

Utilização do MEF para análise da estabilidade de encostas

Marcos Fábio Porto de Aguiar e Márcio de Souza Soares de Almeida
Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRRJ, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro

Francisco Chagas da Silva Filho
Centro de Tecnologia, Universidade de Fortaleza, Fortaleza, Ceará

RESUMO: O estudo do comportamento de encostas pode ser dividido em duas categorias: avaliação de estabilidade e estimativa do movimento. Sendo assim, dois tipos diferentes de análises, são geralmente realizadas: por equilíbrio limite e por métodos numéricos. Tendo em vista as análises por equilíbrio limite, estas podem ser implementadas somente com informações sobre a resistência do solo e a geometria da encosta, sem considerar o comportamento *tensão deformação*. No entanto, a consideração deste pode fornecer resultados mais realistas. Apresentam-se, então aqui, exemplos de análises de estabilidade aplicados à encosta de Coroa Grande na Serra do Mar, com um método de equilíbrio limite “tradicional” e pelo método de elementos finitos (MEF). Verifica-se que o MEF, para a análise de estabilidade de encostas é uma alternativa interessante e complementar em relação aos métodos tradicionais por equilíbrio limite e pode representar uma ferramenta de grande utilidade. Porém, sua utilização adequada depende da situação estudada e dos parâmetros do solo disponíveis.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de Encostas, Equilíbrio Limite, Método dos Elementos Finitos, Tensão-Deformação, Fator de Segurança.

1 INTRODUÇÃO

A maioria das análises de estabilidade de encostas realiza-se, na prática, por procedimentos “tradicionais” de equilíbrio limite envolvendo métodos de fatias. O método dos elementos finitos pode representar uma alternativa para a análise de estabilidade de encostas, podendo ser acurada, versátil e com considerações mais adequadas quanto ao mecanismo de ruptura.

A ruptura de encostas em modelos de elementos finitos ocorre “naturalmente” através de zonas nas quais a resistência ao cisalhamento do solo é insuficiente para resistir às tensões cisalhantes.

Com o objetivo de verificar a aplicação do MEF para a análise de estabilidade de encostas, o presente artigo descreve um exemplo prático, na encosta de Coroa Grande, e compara o resultado com o método “tradicional” de equilíbrio limite de Janbu, incluindo-se a influência do nível freático. Esquemas gráficos são mostrados para ilustrar os resultados obtidos em cada método.

2 ANÁLISES DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS

Aborda-se, a seguir, as conceituações teóricas de métodos “tradicionais” de equilíbrio limite e do método “alternativo” de elementos finitos.

2.1 Análise de Estabilidade de Encostas por Equilíbrio Limite

Na técnica de equilíbrio limite, a análise de estabilidade de talude tem como resultado o fator de segurança (F_S). Este valor é determinado para a provável superfície de ruptura. Processos interativos podem ser utilizados envolvendo a seleção de uma massa potencial de cisalhamento. A subdivisão dessa massa em fatias é realizada em vários métodos de cálculo possíveis (e.g., Fellenius, Bishop, e Janbu), considerando-se o equilíbrio em cada fatia.

Os diversos métodos de análise de estabilidade por equilíbrio limite possuem limitações, consideram diferentes hipóteses simplificadoras e condições de equilíbrio para obtenção dos referidos fatores de segurança. Ao considerar o equilíbrio de momento em relação

a um ponto externo, centro de um arco deslizante no caso de superfícies circulares, emprega-se a definição de fator de segurança F_S como sendo a razão entre o momento da força resistente (M_R) ao longo da superfície de deslizamento e o momento do peso da massa deslizante (M_D) com segue (Lambe e Whitman, 1979):

$$F_S = \frac{M_R}{M_D} \quad (1)$$

Para avaliar a estabilidade de um talude, por equilíbrio limite, é necessário realizar cálculos em considerável número de possíveis superfícies de deslizamento, para com isso, determinar a localização da superfície crítica de cisalhamento e o correspondente mínimo valor de FS. A análise pode ser, também, realizada para uma superfície de cisalhamento já identificada, por exemplo, através de instrumentação realizada anteriormente.

