



Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal do Maranhão
Cidade Universitária Dom Delgado
Centro de Ciências Exatas e Tecnologia
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



**IMPLEMENTAÇÃO DE ALGORITMO PROBABILÍSTICO PARA ANÁLISE
TRIDIMENSIONAL DE ESTABILIDADE DE TALUDES**

PEDRO FERNANDES DA SILVA JUNIOR

São Luís – MA

2019

PEDRO FERNANDES DA SILVA JUNIOR

**IMPLEMENTAÇÃO DE ALGORITMO PROBABILÍSTICO PARA ANÁLISE
TRIDIMENSIONAL DE ESTABILIDADE DE TALUDES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Fundação Universidade Federal do Maranhão, como requisito avaliativo para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil, sob a orientação do Prof. Dr. George Fernandes Azevedo.

São Luís – MA

2019

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

SILVA JUNIOR, PEDRO FERNANDES DA.

IMPLEMENTAÇÃO DE ALGORITMO PROBABILÍSTICO PARA ANÁLISE
TRIDIMENSIONAL DE ESTABILIDADE DE TALUDES / PEDRO
FERNANDES DA SILVA JUNIOR. - 2019.

70 f.

Orientador(a): GEORGE FERNANDES AZEVEDO.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil,
Universidade Federal do Maranhão, São Luís, MA, 2019.

1. Estabilidade de Taludes. 2. Fator de Segurança. 3.
Maximização. 4. Probabilidade de Ruptura. 5. Superfície
de Ruptura. I. AZEVEDO, GEORGE FERNANDES. II. Título.

Trabalho de Conclusão de Curso de autoria de Pedro Fernandes da Silva Junior, intitulada **IMPLEMENTAÇÃO DE ALGORITMO PROBABILÍSTICO PARA ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DE ESTABILIDADE DE TALUDES**, apresentada como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil, em ___/___/___, defendida e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

George Fernandes Azevedo, Dsc.
Orientador

Rodrigo da Cruz de Araújo, Dsc.
1º examinador

Felipe Alexander Vargas Bazan, Dsc.
2º examinador

São Luís – MA
2019

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

SILVA JUNIOR, PEDRO FERNANDES DA.
IMPLEMENTAÇÃO DE ALGORITMO PROBABILÍSTICO PARA ANÁLISE
TRIDIMENSIONAL DE ESTABILIDADE DE TALUDES / PEDRO
FERNANDES DA SILVA JUNIOR. - 2019.

70 f.

Orientador(a): GEORGE FERNANDES AZEVEDO.
Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil,
Universidade Federal do Maranhão, São Luís, MA, 2019.

1. Estabilidade de Taludes. 2. Fator de Segurança. 3.
Maximização. 4. Probabilidade de Ruptura. 5. Superfície
de Ruptura. I. AZEVEDO, GEORGE FERNANDES. II. Título.

RESUMO

Este trabalho estudou a avaliação tridimensional da estabilidade de taludes a partir da utilização conjunta de modelos determinísticos e probabilísticos. Visando maximizar o fator de segurança, utilizou-se da geração de elipsoides a partir do modelo de Monte Carlo para a obtenção de uma gama de superfícies testes a serem aplicadas na determinação de probabilidades de ruptura utilizando-se de um modelo de análise tridimensional de estabilidade. Tal modelo determina o fator de segurança a partir do conhecimento prévio da suposta superfície de ruptura, em seguida, aplica o Método das Estimativas Pontuais para obter a probabilidade de ruptura máxima e, conseqüentemente, a superfície crítica de ruptura associada a ela. Os resultados evidenciaram a eficácia do método, exibindo superfícies geradas a partir de um relevo natural e evidenciando sua capacidade de ação dentro das diferentes situações de relevo.

Palavras-chave: Estabilidade de Taludes. Fator de Segurança. Superfície de Ruptura. Maximização. Probabilidade de Ruptura.

ABSTRACT

This work studied the three-dimensional evaluation of slope stability using deterministic and probabilistic models. In order to maximize the safety factor, the Monte Carlo model was applied on the generation of ellipsoids to create a range of test surfaces applied on the determination of collapse probabilities using a three-dimensional stability model. This model evaluates the safety factor from the previous knowledge of a supposed slip surface, then applies the Point Estimates Method to obtain the maximum probability of rupture and, consequently, the critical surface associated with it. The results demonstrated the method efficacy, showing surfaces generated from a natural relief, evidencing its capacity of action within the different situations.

Keywords: Slope Stability. Safety Factor. Slip Surface. Maximization. Rupture Probability.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. Considerações iniciais	9
1.2. Justificativa	10
1.3. Objetivos	10
1.3.1. Objetivo geral	10
1.3.2. Objetivos específicos.....	10
2. REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1. Movimentos de massa	11
2.1.1. Definição	11
2.1.2. Classificação e causas	11
2.1.2.1. Quedas.....	12
2.1.2.2. Tombamento	13
2.1.2.3. Deslizamentos.....	14
2.1.2.4. Expansão Lateral	16
2.1.2.5. Fluxo	17
2.1.2.6. Complexos	18
2.2. Técnicas de análise de deslizamentos causados por precipitação	19
2.2.1. Modelo SLIDE (Slope-Infiltration Distributed Equilibrium)	19
2.2.2. Modelo SHALSTAB (Shallow Stability).....	22
2.2.3. Modelos de análise em talude tridimensional	23
2.2.3.1. Modelo de colunas de Hovland	24
2.2.3.2. Modelo de análise tridimensional de deslizamento com infiltração ..	25
2.3. Modelos Probabilísticos	31
2.3.1. Método de Monte Carlo	32
2.3.2. Método das Estimativas Pontuais.....	34
3. METODOLOGIA	37
3.1. Estrutura computacional	37

3.2. Área de Aplicação	40
4. APLICAÇÃO E DISCUSSÕES	41
4.1. Superfícies e parâmetros obtidos	41
4.1.1. Superfície A.....	41
4.1.2. Superfície B.....	46
4.1.3. Superfície C.....	51
5. CONCLUSÃO	56
REFERÊNCIAS.....	58
APÊNDICE A.....	62

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

Os desastres naturais apresentam grande impacto na vida cotidiana da população em geral, gerando grandes perdas socioeconômicas devido sua grande proporção (RIFFEL et al., 2016). Dentre esses desastres, podem ser destacados os sismos, enchentes e movimentos de massa. Seu estudo, dadas suas consequências, é um interesse do Estado e população, uma vez que tais consequências afetam todas as camadas da sociedade.

Em particular, os movimentos de massa, segundo a ONU (1993), são uma das maiores causas de perda de vidas, prejuízos e danos a propriedades quando comparado a outros desastres naturais. No Brasil, em especial nas áreas montanhosas, há eventos recorrentes de deslizamentos, principalmente os provocados por grandes precipitações. Guimarães et. al. (2008) destacam que “o Brasil, devido às condições climáticas, com intensas chuvas de verão [...], está muito suscetível à ocorrência dos movimentos de massa”. É importante destacar, também, que tais movimentos não são causados apenas por fenômenos naturais, a ação antrópica também possui uma participação essencial na ocorrência de tais acidentes, principalmente em áreas de ocupação de encostas.

Prever a ocorrência de movimentos de massa é um aspecto fundamental no cotidiano de cidades que apresentam risco. Sua complexidade e grande variedade de fatores detonantes tornam sua modelagem dificultosa e desafiadora. Surge, então, a necessidade de buscar por um modelo que possa garantir eficiência e precisão na previsão de acontecimentos. Assim, os modelos computacionais tornam-se peças chave na investigação de encostas e taludes, e aliados a softwares como os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), proporcionam uma poderosa ferramenta de previsão de desastres e de análise de risco.

1.2. Justificativa

Os movimentos de massa, deflagrados por precipitação, caracterizam uma grande parcela dos desastres naturais recorrentes no Brasil. Geralmente, os eventos relacionados a movimentos de massa assumem proporções gigantescas e, além disso, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2018), aproximadamente 8,27 milhões de habitantes vivem em área de risco.

Assim, determinar a superfície de ruptura de taludes é parte fundamental do seu processo de análise da estabilidade. Associada a determinação do fator de segurança, o conhecimento da posição da superfície torna o processo mais rápido e eficaz, aumentando a quantidade de informações disponíveis sobre as áreas estudadas. Atrelado a isso, estão os modelos de determinação computacional que proporcionam rapidez e precisão, além de serem parte integrante de sistemas de alerta.

Portanto, justifica-se a importância da realização do presente estudo no que diz respeito à investigação de superfícies de ruptura e à aplicação de modelos computacionais para sua realização, por meio da necessidade de maior conhecimento a respeito do comportamento dos movimentos de massa e da busca por métodos eficientes de investigação, modelagem e previsão de acontecimentos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

Desenvolver uma metodologia capaz de encontrar a superfície crítica de ruptura de taludes tridimensionais, considerando como fator deflagrante a precipitação, a partir da utilização conjunta de modelos determinísticos e probabilísticos, comparando o esperado com o obtido em simulação.

1.3.2. Objetivos específicos

- Escolher o modelo de análise;
- Implementar os modelos escolhidos;
- Avaliar as possíveis superfícies de ruptura geradas;
- Determinar a superfície crítica de ruptura;

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Movimentos de massa

2.1.1. Definição

Movimento de massa é o termo geral utilizado para descrever o movimento descendente de solo, rocha ou materiais orgânicos sob os efeitos da gravidade e do relevo que resulta em tal movimento. De forma complementar, os movimentos de massa podem apresentar a mistura de solo e rocha e ocorrem a partir de uma superfície de ruptura (HIGHLAND & BOBROWSKY 2008, p.4-5).

Atualmente, o termo movimento de massa possui um conceito bem abrangente e está associado a vários tipos de materiais, não apenas ao que sugeria o termo americano *landslides*, que em tradução literal pode ser tido como “deslizamento de terra”:

O termo *landslides* (movimentos de massa) denota o movimento de rocha, detrito ou solo encosta abaixo. O fenômeno descrito como *landslides* não está limitado nem pela *land* (terra) nem pelo *sliding* (movimento), a palavra como é usada agora na América do Norte possui um conceito muito mais abrangente que suas partes componentes sugerem (CRUDEN & VARNES, 1996, p.36, tradução nossa).

2.1.2. Classificação e causas

As classificações dos movimentos de massa, de forma mais básica, levam em consideração o tipo do movimento e o tipo do material envolvido (HIGHLAND & BOBROWSKY 2008, p.5). Muitos sistemas de classificação foram propostos ao longo do tempo, entretanto, os sistemas de classificação mais adotados correspondem ao de Varnes (1978) e Hutchinson (1988). As Sociedades Internacionais da UNESCO formaram no início dos anos de 1990, para a Década Internacional para a Redução de Desastres Naturais, um grupo de trabalho denominado: *UNESCO Working Party on World Landslide Inventory (WP/WLI)* que, em seu relatório final denominado: *A Suggested Method for Reporting Landslide*, utiliza a classificação de Varnes, criada em 1978, e relata que esta é a mais amplamente utilizada (THE GEOLOGICAL SOCIETY, s.d.).

Além do sugerido pelo WP/WLI, Fell et al. (2007, p.15), corroboram que deve-se usar uma terminologia consistente acerca dos movimentos de massa

recomendando, portanto, as classificações de Cruden e Varnes (1996) e Varnes (1978), resumidas no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Classificação abreviada de movimentos de massa.

TIPO DE MOVIMENTO	TIPO DE MATERIAL		
	ROCHAS	SOLOS	
		Predominantemente Grosso	Predominantemente Fino
QUEDAS	De rochas	De detritos	De solo
TOMBAMENTOS	De rocha	De detritos	De solo
DESLIZAMENTOS	De rochas ou de blocos	De detritos ou bloco de detritos	De solo ou bloco de solo
EXPANSÃO LATERAL	De rocha	De detritos	De solo
FLUXOS	Fluência	De detritos	De solo
COMPLEXOS	Combinação de dois ou mais		

FONTE: VARNES (1978), Adaptado.

Cruden e Varnes (1996), complementaram a classificação de 1978 através da reafirmação de conceitos e a adição de uma classificação dos movimentos a partir da sua velocidade. Em sua publicação, afirmam que “os critérios utilizados na classificação de movimentos de massa seguem Varnes (1978), enfatizando o tipo de movimento e tipo de material”.

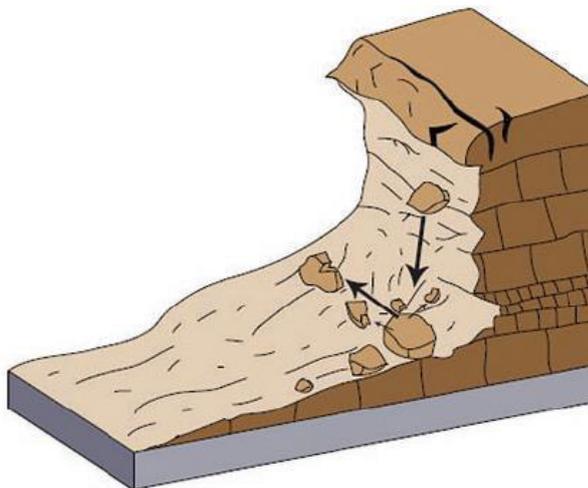
A escala de velocidade foi alterada para atender limites na ordem de múltiplos de 100, e foi incluída uma sétima classe de velocidade, complementando as dispostas em Varnes (1978) (CRUDEN & VARNES, 1996, p.49). Assim, seguindo as sugestões de WP/WLI, para este trabalho será utilizada a classificação de Varnes (1978) com as devidas complementações dispostas em Cruden e Varnes (1996). Por fim, a cada classe aqui definida estarão dispostas, dentro de cada seção, as possíveis causas envolvidas em cada tipo de movimento.

2.1.2.1. Quedas

Tratam-se dos movimentos onde uma massa de qualquer tamanho se separa de um talude íngreme ou encosta ao longo de uma superfície que apresenta uma pequena ou nenhuma tensão cisalhante e desce principalmente por queda livre, saltos ou rolamentos, representado na figura 2.1. Estes movimentos são classificados desde muito rápidos a extremamente rápidos e podem ser ou não precedidos de menores

movimentos (VARNES, 1978, p.11). Além disso, Varnes (1978) acrescenta que as quedas podem ser de rocha, solo ou detritos.

Figura 2.1 - Esquema representativo de quedas em rochas.



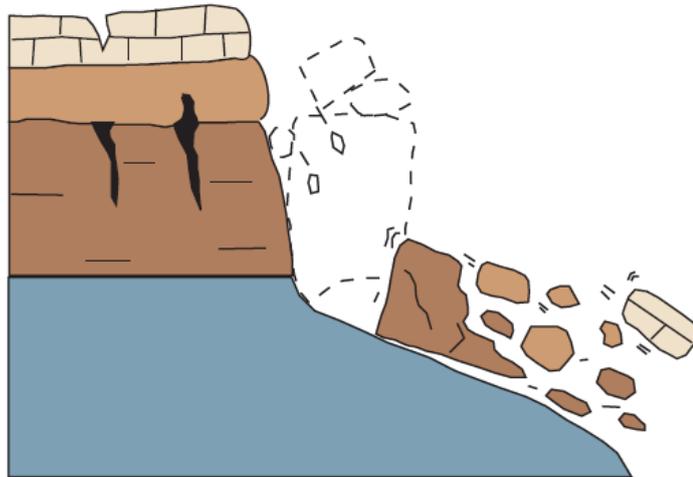
FONTE: HIGHLAND & BOBROWSKY (2008).

O material das quedas geralmente atinge o pé do talude com ângulos menores que o de queda, resultando em saltos. A massa também pode se despedaçar com o impacto e incidir em outras movimentações como rolamentos. A tendência é que pare assim que o terreno assumira um perfil mais plano. Os mecanismos detonantes para esse tipo de movimento variam desde cortes na parte inferior do talude, provocados por algum fluxo interno, a mecanismos de mudança climática como chuvas, ciclos de congelamento e descongelamento, atividades humanas, sismos ou vibrações intensas (HIGHLAND & BOBROWSKY, 2008, p.6).

2.1.2.2. Tombamento

Consiste na rotação para a frente de uma ou mais massas de solo, em torno de um ponto mais abaixo ou fora do maciço, por ação da gravidade e forças exercidas por corpos adjacentes ou pela presença de fluidos em fendas que o maciço possa apresentar. A massa de solo em tombamento rotaciona sem entrar em colapso (VARNES, 1978, p.11), mecanismo retratado na figura 2.2. Varnes (1978) também acrescenta que tombamentos ocorrem em uma grande variedade de rochas e possuem uma grande variação de volume. Além disso, podem ou não culminar em quedas ou rolamentos, dependendo apenas das propriedades geométricas da encosta.

Figura 2.2 - Esquema representativo de um tombamento.



FONTE: HIGHLAND & BOBROWSY (2008).

Os tombamentos assumem velocidades entre extremamente lenta e extremamente rápida, além disso pode ocorrer aceleração durante o movimento devido a distância percorrida pela massa. Suas principais causas giram em torno da ação da gravidade exercida pelo material superior da encosta, pela presença de água ou gelo em ocorrências de fendas ao longo da massa. Também pode-se considerar vibrações, remoções de material no pé do talude ou erosões causadas por corpos d'água (HIGHLAND & BOBROWSKY, 2008, p.8).

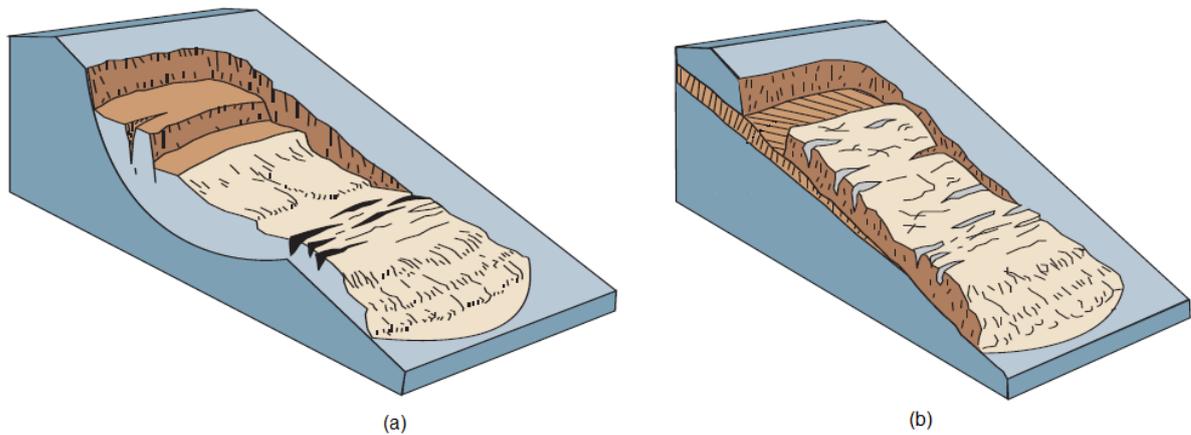
2.1.2.3. Deslizamentos

Este movimento é caracterizado pela presença de tensões de cisalhamento e movimentação ao longo de uma ou várias superfícies que são visíveis ou podem ser razoavelmente aproximadas. Essa movimentação pode ser progressiva, ou seja, a ruptura por cisalhamento pode não começar diretamente na possível superfície de ruptura e, sim, se propagar a partir de uma área de falha local. Por fim, a massa desprendida no movimento deslizará sob uma superfície de ruptura bem definida, que se torna a superfície de separação (VARNES, 1978, p.12).

Os deslizamentos apresentam uma divisão de acordo com a superfície de ruptura formada, podendo ser deslizamentos translacionais (planar), rotacionais (circular), retratados na figura 2.3, ou em cunha, figura 2.4. De acordo com Varnes (1978) “em deslizamentos translacionais a massa progride [...] ao longo de uma superfície mais ou menos plana ou gentilmente ondulatória[...]”, além disso, acrescenta que os deslizamentos translacionais podem progredir indefinidamente

caso a superfície de movimentação seja suficientemente inclinada e a tensão cisalhante resistente permaneça menor que aquela mobilizada.

Figura 2.3 - Representação de deslizamento rotacional (a) e translacional (b).

