



ESTABILIDADE E IMPERMEABILIZAÇÃO DE TALUDE

JOSÉ IGOR GONÇALVES DA SILVA
FAGNER CAMPOS DOS SANTOS



**ESTABILIDADE E IMPERMEABILIZAÇÃO
DE TALUDE**



JOSÉ IGOR GONÇALVES DA SILVA
FAGNER CAMPOS DOS SANTOS

**ESTABILIDADE E IMPERMEABILIZAÇÃO
DE TALUDE**

1ª Edição

Quipá Editora
2023

Copyright © dos autores e autoras. Todos os direitos reservados.

Esta obra é publicada em acesso aberto. O conteúdo dos capítulos, os dados apresentados, bem como a revisão ortográfica e gramatical são de responsabilidade de seus autores, detentores de todos os Direitos Autorais, que permitem o download e o compartilhamento, com a devida atribuição de crédito, mas sem que seja possível alterar a obra, de nenhuma forma, ou utilizá-la para fins comerciais.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S586e Silva, José Igor Gonçalves da
Estabilidade e impermeabilização de talude / José Igor
Gonçalves da Silva e Fagner Campos dos Santos. — Iguatu, CE :
Quipá Editora, 2024.
69 p. : il.

ISBN 978-65-5376-390-6
DOI 10.36599/qped-978-65-5376-390-6

1. Impermeabilização. 2. Talude. 3. Solo – Estabilidade. 4.
Encostas – Deslizamento. I. Santos, Fagner Campos dos. II.
Título.

CDD 624

Elaborada por Rosana de Vasconcelos Sousa — CRB-3/1409

Obra publicada pela Quipá Editora em agosto de 2024

Quipá Editora
www.quipaeditora.com.br
@quipaeditora

Dedico este trabalho a memória de meu avô, Airton Ferreira Gonçalves (*in memoriam*), exemplo de homem honrado, pai e avô dedicado, e que sempre foi um amigo e companheiro.

José Igor Gonçalves da Silva

Ao meu pai Joaquim Lourenço dos Santos (*in memoriam*), a minha mãe Quitéria Campos da Silva.

Fagner Campos dos Santos

AGRADECIMENTO

Agradeço a todo apoio e copanheirismo de minha esposa, Geyze Marinho dos Santos, ao carinho e amor de minha sogra, Josélia Marinho da Cruz, e minha amada mãe, Izabel Ferreira Gonçalves da Silva, e a minha força motriz, meu filho, João Henrique Marinho Gonçalves.

José Igor Gonçalves da Silva

Primeiramente agradeço a Deus por permitir que tudo isso fosse possível, por todas as bênçãos e graças que me permitiram crescer profissionalmente e concluir mais este trabalho.

A minha mãe, por todo o incentivo para que eu nunca parasse de estudar.

A minha noiva Palloma pela compreensão que sempre demonstrou em diversos momentos e por me dá apoio e forças para buscar sempre o crescimento pessoal e profissional.

Aos diversos docentes renomados com os quais tive oportunidade de aprender, onde através dos seus vastos conhecimentos pude me tornar um profissional ainda mais qualificado e bem mais preparado para o mercado de trabalho.

Fagner Campos dos Santos

APRESENTAÇÃO

Nas últimas décadas, os acidentes causados por deslizamentos de encostas têm se tornado uma preocupação crescente em diversas regiões do Brasil. Mesmo com a obrigatoriedade da implementação da Defesa Civil nos municípios, observa-se um aumento contínuo de construções irregulares, frequentemente realizadas sem qualquer estudo de viabilidade construtiva. Este cenário é agravado pela variabilidade climática brasileira, onde muitas regiões enfrentam grandes volumes de chuva em determinados períodos do ano, impactando diretamente a estabilidade dos solos nas encostas.

As chuvas intensas promovem movimentações de terra tanto na superfície quanto no interior dos maciços de solo, elevando o risco de deslizamentos. A análise adequada desses maciços, conduzida por técnicos especializados, é essencial para a identificação de riscos e a implementação de medidas preventivas eficazes. Tais medidas abrangem tanto ações educativas, que visam conscientizar a população sobre os perigos das construções irregulares, quanto intervenções estruturais, incluindo obras de contenção e drenagem.

A preservação dos taludes estáveis, especialmente em áreas de alta relevância, também é um aspecto crucial para a

mitigação dos riscos de deslizamentos. Entre as técnicas eficazes destacam-se a impermeabilização do solo utilizando geossintéticos, sendo a geomanta de PVC um exemplo notável por sua facilidade de aplicação e viabilidade econômica. Este material não apenas protege as encostas ao impedir a infiltração de água, como também atua como uma barreira física, dificultando a interferência humana e o acesso de animais.

Este livro oferece um estudo detalhado dos fenômenos relacionados aos deslizamentos de encostas e propõe uma abordagem matemática para a determinação do Fator de Segurança, uma medida crucial para avaliar a estabilidade das encostas e prevenir desastres. A intenção desta obra é fornecer um embasamento sólido para estudos na área de estabilidade de taludes, contribuindo para a formação de profissionais capacitados a enfrentar esses desafios e implementar soluções eficazes para a preservação da vida e do meio ambiente.

INTRODUÇÃO

Os deslizamentos de terra são fenômenos naturais complexos que causam significativos impactos sociais, econômicos e ambientais. No dia 31 de maio de 2017, um deslizamento na Zona Norte do Recife, noticiado pelo portal G1, resultou em fatalidades, apesar da área estar sob monitoramento da Defesa Civil e ter sido coberta com uma lona plástica dias antes do acidente. A queda de uma árvore, que não foi removida pelas autoridades competentes, pode ter sido o gatilho para o deslizamento (Portal G1, 2017).

A modificação de taludes naturais, seja pela ação humana ou por fenômenos naturais, pode comprometer sua estabilidade, resultando em prejuízos econômicos e sociais significativos. O estudo dos processos geológicos que causam a instabilidade de taludes é, portanto, essencial. Em áreas urbanas, especialmente em regiões ocupadas de forma desordenada, o risco de deslizamentos causar fatalidades e danos ao patrimônio público é elevado.

Segundo Guerra (2000), os movimentos de massa podem ser classificados como quedas, escorregamentos, corridas, tombamentos e espraiaamentos. Este livro focará nos escorregamentos, os mais comuns no Brasil. Um talude é

considerado estável quando apresenta probabilidades mínimas de deslizamento. No entanto, fatores como a permeabilidade do solo à água das chuvas, a variação do nível dos lençóis freáticos e a erosão podem alterar essa estabilidade e modificar seu Fator de Segurança.

Uma possível solução para preservar o Fator de Segurança de taludes estáveis é a impermeabilização do solo na superfície da encosta. Dentre os métodos utilizados para isso, destaca-se o uso de geossintéticos, especialmente a geomanta de PVC. Com os recursos naturais cada vez mais escassos, a inovação no uso de materiais sintéticos e métodos construtivos eficazes tem ganhado destaque na Engenharia Civil. Os geossintéticos, em particular os geotêxteis, são amplamente utilizados em obras de drenagem, reforço e filtração devido à sua resistência, impermeabilidade, facilidade de aplicação, alta durabilidade, flexibilidade e custo razoável.

Apesar de suas vantagens, a falta de conhecimento leva muitos projetistas a ignorar ou rejeitar o uso de geotêxteis. Para promover a utilização desses materiais, foi fundado o Comitê Técnico Geotêxtil (CTG) da ABINT, composto por empresas como Amanco do Brasil Ltda., Bidim - BBA Nonwovens, Ober S/A Indústria e Comércio e Indústria de Feltros Santa Fé S/A. O

CTG elaborou o "Curso Básico de Geotêxteis", escrito pelo engenheiro José Carlos Vertematti.

Este livro aborda de forma simples a estabilidade de taludes quanto aos escorregamentos e as relações matemáticas envolvidas na determinação do Fator de Segurança. Também discute a influência da água na estabilidade dos taludes e as medidas necessárias para minimizar os riscos de acidentes. Além disso, são apresentados estudos de caso nacionais e internacionais, métodos de análise e técnicas de estabilização, bem como estratégias de planejamento e gestão de riscos.

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO

INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 1 **13**

CONCEITOS BÁSICOS

CAPÍTULO 2 **26**

FATORES CONDICIONANTES E
DESENCADEANTES

CAPÍTULO 3 **29**

MÉTODOS DE ANÁLISE E ESTABILIZAÇÃO

CAPÍTULO 4 **45**

ESTABILIDADE DO TALUDE

CONCLUSÃO **61**

REFERÊNCIAS **63**

SOBRE OS AUTORES **66**

CAPÍTULO 1

CONCEITOS BÁSICOS

Processos Geológicos de instabilidade de Taludes

Segundo Potapova (1968), os processos geológicos são conjuntos de ações que, ao longo do tempo, modificam a crosta terrestre. A energia necessária para essas ações provém do sol ou do interior da Terra. Os processos geológicos que ocorrem dentro da Terra são chamados de endógenos, enquanto aqueles que ocorrem na superfície são denominados exógenos.

Taludes, também conhecidos como encostas naturais, são definidos por Moreira e Junior (2004, p. 2) como superfícies inclinadas "compostas de solo e rocha originados de processos geológicos e geomorfológicos diretos". Esses taludes podem sofrer modificações devido à ação humana, como desmatamentos, introdução de vegetação, carregamento, cortes, entre outros. Quando os taludes sofrem escavações antropogênicas, são classificados como Taludes de Corte e Taludes de Aterro.

A norma técnica que aborda a Estabilidade de Taludes é a NBR 11682/1991. De acordo com essa norma, um talude é considerado estável quando "não apresenta nenhum sintoma de instabilidade, tais como trincas, sulcos, erosão, cicatrizes, abatimentos, surgências anormais de água, rastejo, rachaduras em obras locais, etc." (NBR 11682, 1991, p. 3).

Fatores Naturais e Antrópicos

Os deslizamentos de terra podem ser provocados por uma variedade de fatores naturais e antrópicos. Entre as causas naturais, destacam-se a precipitação intensa, que aumenta a umidade do solo, reduzindo sua coesão e aumentando o peso das camadas superiores, o que pode desencadear deslizamentos (Guerra, 2000). Os terremotos também são uma causa significativa, pois podem romper encostas, especialmente em áreas com estrutura geológica já instável. O impacto dos sismos pode desestabilizar o solo e as rochas, resultando em deslizamentos. Além disso, variações climáticas, como mudanças sazonais e ciclos de congelamento e descongelamento, podem alterar a estrutura do solo, aumentando o risco de deslizamentos. A erosão natural, causada pela ação contínua de água ou vento, pode desgastar as encostas, removendo o material e tornando-as mais suscetíveis a deslizamentos.

Do ponto de vista antrópico, o desmatamento é uma causa relevante, pois a remoção de vegetação, especialmente em encostas, reduz a estabilização natural proporcionada pelas raízes das plantas, tornando o solo mais suscetível à erosão e ao colapso (Moreira & Junior, 2004). A construção de infraestrutura, como escavações para estradas e edifícios, altera a estabilidade dos taludes, frequentemente sem as devidas medidas de contenção. O carregamento excessivo, que pode incluir a adição de edificações ou depósitos de resíduos, aumenta a carga sobre um talude, comprometendo sua estabilidade. Além disso, o uso inadequado do solo, como a agricultura em encostas e a construção de barragens sem planejamento apropriado, pode desencadear deslizamentos.

