

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL / INSTITUTO DE GEOGRAFIA (IG)

MAIRA VIEIRA DE ALMEIDA

**ANÁLISE 3D COMPUTACIONAL DA ESTABILIDADE DE TALUDE ROCHOSOS  
FRATURADOS UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS DE ELEVADA RAZÃO DE  
ASPECTO**

MONTE CARMELO  
2024

MAIRA VIEIRA DE ALMEIDA

**ANÁLISE 3D COMPUTACIONAL DA ESTABILIDADE DE TALUDE ROCHOSOS  
FRATURADOS UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS DE ELEVADA RAZÃO DE  
ASPECTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Geologia do Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Michael Andrade Maedo

MONTE CARMELO

2024

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU com  
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

A447	Almeida, Maira Vieira de, 1997-
2024	<p>ANÁLISE 3D COMPUTACIONAL DA ESTABILIDADE DE TALUDE ROCHOSOS FRATURADOS UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS DE ELEVADA RAZÃO DE ASPECTO [recurso eletrônico] / Maira Vieira de Almeida. - 2024.</p> <p>Orientador: Michael Andrade Maedo.</p> <p>Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em Geologia. Modo de acesso: Internet.</p> <p>Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Geologia. I. Maedo, Michael Andrade ,1987-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Geologia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 551</p>

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

MAIRA VIEIRA DE ALMEIDA

**ANÁLISE 3D COMPUTACIONAL DA ESTABILIDADE DE TALUDE ROCHOSOS  
FRATURADOS UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS DE ELEVADA RAZÃO DE  
ASPECTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Geologia do Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Monte Carmelo, 16 de agosto de 2024.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Michael Andrade Maedo – Orientador  
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

---

Prof. Dr. Fabiano Mota da Silva  
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Luciany Oliveira Seabra  
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

*Dedico este trabalho a Deus, a minha família,  
amigos e ao meu orientador, que me deram  
estímulo, carinho e compreensão.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente expresso a minha sincera gratidão a Deus, por ter guiado os meus passos durante a graduação e por ter me dado forças para poder concluir esta etapa da minha vida e este trabalho.

Agradeço profundamente ao Prof. Dr. Michael Maedo, que acreditou em mim e por toda orientação, paciência e dedicação que teve comigo ao longo de todo o trajeto. Todo suporte que me ofereceu foram imprescindíveis para a condução deste estudo.

Agradeço aos meus queridos pais, Marcio Navarro de Almeida e Maria Vieira de Almeida, por todos os conselhos e carinhos que me deram ao longo da minha vida. O apoio de vocês durante a minha formação acadêmica foi fundamental, sem isso eu não teria conseguido.

Gostaria de agradecer também a todos os professores do curso de Geologia, pela partilha dos seus conhecimentos e experiência através das aulas e a Coordenação do Curso de Graduação em Geologia - COGEO por todo o suporte e assistência oferecido.

Não posso deixar de agradecer aos meus amigos e colegas do curso, que muitas vezes ajudaram a suportar os momentos difíceis e desafios ao longo desses anos de graduação.

## RESUMO

O acidente no lago de Furnas, no município de Capitólio, em Minas Gerais, envolvendo a ruptura de uma massa rochosa abriu discussão sobre a estabilidade de meios geológicos fraturados. A análise de estabilidade de talude consiste em determinar o Fator de Segurança (FS) associado a uma determinada superfície de ruptura. Tradicionalmente, a análise é realizada com base em Métodos de Equilíbrio Limite, desprezando o comportamento tensão-deformação do meio. Além disso, geralmente o efeito da fratura não é considerado nas análises envolvendo meios rochosos fraturados. O presente trabalho objetiva investigar a viabilidade e empregabilidade de utilizar a Técnica de Fragmentação da Malha (TFM) em conjunto com o Método de Redução da Resistência ao Cisalhamento para determinar o FS em análises tridimensionais. Na TFM, elementos finitos sólidos de interface de elevada razão de aspecto munidos com modelos constitutivos apropriados são posicionados entre os elementos da malha original, levando a malha a uma configuração fragmentada. O modelo constitutivo dos elementos de interface será baseado no critério de Mohr-Coulomb e, posteriormente, implementado no programa de elementos finitos CODE\_BRIGHT para a realização dos experimentos numéricos.

**Palavras-chave:** Tridimensional. Talude rochoso. Fraturas. Método dos elementos finitos. Elementos de alta razão de aspecto.

## **ABSTRACT**

The accident at Furnas Lake in the Capitólio city, Minas Gerais, involved the failure of a rock mass due to the instability of the fractured geological environment. Slope stability analysis consists of determining the Factor of Safety (FoS) associated with a given failure surface. Traditionally, the analysis is based on Limit Equilibrium Methods, neglecting the stress-strain behavior of the medium. This study proposes to use the Mesh Fragmentation Technique (MFT) together with the Shear Strength Reduction Method (SSR) to conduct slope stability analyses and determine the FoS in three-dimensional analyses. In the TFM, solid finite elements with a high aspect ratio (HAR-FE) were positioned between the elements of the original mesh, leading the mesh to a fragmented configuration. The constitutive model of such finite elements is based on Mohr-Coulomb criterion, which was implemented in the finite element program CODE\_BRIGHT to carry out numerical experiments.

**Keywords:** Three-dimensional. Rock slope. Fractures. Finite element method. High aspect ratio finite elements.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Malha de elementos finitos.....	17
Figura 2 - Material degradado.....	20
Figura 3 - Diagrama tensão-deformação axial .....	21
Figura 4 - (a) lei de endurecimento linear; (b) lei de abrandamento linear; (c) dano perfeito; (d) lei de endurecimento exponencial; (e) lei de abrandamento exponencial.....	22
Figura 5 - Interface de elementos finitos sólidos: (a) elemento triangular de três nós e (b) elemento tetraedro de quatro nós. ....	25
Figura 6 - Experimento numérico de cisalhamento direto: (a) geometria e malha de elementos finitos; (b) aplicação do deslocamento vertical para induzir cisalhamento; (c) detalhe mostrando o elemento finito de alta razão de aspecto entre os elementos regulares tetraédricos. ....	29
Figura 7 - Curva de tensão de cisalhamento por tempo para valores de coesão na direção x e y .....	30
Figura 8 - Talude Tridimensional .....	31
Figura 9 - Malhas regulares tridimensionais empregadas para simular o talude homogêneo .....	32
Figura 10 - Deslocamentos obtidos nas simulações do talude homogêneo .....	33
Figura 11 - Valores de deslocamento adimensional obtidos por meio das simulações do talude homogêneo.....	33
Figura 12 - Fissura de tensão atrás de uma massa rochosa deslizante na qual ocorreu um deslocamento horizontal significativo (acima do Lago Kooteney, British Columbia) .....	34
Figura 13 - Talude Tridimensional com uma fatura plana .....	35
Figura 14 - Malha tridimensional empregadas para simular o talude com uma fratura .....	36
Figura 15 - Deslocamentos obtidos nas simulações do talude tridimensional com uma fratura .....	36
Figura 16 - Valores de deslocamento adimensional obtidos por meio das simulações do talude tridimensional com uma fratura .....	37
Figura 17 - Falha típica de cunha envolvendo deslizamento em duas juntas persistentes com linha de intersecção de juntas na ponta da face da rocha e um plano superior que formou uma rachadura de tensão (rocha vulcânica forte na Interestadual 5, perto de Grants Pass, Oregon).....	38
Figura 18 - Talude tridimensional em cunha.....	39
Figura 19 - Malha tridimensional empregadas para simular o talude em cunha.....	39
Figura 20 - Deslocamentos obtidos nas simulações do talude tridimensional em cunha.....	40
Figura 21 - Valores de deslocamento adimensional obtidos por meio das simulações do talude tridimensional com uma fratura.....	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelo constitutivo de Mohr-Coulomb.....	22
Tabela 2 - Esquema de integração IMPL-EX para o modelo de Mohr-Coulomb.....	24
Tabela 3 - Propriedades Mecânicas do Material .....	31
Tabela 4 - Quantidades de elementos e nós de cada malha .....	32
Tabela 5 - Propriedades Mecânicas do Material .....	35
Tabela 6 - Quantidades de elementos e nós da malha .....	36
Tabela 7 - Propriedades Mecânicas do Material.....	39
Tabela 8 - Quantidades de elementos e nós da malha .....	40

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>MECÂNICA DO DANO CONTÍNUO .....</b>	<b>18</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODO .....</b>	<b>26</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>28</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>38</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>41</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O talude é definido basicamente como um terreno inclinado, em relação a horizontal que delimita uma massa de solo, rocha ou outro material qualquer (ABNT NBR 11682, 2009). A estabilidade de taludes sempre foi um tema de muitos estudos e é considerado um assunto de suma importância, posto que a instabilidade desse, em muitas situações geram perdas irreparáveis para a sociedade, como perdas de vidas humanas e prejuízos econômicos. Os deslizamentos são processos naturais que podem ser detectados por meio de instalação de sensores e principalmente pelo monitoramento geotécnico adequado para identificar a existência de algum risco de desabamento, com isso é possível emitir alertas a população e evitar tragédias. Ademais, a existência de fraturas em taludes rochosos afeta consideravelmente o comportamento do meio, gerando um plano de falha preferencial, levando a uma possível ruptura.

Assim sendo, as análises geotécnicas são essenciais e vem atraindo cada vez mais profissionais para esta área. Tradicionalmente, as análises de estabilidades de taludes e encostas são realizadas por meio de métodos baseados no Método do Equilíbrio Limite (MEL), o qual despreza a relação tensões deformação e calcula o Fator de Segurança (FS) de uma superfície de ruptura de geometria pré definida admitindo nessa superfície a relação entre a resistência ao cisalhamento ( $\tau_r$ ) e os esforços cisalhantes atuante ( $\tau_s$ ). Neste caso,  $FS > 1$  reflete a condição estável do talude,  $FS = 1$ , indica a iminência da ruptura da massa de e/ou rocha e  $FS < 1$  resulta em uma situação de instabilidade.

Com o avanço na tecnologia computacional e dos métodos numéricos, os estudos atuais utilizam análises de deslocamento por meio do método de elementos finitos e considera se a relação de tensão e deformações dos materiais. Um exemplo disso, está no trabalho realizado pelos autores (XINXIN, Li; JIANSHE, Liu; WENPING, Gong; YI, Xu; BOWA, 2021), em que um esquema de modelagem baseado em rede de Fratura Discreta Eficiente (FDE) foi desenvolvido. Para identificar a superfície de deslizamento crítica e avaliar o Fator de Segurança, foi empregado a análise de redução de resistência baseada no Método dos Elementos Finitos (MEF). Outra proposta consiste em utilizar a Técnica de Fragmentação da Malha (TFM) (MAEDO, 2015; MAEDO, et al. (2020); MAEDO, et al. (2021); MANZOLI, et al. (2016)) para reproduzir o comportamento do meio fraturado e que, em conjunto com o Método de Redução de Resistência ao Cisalhamento, é capaz de determinar o FS. Na TFM, elementos de interface de alta razão de aspecto são introduzidos entre os elementos da malha original, fragmentando.

Tais elementos de interface são munidos de um modelo constitutivo que reproduz o processo de degradação do material.

Neste trabalho foram feitos modelamentos de taludes tridimensionais baseados no critério de falha de Mohr-Coulomb. Este critério utiliza como parâmetros elásticos o módulo de elasticidade do material ( $E$ ) e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), enquanto o ângulo de atrito ( $\varphi$ ) e a coesão ( $c$ ) são os parâmetros utilizados para definir o limite de dano do material geológico. O modelo de Mohr Columb e o Método de Redução de Resistência ao Cisalhamento (Shear Strength Reduction Method) são necessários para determinar o Fator de Segurança (FS) associado ao talude.