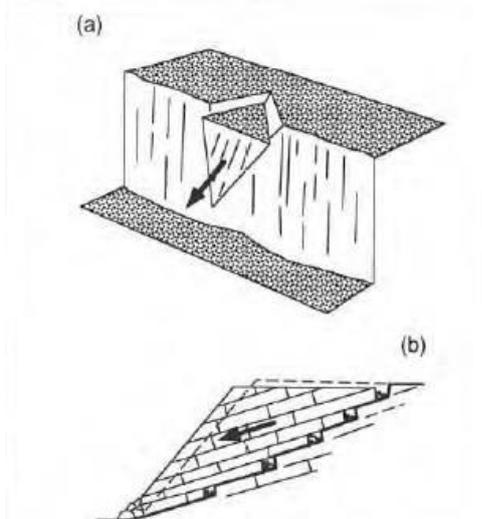


FONTE: HIGHLAND & BOBROWSKY (2008), Adaptado.

Nos deslizamentos rotacionais, Varnes (1978) comenta que a massa desliza ao longo de uma superfície de ruptura curva e côncava para cima, comparando ao formato de uma colher. Em taludes, as superfícies de ruptura nesses deslizamentos tendem a se aproximar a um cilindro com eixo paralelo ao talude. Por fim, pode-se afirmar que, nos deslizamentos rotacionais, a movimentação tende a restaurar o equilíbrio da massa deslocada que tende a se acumular no pé da encosta.

Deslizamentos em cunha, de acordo com Cruden e Varnes (1996), são um tipo de deslizamento translacional onde a superfície de ruptura surge a partir de duas descontinuidades, e a massa tende a deslizar na sua linha de interseção. Além disso, acrescentam o conceito de deslizamento em degrau, que apresenta uma quantidade diversa de superfícies de ruptura em formato de escada. Ambos são retratados na figura 2.4.

Figura 2.4 - Representação de deslizamento em cunha (a) e degrau (b).



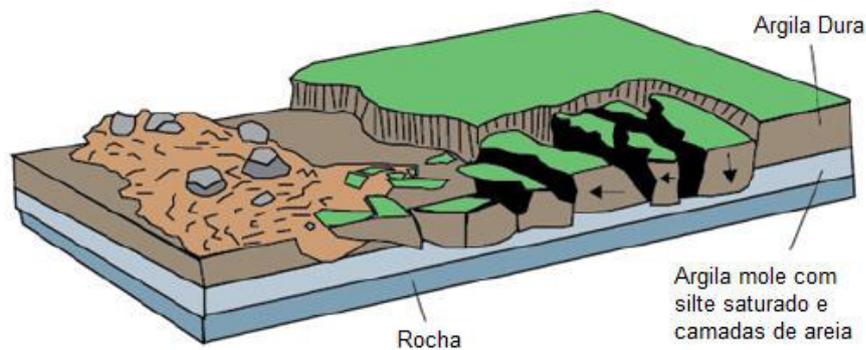
FONTE: CRUDEN & VARNES (1996).

De forma geral, a ocorrência de deslizamentos está associada a ações que modifiquem as condições de resistência do talude. Highland e Bobrowsky (2008) comentam que chuvas intensas ou duradouras tendem a saturar taludes e elevar o nível do lençol freático. A elevação do nível d'água pode ocorrer, também, pela criação de reservatórios. Além disso, a ação humana, vazamentos subterrâneos e sismos podem contribuir para a ocorrência. Assim, em países tropicais, como o Brasil, pode-se indicar como principal mecanismo detonante de deslizamentos as chuvas, que estão diretamente associadas às perdas de resistência no solo. Por fim, Highland e Bobrowsky (2008) também relatam que deslizamentos rotacionais tendem a ocorrer em materiais homogêneos e possuem velocidades entre extremamente lenta e moderadamente rápida.

2.1.2.4. Expansão Lateral

Neste tipo de movimento há a predominância da expansão lateral impulsionada por fratura de cisalhamento ou de tração. Existem dois tipos distintos de expansão lateral: o primeiro apresenta movimentos distribuídos por toda extensão, porém não apresenta nenhuma superfície de ruptura e nem a presença de um fluxo plástico (VARNES, 1978, p.14-15). Já o segundo envolve o fraturamento e alargamento de material resistente, rocha ou solo, devido a liquefação ou fluxo de material subjacente (figura 2.5). A parte resistente (superior) pode descer, transladar, rotacionar, desintegrar ou se liquefazer e fluir (VARNES, 1978, p.14-15).

Figura 2.5 - Representação de expansão lateral a partir da liquefação de camada inferior.



FONTE: HIGHLAND & BOBROWSKY (2008), Adaptado.

A expansão lateral possui velocidades entre lenta e moderada, e a taxa de evolução pode variar de milímetros quadrados por dia até metros quadrados por dia. Os mecanismos de detonação das expansões estão associados à desestabilização da camada inferior menos resistente. São eles: a liquefação da camada inferior por terremotos, sobrecarga natural ou antropológica da camada superior, saturação da camada inferior menos resistente e deformação plástica de material instável mais profundo (HIGHLAND & BOBROWSKY, 2008, p.14).

2.1.2.5. Fluxo

Os fluxos são movimentos de massa que não são classificados em nenhuma das categorias anteriores. Em materiais não consolidados a movimentação se assemelha à de um fluido viscoso não importando a sua velocidade (rápida ou devagar) nem sua natureza (seca ou molhada). Já nas rochas é mais difícil de se classificar as movimentações que tendem a dobrar, entortar ou elevar. Entretanto, de maneira geral, o comportamento se assemelha, também, ao de um fluido viscoso. Logo pode-se descrevê-lo como o fluxo de uma rocha intacta (VARNES, 1978, p.17).

Nas rochas, de acordo com Varnes (1978), “os movimentos de fluxos em rochas incluem deformações distribuídas ao longo de fraturas grandes, pequenas ou até mesmo microfaturas, sem concentração de deslocamentos ao longo de uma fratura em andamento”. Ainda segundo o autor, esses movimentos possuem velocidades extremamente lentas e possuem variação de estabilidade ao longo do tempo.

apresentam as características de mais de uma das classificações acima, seguindo as classificações de 1978.

2.2. Técnicas de análise de deslizamentos causados por precipitação

O Brasil, devido a suas condições climáticas e geológicas, apresenta como principais tipos de desastres naturais os movimentos de massa e enchentes, Riffel et al. (2016) afirmam que os desastres que ocorrem no Brasil são majoritariamente de origem atmosférica, ligados ao excesso ou escassez de precipitação. Dentre os movimentos de massa, o mais recorrente em território nacional é o deslizamento detonado por precipitação uma vez que, de acordo com Liao et al. (2010), “[...] as chuvas causam a ruptura de taludes pois a água reduz a força de cisalhamento resistente e aumenta a força de cisalhamento solicitante na camada de solo”. Portanto, é essencial destacar alguns modelos criados para a análise de deslizamentos causados por chuva.

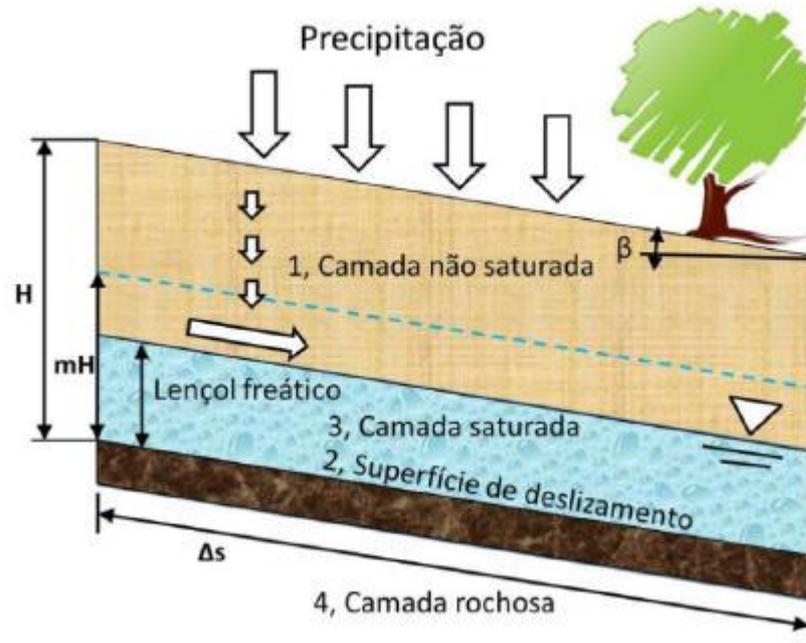
2.2.1. Modelo SLIDE (Slope-Infiltration Distributed Equilibrium)

Este método de análise resulta de estudo atribuído a Liao et al. (2010), que modificou um modelo físico anterior, atribuído a Montrasio e Valentino (2008), no intuito de criar um protótipo de sistema de alerta de deslizamentos detonados por precipitação na Ilha de Java, Indonésia. O estudo consistiu em 3 componentes principais, sendo o primeiro um levantamento de susceptibilidade a partir de uma base de dados geoespaciais. O segundo, um sistema de monitoramento de precipitações via satélite, e, por fim, o modelo físico de previsão de deslizamentos detonados por chuvas chamado SLIDE, adaptado de Montrasio e Valentino (2008).

O modelo SLIDE apresenta uma hipótese simplificada para o fluxo descendente de água no talude e, assim, define uma correlação direta entre a precipitação e o fator de segurança do talude estudado (LIAO et al., 2010, p.317). Além disso, o modelo SLIDE considera a variação do lençol freático em cada evento de precipitação a partir de uma simulação diferencial da quantidade de água presente no solo. Liao et. al. (2010) descrevem que o sistema de previsão funciona a partir do cálculo de fatores de segurança continuamente dentro da região de estudo, com entradas de informações de solo a partir de bases de dados disponíveis e utiliza a distribuição espacial, duração e intensidade das chuvas para o mecanismo detonante.

Matematicamente, o SLIDE transcreve o fenômeno físico que engloba o mecanismo detonante da precipitação, considerando as forças provocadas pelo fluxo descendente de água no solo e a contribuição da saturação parcial na força cisalhante resistente do solo (LIAO et al., 2010, p.318). O esquema representativo pode ser observado na figura 2.7.

Figura 2.7- Esquema ilustrativo do modelo SLIDE em talude infinito.



FONTE: LIAO ET AL. (2010), Adaptado.

A formulação possui uma conexão simplificada entre a quantidade de chuva e o fator de segurança, retratada na equação 2.1.

$$FS = \frac{\cot \beta \cdot \tan \phi' \cdot [\Gamma + m \cdot (n_w - 1)] + C' \cdot \Omega}{\Gamma + m \cdot n_w} \quad (2.1)$$

Na equação 2.1, β é a inclinação do talude, ϕ' é o ângulo de atrito do solo, ambos em graus. Os demais termos tratam-se da coesão total (C') e de funções integrantes descritas nas equações a seguir.

$$\Gamma = G_s(1 - n) + n \cdot S_r \quad (2.2)$$

$$n_w = n \cdot (1 - S_r) \quad (2.3)$$

$$\Omega = \frac{2}{\sin 2\beta \cdot H \cdot \gamma_w} \quad (2.4)$$

Nas equações acima, G_s é a gravidade específica, β é a inclinação do talude, n a porosidade do solo, S_r é o grau de saturação, H a altura vertical do talude, e γ_w é o peso específico da água. A coesão total é expressa pela equação 2.5.

$$C' = [c' + c_\phi] \cdot \Delta s = [c' + A \cdot (1 - \lambda m^\alpha)] \cdot \Delta s \quad (2.5)$$

Na equação da coesão total, c' é a coesão efetiva do solo, A é um parâmetro do tipo de solo relacionado com o pico de tensão de cisalhamento na ruptura, Δs é o comprimento unitário da massa de solo, λ é um coeficiente de intensidade ligado ao tipo de solo e α é um parâmetro que representa a tendência não-linear da curva de coesão. Liao et al. (2010) destacam que a coesão total inclui a coesão efetiva do solo e a coesão aparente relacionada com a matriz de sucção proposta por Freflund et al. (1996).

O fator m presente na equação da coesão total representa a espessura adimensional, corresponde a um parâmetro que dita a variação do nível de água em termos da altura vertical. Montrasio e Valentino (2008) conseguiram escrever essa espessura como função da intensidade das chuvas. Liao et al. (2010) afirmam que o parâmetro m_t foi escrito de forma diferencial, o que permitiu uma melhor avaliação dos efeitos de chuvas isoladas, além disso, ressalta que o modelo de talude infinito do SLIDE (figura 2.7) fora concebido como um tanque de balanço hídrico que ao mesmo tempo contabiliza a entrada de água devido a infiltração e a perda devido a um fluxo interno ou evapotranspiração.

O valor inicial de m varia de acordo com o objeto de estudo, e pode ser determinado com ensaios *in situ*. A partir do valor obtido pode-se calcular o seu valor para cada passo de tempo utilizando-se do procedimento descrito na equação 2.6.

$$\begin{cases} m_1 = 0 \\ O_t = K_t \cdot \sin \beta \cdot m_t \cdot H \cdot \cos \beta \cdot \Delta t \\ \Delta m_t = \frac{(I_i - O_t)}{n \cdot H \cdot (1 - S_r)} \\ m_{t+1} = m_t + \Delta m_t \end{cases} \quad (2.5)$$

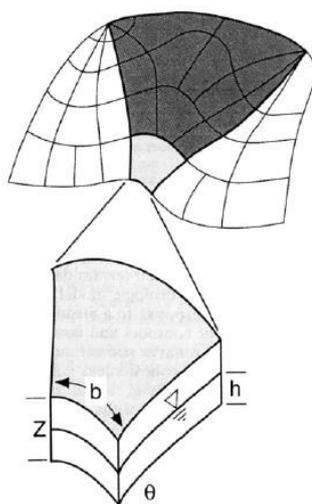
Nas equações acima, t é o tempo, Δt é o intervalo de tempo, m_1 é o valor inicial de m , e m_t é calculado em cada passo do tempo. O_t representa a saída de água em uma porção finita de um talude finito de comprimento L , I_t é a intensidade da chuva e K_t é a representação de uma capacidade global de drenagem devido a permeabilidade do solo e a presença de outros fluxos de saída preferenciais (LIAO et al., 2010).

2.2.2. Modelo SHALSTAB (Shallow Stability)

Este modelo foi desenvolvido através dos trabalhos de Montgomery e Dietrich (1994), em seguida foi adaptado para a utilização em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas) (DIETRICH & MONTGOMERY, 1998). Resultante de uma combinação do modelo de estabilidade de taludes e modelos hidrológicos, o modelo SHALSTAB incorpora parâmetros topográficos e geotécnicos dentro de sua análise (NUNES et al, 2016, p.1857). Além disso, Vieira e Ramos (2015, p.163) afirmam que o SHALSTAB calcula a quantidade de chuva necessária para a ocorrência de deslizamentos levando em conta o fluxo interno paralelo à superfície, a condutividade hidráulica e a espessura do solo para toda a bacia.

O modelo hidrológico utiliza uma chuva em estado estacionário e mapeia o padrão espacial de equilíbrio baseado na análise das áreas de influência localizadas mais acima nos taludes, da transmissividade do solo e a inclinação local. O modelo divide a bacia hidrográfica em elementos topográficos, definidos em malha, e conexões em tubos ortogonais aos contornos topográficos. A chuva líquida (precipitação descontada da evapotranspiração e drenagem profunda) é transformada em fluxo interno que é dirigido aos tubos, permitindo a avaliação do fluxo local em cada elemento topográfico (MONTGOMERY & DIETRICH, 1994, p.1153). A malha topográfica e representação local encontram-se ilustradas na Figura 2.8.

Figura 2.8 - Representação dos elementos topográficos.



FONTE: MONTGOMERY & DIETRICH (1994, p.1154).

Assim, o modelo reduz a parcela hidrológica a apenas um cálculo de peso (W) como mostra a Equação 2.6.

$$W = \frac{q}{T} \cdot \frac{a}{b \cdot \sin \theta} \quad (2.6)$$

Onde, W é o peso, q é a chuva líquida, a é área de contribuição drenante através de b , que é o comprimento do contorno da parte mais baixa de cada elemento, T é a transmissividade do solo quando saturado e θ é a inclinação, em graus, da encosta (MONTGOMERY & DIETRICH, 1994, p.1154).

A parcela de estabilidade de taludes considera que o solo respeita o critério de resistência de Mohr-Coulomb, e que a superfície de ruptura é conhecida. Além disso, resume-se que a resistência do solo está associada às forças de atrito resultantes nas superfícies de contato (OLIVEIRA, 2009, p.238). Assim, de acordo com Oliveira (2009), a Equação 2.7 relaciona a proporção da coluna de água (h) na espessura (Z) considerada, denominando taxa de submersão do solo. h assumirá, no máximo, o valor de Z caso o solo esteja saturado.

$$\frac{h}{Z} = \frac{\rho_{nat}}{\rho_{\acute{a}gua}} \cdot \left(1 - \frac{\tan \beta}{\tan \phi'}\right) \quad (2.7)$$

Na equação 2.7, h é a altura do nível da água, Z a espessura do solo, β a inclinação do talude, ρ_{nat} a densidade natural do solo, $\rho_{\acute{a}gua}$ densidade da água e ϕ' o ângulo de atrito efetivo. Sobre a equação 2.8, Oliveira (2009) afirma que “[...] os parâmetros topográficos, geotécnicos e meteorológicos são combinados, e apresentados sob a forma da razão “ q/T ” [...]”. O modelo SHALSTAB pode então ser resumido na Equação 2.8 que engloba todos os parâmetros topográficos, geotécnicos e hidrológicos.

$$\frac{q}{T} = \frac{\rho_{nat}}{\rho_{\acute{a}gua}} \cdot \left(1 - \frac{\tan \beta}{\tan \phi'}\right) \cdot \frac{b}{a} \cdot \sin \beta \quad (2.8)$$

2.2.3. Modelos de análise em talude tridimensional

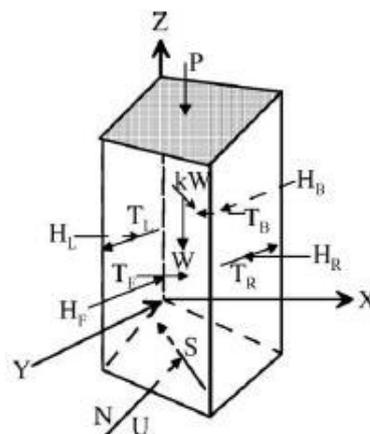
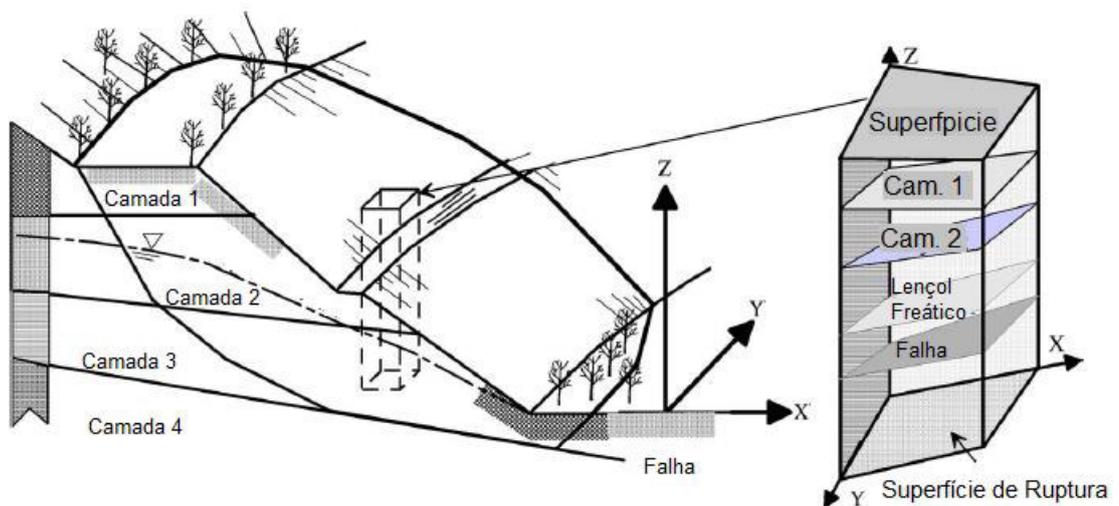
A grande maioria dos modelos de análise de estabilidade de taludes tende a considerar casos bidimensionais, ou seja, uma análise no plano de ruptura crítico, na maioria das vezes assumindo o solo como um material homogêneo e isotrópico. Segundo Xie et al. (2006), as análises bidimensionais utilizam representações equivalentes de esforços planos e possuem resultados conservadores e consequentemente soluções mais onerosas.

Qiu et al. (2006) comentam que é sabido que uma análise tridimensional se torna muito importante nos casos em que a geometria do talude e da superfície de ruptura variam significativamente na direção lateral, em que as propriedades são altamente anisotrópicas ou que o talude apresente carregamentos locais. Xie et al. (2006) acrescentam que modelos tridimensionais aumentam o fator de segurança devido a análise bidimensional se dar na superfície crítica e possibilitam a integração com modelos computacionais e SIG.

