

ANÁLISE DE ESTABILIDADE GLOBAL DO TALUDE DO ARROIO DILÚVIO ATRAVÉS DO SOFTWARE SLIDE 2

Autor: Matheus turra (matheus.turra@edu.pucrs.br)

Orientador: Prof. MSc. Cleber de Freitas Floriano (cleber.floriano@pucrs.br)

RESUMO

A urbanização de espaços envolve cortes e aterros que afetam diretamente a estabilidade dos taludes, especialmente em regiões de alta pluviosidade. Em Porto Alegre, RS onde a média de precipitação anual é de 129,67 mm, a chuva, ao saturar o solo, impacta na coesão, infiltração, erosão e resistência. O Arroio Dilúvio, com 17.605 m de extensão e 12 km canalizados, percorre solos variados, predominantemente de origem granítica e de gnaisses, mas também depósitos aluviais próximos à calha. Essas condições elevam a poro-pressão e reduzem a resistência do solo, contribuindo para a ocorrência de escorregamentos. Estudos prévios, como o TCC de Barbosa (2019), demonstraram que, embora os materiais utilizados tenham resistência ao cisalhamento adequada, houve escorregamentos rotacionais que causaram o colapso. Isso levanta a questão: “As diversas rupturas ao longo do canal são provenientes de instabilidades globais?” O estudo busca responder por meio de pesquisa experimental a causa do colapso, se os modos de ruptura tiveram relação com a resistência ao cisalhamento dos solos na estabilidade global. Os resultados demonstram que as diversas rupturas que ocorreram no Dilúvio não têm relação com instabilidades globais, e sim com problemas de ruptura local.

Palavras-chave: estabilidade de taludes, movimentos de massa, análise de estabilidade, canais urbanos.

1 INTRODUÇÃO

Os taludes são estruturas geotécnicas presentes em diversas áreas da Engenharia Civil e Engenharia de Minas, sendo essenciais para garantir a estabilidade em encostas, cortes rodoviários, barragens, entre outros (JUNIOR, 2023). Eles se referem a superfícies inclinadas que delimitam solos ou rochas, cuja função principal é evitar deslizamentos e garantir a segurança de obras e estruturas adjacentes. A análise da estabilidade de taludes é um campo de estudo essencial para engenheiros geotécnicos, pois envolve a compreensão das propriedades mecânicas do solo, as condições hidrológicas e os esforços que atuam sobre a estrutura, dessa forma, o estudo do comportamento dos taludes ligados às adaptações do terreno ganha importância da Geotecnia (DOS SANTOS, 2022). Ao avaliar a calha do Arroio Dilúvio dentro do mapa geológico de Porto Alegre RS, desde sua nascente no Parque Natural Municipal *Saint Hilaire*, em Viamão, durante toda a sua extensão de 17.605m até a foz no Lago Guaíba,

observa-se que sua extensão canalizada e retificada está estimada em 12 km, dos quais 10 km finais tendo calha central entre as pistas da Avenida Ipiranga, abrangendo o percurso entre a Avenida Antônio de Carvalho e a foz.

A questão central é que, embora o arroio percorra um solo de granito na maior parte do curso, próximo a calha o solo é composto por depósitos aluviais e Gnaisses o que impacta fortemente na estabilidade do talude dada a dinâmica de infiltração, dinâmica de umedecimento, que provoca elevação da Poro-pressão de água ou redução da sucção, e consequentemente, a perda de resistência do solo. Além disso, fatores externos, como cargas vivas adicionais, dragagem mecânica e intemperismo de longo prazo, podem agravar o problema (ELKHOLY, 2013; Liu et al., 2022). A complexidade dos mecanismos de colapso de taludes requer estudos específicos do local para determinar técnicas apropriadas de reabilitação ou reconstrução (ELKHOLY, 2013). Neste TCC serão abordados os principais conceitos, metodologias de cálculo e técnicas de estabilização, com o objetivo de oferecer uma visão detalhada sobre os fatores que influenciam a segurança e durabilidade dos taludes, considerando a norma NBR 11682 que é específica para encostas, mas pode ser adaptada a canais. O objetivo dessa pesquisa é o estudo da estabilidade global referente ao talude que apresentou escorregamento rotacional, que foi objeto de estudo no TCC de Barbosa (2019), e analisar os respectivos fatores de segurança encontrados pelo programa computacional slide 2 com cenários diferentes geométricos existentes do canal. Abaixo, a foto do local exato, onde se encontram as oito placas de concreto danificadas referenciadas no trabalho de Barbosa (2019).

Figura 1: modulação danificada



Fonte: Barbosa (2019, p.19)

Para esta pesquisa foram avaliadas três (3) seções de seção típica transversal a jusante do arroio Dilúvio que estão localizadas nas zonas de ruptura do canal. Uma das limitações do trabalho é a premissa de que a diferença de carga total do tardo do muro, em relação a frente do muro, é de 0,5 metros. Embora essas variações possam ser tanto maiores quanto menores em função da

permeabilidade do conjunto de materiais envolvidos e da capacidade de reequilíbrio hidráulico do canal. Parâmetros como coesão, peso específico e ângulo de atrito, bem com o nível do lençol freático, citados no trabalho de Barbosa (2019) foram primordiais para as análises no *slide 2*. Os métodos de *Bishop* simplificado e *Morgstern-price* foram utilizados para a análise dos taludes no programa *slide 2*, o que será tratado mais adiante neste estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será abordado alguns conceitos e formulações fundamentais para o entendimento do objetivo do presente trabalho de forma mais abrangente.

2.1 Movimentos de Massa

De acordo com Gerscovich (2016), movimento de massa é qualquer deslocamento de um certo volume de solo, que são influenciados por diversos fatores como: intemperismo, declividade acentuada de taludes, água no solo e sobrecarga.

2.2 Classificação dos movimentos do solo

Há inúmeras propostas de classificação de movimentos de massa, porém a de Varnes (1978) é a mais adotada internacionalmente, entretanto toda classificação está embasada em condições climáticas e geológicas do local. Augusto Filho (1992) desenvolveu um estudo sob a classificação de Varnes (1978) e adequou para ambientes tropicais, como o Brasil (GERSCOVICH, 2016). A tabela 1 resume esta classificação de Augusto Filho (1992).

As corridas são deslizamentos de encostas com grande volume de material e estão ligadas a eventos pluviométricos excepcionais. São mais raros que os deslizamentos, mas com poder destrutivo maior e alto nível de alcance, possuem velocidade elevada e ocorrem quando o solo perde suas características e começa a se comportar como um fluido. As corridas e os deslizamentos são os movimentos que ocorrem com maior frequência no Brasil (RIFFEL et al., 2016; GERSCOVICH, 2016).

Quedas podem ser também chamadas de rolamento de blocos, são comuns em taludes com cortes de rocha. Se referem a blocos de rocha que despencam em queda livre, e podem ser classificados em quedas por descalçamento ou tombamento (GERSCOVICH, 2016).

O rastejo, segundo Massad (2003), é um movimento superficial do solo, lento, que pode ser mais lento em épocas de seca ou mais acelerado em épocas de chuva. Com o tempo, caso evolua, um rastejo pode vir a se tornar um escorregamento.

Tabela 1: Tipos de movimentações de massa

Processos	Características do movimento, material e geometria
Rastejo ou Fluência	Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes Solo, rocha alterada/fraturada Geometria indefinida
Escorregamentos	Poucos planos de deslocamento Velocidades médias a altas Pequenos e grandes volumes de material Geometria e materiais variáveis Planares solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza Circulares solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas Em cunha solos e rochas com dois planos de fraqueza
Quedas	Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado Velocidades muito altas Material rochoso Pequenos a médios volumes Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc Rolamento de matacão Tombamento
Corridas	Movimento semelhante ao de um líquido viscoso Desenvolvimento ao longo das drenagens Velocidades médias a altas Mobilização de solo, rocha, detritos e água Grandes volumes de material Extenso alcance, mesmo em áreas planas

Fonte: Freu (2012) citado em Barbosa (2019, p. 4)

De acordo com Riffel et al. (2016), escorregamento ou deslizamento são movimentos rápidos, com limites laterais e de profundidade definidos. Acontecem quando as tensões cisalhantes, que atingem a resistência ao cisalhamento do solo, e ocorrem devido às chuvas críticas e/ou por força gravitacional.