### 1.1 Motivação

O monitoramento geotécnico passou a ser cada vez mais procurado pelas empresas e órgãos públicos devidos aos desastres envolvendo deslizamentos de terras e rochas, como o ocorrido no lago de Furnas em Capitólio (MG) no ano de 2022, em que um bloco de rocha desabou e matou 10 pessoas que estavam no local.

Assim, a implementação de análises geotécnicas em estabilidades de talude surge como uma solução vital para garantir a segurança e a proteção do meio ambiente circundante, pois é possível detectar precocemente sinais de instabilidade do terreno, como deslizamentos de terra e desmoronamentos, permitindo a tomada de medidas preventivas antes que ocorram incidentes graves.

### 1.2 Objetivos

O presente projeto de conclusão do curso tem como objetivos fazer modelamentos de taludes tridimensionais utilizando a Técnica de Fragmentação da Malha (TFM), na qual elementos finitos tetraédricos de alta razão de aspecto foram inseridos entre os elementos da malha original, para prever a superfície de ruptura de taludes e determinar o FS. Além disso, esse trabalho também tem como objetivos específicos:

- Implementar a Técnica de Fragmentação da Malha (TFM): inserir elementos finitos tetraédricos de alta razão de aspecto entre os elementos da malha original;
- Utilizar o programa CODE\_BRIGHT: aplicar uma versão in-house do programa para capturar o comportamento termo-hidromecânico de meios porosos parcialmente saturados;

- Implementar o modelo constitutivo de Mohr-Coulomb: realizar análises tridimensionais baseadas neste modelo;
- Validar a metodologia: comparar as respostas obtidas com outras metodologias disponíveis na literatura.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O Método do Equilíbrio Limite (MEL) foi e ainda é a principal base nos estudos de estabilidade de taludes. De acordo com Santo 2017, “essa teoria considera que a instabilidade de um talude é deflagrada quando as tensões cisalhantes mobilizadas se igualam à resistência ao cisalhamento. Na análise, a superfície de deslizamento é fragmentada em fatias verticais ou horizontais, para as quais devem ser satisfeitas as condições de equilíbrio estático”. O resultado da análise é expresso em termos de fator de segurança, que indica a necessidade de intervenção para a estabilização do talude. O fator de segurança é descrito em função da resistência ao cisalhamento do solo ( $\tau_s$ ), enunciada aqui pelo critério de Mohr - Coulomb, e corresponde ao número pelo qual se divide a resistência do solo para obter equilíbrio (DUNCAN et al., 2014).

$$\tau \frac{\tau_s}{FS} = \frac{c' + (\sigma' - u) \tan \phi'}{FS} \quad (2.1)$$

onde  $c'_m$  é a coesão mobilizada do solo e  $\phi'_m$  o ângulo de atrito mobilizado, estabelecendo assim a relação:

$$FS = \frac{c'}{c'_m} = \frac{\tan \phi'}{\tan \phi'_m} \quad (2.2)$$

Como o Método do Equilíbrio Limite (MEL) não leva em consideração os deslocamentos, a massa instável se move como um corpo rígido. Os métodos descritos a seguir são fundamentados no MEL:

- Método do Talude Infinito: segundo Massad (2003), taludes infinitos consistem em taludes de encostas naturais que se caracterizam pela sua grande extensão, de centenas de metros, e pela reduzida espessura do manto de solo, de alguns metros. A ruptura, quando ocorre, é do tipo planar, com linha crítica situada na interface entre duas camadas com características físicas distintas. A teoria do talude infinito é bastante útil na avaliação da estabilidade de solos superficiais e trata-se de um método baseado no procedimento do corpo-livre único, de aplicabilidade simples (DUNCAN; WRIGHT, 2005).
- Método de Culman: baseia-se na análise da estabilidade de um talude em função de dois parâmetros, o ângulo de atrito interno e a coesão. Este método defende que a ruptura do

talude ocorre quando a tensão de cisalhamento média, que promove o deslizamento, supera a resistência ao cisalhamento do solo. Segundo Dutra (2013), a análise de estabilidade de taludes pelo método de Culmann tem como hipótese básica a ruptura planar passando pelo pé do talude. Este método produz resultados aceitáveis para taludes aproximadamente verticais (entre  $75^\circ$  e  $90^\circ$ ).

- Método das Fatias (Lamelas) de Fellenius (1927): proposto por Fellenius (1927), foi o primeiro a ser desenvolvido considerando-se a superfície de ruptura como sendo circular. Neste método o talude é dividido em fatias, assumindo-se a base da fatia como linear e em cada base da lamela deve compreender um tipo de solo, não podendo existir dois materiais na mesma base. Além disso, o topo da fatia não deve apresentar descontinuidades. O FS é a relação entre o momento devido as forças resistentes ( $M_r$ ) e o momento devido as forças atuantes ( $M_a$ ) do número total de fatias ( $n$ ) do círculo de ruptura adotado. O método de Fellenius é muito utilizado pela maioria dos programas de computador, já que pode prontamente adaptar geometrias complexas dos taludes, condições variáveis do solo e a influência de cargas externas (ABRAMSON, 2002).
- Método de Bishop Simplificado (1955): este método é baseado no Método das Fatias, assim sendo, também considera a superfície de ruptura não circular. No Método de Bishop Simplificado considera-se que as forças de interação entre as fatias são horizontais e se anulam, desconsiderando as forças tangenciais entre essas e o equilíbrio das forças é feito na vertical. O cálculo do fator de segurança é feito ignorando as forças de corte entre as fatias, satisfazendo apenas o equilíbrio de momentos (AGUILERA, 2009). Esse método satisfaz a condição de força equilíbrio vertical para cada fatia e um momento global de equilíbrio pelo centro da superfície circular em teste. Bishop supõe que todas as forças cisalhantes entre as fatias são nulas, reduzindo o número de incógnitas por  $(n - 1)$ . Isso deixa  $(4n - 1)$  incógnitas, deixando a solução sobrestimada já que a força de equilíbrio horizontal não vai ser satisfeita para uma fatia (ABRAMSON et al., 2002). Entretanto já não satisfaz as forças horizontais de equilíbrio ou os momentos individuais de cada fatia, porém os seus resultados se assemelham aos encontrados pelos métodos mais sofisticados, mesmo não satisfazendo todas as condições de equilíbrio. (DUNCAN e WRIGHT, 1980).

Há outros métodos baseados no MEL, como o Método de Spencer (1967) e o Método de MORGENSTERN & PRICE (1965), juntamente são considerados como métodos de análises rigorosos, pois satisfazem todas as condições de equilíbrio, tanto as de forças quanto as de momento. O método de Spencer (1967) foi no início desenvolvido para trabalhar com

superfícies circulares, no entanto, depois foi adaptado para superfícies não circulares. Segundo Silva (2011) as forças de interação entre as fatias são representadas por uma resultante  $Q$  que assume uma inclinação constante  $T$  com a horizontal, essa resultante é aplicada na base da fatia e no ponto intermédio dela. A reação normal  $N$  é obtida pelo equilíbrio de forças na direção paralela e perpendicular à base das fatias. O fator de segurança pode ser obtido por duas formas: somatório de momentos em relação a um ponto ou somatório de forças na direção horizontal ou paralela à base das fatias. O método prevê o cálculo de FS para os dois ângulos, correspondentes aos dois lados das fatias (Fredlund, 1977). Já no método de MORGENSTERN & PRICE (1965), foi desenvolvido para permitir que a superfície de ruptura assuma qualquer formato, seja circular, não-circular ou composta. Nesta metodologia as forças de interação são controladas pela função  $f(x)$  multiplicada por um fator  $\lambda$ . Essa função determinará a inclinação das forças entre as fatias. Assim sendo, para resolver os cálculos do método, assume-se a relação entre as forças  $E$  e  $T$ , a saber:

$$T = \lambda \cdot f(x) \cdot E \quad (2.3)$$

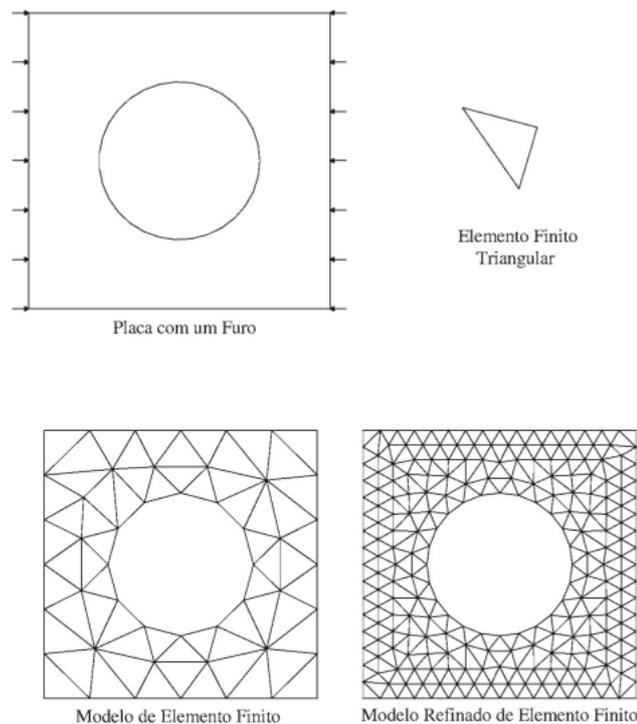
Sendo:  $\lambda$  – a constante a ser determinada pelo processo iterativo

$f(x)$  – função que precisa ser especificada

$E$  - força normal entre as fatias

Segundo MORGENSTERN & PRICE (1965), a função  $f(x)$  são arbitradas como arco seno e essa função apresenta menor influência sobre o fator de segurança.

Devido ao desenvolvimento da capacidade dos computadores e na facilidade em resolver problemas de estabilidade de taludes, o Método dos Elementos Finitos (MEF) ficou cada vez mais conhecido e atualmente é um dos mais procurados em análises geotécnicas, pois pode modelar como os materiais se comportam quando sofrem tensões e deformações não lineares.. Este será o método utilizado neste trabalho. Assim sendo, o Método dos Elementos Finitos (MEF) foi desenvolvido nos anos de 1950 pela indústria aeroespacial. Em 1956, M.J. Turner, R.W.Clough, H.C. Martin e L.J. Topp publicaram um dos primeiros artigos sobre o MEF (Turner et al., 1956). Este método é muito útil para prever o comportamento estrutural, mecânico, térmico, elétrico e químico de sistemas, através de simulações de computador. De acordo com Fish e Belytschko (2009), o princípio básico do MEF é dividir o corpo em elementos finitos, conectados por nós, e obter uma solução aproximada, como mostra a Figura 1. Esta é chamada de malha de elementos finitos e o processo para sua construção é conhecido como ‘geração da malha’. Os computadores são necessários para resolver as equações, para por fim obter uma solução exata.

**Figura 1-** Malha de elementos finitos

**Fonte:** Fish e Belytschko, 2009.

As análises de estabilidade de taludes em duas dimensões era a mais utilizado pelos engenheiros, devido a sua simplicidade dos conceitos e por fornecer estimativas precisas do FS contra falhas. Entretanto, em situações onde a geometria e as condições de carregamento do talude não estão em conformidade com a idealização da deformação plana, uma análise bidimensional do talude pode produzir resultados que não são precisos. Nessas situações, a opção viável seria estudar a análise de ruptura de taludes em três dimensões. Assim sendo, recentemente as análises em 3D vindo sendo cada vez mais procurado pelos pesquisadores (Baker e Leschinsky 1987; Leshchinsky e Baker 1986; Leshchinsky et al. 1985; Cavounidis e Kalogeropoulos 1992). Este método costuma ser necessário quando a massa de falha e a geometria do talude se alteram lateralmente, as propriedades do solo/rocha são anisotrópicas e não homogêneas e as sobretaxas locais são aplicadas ao talude.