2.2.3.1. Modelo de colunas de Hovland

A estabilidade de um deslizamento nesse modelo está relacionada com as informações geológicas, aspectos geomorfológicos, parâmetros geomecânicos e condições hidráulicas (XIE et al., 2006, p.264). A Figura 2.9 ilustra a discretização das camadas de um solo em uma coluna utilizada para as análises tridimensionais.

Figura 2.9 - Representação de coluna de solo e forças atuantes.



FONTE: XIE et al. (2006), Adaptado.

A partir da coluna, assume-se que suas faces laterais não possuem atrito e a equação do fator de segurança do modelo de Hovland (equação 2.9), pode ser expressa utilizando as forças resistentes e mobilizadas ao longo da superfície de ruptura (*slip surface*).

$$SF_{3D} = \frac{\sum_J \sum_I \{c' A + [(W + P) \cos \theta - U - kW \sin \theta] \tan \phi'\} + E \cos \theta_{Avr}}{\sum_J \sum_I [(W + P) \sin \theta_{Avr} + kW \cos \theta_{Avr}]} \quad (2.9)$$

Na equação 2.9, SF_{3D} é o fator de segurança, W é o peso de uma coluna, A é a área da superfície de ruptura, c' é a coesão efetiva, ϕ' o ângulo de atrito efetivo, θ é o ângulo normal da superfície de ruptura, J, I são os números de linha e coluna na malha ao longo do deslizamento, U é a poro-pressão em cada coluna, P é a força vertical atuando na coluna (carregamento superior), k é o fator de aceleração horizontal causada por terremotos e, por fim, E é a resultante de todas as componentes horizontais aplicadas.

Devido sua complexidade, sem um SIG, calcular o fator de segurança de um talude tridimensional no modelo de colunas seria uma tarefa tediosa e demorada. A partir de um SIG pode-se utilizar todas as informações em termos dos vetores presentes no sistema (XIE et al., 2006, p.264). Ao utilizar o sistema para auxiliar o procedimento de cálculo da equação 2.9, serão necessárias as equações 2.10 a 2.12.

$$W = d^2 \sum_{i=1}^n h_i \gamma_i \quad (2.10)$$

$$P = d^2 p \quad (2.11)$$

$$U = Au \quad (2.12)$$

Nas equações acima, d é o tamanho do pixel que define a coluna estudada, i é o número representativo da camada, e $h_i \gamma_i$ é o peso unitário de cada camada do grid, p é a carga vertical na malha, e u a poro-pressão ao longo da superfície de ruptura (XIE et al., 2006, p.265).

2.2.3.2. Modelo de análise tridimensional de deslizamento com infiltração

Este modelo contemplará as indicações realizadas por Qiu et al. (2006), que em seu trabalho propõem a integração de um modelo hidrológico que simula a infiltração da chuva no solo com uma adaptação do modelo de colunas de Hovland. A partir deste modelo, a superfície de ruptura pode ser encontrada a partir de

procedimentos randômicos de busca apenas variando os parâmetros geométricos da superfície simulada (QIU et al., 2006, p.1570).

Na análise hidrológica, é importante considerar as informações hidráulicas, sucção, intensidade e duração da chuva, bem como a existência de chuvas antecedentes e a saturação do solo. Segundo Qiu et al. (2006), existem numerosos modelos de determinação da infiltração a partir das características básicas do solo, entretanto, devido seu mecanismo complexo a determinação da quantidade e dos efeitos causados à estabilidade é laboriosa.

Qiu et al. (2006) e Azevedo et al. (2018) propõem a utilização do modelo hidrológico de Green e Ampt (1911) a partir da suposição de que a infiltração das chuvas é vertical através da zona não saturada antes de atingir o freático. Azevedo et al. (2018) reforçam que o modelo é de uso relativamente simples e considera cinco hipóteses principais. Na primeira, a superfície do solo é mantida constantemente úmida pelo acúmulo de água, a segunda afirma que existe uma frente úmida acentuada, a terceira diz que a condutividade hidráulica do solo é constante com a profundidade, bem como sua matriz de sucção na frente úmida (quarta hipótese) e, por fim, supõe-se que o solo se encontra completamente saturado até a profundidade da frente úmida.

Seguindo a lei de Darcy a infiltração assume a equação 2.13 abaixo. Nela, K_s é a condutividade hidráulica do solo, ψ_f e a matriz de sucção na frente úmida e Z_f é a profundidade da frente úmida.

$$f = K_s \frac{\Psi_f + Z_f}{Z_f} \quad (2.13)$$

Qiu et al. (2006) afirma que, a profundidade da frente úmida pode ser relacionada com a quantidade acumulada de água infiltrada, a partir da equação 2.14, onde F é essa quantidade, θ_s é o teor de umidade volumétrico inicial e θ_i é o teor de umidade volumétrico saturado.

$$F = Z_f(\theta_s - \theta_i) \quad (2.14)$$

Após manipulações matemáticas, a quantidade acumulada de água infiltrada em um tempo t pode ser escrita de acordo com as equações 2.15 a 2.18.

$$F(t) = t_p + \frac{1}{K_S} [F - F_p + \Psi_f(\theta_S - \theta_i) \ln(n)] \quad (2.15)$$

$$n = \frac{\Psi_f(\theta_S - \theta_i) + F_p}{\Psi_f(\theta_S - \theta_i) + F} \quad (2.16)$$

$$t_p = \frac{F_p}{P} \quad (2.17)$$

$$F_p = \frac{\Psi_f K_S (\theta_S - \theta_i)}{P - K_S} \quad (2.18)$$

Nelas, F_p é a quantidade de água que infiltra no solo antes do seu acúmulo na superfície, t_p é o tempo necessário para que ocorra o acúmulo e P representa a intensidade da precipitação. Qiu et al. (2006) afirmam que uma condição necessária para que as equações 2.15 – 2.18 sejam utilizadas é que a intensidade da chuva deve ser maior que a condutividade hidráulica do solo. Caso a intensidade da chuva seja menor que a infiltração ($P \leq K_S$) ou não ocorra acumulação superficial ($t \leq t_p$), toda a quantidade de chuva irá infiltrar e a taxa de infiltração será igual a intensidade da chuva (QIU et al., 2006). Esse caso está representado nas equações 2.19 e 2.20.

$$f(t) = P \quad (2.19)$$

$$F = P \cdot t \quad (2.20)$$

Para o cálculo da profundidade de infiltração pode-se aplicar um processo iterativo na equação 2.15 ou então aplicar a solução aproximada sugerida por Serrano (2003) (AZEVEDO et al., 2018, p.657). Essa solução está listada nas expressões abaixo.

$$F(t) \approx F_0(t) + \Psi_f(\theta_S - \theta_i) \ln[m_1(t)] \left(1 + \frac{m_2(t)}{[1 - m_2(t)]\{1 + m_2(t) \ln[m_1(t)]\}} \right) \quad (2.21)$$

$$F_0 = K_S(t - t_p) + F_p \quad (2.22)$$

$$m_1(t) = \frac{F_0(t) + \Psi_f(\theta_S - \theta_i)}{F_p + \Psi_f(\theta_S - \theta_i)} \quad (2.23)$$

$$m_2(t) = \frac{\Psi_f(\theta_S - \theta_i)}{F_0(t) + \Psi_f(\theta_S - \theta_i)} \quad (2.24)$$

Para aplicação do modelo de cálculo da infiltração, podem ser aplicadas as equações 2.15 e 2.21, desde que, respectivamente, a condição $2m_2(t) < 1$ seja aplicada ou não. Azevedo et al. (2018) utilizam para a estimativa do nível inicial do lençol freático inicial o processo iterativo disposto no trabalho de Liao et al (2010).

O fator de segurança avaliado no modelo, trata-se, seguindo Qiu et al. (2006), de um modelo tridimensional amparado em base de dados SIG do tipo *raster*. Esta formulação provém de uma adaptação feita por Xie et al. (2004) do fator de segurança de colunas proposto por Hovland (1977), já discutido na seção anterior. A formulação está representada na eq. 2.25.

$$SF_{3D} = \frac{\sum_J \sum_I \{cA + W \cos \theta \tan \phi\} \cos \theta_{Avr}}{\sum_J \sum_I [W \sin \theta_{Avr} \cos \theta_{Avr}]} \quad (2.25)$$

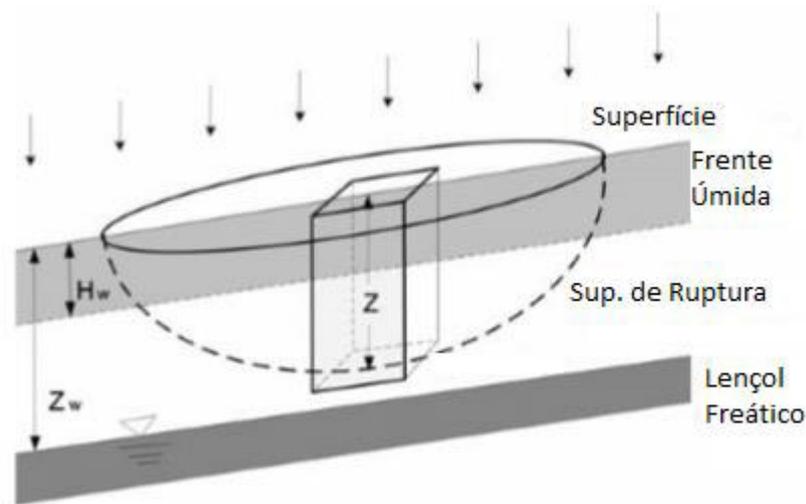
Na Equação 2.25, c é a coesão, A é a área da superfície de ruptura, W o peso de uma coluna de solo, ϕ é o ângulo de atrito, θ a inclinação da superfície de ruptura, θ_{Avr} é o ângulo entre a direção do movimento e o plano horizontal, FS_{3D} é o fator de segurança, J e I representam as linhas e colunas dentro do intervalo da massa de ruptura. Por fim, Qiu et al. (2006) dividem quatro configurações de cálculo para o fator de segurança a partir de casos passíveis de ocorrência e que possuem o comportamento previsível, cada um deles com suas relações de resistência e mobilização.

A superfície de ruptura, na primeira configuração, se forma dentro da zona não-saturada entre a frente úmida avançando a partir da superfície e o lençol freático, como ilustrado na Figura 2.10, nessa configuração as forças resistentes (F_1) e mobilizadas (F_2) seguem o disposto nas equações 2.26 e 2.27 (QIU et al., 2006, p.1573).

$$F_1 = \{c'_i A' + [\gamma_i z + (\gamma_{sat} - \gamma_i) H_w] A \cos \theta \tan \phi'\} \cos \theta_{Avr} \quad (2.26)$$

$$F_2 = [\gamma_i z + (\gamma_{sat} - \gamma_i) H_w] A \sin \theta_{Avr} \cos \theta_{Avr} \quad (2.27)$$

Figura 2.10 - Configuração 1.



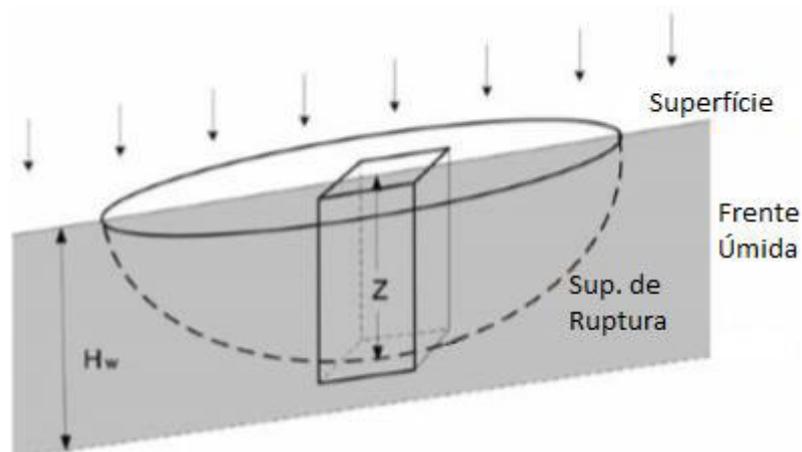
FONTE: QIU et al. (2006), Adaptado.

Em sua segunda configuração, Qiu et al. (2006), afirmam que a superfície de ruptura se forma inteiramente na área entre a superfície e o fim da frente úmida, uma área saturada determinada por seu avanço descendente, como representado na Figura 2.11. As respectivas forças resistentes e atuantes constam nas equações 2.28 e 2.29.

$$F_1 = [c'_w A' + (\gamma_{sat} z \cos \theta - u_w) A \tan \phi'] \cos \theta_{Avr} \quad (2.26)$$

$$F_2 = \gamma_{sat} z A \sin \theta_{Avr} \cos \theta_{Avr} \quad (2.27)$$

Figura 2.11 - Configuração 2.



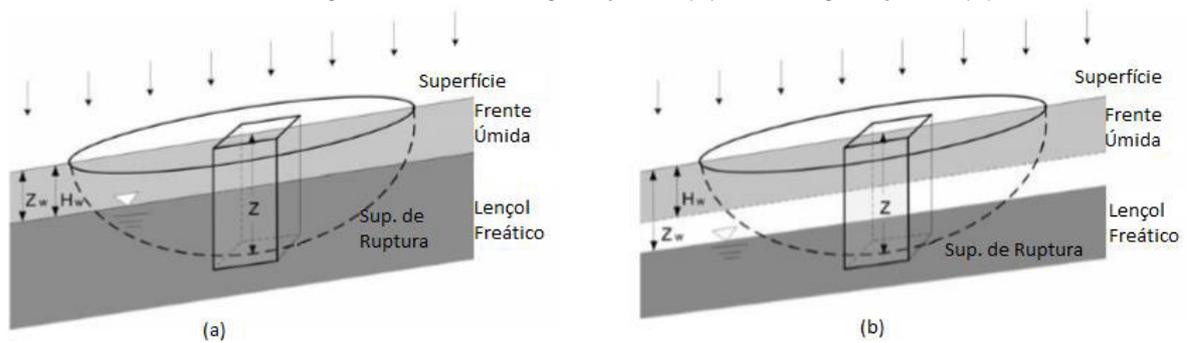
FONTE: QIU et al. (2006), Adaptado.

Semelhante à segunda configuração, a próxima também considera o solo como saturado, assim, a superfície de ruptura forma-se na zona abaixo do lençol freático e

da frente úmida esta, que por sua vez atingiu a altura do lençol (QIU et al., 2006, p.1574). Sua representação encontra-se ilustrada na Figura 2.12 e suas respectivas forças resistentes e atuantes encontram-se nas Equações 2.28 e 2.29.

A última, por sua vez, ainda de acordo com Qiu et al. (2006), possui a superfície de ruptura formada dentro da zona saturada formada pela frente úmida, passando por uma interface intermediária seca e atingindo o lençol freático em uma zona também saturada, seu esquema está ilustrado na Figura 2.12 e suas forças resistentes e mobilizadas nas Equações 2.30 e 2.31.

Figura 2.12 - Configuração 3 (a) e Configuração 4 (b).



FONTE: QIU et al. (2006), Adaptado.

$$F_1 = [c'_w A' + (\gamma_{sat} z \cos \theta - u_w) A \tan \phi'] \cos \theta_{Avr} \quad (2.28)$$

$$F_2 = \gamma_{sat} z A \sin \theta_{Avr} \cos \theta_{Avr} \quad (2.29)$$

$$F_1 = \{c'_w A' + [(\gamma_i(z_w - H_w) + \gamma_{sat}(H_w + z - z_w)) \times \cos \theta - u_w] A \tan \phi'\} \cos \theta_{Avr} \quad (2.30)$$

$$F_2 = [\gamma_i(z_w - H_w) + \gamma_{sat}(H_w + z - z_w)] A \sin \theta_{Avr} \cos \theta_{Avr} \quad (2.31)$$

Todas as formulações supracitadas levam em consideração que cada lado das colunas de solo consideradas no modelo não possuem atrito, além disso, o Fator de Segurança 3D pode ser calculado, considerando uma das configurações acima, a partir da Equação 2.32, nesta, cada caso pode ser levado em conta separadamente, e os parâmetros necessários podem ser obtidos a partir de investigações de solo ou ensaios triaxiais (Qiu et al., 2006, p.1574).

$$SF_{3D} = \frac{\sum_J \sum_I F_1}{\sum_J \sum_I F_2} \quad (2.32)$$

Considera-se, para efeitos de cálculo, que F_1 seja a força resistente (kN), F_2 a força mobilizada (kN), γ_{sat} o peso saturado unitário do solo (kN/m³), γ_i o peso inicial unitário (kN/m³), c'_i a coesão efetiva inicial do solo (kN/m²), c'_w a coesão efetiva saturada (kN/m²), ϕ' o ângulo de atrito efetivo (°), z_w a profundidade da frente úmida

(m), u_w a poropressão (kN/m²), A consiste na área da coluna de solo (m²), A' a área da superfície de ruptura na coluna, θ a inclinação da superfície de ruptura (°), θ_{Avr} o ângulo de inclinação da direção principal de deslizamento (°), I e J representam os números das linhas e colunas da célula estudada dentro da área analisada, por fim, H_w representa a profundidade do lençol freático (Qiu et al, 2006, p.1574).

2.3. Modelos Probabilísticos

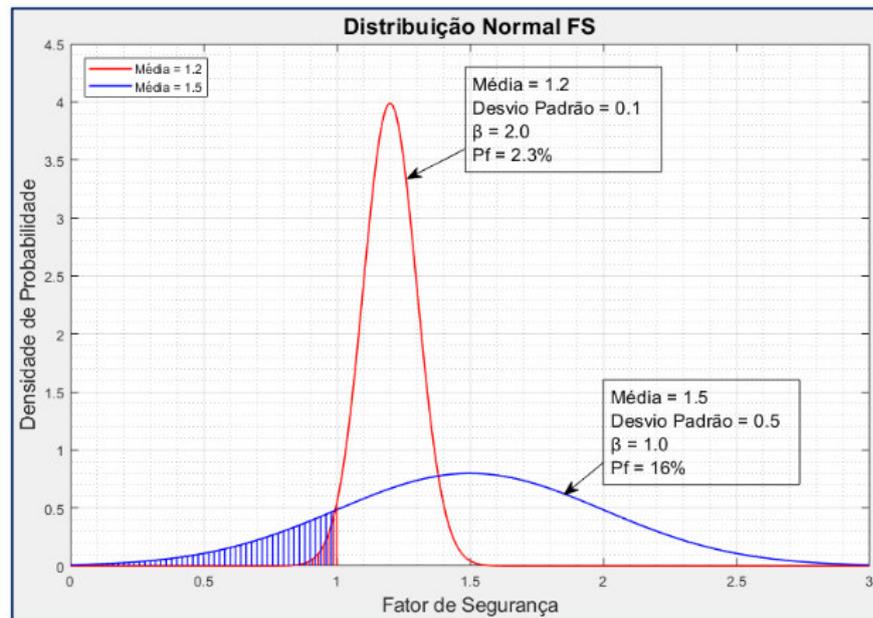
Segundo Montoya & Assis (2011), os modelos probabilísticos são aqueles que nos permitem estudar uma distribuição de probabilidade de uma variável dependente com base nas distribuições estatísticas das variáveis independentes geradoras.

Ao calcular-se um Fator de Segurança (FS) existem variáveis necessárias que estão ligadas às características dos solos e à configuração geométrica do talude tais como, peso específico e ângulo de atrito, estas possuem incertezas associadas que devem ser quantificadas dentro do FS através da probabilidade de ruptura (PR) e do índice de confiabilidade (β) (LOPEZ, 2017, p.43).

Em modelos determinísticos dois taludes fictícios A e B podem apresentar, respectivamente, FS=1,2 e FS=1,5 assim o B pode ser considerado mais estável que A, entretanto, trazendo para uma análise probabilística, de acordo com as distribuições de cada um deles, o talude B, até então mais estável, pode apresentar uma probabilidade de ruptura maior que o A, baseado apenas em sua curva de distribuição de probabilidade. De acordo com Lopez (2017), do ponto de vista determinístico o uso solitário do FS pode apresentar informações incompletas ou errôneas sobre a estabilidade do talude.

A Figura 2.13 ilustra o exemplo supracitado, apresentando as distribuições em cada caso, onde P_f é a probabilidade de ruptura. É perceptível, a partir da observação da mesma, que a área abaixo do gráfico até o FS crítico (FS=1) do talude B é maior que a do A, deixando-o, portanto, mais instável. Dentre os métodos utilizados na geotecnia para avaliação probabilística de fatores de segurança estão os métodos de Monte Carlo e o método das estimativas pontuais de Rosenblueth.