Os deslizamentos são os únicos que podem ser analisados estaticamente, aplicando método de equilíbrio-limite, e diversas são as suas possíveis causas de ocorrência. Podem ser devido a alteração da geometria do talude, sobrecargas, infiltração de águas da chuva, desmatamento e poluição, destruindo a vegetação do talude (MASSAD, 2003).

Existem diversas denominações para classificação dos deslizamentos, e varia de acordo com as condições geomorfológicas do local. As rupturas podem ser planares ou translacionais, rotacionais ou circulares, em cunha, ou uma combinação destes (GERSCOVICH, 2016).

Os escorregamentos planares acontecem quando há um material superficial de baixa resistência sob um embasamento rochoso, gerando planos de fraqueza. Quando as camadas de baixa resistência não são paralelas a superfície do talude a ruptura se dá em forma de cunha (GERSCOVICH, 2016).

Já o deslizamento rotacional ou circular, como o próprio nome diz, tem uma superfície de ruptura em forma de círculo, remetendo a um formato de colher. Podem ser múltiplos quando mobilizam mais de uma ruptura e ocorrem mais frequentemente em solos homogêneos, portanto é o tipo mais comum de ruptura em aterros (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

2.3 Métodos de cálculo de estabilidade

Segundo Caputo (2017), um talude é uma massa de solo com três forças atuantes: o peso, resistência ao cisalhamento e o escoamento de água. Os métodos de cálculo de análise de estabilidade de taludes são baseados na premissa de haver equilíbrio no solo, e este se comportar como um material rígido-plástico, prestes a entrar em ruptura, este método é chamado de método de equilíbrio-limite.

Em 1916, os suecos desenvolveram um método (MÉTODO SUECO), a partir do método de equilíbrio-limite, que subdividia a massa rompida de solo em lamelas ou fatias. Foi descoberto que as linhas de ruptura em um talude eram em forma de círculo, daí o conceito de círculo de atrito. Na Figura 2 pode-se analisar as forças atuantes em um talude de acordo com o método das fatias.

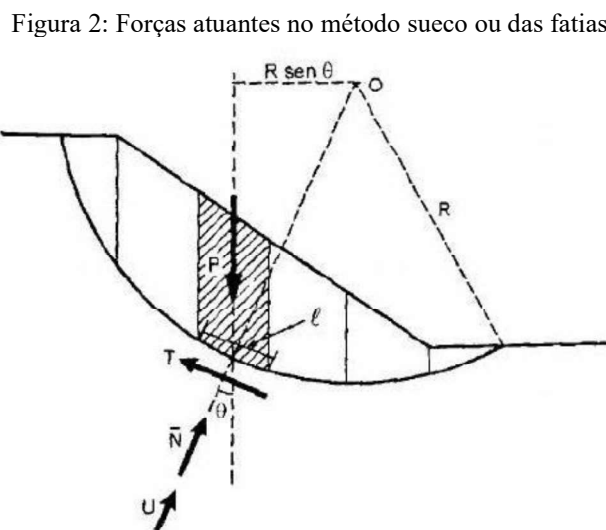


Figura 2: Forças atuantes no método sueco ou das fatias

Fonte: Massad (2003) apud Barbosa (2019, p. 6)

Neste método, primeiramente o talude é subdividido em fatias, considerando que a base dessas fatias é linear, entretanto deve-se certificar que a base da fatia está localizada no mesmo material, portanto não devem ter dois materiais diferentes na base da fatia. Depois se executa o equilíbrio de forças por fatia, considerando que a tensão normal presente na base das fatias é formada pelo peso próprio do solo contido em cada uma delas. Após isso, é calculado um fator de segurança através da equação de equilíbrios de momentos (GERSCOVICH, 2016).

Para o cálculo de coeficiente de segurança deve-se analisar os momentos resistentes, ou seja, as reações estabilizadoras, sobre os momentos atuantes, ou seja, as ações instabilizadoras, ou seja, como afirma Nunes (2021), o coeficiente de segurança é definido como o resultado da divisão entre a resistência e a tensão cisalhante. Segundo a Equação 1 (CAPUTO, 2017),

$$S = \frac{M_e}{M_i} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

S = Fator de segurança

Me = Momentos estabilizantes

Mi = Momentos instabilizantes

Isto deve ser realizado para cada fatia do talude até ser encontrado um fator de segurança mínimo, e este ser o fator crítico do talude. Segundo a norma NBR 11682/2009 que se refere a estabilidade de encostas preconiza a seguinte averiguação do fator de segurança em relação a segurança de vidas humanas e danos ambientais.

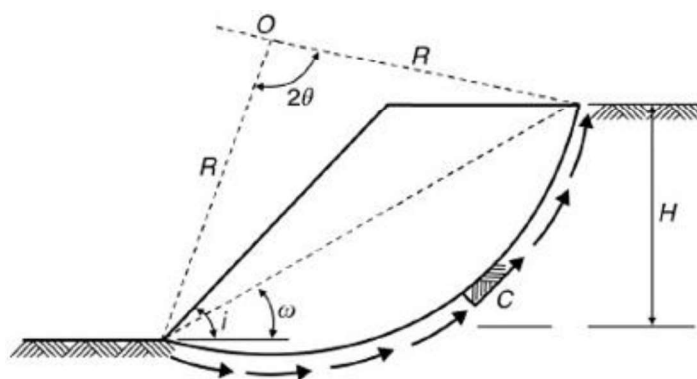
Segundo Gerscovich (2016), o método das fatias é o mais usual para cálculos de estabilidade, pois o método permite que o solo seja heterogêneo, admite a irregularidade do talude e inclui a distribuição de poro-pressão no solo.

Baseado no método das fatias, existem diversas variantes como, os mais comuns, Fellenius (1927), *Bishop* simplificado (1955) e *Morgenstern-Price* (1965). Todos os estes fazem algum tipo de simplificação e equilíbrio de forças ou momentos para resolver as equações e obter o resultado do fator de segurança. Portanto alguns métodos são mais rigorosos que outros de acordo com o nível de simplificação.

Segundo Massad (2003), Fellenius (1927) estendeu a análise e considerou também a coesão na resistência ao cisalhamento do solo, porém não considera forças entre as fatias de solo. Esta simplificação faz o equilíbrio de forças na direção da normal, ou seja, à base da fatia.

Como mostra Figura 3, o centro O do círculo crítico que se refere a ruptura do talude está na vertical que passa pelo centro do talude, ou seja, o equilíbrio de forças se dá na direção do raio do círculo.

Figura 3: Método de Fellenius



Fonte: Caputo (2017) apud Barbosa (2019, p. 8)

$$F_S = \left[\frac{\sum [c' \cdot l + (P \cos(\theta) - u \cdot \Delta x \sec(\theta) \cdot \tan(\phi'))]}{\sum (P \sin(\theta))} \right] \quad (\text{Equação 2})$$

- c' = Coesão do solo
 l = Comprimento da base da fatia analisada
 P = = Inclinação da base da fatia
 u = Poropressão na fatia
 Δx = Largura da fatia
 ϕ' = Ângulo de atrito

O método de Fellenius (1927), Equação 2, é usado por ser simples matematicamente, em geral, é mais conservador que outros métodos, como é o caso de *Bishop* Simplificado (1955), o grande limitador do método de Fellenius (1927) é que quando a massa de solo tem poro-pressões elevadas, este pode induzir ao erro (MASSAD, 2003).

