

ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DA ESTABILIDADE DE TALUDES DE BARRAGENS E ENCOSTAS DURANTE EVENTOS ATMOSFÉRICOS EXTREMOS: ESTUDO DE CASOS

Rodrigo Vilela, Gilson de Farias Neves Gitirana Júnior
Universidade Federal de Goiás, 74605-220, Brasil
dygao_snf@hotmail.com , gilsongitirana@gmail.com

PALAVRAS-CHAVE: Análise, Estabilidade, Taludes,

1 INTRODUÇÃO

A análise de estabilidade de taludes pode ser dividida em dois problemas, sendo o primeiro o cálculo do fator de segurança para uma superfície determinada e, o segundo a determinação da superfície de ruptura crítica. O cálculo do fator de segurança pode ser realizado basicamente de duas formas, a análise limite e o equilíbrio limite. A determinação da superfície de ruptura crítica pode ser realizada através de métodos heurísticos ou métodos de programação matemática.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Análise Tridimensional do Fator de Segurança de Taludes

O principal objetivo da análise de estabilidade de taludes é determinar a carga máxima que a estrutura suportará em condições estáveis, ou seja, qual a carga suportada pela estrutura na iminência da ruptura. Entre os métodos diretos para resolver problemas relacionado a estabilidade estão os métodos de equilíbrio limite e análise limite, conhecidos como métodos limite.

No equilíbrio limite, a massa de ruptura é dividida em um número “x” de fatias e para encontrar o fator de segurança utiliza-se as condições de equilíbrio estático.

A análise limite considera as equações de equilíbrio de tensões, equações de compatibilidade e a relação tensão-deformação do material de maneira idealizada (material rígido perfeitamente plástico).

2.1.1 Métodos de Análise Limite

A Análise Limite tem como principal objetivo a determinação da carga que leva uma determinada estrutura ao colapso (carga de colapso). As formulações existentes nesse método para o cálculo da carga de colapso são baseadas nos teoremas de Análise Limite (superior ou inferior). A formulação pelo limite inferior (formulação estática) deve satisfazer as condições de admissibilidade estática dos campos de tensões; a formulação pelo limite superior (formulação cinemática) deve satisfazer as condições de admissibilidade cinemática dos campos de velocidades e

a formulação mista tem a forma da formulação pelo limite inferior, com variáveis de tensões, porém o campo de tensões não é estaticamente admissível, apenas de forma aproximada.

A aplicação dos teoremas limites em problemas tridimensionais é mais recente. Um método que é uma extensão da abordagem bidimensional de Donald e Chen (1997 apud Chen; Zuyu, 2001) é descrita por Chen et al. (2001), onde a massa de solo delimitada pela superfície de ruptura é dividida em um número de prismas com interfaces inclinadas.

Em 2003, foi formulado por Chen et al. um novo método do limite superior para problemas de estabilidade de taludes bidimensionais e tridimensionais, onde elementos finitos rígidos são usados para construir um campo de velocidade cinematicamente admissível. É permitido que ocorram descontinuidades de velocidades cinematicamente admissíveis em todos os limites entre os elementos. Este método formula um problema de estabilidade de taludes como um problema de otimização baseado no teorema do limite superior. A função objetivo para a determinação do valor mínimo do fator de segurança tem um número de incógnitas que estão sujeitas a uma série de igualdades lineares e não-lineares restritas e, também, desigualdades não restritas. A função objetivo e as equações restritas são derivadas de equações de equilíbrio de energia-trabalho, do critério de ruptura de Mohr-Coulomb, de uma regra de fluxo associada e de certas condições de contorno. A função objetivo com restrições conduz a um problema padrão de programação não-linear, que pode ser resolvido por um algoritmo quadrático seqüencial.

Chen et al. (2005) aplicaram um algoritmo de programação quadrática seqüencial especial (SQP) eficiente computacionalmente, o CFSQP (Lawrence et al., 1998), para resolver o problema de otimização não-linear para encontrar o fator de segurança mínimo. O uso desse algoritmo se mostrou fácil e eficiente na solução de um problema de programação não-linear resultante de análise de estabilidade de taludes pelo limite superior usando elementos finitos rígidos.

2.1.2 Métodos de Equilíbrio Limite

Uma forma de aplicação do método de equilíbrio limite à análise tridimensional, onde a massa de solo acima da superfície de ruptura é dividida em várias colunas verticais (Figura 1) foi descrita por Chen e Chameau (1982).