Na análise de estabilidade de taludes 3D, o MEF é considerado o mais rigoroso e embora este método leve mais tempo do que outros para serem concluídos, é o que está sendo mais utilizados para verificar o estado de estabilidade de taludes 3D (Ugai e Leshchinsky 1995; Jeremiý 2000; Griffiths e Marquez 2007; Tan e Sarma 2008; Kelesoglu 2016).

Jeremiý (2000) apresentou a mais recente técnica para modelar problemas de estabilidade de taludes em 3D utilizando MEF, que para este problema foi necessário um número relativamente pequeno de elementos finitos. Os mecanismos de ruptura de taludes foram definidos por deformações localizada e contínua. O novo método pode ser usado para descrever gradientes de deformação acentuados causados pela localização de cisalhamento durante falhas em taludes.

Grifths e Marquez (2007) realizaram um critério de falha de Mohr - Coulomb para uma análise 3D de solos perfeitamente plásticos elásticos usando o programa de elementos finitos (FE), assumindo que não há dilatação. Nas etapas de criação da matriz de rigidez e redistribuição de tensões do algoritmo, utilizaram elementos hexaédricos de 20 nós com integração reduzida. Usando um método FE elastoplástico, os autores apresentaram as descobertas de vários exemplos de taludes 3D. Eles provaram que a convergência do fator de segurança 3D com o resultado 2D aumentou.

Zhang et al. (2013) combinaram o método de diferenças finitas elastoplásticas e um método de redução de resistência para estudar como formas complicadas afetam a estabilidade de taludes tridimensionais. Os resultados da análise foram benéficos para a preparação para riscos de deslizamentos ou para a concepção de infra-estruturas de uma forma segura e econômica.

De acordo com Grifths e Marquez (2007), “embora ainda seja considerado difícil que a estabilidade de taludes 3D se torne uma abordagem rotineira na prática geotécnica, o aumento da velocidade e a queda dos custos dos computadores significam que as análises FE não lineares 3D podem ser realizadas rotineiramente em um computador desktop ou laptop. A análise tridimensional é simplesmente mais realista e leva não apenas a uma maior precisão, mas também a uma melhor compreensão da natureza dos mecanismos de ruptura de taludes.”

### **3 MECÂNICA DO DANO CONTÍNUO**

Lamaitre (1992) afirma que o dano de materiais é um processo físico progressivo gradual que leva à sua desintegração. O campo da Mecânica do Dano investiga os mecanismos que causam essa degradação quando os materiais sofrem cargas, usando fatores mecânicos. Além disso, o processo de degradação altera as propriedades elásticas do material, diminuindo sua área efetiva resistente e aumentando conseqüentemente a degradação da rigidez. A

elasticidade está diretamente relacionada ao movimento relativo dos átomos, assim é diretamente influenciada pelo dano, pois o número de ligações atômicas responsáveis pela elasticidade diminui com o dano (Lamaitre, 1992). Desta forma, o presente trabalho irá apresentar conceitos e componentes da formulação da mecânica do dano contínuo aplicada na descrição do comportamento inelástico do material, associado a degradação e ao dano friccional ao cisalhamento.

### 3.1 Variável de dano

O dano é definido fisicamente como uma propriedade que mede o nível de integridade de um corpo, podendo ter valores variáveis de 0 a 1, em que  $d = 0$  representa o estado do material intacto e  $d = 1$  representa o estado do material completamente degradado. Assim sendo, a variável do dano se encontra dentro dos limites  $d \in [0,1]$  e pode ser expressa como:

$$d = \frac{A_D}{A} \quad (3.1)$$

onde  $A_D$  representa a área degradada e  $A$  representa a área total, conforme a Figura 2 a seguir. É imprescindível salientar que a partir do momento em que o material começa a sofrer dano, continuará se degradando, pois o dano não regride, com isso o material não poderá retornar ao seu estado íntegro. Logo, a evolução do dano pode ser expressa como:

$$\dot{d} = \frac{\dot{A}_D}{A} \geq 0 \quad (3.2)$$

### 3.2 Relação constitutiva

Conforme a equação:

$$\sigma = (1 - d)\bar{\sigma} \quad (3.3)$$

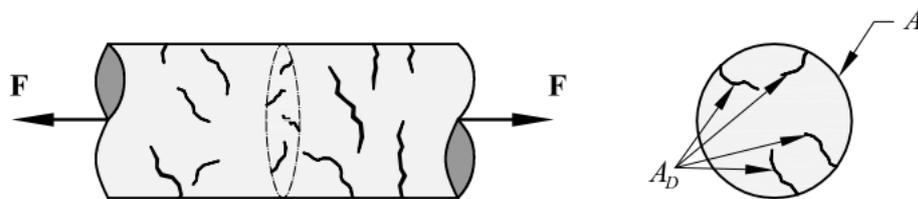
a tensão aparente,  $\sigma$ , e a tensão elástica,  $\bar{\sigma}$ , são expressas em termos da variável de dano,  $d$ . Quando o material ainda se encontra na condição intacta, sem sofrer dano ( $d = 0$ ), a tensão aparente é a mesma que a tensão elástica ( $\sigma = \bar{\sigma}$ ). Porém, quando o material se encontra completamente degradado ( $d = 1$ ) a tensão aparente é zero. Segundo Lamaitre (1983), no princípio da equivalência de deformação ( $\epsilon$ ), consegue-se obter a relação do módulo de

elasticidade íntegro ( $E$ ) e o módulo de elasticidade degradado ( $E_D$ ), usando a variável de dano da seguinte forma:

$$E_D = (1 - d)E \quad (3.4)$$

essa relação expressa que o módulo de rigidez degradado é dependente da variável do dano.

**Figura 2** - Material degradado



**Fonte:** MAEDO, 2015 (Adaptado de Lemaitre, 1983).

### 3.3 Critério de degradação

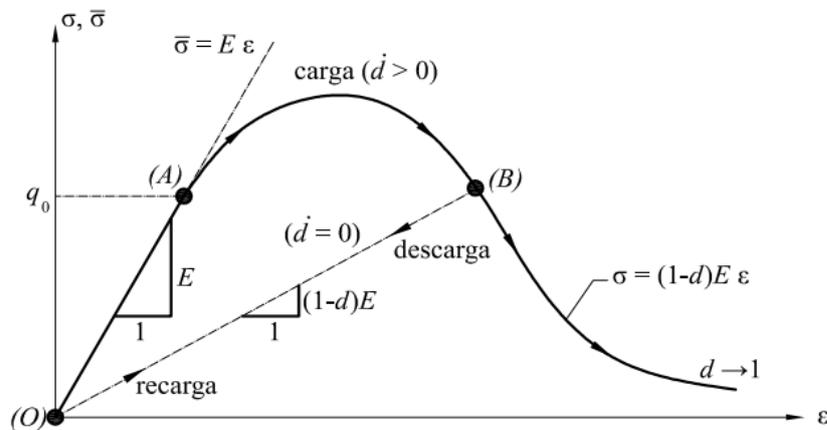
O critério de degradação diferencia o estado elástico, confinado dentro dos limites estabelecidos pela função de dano, do estado que representa o processo de degradação das propriedades do material (MAEDO, 2015). A função que descreve o domínio elástico  $\varphi(\sigma)$ , é encontrado dentro da região  $\varphi(\sigma) < 0$ , delimitada pela superfície de dano  $\varphi(\sigma) = 0$ , podendo ser representada pela equação  $\varphi(\sigma) = f = c + \sigma \tan \phi$ , sendo  $\tau = c + (\sigma) \tan (\phi)$  a tensão que defini a forma do domínio elástico e  $q$  a variável interna, que define seu tamanho. Ademais, também é possível reescrever o critério de degradação no domínio do espaço das tensões elásticas da seguinte forma:  $\varphi(\sigma^-) = \tau = (c' + (\sigma) \tan (\phi))(\sigma^-) - r \leq 0$  e  $r = \frac{q}{1-d}$ , onde  $r$  é a variável interna no espaço de tensões elásticas, e  $r \geq 0$  a evolução da variável interna, em que  $r$  sempre cresce. Isolando a variável de dano tem se a equação  $d(r) = 1 - \frac{q(r)}{r}$ .

#### 3.3.1 Lei de evolução da variável de dano

De acordo com a Figura 3, em materiais dentro do regime linear elástico, como no trecho  $\overline{OA}$ , não há presença de dano  $d = 0 \rightarrow \varphi < 0$ , isso significa que não houve evolução na variável interna ( $\dot{r} = 0$ ), entretanto existe um ponto limite de tensão em (A) em que ao ser ultrapassado, geralmente devido a aplicação de cargas, esse material começa a sofrer degradação, com isso esse corpo sai do regime linear elástico e passa para o regime inelástico (trecho  $\overline{AB}$ )  $\varphi = 0 \rightarrow$

$\dot{r} \geq 0$  e conseqüentemente  $\begin{cases} \dot{r} = \dot{\tau} > 0 \\ \dot{d} > 0 \end{cases} \Rightarrow \dot{\tau} > 0 = \begin{cases} \dot{r} = \dot{\tau} > 0 \\ \dot{d} > 0 \end{cases}$ . Ao retirar a carga aplicada as propriedades desse corpo retornam para o limite linear elástico (trecho  $\overline{BO}$ ),  $\dot{\varphi} < 0$ , dessa forma  $\varphi = 0$ ;  $\dot{\tau} < 0 \Rightarrow \begin{cases} \dot{r} = 0 \\ \dot{d} = 0 \end{cases}$ , porém como sofreu degradação, o seu módulo de elasticidade não será o mesmo de antes e a sua rigidez diminui  $(1-d)$ . Portanto, com as explicitações das equações anteriores e  $r = q_0$  antes do dano, obtém se uma lei de evolução para a variável interna  $r(t) = r_t = \max_{s \in [0,t]} [q_0, \tau^-(s)]$ .