Figura 2.13 - Exemplo de distribuições de probabilidade.



FONTE: LOPEZ (2017).

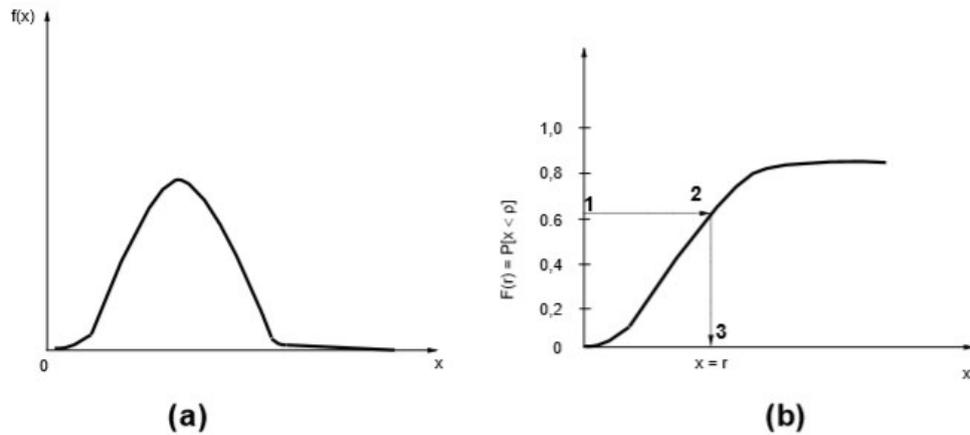
2.3.1. Método de Monte Carlo

Este método, gera uma sequência de números aleatórios de acordo com a distribuição de probabilidade das variáveis independentes. Segundo Silva (2015), o objetivo dessa técnica é a aproximação da função de probabilidade para uma ou diversas variáveis aleatórias.

Montoya & Assis (2011) corroboram que o método de Monte Carlo (MMC) é uma metodologia que permite determinar a distribuição de frequência da variável dependente a partir da geração de números aleatórios uniformes que representam as variáveis independentes relacionadas.

Ainda de acordo com Montoya & Assis (2011), o MMC considera que a variável dependente, representada por uma função $F = F(X_1, X_2, \dots, X_n)$, possui suas variáveis independentes X_1, X_2, \dots, X_n com as devidas distribuições de probabilidade conhecidas, além disso, este método atribui valores aleatórios de frequência para as variáveis X_1, X_2, \dots, X_n e avalia os valores de F para cada um deles. Este processo é repetido até que se consiga a convergência da distribuição de probabilidade (Figura 2.14).

Figura 2.14 - Convergência da variável independente.



FONTE: SILVA (2015).

Na maioria dos casos, a geração dos valores aleatórios segue a função de distribuição acumulada, $F(r) = P[x < r]$, por definição, essa função é distribuída uniformemente no intervalo $[0,1]$ desde que a variável seja contínua, assim, caso um valor qualquer seja gerado ele será um valor da função de probabilidade $f(x)$ dentro de $F(r)$ (MONTROYA & ASSIS, 2011, p.74).

Silva (2006) afirma que a análise de estabilidade a partir do MMC envolve uma grande quantidade de iterações e, teoricamente, quanto maior essa quantidade mais precisão terão os resultados obtidos. Harr (1987) relata que o número de iterações necessárias no MMC depende do nível de confiança desejado e do número de variáveis consideradas seguindo a Equação 2.33.

$$N_{mc} = \left[\frac{(d^2)}{(4(1 - \varepsilon)^2)} \right]^m \quad (2.33)$$

Na equação supracitada, N_{mc} é o número de iterações de Monte Carlo, ε o nível de confiança esperado, d o desvio padrão do nível de confiança e m o número de variáveis. Montoya & Assis (2011) afirmam que o MMC pode ser classificado como um método exato, pois, conhecendo as distribuições das variáveis independentes, é possível utilizar um gerador de valores aleatórios a partir das mesmas. Por fim, Silva (2006) completa que para fins práticos geralmente são realizadas milhares de iterações e que essa quantidade pode não ser eficaz em problemas de várias variáveis.

2.3.2. Método das Estimativas Pontuais

O método das estimativas pontuais, proposto por Rosenblueth (1975), é outro modelo probabilístico de estudo da estabilidade de taludes. Silva (2015) comenta que se trata de um método simplificado e que apenas compromete sua eficácia caso a dispersão dos dados das variáveis seja muito grande.

Resumidamente, o método estima os momentos da variável dependente (média, desvio padrão etc.) tomando como referência as variáveis aleatórias independentes desde que se conheçam pelo menos dois de seus momentos, média e desvio padrão, ou tenham-se suas estimativas. Dentre suas vantagens, o método não exige conhecimento das distribuições de probabilidade completas seja das variáveis independentes ou da variável dependente (SILVA, 2015, p.43).

Neste método, segundo Maia (2003), a distribuição de uma variável aleatória X_i é concentrada em dois pontos descritos pelas Equações 2.34 e 2.35.

$$X_{i+} = \bar{X}_i + \sigma_i \quad (2.34)$$

$$X_{i-} = \bar{X}_i - \sigma_i \quad (2.35)$$

Nessas equações, \bar{X}_i é a média da variável X_i e σ_i é o desvio padrão da distribuição da variável X_i . Rosenblueth (1975), afirma que existindo uma função $F = F(X_1, X_2)$ onde X_1 e X_2 sejam variáveis aleatórias de distribuição simétrica em relação a suas médias, as coordenadas das estimativas tendem a ser os quatro pontos $\bar{X}_1 \pm \sigma_1$ e $\bar{X}_2 \pm \sigma_2$. Além disso, é possível generalizar este caso para uma função F de n variáveis independentes, nesses casos, o número de pontos estimados segue a ordem de 2^n , onde n é o número de variáveis independentes.

No caso supracitado, de n variáveis independentes, o procedimento probabilístico de determinação da distribuição da variável dependente, segundo Maia (2003), inicia-se por meio de cálculos determinísticos levando em consideração a combinação dos pontos estimados como o descrito anteriormente, prosseguindo, então, à determinação de 2^n valores para a variável dependente. As combinações estão ilustradas na Figura 2.15.

Figura 2.15 - Combinações dos pontos estimados.

Número de Variáveis Aleatórias

		1	2	3	4	...	n
N ú m e r o d e T e r m o s	1	-	-	-	-		
	2^1	2	+	-	-		
		3	-	+	-	-	
	2^2	4	+	+	-	-	
		5	-	-	+	-	
		6	+	-	+	-	
		7	-	+	+	-	
	2^3	8	+	+	+	-	
		9	-	-	-	+	
		10	+	-	-	+	
		11	-	+	-	+	
		12	+	+	-	+	
		13	-	-	+	+	
		14	+	-	+	+	
		15	-	+	+	+	
	2^4	16	+	+	+	+	
	.						
	.						
	.						
	2^n						

FONTE: MAIA (2003).

A partir de uma determinada função para o cálculo do fator de segurança (FS) e dos valores estimados de cada variável considerada independente e aleatória, Miller et al. (2004) estipulam os passos a serem seguidos para a determinação da distribuição de probabilidade do FS com duas variáveis. Tal procedimento pode ser generalizado como o mostrado na Figura 2.15. As referidas etapas, simplificadaamente, são:

- 1) Calcular, deterministicamente os valores de FS para cada combinação de estimativas de acordo com as Equações 2.36 a 2.39.

$$FS_{++} = FS[\bar{X}_1 + \sigma_1; \bar{X}_2 + \sigma_2] \quad (2.36)$$

$$FS_{--} = FS[\bar{X}_1 - \sigma_1; \bar{X}_2 - \sigma_2] \quad (2.37)$$

$$FS_{+-} = FS[\bar{X}_1 + \sigma_1; \bar{X}_2 - \sigma_2] \quad (2.38)$$

$$FS_{-+} = FS[\bar{X}_1 - \sigma_1; \bar{X}_2 + \sigma_2] \quad (2.39)$$

- 2) Determinar o valor médio (\overline{FS}) do fator de segurança a partir dos determinados previamente, seguindo a Equação 2.40 para 2 variáveis independentes, que também, pode ser generalizada para n variáveis.

$$\overline{FS} = \frac{1}{2^2} (FS_{++} + FS_{+-} + FS_{-+} + FS_{--}) \quad (2.40)$$

- 3) Calcular a variância ($V[FS]$) utilizando a Equação 2.41, onde o termo $\overline{FS^2}$ é calculado a partir da substituição do termo FS por FS^2 na Equação 2.40.

$$V[FS] = \overline{FS^2} - (\overline{FS})^2 \quad (2.41)$$

- 4) O desvio padrão é determinado obtendo-se a raiz quadrada de $V[FS]$.

Com a generalização do procedimento, assumindo um FS dependente de n variáveis aleatórias não correlacionadas, sua média e variância podem ser calculadas de acordo com as fórmulas gerais das Equações 2.42 e 2.43 (AZEVEDO, 2015, p.37).

$$\overline{FS} = \frac{1}{2^n} \sum_{i=1}^{2^n} FS_i \quad (2.42)$$

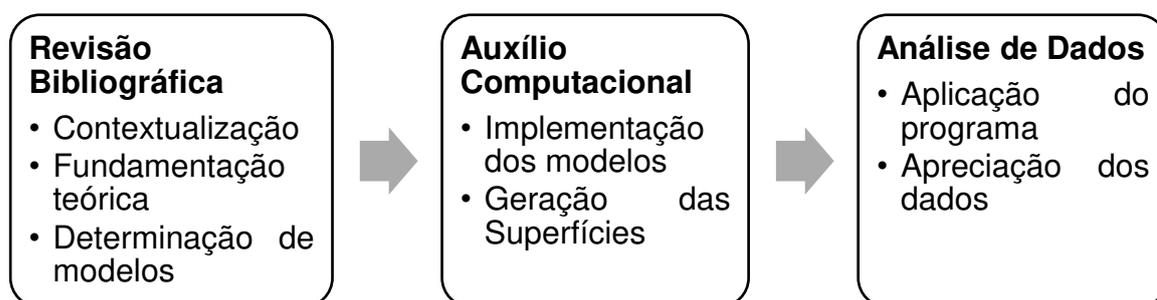
$$V[FS] = \frac{1}{2^n - 1} \sum_{i=1}^{2^n} [FS_i - \overline{FS}]^2 \quad (2.43)$$

Nas equações 2.42 e 2.43, os valores de FS_i são obtidos a partir da substituição alternada dos valores das variáveis pelas combinações obtidas de acordo com as Equações 2.34 e 2.35, seguindo o ilustrado na Figura 2.15.

3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada nesta pesquisa objetivou a criação de um algoritmo capaz de, a partir de modelos existentes e relevos conhecidos, gerar superfícies críticas de ruptura utilizando um modelo de análise tridimensional determinístico aliado a modelos probabilísticos. Resumidamente, a Figura 3.1 retrata as etapas seguidas na realização deste trabalho. Logo em seguida, cada etapa, assim como os processos a elas atrelados, são descritos.

Figura 3.1 - Etapas da Pesquisa.



Em um primeiro momento, a revisão bibliográfica possuiu, como foco, elucidar a teoria necessária para criar a fundamentação teórica necessária para o andamento da pesquisa. Esta passa pelas definições de movimentos de massa e abrange a classificação mais aceita até então, a de Cruden & Varnes (1996), deixando evidentes as diferenças existentes entre cada tipo de movimento de massa.

Seguindo na criação da fundamentação, o foco da revisão passa para os deslizamentos deflagrados por chuva. Nesse ponto, são reunidos os modelos mais conhecidos de análise de ruptura para que se crie um melhor entendimento aos modelos seguintes e escolha-se o modelo mais adequado à aplicação no algoritmo. Dentre os explicitados, o método de Qiu et al. (2006) foi o mais adequado.

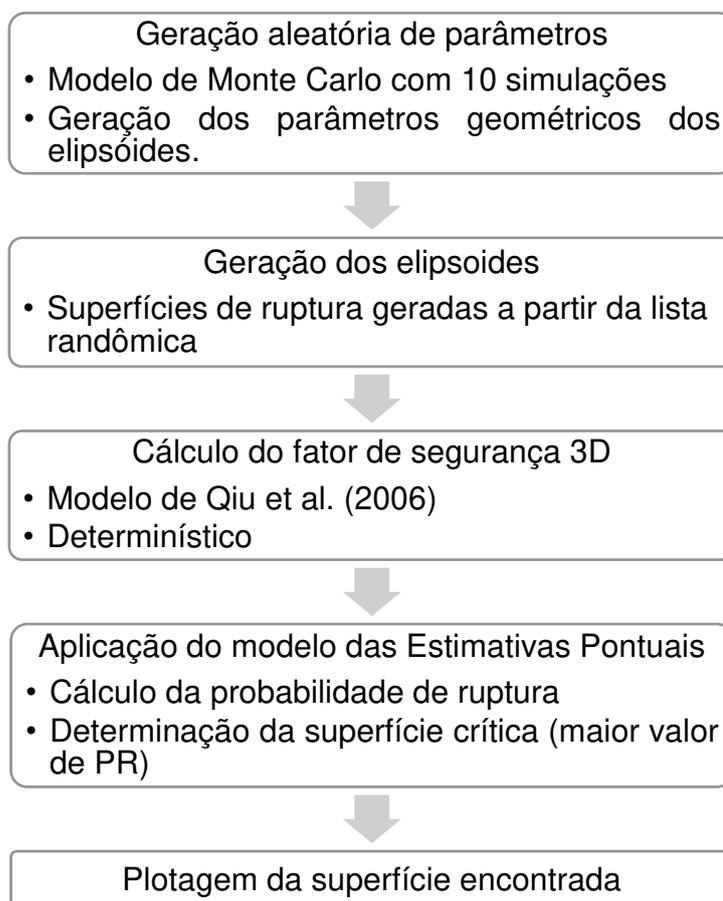
Por fim, a utilização dos modelos determinísticos ignora a existência das incertezas ligadas às variáveis necessárias para a análise. Assim, a revisão passa para dois modelos probabilísticos utilizados na análise de taludes, sendo importante ressaltar que a escolha dos modelos de Monte Carlo e das Estimativas Pontuais ocorreu a partir de sua fácil aplicação computacional.

3.1. Estrutura computacional

O algoritmo implementado utilizou um conjunto de métodos e modelos previamente escolhidos para gerar, a partir de informações disponibilizadas via SIG,

superfícies críticas de ruptura. O algoritmo segue as disposições do modelo de Hovland, adaptado por Qiu et al. (2006), conjuntamente com o método de Monte Carlo e das Estimativas Pontuais. A Figura 3.2 ilustra resumidamente o funcionamento do programa, evidenciando os modelos utilizados em cada passo.

Figura 3.2 - Funcionamento do algoritmo.



Composto por quatro funções, o algoritmo inicialmente, utilizando o método de Monte Carlo, gera aleatoriamente, dentro de um intervalo predefinido, os parâmetros (eixo maior, eixo menor, profundidade e inclinação) necessários para a definição dos elipsoides que servirão de possíveis superfícies de ruptura. Assim, cria-se um conjunto de elipsoides que serão aplicados futuramente no modelo de Qiu et al. (2006).

Após o passo supracitado, o programa busca, dentro da sua biblioteca, as informações importadas via SIG e aplica, a partir dos dados obtidos, o modelo de análise tridimensional de Qiu et al. (2006) para o cálculo do fator de segurança correspondente a cada centro escolhido dentro da área de estudo. Nesse processo, o

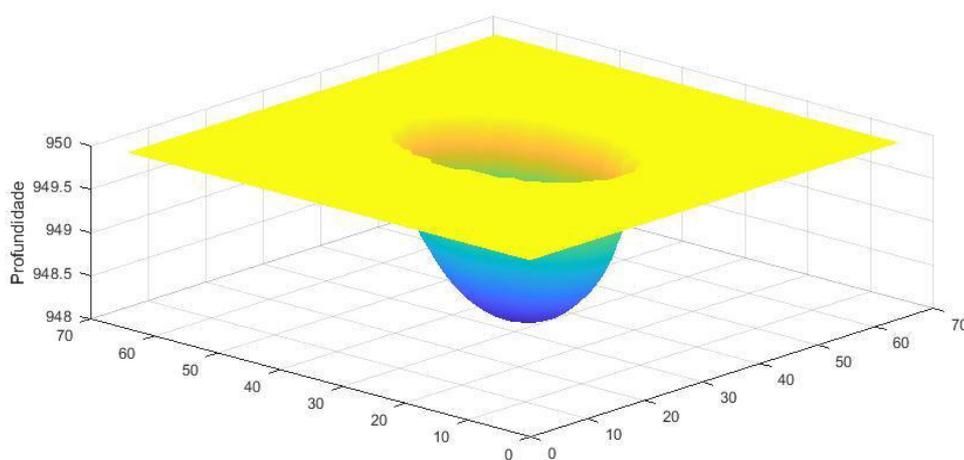
mesmo investiga as posições da frente úmida e do lençol freático para adequação dos cálculos às quatro configurações propostas pelo autor supracitado.

Em seguida, após a aplicação do modelo de Qiu et al (2006) em cada um dos elipsoides gerados, que entram como a superfície de ruptura na coluna proposta pelo modelo, o programa utiliza o processo exibido no método das estimativas pontuais, que fora escolhido por sua simplicidade computacional. Assim, ele calcula uma distribuição de probabilidade e, dentre os valores obtidos, encontra a maior probabilidade de ruptura, esta está associada a um elipsoide que será a superfície crítica de ruptura.

Destaca-se que o programa busca as probabilidades de ruptura dentro de um raio ao redor do centro escolhido para estudo, e, a partir desde, realiza a plotagem da superfície crítica de acordo com os parâmetros da encosta estudada (inclinação, profundidade etc.), lembrando que a orientação e inclinação da superfície são obtidas a partir da média dos mesmos parâmetros de cada célula dentro da área predefinida.

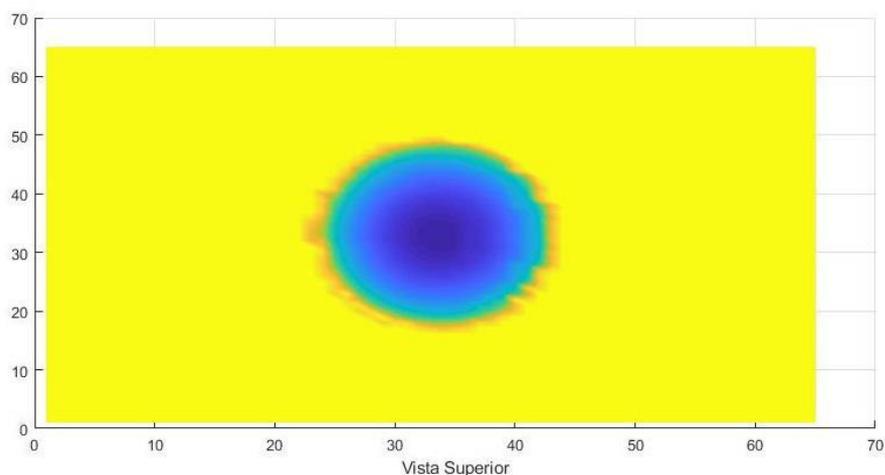
Em um primeiro momento, foi gerada uma superfície teste possuindo parâmetros controlados no intuito de simular um relevo completamente plano (inclinação = 0°) e verificar a eficácia do programa na determinação da superfície de ruptura. O relevo simulado possui solo com profundidade de 3 metros, frente úmida ainda na superfície (0 metros), e lençol freático a 2 metros a partir da superfície do solo. A inclinação do elipsoide crítico obtido, para verificação geométrica, foi fixada em 0°. As Figuras 3.3 e 3.4 exibem o resultado desta aplicação simulada.

Figura 3.3 - Superfície crítica de teste.



FONTE: Do autor.

Figura 3.4 - Vista superior da superfície teste.



FONTE: Do autor.

É perceptível, a partir da Figura 3.3, que o programa é capaz de gerar os elipsoides e determinar a superfície crítica. Observando a Figura 3.4, é reconhecível o formato elíptico resultante na superfície do relevo simulado e, além disso, também é verificada a profundidade, pela Figura 3.3, dentro do limite estabelecido de 2m. O programa mostra-se capaz de determinar as superfícies críticas em qualquer situação de relevo, desde que os dados de entrada necessários estejam disponíveis, assim, evidenciando sua eficácia a partir deste teste controlado.