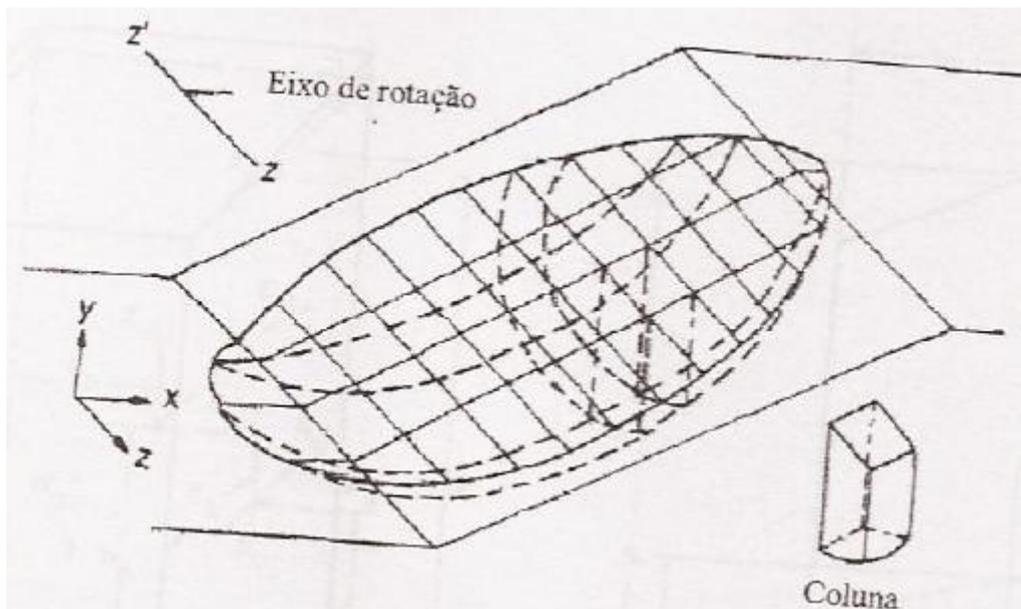


Figura 1. Massa de ruptura tridimensional.

Os parâmetros incluídos nesta análise são as forças normais e cisalhantes atuantes nos lados e base da coluna; os pontos de aplicação destas forças e o fator de segurança total. Várias hipóteses devem ser assumidas para que o problema seja determinado. A massa de ruptura é considerada simétrica e se considera que a direção do movimento está somente no plano X-Y. As tensões cisalhantes horizontais atuantes na base (plano Y-Z), no início do processo de escorregamento são consideradas nulas.

Chen e Chameau (1982) descreveram, também, a hipótese de que as forças entre fatias que atuam nos lados das colunas têm a mesma inclinação ao longo de toda a massa de solo. Com estas hipóteses, as incógnitas remanescentes são as tensões normais horizontais atuando nas laterais das colunas, as forças normais atuando na base da coluna, o fator de segurança e o ângulo de inclinação da resultante das forças entre fatias com a horizontal. As equações de equilíbrio são resolvidas usando o método secante para equações não-lineares (Wolfe, 1997 apud Chen e Chameau, 1982), e o fator de segurança pode, então, ser encontrado.

Em 2008, Stianson realizou uma pesquisa cujo objetivo foi demonstrar um processo de combinação de uma análise de tensões por elementos finitos em um talude utilizando os conceitos de equilíbrio limite para calcular o fator de segurança para superfícies de deslizamento tridimensionais. O estado de tensões interno calculado a partir da análise de elementos finitos é usado para determinar as forças que atuam ao longo da superfície de deslizamento tridimensional e é realizado um procedimento de interpolação para determinar tensões atuantes em pontos distintos ao longo da superfície de deslizamento que dependem da malha utilizada na análise tensão-deformação tridimensional (tetraedro, hexaedro, etc.) Como simplificação, as tensões a partir da análise de elementos finitos são exportados para uma configuração de grid comum, conhecido como grid intermediário, constituído por elementos retangulares (Figura 2).

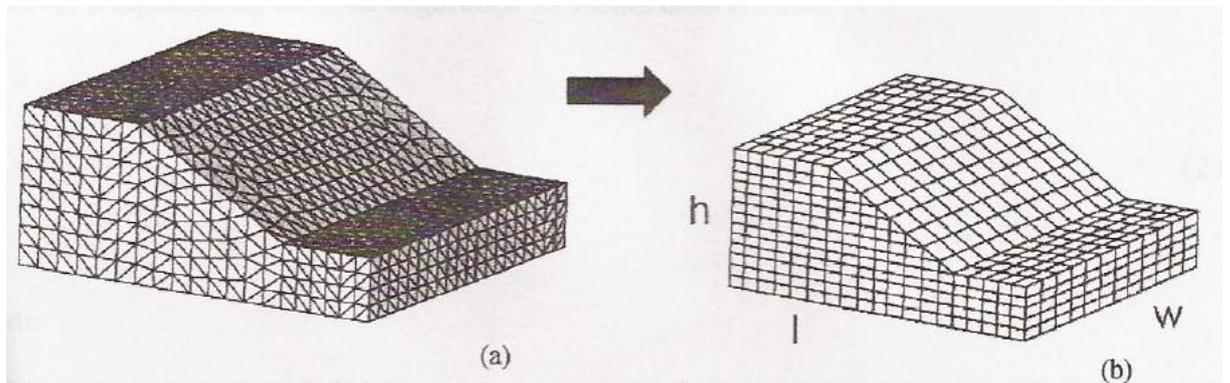


Figura 2. Grid tridimensional que liga a análise de tensões por elementos finitos com cálculos de estabilidade de taludes (a) Análise tensão-deformação tridimensional; (b) Grid intermediário tridimensional. (Stianson, 2008)