As consequências dos deslizamentos de terra são severas e abrangem aspectos econômicos e sociais. Entre as principais consequências estão a perda de vidas, especialmente em áreas urbanas ou habitadas, onde os deslizamentos podem causar fatalidades devido ao colapso de solo ou danos estruturais (PORTAL G1, 2017). A destruição de infraestruturas, como estradas, pontes e edifícios, pode resultar em custos elevados para reparo e reconstrução. O deslocamento de grandes quantidades de solo pode levar à perda de terras férteis, impactando negativamente a agricultura e o ecossistema local. Os deslizamentos também podem alterar cursos de rios e destruir habitats naturais, afetando a biodiversidade e o equilíbrio ecológico. Em casos graves, as áreas afetadas podem precisar ser evacuadas, forçando comunidades a se deslocarem e enfrentarem os desafios associados ao reassentamento. Além disso, os custos econômicos não se restringem apenas aos danos diretos e reparos; os deslizamentos podem impactar negativamente a economia local, afetando setores como turismo e agricultura.

Deslizamento/Escurregamento

No livro “Geomorfologia e Meio Ambiente”, Guerra (2000, p. 124) caracteriza os deslizamentos de terra como um tipo de movimento de massa oriundo de “fenômenos naturais contínuos de dinâmica externa que modelam a paisagem da superfície terrestre”. Estes movimentos são resultado de processos geológicos e geomorfológicos que atuam sobre a crosta terrestre, modificando suas características ao longo do tempo.

Guerra (2000) ressalta que os deslizamentos em encostas representam uma preocupação significativa devido aos

grandes prejuízos que causam anualmente. No Brasil, onde extensas áreas de maciços encontram-se em regiões íngremes e a combinação das condições climáticas com práticas antrópicas contribui para a instabilidade dos taludes, os acidentes relacionados a deslizamentos são particularmente frequentes durante os períodos de chuvas intensas. A interação entre as características geográficas, climáticas e o impacto humano acentua a vulnerabilidade das encostas, resultando em uma considerável quantidade de desastres e danos.

Os escorregamentos, que são um tipo específico de deslizamento de terra, são frequentemente descritos como movimentos rápidos que se deslocam de cima para baixo e para fora do talude. Terzaghi (1950) explica que esses deslocamentos de massa podem ocorrer a velocidades que variam de zero a 30 cm/h, dependendo das condições do solo e da inclinação da encosta. A velocidade e a dinâmica dos escorregamentos são influenciadas por diversos fatores, incluindo a quantidade de umidade no solo, a estrutura geológica e a presença de vegetação ou a falta dela. Esses movimentos rápidos e muitas vezes imprevisíveis contribuem significativamente para o impacto econômico e social dos deslizamentos de terra.

Tipos de Escorregamentos

A primeira classificação de movimentos de terra foi realizada por Sharpe (1938). O Grupo Internacional do Inventário Mundial de Deslizamento padronizou a classificação pelos seguintes tipos de movimentos: queda, escorregamento, corridas, tombamentos e espraiaamentos (GUERRA, 2000). No

Brasil o escorregamento é um dos tipos de movimento de massa que mais ocorre.

Há diversas classificações propostas pelos autores brasileiros, normalmente utiliza-se a que está no livro Geomorfologia e Meio Ambientação (GUERRA, 2000), está descrita no Quadro 01.

Quadro 01. Comparação entre algumas propostas brasileiras de classificação

FREIRE (1965)	GUIDICINI E NIEBLE (1984)	IPT (1991)
Escoamentos: Rastejos e Corridas	Escoamentos: Rastejos e Corridas	Rastejos
Escorregamentos: Rotacionais e Translacionais	Escorregamentos: Rotacionais, Translacionais, Quedas de Blocos e Queda de detritos	Corridas de Massas
Subsidências e Desabamentos	Subsidências: Subsidências, Recalques e Desabamentos	Escorregamentos
	Formas de Transição Movimentos Complexos	Quedas/ Tombamentos

Fonte: GUERRA, 2000, p. 128.

Já Augusto Filho (1992) relaciona as características dos escoamentos com a geometria da encosta e com o tipo de material envolvido, descrevendo os tipos mais frequentes no Brasil, como pode ser visto no Quadro 02.

Quadro 02. Tipos de movimento de massa em encostas no Brasil

PROCESSOS	DINÂMICA / GEOMETRIA / MATERIAL
Rastejo	<ul style="list-style-type: none"> • Vários planos de deslocamento (internos) • Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade • Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes • Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada • Geometria indefinida
Escorregamentos	<ul style="list-style-type: none"> • Poucos planos de deslocamento (externos) • Velocidades médias (m/h) a altas (m/s) • Pequenos e grandes volumes de material • Geometria e materiais variáveis: <ol style="list-style-type: none"> 1. Planares = solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza 2. Circulares = solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas 3. Em cunha = solos e rochas com dois planos de fraquezas
Quedas	<ul style="list-style-type: none"> • Sem planos de deslocamentos • Movimentos tipos queda livre ou em plano inclinado • Velocidades muito altas (vários m/s) • Material rochoso • Pequenos e médios volumes • Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc • Rolamento de matação • Tombamento
Corridas	<ul style="list-style-type: none"> • Muitas superfícies de deslocamento • 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 raio de alcance, mesmo em áreas planas

Fonte: Augusto Filho, 1992 apud Geo-Rio, 1999

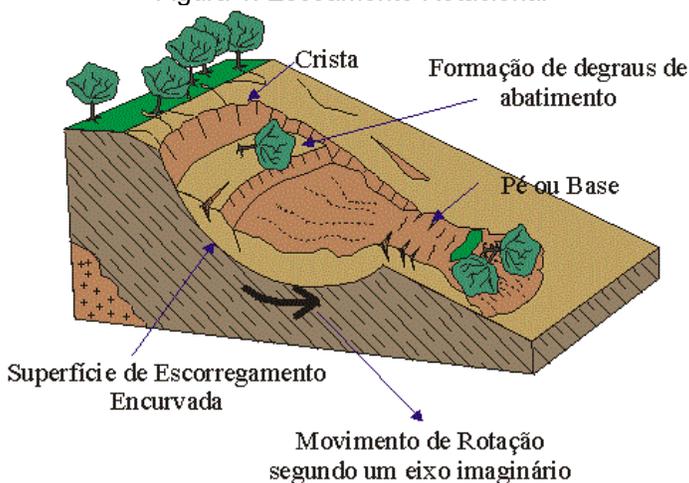
Os escorregamentos de massa representam diferentes modos de movimentação do solo e das rochas, variando de acordo com as características da superfície de ruptura e o tipo de material envolvido. A seguir, são abordados os principais tipos de escorregamentos e considerações sobre a estabilização de taludes.

a) Escorregamentos rotacionais ou circulares (slumps)

O movimento de massa tem uma superfície de ruptura de forma côncava para cima atingindo uma rotação, como pode ser visto na Figura 1. Normalmente ocorre pela existência de solos espessos e homogêneos (GUERRA, 2000, p. 138).

O início do escoamento rotacional algumas vezes é associado a fenômenos naturais como a erosão, mas geralmente advêm da ação antrópica como a implantação de estrada e a retirada do maciço sólido para construção de residências.

Figura 1. Escoamento Rotacional



Fonte: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09c.html>

b) Escorregamentos Translacionais ou Planar

O escorregamento translacional ou planar é caracterizado por uma superfície de ruptura que possui uma forma predominantemente planar. Essa superfície de ruptura é frequentemente associada a descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas no interior do material do talude (Guerra, 2000, p. 139). Essas descontinuidades podem ser resultado de uma variedade de processos, incluindo processos geológicos, geomorfológicos e pedológicos. Por exemplo, processos geológicos como a presença de fraturas naturais ou a formação de planos de estratificação podem criar superfícies de ruptura planas. Além disso, processos geomorfológicos como a erosão podem expor ou acentuar essas descontinuidades.

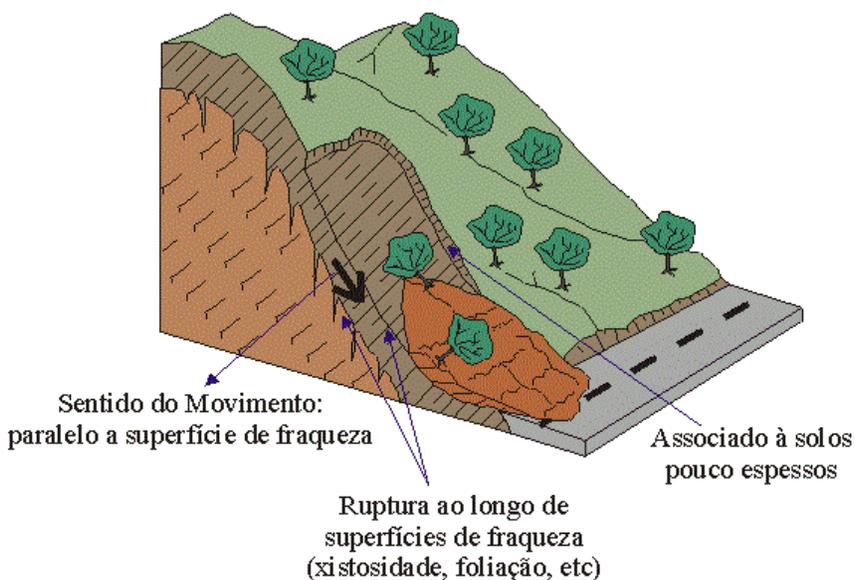
Os processos pedológicos, como a alteração do solo e a formação de camadas de argila, também podem contribuir para a formação de planos de ruptura planos. Essas características tornam os escorregamentos translacionais diferentes dos escorregamentos rotacionais, que têm uma superfície de ruptura circular (Fernando & Amaral, 1996).

Podemos classificar os escorregamentos translacionais com base no tipo de material que é movimentado durante o escorregamento. Em geral, os escorregamentos translacionais podem envolver rocha, solo ou ambos os materiais. Os escorregamentos translacionais de rocha ocorrem quando grandes blocos de rocha se deslocam ao longo de uma superfície de ruptura plana. Já os escorregamentos translacionais de solo envolvem a movimentação de camadas de solo sobre uma superfície planar. Quando ambos os tipos de materiais estão presentes, o fenômeno pode ser denominado como escorregamento translacional de solo e rocha (Fernando & Amaral, 1996). Esse tipo de escorregamento geralmente

ocorre após fortes chuvas, que saturam a superfície do talude e reduzem a coesão do material, aumentando o risco de deslocamento.

De acordo com Fernando e Amaral (1996), a saturação da superfície do talude devido a chuvas intensas pode levar a um aumento no peso do solo e a uma diminuição na resistência ao cisalhamento, facilitando o escorregamento translacional. Em alguns casos, escorregamentos translacionais podem envolver grandes volumes de material, o que pode resultar em deslizamentos significativos e potencialmente perigosos (Guerra, 2000, p. 139).