2.1.1 Método de Janbu (Janbu, 1968)

O método generalizado de fatias (Janbu, 1968) pode ser utilizado para resolver problemas de estabilidade em situações de topografia irregular e solos em camadas de diferentes resistências ao cisalhamento, com superfície de cisalhamento de qualquer formato.

As Considerações básicas do método de Janbu são:

- Condições de deformação plana;
- A tensão cisalhante de equilíbrio ao longo da superfície de cisalhamento segue a equação do fator de segurança;
- Assume-se que a resultante total age onde a componente do peso intercepta a base da fatia;
- A posição da linha de ação da força lateral total E é considerada como conhecida.

Existem duas formulações para o método de Janbu: considerando-se uma simplificação relativa as forças de cisalhamento que atual nas faces das fatias e sem considerá-la. Na formulação simplificada ou método de Janbu simplificado, examinando-se o equilíbrio de força global obtém-se uma expressão para o fator de segurança, sendo considerado que as

forças cisalhantes entre as fatias têm valor 0 (zero), mas devido a isto, um fator de correção é introduzido. No método de Janbu generalizado, as forças entre as fatias são avaliadas considerando-se o equilíbrio de momento em cada fatia. Para isto é necessário assumir a posição da linha de empuxo onde atuam as forças entre as fatias. Considera-se, então implicitamente, o equilíbrio global de momento.

Em ambas as formulações, os parâmetros do solo utilizados são: ângulo de atrito, ϕ' , coesão, c' , e peso específico γ . Na base da fatia atuam: tensão normal total σ , tensão cisalhante τ e poro-pressão u . O critério de ruptura considerado é: $s = c' + (\sigma - u) \cdot \tan \phi'$.

2.2 Análise de Estabilidade de Encostas pelo Método de Elementos Finitos

O programa proposto por Griffiths e Lane (1999) utiliza análises no estado plano de deformações e adota o modelo elástico perfeitamente plástico como critério de ruptura com elemento de 8 nós e integração numérica realizada com a utilização de 4 pontos de Gauss para a geração do vetor de carga na consideração do peso próprio dos materiais, para a matriz de rigidez e para a fase de redistribuição de tensões utilizada pelo algoritmo que calcula o fator de segurança por elementos finitos. Neste algoritmo o solo é admitido inicialmente elástico gerando tensões normais e de cisalhamento nos pontos de integração no interior do elemento. Estas tensões são então comparadas com o critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Se o estado de tensões em um determinado ponto de integração se encontrar abaixo da envoltória, este ponto continuará na condição elástica. Caso contrário (sobre ou acima da envoltória), o ponto estará em plastificação. Os pontos com o estado de tensões em ruptura plástica redistribuem estas tensões nas proximidades deste ponto de acordo com o algoritmo proposto e que tem por objetivo determinar a condição mínima de equilíbrio do maciço.

2.2.1 Modelo de solo

O modelo utilizado nesse estudo considera seis parâmetros do solo: ângulo de dilatância, Ψ , ϕ' , c' , módulo de Young, E' , coeficiente de Poisson, ν' e peso específico total γ .

Sugere-se, tendo em vista o nível de detalhamento da modelagem volumétrica considerado nos escopos dos modelos elásticos perfeitamente plásticos utilizados, um ângulo de dilatância constante. Como o principal objetivo é a obtenção acurada do fator de segurança na encosta, um valor pré-fixado de $\Psi = 0$ é utilizado com variação de volume igual a 0 (zero) durante o escoamento. Este valor de Ψ permite que o modelo forneça fatores de segurança confiáveis e uma indicação racional da localização e formato da potencial superfície de ruptura (Griffiths e Lane, 1999).

Os parâmetros elásticos E' e ν' referem-se, respectivamente, ao módulo de Young e ao coeficiente de Poisson do solo e não obstante terem grande influência nas deformações ocorridas antes da ruptura, têm uma pequena influência no fator de segurança obtido em análise de estabilidade de taludes. Na ausência de dados significativos para E' e ν' , sugere-se adotar: $E' = 10^5$ kN/m² e $\nu' = 0,3$ (Griffiths e Lane, 1999).