3.2. Área de Aplicação

A região topográfica utilizada corresponde a uma área de relevo conhecido em torno de Brasília-DF, a qual foi escolhida por ser um local que apresenta uma grande quantidade de informações disponíveis em sistemas de informações geográficas criando, portanto, uma base de dados robusta para a utilização do algoritmo, principalmente por apresentar dados reais dos parâmetros utilizados nos cálculos dos fatores de segurança e probabilidades de ruptura.

4. APLICAÇÃO E DISCUSSÕES

Dentro da topografia real, foram escolhidos pontos de posicionamento espacial aleatórios, destes, obtiveram-se os parâmetros do solo e topográficos. A partir dos dados obtidos, avaliou-se a superfície crítica de ruptura gerada, os valores de cada parâmetro, a probabilidade de ruptura a ela associada, a posição do lençol freático e a classificação dentro das configurações do modelo de Qiu et al (2006), já a frente úmida foi fixada a 0,5 metros para simplificação dos processos.

Para o desenvolvimento do modelo probabilístico incluso no algoritmo, levando em consideração a grande variabilidade encontrada em parâmetros de solos em geral, faz-se necessária a utilização de coeficientes de variação. Quando há a ausência de estudos que determinem seu valor para os dados reais, pode-se assumir valores clássicos para tais coeficientes (USACE, 1999). Assim, o presente estudo, utiliza os valores sugeridos por Assis et al. (2012), listados na Tabela 4.1, para aplicação do método das estimativas pontuais. Finalmente, para os valores médios, o algoritmo utiliza as informações disponíveis na malha do sistema de informações geográficas e assume que os parâmetros apresentam uma distribuição normal de probabilidade, uma vez que não se dispõe de informações reais que permitam determinar as verdadeiras distribuições estatísticas das variáveis independentes.

Tabela 4.1 - Coeficientes de variação.

Parâmetro	Coeficiente de variação
Coesão efetiva (kPa)	40%
Ângulo de atrito efetivo (°)	10%
Peso específico (kN/m³)	5%

FONTE: ASSIS et al. (2012)

4.1. Superfícies e parâmetros obtidos

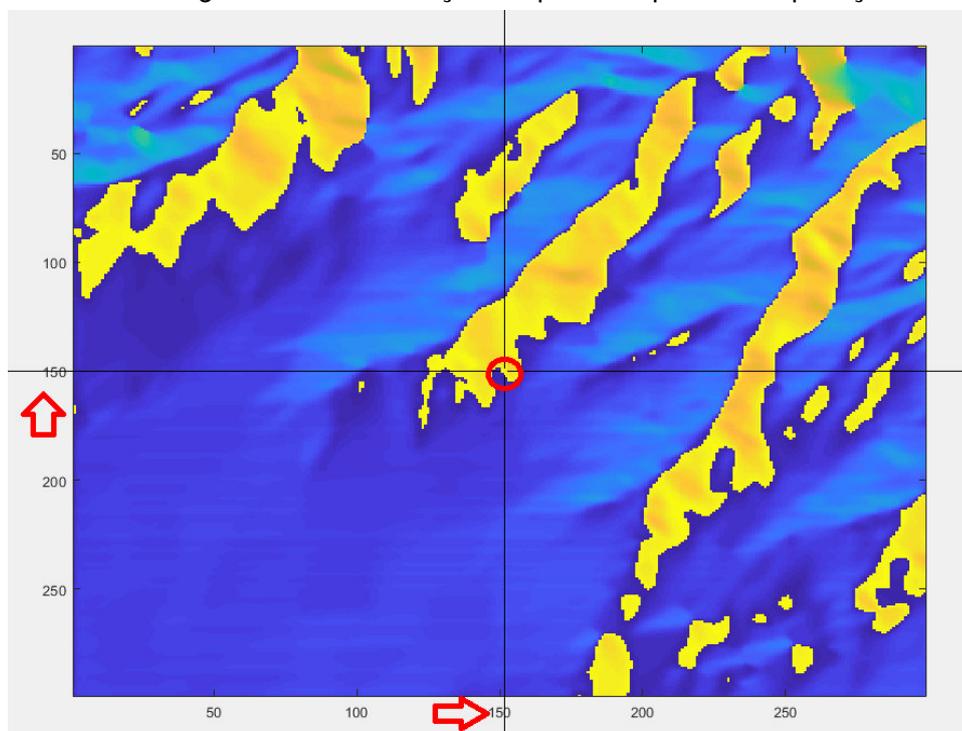
4.1.1. Superfície A

Obtida escolhendo-se o centro da matriz, a primeira superfície (Superfície A) tem sua localização representada na Figura 4.1. Os valores destacados (150 e 150) correspondem às coordenadas dentro das matrizes de informações do solo, bem como as coordenadas utilizadas como centro para os cálculos efetuados.

A posição centralizada não corresponde a nenhuma particularidade do relevo e sim apenas a uma escolha espacial aleatória dentro da área escolhida de estudo. Os elipsoides gerados inicialmente, dentro dos limites estipulados, encontram-se na

Tabela 4.2, a iteração de número 1 corresponde aos limites superiores escolhidos para o eixo maior, menor e profundidade.

Figura 4.1 - Localização do primeiro ponto de aplicação.



FONTE: Do autor.

Tabela 4.2 - Elipsoides testados para a Superfície A.

Iteração	Inclinação (rad)	Eixo maior	Eixo menor	Profundidade (m)
1	0,1142	80	50	2
2	0,1142	51	38	0,4856
3	0,1142	63	35	0,7185
4	1,0297	63	40	1,8986
5	0,5411	58	23	0,6551
6	0,9599	56	42	1,3425
7	0,9948	75	39	0,8773
8	0,6109	63	22	1,6670
9	0,0175	77	14	1,5377
10	0,4538	62	41	0,3345

FONTE: Do autor.

Como citado anteriormente, o centro dos elipsoides encontra-se nas coordenadas $x=150$ e $y=150$. A partir desta informação, foi possível encontrar os parâmetros do solo e da topografia dentro da célula correspondente. Vale ressaltar que para essa região a malha apresenta pixels com largura de 5 metros. Na Tabela

4.3, estão listados os valores obtidos destes parâmetros dentro do pixel de centro supracitado.

Tabela 4.3 - Parâmetros relacionados à superfície A.

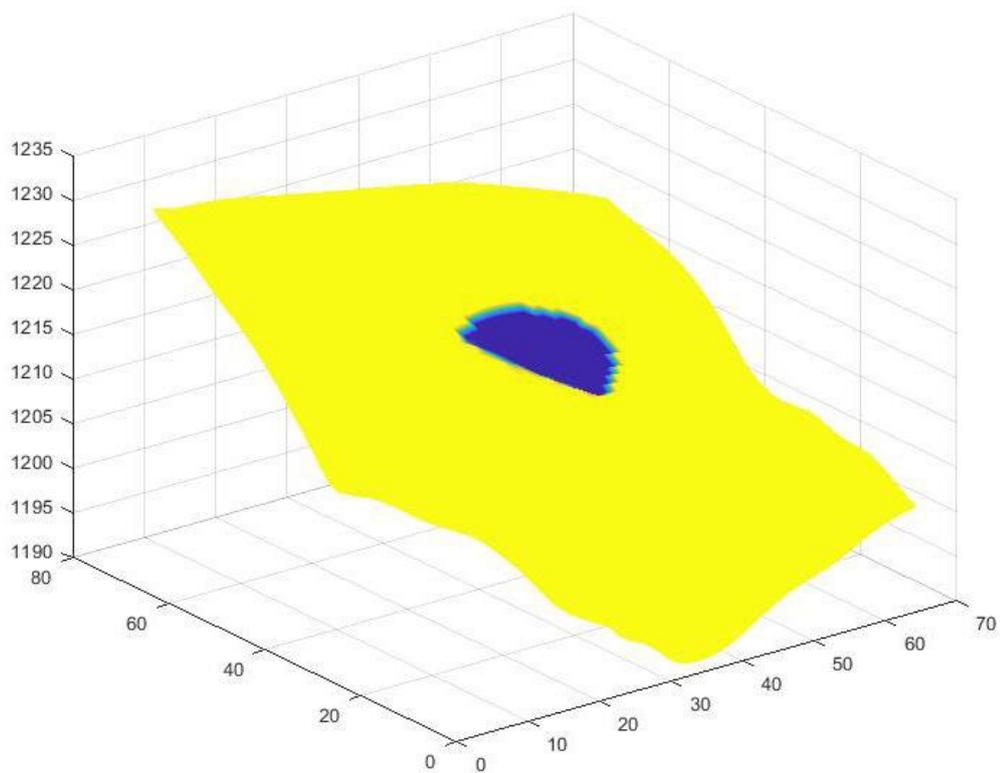
Parâmetro	Valor	Unidade
Coesão inicial ($c'_{inicial}$)	5	kPa
Coesão saturada (c'_{sat})	4,5	kPa
Ângulo de atrito (ϕ')	25	graus
Peso específico (γ_{nat})	15	kN/m ³
Peso específico saturado (γ_{sat})	19	kN/m ³
Frente úmida (H_w)	0,5	m
Lençol Freático (z_w)	0,616	m
Espessura da camada (z)	0,7	m
Declividade (β)	7,78	graus
Probabilidade de ruptura (PR)	0,0055	%

FONTE: Do autor.

Destaca-se que, na Tabela 4.3, a probabilidade de ruptura exibida (PR=0,0055%) corresponde à máxima PR dentre os dez elipsoides gerados. Em particular, esta PR corresponde ao elipsoide de número 2 (Tabela 4.2), e, portanto, este é considerado como a superfície crítica de ruptura. Após adequações referentes à profundidade do talude, a superfície crítica de ruptura encontrada é representada nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4, que buscam exibir diferentes ângulos de visão de sua posição no relevo.

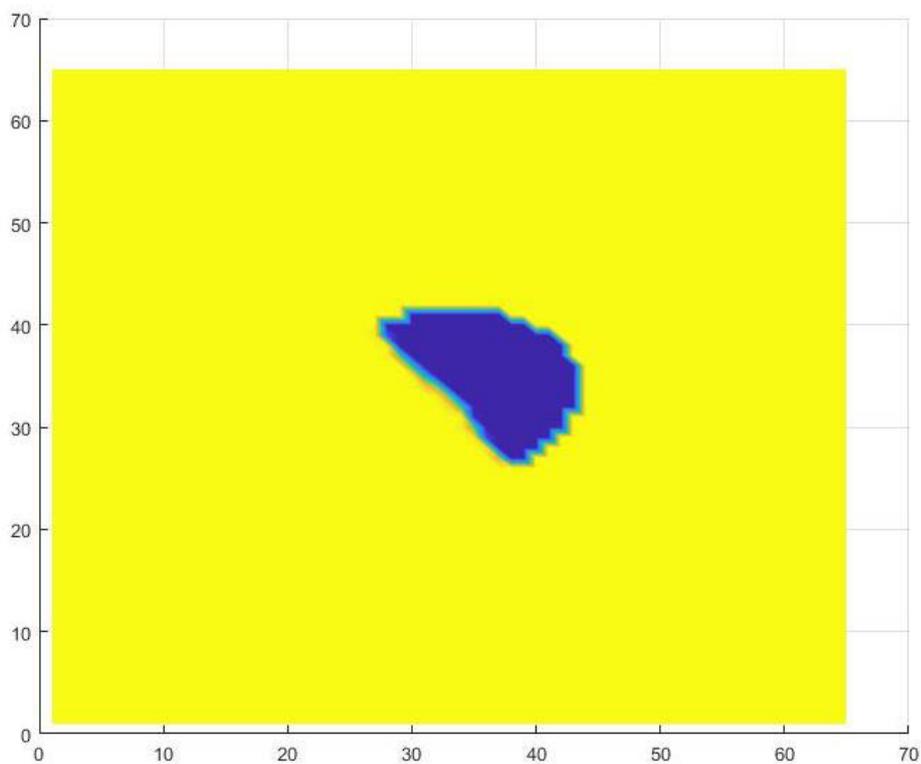
É importante notar que, no caso da superfície simulada (elipsoide) possuir uma profundidade maior que a da camada de solo, o programa a traz para a interface entre o solo e a camada inferior mais resistente, adequando a superfície de ruptura ao perfil encontrado no relevo natural. No caso da Superfície A, não foi necessária a adequação pois, de acordo com a Tabela 4.2, sua profundidade máxima é de aproximadamente 0,48 metros, menor que a espessura do solo que é de $z=0,7$ metros (Tabela 4.3).

Figura 4.2 – Superfície de ruptura A.



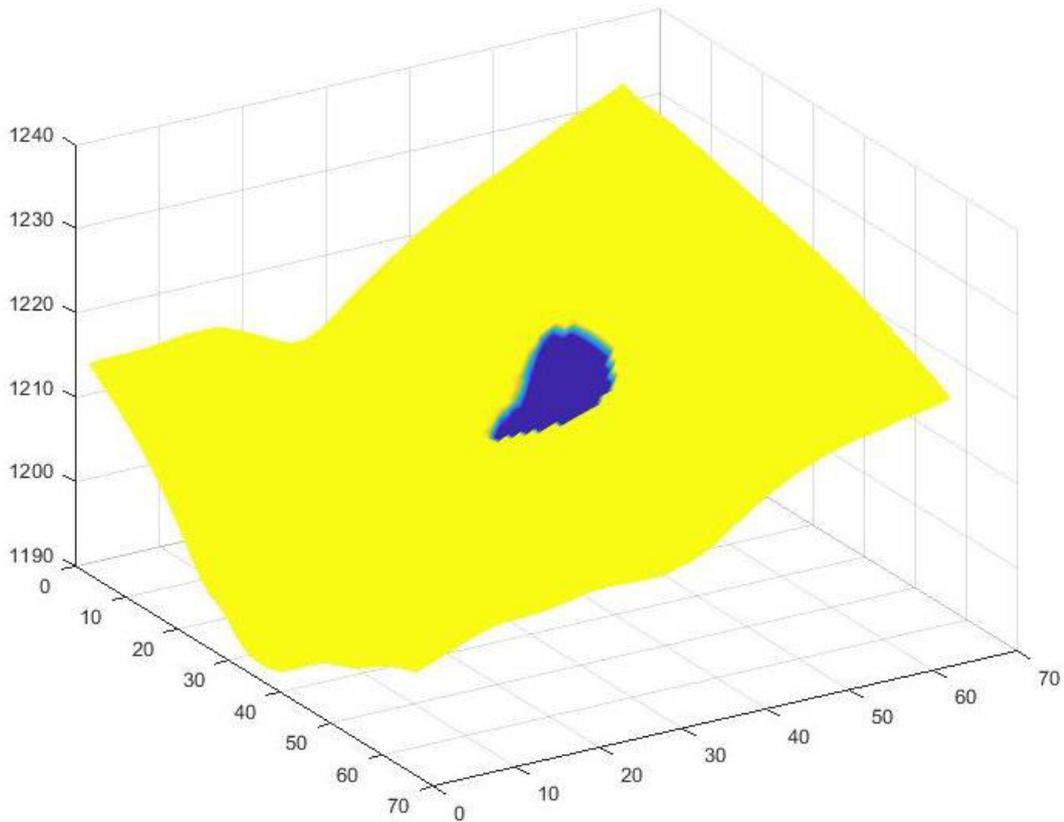
FONTE: Do autor.

Figura 4.3 - Vista superior da Superfície A.



FONTE: Do autor.

Figura 4.4 - Segunda vista da Superfície A.

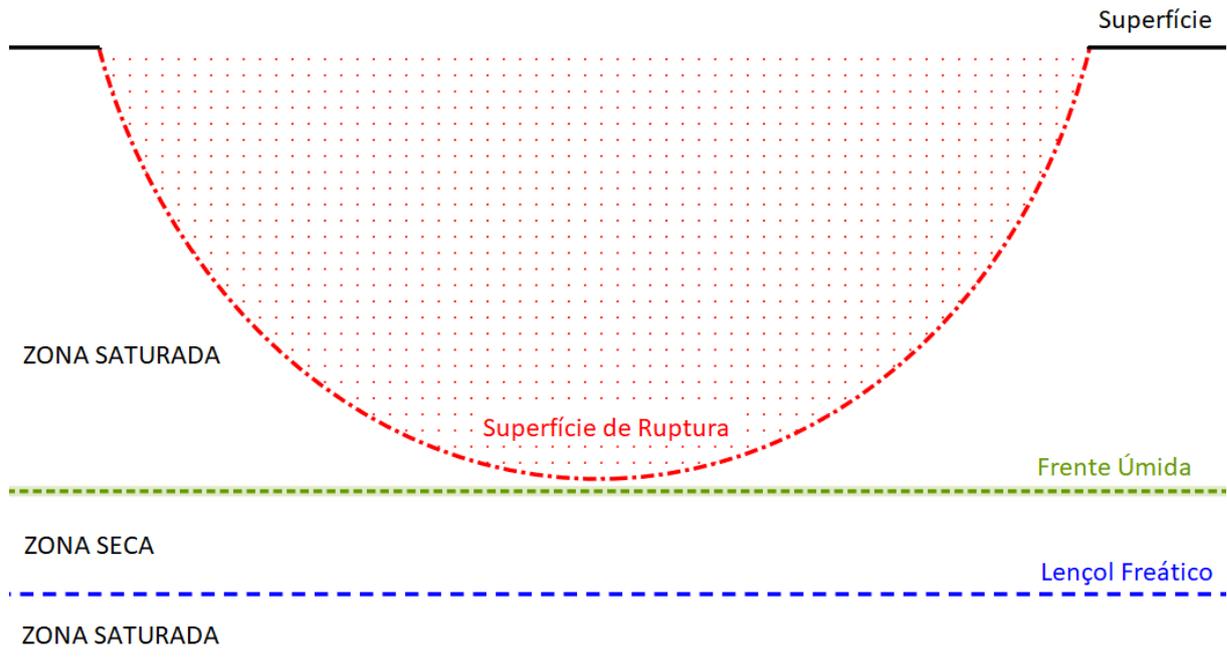


FONTE: Do autor.

As Figuras 4.2 e 4.4 exibem a configuração do relevo no local de ruptura e em uma vizinhança ao redor. Ao observá-las, é possível verificar que a região de ruptura apresenta uma determinada uniformidade de declividade, isso de certa forma, explica a pequena probabilidade de ruptura resultante. Ainda nas figuras, a região azul-escuro corresponde ao ponto de maior profundidade da superfície de ruptura.

Retornando para a Tabela 4.3, a espessura do solo no pixel central da região de ruptura é de $z=0,7$ m, além disso, a profundidade da superfície crítica de ruptura, segundo a Tabela 4.2, é de $0,4856$ m. Com tais informações, a profundidade da frente úmida ($0,5$ m) e do lençol freático ($0,616$ m) é possível determinar, através de uma pequena ilustração (Figura 4.5), uma simplificação exagerada da configuração do subsolo e, por consequência, definir qual a configuração de acordo com o modelo de Qiu et al. (2006).

Figura 4.5 - Simplificação da ruptura.



FONTE: Do autor.

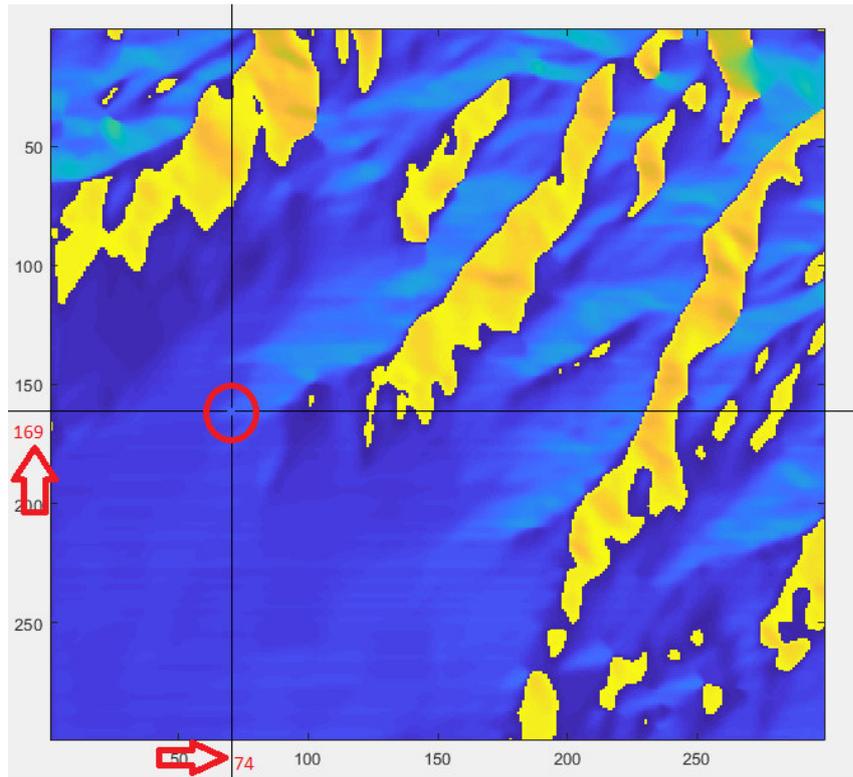
A partir da Figura 4.5, confirma-se que a ruptura acontece de acordo com a configuração 2, que corresponde ao caso em que a superfície de ruptura se forma dentro da área saturada formada pela frente úmida, ou seja, não atinge nem a interface seca intermediária nem a zona saturada do lençol freático.