Figura 2. Escoamento Translacional



Fonte: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09c.html>

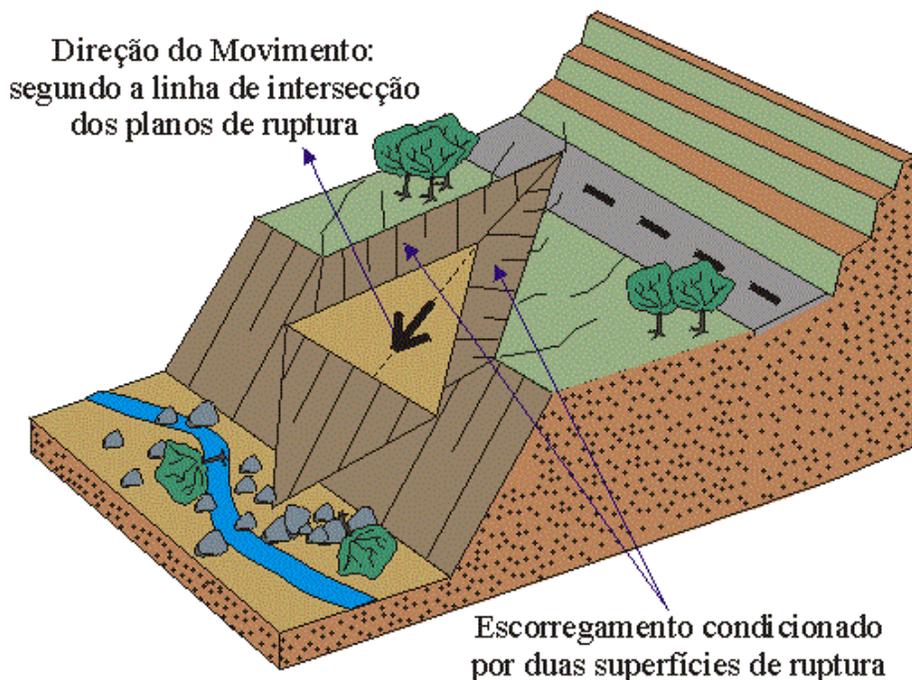
c) Escorregamentos em Cunha

Ocorrem em regiões com relevos controlados por estruturas geológicas. De acordo com o Instituto Geológico da Secretaria do Meio Ambiente do Governo de São Paulo, os escoamentos em cunha,

são associados aos maciços rochosos pouco ou muito alterados, nos quais a existência de duas estruturas planares, desfavoráveis à estabilidade, condiciona o deslocamento de um prisma ao longo do eixo de intersecção destes planos. Ocorrem principalmente em taludes de corte ou em encostas que sofreram algum tipo de desconfinamento, natural ou antrópico (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2009, p.).

Na Figura 03, a ilustração desse tipo de movimento de massa que tem o número de ocorrências mais esporádico no Brasil.

Figura 03. Escoamento em Cunha

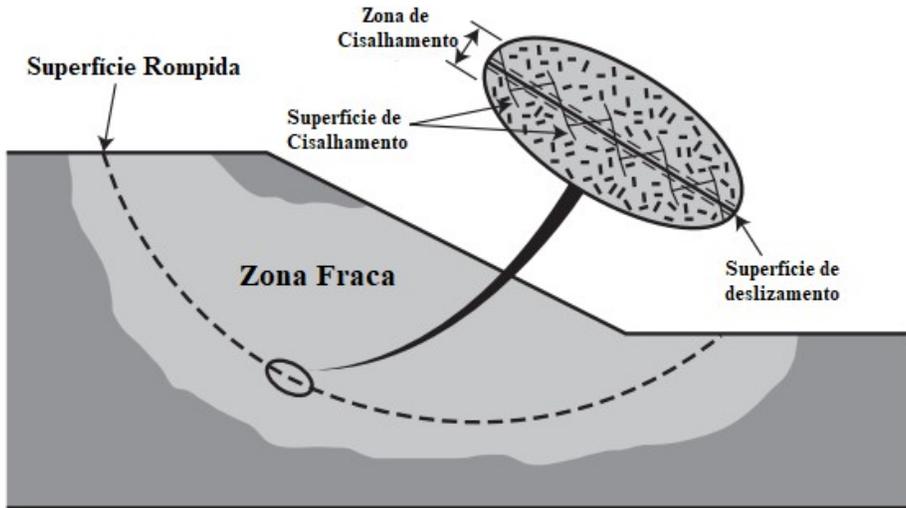


Fonte: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09c.html>

Estabilização de Taludes

O talude é dito estável quando não há uma superfície de cisalhamento contínua na massa do solo. No deslizamento a massa de solo em torno da superfície de cisalhamento forma uma zona de cisalhamento, conforme visto na Figura 04, formando a Zona Cisalhada que delimita a Zona Fraca (LEROUEIL, 2001, p. 221).

Figura 04. Zona Fraca, Zona de cisalhamento e Superfície Deslizante em uma inclinação



Fonte: LEROUEIL, 2001, p. 221

Um componente muito importante no estudo de estabilidade é a água. Podendo causar alterações na tensão efetiva, na resistência do solo, variando o peso da massa, gerando erosões internas e/ou externas através de seu fluxo e alterando os minerais que constituem o solo (GERSCOVICH, 2009, p.33).

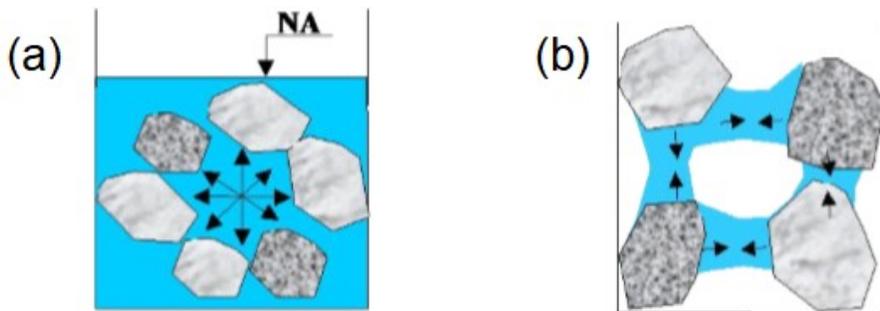
Do montante de água da chuva, parte infiltra e parte flui superficialmente (runoff) ou fica retido em depressões superficiais. Essa parte que infiltra altera a região não saturada chegando a gerar um fluxo subsuperficial. Abaixo, a equação que estabelece os componentes hidrológicos, balanço hidrológico (GERSCOVICH, 2009, p.33).

$$P = Q + E + I + \Delta W + \chi \quad (\text{equação 1})$$

Os componentes da equação 1 são: “ P ” a precipitação total, “ Q ” o runoff, “ E ” a parcela perdida por evapotranspiração, “ I ” a variação de umidade do solo causada pela infiltração, “ ΔW ” a variação de nível do reservatório (rios, lagos e mares) e “ χ ” as perdas adicionais.

O solo saturado tem poropressão positiva, enquanto o não saturado tem poropressão negativa (sucção), vide Figura 05. Esse segundo apresenta Coesão Aparente que pode alterar pela variação de umidade da região.

Figura 05. Tensões na água (poropressão positivo (a), poropressão negativo (b))



Fonte: Notas de Aula da Profa. Denise M S Gerscovich, 2009, p. 35.

CAPÍTULO 2

FATORES CONDICIONANTES E DESENCADEANTES

Tipos de Solo e Rocha

A estabilidade dos taludes é significativamente influenciada pelos tipos de solo e rocha presentes na área. Solos podem ser classificados em diferentes categorias com base em suas propriedades físicas e mecânicas. Entre os tipos de solo, destacam-se o solo argiloso, arenoso e siltoso. Cada um possui características distintas que afetam sua coesão e capacidade de suportar cargas. Solos argilosos, por exemplo, têm alta coesão e plasticidade, mas são suscetíveis à expansão e contração com variações de umidade. Já os solos arenosos possuem baixa coesão e são mais vulneráveis à erosão (Guerra, 2000).

No que diz respeito às rochas, elas podem ser categorizadas como ígneas, metamórficas ou sedimentares. Rochas ígneas, como o granito, são geralmente mais resistentes e menos suscetíveis a deslizamentos em comparação com rochas sedimentares, como o xisto e a argila, que podem ser facilmente alteradas pela ação de água e processos de meteorização (LEROUEIL, 2001). A estrutura geológica também desempenha um papel crucial, uma vez que as características estruturais, como fraturas e falhas, podem enfraquecer a rocha e facilitar a ocorrência de deslizamentos.

Estrutura Geológica

A estrutura geológica de uma região é um fator determinante na estabilidade dos taludes. As características estruturais, como a presença de fraturas, falhas e planos de descontinuidade, influenciam a propensão dos taludes a deslizamentos. Estruturas geológicas instáveis, como camadas inclinadas e fraturadas, aumentam o risco de deslocamento de massa (Guerra, 2000). A interação entre os diferentes tipos de rocha e a orientação das fraturas pode criar zonas de fraqueza que favorecem a instabilidade.

Precipitação

A precipitação é um dos principais fatores climáticos que afetam a estabilidade dos taludes. Chuvas intensas e prolongadas aumentam a umidade do solo, reduzindo sua coesão e aumentando o peso das camadas superficiais (Guerra, 2000). A saturação do solo pode levar ao aumento da pressão de poro e ao conseqüente enfraquecimento da estrutura do solo, tornando-o mais propenso a deslizamentos. Estudos demonstram que eventos de precipitação intensa estão frequentemente associados a deslizamentos de terra, especialmente em regiões com solo e rochas menos resistentes (GERSCOVICH, 2009).

Alterações Sazonais

As alterações sazonais, como variações de temperatura e ciclos de congelamento e descongelamento, também impactam a estabilidade dos taludes. Durante o inverno, o congelamento

da umidade no solo pode aumentar a pressão interna e a ruptura do solo, enquanto o descongelamento subsequente pode resultar em fluxo de água que exacerba a instabilidade (LEROUEIL, 2001). As mudanças sazonais afetam a estrutura do solo e podem desencadear deslizamentos quando a capacidade do solo de suportar a carga é comprometida por esses ciclos de congelamento e descongelamento.

Desmatamento

O desmatamento reduz a cobertura vegetal, que desempenha um papel crucial na estabilização dos taludes. As raízes das plantas ajudam a manter o solo coeso e a absorver a água da chuva, o que reduz o risco de erosão e deslizamentos (Moreira & Junior, 2004). A remoção da vegetação expõe o solo à erosão e pode levar ao aumento da saturação e ao enfraquecimento da estrutura do solo, aumentando a probabilidade de deslizamentos.