Em termos de tensões principais e considerando a compressão com sinal convencionalmente negativo, mostra-se, a seguir, a formulação do critério:

$$F = \frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2} \text{sen} \phi' - \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2} \cos \phi' - c' \cos \phi' \quad (2)$$

onde σ_1' e σ_3' são tensões principais efetivas maior e menor, respectivamente.

A função de ruptura F pode ser interpretada como segue:

- $F < 0$, tensões dentro da envoltória de ruptura (elástico);
- $F = 0$, tensões na envoltória de ruptura (plástico);
- $F > 0$, tensões fora da envoltória de ruptura (plástico e deve ser redistribuído).

2.2.2 Vetores de peso próprio $p^{(e)}$

As forças geradas devido ao peso próprio do solo são computadas utilizando a técnica de acionamento da gravidade ou “turn on”, que envolve integrais sobre cada elemento de forma, como segue:

$$p^{(e)} = \gamma \int_{V^e} N^T dV^e \quad (3)$$

onde N são funções de forma do elemento e o sobrescrito e refere-se ao número do elemento. Esta integral avalia o volume V^e de cada elemento, multiplicado pelo peso específico aparente γ e distribui a força vertical da rede para todos os nós. Estas forças dos elementos são incorporadas num vetor de força de gravidade global que é aplicado numa rede de elementos finitos para gerar o estado tensões inicial do problema.

2.2.3 Determinação do Fator de Segurança

O Fator de Segurança (F_S) da encosta é definido como sendo o fator pelo qual os parâmetros originais de resistência ao cisalhamento têm que ser divididos para levar o talude à ruptura. Os parâmetros de resistência c' e ϕ' e que são na ruptura c_f' e ϕ_f' , relacionam-se, considerando a “técnica de redução de resistência ao cisalhamento” (Matsui e San, 1992), como mostrado nas equações a seguir:

$$c_f' = \frac{c'}{SRF} \quad (4)$$

$$\phi_f' = \arctan\left(\frac{\tan \phi'}{SRF}\right) \quad (5)$$

SRF é o “Fator de Redução de Resistência”. A “técnica de redução de resistência ao cisalhamento” permite a aplicação de diferentes fatores para os termos c' e ϕ' . Pode, no entanto, aplicar-se o mesmo fator para ambos os termos. Para encontrar o Fator de Segurança F_S , é necessário iniciar uma procura sistemática pelo SRF que levará o talude a ruptura. Quando este valor é encontrado, $F_S = SRF$.

2.2.4 Critério de ruptura

A indicação de ruptura, considerada no modelo é a de não convergência da solução (Zienkiewicz e Taylor, 1989), pois não ocorre mais mobilização de resistência necessária para se manter o equilíbrio.

Quando o algoritmo não converge dentro de um número máximo de interações especificadas pelo operador, a implicação é que nenhuma distribuição de tensões pode ser encontrada de forma que seja simultaneamente apta para satisfazer tanto ao critério de ruptura de Mohr-Coulomb como ao equilíbrio global. Se o algoritmo não satisfaz estes critérios, considera-se que ocorreu a “ruptura”. Ruptura de talude e a não convergência numérica ocorrem simultaneamente e são acompanhadas de um drástico crescimento dos deslocamentos nodais na rede.

3 ANÁLISES DE ESTABILIDADE DA ENCOSTA EM COROA GRANDE

Para aplicação de análises de estabilidade pelos métodos: de equilíbrio limite e de elementos finitos, será estudado a situação da encosta de Coroa Grande, localizada na vertente litorânea da Serra do Mar no Município de Itaguaí - Estado do Rio de Janeiro (Figura 1).