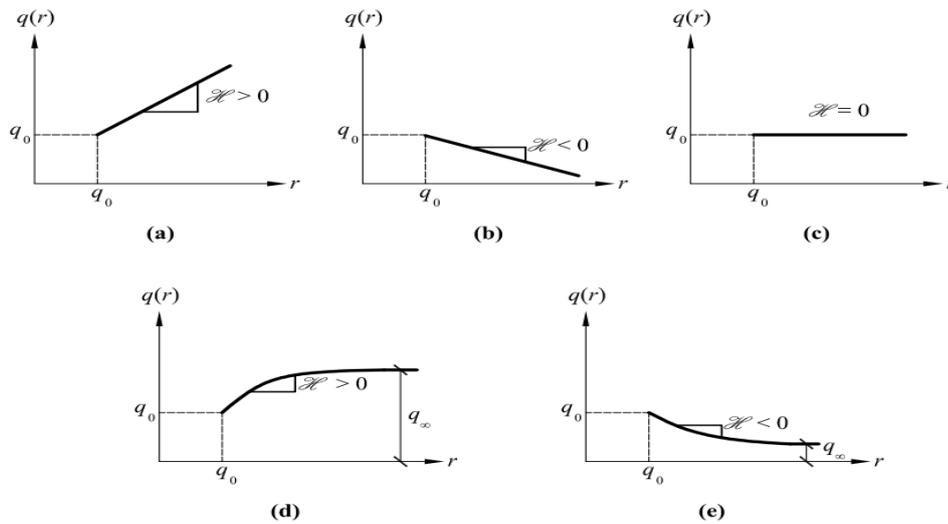
**Figura 3** - Diagrama tensão-deformação axial



**Fonte:** MAEDO, 2015.

A Figura 4 evidencia os diferentes tipos de comportamentos que o material pode exibir conforme a evolução da variável interna  $q(r)$ , as quais definem a lei de endurecimento/abrandamento das tensões, através do parâmetro  $\mathcal{H}$  e rege o comportamento da evolução do dano após o limite elástico linear. Assim sendo, quando  $\mathcal{H} > 0$  (Fig.4 (a) e (d)), representa o endurecimento, onde a variável  $q$  sempre cresce. No caso quando  $\mathcal{H} < 0$  (Fig.4 (b) e (e)), representa o abrandamento, onde a variável  $q$  irá decrescer, isso significa que o material começará a apresentar falhas. Quando  $\mathcal{H} = 0$  (Fig. 4 (c)) representa o dano perfeito, onde a variável  $q$  ficará constante. O parâmetro  $\mathcal{H}$  pode ser obtido através da seguinte formula  $\mathcal{H}(r) = \frac{\partial q(r)}{\partial r} = q'(r)$ . Desse modo, para a lei de endurecimento/abrandamento tem se:  $q(r) = q_0 + \mathcal{H}(r - q_0) \rightarrow \dot{q}(r) = \mathcal{H}\dot{r}$  e para o modo da condição exponencial formula se:  $q(r) = q_\infty - (q_\infty - q_0)e^{A\left(\frac{1-r}{q_0}\right)}$ .

**Figura 4** - (a) lei de endurecimento linear; (b) lei de abrandamento linear; (c) dano perfeito; (d) lei de endurecimento exponencial; (e) lei de abrandamento exponencial.



Fonte: MAEDO, 2015.

**Tabela 1** - Modelo constitutivo de Mohr-Coulomb

Relação Constitutiva:	$\sigma = (1 - d)\bar{\sigma}$
Tensão equivalente:	$\tau = c' + (\sigma) \tan (\varphi)$
Critério de Dano (Mohr Coulomb):	$\bar{\varphi} = \bar{\tau} - r \leq 0$
Evolução da Variável Interna $r$ :	$r(t) = \max_{k \in [0, t]} [q_0, \bar{\tau}(k)]$
Evolução do Dano:	$d(r) = 1 - \frac{q(r)}{r}$
	$q(r) = q_{(0)} + \mathcal{H} (r - q_{(0)})$ ou
Lei de Endurecimento/Abrandamento:	$q(r) = q_{\infty} - (-q_0) \exp[\mathcal{H}(1 - r/r_0)]$

### 3.4 Modelo de dano friccional de Mohr-Coulomb

O modelo de dano isotrópico do tipo Mohr-Coulomb (GIMENES et al, 2023) foi utilizado no presente trabalho para simular o deslizamento entre materiais. Este modelo degrada as componentes do tensor de tensão do EF-ERA associadas ao cisalhamento, seguindo como referência a direção  $s$ . Dessa forma, usando um sistema de coordenadas locais  $(n, s)$  foi possível formar a equação constitutiva para o modelo da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{nn} & \sigma_{ns} \\ \sigma_{sn} & \sigma_{ss} \end{bmatrix} = \mathbb{C} : \begin{bmatrix} \varepsilon_{nn} & \varepsilon_{ns} \\ \varepsilon_{sn} & \varepsilon_{ss} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Para se obter o tensor tensão nominal,  $\bar{\sigma}$ , é preciso aplicar a variável do dano  $d_s \in [0,1]$  nas componentes de cisalhamento, isto é:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \sigma_m & \sigma_{\tau s} \\ \sigma_{sn} & \sigma_{ss} \end{bmatrix}}_{\sigma} = \underbrace{\begin{bmatrix} \bar{\sigma}_m & 0 \\ 0 & \bar{\sigma}_{ss} \end{bmatrix}}_{\bar{\sigma}_n} + (1 - d_s) \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & \bar{\sigma}_{\tau s} \\ \bar{\sigma}_{sn} & 0 \end{bmatrix}}_{\tau_s} \quad (3.6)$$

Com isso, o critério de dano estabelecido para este caso é:

$$f_s = \|\sigma_{\tau s}\| - q_s(r_s) \leq 0 \quad (3.7)$$

em que  $q_s$  é a variável interna do tipo tensão aparente e  $r_s$  é a variável interna do tipo tensão elástica. Fazendo a divisão da equação anterior por  $(1 - d_s)$ , o critério pode ser apresentado no contexto da tensão elástica como:

$$\bar{f}_s = \|\bar{\sigma}_{\tau s}\| - r_s \leq 0 \quad (3.8)$$

A variável  $r_s$  é dada pelo valor máximo da tensão de cisalhamento  $\|\bar{\sigma}_{\tau s}\|$  atingido durante todo o processo de carregamento, partindo do valor inicial  $r_0$ :

$$r_s = \max_{k \in [0, t]} [\|\bar{\sigma}_{\tau s}(k)\|, r_0] \quad (3.9)$$

onde  $r_0 = c + \bar{\sigma}_m \tan \phi$ ,  $c$  é o intercepto de coesão e  $\phi$  é o ângulo de atrito que controla a influência da tensão normal de compressão  $\bar{\sigma}_m \geq 0$ . Como a variável interna depende das propriedades elásticas, é possível calculá-la diretamente usando as componentes do tensor de deformação durante cada etapa. Posteriormente, a evolução da variável dano é obtida por:

$$d_s(r_s) = 1 - \frac{q_s(r_s)}{r_s} \quad (3.10)$$

A variável do tipo tensão aparente,  $q_s$ , é expressa pela seguinte lei exponencial:

$$q_s(r_s) = r_0 \exp \left[ h \mathcal{H} \left( 1 - \frac{r_s}{r_0} \right) \right] \quad (3.11)$$

sendo  $\mathcal{H}$  o parâmetro de abrandamento, o qual é regularizado pela espessura  $h$  do elemento de alta razão de aspecto. Finalmente, o modelo de dano de Mohr-Coulomb é integrado por meio do esquema de integração implícito-explicito IMPL-EX (OLIVER, 2008; Prazeres, 2016). Os detalhes para implementação do IMPL-EX para o modelo de dano friccional de dano estão na Tabela 2.

**Tabela 2** - Esquema de integração IMPL-EX para o modelo de Mohr-Coulomb

<p><b>ENTRADA:</b> <math>\boldsymbol{\varepsilon}_{(n+1)}, \bar{\sigma}_{nn(n)}, r_{s(n)}, \Delta r_{s(n)}</math></p> <p>(i) Calcule o tensor de tensões elásticas:</p> $\boldsymbol{\sigma}_{(n+1)} = \mathbb{C} : \boldsymbol{\varepsilon}_{(n+1)}$ <p>(ii) Rotacione o tensor de tensões, de modo que suas componentes fiquem orientadas segundo o sistema de coordenadas locais <math>(n,s)</math></p> <p>(iii) Verifique as condições de carga-descarga</p> <p style="padding-left: 40px;">SE <math>(\ \bar{\sigma}_{rs}\  - r_{s(n)} \leq 0)</math>, ENTÃO</p> <p style="padding-left: 80px;">Mantenha o valor da variável interna: <math>r_{s(n+1)} := r_{s(n)}</math></p> <p style="padding-left: 40px;">SENÃO</p> <p style="padding-left: 80px;">Atualize a variável interna: <math>r_{s(n+1)} := \ \bar{\sigma}_{rs}\ </math></p> <p style="padding-left: 40px;">FIM SE</p> <p>(iv) Calcule o incremento da variável interna</p> $\Delta r_{s(n+1)} := r_{s(n+1)} - r_{s(n)}$ <p>(v) Calcule a extrapolação linear da variável interna</p> $\tilde{r}_{s(n+1)} := r_{s(n)} + \frac{\Delta t_{(n+1)}}{\Delta t_{(n)}} \Delta r_{s(n)}$ <p>(vi) Atualize a variável de dano</p> $\tilde{d}_{(n+1)} := 1 - \frac{q_s(\tilde{r}_{s(n+1)})}{\tilde{r}_{s(n+1)}}$ <p>(vii) Calcule o tensor de tensões conforme equação a seguir</p> $\boldsymbol{\sigma}_{(n+1)} := \bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n(n+1)} + (1 - \tilde{d}_{s(n+1)}) \bar{\boldsymbol{\tau}}_{s(n+1)}$ <p>(viii) Rotacione o tensor de tensões, obtendo suas componentes segundo o sistema global de coordenadas <math>(x,y,z)</math></p> <p><b>SAÍDA:</b> <math>\boldsymbol{\sigma}_{(n+1)}, \bar{\sigma}_{nn(n+1)}, r_{s(n+1)}, \Delta r_{s(n+1)}</math></p>
--

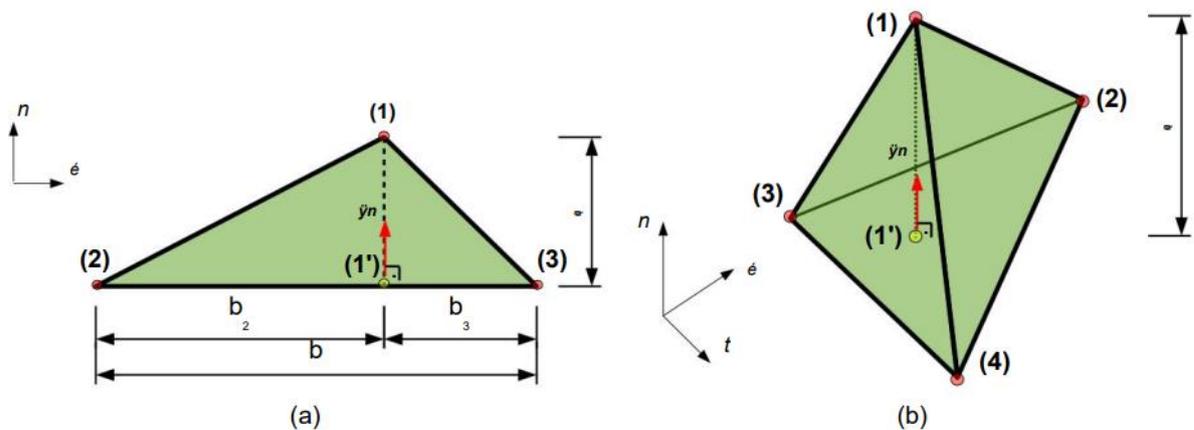
Fonte: A Autora, 2024.

### 3.5 Interface de elementos finitos sólidos tetraédricos de 4 nós

Nos elementos finitos tridimensionais de quatro nós, conforme a razão de aspecto aumenta a cinemática deste tipo de elemento aproxima se dá cinemática da descontinuidade forte. Com isso, de acordo com o aumento do refinamento do elemento, o comportamento do deslocamento e deformação irá se aproximar daquele que representa uma fratura. A aproximação da descontinuidade forte é uma metodologia de uma função linear, que quando se aproxima da descontinuidade (fratura) a função fica na vertical.