Construção de Infraestrutura

A construção de infraestrutura, como estradas, edifícios e represas, pode alterar significativamente a estabilidade dos taludes. Atividades de escavação e alteração do terreno modificam a estrutura e a composição do solo e das rochas, muitas vezes sem as devidas medidas de contenção (Guerra, 2000). A alteração do perfil do terreno e a adição de carga sobre os taludes podem desestabilizar a área e aumentar o risco de deslizamentos, especialmente se não forem implementadas técnicas adequadas de engenharia e estabilização (Fernando & Amaral, 1996).

CAPÍTULO 3

MÉTODOS DE ANÁLISE E ESTABILIZAÇÃO

Métodos Empíricos

O escorregamento translacional, também conhecido como escorregamento planar, é um tipo de movimento de massa caracterizado por uma superfície de ruptura com orientação predominantemente plana. De acordo com Guerra (2000, p. 139), essa superfície planar de ruptura é frequentemente associada a descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas presentes no interior do material que compõe o talude. Essas descontinuidades podem ser resultantes de diversas condições e processos que afetam a integridade estrutural do talude.

As descontinuidades mecânicas incluem fraturas geológicas, falhas, e planos de estratificação, que são características estruturais do material rochoso ou do solo e que podem enfraquecer a coesão e aumentar a suscetibilidade ao escorregamento. Por outro lado, as descontinuidades hidrológicas envolvem variações na umidade do solo, como zonas de saturação que podem ocorrer devido a infiltração de água, ou a presença de água subterrânea, que pode alterar a tensão efetiva e a resistência ao cisalhamento do material do talude (Guerra, 2000, p. 139).

Essas superfícies planas de ruptura são frequentemente o resultado de processos geológicos, geomorfológicos e pedológicos. Do ponto de vista geológico, a presença de camadas de rochas estratificadas, fraturas ou falhas pode criar superfícies de ruptura planas que são suscetíveis a movimentos de massa. Processos geomorfológicos, como a erosão, podem expor essas descontinuidades ou criar, enquanto processos pedológicos, como a formação e alteração dos horizontes do solo, podem impactar a estabilidade do talude ao modificar a coesão e a resistência do solo (Fernando & Amaral, 1996). A interação entre esses processos pode

resultar em um ambiente onde as superfícies de ruptura planar são propensas a escorregamentos translacionais.

Os escorregamentos translacionais podem ser classificados de acordo com o tipo de material que é movimentado. Essa classificação é crucial para compreender a dinâmica do movimento e suas implicações para a estabilidade do talude. Existem três principais categorias de escorregamentos translacionais: de rocha, de solo e de ambos os materiais. Escorregamentos translacionais de rocha ocorrem quando blocos significativos de rocha se deslocam ao longo de uma superfície de ruptura planar. Esse tipo de escorregamento geralmente ocorre em áreas com maciços rochosos onde as fraturas ou falhas proporcionam superfícies de ruptura adequadas para o deslocamento. Por outro lado, escorregamentos translacionais de solo envolvem a movimentação de camadas de solo que deslizam ao longo de uma superfície plana. Este tipo de escorregamento é comum em solos saturados onde a coesão do solo é reduzida devido à presença de água. Em situações onde tanto rochas quanto solos estão presentes, o fenômeno pode ser denominado escorregamento translacional de solo e rocha. Este tipo de escorregamento é particularmente complexo, pois combina as características e os comportamentos de ambos os materiais, o que pode resultar em grandes volumes de material sendo deslocados simultaneamente (Fernando & Amaral, 1996).

Segundo Fernando e Amaral (1996), escorregamentos translacionais geralmente ocorrem após fortes chuvas que saturam a superfície do talude. A saturação do solo pode reduzir a resistência ao cisalhamento do material e aumentar o peso da massa, criando condições favoráveis para o escorregamento. A água da chuva pode infiltrar-se profundamente no solo, gerando um fluxo subsuperficial que contribui para a redução da coesão do solo e aumenta o risco de escorregamento. Esse fenômeno é particularmente perigoso em áreas onde grandes volumes de material estão envolvidos, resultando em deslizamentos de larga escala que podem causar impactos significativos na infraestrutura e na segurança das áreas afetadas. A compreensão desses processos é essencial para a avaliação e

mitigação de riscos associados aos escorregamentos translacionais e para o desenvolvimento de estratégias eficazes de gerenciamento e prevenção (Guerra, 2000, p. 139).

Métodos Analíticos

Os métodos analíticos de análise de estabilidade de taludes são ferramentas cruciais na engenharia geotécnica, empregando fórmulas matemáticas e princípios da mecânica dos solos para avaliar a estabilidade de encostas e taludes. Esses métodos são fundamentais para prever o comportamento dos taludes sob diversas condições e para garantir a segurança em projetos de engenharia civil e geotécnica.

Entre os métodos analíticos mais amplamente utilizados está a abordagem de equilíbrio limite. Este método é baseado na premissa de que um talude está em um estado de equilíbrio quando as forças que tendem a causar o deslizamento são exatamente equilibradas pelas forças que resistem a esse deslizamento. A análise de equilíbrio limite envolve a avaliação da resistência ao cisalhamento do solo, que é a capacidade do solo de suportar forças de cisalhamento sem falhar, e as forças atuantes que promovem o deslizamento. Esta abordagem é empregada para calcular o fator de segurança, que é a razão entre a resistência disponível e as forças que promovem o deslizamento. Um fator de segurança maior que 1 indica que o talude é estável, enquanto um valor menor que 1 sugere que o talude é instável e pode estar propenso a um deslizamento (LEROUEIL, 2001).

Um exemplo clássico e amplamente utilizado de método analítico é o Método da Círculo de Ruptura, desenvolvido por Terzaghi em 1950. Este método assume que a superfície de

ruptura em um talude é circular, o que simplifica a complexidade da superfície de ruptura real e permite uma análise matemática mais manejável. O Método da Círculo de Ruptura calcula o fator de segurança considerando a interação entre a resistência ao cisalhamento do solo e as forças atuantes ao longo da superfície circular de ruptura.

A análise envolve a determinação da força total que atua ao longo da superfície de ruptura e a comparação com a resistência total oferecida pelo solo ao longo dessa superfície. O fator de segurança é obtido ao dividir a resistência total pelo produto das forças que promovem o deslizamento. O método considera fatores como a coesão do solo, o ângulo de fricção interna, a inclinação da superfície do talude e a influência da água (Terzaghi, 1950).

A abordagem de equilíbrio limite e o Método da Círculo de Ruptura são amplamente utilizados devido à sua eficácia em fornecer estimativas rápidas e razoavelmente precisas da estabilidade dos taludes. No entanto, esses métodos têm suas limitações, como a simplificação da geometria da superfície de ruptura e a necessidade de suposições sobre a homogeneidade do solo. Para superar essas limitações, os engenheiros podem complementar a análise com métodos numéricos mais avançados, como os métodos de elementos finitos, que permitem uma análise mais detalhada e precisa da estabilidade dos taludes em condições complexas e variáveis (LEROUEIL, 2001; Terzaghi, 1950).

Métodos Numéricos

Os métodos numéricos de análise de estabilidade de taludes representam uma evolução significativa na avaliação da

segurança e estabilidade de encostas e taludes. Estes métodos utilizam simulações computacionais avançadas para modelar o comportamento do solo e das rochas sob uma variedade de condições, permitindo uma análise mais detalhada e precisa em comparação com os métodos analíticos tradicionais.

Um dos métodos numéricos mais amplamente empregados é o Método dos Elementos Finitos (MEF). Este método é especialmente útil para a análise de taludes complexos, onde as propriedades do solo variam espacialmente e a geometria do talude pode ser irregular.

O MEF divide a área de estudo em uma malha de elementos menores e interconectados, permitindo a análise de cada elemento sob condições específicas. Cada elemento da malha é considerado como uma entidade independente que pode responder de maneira diferente às forças e condições ambientais. As equações que governam o comportamento dos elementos são resolvidas numericamente para obter a distribuição das tensões, deformações e outros parâmetros relevantes ao longo do talude (Fernando & Amaral, 1996).

Este método é particularmente eficaz na análise de taludes que apresentam uma combinação complexa de propriedades do solo, incluindo variações na coesão, ângulo de fricção interna e influências de água. O MEF permite a modelagem detalhada das condições de carga, como variações no nível de água subterrânea e carregamentos externos, que podem afetar a estabilidade do talude. Ao criar uma representação tridimensional do talude e dos materiais que o compõem, o MEF proporciona uma visão aprofundada da distribuição das tensões e das possíveis áreas de falha, que não podem ser facilmente capturadas por métodos analíticos simples (GERSCOVICH, 2009).

Além da capacidade de modelar a geometria complexa e as propriedades variáveis do solo, o MEF também permite a incorporação de diferentes cenários de carregamento e condições ambientais. Isso é particularmente importante para a análise de taludes em áreas com variações significativas de clima e uso do solo, onde as condições podem mudar ao longo do tempo e influenciar a estabilidade do talude de maneiras complexas. Por exemplo, o MEF pode ser usado para simular o efeito de chuvas intensas sobre um talude, avaliar o impacto de projetos de infraestrutura nas tensões do solo e prever a resposta do talude a mudanças nas condições de carga (Fernando & Amaral, 1996; GERSCOVICH, 2009).

Os métodos numéricos, como o MEF, oferecem uma análise detalhada e precisa da estabilidade de taludes, permitindo aos engenheiros identificar áreas críticas que podem precisar de medidas de estabilização adicionais. Essa abordagem detalhada é essencial para o planejamento e a execução de projetos de engenharia em áreas propensas a deslizamentos, garantindo que as intervenções sejam baseadas em uma compreensão completa do comportamento do talude sob diferentes condições.

Técnicas de Estabilização

Drenagem

A drenagem desempenha um papel fundamental na estabilização de taludes, sendo uma técnica essencial para a gestão da água no solo e a prevenção de deslizamentos. O principal objetivo da drenagem é reduzir a quantidade de água presente no solo, o que, por sua vez, diminui a pressão de poro

e reduz o risco de falhas de estabilidade. A pressão de poro, que é a pressão exercida pela água nos poros do solo, pode significativamente enfraquecer a coesão do solo e aumentar o peso da massa, tornando os taludes mais suscetíveis a deslizamentos.

Existem diversas abordagens e métodos de drenagem que podem ser aplicados dependendo das características específicas do talude e do tipo de solo presente. A drenagem superficial é uma técnica que visa remover a água da superfície do talude antes que ela possa infiltrar-se profundamente. Isso é realizado através da instalação de sistemas de canais, valas e canaletas que direcionam a água da superfície para fora da área crítica, minimizando a quantidade de água que pode ser absorvida pelo solo (Guerra, 2000). Esses sistemas ajudam a evitar a formação de poças e a reduzir a infiltração superficial que pode saturar a camada superior do solo.

Por outro lado, a drenagem profunda é projetada para remover a água do interior do solo, através da instalação de drenos verticais ou horizontais. Drenos verticais, como poços de drenagem ou tubos perfurados, são inseridos em pontos estratégicos para permitir a remoção da água acumulada em camadas mais profundas do solo. Drenos horizontais, como drenos de substrato ou tubulações de drenagem, são colocados ao longo do talude para coletar e transportar a água que se infiltra horizontalmente através do solo (LEROUEIL, 2001). Esses sistemas profundos são essenciais em taludes onde a água pode se acumular em camadas abaixo da superfície e, assim, aumentar o risco de deslizamentos.