A equação usada para o cálculo do fator de segurança de uma superfície de deslizamento arbitrária tridimensional pode ser definido como:

$$F_S = \frac{\int \tau_f dA}{\int \tau dA} \quad (1)$$

Onde:

τ_f é a resistência ao cisalhamento do solo;

τ é a tensão cisalhante mobilizada;

dA é a área incremental na superfície de deslizamento.

Segundo Hong e ChuangBing (2009), a primeira análise global de estabilidade de taludes foi feita por Bell (1968 apud Hong e ChuangBing, 2009), que assumiu uma expressão da pressão normal na superfície de ruptura com dois parâmetros indeterminados C1 e C2, e tomou todo o corpo deslizante ao invés de fatias individuais como o objeto carregado, Bell (1968 apud Hong e ChuangBing, 2009) deduziu um sistema de equações não-lineares com C1, C2 e o fator de segurança como as incógnitas. Uma vez que no método de Bell é tomado como objeto todo o corpo deslizante ao invés de uma fatia individual e não são introduzidas forças entre fatias, podemos nos referir ao método de Bell como um método global, enquanto os outros, métodos de fatias, como métodos locais.

2.2 Métodos de Procura da Superfície de Ruptura Crítica

Segundo Chen e Shao (1988) a rotina mais adotada para o cálculo do fator de segurança da estabilidade de taludes pode ser dividida em duas etapas. A primeira é o cálculo do fator de segurança para uma superfície de ruptura específica usando certo método de análise e, a segunda é a procura, dentre muitas superfícies de ruptura em potencial, da superfície crítica, cujo fator de segurança é mínimo. Os autores observam que desde 1950 a teoria da otimização tem sido desenvolvida com sucesso e aplicada em vários campos, incluindo o fator de segurança mínimo

da análise de estabilidade de taludes. No trabalho de Chen e Shao (1988) a função objetivo a ser otimizada, que é o fator de segurança, é calculada por um método convencional bidimensional de fatias, que envolve interações numéricas. Foi aplicada a extensão do método generalizado das fatias para o cálculo da função objetivo, devido sua capacidade de obter a convergência garantida de valores de fator de segurança com precisão adequada, que é exigido para o sucesso da implementação do algoritmo de otimização. A validação e a viabilidade dos métodos de otimização foram provadas pelo sucesso da solução de seus problemas teste. As modificações dos métodos de Davidon-Fletcher-Powell sugeridas pelos autores foram consideradas essenciais por causa das particularidades envolvidas na análise de estabilidade de taludes.

Em 2003, Cheng relatou algumas dificuldades na localização da superfície de ruptura crítica:

- A função objetivo do fator de segurança não é linear e pode não ser convexa;
- Chen e Shao (1988) descobriram que existem vários mínimos em uma solução de domínio viável. O autor tentou o método de otimização tipo gradiente e observou que diferentes tentativas iniciais fornecem diferentes mínimos locais mesmo para taludes homogêneos com geometrias simples. Isto mostra que a existência de vários mínimos locais é a característica fundamental dos problemas de estabilidade de taludes;
- Uma boa tentativa inicial para condições de solos gerais com carregamentos arbitrários podem dificultar o desenvolvimento da análise de otimização.

3 MÉTODOS E CASO

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

São apresentados a seguir os materiais e métodos utilizados nesse trabalho. Nas análises numéricas foram utilizados os programas FlexPDE 5. Outro programa utilizado foi o SAFE 3D, responsável por fazer o cálculo do fator de segurança.

3.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A análise de tensões em uma massa de solo vem sendo tradicionalmente realizada em análises de estabilidade de taludes utilizando a análise estática das forças atuantes nas faces de fatias (bidimensional) ou prismas (tridimensional) que compõem a massa deslizante. Esta abordagem tem produzido resultados variados, dependendo das hipóteses que foram adotadas na solução das equações de equilíbrio. Por esta razão são originados diversos métodos de estabilidade de taludes por equilíbrio limite (FREDLUND; KRAHN, 1977).