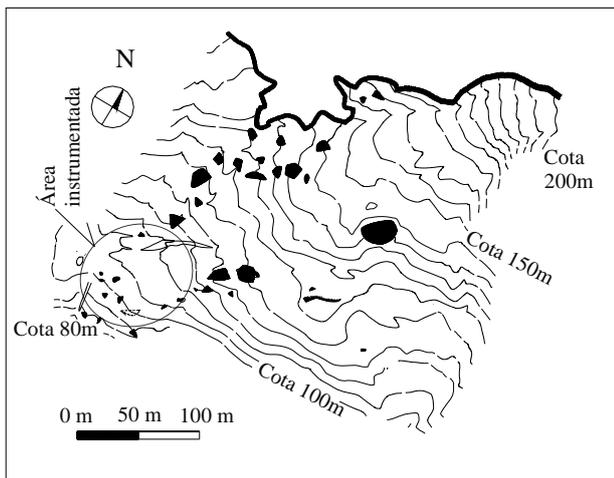


Figura 1. Encosta em Coroa Grande, Itaguaí-RJ.

A referida área foi instrumentada no período de 1986 a 1999 com inclinômetros, piezômetros e medidores de nível d'água, com isto dispõe-se, de acordo com a análise dos resultados da instrumentação, das posições: da superfície de

cisalhamento e do nível freático na seção da encosta (Aguiar, 2004).

O maciço da encosta é composto predominantemente de solo coluvionar na camada superior, sobre uma camada residual e nas camadas mais profundas identifica-se a rocha sã. Dados relativos aos parâmetros de resistências de pico e residual (γ , c' e ϕ') da região foram obtidos por Feitas (2004). Outros parâmetros, como E' e ν' , foram pesquisados na literatura para solos similares.

3.1 Análise de estabilidade por equilíbrio limite

Utilizando-se o método de Janbu para a seção mostrada na Figura 2, foram obtidos os resultados mostrados na Tabela 1. O método de Janbu foi escolhido por fornecer bons resultados com metodologia simples e permitir qualquer formato de superfície de cisalhamento.

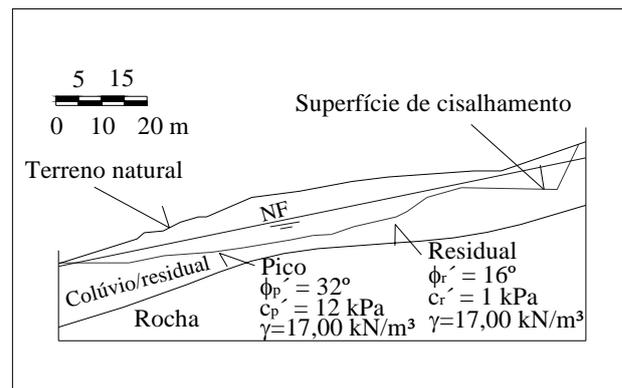


Figura 2. Encosta com NF e superfície de cisalhamento.

Considerou-se na análise:

- O nível freático máximo e a superfície de cisalhamento, observados através dos resultados dos medidores de nível d'água e inclinômetros, no período de 1986 a 1999 (Aguiar, 2004);
- Parâmetros de resistência de pico e residual, obtidos de ensaios laboratoriais de resistência ao cisalhamento direto e por torção (Freitas, 2004).

3.2 Análise de estabilidade por elementos finitos

Utilizando-se o método de análise de estabilidade de encostas por elementos finitos para a seção mostrada na Figura 3, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 1.

Considerou-se na análise:

- O nível freático máximo, observado através dos resultados dos medidores de nível d'água, no período de 1986 a 1999 (Aguiar, 2004);
- Parâmetros de resistência de pico e residual, obtidos de ensaios laboratoriais de resistência ao cisalhamento direto e por torção (Freitas, 2004), sendo os parâmetros adicionais necessários para o método: E' e ν' , obtidos da literatura científica para solos similares.

Na análise por elementos finitos, os parâmetros de resistência do solo: de pico e residual, são utilizados, no modelo na mesma análise.