A implementação adequada de sistemas de drenagem não apenas melhora a estabilidade do talude, mas também previne a saturação excessiva do solo, que é um dos principais fatores contribuintes para deslizamentos de terra. A saturação

excessiva reduz a coesão do solo e aumenta o peso da massa de solo, tornando-a mais propensa a deslizar sob condições de carga e inclinação inadequadas. Além disso, a drenagem eficaz ajuda a manter a estabilidade da estrutura do solo, especialmente durante períodos de chuvas intensas ou prolongadas, que podem exacerbar o risco de deslizamentos (Guerra, 2000; LEROUEIL, 2001).

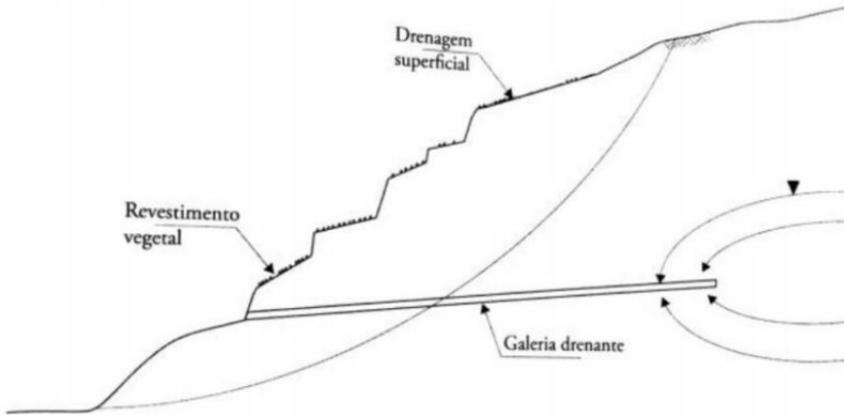
Portanto, a drenagem é uma medida preventiva crucial na engenharia de taludes, pois contribui para a manutenção da integridade estrutural do solo e reduz a probabilidade de eventos de deslizamento. O design e a implementação eficazes de sistemas de drenagem devem considerar as características geológicas e hidráulicas do talude, garantindo uma abordagem integrada e adaptada às condições específicas do local.

Figura 06. Drenagem profunda



Fonte: <https://www.engestab.com.br/dreno-horizontal-profundo#group1-3>

Figura 07: Esquema de drenagem profunda



Fonte: <https://www.guiadaengenharia.com/estabilizacao-taludes/>

Figura 08: Drenagem superficial



Fonte: <https://www.guiadaengenharia.com/estabilizacao-taludes/>

Reforços Mecânicos

Os reforços mecânicos são técnicas cruciais para aumentar a capacidade de carga e garantir a estabilidade dos taludes, sendo empregadas para fortalecer a estrutura do solo e prevenir o colapso ou deslocamento. Esses métodos envolvem o uso de elementos estruturais e materiais projetados para suportar as forças exercidas sobre o talude e melhorar a resistência ao cisalhamento do solo. Entre as técnicas mais comuns estão a instalação de taludes de contenção, o uso de geossintéticos, e o emprego de estacas e anclagens (ou âncoras).

a) Talude de Contenção e Muro de Arrimo

Os taludes de contenção, com destaque para os muros de arrimo, desempenham um papel essencial na estabilização de encostas e taludes ao resistir às forças horizontais exercidas pelo solo sobre a estrutura. Esses muros são projetados para suportar a carga do solo e impedir que ele se mova, atuando diretamente na preservação da integridade estrutural em áreas propensas a deslizamentos.

A construção de muros de arrimo pode utilizar uma variedade de materiais, cada um oferecendo características específicas que influenciam sua eficácia e durabilidade. Entre os materiais mais comuns estão o concreto, as pedras e os blocos.

O concreto é amplamente utilizado devido à sua resistência à compressão e durabilidade, podendo ser aplicado na forma de elementos pré-moldados ou moldados no local. O concreto armado, que combina a resistência à compressão do

concreto com a resistência à tração do aço, é uma opção comum. Por outro lado, os muros construídos com pedras, seja de forma seca ou com argamassa, são escolhidos por sua resistência natural e estética. Os blocos de concreto ou pedra, por sua vez, são favoráveis em áreas urbanas pela rapidez de instalação e facilidade de manutenção.

A eficácia dos muros de arrimo depende de um projeto bem elaborado que considere fatores críticos para garantir a estabilidade da estrutura. A análise de estabilidade deve avaliar as forças de empuxo do solo, o peso da própria estrutura e as forças externas, como a pressão da água ou cargas adicionais. É fundamental considerar a análise das forças horizontais e verticais para assegurar que o muro não cederá ou deslizará. Além disso, a drenagem adequada é um aspecto crucial; a presença de água pode comprometer a estabilidade do muro, e sistemas de drenagem, como drenos e geotêxteis, devem ser incorporados para reduzir a pressão de poro no solo e evitar a saturação.

A base e os fundamentos do muro devem ser projetados para suportar as cargas aplicadas e distribuir as forças de forma eficiente. Uma base sólida é essencial para prevenir deslocamentos ou falhas estruturais. E a manutenção contínua é vital para garantir a durabilidade e a integridade do muro ao longo do tempo. Inspeções regulares ajudam a identificar sinais de desgaste, fissuras ou problemas com o sistema de drenagem, permitindo a realização de reparos e reforços necessários. O gerenciamento adequado da água ao redor do muro é igualmente importante para evitar problemas relacionados à saturação e pressão excessiva, garantindo a estabilidade e a longevidade da estrutura.

Figura 09. Muro de arrimo em concreto armado



Fonte: <https://abmpremoldados.com.br/muro-de-arrimo-em-concreto-armado/>

Figura 10. Muro de Arrimo de gabião



Fonte: AEC Revista, 2023

Figura 11. Contenção com pneus



Fonte: <https://www.tecnogeo.com.br/empresa-tirantes/>

Fonte: CARLUC, 2023

b) Geossintéticos

Os geossintéticos, que incluem geotêxteis e geomantas, são materiais sintéticos empregados para melhorar a estabilidade do solo e a resistência dos taludes. Os geotêxteis são tecidos permeáveis projetados para funções múltiplas, incluindo reforço, drenagem e filtração. Eles reforçam o solo ao melhorar a distribuição das tensões e aumentar a capacidade de carga, o que reduz a probabilidade de falhas no talude.

Além disso, os geotêxteis ajudam a filtrar a água e a controlar a erosão, enquanto proporcionam uma estrutura para o crescimento da vegetação. As geomantas, que são materiais não tecidos, são aplicadas principalmente para estabilizar a superfície do solo e proteger contra a erosão. Essas coberturas ajudam a manter a integridade da camada superior do solo, evitando a perda de material e promovendo a vegetação, o que é fundamental para a estabilização a longo prazo (Fernando & Amaral, 1996).

c) Estacas e Anclagens

As estacas e anclagens são técnicas de reforço estrutural que fornecem suporte adicional para os taludes. Estacas são elementos estruturais que são cravados no solo para transferir a carga para camadas mais profundas e mais estáveis, especialmente em solos que têm uma capacidade de carga superficial insuficiente. Elas podem ser fabricadas em diversos materiais, como concreto, aço ou madeira, dependendo das condições do solo e dos requisitos do projeto.

As anclagens, por sua vez, são dispositivos inseridos no solo ou na rocha que são conectados a uma estrutura de suporte na superfície. Elas atuam resistindo às forças de cisalhamento e tração, estabilizando o talude e prevenindo movimentos indesejados. Essas técnicas são particularmente úteis em áreas onde o solo é fraco ou onde há necessidade de suporte adicional para garantir a estabilidade a longo prazo (Fernando & Amaral, 1996).

Figura 12. Tirantes em contenção por ancoragem



Importância dos Reforços Mecânicos

A implementação adequada de reforços mecânicos é fundamental para a estabilidade dos taludes, principalmente em áreas com condições geológicas e de carga desfavoráveis. Essas técnicas ajudam a distribuir as forças exercidas sobre o talude, melhoram a resistência ao cisalhamento do solo e reduzem a pressão sobre a superfície do talude.

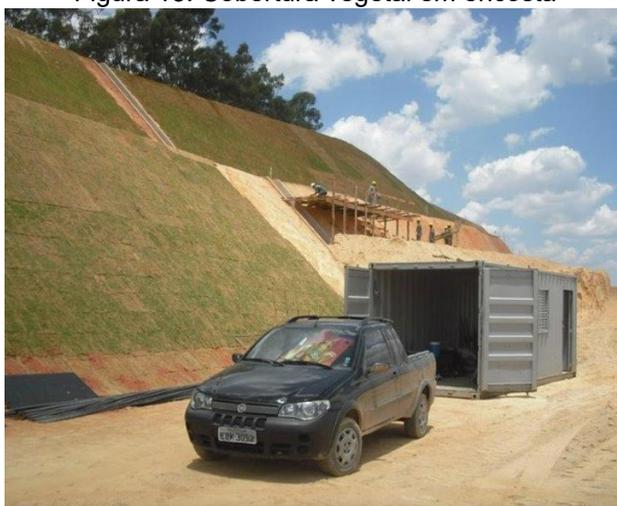
Além disso, os reforços mecânicos servem como medidas preventivas contra deslizamentos, proporcionando suporte estrutural adicional e aumentando a segurança das áreas vulneráveis. O uso eficaz de métodos de reforço mecânico não apenas contribui para a estabilidade dos taludes, mas também desempenha um papel vital na prevenção de

desastres associados a movimentos de massa (Fernando & Amaral, 1996).

Coberturas Vegetativas

As coberturas vegetativas envolvem o plantio de vegetação para estabilizar taludes e controlar a erosão. As raízes das plantas ajudam a manter o solo coeso e a absorver a água da chuva, reduzindo o risco de deslizamentos. Espécies vegetais selecionadas para coberturas vegetativas devem ser adequadas para o tipo de solo e as condições climáticas da região. O uso de vegetação também pode ser combinado com outras técnicas de estabilização, como a instalação de geotêxteis, para maximizar a eficácia da estabilização (GERSCOVICH, 2009). As coberturas vegetativas são uma solução sustentável e ambientalmente amigável para a estabilização de taludes, promovendo a recuperação ecológica e a prevenção de deslizamentos.