Uma alternativa para análise de tensões é resolver as equações de equilíbrio através de equações diferenciais parciais utilizando o método dos elementos finitos. Para isso, o estado de tensão tridimensional em uma massa de solo pode ser representado por um tensor de estado de tensão σ , da mesma forma, pode-se definir um estado de deformações tridimensionais através de um tensor de estado de deformação.

A relação tensão-deformação pode ser classificada em diversos tipos, de acordo com o comportamento do material analisado. Na relação elástica linear o material sofre uma determinada deformação ao ser submetido a um carregamento obedecendo a uma função linear ϵ , quando descarregado, o material volta à condição anterior ao deslocamento. Já em uma relação elástica não-linear o material volta ao estado inicial após o descarregamento, mas obedece a uma função não-linear. Para relação elasto-plástica, o material possui dois tipos de comportamentos. Até um limite de carga o material se comporta de maneira elástica, retornando ao estado inicial após o descarregamento. Ao atingir o limite elástico o material sofre deformações plásticas que são irreversíveis após o descarregamento.

Os componentes de deslocamento são utilizados como as primeiras variáveis do problema de tensão-deformação. Entretanto, a fim de obter as equações diferenciais que governam o equilíbrio estático de forças através do contínuo, as tensões presentes nas equações de equilíbrio devem ser substituídas pelos componentes de deslocamento. As relações usadas a fim de reescrever as equações diferenciais parciais são as relações constitutivas de tensão-deformação

3.2.1. Equações diferenciais de equilíbrio

As equações diferenciais de equilíbrio expressam o equilíbrio estático de forças atuando em um elemento representativo de volume. Este elemento é considerado suficientemente pequeno, tanto que as propriedades do material e as variáveis são contínuas ao longo do elemento. Isto representa uma hipótese fundamental da mecânica do contínuo. A Figura 3 ilustra o elemento infinitesimal com as tensões nas faces e suas variações diferenciais.

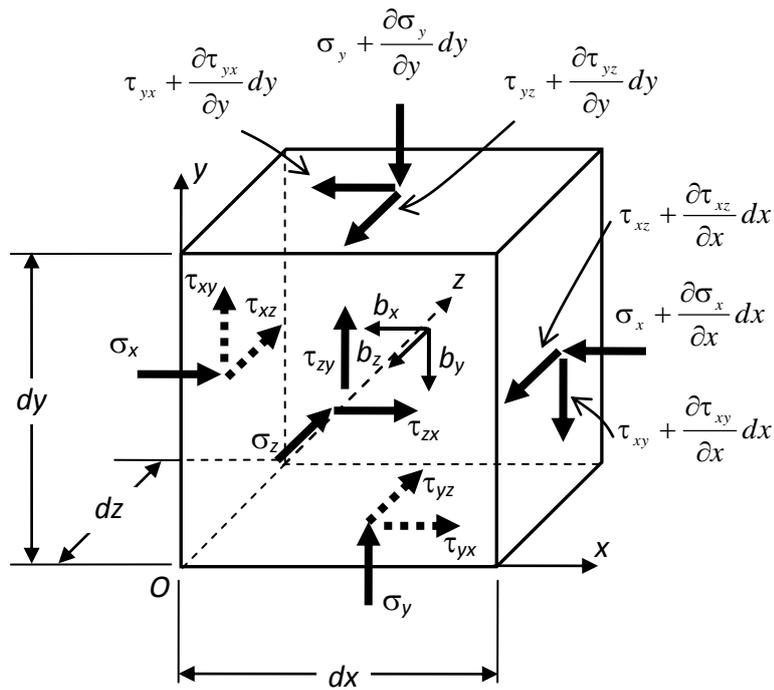


Figura 3 - Elemento representativo de volume de solo, com as tensões e variações diferenciais.

O equilíbrio estático para condições tridimensionais pode ser escrito como se segue:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + b_x = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + b_y = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + b_z = 0 \quad (4)$$

onde σ_i e τ_{ij} são a tensão normal e a tensão cisalhante, respectivamente, e b_i são as forças de corpo.

3.2.2. Condições de contorno

Segue figura 5 detalhando condições de contorno de uma encosta analisada.