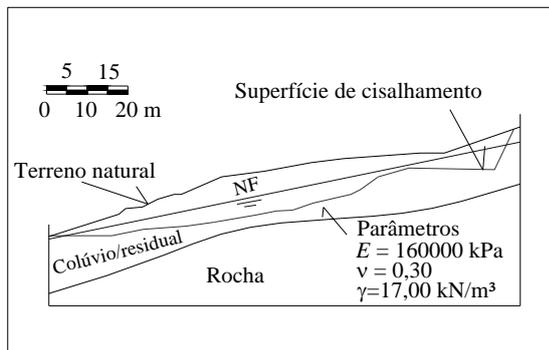


Figura 3. Seção da Encosta com superfícies freática.

3.3 Resultados

Os resultados obtidos nas análises são apresentados graficamente através das figuras 4 a 7 e a tabela 1 mostra os valores.

A Figura 4 apresenta a geometria das fatias e nível freático na análise pelo método de Janbu. A Figura 5 apresenta as máximas deformações cisalhantes considerando F_s , isto é, para o fator de redução de resistência equivalente ao crítico, 1,33. As figuras 7 e 8 mostram as deformações cisalhantes máximas para fatores de redução de resistência maiores que o crítico, 1,37 e 1,75, obtém-se, assim, uma idéia da possível evolução da zona de cisalhamento.

Para as análises foram utilizados os programas GEOSTUDIO (2004) e PHASE² (2005), utilizados respectivamente nas análises por equilíbrio limite e por elementos finitos.

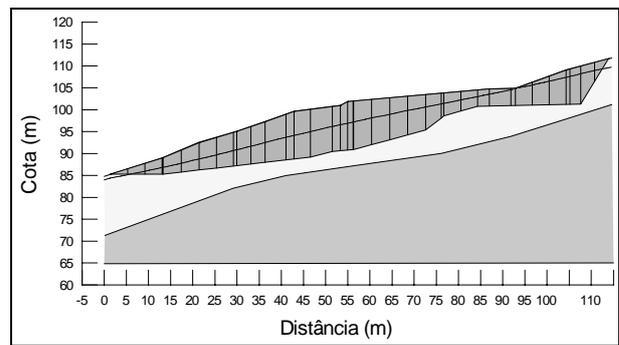


Figura 5. Análise por equilíbrio limite.

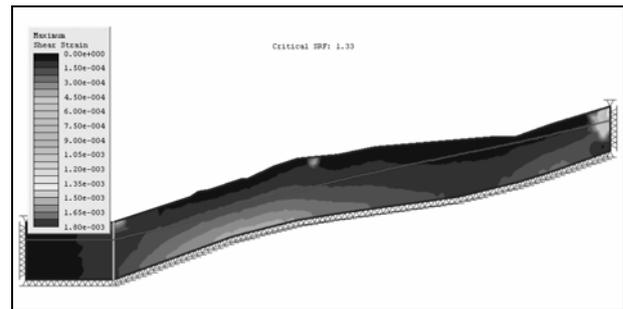


Figura 6. Máximas deformações cisalhantes, $SRF = 1,33$.

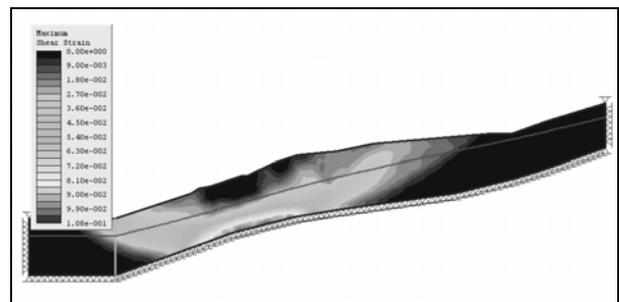


Figura 7. Máximas deformações cisalhantes, $SRF = 1,37$.

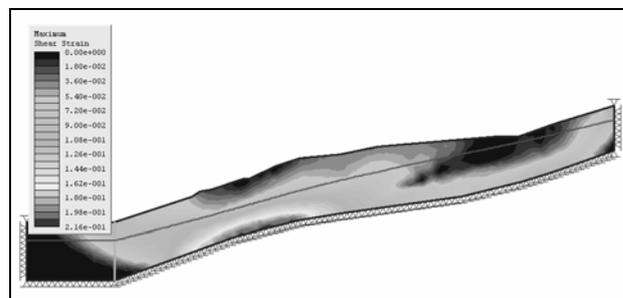


Figura 8. Máximas deformações cisalhantes, $SRF = 1,75$.