4.1.2. Superfície B

A Superfície B encontra-se localizada um pouco a esquerda e abaixo em relação a posição da Superfície A, seu centro possui as coordenadas, x e y, na matriz de relevo 74 e 169 respectivamente. Sua posição no relevo e as coordenadas de seu centro estão destacadas na Figura 4.6.

Assim como a superfície anterior, B teve sua posição escolhida aleatoriamente apenas levando em consideração um determinado afastamento da posição de A. Coincidentemente, a região em que se encontra a superfície B apresenta semelhanças em alguns parâmetros, o que sugere certa uniformidade do perfil de solo na área estudada. Os elipsoides testados no caso da Superfície B encontram-se listados na Tabela 4.4.

Figura 4.6 - Localização da Superfície B.



FONTE: Do autor.

Tabela 4.4 - Elipsoides testados para a Superfície B.

Iteração	Inclinação (rad)	Eixo maior	Eixo menor	Profundidade (m)
1	0,6450	80	50	2
2	0,6450	65	26	1,6027
3	0,6450	56	27	1,8017
4	0,8029	69	47	0,4188
5	1,1868	70	31	1,1046
6	1,0297	72	5	1,2598
7	0,8203	77	10	0,0640
8	0,3316	80	44	1,2294
9	0,9250	73	27	0,7248
10	0,1047	68	43	0,0991

FONTE: Do autor.

Assim como nas demais, a primeira iteração corresponde à estimativa inicial da inclinação e aos limites utilizados para eixo maior, eixo menor e profundidade dos elipsoides. Em particular, para a Superfície B, a iteração que apresentou maior probabilidade de ruptura e, conseqüentemente, foi considerada como superfície crítica de ruptura foi a iteração de número 5, com inclinação aproximada de 68° e profundidade máxima de 1,1046m.

Os parâmetros do solo referentes ao pixel correspondente ao centro da Superfície B encontram-se listados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Parâmetros da Superfície B.

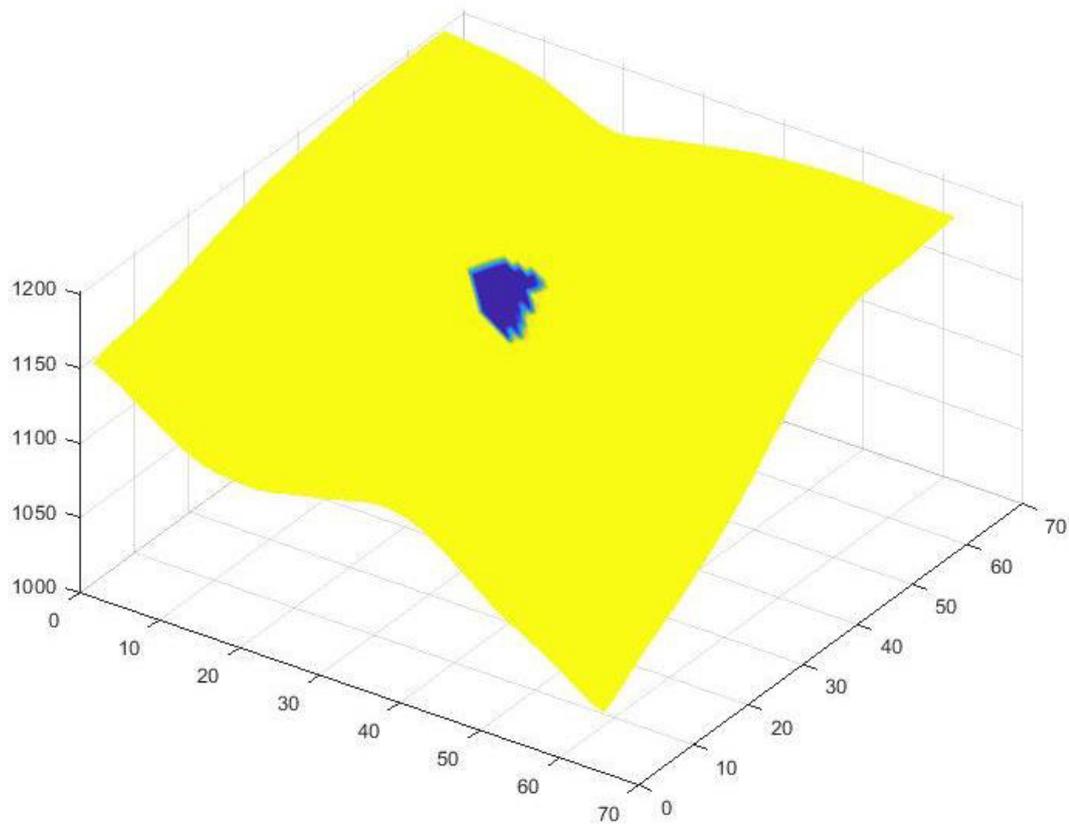
Parâmetro	Valor	Unidade
Coesão inicial ($c'_{inicial}$)	5	kPa
Coesão saturada (c'_{sat})	4,5	kPa
Ângulo de atrito (ϕ')	25	graus
Peso específico (γ_{nat})	15	kN/m ³
Peso específico saturado (γ_{sat})	19	kN/m ³
Frente úmida (H_w)	0,5	m
Lençol Freático (z_w)	0,6167	m
Espessura da camada (z)	0,7	m
Declividade (β)	18,67	graus
Probabilidade de ruptura (PR)	1,79	%

FONTE: Do autor.

Observando a Tabela 4.5, é possível notar que, pelo menos no pixel central, a superfície de ruptura ultrapassa a espessura da camada de solo, portanto, como citado anteriormente, o algoritmo reconhece tal ultrapassagem e realiza a correção, trazendo a superfície de ruptura para a base da camada de solo, uma vez que se assume que abaixo da camada de solo ($z=0,7m$) exista uma camada mais resistente que não sofrerá a ruptura.

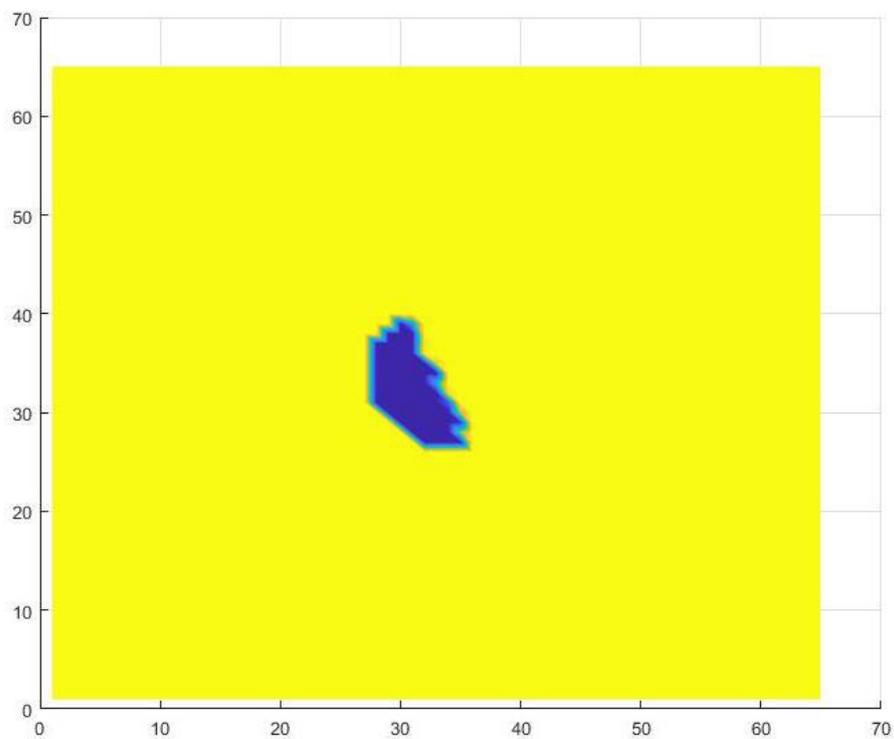
A Superfície B está associada a uma PR de 1,79%, sendo esta a máxima probabilidade de ruptura dentre as 10 testadas pelo algoritmo. As Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 exibem a forma da superfície, bem como suas vistas e perspectivas quando olhada diretamente no relevo. A partir de sua observação, é possível encontrar um relevo mais acidentado e uma declividade mais acentuada que aquela encontrada na Superfície A, estes aspectos, associados às condições do solo justificam sua PR mais elevada.

Figura 4.7 – Superfície de ruptura B.



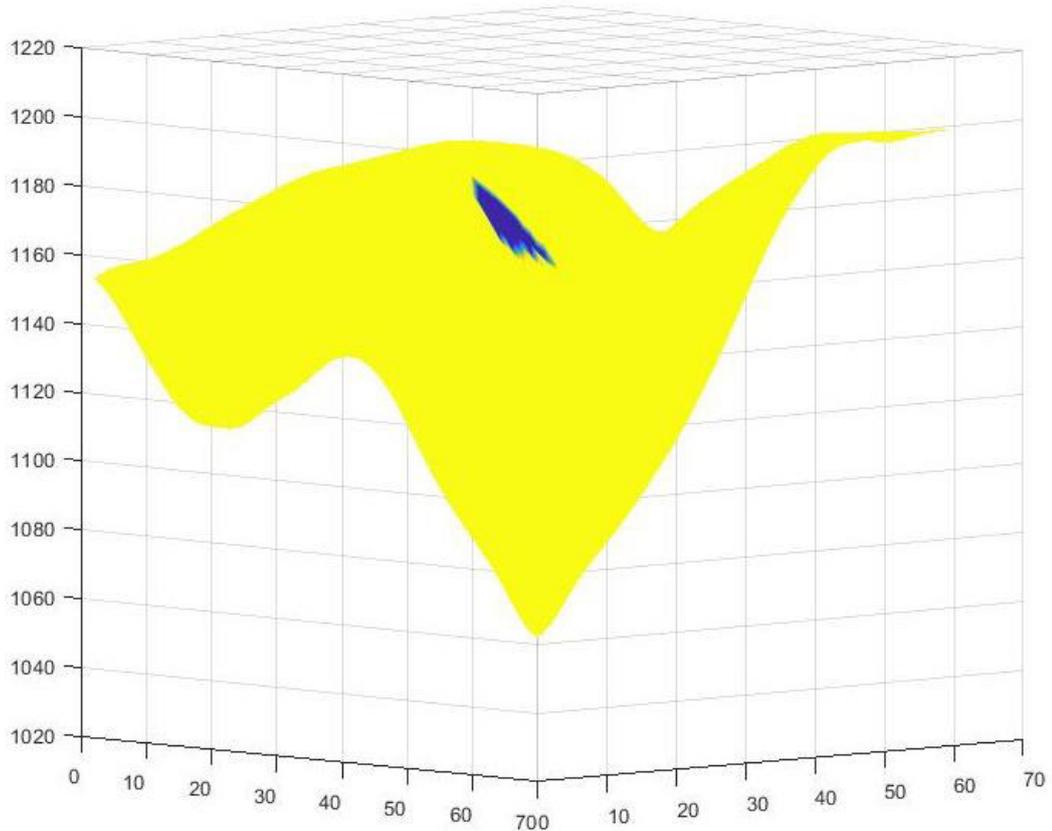
FONTE: Do autor.

Figura 4.8 - Vista superior da Superfície B.



FONTE: Do autor.

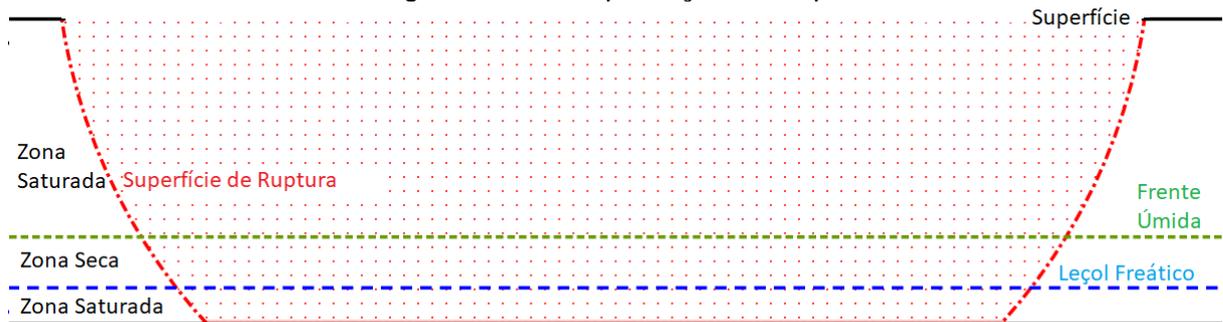
Figura 4.9 - Destaque do relevo da Superfície B.



FONTE: Do autor.

Em particular, a Figura 4.9 destaca a geometria do relevo escolhido e o posicionamento da superfície crítica de ruptura obtida, além disso, deixa perceptível o seu posicionamento em uma região de relevo acidentado. Por fim, lembrando o que foi citado acima, a Superfície B atinge a base do solo, e, portanto, se encaixa na configuração 4 de Qiu et al. (2006), ou seja, a superfície ultrapassa a frente úmida, atinge a região intermediária seca e avança até o fim do lençol freático. A Figura 4.10 ilustra, de forma bastante simplificada, a configuração do perfil de solo no pixel central da Superfície B.

Figura 4.10 - Simplificação da Superfície B.

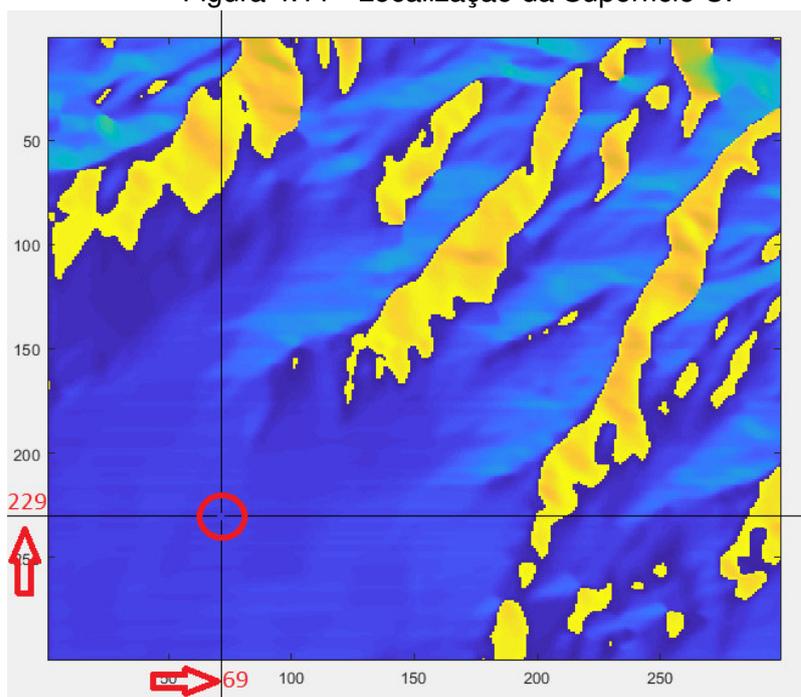


FONTE: Do autor.

4.1.3. Superfície C

A última superfície crítica de ruptura, também escolhida randomicamente, encontra-se abaixo da superfície B e possui seus centros nas coordenadas x e y da matriz 69 e 229 respectivamente. Dentre as superfícies, a Superfície C é a que apresenta a geometria mais diferenciada. Sua localização e centro estão representados na Figura 4.11 abaixo.

Figura 4.11 - Localização da Superfície C.



FONTE: Do autor.

Na Tabela 4.6 é possível encontrar os elipsoides testados para a geração da superfície crítica.

Tabela 4.6 - Elipsoides testados para a Superfície C.

Iteração	Inclinação (rad)	Eixo maior	Eixo menor	Profundidade (m)
1	0,7140	80	50	2
2	0,7140	52	18	0,9121
3	0,7140	53	49	0,6642
4	0,4189	52	20	1,0522
5	0,0873	52	18	1,4594
6	0,4189	74	39	1,4145
7	0,0524	78	5	1,5628
8	0,6981	66	7	0,5760
9	1,0647	53	35	1,3851
10	0,8901	75	32	1,1133

FONTE: Do autor.

A superfície testada correspondente à PR máxima foi o elipsoide da iteração 8, apresentando uma inclinação aproximada de 40° e profundidade máxima próxima de 0,58 metros. Seguindo as informações da Tabela 4.7, é possível perceber que a superfície de ruptura máxima possui profundidade máxima, no pixel central, maior que a profundidade fixada da frente úmida (0,5 m).

Tabela 4.7 - Parâmetros da Superfície C.

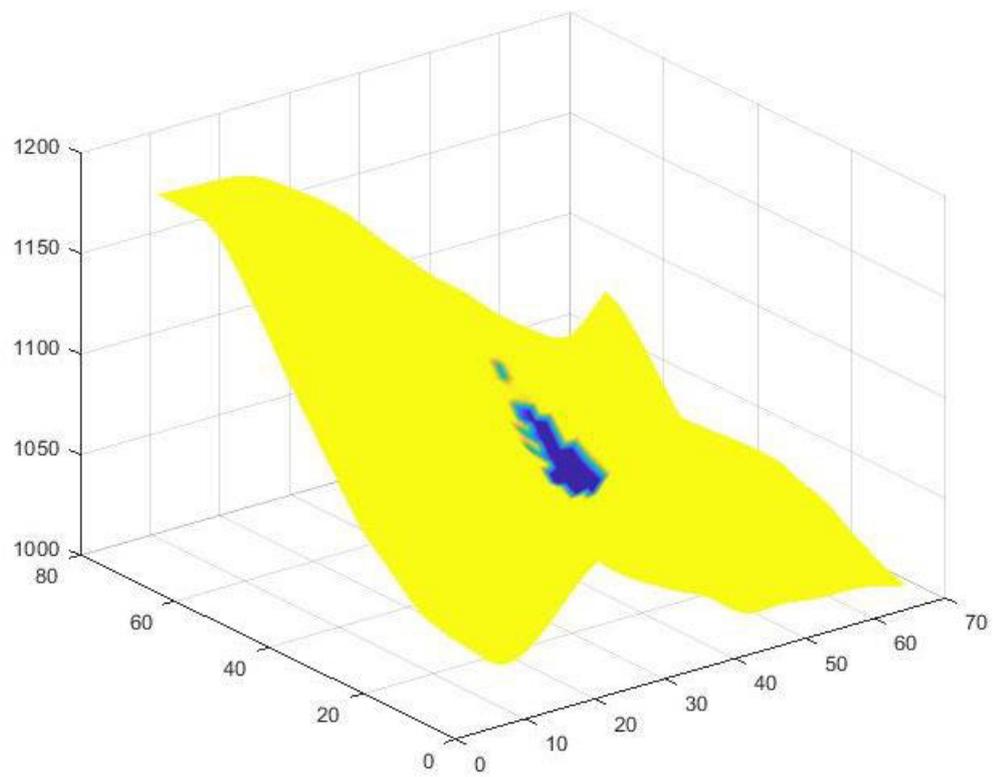
Parâmetro	Valor	Unidade
Coesão inicial ($c'_{inicial}$)	5	kPa
Coesão saturada (c'_{sat})	4,5	kPa
Ângulo de atrito (ϕ')	25	graus
Peso específico (γ_{nat})	15	kN/m ³
Peso específico saturado (γ_{sat})	19	kN/m ³
Frente úmida (H_w)	0,5	m
Lençol Freático (z_w)	0,6167	m
Espessura da camada (z)	0,7	m
Declividade (β)	40,71	graus
Probabilidade de ruptura (PR)	8,09	%

FONTE: Do autor.

Seguindo com a Tabela 4.7, a probabilidade máxima de ruptura encontrada foi de 8,09%, a mais alta dentre as três, parte disso deve-se à declividade acentuada (40,7°) da encosta em que se encontra, uma vez que os parâmetros do solo correspondem, em partes, aos das superfícies anteriores, ressaltando a uniformidade do perfil de solo da região trabalhada.