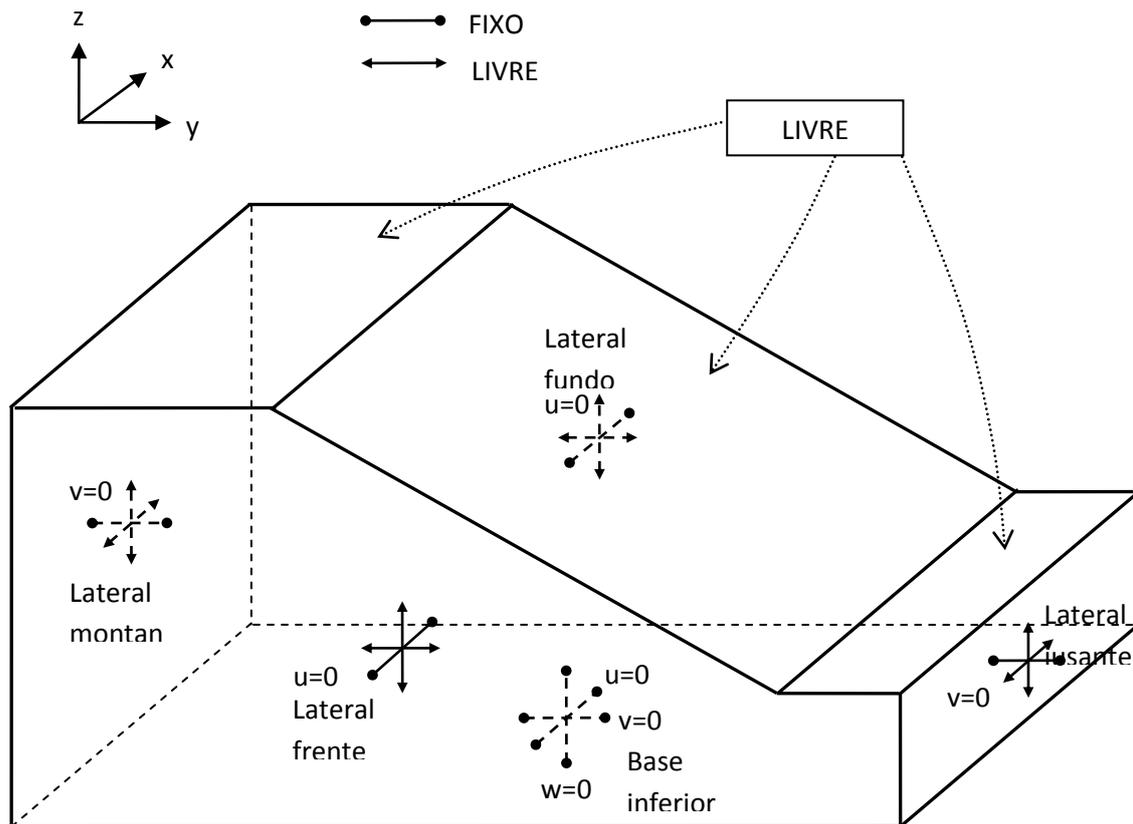


Figura 4 - Talude tridimensional com suas condições de fronteira.

A figura 4 representa a liberdade de cada superfície da encosta. A lateral fundo e frente possuem restrição de movimentação no eixo x; A lateral jusante e montante possuem restrição de movimentação no eixo y e a base inferior é restrita de se deslocar em todas direções. A superfície não possui nenhuma restrição por ser o local analisado para ocorrência da ruptura.

3.2.3. Análise de Fator de Segurança ao longo de uma superfície

O método de análises proposto aqui é uma extensão do método aperfeiçoado, para condições tridimensionais (Kulhawy e Duncan, 1973). No caso bidimensional, o fator de segurança é definido como a razão pela qual a resistência ao cisalhamento deve ser reduzida para trazer a massa de solo para o estado de equilíbrio limite ao longo de uma superfície bidimensional pré-definida.