Tabela 1. Resultado das análises em Coroa Grande.

F_S	Método de equilíbrio limite	Pico	2,6
		Residual	1,0
MEF			1,3

4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos com o método de Janbu, observa-se que, caso considere-se parâmetros de resistência residuais, situação mais provável na zona de cisalhamento por já haver deformações, a resistência ao cisalhamento fora totalmente mobilizada ao longo da superfície de cisalhamento e o maciço está na condição limite de equilíbrio estático. Porém, considerando-se parâmetros de resistência de pico, as análises indicam a estabilidade da encosta.

Com a utilização do MEF obteve-se um fator de segurança F_S maior que a unidade, indicando a estabilidade da encosta. Com o MEF ambos os parâmetros de resistência, de pico e residual, são considerados na mesma análise.

Observa-se, com a visualização das deformações cisalhantes máximas, o formato da zona de ruptura. Utilizando-se valores de fatores de redução de resistência SRF maiores que o crítico, pode-se ter uma idéia do possível desenvolvimento da zona de cisalhamento da encosta. Verifica-se uma semelhança entre o formato da zona de cisalhamento obtida para $SRF=1,75$ e a superfície de cisalhamento obtida da instrumentação.

No caso estudado, onde a superfície de cisalhamento foi identificada através de inclinômetros e tendo em vista outros fatores como: forte heterogeneidade do maciço, comprovada nas amostras (Fretas, 2004) e possível anisotropia, entende-se que o resultado obtido com o método de Janbu, para parâmetros de resistência ao cisalhamento residual, estão condizem com os resultados da instrumentação que indicam que a encosta movimentou-se. Porém, pode-se também, verificar a importância da aplicação do MEF para análise de estabilidade de encostas, obtendo-se fatores de segurança coerentes e a forma da possível superfície de cisalhamento para casos onde a instrumentação não existe.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi originalmente iniciada através do projeto CTPetro-FINEP - Estudos geotécnicos de dutos enterrados com a COPPE-UFRJ. Os autores agradecem ao apoio e interesse contínuos dos Engenheiros Cláudio Amaral e Álvaro Maia da Costa do CENPES nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Aguiar, M. F. P. (2004), Análise de Movimentos em Encostas Naturais Através de Monitoramento por Instrumentação, 1º Seminário de Qualificação ao Doutorado, COPPE - UFRJ, Rio de Janeiro - RJ, p. 135.
- Anderson M. G. e Richards K. S. (1987), Slope Stability - Geotechnical Engineering and Geomorphology, John Wiley & Sons, New York.
- Freitas, N. C. (2004), Estudos dos movimentos de um colúvio no Sudeste brasileiro, tese de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, p. 106.
- GEO STUDIO (2004), Software tools for geotechnical solutions, 2004.
- Griffiths, D.V. e Smith, I. M. (2004), Programming the Finite Element Method, 4ª Edição, John Wiley and Sons, Chichester, New York.
- Griffiths, D.V. e Lane, P. A. (1999), Slope Stability Analysis by Finite Elements, Géotechnique 49, nº 3, p. 387-403.
- Janbu, N. (1968), Slope Stability Computations. Soil Mechanics and Foundation Engineering Report. Technical University of Norway, Trondheim, Noroega, 1968.
- Lambe, T. W. e Whitman, R. V. (1979), Soil Mechanics, John Wiley and Sons, New York, 553 p.
- Matsui, T. e San, K. C. (1992), Finite Element Slope Stability Analysis by Shear Strength Reduction Technique. Soil Found. 32, Nº 1, p. 59-70.
- Phase² (2005), 2D Finite Element Program for Calculating Stress and Estimating Support Around Excavations in Soil and Rocks, Verification Manual. Rocscience Inc.
- Zienkiewicz, O. C. e Taylor, R. L. (1989), The Finite Element Method volume 1, McGraw Hill, London, New York, 4th edition.