As simplificações de *Bishop* (1955) são que as parcelas verticais das forças que atuam nas laterais das fatias se anulam, restrito a superfícies com ruptura circular além de considerar um fator segurança constante ao longo da ruptura (GOMES, 2003).

Já o método de *Bishop*, inicialmente desenvolvido para análise de superfícies circulares, demonstra aplicabilidade também em superfícies não circulares, conforme Albataineh (2006). O método opera sob certas premissas, incluindo a concepção de que a falha ocorre por meio da rotação de uma massa de solo em uma superfície de deslizamento circular centrada em um ponto comum. Adicionalmente, assume-se que as forças laterais nas fatias são horizontais, eliminando tensões de cisalhamento entre estas fatias (BISHOP, 1955). A força normal total é tratada como atuando no centro da base de cada fatia, sendo obtida pela soma das forças na direção vertical. Estas premissas fundamentais são essenciais para o adequado entendimento e aplicação do método de *Bishop* em análises de estabilidade geotécnica. A Equação 3 exemplifica o método em um talude.

1. Características:

- a. Considera o equilíbrio de forças verticais e momentos no talude.
- b. Divide o talude em fatias verticais, assumindo que as forças de cisalhamento agem nas bases e laterais das fatias.
- c. Simples de implementar e computacionalmente eficiente.

2. Suposições:

- a. As forças interslice (entre as fatias) são horizontais.
- b. O talude tem uma superfície de ruptura circular.

3. Equação Principal: O fator de segurança (FSFSFS) é calculado iterativamente usando:

Na figura 3 pode-se notar o surgimento de forças entre lamelas, componente horizontal E_n e componente vertical V_n , enquanto na Equação 3 a formulação utilizada por Bishop.

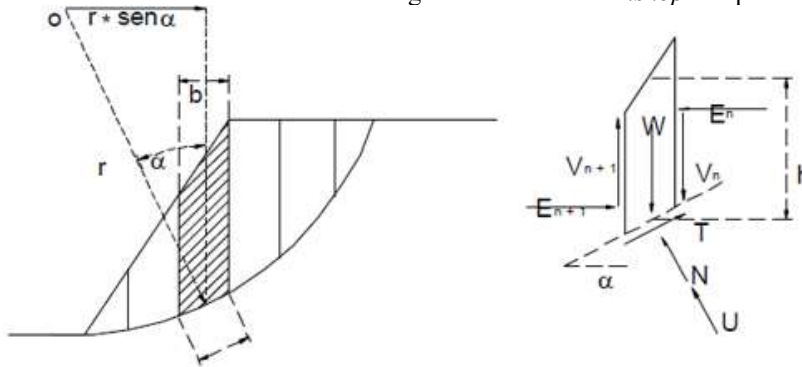
$$F_S = \left[\frac{\sum [b \cdot c' + (W - u \cdot b) \cdot \tan(\phi')]}{\sum (W \cdot \sec(\alpha))} \cdot \frac{1}{M(\alpha)} \right] \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

- c' = Coesão do solo
- b = Largura da fatia analisada
- W = Peso da fatia
- u = Poropressão na fatia
- ϕ' = Ângulo de atrito
- α = Ângulo entre a horizontal
- $\tan(\theta')$ Tangente da base da fatia

As limitações do método de Bishop basicamente duas (Figura 4): funciona melhor para superfícies de ruptura circulares e não considera forças verticais entre fatias.

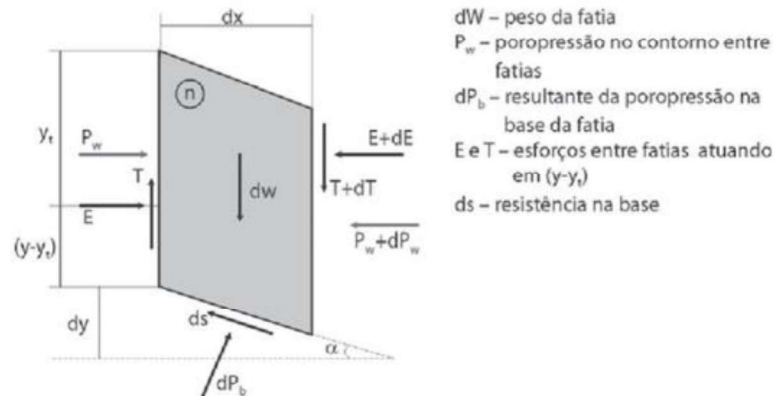
Figura 4: Método de *Bishop* Simplificado



(Fonte: Gomes (2003) apud Barbosa (2019, p. 09)

Por fim o método de *Morgenster-Price* (1965) é considerado um método rigoroso pois satisfaz todas as equações de equilíbrio e admite qualquer superfície de ruptura não apenas rupturas circulares, porém é indispensável o uso de programas computacionais devido ao elevado número de iterações necessárias e cálculos complexos (Figura 5). Ao contrário dos outros métodos que utilizam equilíbrio entre forças ou momentos, *Morgenstern-Price* varia de acordo com uma função da resultante das forças entre as fatias (GERSCOVICH, 2016).

Figura 5: Fatia de Morgenstern-Price



Fonte: Gerscovich (2016) apud Barbosa (2019, p. 10)

A utilização do método *Morgenstern-Prices* deve a suas características, segundo a literatura pesquisada, de ser um método mais geral e robusto, estar fundamentado no equilíbrio total (forças e momentos) e permite superfícies de ruptura arbitrárias (não apenas circulares) e considerar as forças interslice com componentes horizontais e verticais.

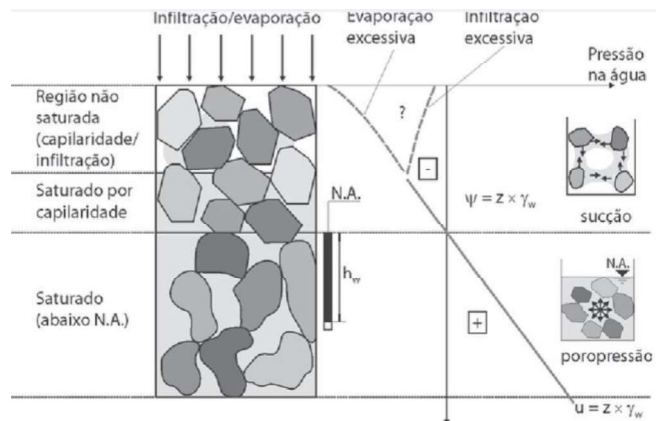
Importante salientar que o modelo supõe que as forças interslice podem ter direções variadas, e sua forma é controlada por uma função predefinida (ex.: linear ou senoidal), e que o modelo resolve iterativamente tanto para o equilíbrio de forças quanto para o equilíbrio de momentos. Além disso, cabe lembrar que a equação principal para o método envolve resolver sistemas de equações simultâneas, em que:

1. o fator de segurança (FS) é relacionado às forças e momentos em cada fatia;
2. as forças *interslice* são expressas como funções da posição e forma da superfície de ruptura.

A vantagem do método *Morgenstern-Price* é que pode ser aplicado a geometrias complexas e condições heterogêneas, o que permite análise mais detalhada das forças no talude, muito embora seja computacionalmente mais exigente, o que impõe *softwares* especializados para resolução prática.

Considerando os modelos de *Bishop* e *Morgenstern-Price*, segundo a literatura da pesquisa, o modelo de *Bishop* é mais simples, eficiente para taludes homogêneos e superfícies circulares (Figura 6), enquanto o de *Morgenstern-Price* é mais versátil, ideal para condições complexas, mas demanda maior poder computacional. Existem também outros métodos, baseado na teoria das fatias, como Janbu (1954, 1957, 1973), Spencer (1967) e Sarma (1973) (CAVALCANTE, 2023).