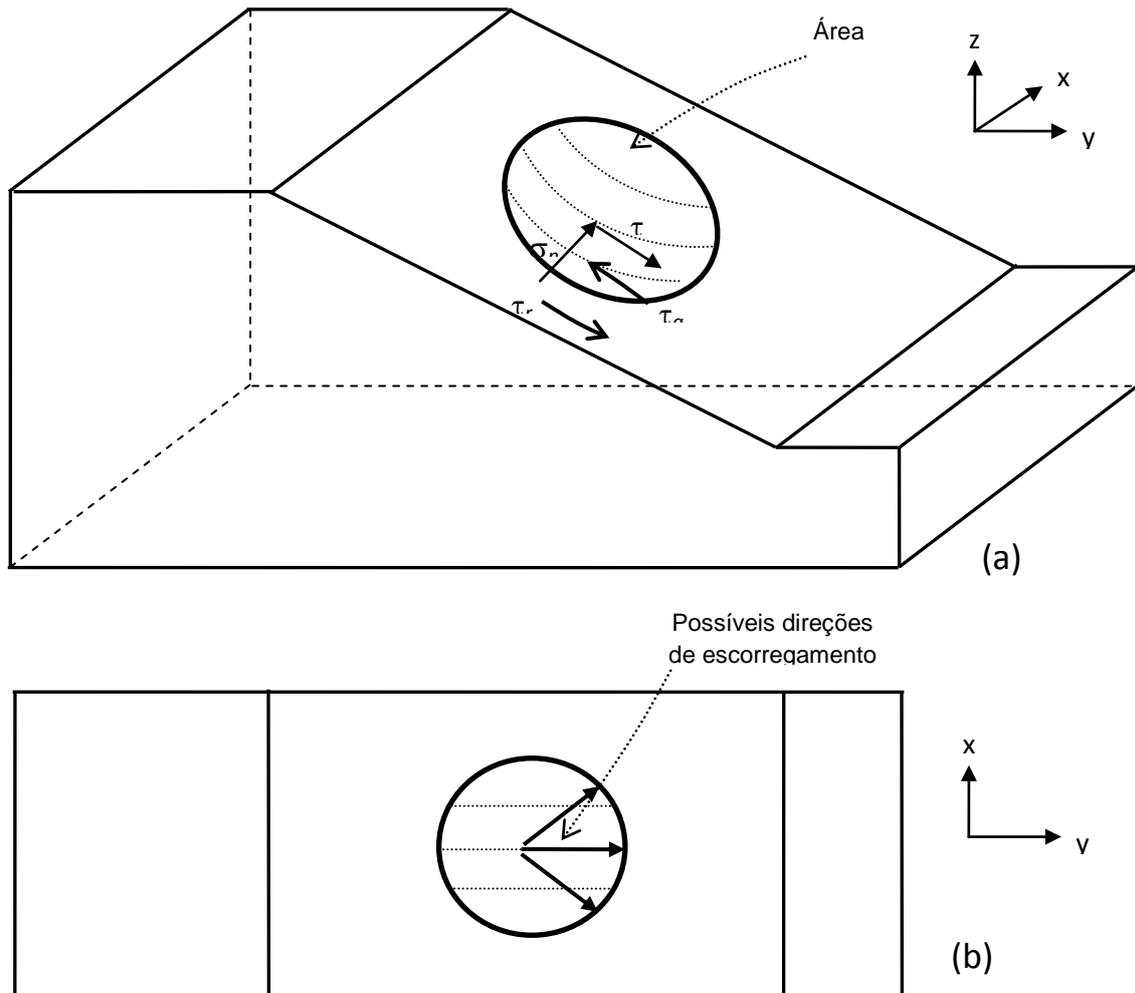


Figura 5 - a) Talude tridimensional com a superfície de ruptura e tensões; b) projeção do talude no plano horizontal e possíveis direções de escorregamento.

Conforme ilustra a Fig. 5, para uma superfície de ruptura tridimensional, o fator de segurança deve ser computado de uma forma similar à condição bidimensional, porém levando em conta a direção de escorregamento de interesse no plano horizontal. Deve-se tomar a força total resistente e dividi-la pela força total cisalhante:

$$F_S = \frac{R_{ff}}{S_{ff}} = \frac{\int_A \tau_{ff,r} dA}{\int_A \tau_{ff,a} dA} \quad (5)$$

onde: R_{ff} é a força total resistente, no plano de ruptura, na direção de ruptura; S_{ff} é a força total cisalhante, no plano de ruptura, na direção de ruptura; $\tau_{ff,r}$ é a tensão cisalhante resistente, no plano de ruptura, na direção de ruptura; $\tau_{ff,a}$ é a tensão cisalhante atuante, no plano de ruptura, na direção de ruptura; e A é a área da superfície de ruptura. Os dois primeiros sub-índices indicam o plano e a direção da tensão. O terceiro indica o tipo de tensão.

3.2.4. Tensões resistentes e atuantes ao longo de uma superfície de ruptura tridimensional

As tensões normais atuantes em um plano tangente a qualquer ponto de uma superfície de ruptura tridimensional são obtidas de forma análoga ao procedimento no caso bidimensional. Para a generalização para a situação tridimensional torna-se conveniente lançar mão dos cossenos diretores na definição das direções. A tensão normal em qualquer plano é obtida a partir do estado de tensões no ponto de interesse e pelos cossenos diretores do plano de interesse. Conforme apresentado na Figura 3.8, os cossenos diretores são a representação das componentes do vetor unitário normal ao plano de interesse. O plano de interesse é o plano tangente à superfície de ruptura em um dado ponto.

3.2.5. Superfície de ruptura elipsoidal

O formato elipsoidal vem sendo defendido por vários autores (lista referencias), devido à sua flexibilidade e à possibilidade de representação de variados mecanismos espaciais de escorregamento. O formato elipsoidal, sendo produto da rotação de uma elipse, permite a representação de superfícies alongadas longitudinalmente ou transversalmente em relação à face do talude, conforme apresentado na Figura 6.