Figura 13. Cobertura vegetal em encosta



Fonte: <https://www.engestab.com.br/revestimento-vegetal-taludes#group1-5>

CAPÍTULO 4

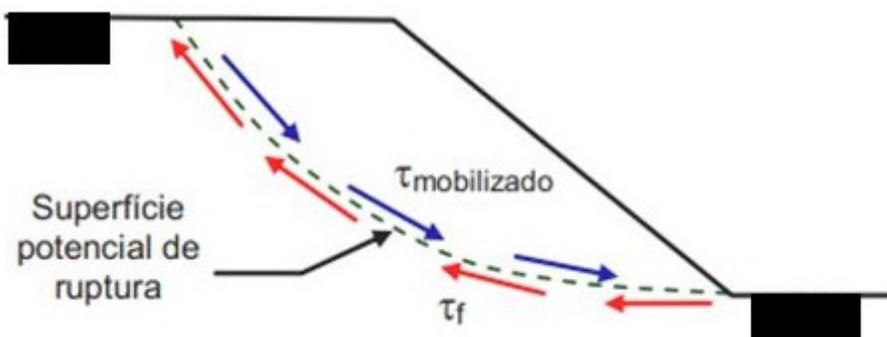
ESTABILIDADE DO TALUDE

Risco e Fator de Segurança

O Fator de Segurança, F_s , estima em quanto à resistência ao cisalhamento do solo ao longo da superfície de ruptura supera os esforços solicitantes. A NBR 11682/1991 o define como a “relação entre os esforços estabilizantes (resistentes) e os esforços instabilizantes (atuantes) para determinado método de cálculo adotado” (NBR 11682, 1991, p. 2).

No momento em que as tensões cisalhantes se igualam à resistência ao cisalhamento, seja pelo aumento de um ou pela redução do outro, a talude se torna instável surgindo uma superfície potencial de ruptura, vide Figura 06.

Figura 14. Superfície potencial de ruptura



Fonte: produzida pelo autor.

Esse parâmetro determinado pelo modelo matemático deve respeitar a Tabela 1, sendo o uso de fatores diferentes condicionados a serem devidamente justificados, quanto a projetos. Quanto maior F_s maior a segurança contra a ruptura.

Tabela 1. Utilização de modelos matemáticos

GRAU DE SEGURANÇA NECESSÁRIO AO LOCAL	Método baseado no equilíbrio-limite	Tensão-deformação
	Fator de segurança mínima	Deslocamento máximo
ALTO	1,50	Os deslocamentos máximos devem ser compatíveis com o grau de segurança necessário ao local, à sensibilidade de construções vizinhas e à geometria do talude. Os valores assim calculados devem ser calculados.
MÉDIO	1,30	
BAIXO	1,15	

Fonte: NBR 11682, 1991, p.18

Fazemos a análise da estabilidade de taludes, baseado na hipótese da existência de equilíbrio numa massa de solo, utilizando o método do equilíbrio-limite. Este método determina o Fator de Segurança, F_s , utilizando dados do maciço como resistência ao cisalhamento, poropressão, etc; tendo o solo como um material rígido-plástico, na iminência de desmoronar (MASSAD, 2010, p. 63-64). Segue a relação,

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} \quad (\text{equação 2})$$

onde, τ_f (ou S) equivale à resistência ao cisalhamento do solo e τ_{mob} (ou τ) as tensões cisalhantes atuantes ou resistência mobilizadas.

$$S = \tau_f = c' + \sigma' \cdot \tan \phi' \quad (\text{equação 3})$$

Os termos da equação (3) são: ϕ' ângulo de atrito, c' coesão efetiva e σ' tensão efetiva.

Dizemos que um Talude está na condição eminente de ruptura quando $F_s = 1,0$. Se $F_s > 1,0$, o Talude está estável quanto ao escorregamento. Para valores menores que um o talude está instável. O método de equilíbrio-limite pode se apresentar nas variações contidas no Quadro 3.

Quadro 3. Método de equilíbrio limite

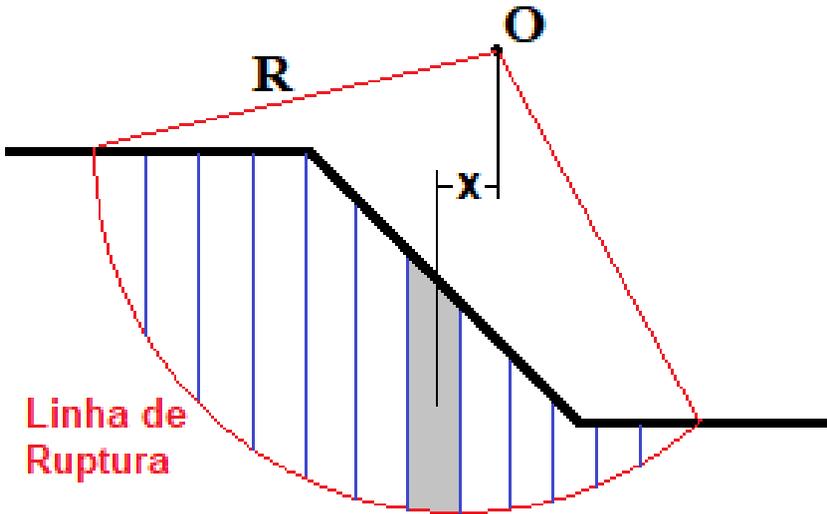
MÉTODO DE EQUILÍBRIO-LIMITE	Método do círculo de atrito	
	Método Sueco	de Fellenius (das Fatias)
		de Bishop Simplificado
		de Morgenstern-Price
Método das cunhas		

Fonte: MASSAD, 2010, p. 65

Neste artigo nós adotaremos o Método das Fatias (ou Fellenius, ou lamelas). Para isso, admitimos que a linha de ruptura seja um arco de circunferência e a massa de solo seja

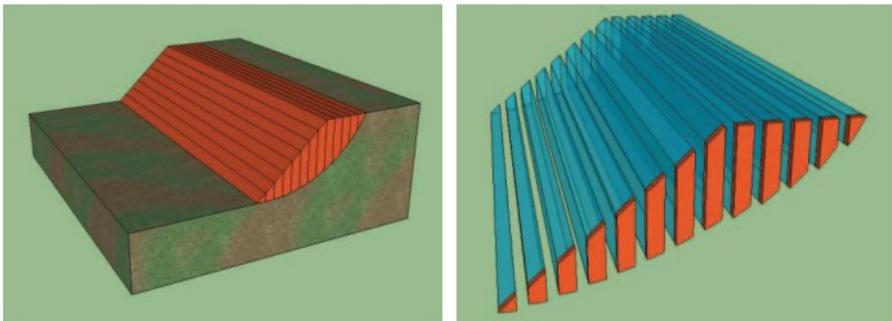
dividida em fatias por linhas verticais, como visto na Figura 7 e 8.

Figura 15. Métodos das Fatias



Fonte: Produzida pelo autor

Figura 16. Divisão do talude em fatias

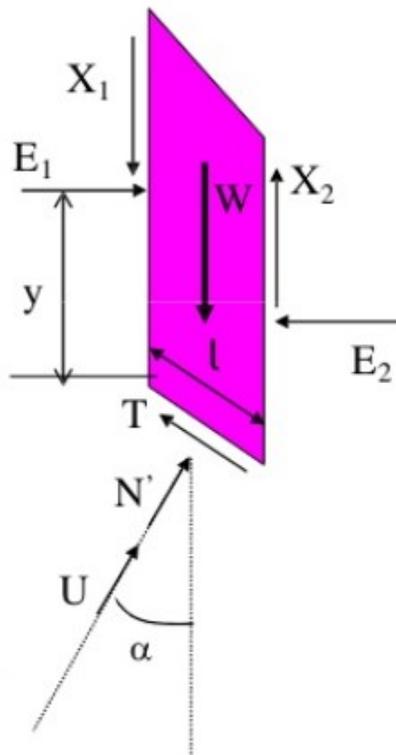


Fonte: SILVA, 2011, p.13

Neste método, as fatias verticais são analisadas individualmente, como se fosse um único bloco. Promove-se a análise do equilíbrio das forças envolvendo o peso (P ou W) da fatia, as forças resultantes referentes às pressões neutras (U), e as forças E e X, na face direita da fatia (MASSAD, 2010, p. 65). Abaixo, Figura 9, as forças que atuam em cada fatia.

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} \quad (\text{equação 4})$$

Figura 17. Forças atuantes na fatia de talude



Fonte: GOMES, s.d, p.11

Como a força tangencial $T = l \cdot \tau_{mob}$ e considerando o exposto na equação 4, temos,

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} \implies F_s = \frac{c' + \sigma' \cdot \tan \phi'}{\tau_{mob}} \implies$$

$$F_s = \frac{c' + \sigma' \cdot \tan \phi'}{\frac{T}{l}} \implies T = \frac{l \cdot c' + \sigma' \cdot l \cdot \tan \phi'}{F_s}$$

$$\sigma' \cdot l = N' T = \frac{l \cdot c' + N' \cdot \tan \phi'}{F_s} \quad (\text{equação 5})$$

Sabendo que o somatório das forças horizontais é identicamente nulo, $\sum E = 0 = \sum X$, e respeitando o posicionamento das forças tão quais estão postas na Figura 9, sobre uma angulação α e as relações $N' + U = N$ e $L_a = \sum l$. A relação abaixo está na base da fatia.

$$\sum X = 0 \implies N = W \cdot \cos \alpha \implies N' + U = W \cdot \cos \alpha \implies N' = W \cdot \cos \alpha - U$$

Já que $U = ul$, temos

$$N' = W \cdot \cos \alpha - U. \quad (\text{equação 6})$$

Sabendo que $\sum T = \sum W \sin \alpha$, temos,

$$\sum \left[\frac{l \cdot c' + N' \cdot \tan \phi'}{F_s} \right] = \sum W \sin \alpha \implies \frac{1}{F_s} [c' \sum l + \tan \phi' \cdot \sum N'] = \sum W \sin \alpha$$

$$\Rightarrow \frac{1}{F_s} [L_a \cdot c' + \tan \phi' \cdot \sum N'] = \sum W \sin \alpha \Rightarrow F_s = \frac{L_a \cdot c' + \tan \phi' \cdot \sum N'}{\sum W \sin \alpha}.$$

Assim, pela equação (6),

$$F_s = \frac{L_a \cdot c' + \tan \phi' \cdot \sum (W \cdot \cos \alpha - U)}{\sum W \sin \alpha}. \quad (\text{equação 7})$$

A norma que regulamenta os requisitos mínimos para um estudo e controle da estabilidade de encostas (taludes de origem natural) e de taludes, resultantes de cortes e aterros, é a NBR 11682: 2009. Nela encontramos importantes definições e os estudos relativos às estabilidades de encostas e como minorar os efeitos de sua instabilidade.

Nas palavras de Guerra (2000), o estudo na série histórica de eventos de deslizamentos em dada região é de suma importância.

A previsão de deslizamento e a redução de suas consequências podem ser alcançadas quando se obtém conhecimento detalhado da frequência, características e magnitude dos deslizamentos numa área geográfica (GUERRA, 2000, p. 171)

O mesmo autor descreve alguns passos importantes para diminuição dos riscos e em seu respectivo estudos. Aqui faremos uma breve abordagem nas seguintes subseções.

Mapas de Susceptibilidade a Deslizamentos

Brabb (1984 apud FERNANDEZ *et al*, 1999) define a susceptibilidade ao deslizamento de terra como “a tendência de um deslizamento de terra ser gerado alus alu específica no alus; isso pode ser medido a partir da correlação entre fatores determinantes, juntamente com a distribuição aluses dos movimentos”.