Figura 6: Perfil de Poro-pressão no solo



Fonte: Gerscovich (2016) apud Barbosa (2019, p.12)

Isto pode ser matematicamente observado de acordo com o Princípio de Tensões proposto por Terzaghi (1967). Sabe-se que a pressão na água é calculada por:

$$\mu = \gamma_w * h_w \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

μ = Poropressão ou pressão neutra

γ_w = Peso específico da água

h_w = Profundidade da água em relação ao nível freático

Terzaghi demonstrou que a tensão total em um ponto de solo qualquer é a soma de dois componentes: a tensão efetiva, transmitida pelo contato entre as partículas, e a pressão d'água, chamada Poropressão ou pressão neutra. Portanto Terzaghi estabeleceu que a tensão efetiva para solos saturados se dá conforme a Equação 5:

$$\sigma' = \sigma - \mu \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

σ' = Tensão efetiva

σ = Tensão total

μ = Poropressão ou pressão neutra

Desta forma, pode-se concluir que, quando um solo está abaixo do nível freático, ocorre um decréscimo das tensões efetivas, forças de sucção, diminuindo a resistência ao cisalhamento, podendo levar um talude ao colapso.

2.4 Erosão Hídrica em Taludes

As erosões, ou remoção de material superficial do solo, podem ser classificadas como um desenvolvimento natural, são alavancadas por um conjunto de fatores dinâmicos, que podem perturbar a estabilidade de um talude. A possibilidade de desenvolver processos erosivos são influenciadas por fatores externos e internos, segundo o quadro de Gerscovich (2016), cada fator atua de forma isolada ou em conjunto operando em situações de escorregamentos, solapamentos, erosão superficial ou subterrânea, conforme Tabela 2.

Tabela 2: Fatores causadores de erosão

Fatores externos	Potencial de erosividade da chuva
	Condições de infiltração
	Escoamento superficial
	Topografia (declividade e comprimento da encosta)
Fatores internos	Fluxo interno
	Tipo de solo
	Desagregabilidade
	Erodibilidade
	Características geológicas e geomorfológicas
	Presença de trincas de origem tectônica
	Evolução físico-química e mineralógica do solo

Fonte: Gerscovich (2016) apud Barbosa (2019, p. 13)

A erosão hídrica, deflagrada pela ação de chuvas, é uma das principais maneiras de perda de solo em ambientes tropicais. Julgando isto, diversas são as técnicas de recobrimento de taludes com o intuito de aliviar os impactos ambientais de solos expostos a manifestações erosivas. Estas técnicas podem ser desde barreiras físicas de proteção, a soluções com geomantas e técnicas de bioengenharia.

2. 5 Peso Específico do Solo

O peso específico dos grãos pode ser estimado de acordo com as tabelas de Godoy (1972) (Tabelas 3 e 4). Para solos arenosos ou granulares é relacionado com sua compactidade e pelo número de golpes do SPT, e para solos argilosos ou coesivos, relacionado com sua consistência em conjunto com o número de golpes.

Tabela 3: Peso específico dos grãos para solos arenosos

N (golpes)	Consistência	Peso específico (kN/m³)		
		Seca	Úmida	Saturada
≤ 5	Fofa	16	18	19
5 - 8	Pouco compacta	16	18	19
9 - 18	Medianamente compacta	17	19	20
19 - 40	Compacta	18	20	21
> 40	Muito Compacta	18	20	21

Fonte: Godoy (1972) apud Barbosa (2019, p. 17)

Tabela 4: Peso específico dos grãos para solos argilosos

N (golpes)	Consistência	Peso específico (kN/m³)
≤ 2	Muito mole	13
3 - 5	Mole	15
6 - 10	Média	17
11 - 19	Rija	19
≥ 20	Dura	21

Fonte: Godoy (1972) *apud* Barbosa (2019, p. 17)

2.6 Coesão

Se em solos arenosos o principal fator responsável pela resistência ao cisalhamento é o ângulo de atito, como dito anteriormente, em solos argilosos o parâmetro que garante a resistência ao cisalhamento é a coesão. A Tabela 5 desenvolvida por Alonso (1983) relaciona o número de golpes do SPT com a consistência das argilas para a obtenção de um valor aproximado de coesão aparente.

Tabela 5: Peso específico dos grãos para solos argilosos

N (golpes)	Consistência	Coesão (kPa)
< 2	Muito mole	< 10
2 - 4	Mole	10 - 25
4 - 8	Média	25 - 50
8 - 15	Rija	50 - 100
15 - 30	Muito Rija	100 - 200
> 30	Dura	> 200

Fonte: Alonso (1983) *apud* Barbosa (2019, p. 17)

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia do trabalho constou primeiramente da realização de uma revisão bibliográfica referente ao tema, envolveu o levantamento de fontes, cruzamento de referências obtidas da literatura e estudos de numerosos artigos técnico-científicos em periódicos e um número restrito de livros foi igualmente consultado, com a finalidade de proporcionar o embasamento teórico necessário para se atingir os objetivos da pesquisa.

A análise utilizou como referência um talude real no município de Porto Alegre/RS, o qual já foi anteriormente utilizado em um estudo de Leonardo Teixeira Barbosa (2019), com a análise feita por meio de método de equilíbrio limite.

3.1 Método de Pesquisa

O estudo da estabilidade dos taludes será realizado por meio de métodos baseados na Teoria do Equilíbrio Limite, mais comumente utilizada nos problemas de estabilidade e caracterizada pela formação de uma superfície de ruptura plana, circular ou mista, onde a razão entre a tensão cisalhante e a tensão normal atinge um valor crítico.

Esta pesquisa foi planejada em quatro etapas principais: Revisão Bibliográfica, Ambientação e Ensaio no *software Slide 2* e Análise Paramétrica. Para realizar a análise paramétrica, e posteriormente obter equações capazes de prever o fator de segurança a partir de parâmetros relativos às características do talude, foram realizadas diversas simulações, variando individualmente cada um deles.

A altura (h) foi um fator estudado considerando a geometria em relação aos parâmetros do solo, utilizando valores referentes ao ângulo de atrito (ϕ), coesão (c) e peso específico natural (γ_n) do solo.

O *Software Slide 2* é um programa da **Rocscience** usado para analisar a estabilidade de taludes simples e homogêneos, calculando o fator crítico de segurança e a superfície de deslizamento circular correspondente. Ele é utilizado por empresas da área geotécnica para analisar a probabilidade de falha ou o fator de segurança de superfícies de falha em solo ou rochas. Permitindo assim: criar e analisar modelos complexos de forma rápida e fácil, modelar a dinâmica da água subterrânea, carregamento externo e suporte de várias maneiras de analisar a estabilidade de superfícies de deslizamento. Utiliza métodos de equilíbrio de limite de fatia vertical ou não vertical e realiza a análise de infiltração de águas subterrâneas de elementos finitos.

3.2 Método de Trabalho

3.2.1 Aplicação e/ou Teórica / Desenvolvimento

De acordo com Barbosa (2019), na medição de nível d'água foi realizado três leituras estimadas em cada zona separada pelo dique, jusante e montante, pois apresentam diferentes cotas, e feito uma média entre as leituras. Vale ressaltar que, a medição foi feita no dia 07/10/2019 após um período de chuvas com o acumulado de 106,4 milímetros entre os dias 02/10/2019 e 06/10/2019 segundo o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), no dia da medição não choveu.