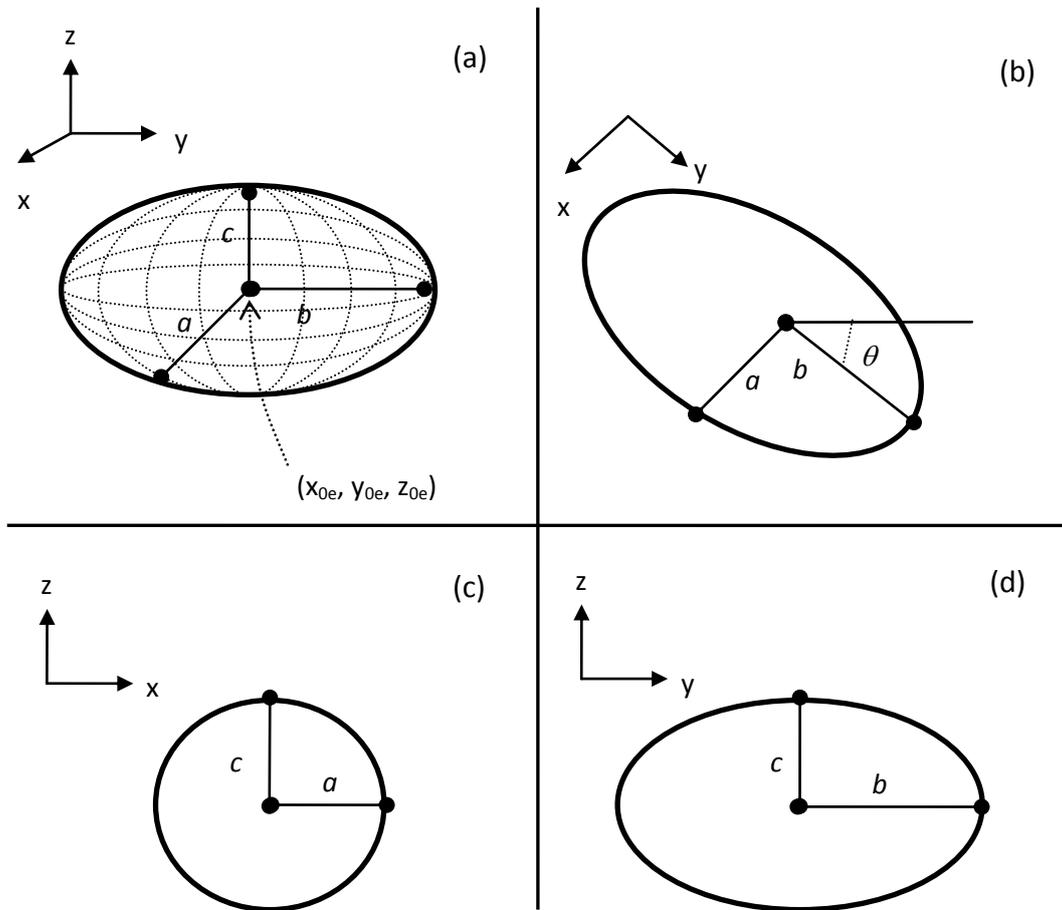


Figura 6 - a) Superfície de ruptura elipsoidal e seus parâmetros; b) Elipse no plano x-y; c) Elipse no plano x-z; d) Elipse no plano y-z.

O formato e a posição de uma superfície de ruptura elipsoidal podem ser matematicamente definidos conforme a equação a seguir:

$$z = z_{0e} - c \sqrt{1 - \frac{[(x - x_{0e})\cos\theta + (y - y_{0e})\sin\theta]^2}{a^2} - \frac{[(y - y_{0e})\cos\theta - (x - x_{0e})\sin\theta]^2}{b^2}} \quad (6)$$

onde: x_{0e} , y_{0e} , e z_{0e} são as coordenadas do centro; a , b , e c são os comprimentos dos semi-eixos nas direções x , y , e z , e θ fornece a orientação da elipsóide no plano x - y , θ começando com 0 na direção x e crescendo em sentido horário. Para uma superfície de ruptura elipsoidal, as derivadas são:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{2[(x - x_{0e})\cos\theta + (y - y_{0e})\sin\theta]\cos\theta}{a^2} - \frac{2[(y - y_{0e})\cos\theta - (x - x_{0e})\sin\theta]\sin\theta}{b^2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial f}{\partial y} = \frac{2[(x-x_{0e})\cos\theta+(y-y_{0e})\sin\theta]\sin\theta}{a^2} + \frac{2[(y-y_{0e})\cos\theta-(x-x_{0e})\sin\theta]\cos\theta}{b^2} \quad (8)$$

$$\frac{\partial f}{\partial z} = \frac{2(z-z_{0e})}{c^2} \quad (9)$$

Ficam desta forma, completamente definidos os cossenos diretores necessários para o cálculo das tensões em qualquer ponto ao longo da base de uma superfície de ruptura elipsoidal. Os parâmetros necessários são resumidos no Quadro 1.