Os zoneamentos das regiões com susceptibilidade a deslizamentos não serve como ferramenta de determinação da estabilidade de talude, mas é uma importante para alusesr uma alu de estudo em zonas por características suficientemente semelhantes quanto à probabilidade da ocorrência de deslizamento.

Tais mapas são instrumentos técnico-científicos fundamentais para reduzir os riscos e são resultados de estudos de diversos órgãos das sociedades geotécnicas, como a Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações (ISS-MFE), manuais de preparação de Hazard Maps (Varnes, 1984) e de um guia para mapeamento de risco (IAEG, 1993).

De forma geral os mapas de susceptibilidade foram elaborados do cruzamento de dados dos mapas de inventários de deslizamentos com tratamentos estatísticos e qualitativos (De Graff e Romesburg, 1980).

Através de reconhecimento de campo, usando também fotos de diferentes épocas, realizou-se o cruzamento dos dados para gerar um mapa, dividindo-se as classes de riscos em alus tipos, como mostra o Quadro 03.

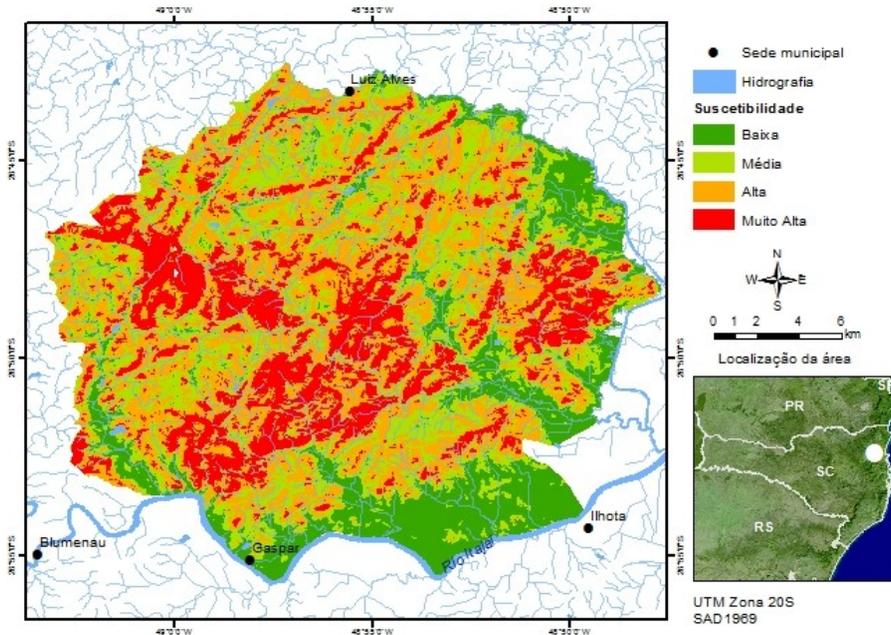
Quadro 03. Classificação de risco quanto à susceptibilidade de deslizamento pelo esquema de cores.

<p>Áreas de Muito Baixa Susceptibilidade (BRANCO)</p>	<p>Áreas com pouquíssima probabilidade a deslizamentos, onde nenhum movimento significativo foi detectado nas últimas décadas. Em geral, relacionada à áreas com declividade menor que 10%.</p>
<p>Áreas de Baixa Susceptibilidade (V...ERDE)</p>	<p>Áreas pouco susceptíveis a deslizamentos, um número muito reduzido de movimentos anteriores ocorreram nestes locais. Em geral, envolvem as áreas de encosta com coberturas vegetais ainda preservadas e caracterizadas pela aluses de solo residual desenvolvido sobre aluse.</p>
<p>Áreas de Moderada Susceptibilidade (AMARELO)</p>	<p>Áreas susceptíveis a deslizamentos; um número razoável de acidentes anteriores ocorreu nestes locais. Em geral, envolvem áreas de declividade acima de 20%, composta de solo residual desenvolvido sobre aluses;</p>
<p>Áreas de Alta Susceptibilidade (VERMELHO)</p>	<p>Áreas muito susceptíveis a deslizamentos. São áreas críticas conhecidas, seja pela frequência de acidentes, seja pelo elevado número de obras de contenção executadas nas encostas. Em geral, envolvem áreas com favelas caracterizadas por depósitos de alus, blocos rochosos e lascas instáveis.</p>

Fonte: GUERRA, 2000, p. 174-175.

Um bom exemplo está apresentado na Figura 10, referente ao município de Luis Alves – SC, que em 2008 teve um caso de alagamento e deslizamentos de terra que causou uma das maiores fatalidades da história do Brasil, contabilizando 114 mortes.

Figura 18. Mapa de suscetibilidade a deslizamento de terra.



Fonte: <http://www.sinageo.org.br/2014/trabalhos/3/3-11-984.html>

Cartas de Riscos de Acidentes Associados a Deslizamentos

Após a identificação da região propícia ao deslizamento, usam-se métodos específicos ligados à cartografia de risco de

acidentes (GUERRA, 2000, p. 175). Esta análise de risco está associada à equação,

$$R = P \cdot C. \quad (\text{equação 8})$$

onde, R equivale ao risco de deslizamento, P equivale à susceptibilidade (probabilidade de ocorrência) e C a consequência do acidente.

Os instrumentos cartográficos técnico-científicos que demonstram a distribuição, os tipos, a frequência, as características, o grau e a hierarquização do risco associado aos deslizamentos, são conhecidos com Cartas de Risco Geológicos (GUERRA, 2000, p. 176).

Na última década, a elaboração de carta de risco associada a deslizamento vem aumentando, já sendo atividades reanentes em alguns municípios. Sua metodologia de elaboração compreende: identificação de risco (definição, caracterização, delimitação, determinação dos condicionantes de deslizamentos e rea de influência) e análise de risco (levantamento de dados, mapeamento de campo e representação cartográfica).

Medida de Redução dos Acidentes Associados a Deslizamentos

Segundo Cerri (1992 e 1993, apud Guerra, 2000, p. 181) a redução do risco de acidentes e de suas consequências, sociais ou econômicas, está condicionada a três atividades: “adoção de medidas de prevenção de acidentes; planejamento para situações de emergência; e informações públicas e programa de treinamento”.

a) A adoção de medidas de prevenção de acidentes

Envolve ações como a retirada das pessoas das áreas de risco visando reduzir as possíveis fatalidades e garantir o seu retorno ao local de origem (quando não for possível garantir a relocação dessas pessoas), o controle da ocupação das áreas de riscos tendo como base as informações contidas na carta geotécnica da região e a recuperação da área de risco através de obras de contenção e drenagem.

Essas ações devem ser conduzidas pela Defesa Civil, por meio de seus Planos Preventivos que deve conter quatro fases: elaboração, implantação, operação e avaliação (Cerri,1992-1993, apud Guerra, 2000, p. 183).

b) Planejamento para as emergências

Caso o acidente seja inevitável, um bom planejamento para as situações de emergência diminui consideravelmente os danos sociais e econômicos oriundos do evento. Em cidades que têm uma frequência alta de deslizamentos convém a contratação de profissionais com formação em geociência.

Inicialmente se devem tomar medidas técnicas baseadas na carta de risco ou nas vistorias e nos relatos de moradores para estimar a extensão da área ameaçada e de moradias em risco. Em seguida, fazem-se ações de conscientização dos moradores junto às associações de moradores das comunidades afetadas. Sequencialmente, estruturam-se as equipes envolvidas no trabalho de emergência, principalmente aos componentes da Defesa Civil. Por fim, realiza-se a orientação das equipes de resgate e a restauração da área

abalada, visando à segurança da população vizinha e da equipe de resgate (GUERRA, 2000, p. 184).

c) Informações públicas e programa de treinamento

A redução efetiva das fatalidades e prejuízos advindos do deslizamento está diretamente associada à relação entre a sociedade e os órgãos responsáveis por prevenir e remediar esse tipo de acidentes.

O compartilhamento de informações técnicas entre Defesa Civil, Corpo de Bombeiro, técnicos das prefeituras e da população em geral, bem como as campanhas de treinamentos e distribuição de cartilhas de orientação são de fundamental importância nas medidas de redução de acidentes.

d) Impermeabilização de taludes estabilizados

Como visto na seção 2.2, a permeabilidade do talude altera sua estabilidade mudando a percolação interna no maciço. Assim, para garantir a estabilidade do talude devem-se fazer ações de drenagem e/ou impermeabilização a montante.

A impermeabilização também ajuda na proteção contra erosão. No período de chuva o solo tende a saturar na superfície do solo ou na elevação do nível de lençol freático, podendo ocorrer a erosão no pé de talude ou promover a erosão interna.

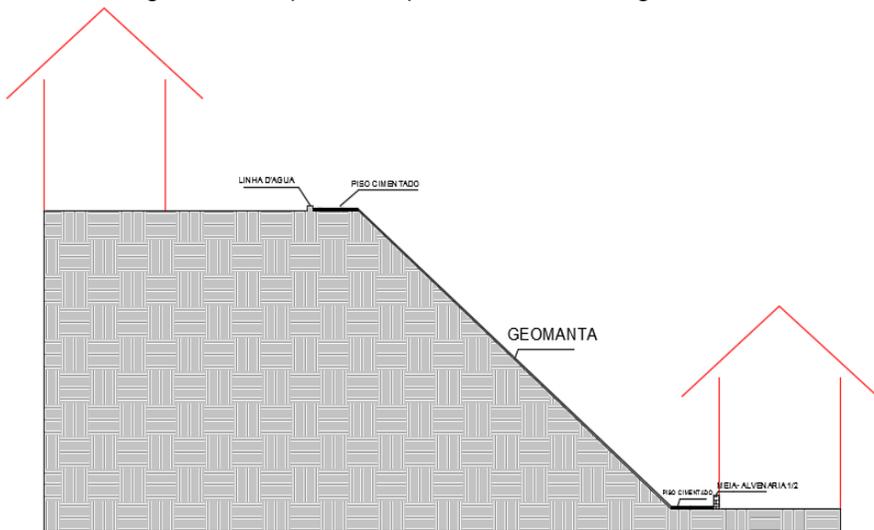
Atualmente existem diversos métodos e materiais responsáveis por promover essa impermeabilização pelo revestimento. Uma boa solução é o uso de geossintéticos. Que por ter uma aplicação simples e rápida torna seu ideal para

taludes em áreas urbanas, como visto no esquema na Figura 11.

Geossintético é um produto elaborado de materiais poliméricos para ser adicionados ou associados a materiais sólidos da natureza ou outras matérias geotécnicas da engenharia civil. Os polímeros mais usados na composição são PET, PA, PE, LDPE, LLDPE, HDPE, PP, PS, PVC, ECB e CPE (COSTA *et al*, 2015).

Geotêxteis, tipo de Geossintético, são mantas contínuas de fibras, filamentos ou tecidos flexíveis e permeáveis. São utilizados para aplicações de separação, proteção, filtração, drenagem, reforço e controle de erosões. Mas as quatro funções básicas que desempenham são: separação, reforço, drenagem e filtração (JANSEN, 2012). Classificando-se como Geotêxtil Tecido (GTW); Geotêxtil Não-tecido (GTN); Geotêxtil Tricotado (GTK); Geotira (GI) ou Geotubo (GP).