Considerando o elemento finito triangular padrão de três nós e o elemento finito tetraedro de quatro nós, conforme ilustrado na Figura 5, os elementos são caracterizados pela posição de seus nós em relação ao sistema de coordenadas cartesianas local  $(n, s, t)$ , um vetor unitário  $n$  normal à base do elemento e altura  $h$  dada pela distância entre o nó  $(1)$  e sua projeção na base do elemento  $(1')$  (Bitencourt Jr, 2015).

**Figura 5** - Interface de elementos finitos sólidos: (a) elemento triangular de três nós e (b) elemento tetraedro de quatro nós.



**Fonte:** Bitencourt Jr, 2015.

Este subcapítulo tem como intenção demonstrar o equacionamento de  $\mathcal{E}$  para elemento tetraédrico, que pode ser feito com base no desenvolvido para o elemento triangular (BITENCOURT JR, 2015).

Ao utilizar o sistema de coordenadas cartesianas locais  $(n, s, t)$  demonstrado na Figura 5, os vetores definem as coordenadas dos nós do elemento finito 3D de 4 nós:

$$\begin{aligned} X_e^{(1)} &= (h, x_s^{(1)}, x_t^{(1)}), \\ X_e^{(2)} &= (0, x_s^{(2)}, x_t^{(2)}), \\ X_e^{(3)} &= (0, x_s^{(3)}, x_t^{(3)}), \end{aligned} \tag{3.12}$$

$$X_e^{(4)} = (0, x_s^{(4)}, x_t^{(4)}).$$

De acordo com  $h$  a altura desse elemento, dada pela distancia entre nó 1 e a sua projecção na base e  $A$  a area da base do elemento. Assim sendo, os elementos do tensor de deformação para o elemento  $e$ , conforme definido na equação, podem ser representados em formato matricial:

$$\tilde{\epsilon} = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} \tilde{\epsilon}_m & \tilde{\epsilon}_{rs} & \tilde{\epsilon}_{rt} \\ \tilde{\epsilon}_{rs} & \tilde{\epsilon}_{ss} & \tilde{\epsilon}_{st} \\ \tilde{\epsilon}_{rt} & \tilde{\epsilon}_{st} & \tilde{\epsilon}_{tt} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

e

$$\hat{\epsilon} = \frac{1}{h} \begin{bmatrix} [[u]]_n & \frac{1}{2} [[u]]_s & \frac{1}{2} [[u]]_t \\ \frac{1}{2} [[u]]_s & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} [[u]]_t & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

onde:

$$\tilde{\epsilon}_m = 0$$

$$\tilde{\epsilon}_{ss} = \frac{1}{2} [(x_t^{(3)} - x_t^{(2)})u_s^{(4)} + (x_t^{(2)} - x_t^{(4)})u_s^{(3)} + (x_t^{(4)} - x_t^{(3)})u_s^{(2)}],$$

$$\tilde{\epsilon}_{tt} = -\frac{1}{2} [(x_s^{(3)} - x_s^{(2)})u_t^{(4)} + (x_s^{(2)} - x_s^{(4)})u_t^{(3)} + (x_s^{(4)} - x_s^{(3)})u_t^{(2)}],$$

$$\tilde{\epsilon}_{rs} = \frac{1}{4} [(x_t^{(3)} - x_t^{(2)})u_n^{(4)} + (x_t^{(2)} - x_t^{(4)})u_n^{(3)} + (x_t^{(4)} - x_t^{(3)})u_n^{(2)}],$$

$$\tilde{\epsilon}_{rt} = -\frac{1}{4} [(x_s^{(3)} - x_s^{(2)})u_n^{(4)} + (x_s^{(2)} - x_s^{(4)})u_n^{(3)} + (x_s^{(4)} - x_s^{(3)})u_n^{(2)}], \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\epsilon}_{st} = & \frac{1}{4} [(x_t^{(3)} - x_t^{(2)})u_t^{(4)} + (x_t^{(2)} - x_t^{(4)})u_t^{(3)} + (x_t^{(4)} - x_t^{(3)})u_t^{(2)} + \\ & - (x_s^{(3)} - x_s^{(2)})u_s^{(4)} + (x_s^{(2)} - x_s^{(4)})u_s^{(3)} + (x_s^{(4)} - x_s^{(3)})u_s^{(2)}] \end{aligned}$$

em que  $u_n^{(1)}$ ,  $u_s^{(1)}$ ,  $u_t^{(1)}$  são componentes do deslocamento do nó  $l$  na direção dos  $n$ ,  $s$  e  $t$ .

## 4 MATERIAIS E MÉTODO

### 4.1 MATERIAIS

- Sistema operacional Linux OpenSUSE Leap 15.5
- Compilador Intel© oneAPI Base Toolkit e HPC Toolkit
- GiD Simulation, versão 16.0.6
- Programa de elementos finitos CODE\_BRIGHT, versão in-house

- Fragmentador de malhas FRAG
- Computador de mesa com a seguinte configuração
  - Processador Intel Core i9-12900 K 3.2 GHz 30 MB LGA1700
  - Placa mãe (Intel) Gigabyte H610M H DDR4 LGA1700
  - 2 Memórias Kingston Fury Beast DDR4 32GB 3200MHz
  - SSD M.2 2280 WD Green 480GB SATA 3 – WDS480G3G0B
  - HD Sata3 4TB Seagate ST4000DM004
  - Fonte de alimentação C3Tech 500W 80 Plus Bronze OS-G500B
  - Gabinete Gamer K-MEX Kratos 3 CG-50TP Preto
  - GPU NV GTX1660 6GB Super Ghost G6 Gainward NE6166S018J9-1160X

## 4.2 Método

Todas as simulações foram realizadas em um computador de mesa, cujo sistema operacional é o Linux OpenSUSE LEAP 15.5. A máquina possui processador Intel Core i9-12900 K 3.2 GHz 30, 32 GB de memória RAM, 480 GB de SSD e 4 TB de HD para armazenamento.

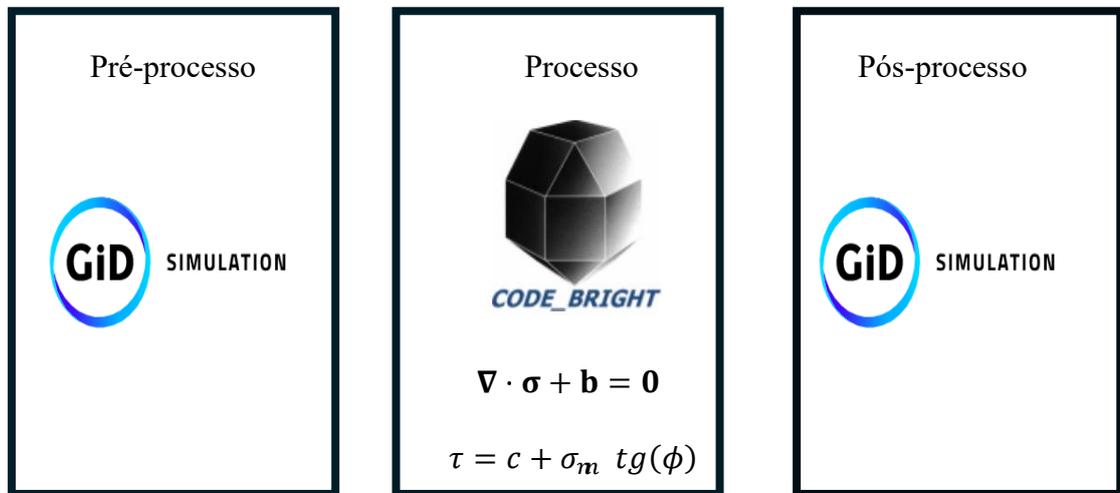
O método aplicado para a geração dos casos estudados consistiu em três etapas, dívidas em pré-processo, processo e pós-processo, conforme o fluxograma a seguir. Para a realização da etapa de pré-processo foi utilizado o software GiD Simulation v. 16.0.6 com o intuito de configurar os parâmetros do problema como: fazer a descrição geométrica do maciço, escolher o modelo constitutivo apropriado, definir as propriedades dos materiais, prescrever as condições de contorno e gerar as malhas de elementos finitos.

Após a geração das malhas foi necessário fragmentá-las e para isso utilizou-se o programa denominado FRAG, desenvolvido pelo grupo de pesquisa de Métodos Numéricos e Engenharia Geotécnica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Tanto o programa FRAG quanto o CODE\_BRIGTH foram compilados com o auxílio do compilador da Intel e dos pacotes oneAPI Base Toolkit e HPC Toolkit. Para fragmentar a malha, o programa recebe dados topológicos do sistema e elabora uma nova topologia, gerando e inserindo os elementos finitos de elevada razão de aspecto entre os elementos da malha original (MAEDO, (2015); MANZOLI, et al. (2016); MAEDO, et al. (2020); MAEDO, et al. (2021)). Nele, os dados de entrada do programa (*i.e.*, número de nós, número de elementos, número de nós por elemento, número de dimensões e materiais, coordenadas dos nós e conectividade dos elementos) são informações da malha original geradas pelo GiD durante a etapa de pré-processo.

Na etapa do processo, os arquivos de entrada foram processados na versão *in-house* do CODE\_BRIGHT (Olivella, et.al (1994); Olivella, et.al (1996)), o qual é um programa de elementos finitos capaz de realizar análises de transporte de massa e transferência de calor em meios geológicos deformáveis. O programa foi originalmente desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Politécnica da Catalunha (UPC), e combinado com pré/pós-processador GiD (RIBÓ, et al.1998) tornou se uma ferramenta numérica com interface gráfica intuitiva e amigável.

Por último, no pós-processo, novamente foi utilizado o GiD para a visualização, análise e interpretação dos resultados, como os campos de tensões, deslocamentos e para a determinação do FS. Nesta etapa, foi realizada a validação e verificação dos resultados decorrentes do processo numérico. Os casos estudados nesse projeto foram problemas puramente mecânicos e, para o contexto de simulação de ruptura da superfície do talude, foi utilizado um modelo constitutivo de dano baseado no critério de Mohr-Coulomb.

#### Fluxograma de Processos



Fonte: A Autora, 2024.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

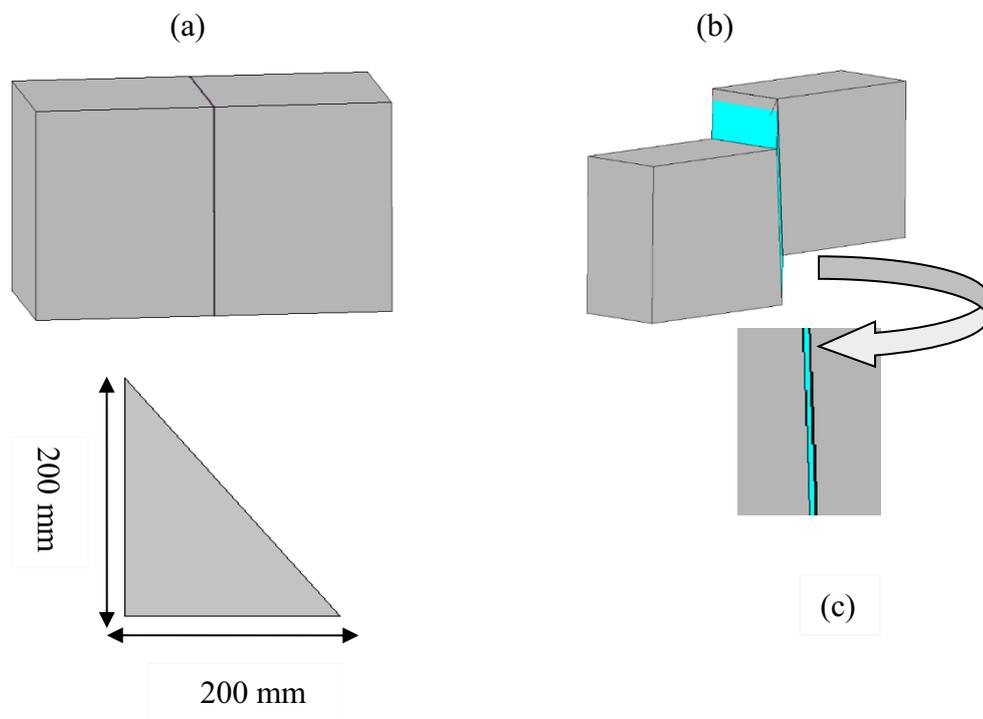
### 5.1 ESTUDOS DE CASOS 3D

#### 5.1.1 Experimento numérico de cisalhamento direto

Para validar a implementação do modelo constitutivo efetuou-se uma geometria em 3D, composta por dois blocos de tamanhos (200 mm X 200 mm), como mostra a Figura 6 (a) e para

fragmentallos foi inserido um par de elementos finitos de elevada razão de aspecto entre os blocos, Figura 6 (c). Foram considerados dois intervalos de tempo, em que no primeiro aplicou se uma tensão de compressão por meio do deslocamentos impostos na face direita do bloco, com deslocamento horizontal. O segundo intervalo consistiu em manter a carga horizontal e aplicou se um deslocamento vertical, induzindo ao cisalhamento na região central, onde os elementos de alta razão de aspectos foram inseridos, Figura 6 (b). É imprescindível salientar, que os parâmetros adotados não refletem as características de nenhum material geológico específico, apenas foram adotados para validar o modelo.