Quadro 1 - Parâmetros de entrada.

| Parâmetro | Definição |
|-----------|--------------------------------------------------|
| x_{0e} | Coordenada do centro da elipsóide na direção x |
| y_{0e} | Coordenada do centro da elipsóide na direção y |
| z_{0e} | Coordenada do centro da elipsóide na direção z |
| a | Comprimento do semi-eixo da elipsóide na |
| b | Comprimento do semi-eixo da elipsóide na |
| c | Comprimento do semi-eixo da elipsóide na |
| θ | Orientação da elipsóide sentido horário |

Tem-se um total de sete parâmetros, que definem o tamanho e a posição da superfície de escorregamento e a direção do movimento de escorregamento. O caso análogo na condição bidimensional requer quatro parâmetros, quais sejam as coordenadas do centro do círculo, x_{0e} e z_{0e} e os comprimentos do semi-eixo nessas direções a e c . Comparando-se o número de variáveis, vê-se que são necessárias mais três variáveis, que indicam a posição do centro na direção longitudinal, y , a direção de escorregamento, e o comprimento do semi-eixo nesta direção.

3.3. CASO ANALISADO

O caso analisado nesse trabalho foi obtido de um estudo anterior no morro dos Cabritos no Rio de Janeiro. A encosta analisada colapsou no dia 7 de novembro de 1988 e envolveu um volume de solo de 5000m³, causando sérios danos em um bloco residencial. A figura 7 abaixo mostra com detalhe a grandeza do deslizamento.



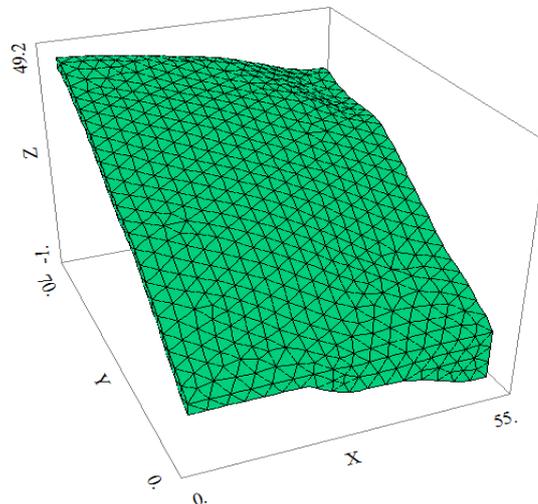
Figura 7 – Detalhes da ruptura da encosta do morro dos macacos

Dos dados obtidos da topografia original do terreno, fez-se a malha mostrada abaixo, figura8.

Stress Analysis - Linear Elastic - Total Stress

17:55:32 6/15/11
FlexPDE 5.0.22

original shape
(-89.8,-248., 30.)



Lagoa Stress v02: Grid#1 p2 Nodes=8918 Cells=4894 RMS Err= 0.009

Figura 8 – Malha gerada no FlexPDE 5 da superfície da encosta antes da ruptura

Dessa malha analisou-se as tensões atuantes e o fluxo de água devido as precipitações que ocorreram nos dias anteriores e calculou-se o fator de segurança.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após cálculo do Fator de Segurança, que resultou em um valor de 3,59 , constatou-se que a encosta era estável e que deve ter ocorrido alguma situação não analisada.

Outra consideração a ser feita, é refinar a malha para que possa trazer valores mais próximos dos reais.

5. CONCLUSÃO

Após constatar que o Fator de Segurança deu tão acima de 1, mostrou que o estudo deve-se recomençar, analisando cada critério para que não seja esquecido nenhum item importante, que pode causar impacto tão grande nesse valor e assim, tornar uma análise que espera-se valor próximo a 1, tenha valor maior do que 3,5.

A facilidade atual de calcular-se uma estabilidade de uma encosta e talude leva ao fato de acidente como esses que ocorrem na nossa época serem acontecimentos desnecessários, já que poderiam ser previstos por programas numéricos, em questões de horas.

6. REFERÊNCIAS

ADRIANO, P.R.R. ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DE ESTABILIDADE DE TALUDE UTILIZANDO O MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE APERFEIÇOADO, 2009.

CHEN, Z.Y.; WANG, X., HABERFIELD,C.; YIN,J.H; WANG,Y. A three-dimensional slope stability analysis method using the upper bound theorem Part 1: theory and methods.

FREDLUND, D.G.; KRAHN,J; COMPARISON OF SLOPE STABILITY METHODS OF ANALYSIS, 1977.

GERSCOVICH, D.M.S.; Fluxo em meios porosos saturados e não saturados, modelagem numérica com aplicações ao estudo da estabilidade de encostas no Rio de Janeiro, 1994.

SOARES, P.M.C; Busca da superfície de ruptura critica na analise tridimensional de estabilidade de taludes, 2010.

STIANSON, J.R. A three-dimensional slope stability method based on finite element stress analysis and dynamic programming. PhD. Thesis, Univerty of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada. 226p., 2008.