Tabela 6: Leituras de NA à jusante do dique

Leitura	Nível d'água (m)
L1	0,21
L2	0,25
L3	0,27
Média	0,243

Fonte: dados coletados em Barbosa (2019, p. 21)

De acordo com os valores da Tabela 6, retirada do trabalho de Barbosa (2019), utilizou-se o nível de água de 0,24m a jusante para o presente trabalho. Foi resgatado do mesmo trabalho, valores de peso específico, coesão e ângulo de atrito de todos os materiais necessários para esta pesquisa. A coesão da areia do aterro será tratada mais adiante. Os três (3) modelos utilizados para as análises no programa *slide 2* foram retirados do Departamento Nacional de Obras e Saneamento, e são referentes aos locais onde houve rompimento no arroio Dilúvio. Os desenhos citados serão publicados mais adiante após a conclusão final do presente estudo.

De acordo com Barbosa (2019), foi observado que o fundo do canal é de material natural sedimentar arenoso composto por areia grossa e cascalho. Este material é retirado das diversas dragagens realizadas naquele ponto do canal, além de muito lixo e outros resíduos, sendo este material arenoso responsável pela tensão tangencial crítica a ser exercida pelo fluxo d'água na base ou fundo do canal. A presença deste material sedimentar dificultou ainda mais as leituras. De acordo com Barbosa (2019) ainda, com o propósito da contenção ser rígida monolítica sem aceitar nenhum deslocamento, utilizou-se como propriedades do muro e fundações o peso específico da rocha granito de cerca de 28kN/m³, de acordo com ABNT NBR 6120. Para a coesão foi estipulado o valor médio de 500kPa para a argamassa compreendida entre as pedras de granito, e foi obtido o ângulo de atrito da contenção de cerca de 60°. Entretanto, nos cálculos do programa computacional foi inserido o valor de 50° a favor da segurança e devido ao desgaste dos materiais inspecionados in loco.

A partir do entendimento de que a areia do aterro é composta por material sedimentar de granito, e apresenta uma grande quantidade de argila mole no horizonte, foi alterado os valores de coesão para os areiais de aterro. Este material que estava inicialmente citado por Barbosa (2019) como sendo de valores iguais a zero, para valores maiores de coesão, foram utilizados de modo a obter uma análise mais adequada no programa *slides 2* para esses respectivos valores. De acordo com a Tabela 7 e 8, a seguir.

Tabela 7: Valores de coesão dos modelos 1 e 2 e seus respectivos materiais

coesão(Kpa)	materiais
4	Areia aterro
0	Areia intermediária
0	Areia fundo
500	Muro de gabião

Fonte: Barbosa (2019). Obs. O valor para a coesão da areia do aterro foi modificado. Barbosa (2019) utilizou inicialmente 0. Este estudo utilizou 4 Kpa para os modelos 1 e 2 de seção típica transversal.

Tabela 8: Valores de coesão do modelo 3 de seção típica transversal e seus respectivos materiais

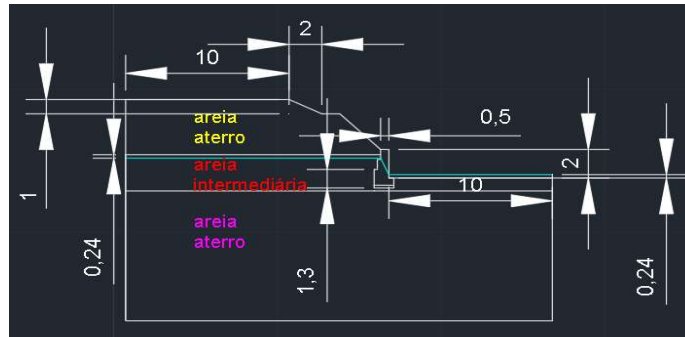
coesão(Kpa)	materiais
6	Areia aterro
0	Areia intermediária
0	Areia fundo
500	Muro de gabião

Fonte: Barbosa (2019). Obs.: Foi modificado o valor de coesão para areia de aterro, utilizando 6 Kpa. No trabalho de Barbosa (2019) foi utilizado zero para coesão de areia aterro.

3.2.2 Aplicação e/ou Teórica / Desenvolvimento

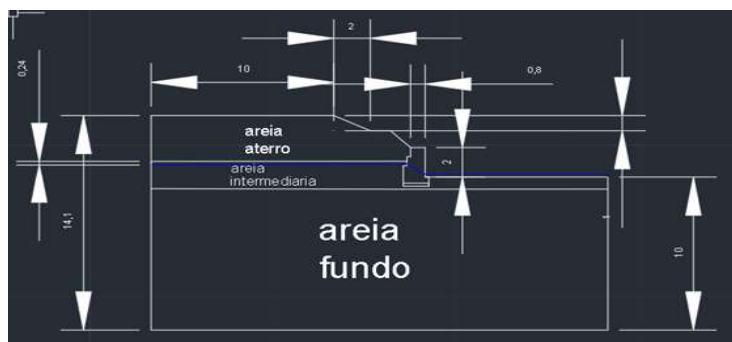
As geometrias das três (3) seções estudadas estão representadas na Figura 7. Em azul está a linha representando a cota do nível d'água ou lençol freático do talude. A altura do muro de contenção está com 2 metros. O aterro de cima ficou com 2 metros de base e 1 metro de altura em todas as seções. Esses valores de inclinação do aterro de cima, são variáveis conforme os perfis retirados do Departamento Nacional de Obras e Saneamento (será publicado após o apêndice final). Optou-se pelos valores acima mencionados devido a inclinação do talude visando a geometria mais próxima possível da realidade em questão. Os três (3) modelos são apresentados nas Figuras 7, 8 e 9 desenvolvidas no *Autocad*.

Figura 7: Desenho da geometria do modelo 1 de seção típica transversal utilizada pelo *Autocad*.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 8: Desenho da geometria do modelo 2 da seção típica transversal utilizada pelo Autocad



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 9: Desenho do modelo 3 da seção típica transversal utilizada pelo *Autocad*



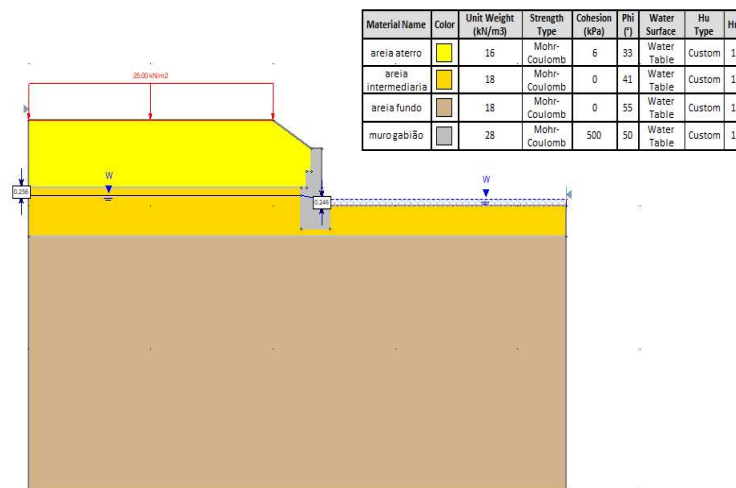
Fonte: Elaborada pelo autor

Com relação as três (3) seções desenvolvidas pelo autor utilizando o *Autocad*, foi considerado o talude do lado esquerdo como desenho de seção típica que ficou sujeito a análise (mais adiante será postado os desenhos após o apêndice).

As cargas atuantes no entorno do arroio Dilúvio foram consideradas a partir do critério da sobrecarga de 25 kn/m² (45 toneladas) devido ao fluxo de veículos constante da Avenida Ipiranga com 10 metros transversais da posição do talude analisado. Há também uma ciclovias, que não foi incluída na análise por sua irrelevância em termos de cargas e sobrecargas.

Com relação ao valor da sobrecarga referida acima (25 KN/m³), foi estipulado através de um minucioso estudo junto ao professor orientador Cléber de Freitas Floriano. Nas Figuras 10, 11, 12, e 13 elaboradas pelo autor, estão as respectivas representações das seções por meio de desenhos dos modelos, aplicados no programa *slide 2* para análise, e seus respectivos valores de fator de segurança encontrados.