**Figura 6** - Experimento numérico de cisalhamento direto: (a) geometria e malha de elementos finitos; (b) aplicação do deslocamento vertical para induzir cisalhamento; (c) detalhe mostrando o elemento finito de alta razão de aspecto entre os elementos regulares tetraédricos.



**Fonte:** A Autora, 2024.

Foi feito uma análise nos blocos 3D apenas com o valor da coesão na direção x e y, para verificar através das análises do gráfico como essa propriedade afeta o comportamento de um material sob tensão de compressão.

### 5.1.2 Talude Rochoso Homogêneo

Para o estudo de um talude tridimensional sem fratura, foi utilizado como base o trabalho realizado por Griffiths e Marques em 2007. Assim, foi simulado um talude homogêneo

3D, constituído por argila não drenada, com comprimento de 140 metros e altura de 15 metros. As propriedades mecânicas do material da rocha foram listados na Tabela 3. Neste caso, a base do talude foi totalmente fixada e os movimento em z e em x, ademais foi atribuído movimento na lateral direita, na costa e em frente ao talude. Para este caso, foram considerados 1000 passos de tempo, para garantir a convergência dos resultados.

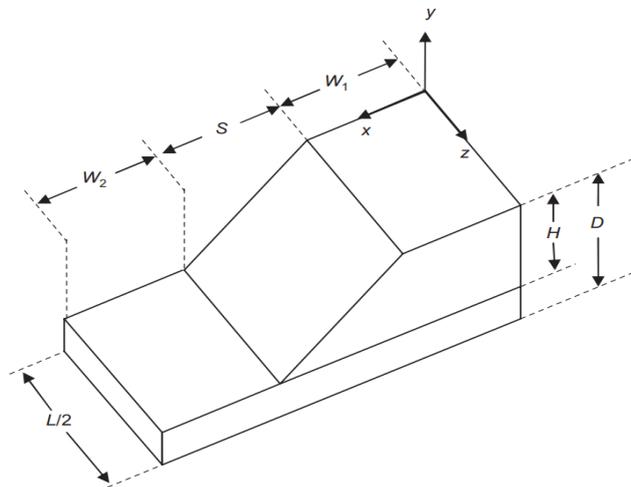
**Tabela 3 - Propriedades Mecânicas do Material**

Material	Módulo de elasticidade (E) (MPa)	coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) (MPa)	Peso específico ( $\gamma$ ) (kN/m <sup>3</sup> )	coesão (c) (MPa)	Ângulo de atrito ( $\varphi$ ) (°)
Rocha	100	0.3	20	0.04	0

**Fonte:** A Autora, 2024.

Devido à simetria da geometria, a profundidade real da malha variou pela metade, permitindo uma investigação da influência da tridimensionalidade como mostra a Figura 8.

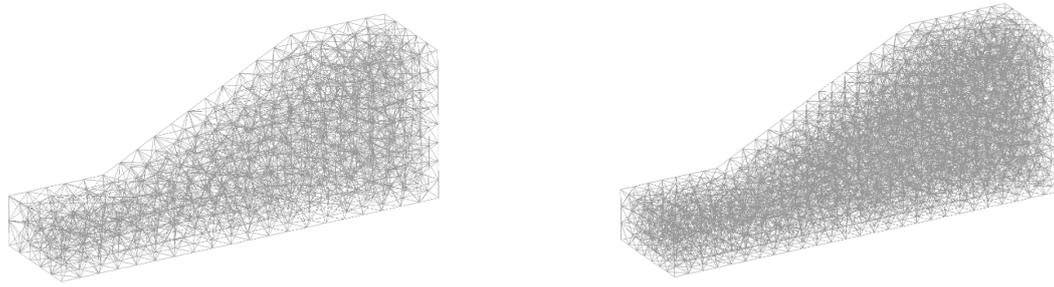
**Figura 8 – Talude Tridimensional**



**Fonte:** Griffiths e Marques em 2007.

As análises foram realizadas variando o tamanho da malha de elementos finitos uma mais grossa com elementos de tamanho 2 e a outra mais fina com elementos de tamanho 1,5, como ilustra a Figura 9, com o intuito de mostrar a influencia dos resultados em relação ao refinamento da malha. As informações das quantidades de elementos sólidos tetraédicos e nós de cada malha estão disponível na Tabela 4.

**Figura 9** - Malhas regulares tridimensionais empregadas para simular o talude homogêneo.



Malha Grossa

Malha Fina

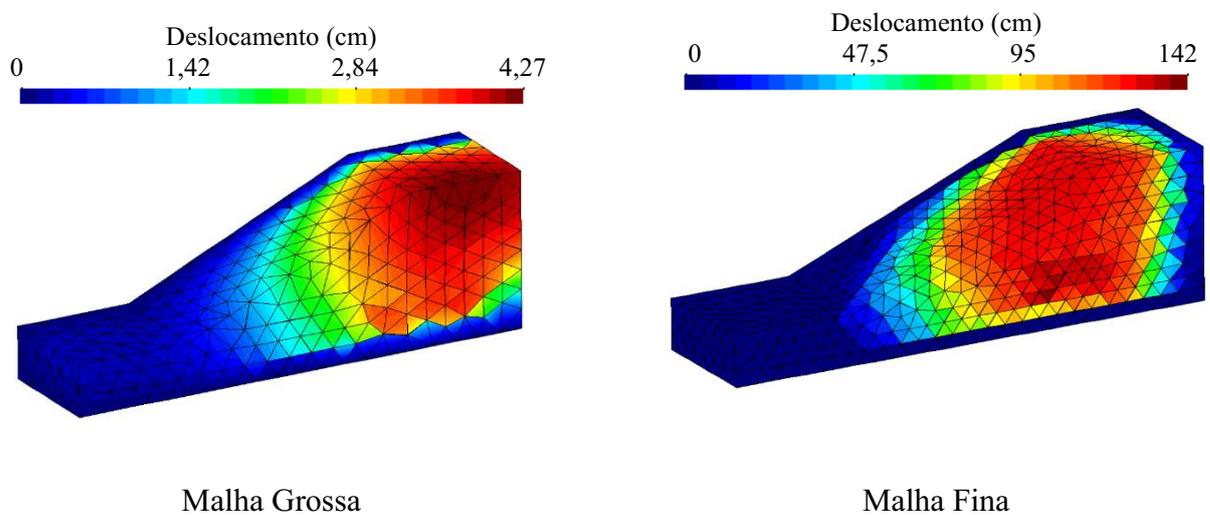
Fonte: A Autora, 2024.

**Tabela 4** - Quantidades de elementos e nós de cada malha

	Números de elementos	Números de nós
<b>Malha Grossa</b>	4875 elementos	1102 nós
<b>Malha Fina</b>	11765 elementos	2480 nós

Com o processamento das malhas, de acordo com a Figura 10, pode se observar o deslocamento através das diferenças de cores. Assim, é possível notar que a malha grossa e a malha fina estão em processo de ruptura, com concentrações dos deslocamentos nas cristas do talude e vai se estendendo até a parte de baixo, como observado pela coloração avermelhada. Ambas as malhas romperam com FS 1,8.

**Figura 10** - Deslocamentos obtidos nas simulações do talude homogêneo



Malha Grossa

Malha Fina

Fonte: A Autora, 2024.

### 5.1.3 Talude Rochoso Com Uma Fratura

Qualquer um que tenha examinado encostas rochosas escavadas não pode ter deixado de notar as ocasionais fissuras de tensão atrás da crista conforme mostra a Figura 12.

**Figura 12** - Fissura de tensão atrás de uma massa rochosa deslizante na qual ocorreu um deslocamento horizontal significativo (acima do Lago Kooteney, British Columbia).

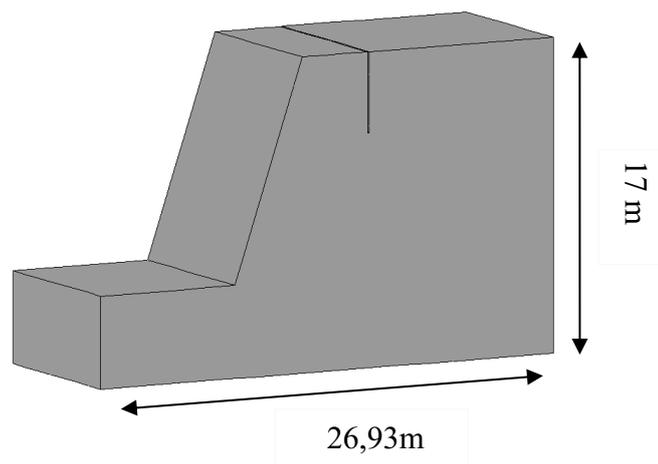


**Fonte:** Wyllie and Mah (2004).

Algumas dessas fissuras são visíveis há dezenas de anos e, em muitos casos, não parecem ter tido nenhuma influência adversa sobre a estabilidade da encosta. É interessante, portanto, considerar como tais fissuras são formadas e se elas podem dar alguma indicação de instabilidade da encosta. Em uma série de estudos de modelos muito detalhados sobre a falha de encostas em rochas articuladas, Barton (1971) descobriu que a fissura resultou de pequenos movimentos de cisalhamento dentro da massa rochosa. Embora esses movimentos individuais tenham sido muito pequenos, seu efeito cumulativo resultou em um deslocamento significativo das superfícies da encosta, o que causou a separação de juntas verticais atrás da crista da encosta e formou fissuras de "tensão". O fato de a fissura de tensão ser causada por movimentos de cisalhamento na encosta é importante porque sugere que, quando uma se torna visível na superfície de uma encosta, deve-se presumir que a falha de cisalhamento foi iniciada dentro da massa rochosa.

