbrio, mostraram-se eficazes, elevando o FS para valores acima de 1,5 e atendendo, assim, aos critérios normativos de segurança.

Conclui-se que a modelagem computacional, baseada em parâmetros de solo obtidos em laboratório, é uma ferramenta indispensável para prever o comportamento de diques e projetar reforços eficazes. No contexto da reconstrução das defesas contra cheias de Porto Alegre, este tipo de análise é fundamental para garantir a segurança e a resiliência futura dessas estruturas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7181. Solos - Análise granulométrica. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7182. Solos – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. Estabilidade de Encostas. Rio de Janeiro.
- ASTM International (2023). ASTM D3080: Standard Test Method Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Condition.
- Domingues, R. T., et al. (2019) Comparativo Entre o Ensaio de Cisalhamento Direto e o Borehole Shear Test na Obtenção dos Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento dos Solos, XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul GEOSUL 2019, Joinville, Santa Catarina.
- Freitas, M.A.C.,(2011) Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Morgenstern-Price e Correia. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Especialização em Geotecnia, Universidade do Porto de Porto, Portugal.
- Gerscovich, D. M.S. (2016) Estabilidade de Taludes. 2. ed. Oficina de Textos, São Paulo.
- Pinto, H. (1988). Mecânica dos solos: E suas aplicações - Fundamentos. 6ª ed. Rio de Janeiro, LTC, 234 p.