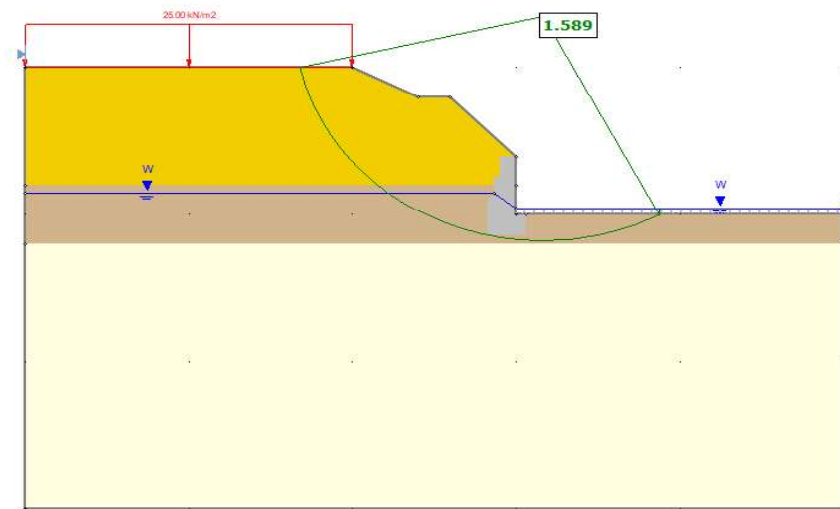
Figura 10: desenho do modelo 1 de seção típica transversal pelo slide 2



Fonte: Elaborada pelos autore

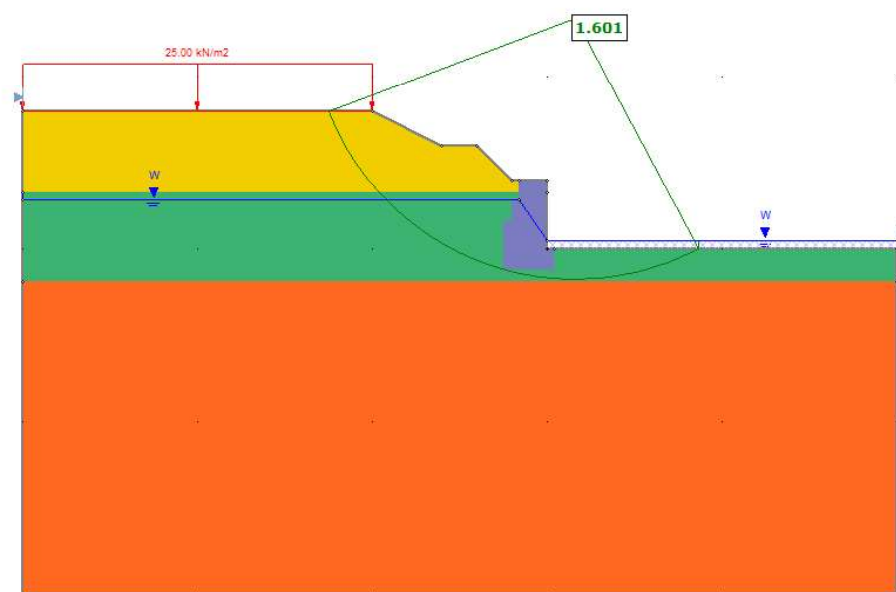
Figura 11: Resultados de fator de segurança do modelo 1 de seção típica transversal através do slide 2.

(fs encontrado de 1,589).



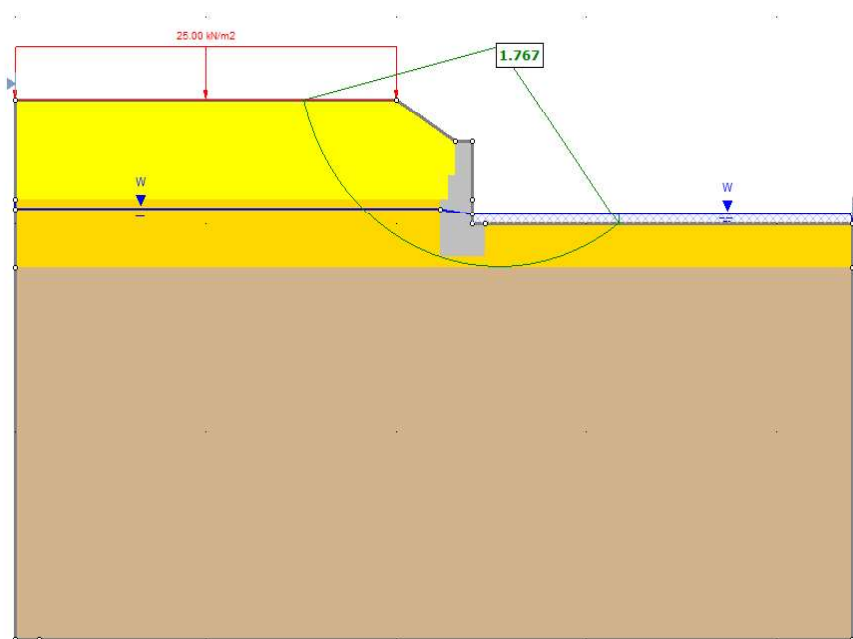
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 12: resultados do fator de segurança do modelo 2 de seção típica transversal. Fs de 1,6.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 13: Desenho do modelo 3 no programa slide 2 fator de segurança (encontrado de 1,767).



Fonte: Elaborada pelos autores

Ainda de acordo com Barbosa (2019), os valores de ângulo de atrito e peso específico estão nas duas Tabelas (9 e 10) abaixo bem com seus respectivos materiais.

Tabela 9: Valores de peso específico e seus respectivos materiais.

Material	Peso específico (kN/m3)
Areia aterro	16
Areia intermediária	18
Areia fundo	18
Muro de gabião	28

Fonte: Elaborada pelos autores

Para a metodologia de cálculo, optou-se por trabalhar com *Bishop* e *Morgstern-Price* pois são métodos muito usados e consagrados para análise de estabilidade de taludes de solos. O método *Bishop* fundamenta-se apenas pelo equilíbrio de momentos por isso é menos rigoroso.

Tabela 10: Valores de ângulo de atrito e seus respectivos materiais

Material	Ângulo de atrito(graus)
Areia aterro	33
Areia intermediária	41
Areia fundo	55
Muro gabião	50

Fonte: Elaborada pelos autores

O método de *Morgstern-price* está fundamentado em equações e funções que envolvem o equilíbrio de momentos e forças estabelecendo maior rigor na obtenção do fator de segurança. Sendo assim, tem-se dois métodos distintos por equilíbrio limite, um tradicional e outro rigoroso para a comparação de resultados do fator de segurança.

Com relação aos fatores de segurança encontrados através do programa *slide 2*, abaixo está a tabela 11, referente a norma 11682 (norma para estabilidade de taludes), onde estão representadas as intensidades para danos a vidas humanas e materiais. Os valores de fs encontrados nas análises do slide 2 ,estão acima de 1,5 .Os níveis de segurança tanto para danos materiais ,como para vidas humanas está alto.

Tabela 11: Fatores de segurança mínimos para deslizamentos

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais \ Nível de segurança contra danos a vidas humanas	Nível de segurança contra danos a vidas humanas		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

NOTA 1 No caso de grande variabilidade dos resultados dos ensaios geotécnicos, os fatores de segurança da tabela acima devem ser majorados em 10 %. Alternativamente, pode ser usado o enfoque semiprobabilístico indicado no Anexo D.

NOTA 2 No caso de estabilidade de lascas/blocos rochosos, podem ser utilizados fatores de segurança parciais, incidindo sobre os parâmetros γ , ϕ , c , em função das incertezas sobre estes parâmetros. O método de cálculo deve ainda considerar um fator de segurança mínimo de 1,1. Este caso deve ser justificado pelo engenheiro civil geotécnico.