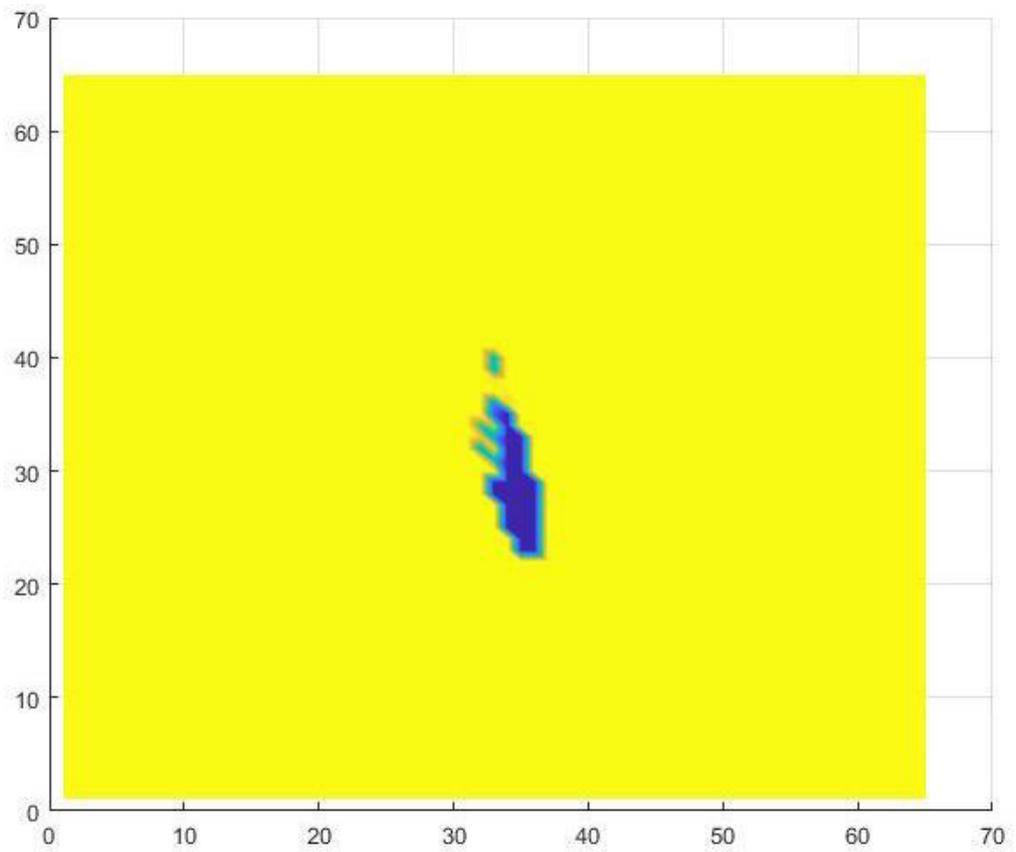
Dentre as três superfícies apresentadas, a Superfície C é a que apresenta a geometria mais irregular, como mostram as Figuras 4.12, 4.13 e 4.14. Observando-as, é possível encontrar uma região em que a superfície de ruptura é mais profunda (azul-escuro) e outra região menor e mais superficial apresentando coloração verde, a última, é melhor visualizada na vista superior (Figura 4.13). Além disso, ainda observando as imagens, a Superfície C está visivelmente em uma região de relevo mais íngreme e mais movimentado que as demais e encontra-se entre duas regiões mais elevadas.

Figura 4.12 - Superfície C.



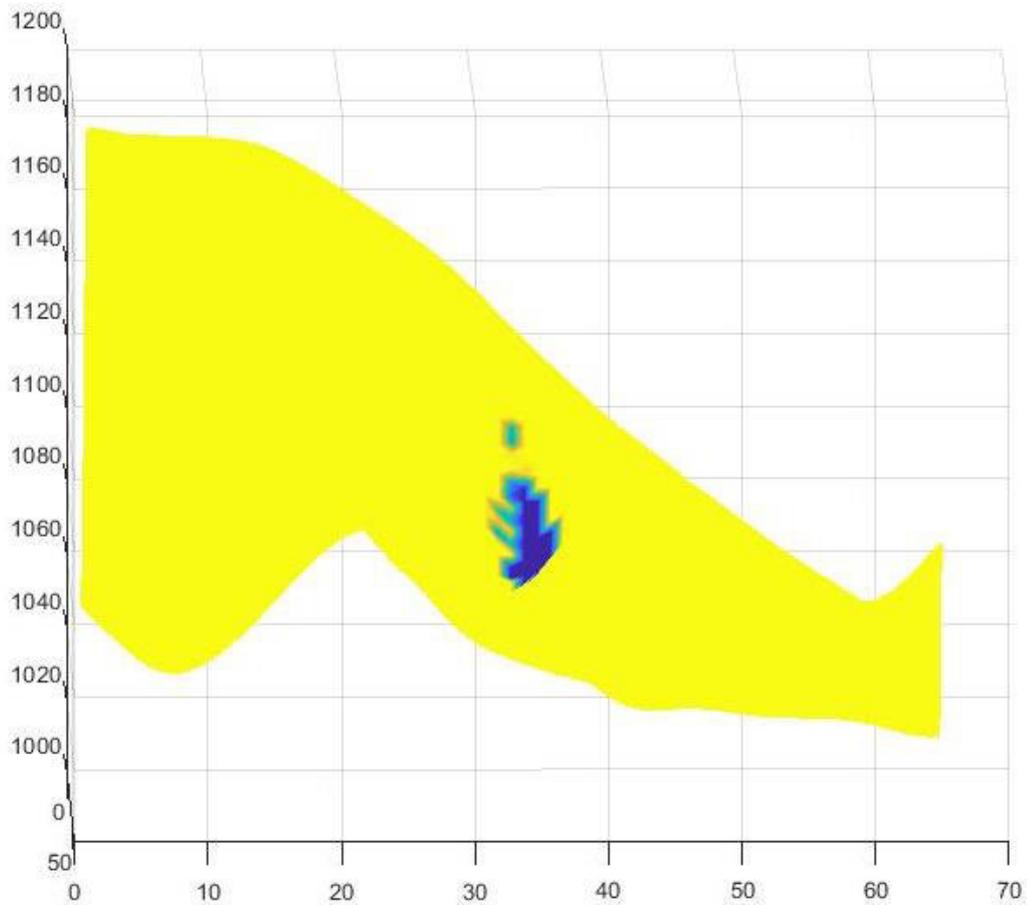
FONTE: Do autor.

Figura 4.13 - Vista superior da Superfície C.



FONTE: Do autor.

Figura 4.14 - Destaque do relevo da Superfície C.

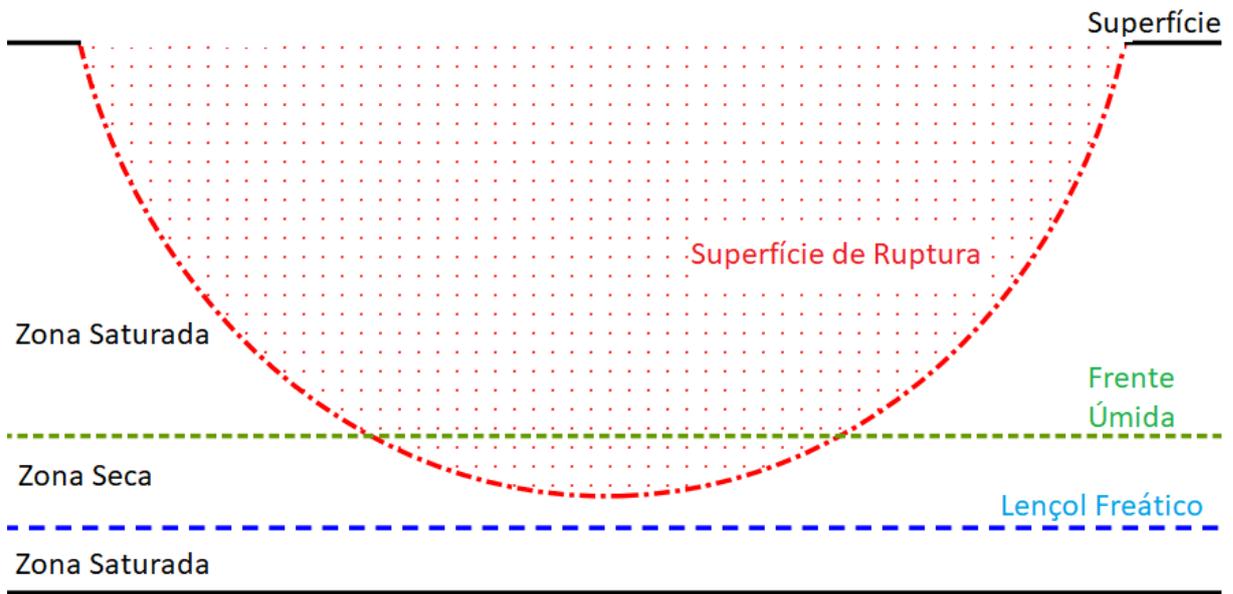


FONTE: Do autor.

A Figura 4.14 realça a posição da superfície entre duas áreas elevadas, e a vista superior (Figura 4.13) destaca o formato alongado e irregular da superfície crítica, apresentando, como afirmado anteriormente, áreas afastadas da zona de maior mobilização.

Por fim, por apresentar, em seu píxel central, uma profundidade de solo de 0,7 metros (Tabela 4.7) e a superfície possuir como profundidade máxima a superfície de ruptura atinge a zona saturada criada pela frente úmida, avança pela zona seca intermediária, porém, não chega a região saturada do lençol freático. Esse comportamento da superfície é característica da configuração 1 de Qiu et al. (2006), abaixo, encontra-se a Figura 4.15 representando a simplificação da Superfície C, importante ressaltar que tais simplificações apenas ilustram as posições das superfícies em seu ponto de profundidade máxima.

Figura 4.15 - Simplificação da superfície C.



FONTE: Do autor.

Ao comparar-se as três superfícies geradas é perceptível a homogeneidade do solo da região estudada, com parâmetros repetentes em áreas diferentes do relevo, ainda assim, apesar da homogeneidade, as superfícies apresentam diferenças de geometria e de probabilidade de ruptura devido a declividade do terreno e também, ao processo de randomização na criação dos elipsoides que estimula sempre a busca pelas superfícies que proporcionam as situações mais críticas.

5. CONCLUSÃO

Inicialmente, é importante destacar que, dentro da análise tridimensional de taludes, a integração de modelos determinísticos e probabilísticos mostrou-se eficiente. Em um primeiro momento, a forma de trabalho do modelo de Monte Carlo, junto à geração dos elipsoides, possibilitou a criação de um conjunto inicial de possíveis superfícies críticas, seu tratamento aleatório possibilitou a maior eficácia da maximização do fator de segurança e, conseqüentemente, facilitou a determinação das superfícies críticas de ruptura.

A organização dos dados de entrada via Sistema de informações Geográficas (SIG) foram peças chave no desenvolvimento do trabalho. Sem a presença destes, a utilização do algoritmo seria inviável devido à variabilidade espacial das informações requeridas inicialmente. Os dados em SIG possibilitaram uma maior celeridade ao processo e a oportunidade de trabalho com esses dados realça a importância da criação de bancos de dados com informações do solo e de relevo, principalmente em locais que estejam sujeitos aos deslizamentos.

A utilização do modelo de Qiu et al. (2006), em paralelo com o modelo das estimativas pontuais, possibilitou a geração de probabilidades de rupturas diversas que foram utilizadas na maximização, deixando este processo menos demorado e mais direto, uma vez que, já conhecida a superfície de ruptura estimada, cria-se no modelo tridimensional celeridade na determinação do fator de segurança. O modelo de análise tridimensional foi a ferramenta principal na obtenção dos resultados, visto que sua robustez possibilitou a verificação de cada uma das configurações de ruptura.

A partir da análise das superfícies obtidas, nota-se que seu posicionamento evidenciou a característica homogênea do solo estudado e destacou a importância da declividade do relevo na análise de estabilidade. Por mais próximos que os parâmetros de resistência e as condições de saturação (frente úmida e freático) se encontrem, as probabilidades de ruptura se apresentam discrepantes, em função majoritariamente da configuração do relevo (declividade).

Destaca-se que, por fim, o objetivo deste trabalho foi alcançado, a partir da junção dos modelos supracitados, permitindo encontrar as superfícies críticas de ruptura e, além disso, os resultados obtidos comprovam a capacidade que a análise

tridimensional de taludes possui em gerar resultados sólidos, condizentes e mais reais quando comparados com o que se espera a partir das determinações teóricas.

Para trabalhos futuros, deixa-se como sugestão, a simulação da variação do nível freático e frente úmida para se verificar a sensibilidade do modelo diante das mudanças ocasionadas pela flutuação da condição de saturação do solo. Propõe-se, também, a utilização de um modelo de infiltração previamente ao modelo de análise tridimensional para a geração da configuração mais próxima da realidade, considerando, inclusive, parâmetros de precipitação.

REFERÊNCIAS

ASSIS, A.P., ESPÓSITO, T.J., GARDONI, M.G., SILVA, P.D.E.A. & MAIA, J.A. (2012). Métodos estatísticos e probabilísticos em geotecnia. Apostila Publicação G. AP-002/2012, UnB, Brasília, Distrito Federal, 278 p.

AZEVEDO, G.F. (2015). **Sistema de Análise Quantitativa de Risco por Escorregamentos Rasos Deflagrados por Chuvas em Regiões Tropicais**. Tese de Doutorado, Publicação G.TD - 107/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 254 p.

AZEVEDO, G.F.; CARVAJAL, H.E.M.; SOUZA, N.M., Análise de ameaça de deslizamentos pelo uso de abordagem probabilística aplicada a um modelo de estabilidade de taludes tridimensional. **Geociências**, v.37, n.3, p.655-668, UNESP: São Paulo, 2018.

BRASIL. IBGE, **População em áreas de risco no Brasil**, 2018, Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/apps/populacaoareasderisco/>>. Acesso em 21 nov. 2018.

CRUDEN, D.M.; VARNES, D.J. Chapter3: Landslide Types and Processes. In: SCHUSTER,R.L.; TURNER, A.K., **Special Report 247: Lanslides: Investigation and Mitigation.**, Transportantion and Road Research Board, Nacional Academy of Science, Washington D.C.: Estados Unidos, 1996, cap.3, p.36-75. Disponível em: <<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247-003.pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2018.

DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D.R., SHALSTAB; a digital terrain model for mapping shallow landslide potential. NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement), **Technical Report**, 29p.,1998.

FELL, R.; WHIT, G.; MINER,A.; FLENTJE, P.N., Guidelines for landslide susceptibility, hazar and risk zoing for land use planning. **Australian Geomechanics Journal**, v.42, n.1, p.13-36, Austrália, 2007.

FREDLUND, D.G.; XING, A.; FREDLUND, M.D.; BARBOUR, S.L. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v.33, n.3, p.440–448, 1996.

GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO, O. A., Junior; GOMES, R. A. T.; FERNANDES, N.F., Movimentos de massa. In: FLORENZANO, T.G., **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. cap. 6, p. 159-184.

HARR, M.E. (1987). *Reliability-Based Design in Civil Engineering*. McGraw-Hill Book Company, New York , EUA, 290 p.

HIGHLAND, L.M.; BOBROWSKY, P., **The landslide handbook: A guide to understanding landslides (Circular 1325)**. U.S. Geological Survey (USGS). Reston, Virginia, 2008. Disponível em: < <https://pubs.usgs.gov/circ/1325/>>. Acesso em: 26 nov. 2018.

HOVLAND, H.J. Three-dimensional slope stability analysis method. **Journal of the Geotechnical Engineering**, v.103, n.9, p.971-986, 1977.

LIAO, Z., HONG, Y., WANG, J., FUKUOKA, H., SASSA, K., KARNAWATI, D. & FATHANI, F. (2010). Prototyping an experimental early warning system for rainfall-induced landslides in Indonesia using satellite remote sensing and geospatial datasets. In **Landslides (2010)**, 7(1):317-324.

LÓPEZ, C. N. M. **Métodos probabilísticos aplicados na análise da estabilidade de taludes em solo**. 2017. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

MAIA, J.A.C. (2003). **Métodos Probabilísticos Aplicados à Estabilidade de Taludes e Cavidades em Rocha**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-099A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 196 p.

MILLER, S.M., WHYATT, J.K. & MCHUGH, E.L. (2004). Applications of the point estimation method for stochastic rock slope engineering. 6th North American Rock Mechanics Conference, ARMA, Houston, Texas, 1: 1-12.

MONTGOMERY, D.R. ; DIETRICH, W.E., A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. In **Water resources research**, vol. 30, nº4, p.1153-1171, abr. 1994.

MONTOYA, C.A.H. & ASSIS, A.P. (2011). Tools for reliability analysis in geotechnical engineering: theory (in Spanish). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 10(18): 69-78.

MONTRASIO, L. & VALENTINO, R. A model for triggering mechanisms of shallow landslides. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 8, p.1149-1159, 2008.

NUNES, D.M.; COELHO, C.D.; SOUZA, A.B.; CALIJURI, M.L.; SANTOS, A.P.S., Uso integrado do modelo SHALSTAB e análise multicritério para mapeamento de áreas susceptíveis aos escorregamentos de terra na bacia do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa – MG. **Revista Brasileira de Cartografia (2016)**: Edição especial movimentos de massa e processos erosivos: 1853-186, Rio de Janeiro, nº 68/9, p.1853-1868, out. 2016.

OLIVEIRA, M.T. **Caracterização de modelagem das áreas de susceptibilidade a movimentos de massa gravitacionais no município de Belo Horizonte (MG)**: Um estudo dinâmico. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2009. 279p.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, **Multilingual landslide glossary**. Working party on world landslide inventory, Richmond, Canadá, p. ii, 1993. Disponível em: <http://iaeg.info/media/1454/multilingual-landslide-glossary_1993-version.pdf>. Acesso em: 03 dez. 2018.

QIU, C.; ESAKI, T.; XIE, M.; MITANI Y.; WANG, C., Spatio temporal estimation of shallow landslide hazard triggered by rainfall using a three-dimensional model. **Environmental Geology**, v.52, n.8, p. 1569-1579, 2006.

RIFFEL, E.S.; GUASSELLI, L.A.; BRESSANI, L.A., Desastres associados a movimentos de massa: Uma revisão de literatura. **Boletim Goiano de Geografia**, v.36, n.2, p.285-306, mai./jul. 2016.

ROSENBLUETH, E. (1975). Point estimates for probability moments. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 72(10): 3812-3814.

SILVA, C. C. **Análise de estabilidade de um talude da cava de Alegria utilizando abordagem probabilística**. 2015. 134f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia. 2015.

SILVA, E.M. (2006). Análise de Estabilidade de Taludes em Solos de Alteração de Rochas Metamórficas do Quadrilátero Ferrífero. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 143 p.

THE GEOLOGICAL SOCIETY. **Landslide & Slope Instability Geohazards:**

Landslide Classification. [S.i.]: Engineering Group Working Party on Geological Hazards. Disponível em:

<http://www.ukgeohazards.info/pages/eng_geol/landslide_geohazard/eng_geol_landslides_classification.htm>. Acesso em: 26 nov. 2018.

U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1999), Risk-Based Analysis in Geotechnical Engineering for Support of Planning Studies, Engineering Technical Letter ETL 1110-2-556, Department of the Army, Washington, DC 20314-1000.

VARNES, D.J. Chapter 2: Slope Movement Types and Processes. In: SCHUSTER, R.L.; KRIZEK, R.J., **Special Report 176: Landslides: Analysis and Control.**, Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D.C.: Estados Unidos, 1978, cap.2, p.11-33. Disponível em: <<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr176/176-002.pdf>>. Acesso em: 26 nov. 2018.

VIEIRA, B.; RAMOS, H. Aplicação do modelo Shalstab para mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos rasos em Caraguatatuba, Serra do Mar (SP). **Revista do Departamento de Geografia**, v. 29, p. 161-174, 17 jun. 2015.

XIE, M.; ESAKI, T.; CAI, M., A GIS-based method for locating the critical 3D slip surface in a slope. **Computers and Geotechnics**, v.31, n.1, p.267-277, 2004.

XIE, M.; ESAKI, T.; QIU, C.; WANG, C., Geographical information system-based computational implementation and application of spatial three-dimensional slope stability analysis. **Computers and Geotechnics**, v.33, n.6-7, p. 260-274, 2006.