Figura 19. Esquema de posicionamento da geomanta



Fonte: Produzida pelo autor

Os Geossintéticos mais usados em obras de impermeabilização são Geogrelhas, GTW, GTN, Geocompostos, GeoNets (“geo-redes”). Um bom exemplo é a Geomembrana de PVC (Policloreto de Vinila), como visto na Figura 11, que é formado por uma membrana impermeável composta por fios sintéticos e que protege a encosta em período de chuva (NBR 12553, 2003).

Figura 20. Geomembrana PVC



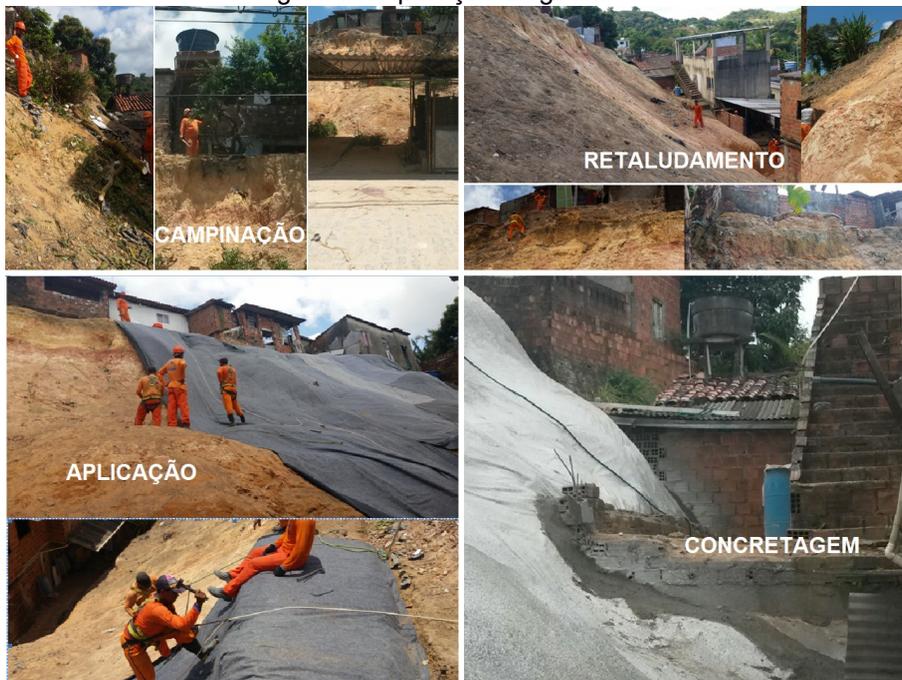
Fonte: SOUZA, 2016, p. 53

A aplicação deste material em taludes estabilizados passa por quatro etapas: capinação (para retirada de lixo e vegetação da superfície inclinada), retaludamento (deixando a superfície mais uniforme e com menos possíveis pontos que possam causar ruptura na membrana), aplicação da geomanta e concretagem (onde se aplica um concreto específico que ajuda no processo de impermeabilização e protege a manta da ação

da chuva, sol, contato de pequenos animais, etc), vide Figura 12.

A aplicação da Geomembrana de PVC requer grande atenção, principalmente quanto às emendas. BRAJA (2007, apud SOUZA, 2016, p. 53) relatar existir vários tipos de emendas: “de aba com adesivos, com fita gomada, macho e fêmea, fundida por extrusão, e fundida em filete, sendo a mais utilizada a emenda feita com adesivo”.

Figura 21. Aplicação da geomanta



Fonte: Produzida pelo autor

CONCLUSÃO

Os custos associados às consequências de um deslizamento de terra frequentemente superam significativamente os gastos necessários para sua prevenção. Quando esses acidentes ocorrem, os prejuízos podem ser incalculáveis, tanto em termos econômicos quanto em perda de vidas humanas. Portanto, a implementação de estratégias de prevenção é essencial.

Medidas como o mapeamento de áreas de risco, a realização de estudos de estabilidade, o monitoramento contínuo dessas regiões, campanhas de conscientização pública, e a execução de intervenções e obras estruturais são fundamentais para minimizar a ocorrência de deslizamentos. Essas ações não só reduzem a probabilidade de fatalidades, mas também mitigam os impactos socioeconômicos que tais desastres podem causar.

A permeabilidade da água no solo dos taludes é um dos principais fatores responsáveis pela maioria dos deslizamentos de terra no Brasil, especialmente em áreas de grande importância para as atividades humanas. Uma estratégia eficaz para prolongar a estabilidade dos taludes é a sua impermeabilização, utilizando geomantas de PVC. Essas geomantas são de fácil manipulação e aplicação, o que não só acelera a execução das obras, como também reduz a geração de resíduos, proporcionando maior economia e eficiência na construção.

Apesar dos benefícios destacados, os geotêxteis ainda possuem um vasto potencial a ser explorado na estabilização e impermeabilização de taludes. Este campo de estudo representa uma oportunidade promissora para o

desenvolvimento de novas técnicas e materiais que possam contribuir significativamente para a segurança e sustentabilidade das áreas suscetíveis a deslizamentos.

Assim, a pesquisa contínua e o avanço tecnológico no uso de geotêxteis podem oferecer soluções inovadoras e eficazes para a estabilização de taludes, proporcionando benefícios ambientais, econômicos e sociais duradouros. A relevância desse campo de estudo para a sociedade é inegável, e seu desenvolvimento pode trazer melhorias substanciais na prevenção de deslizamentos e na mitigação de seus impactos.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682: Estabilidade de taludes. Comitê Brasileiro de Construção Civil. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12553: Geotêxteis. Comitê Brasileiro de Construção Civil. Rio de Janeiro, 2003.

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização Geológico-Geotécnica Voltada à Estabilização de Encostas: Uma Proposta Metodológica. Rio de Janeiro: COBRAE, 1992.

BRAJA, M. Fundamentos da engenharia geotécnica. 6. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

CARVALHO, Matheus. Muro de Arrimo – Definição, Tipos e Etapas. CarLuc. Disponível em: <<https://carluc.com.br/estruturas-de-contencao/muro-de-arrimo/>>. Acesso em: 07 ago. 2024.

CERRI, L. E. S. Riscos geológicos associados a escorregamentos: uma proposta para a prevenção de acidentes. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, São Carlos, 1993.

CERRI, L. E. S. Riscos Geológicos Associados a Escorregamentos na Região Metropolitana de São Paulo. In: PROBLEMAS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS NA RMSP, Anais..., São Paulo: ABGE-ABMS, SBGS/SP, 1992. p. 209-255.

COSTA, A. H. et al. Versatilidade dos Geossintéticos Aplicada à Engenharia. XII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia. RS: 2015.

*****GUERRA, A. J. T.** Geomorfologia e meio ambiente. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2000.

GUIA DA ENGENHARIA.*** Disponível em: <<https://www.guiadaengenharia.com/estabilizacao-taludes/>>. Acesso em: 07 ago. 2024.

JANSEN, R. B. Advanced Dam Engineering for Design, Construction, and Rehabilitation. 1. ed. Estados Unidos da América: Spronger Verlag NY, 2012.

LEROUEIL, S. Natural slopes and cuts: movement and failure mechanisms. Québec: Géotechnique, 2001.

MOREIRA, E. C. G.; JUNIOR, F. F. A. Fenômenos de instabilidade em taludes urbanos. Universidade Católica de Brasília – UCB: Brasília, 2004.

SHARPE, C. F. S. Landslide and Related Phenomena. New Jersey: Pageant, 1938.

SOUZA, J. M. Análise de estabilidade de uma encosta para aplicação de geomanta em Camaragibe – Estudo de Caso. UNINASSAU: Recife, 2016.

TERZAGHI, K. Mecanismo dos Escorregamentos de Terra. São Paulo: Grêmio Politécnico, 1967.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J. A.; AMARAL, R.(orgs.). Desastres naturais: conhecer para prevenir. São Paulo: Instituto Geológico, 2009.

SOBRE OS AUTORES

JOSÉ IGOR GONÇALVES DA SILVA



José Igor Gonçalves da Silva é um educador com uma sólida carreira no ensino, iniciando sua trajetória na rede privada em 2005. Desde o começo, demonstrou um forte compromisso com a educação, dedicando-se a desenvolver métodos de ensino que atendam às necessidades dos alunos e promovam um ambiente de aprendizagem estimulante. Ele possui graduação e mestrado em Matemática pela UFRPE.

Em 2010, José Igor ampliou sua atuação ao ingressar na rede pública de ensino do estado de Pernambuco, onde continuou a aplicar sua experiência e paixão pela educação. Sua transição para a rede pública marcou um novo capítulo em

sua carreira, permitindo-lhe impactar um público mais amplo e enfrentar novos desafios na formação de jovens. Além de sua experiência no ensino, José Igor possui uma sólida formação em Engenharia Civil, com graduação pela UNINASSAU-PE e MBA em Projeto, Desempenho e Construção de Estruturas e Fundações pela IPOG-GO, atuando na execução de obras residenciais, laudos técnicos e dimensionamento estrutural.

Atualmente, José Igor é estudante de doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais, com foco em pesquisas voltadas para a preparação de materiais e nanomateriais para produção de energia. Seu trabalho envolve o desenvolvimento de técnicas para geração de hidrogênio (H₂) como fonte de energia limpa. Além disso, ele estuda a preparação e aperfeiçoamento de catalisadores e supercatalisadores, bem como soluções para armazenamento de energia, contribuindo para avanços significativos na área de energias renováveis.

FAGNER CAMPOS DOS SANTOS



É Mestrando pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPCEM) pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB) na área de materiais cimentícios e geopoliméricos, Especialista em Engenharia de Avaliações e Perícias pelo Instituto IDD (2024), Especialista em Engenharia Diagnóstica Estrutural pela PUC-MINAS (2023), Especialista em Gestão da Qualidade e Produtividade pelo Uniesp Centro Universitário (2023), Especialista em Engenharia de Segurança no Trabalho pela Faculdade Três Marias - João Pessoa (2021), Engenheiro Civil pela Faculdade Maurício de Nassau - João Pessoa (2019).

Atualmente é Sargento do Exército Brasileiro lotado na BASE ADMINISTRATIVA DA GUARNIÇÃO DE JOÃO PESSOA. Tem experiência na área de Engenharia Civil, onde atua há mais de 12 anos, tendo iniciado a carreira como Técnico em Edificações em uma obra de grande porte. Desenvolve trabalhos com ênfase em técnicas construtivas, fiscalização de obras e Patologias das Edificações.

É membro do Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Pernambuco (IBAPE-PE), onde realiza perícias judiciais junto aos tribunais de Justiça (TJPB e TJPE), e extrajudiciais. Faz parte do corpo docente do curso de Pós-Graduação do Uniesp Centro Universitário, onde ministra disciplinas na área de Engenharia de Segurança do Trabalho.

É professor prestador de serviços junto ao Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI-Bayeux), onde ministra disciplinas em cursos técnicos e cursos de formação rápida.

ISBN 978-655376390-6



9

786553

763906