NOTA 3 Esta tabela não se aplica aos casos de rastejo, voçorocas, ravinas e queda ou rolamento de blocos.

Fonte: Tabela retirada da Norma 11682

A NBR 11682, considera que as análises usuais de segurança desprezam as deformações que ocorrem naturalmente no talude ou na encosta e que o valor do fator de segurança (FS) tem relação direta com a resistência ao cisalhamento do material do talude. Admite-se, portanto, que um maior valor de FS corresponde a uma segurança maior contra a ruptura (trecho retirado da Norma 11682).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo abordou as rupturas recorrentes no arroio Dilúvio, município de Porto Alegre/RS. Com base nos estudos realizados por Barbosa (2023) as rupturas estão indicadas apenas na crista do talude, mas não avalia a estabilidade global. As análises de estabilidade realizadas através do *software Slide 2*, portanto, demonstraram que há estabilidade global inclusive atendendo aspectos de Fator de Segurança normativos para os taludes do arroio ($FS > 1,5$). Entretanto, os modos de ruptura observados não são compatíveis com este nível de segurança, o que justifica a tendência de que não há problemas de estabilidade global. A revisão da literatura apontou os principais métodos de cálculo conhecidos, desde o menos rigoroso, método de Fellenius, aos métodos mais rigorosos, como o método de *Morgenstern-Price*. A análise paramétrica, avaliada através do *software Slide 2* permitiu efetuar comparações entre os métodos de cálculo estudados. Observou-se que todos os métodos estudados convergem entre si, com valores de segurança variando a partir da segunda casa decimal.

Foi demonstrado neste estudo que existe segurança global dos taludes avaliados no canal. Os problemas recorrentes do canal, portanto, são problemas de instabilidade externa dos muros de contenção, em função de outras ações que não de estabilidade global, mas sim de ruptura local. Os muros podem estar sofrendo tombamento, deslizamento, em função das pressões hidráulicas de montante serem maior que jusante, problemas de estabilidade interna por erosão hídrica, por ruptura da fundação ou solapamentos, entre outro. Seja por problemas causados por dragagens ou formação naturais de canais de fluxo de sedimentos que promovem erosão do fundo do rio e deixam o muro suspenso. Estes prováveis problemas devem ser estudos em trabalho posteriores.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT 11682 Estabilidade de taludes. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT 11682 Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT 6120 Cargas para cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

AUGUSTO FILHO, O. *Caracterização geológico-geotécnica voltada a estabilização de encostas: uma proposta metodológica*. In: Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, 1, 1992, Rio de Janeiro. Anais Rio de Janeiro: ABMS/ABGE/PCRJ. vol. 2, p. 721-733.

BARBOSA, L. T.; *Estabilidade de estruturas de proteção de margem de canais: diagnóstico geotécnico de um talude do arroio dilúvio/rs*. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Orientador: Cleber de Freitas Floriano, 2019.

CAMPOS, Thiago Duarte Gisbert. *Análise do fator de segurança de um muro de solo grampeado*. 2015. 67 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

CAPUTO, H. P. *Mecânica dos solos e suas aplicações: mecânica das rochas, fundações e obras de terra*: volume 2, 7. ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2017.

CAVALCANTE, Karina da Fonseca et al. *Análise de encosta instrumentada com histórico de movimentações*. 2023. Universidade do Estado do Rio de Janeiro/ Faculdade de engenharia. Dissertação (Mestrado) Rio de Janeiro, RJ. 2023. 96f.

ELKHOLY, Sherif M. *Cases of slope failure of irrigation and drainage channels in Egypt and their rehabilitation*. Tech. J, v. 18, n. 1, p. 1, 2013.

FREU, P. H. A. *Estudo para projeto de estabilização de uma encosta do morro da Glória II*, Angra dos Reis/RJ. UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de engenharia civil, 2012.

GERSCOVICH, Denise M.S. *Estabilidade de taludes* 2. Ed. São Paulo: Oficina de textos, 2016

GOMES, C. L. R., *Retroanálise em estabilidade de taludes em solo: Metodologia para obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento*. Universidade estadual de Campinas/ Faculdade de engenharia civil. Dissertação (Mestrado) Campinas, SP. 2003

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P., 2008, *The landslide handbrook – a guide to understanding landslides*: Reston, Virgínia, U. S. Geological Survey Circular 1325, 129p.

INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), dia 11/10/2019 as 18:00 ALONSO, U. R., *Exercícios de fundações*, São Paulo: Edgard Blucher, 1983.

JUNIOR, Aduari Silveira Rodrigues et al. *ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES EM OBRAS CIVIS*. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, v. 9, n. 10, p. 2182-2191, 2023.

MASSAD, F. *Obras de terra: curso básico de geotecnia*. São Paulo: Oficina de textos, 2003.

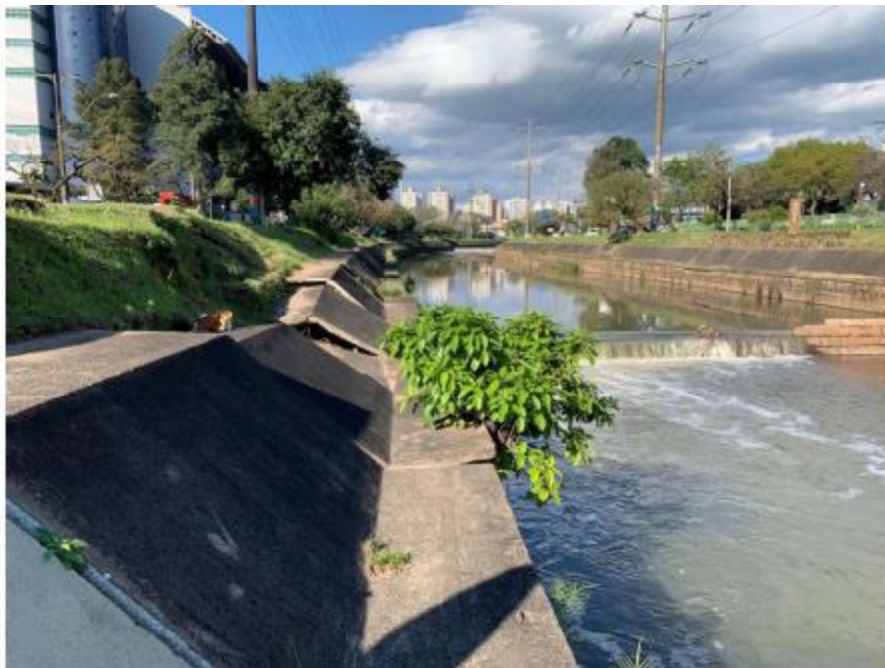
NUNES, Alisson Corrêa; SANTOS, Lucas Cristiano Mendes; DE ARAUJO, Rodrigo da Cruz. *Comparação de métodos da análise de estabilidade e modelagem estatística para previsão do fator de segurança do talude*. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 12, n. 6, p. 246-259, 2021.

RIFFEL, E. S.; GUASSELLI, L. A.; BRESSANI, L. A. *Desastres associados a movimentos de massa: Uma revisão de literatura*. Goiânia, v. 36, n. 2, p. 285-101, mai./jul. 2016

VARNES, David J. *Landslides-Analysis and Control*. National Academy of Sciences, Transportation Board Special Report, v. 176, p. 11-33, 1978.