Com isso, foi simulado um talude tridimensional com uma fratura plana como mostra a Figura 13, baseada no livro de Wyllie and Mah (2004), com o intuito de demonstrar a influência da falha sobre um deslizamento de talude. Assim foi feito um talude rochoso com uma fratura não contínua de 4,35 metros de comprimento e 0,01 metros de espessura. Este modelo possui 26,93 metros de comprimento e 17 metros de altura. As seguintes propriedades mecânicas consideradas do material estão presente na tabela 5. Para este caso, a base do talude foi totalmente fixada, os movimento em x da frente e da costa do talude, e também os movimentos das laterais esquerda e direita em z, as demais foi atribuído movimento na lateral direita, na costa e em frente ao talude. Para este caso, foram considerados 1000 passos de tempo, para garantir a convergência dos resultados.

**Figura 13** – Talude Tridimensional com uma fratura plana.



**Fonte:** A Autora, 2024.

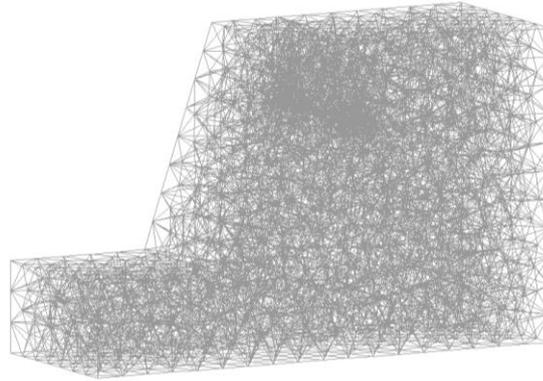
**Tabela 5** - Propriedades Mecânicas do Material

Material	Módulo de elasticidade (E) (MPa)	coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) (MPa)	Peso específico ( $\gamma$ ) (kN/m <sup>3</sup> )	coesão (c) (MPa)	Ângulo de atrito ( $\varphi$ ) (°)
Rocha	14000	0.3	2600	0.025	37

**Fonte:** A Autora, 2024.

Para o presente estudo foi feito uma malha de elementos finitos de tamanho 1,5, como ilustra a Figura 14. As informações das quantidades de elementos sólidos tetraédicos e nos de cada malha estão disponível na Tabela 6.

**Figura 14** - Malha tridimensional empregadas para simular o talude com uma fratura.



**Fonte:** A Autora, 2024.

**Tabela 6** - Quantidades de elementos e nós da malha.

	<b>Números de elementos</b>	<b>Números de nós</b>
<b>Malha</b>	12265 elementos	2614 nós

**Fonte:** A Autora, 2024.

Pode se observar pela Figura 15 que a falha plana é útil para demonstrar a sensibilidade do talude a mudanças na resistência ao cisalhamento e que o deslizamento em uma única superfície plana mergulha atingindo paralela ou quase paralela à face do talude. Além disso, o deslizamento desse talude concentra se principalmente na zona onde ocorre a fratura. Dessa forma, a presença de uma falha impõe forte influência para o deslizamento no maciço rochoso, pois como é uma zona estrutural fraca e descontínua, com resistência relativamente menor, a fratura desencadeia a ruptura desse talude. É imprescindível salientar que o deslizamento desse talude ocorreu com FS 2,2.

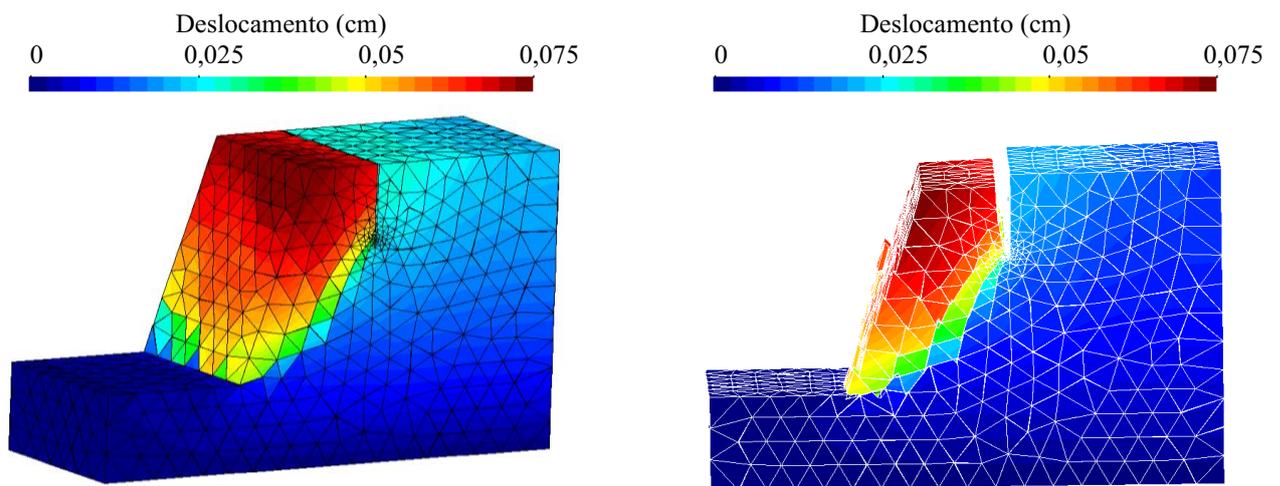
#### **5.1.4 Talude Rochoso Com Ruptura em Cunha**

O estudo da estabilidade de uma cunha é de extrema importância, pois falhas de cunha podem ocorrer em uma gama muito mais ampla de condições geológicas e geométricas do que falhas planas.

Falhas típicas de cunha como ilustrada na Figura 17, mostra as condições que são normalmente assumidas para o tratamento analítico de cunhas, assim a imagen mostra uma encosta cortada, onde uma cunha é formada por duas descontinuidades planas contínuas e a linha de intersecção desses dois planos atinge bem a ponta da face da rocha, ou seja, a tendência

da linha de intersecção e a direção de mergulho da face são aproximadamente iguais. Além disso, o mergulho da linha de intersecção é de cerca de 50–55°, enquanto o ângulo de atrito dessas juntas está na faixa de 35–40°, assim a linha de intersecção mergulha mais acentuadamente do que o ângulo de atrito. Essas condições atendem aos requisitos cinemáticos para falha da cunha.

**Figura 15** - Deslocamentos obtidos nas simulações do talude tridimensional com uma fratura.



Malha com as cores dos deslocamentos

Malha apresentado o deslizamento no rumo da fratura

**Fonte:** A Autora, 2024.

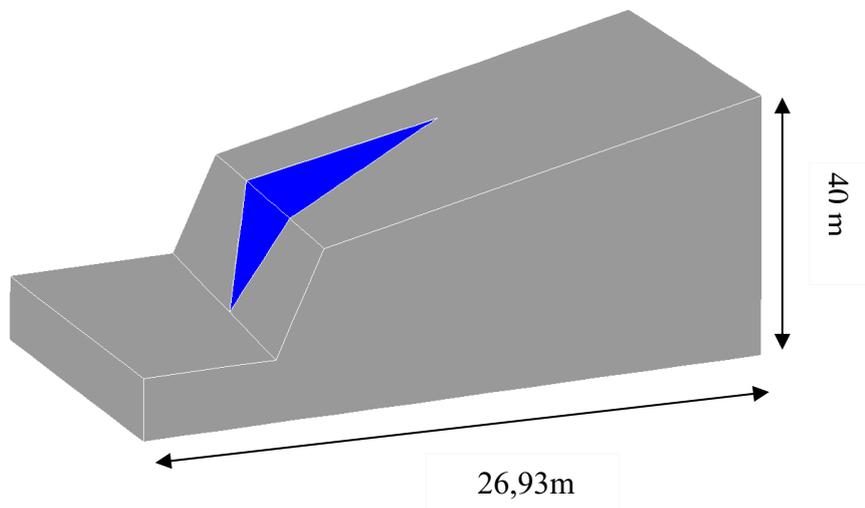
**Figura 17** - Falha típica de cunha envolvendo deslizamento em duas juntas persistentes com linha de intersecção de juntas na ponta da face da rocha e um plano superior que formou uma rachadura de tensão (rocha vulcânica forte na Interestadual 5, perto de Grants Pass, Oregon).



**Fonte:** Wyllie and Mah (2004).

Para a simulação deste caso também foi utilizado como base o livro de Wyllie and Mah (2004), que se trata de uma simulação da falha de um talude contendo descontinuidades atingindo obliquamente a face do talude, onde o deslizamento de uma cunha de rocha ocorre ao longo da linha de intersecção de dois desses planos. Para efeitos de estudos e simplificação dos cálculos foi desprezado o ângulo de atrito, considerando apenas a coesão. Com isso foi modelado um talude rochoso com uma cunha de 100 metros de comprimento e 40 metros de altura como mostra a Figura 18. As seguintes propriedades mecânicas consideradas do material estão presente na tabela 7.

**Figura 18** – Talude tridimensional em cunha.



**Fonte:** A Autora, 2024.

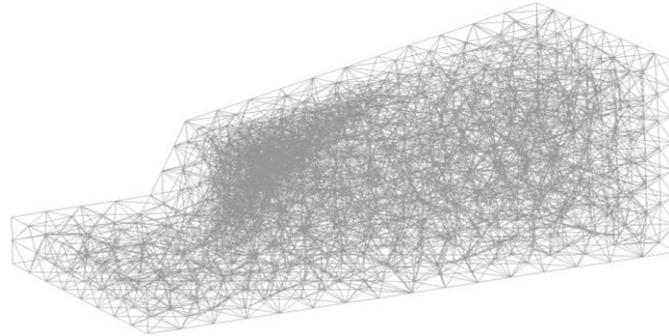
**Tabela 7** - Propriedades Mecânicas do Material

Material	Módulo de elasticidade (E) (MPa)	coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) (MPa)	Peso específico ( $\gamma$ ) (kN/m <sup>3</sup> )	Coesão (c) (MPa)	Ângulo de atrito ( $\varphi$ ) (°)
Rocha	14000	0.3	2500	0.025	0

**Fonte:** A Autora, 2024.

Foi totalmente restringido o movimento da base do talude e também fixado o movimento nas laterais em direção ao plano. Para este caso, foram considerados 1000 passos de tempo, para garantir a convergência dos resultados. Ademais para o presente estudo foi feito uma malha de elementos finitos de tamanho 1,5, como ilustra a Figura 19. As informações das quantidades de elementos sólidos tetraédicos e nos de cada malha estão disponível na Tabela 8.

**Figura 19** - Malha tridimensional empregadas para simular o talude em cunha.



**Fonte:** A Autora, 2024.

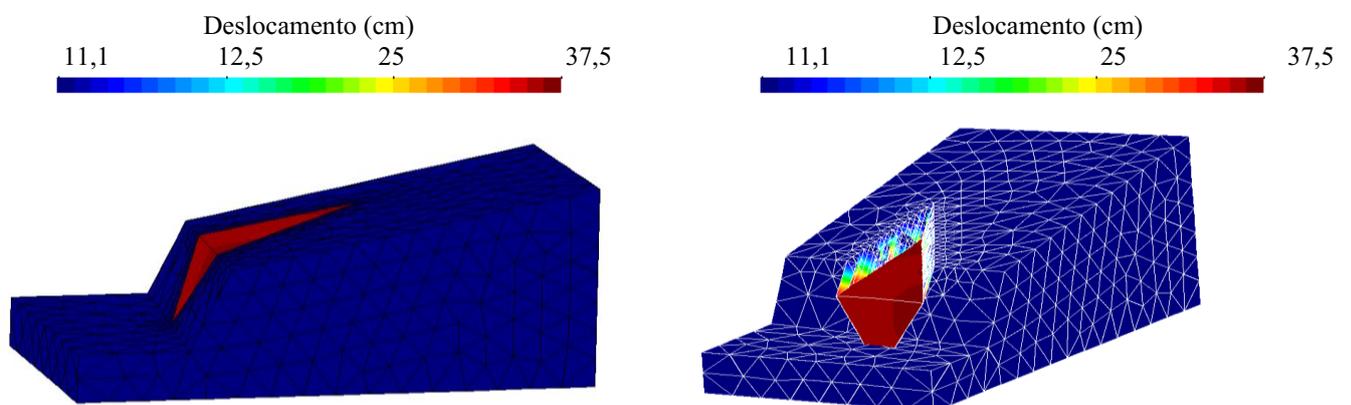
**Tabela 8** - Quantidades de elementos e nós da malha.