APÊNDICE A – ALGORITMOS UTILIZADOS NAS ROTINAS DE CÁLCULO

A.1. Função geradora de parâmetros para elipsoides.

```
function [ alpha,matPossib ] = ListaRandomica(Monte,matParametro,Centro,Expos,Decliv,pixel )
% gera o vetor com as combinações dos parâmetros que serão
%utilizados para criar as iterações das superfícies de ruptura
% Detailed explanation goes here

% matriz de possibilidades a serem testadas
matPossib = zeros(Monte,4);

% direção da superfície de ruptura
alpha = 0;
% inclinação da superfície de ruptura
beta = 0;

% for i = round((Centro(1)-matParametro(1))/pixel):round((Centro(1)+matParametro(1))/pixel)
%   for j = round((Centro(2)-matParametro(2))/pixel):round((Centro(2)+matParametro(2))/pixel)

% PIX = raio em torno do centro
PIX = 5;
% usa um raio de 10 pixels para calcular a direção e a inclinação da superfície de ruptura
for i = round((Centro(1)-PIX)):round((Centro(1)+PIX))
    for j = round((Centro(2)-PIX)):round((Centro(2)+PIX))

        %alpha_transf = Expos(i,j);

%         alpha_transf = 540 - Expos(i,j);
%
%         if alpha_transf >= 360
%
%             alpha_transf = alpha_transf - 360;
%
%         end % end if

        % acumula a orientação e a declividade dos pixels
        alpha = alpha + Expos(i,j);
        beta = beta + Decliv(i,j);

    end % end for
end % end for

% transforma para radianos e calcula a média de alpha e beta

alpha = pi/180*(alpha/((2*PIX+1)*(2*PIX+1)));
beta = (beta/((2*PIX+1)*(2*PIX+1)));

% alpha = pi/180*(alpha/(round((2*matParametro(1)/pixel+1)*(2*matParametro(2)/pixel+1))));
% beta = (beta/(round((2*matParametro(1)/pixel+1)*(2*matParametro(2)/pixel+1))));

% 3ªs alternativas seguem a orientação e declividade das células em torno
% do centro do elipsóide
matPossib(1:3,:) = [beta matParametro(1) matParametro(2) matParametro(3); beta
randi([matParametro(2),matParametro(1)-1]) randi([pixel,matParametro(2)-1])
matParametro(3)*rand; beta randi([matParametro(2),matParametro(1)-1])
randi([pixel,matParametro(2)-1]) matParametro(3)*rand];

% 1ª coluna: declividade randômica
matPossib(4:Monte,1) = pi/180*randi([0,80],Monte-3,1);

% 2ª coluna: eixo maior randômico
```

```

matPossib(4:Monte,2) = randi([matParametro(2),matParametro(1)],Monte-3,1);

% 3ª coluna: eixo menor randômico
matPossib(4:Monte,3) = randi([pixel,matParametro(2)],Monte-3,1);

% 4ª coluna: profundidade do elipsóide randômica
matPossib(4:Monte,4) = matParametro(3)*rand(Monte-3,1);

end % end function

```

A.2. Função para cálculo do fator de segurança

```

function [ PR ] = PR_3D(Hw,zw,pos_validas,z,alpha,beta,cell,c_phi,gama,cv,cv_unico)
%UNTITLED Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here

% salva a quantidade de células que fazem parte da elipse das posições
% válidas
TAM = size(pos_validas,1);

% matrizes que irão armazenar as médias +/- os desvios padrões da coesão, coesão saturada,
% ângulo de atrito e peso específico do solo
med_desv_c_ini = zeros(TAM,2);
med_desv_c_sat = zeros(TAM,2);
med_desv_atrito = zeros(TAM,2);
med_desv_gama_nat = zeros(TAM,2);
med_desv_gama_sat = zeros(TAM,2);

sinal = 1;
% Se cv's são únicos para toda área...
if cv_unico == 1

    for t = 1:2

        sinal = sinal*(-1);

        for i = 1:TAM

            med_desv_c_ini(i,t) = c_phi(pos_validas(i,1),pos_validas(i,2),1) +
sinal*cv(1)*c_phi(pos_validas(i,1),pos_validas(i,2),1);
            med_desv_c_sat(i,t) = c_phi(pos_validas(i,1),pos_validas(i,2),2) +
sinal*cv(1)*c_phi(pos_validas(i,1),pos_validas(i,2),2);

            med_desv_atrito(i,t) = c_phi(pos_validas(i,1),pos_validas(i,2),3) +
sinal*cv(2)*c_phi(pos_validas(i,1),pos_validas(i,2),3);

            med_desv_gama_nat(i,t) = gama(pos_validas(i,1),pos_validas(i,2),1) +
sinal*cv(3)*gama(pos_validas(i,1),pos_validas(i,2),1);
            med_desv_gama_sat(i,t) = gama(pos_validas(i,1),pos_validas(i,2),2) +
sinal*cv(3)*gama(pos_validas(i,1),pos_validas(i,2),2);

            end % end for
        end % end for

    end % end if

% VEtor que vai armazenar os valores de FS3d calculados para as 8
% combinações da média com seus desvios padrões
FS_MEP = zeros(1,8);
cont_FS = 1;

%Cálculo da direção principal do deslizamento
v = zeros(1,TAM);

for j = 1:TAM

```

```

v(j) = beta(pos_validas(j,1),pos_validas(j,2));
end % end for

% Função mode retorna o valor mais frequente na matriz v
Beta_p = mode(mode(v));

% combinações para (valor médio + desvio padrão) e (valor médio - desvio)
for comb1 = 1:2 % coesão
    for comb2 = 1:2 % atrito
        for comb3 = 1:2 %gama

            % componentes do FS (numerador e denominador)
            FS_3D_1 = 0;
            FS_3D_2 = 0;

            for j = 1:TAM

                alpha_xz =
atan(tan(alpha(pos_validas(j,1),pos_validas(j,2))).*sin(beta(pos_validas(j,1),pos_validas(j,2)
)));
                alpha_yz =
atan(tan(alpha(pos_validas(j,1),pos_validas(j,2))).*cos(beta(pos_validas(j,1),pos_validas(j,2)
)));

                A = cell^2*(sqrt(1-
(sin(alpha_xz))^2*(sin(alpha_yz))^2)/(cos(alpha_xz)*cos(alpha_yz)));

                alpha_p =
atan(tan(alpha(pos_validas(j,1),pos_validas(j,2)))*abs(cos(beta(pos_validas(j,1),pos_validas(j
,2))-Beta_p)));

                % Hw = frente úmida; zw = freático;
                % z = posição da superfície de ruptura
                % primeiro laço if considera que a
                % frente úmida esteja acima da
                % superfície de ruptura
                if Hw(pos_validas(j,1),pos_validas(j,2)) < z(j)

                    if Hw(pos_validas(j,1),pos_validas(j,2)) >=
zw(pos_validas(j,1),pos_validas(j,2))

                        % modelo 3 - frente úmida ultrapassa o
                        % o solo está todo saturado, inclusive na
                        % superfície de ruptura
                        FS_3D_1 = FS_3D_1 + (med_desv_c_sat(j,comb1)*A
+ (med_desv_gama_sat(j,comb3)*z(j)*cos(alpha(pos_validas(j,1),pos_validas(j,2))) - 9.8*(z(j)
) *cell^2*tan(med_desv_atrito(j,comb2)) ) *cos(alpha_p);
                        FS_3D_2 = FS_3D_2 +
med_desv_gama_sat(j,comb3)*z(j)*cell^2*sin(alpha_p)*cos(alpha_p);

                    else if zw(pos_validas(j,1),pos_validas(j,2)) > z(j)

                        % modelo 1 - presença de
                        % uma zona não saturada entre a frente úmida
                        e o freático. A superfície de ruptura encontra-se exatamente
                        % na zona não sat.
                        FS_3D_1 = FS_3D_1 +
(med_desv_c_ini(j,comb1)*A + ( med_desv_gama_nat(j,comb3)*z(j) + (med_desv_gama_sat(j,comb3) -
med_desv_gama_nat(j,comb3)) *Hw(pos_validas(j,1),pos_validas(j,2))
)*cell^2*cos(alpha(pos_validas(j,1),pos_validas(j,2)))*tan(med_desv_atrito(j,comb2)) ) *
cos(alpha_p);
                        FS_3D_2 = FS_3D_2 + (
med_desv_gama_nat(j,comb3)*z(j) + (med_desv_gama_sat(j,comb3) -
med_desv_gama_nat(j,comb3)) *Hw(pos_validas(j,1),pos_validas(j,2)) ) *
cell^2*sin(alpha_p)*cos(alpha_p);

                    else

```

```

%modelo 4 - zona não
% saturada no meio da
% coluna. Superfície de
% ruptura encontra-se
% saturada
FS_3D_1 = FS_3D_1 + (
med_desv_c_sat(j,comb1)*A + ( (
med_desv_gama_nat(j,comb3)*(zw(pos_validas(j,1),pos_validas(j,2)) -
Hw(pos_validas(j,1),pos_validas(j,2))) +
med_desv_gama_sat(j,comb3)*(Hw(pos_validas(j,1),pos_validas(j,2))+z(j)-
zw(pos_validas(j,1),pos_validas(j,2))))*cos(alpha(pos_validas(j,1),pos_validas(j,2))) -
9.8*(z(j)-zw(pos_validas(j,1),pos_validas(j,2))) ) *cell^2*tan(med_desv_atrito(j,comb2))
)*cos(alpha_p);
FS_3D_2 = FS_3D_2 + (
med_desv_gama_nat(j,comb3)*(zw(pos_validas(j,1),pos_validas(j,2)) -
Hw(pos_validas(j,1),pos_validas(j,2))) +
med_desv_gama_sat(j,comb3)*(Hw(pos_validas(j,1),pos_validas(j,2))+z(j)-
zw(pos_validas(j,1),pos_validas(j,2))) ) *cell^2*sin(alpha_p)*cos(alpha_p);

end % end if
end % end if

else

%modelo 2 - Frente úmida abaixo
% da superfície de ruptura; solo
% saturado
FS_3D_1 = FS_3D_1 + (med_desv_c_sat(j,comb1)*A +
(med_desv_gama_sat(j,comb3)*z(j)*cos(alpha(pos_validas(j,1),pos_validas(j,2))) - 9.8*(z(j))
) *cell^2*tan(med_desv_atrito(j,comb2)) ) *cos(alpha_p);
FS_3D_2 = FS_3D_2 +
med_desv_gama_sat(j,comb3)*z(j)*cell^2*sin(alpha_p)*cos(alpha_p);

end % end if

end % end for j = 1:TAM

% calcula o FS para cada combinação do valor médio e
% de desvio padrão
FS_MEP(cont_FS) = FS_3D_1/FS_3D_2;
cont_FS = cont_FS + 1;

end % end for comb3
end % end for comb2
end % end for comb1

% cálculo do valor médio e do desvio padrão para as combinações de FS
FS_medio = sum(FS_MEP)/8;
FS_std = std(FS_MEP);

% cálculo da probabilidade de ruptura
x = -10:0.1:(1 - FS_medio)/FS_std);

Y = 1/sqrt(2*pi)*exp(-0.5*x.^2);

PR = trapz(x,Y,2);

end % end function

```

A.3. Função geradora de elipsoides.

```
function [ posVal ] = Superficie(alpha,beta,a,b,c,x0,y0,z0,pixel,H,Topo)
%UNTITLED4 gera a superfície do elipsóide para análise do FS
% Detailed explanation goes here

s1 = sin(alpha);
c1 = cos(alpha);
s2 = sin(beta);
c2 = cos(beta);

M = [c1*c2 s1 c1*c2; -s1*c2 c1 -s1*s2; -s2 0 c2];

cont = 1;

first = 1;

for xL = -a:a
    for yL = -b:b

        if ((xL/a)^2+(yL/b)^2)<1

            zL = -sqrt(c^2*(1-(xL/a)^2-(yL/b)^2));

            POS = M*[xL;yL;zL]+[x0*pixel; y0*pixel; z0];

            % transforma as linhas e colunas de números reais para números inteiros
            POS(1:2) = round(POS(1:2)/pixel);

            % só avalia as células do elipsóide que possuem elevação menor que a topografia
            if POS(3) < Topo(POS(1),POS(2))

                control = 0;

                if cont > 1

                    for i = 1:cont-1

                        if (POS(1,1) == posVal(1,i)) && (POS(2,1) == posVal(2,i))

                            control = 1;
                            break;

                        end % end if

                    end % end for

                else

                    posVal(:,cont) = POS;

                    % se a profundidade do elipsóide for maior que a espessura de
                    % solo do layer correspondente, então a célula recebe e
                    % espessura H do layer
                    if ((Topo(posVal(1,cont),posVal(2,cont))-posVal(3,cont)) >
H(posVal(1,cont),posVal(2,cont)))

                        posVal(3,cont) = H(posVal(1,cont),posVal(2,cont));

                    else

                        posVal(3,cont) = Topo(posVal(1,cont),posVal(2,cont))-posVal(3,cont);

                    end % end if

                end % end if

            end % end if

        end % end if

    end % end for

end % end for
```

```

        cont = cont + 1;
    end % end if

    if (control == 0) && (first == 0)

        posVal(:,cont) = POS;

        % se a profundidade do elipsóide for maior que a espessura de
        % solo do layer correspondente, então a célula recebe e
        % espessura H do layer
        if ((Topo(posVal(1,cont),posVal(2,cont))-posVal(3,cont)) >
H(posVal(1,cont),posVal(2,cont)))

            posVal(3,cont) = H(posVal(1,cont),posVal(2,cont));

        else

            posVal(3,cont) = Topo(posVal(1,cont),posVal(2,cont))-posVal(3,cont);

        end % end if

        cont = cont + 1;

    else

        first = 0;

    end % end if

    end % end if POS(3) < Topo(POS(1),POS(2))

end % end if

    end % end for
end % end for

end % end function

```

A.4. Código principal

Este código integra as funções e gera as superfícies críticas a partir de um ponto escolhido pelo usuário.

```

clear all
clc

%INPUT
%-----
% Input
Topo = load('TOPO.txt');
pixel = 5;
% N° de centros
Ncentro = 1;

% n° de iterações
NItera = 10;
% coordenadas do centro
XYCentro = zeros(Ncentro,2);

% matriz com os parâmetros do elipsóide de tentativa para buscar a

```

```

% superfície de ruptura

matPar = [80 50 2];
%matPar = load('ParElipsoide');

% calcula as matrizes de orientação e declividade das vertentes
% gridrv = [1000 0 0];
% [aspect1,slope1,gradN,gradE] = gradientm(Topo,gridrv);

slope = pi/180*load('declividade.txt');
aspect = load('exposicao.txt');

imagesc(aspect(2:size(aspect,1),2:size(aspect,2)));

% coleta os pontos do centro fornecidos pelo usuário, salva em um vetor e
% mostra na tela
for i = 1:Ncentro

[XYCentro(i,1),XYCentro(i,2)] = ginput(1);
hold on
plot(XYCentro(i,1),XYCentro(i,2),'rs') % red square

end % end for

%
%
% Input dados do solo

% espessura do solo até a superfície de ruptura
z = load('H.txt');

% Input Frente Úmida
% por simplificação, adota-se matriz de frente úmida constante
Hw = 0.5*ones(size(slope,1),size(slope,2));

% profundidade do freático
zw = load('freatico.txt');

% Matriz dos dados de coesão e ângulo de atrito do solo na superfície de
% ruptura
c_phi = zeros(size(Topo,1),size(Topo,2),2);

c_phi(:,:,1) = load('coesão_ini.txt');
c_phi(:,:,2) = load('coesão_sat.txt');
c_phi(:,:,3) = pi/180*load('atrito.txt');

% peso específico do solo
gama = zeros(size(Topo,1),size(Topo,2),2);
gama(:,:,1) = load('peso_nat.txt');
gama(:,:,2) = load('peso_sat.txt');
% tamanho da célula em m
cell = 5;

% COEFICIENTES DE VARIAÇÃO
cv = [0.4 0.1 0.05];

%
%
% matriz que armazenará o relevo modificado pelas superfícies de ruptura
Topo_Ruptura = Topo;
% textura das superfícies de ruptura
textura = zeros(size(Topo,1),size(Topo,2));

% para cada ponto (centro) a ser analisado, realiza-se os procedimentos
for i = 1:Ncentro

% gera as alternativas de parâmetros usando Monte Carlo para gerar os elipsóides
[alpha,altern] = ListaRandomica(NItera,matPar(i,:),XYCentro(i,:),aspect,slope,pixel);

```

```

% aqui fixa-se o valor da inclinação do elipsóide para teste
%altern(:,1) = 0;

% variável de controle para atribuição da 1ª PR calculada como sendo a máxima
PRcontr = -1;

% vetor que armazena as PR's máximas de cada centro
vetPR = zeros(1,Ncentro);

% vetor que armazena as Iterações que fornecem as PR máximas de cada centro
vetIteraMAX = zeros(1,Ncentro);

% número de iterações (elipsóides com parâmetros diferentes) por centro escolhido pelo
usuário
for j = 1:Nitera

    % Gera as posições das células que farão parte do elipsóide desta iteração
    PosicSurf = Superficie(alpha,
altern(j,1),altern(j,2),altern(j,3),altern(j,4),XYCentro(i,1),XYCentro(i,2),Topo(round(XYCentr
o(i,1)),round(XYCentro(i,2))),pixel,z,Topo);

    PRatual =
PR_3D(Hw,zw,PosicSurf(1:2,:)',PosicSurf(3,:)',slope,aspect,pixel,c_phi,gama,cv,1);

    % para o 1º cálculo, a PR atribuída será a 1ª estabelecida
    if PRcontr == -1

        vetPR(i) = PRatual;
        vetIteraMAX(i) = j;

        % salva as coordenadas e profundidade
        matPosMAX = PosicSurf;
        PRcontr = 0;

    else

        if PRatual > vetPR(i)

            vetPR(i) = PRatual;
            vetIteraMAX(i) = j;

            % salva as coordenadas e profundidade
            matPosMAX = PosicSurf;

        end % end if

    end % end if

end % end for

for k = 1:size(matPosMAX,2)

    Topo_Ruptura(matPosMAX(1,k),matPosMAX(2,k)) =
Topo_Ruptura(matPosMAX(1,k),matPosMAX(2,k)) - matPosMAX(3,k);
    textura(matPosMAX(1,k),matPosMAX(2,k)) = - matPosMAX(3,k);

end % end for

end % end for

hold off

%

```

```

%
surf(Topo_Ruptura( round( XYCentro(1)-2*matPar(1)/pixel ):round(
XYCentro(1)+2*matPar(1)/pixel ),round( XYCentro(2)-2*matPar(1)/pixel ):round(
XYCentro(2)+2*matPar(1)/pixel )),textura( round( XYCentro(1)-2*matPar(1)/pixel ):round(
XYCentro(1)+2*matPar(1)/pixel ),round( XYCentro(2)-2*matPar(1)/pixel ):round(
XYCentro(2)+2*matPar(1)/pixel )) )
shading interp

%LARG_PLOT = 10;
%surf(Topo_Ruptura( round( XYCentro(1)-LARG_PLOT ):round( XYCentro(1)+LARG_PLOT )
,round( XYCentro(2)-LARG_PLOT ):round( XYCentro(2)+LARG_PLOT )),textura( round(
XYCentro(1)-LARG_PLOT ):round( XYCentro(1)+LARG_PLOT ),round( XYCentro(2)-LARG_PLOT
):round( XYCentro(2)+LARG_PLOT )) )
%shading interp

```

A.6. Código utilizado para geração do relevo teste

```

clear all
clc

lin = 300;
col = 300;

topo = zeros(lin,col);

for i = 1:col

    %topo(:,i) = 950-i;
    topo(:,i) = 950;
    %topo(:,i)=173.2051-(i*0.5774);
end % end for

decliv = (45)*ones(lin,col);

aspecto = ones(lin,col);

c_ini = 5*ones(lin,col);
c_sat = 4.5*ones(lin,col);
phi = 25*ones(lin,col);
freat = 2*ones(lin,col);
H = 3*ones(lin,col);
p_nat = 15*ones(lin,col);
p_sat = 19*ones(lin,col);

save TOPO.txt topo -ascii
save declividade.txt decliv -ascii
save exposicao.txt aspecto -ascii

save coesão_ini.txt c_ini -ascii
save coesão_sat.txt c_sat -ascii
save atrito.txt phi -ascii
save freatico.txt freat -ascii
save H.txt H -ascii
save peso_nat.txt p_nat -ascii
save peso_sat.txt p_sat -ascii

```