APENDICE”A”

figura 14:local onde se encontra o módulo danificado



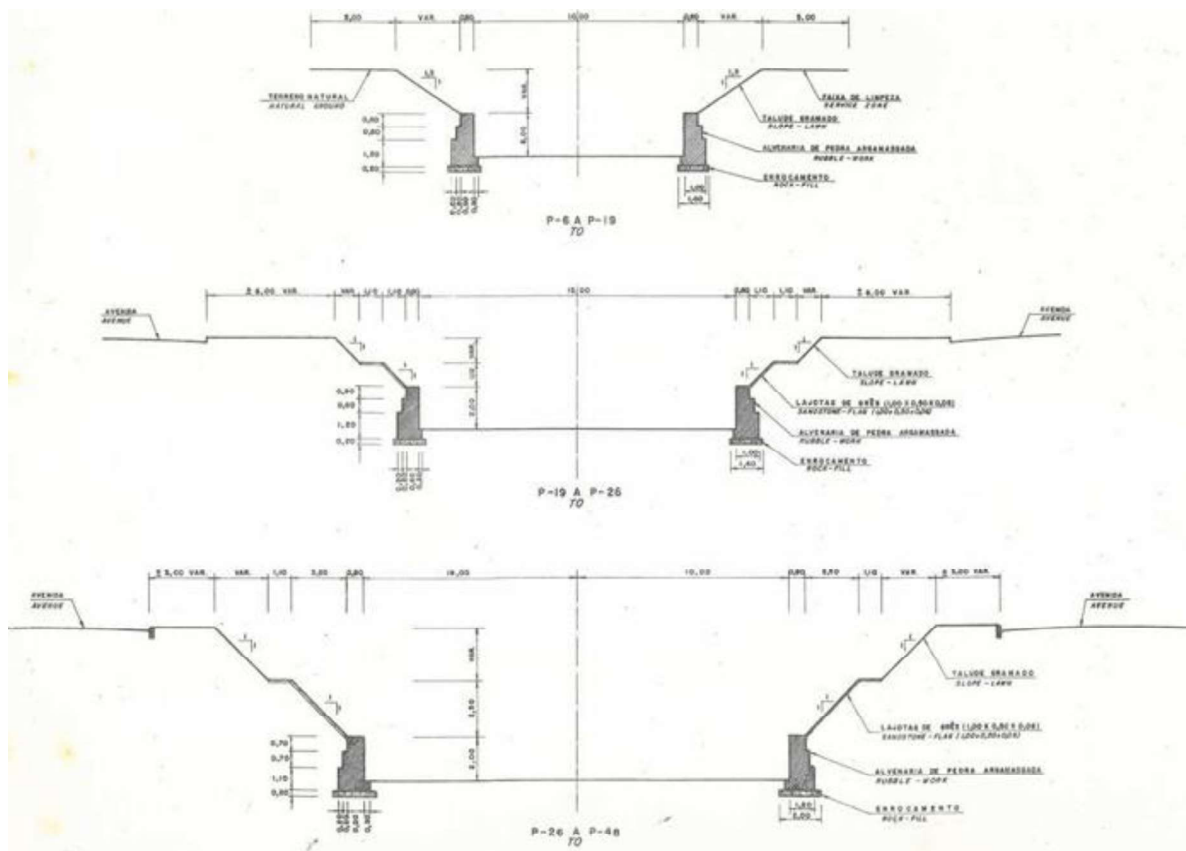
Fonte: Barbosa (2019, p. 33)

Figura 15: Imagem para mostrar a dimensão da ruptura do talude no local



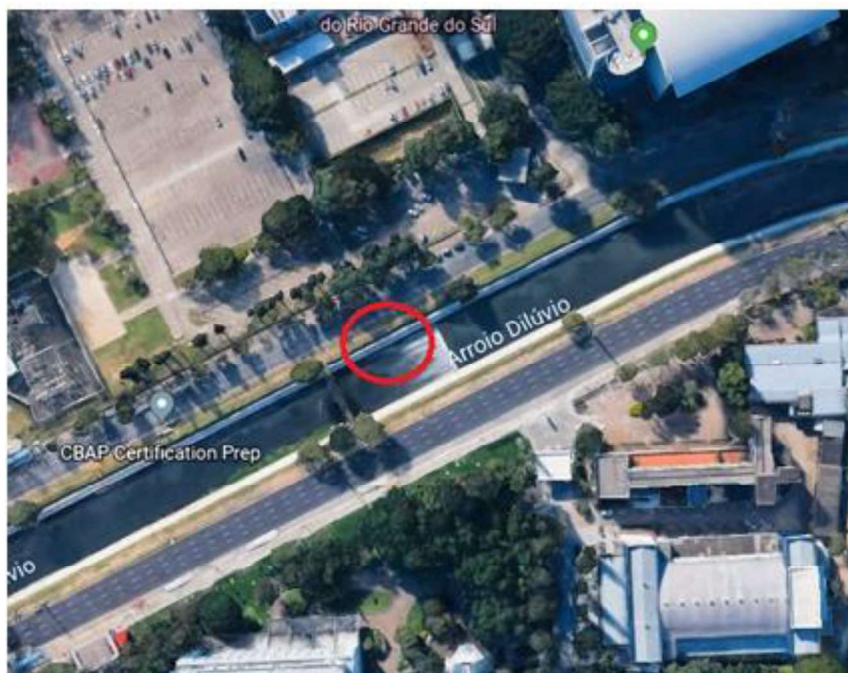
Fonte: Barbosa (2019, p. 35)

Figura 16: Desenho seções típicas do dilúvio. (ordenadas para análise no slide 2 ,de baixo para cima)



fonte:departamento nacional de obras e saneamento

figura17: Localização do talude do arroio Dilúvio analisado no trabalho, na Avenida Ipiranga em frente ao hospital São Lucas da PUCRS, Porto Alegre/RS.



Autor:Barbosa(2019)

Tabela 12: Cálculo de ângulos de atrito equivalente.

SPT-02											
Canadá	Prof. (m)	N	N ₆₀	ϕ' Godoy (1983)	ϕ' Teixeira (1996)	σ (kN/m ²)	γ (kN/m ³)	ϕ' de Mello (1971)	ϕ' médio Godoy (1983)	ϕ' médio Teixeira (1996)	ϕ' médio de Mello (1971)
Areia aterro	1	8	9	31,20	27,65	16	16	41,2	31	27	40
	2	8	9	31,20	27,65	32	16	39,3			33
Areia intermediária	3	16	18	34,40	32,89	50	18	46,3	36	35	49
	4	25	29	38,00	37,36	68	18	53,2			41
	5	51	59	48,40	46,94	86	18	73,9			
	6	42	49	44,80	43,98	104	18	61,8			
Areia fundo	7	54	63	49,60	47,86	122	18	67,5	49	47	65
	8	58	67	51,20	49,06	140	18	66,4			
	9	56	65	50,40	48,47	158	18	62,2			
	10	59	68	51,60	49,35	176	18	61,1			

Fonte: Barbosa (2019, p. 41)

Tabela 13: Dados retirados de Barbosa (2019), pelo programa *gawacwin* 2003

GawacWin 2003

Resumo

Programa licenciado para: MACCAFERRI WEB BRASIL

Projeto: Análise contenção Dilúvio

Arquivo: TALUDEDILUVIO

Date: 06/11/2019

DADOS SOBRE O SOLO

Solo	γ kN/m³	c kN/m²	ϕ graus	Solo	γ kN/m³	c kN/m²	ϕ graus
B _s	16,00	0,00	33,00	F _s	18,00	0,00	41,00
B ₁	18,00	0,00	41,00				

CARGAS

Carga	Valor kN/m²	Carga	Valor kN/m

VERIFICAÇÕES DE ESTABILIDADE

Coef. de Seg. Deslizamento	1,98	Tensão na base (esquerda)	125,23kN/m²
Coef. de Seg. Tombamento	2,31	Tensão na base (direita)	0,45kN/m²
Coef. de Seg. Rup. Global	2,19	Máxima tensão admissível	553,02kN/m²

Fonte: Barbosa (2019, p. 45)