	<b>Números de elementos</b>	<b>Números de nós</b>
<b>Malha</b>	8638 elementos	1868 nós

**Fonte:** A Autora, 2024.

Como observado na Figura 20 o deslizamento que ocorre neste talude acontece inteiramente na cunha atuando como uma superfície de liberação. Assim sendo, feições como essas possuem uma forte influência na causa de deslizamentos. Neste caso o FS que induziu no rompimento foi de 0,5 e é possível nota o comportamento do deslocamento do talude pela curva do gráfico da Figura 21.

**Figura 20** - Deslocamentos obtidos nas simulações do talude tridimensional em cunha.

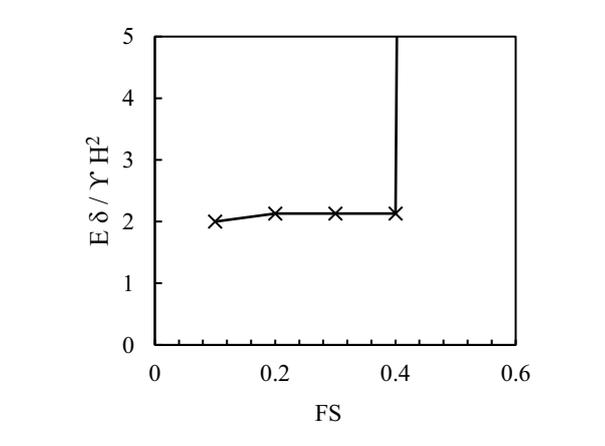


Malha

Malha apresentado o deslizamento no rumo da cunha

**Fonte:** A Autora, 2024.

**Figura 21** - Valores de deslocamento adimensional obtidos por meio das simulações do talude tridimensional com uma fratura.



**Fonte:** A Autora, 2024.

## 6 CONCLUSÃO

A modelagem numérica tridimensional da estabilidade de taludes rochosos com ou sem fraturas ainda é um desafio, entretanto a técnica de redução de resistência baseada nos Métodos dos Elementos Finitos foi considerada uma ferramenta extremamente eficiente para lidar com problemas complexos de estabilidade de taludes 3D. Com o desenvolvimento tecnológico, o aumento da velocidade e a queda dos custos dos computadores, aumentaram significativamente a procura por análises de elementos finitos tridimensional, que cada vez mais podem ser feitas em um computador desktop.

Portanto, este trabalho de conclusão de curso apresentou uma análise profunda da estabilidade de taludes tridimensionais e os fatores que a influenciam. Os resultados obtidos foram benéficos para verificar os riscos de deslizamentos ou para a concepção de infra-estruturas de uma forma segura e econômica. A análise destacou como algumas características presente no talude pode afetar em sua estabilidade. Também pode se verificar a influência que isso teria no comportamento da ruptura e no valor do Fator de Segurança, utilizando o Método de Redução da Resistência ao Cisalhamento (Shear Strength Reduction Method) por elementos finitos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMSON, L.W. Lee, T.S., SHARMA, S., and BOYCE, G.M. Slope Stability and Stabilization Methods by, **John Wiley & Sons**, Inc, New York. 2002.
- AGUILERA, T. C.E. Aplicação de Métodos de Análise de Estabilidade de Taludes de Grande Altura em Mineração. **Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2009. 170 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Estabilidade de Encostas. **NBR 11682** Rio de Janeiro, 2009.
- BAKER R, LESHCHINSKY D (1987). Análise de estabilidade de pilhas cônicas. Solos encontrados 27(4):99–110.
- BARTON, N. R. (1971) A model study of the behavior of excavated slopes. **PhD Thesis, University of London**, Imperial College, 520 pp.
- BISHOP, A.W. 1955. The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. **Géotechnique**, 5(1): 7–17.
- BITENCOURT JR, L. A. G. Numerical modeling of failure processes in steel fiber reinforced cementitious materials. **Tese (Doutorado) — Escola Politecnica – Universidade de São Paulo, USP**, 2015.
- CAVOUNIDIS S, KALOGEROPOULOS H (1992). Efeitos finais na estabilidade de cortes em argilas normalmente consolidadas. **RIG** 2:92.
- DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G. The Accuracy of Equilibrium Methods of Slope Stability Analysis. In: \_\_\_\_\_ **Mechanics of Landslides and Slope Stability**. [S.l.]: S. L. Koh, 1980. p. 5-17.
- DUNCAN, J. M; WRIGHT, S. G. Soil strength and slope stability. 1. ed. **New York: John Wiley & Sons Inc.**, 2005. 312 p.
- DUNCAN, J. M., WRIGHT, S. G., & BRANDON, T. L.. Soil strength and slope stability. **John Wiley & Sons**. 2014.
- DUTRA, V. A. de S. Projeto de estabilização de taludes e estruturas de contenção englobando dimensionamento geotécnico e estrutural. **Monografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2013. 89f.
- FELLENIUS, W. Stability analysis of earth slopes and retaining walls considering both friction and cohesion and assuming cylindrical sliding surfaces. Ernst. 1927.
- FISH, J., BELYTSCHKO, T., “Um Primeiro Curso em Elementos Finitos”, **LTC-Livros Técnicos e Científicos** Editora S.A., 2009.

FREDLUND, D.G., KRAHN, J. Comparison of slope stability methods of analysis. **Canadian Geotechnical Journal**, Vol 14, pp.429-439, 1977.

GIMENES, M.; RODRIGUES, E.A.; BITERN COURT, L.A.G.; MANZOLI, O.L. 2D mesoscale modeling of compressive fracture in concrete using a mesh fragmentation technique. **International Journal of Solids and Structures**, v.260-261, p.112031, 2023.

GRIFTHS, DV; MARQUEZ, RM. Análise tridimensional da estabilidade de taludes por elementos finitos elasto-plásticos. **Geotécnica 57(6):537–546**. <https://doi.org/10.1680/geot.2007.57.6.537>.

JEREMIŸ, B. Métodos de elementos finitos para análise de estabilidade de taludes 3D. In: **Anais das sessões de geo-denver 2000 - estabilidade de taludes 2000**, GSP 101, 289, pp 224–238. [https://doi.org/10.1061/40512\(289\)17](https://doi.org/10.1061/40512(289)17).

KELESOGLU, M.K. (2016). Avaliação dos efeitos tridimensionais na estabilidade de taludes pelo método de redução de resistência. **KSCE J Civ Eng 20(1):229–242**. <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0686-4>.

LAMAITRE, J. A Course on Damage Mechanics. [S.I.]: **Springer Science & Business Media**, 1992. ISBN 978-3-662-02763-9.

LAMAITRE, J. A three dimensional ductile damage model applied to deep-drawing forming limits. **ICM 4 Stockholm**, v. 2, p. 1047–1053, 1983.

LESHCHINSKY, D.; BAKER, R.; SILVER, M.L. (1985). Análise tridimensional da estabilidade de taludes. **Int J Numer Métodos Anal Geomech 9(3):199–223**.

LESHCHINSKY, D.; BAKER, R. (1986). Estabilidade tridimensional de taludes: fim efeitos. **Solos encontrados 26(4):98–110**.

MAEDO, M. A.. Simulação computacional por elementos finitos de múltiplas fissuras em sólidos usando técnica de fragmentação da malha. Bauru, 2015.

MAEDO, M; SÁNCHEZ, M; ALJEZNAW, D; MANZOLI, O; GUIMARÃES, L. J; CLETO, P. R. Analysis of soil drying incorporating a constitutive model for curling. **Acta Geotechnica**, 15, 2619-2635. 2020.

MAEDO, M. A; SÁNCHEZ, M; FABBRI, H; CLETO, P.R; GUIMARÃES, L. J; MANZOLI, O. L. Coupled thermo-hydro-mechanical numerical modeling of evolving fractures in rocks. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 54, 3569-3591. 2021.

MANZOLI, O.L; MAEDO, M.A; BITENCOURT, L.A.G; RODRIGUES, E.A. On the use of finite elements with a high aspect ratio for modeling cracks in quasi-brittle materials. **Engineering Fracture Mechanics**, v.153, p.151-170, 2016.

MASSAD, F. Obras de Terra: curso básico de geotecnia. São Paulo:Oficina de Textos, 2003.

MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. **Geotechnique**, p. 79-93, 1965.

OLIVELLA, S.; CARRERA, J.; GENS, A.; & ALONSO, E. E. (1994). Nonisothermal multiphase flow of brine and gas through saline media. *Transport in porous media*, 15, 271-293.

OLIVELLA, S.; GENS, A.; CARRERA, J.; & ALONSO, E. E. (1996). Numerical formulation for a simulator (CODE\_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media. *Engineering computations*, 13(7), 87-112.

OLIVER, J.; HUESPE, A. E.; & CANTE, J. C. (2008). An implicit/explicit integration scheme to increase computability of non-linear material and contact/friction problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 197(21-24), 1865-1889.

PRAZERES, P. G.; BITENCOURT, L. A.; Bittencourt, T. N.; & MANZOLI, O. L. (2016). A modified implicit–explicit integration scheme: an application to elastoplasticity problems. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 38, 151-161.

SANTOS, I. G. Estabilidade de talude em colúvio com o uso de cortinas ancoradas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Cível) – **Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia**, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. 72f.

SILVA, J.P. M. Os métodos de Equilíbrio Limite e dos Elementos Finitos na Análise de Estabilidade de Talude. 2011. **Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade do Porto – U. PORTO**, Portugal, 2011.

SPENCER, E. A. Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-slice Forces. *Geotechnique*, n.17, p.11-26, 1967.

Tan D, Sarma SK (2008). Verificação de elementos finitos de um método de equilíbrio limite aprimorado para análise de declives. *Geotécnica* 58(6):481–487. <https://doi.org/10.1680/geot.2007.00084>.

TURNER, M.J.; CLOUGH, R.W.; MARTIN, H.C.; TOPP, L.J. Stiffness and deflection analysis of complex structures. *J. Aero. Sci.* 23, 1956.

UGAI, K.; LESHCHINSKY, D.O.V. (1995). Equilíbrio limite tridimensional e análise de elementos finitos: uma comparação de resultados. *Solos encontrados* 35(4):1–7.

WYLLIE, D.C. and MAH, C.W. (2004) *Rock Slope Engineering, Civil and Mining. FOURTH EDITION*, SPON PRESS, Madison, New York.

XINXIN, Li; JIANSHE, Liu; WENPING, Gong; YI, Xu; BOWA, Victor. A discrete fracture network based modeling scheme for analyzing the stability of highly fractured rock slope. Elsevier, 11/2021. *Computers and Geotechnics*, p. 1-18. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104558>. Acesso em: 24 nov. 2021.

ZHANG, Y.. CHEN, G.; ZHENG, L; Li Y, Zhuang X (2013). Efeitos das geometrias na estabilidade tridimensional de taludes. *Pode Geotech J* 50(3):233–249. <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0279>.