

1 Introdução

1.1. Relevância da pesquisa

A paisagem que se vê hoje certamente não é a mesma de alguns milhões de anos atrás. O relevo está em contínua mudança tanto devido ao trabalho de agentes internos formadores do relevo (como o tectonismo e o vulcanismo) quanto devido à ação de agentes externos, os modeladores do relevo. Os movimentos de massa fazem parte desse segundo grupo e, devido às drásticas perdas socioeconômicas (e também de vidas humanas) que acarretam, esses fenômenos costumam ser considerados como desastres naturais.

Existem numerosas classificações para os movimentos de massa disponíveis tanto na literatura internacional (Sharpe, 1938; Varnes, 1978; Hutchinson, 1988) quanto na brasileira (Freire, 1968; IPT, 1991; Augusto Filho, 1992). Apesar dessas classificações divergirem entre os aspectos a serem considerados para identificar um movimento de massa (como tipo de material, tipo de movimento, velocidade e teor de água), os escorregamentos (slides) são geralmente identificados por serem movimentos rápidos de superfície de ruptura bem definida.

Dentre os diversos tipos de movimento de massa, Amaral (1996) verificou que os escorregamentos são os acidentes geológicos mais catastróficos nas encostas do Rio de Janeiro. Segundo o inventário que organizou dos eventos ocorridos entre 1966 e 1996 no estado, os deslizamentos em solos residuais somaram quase 40% do total de movimentos de massa, seguidos de deslizamentos em depósitos de encostas.

Não é à toa que esses fenômenos são numerosos no Rio de Janeiro, e mais especificamente na região serrana do estado. É possível dividir seus deflagradores em dois grupos: um associado à redução de resistência e outro à redistribuição de tensões no solo. A perda de resistência se deve em grande parte à infiltração de água no solo e nosso clima de chuvas intensas torna este processo muito comum. Já as variações nas solicitações estão relacionadas às intervenções feitas nas encostas. Ou

seja, apesar de os escorregamentos serem um fenômeno natural, deve-se levar em conta que cortes, aterros e construções, influenciam na estabilidade do local quando mal calculadas (Fernandes e Amaral, 1996).

Portanto, visando um melhor planejamento urbano, se faz necessário desenvolver técnicas e metodologias para averiguar a estabilidade de taludes. Neste trabalho, a análise limite foi o método escolhido a ser aplicado a taludes tridimensionais. A teoria da análise limite baseia-se nos teoremas da plasticidade descritos por Drucker et al. (1952) (teorema do limite inferior e teorema do limite superior) e através dela é possível estabelecer limites para a carga possível de ser suportada pelo solo, a carga de colapso plástico.

A implementação numérica da análise limite, realizada através da linguagem computacional MATLAB (2004), requer a utilização tanto do método de elementos finitos quanto de otimização. O primeiro possibilita a discretização do meio contínuo em uma malha de elementos, de forma a representar a formulação contínua da análise limite de maneira aproximada. Também se faz uso de técnicas de otimização. A análise limite, segundo o teorema do limite inferior, procura encontrar o maior valor da carga de colapso para o qual o corpo ainda está em equilíbrio e também satisfaz o critério de ruptura. Isto é essencialmente um problema de otimização, pois se tem uma função a maximizar (a carga de colapso) sujeito a restrições: as de igualdade, que são as condições de equilíbrio, e as de desigualdade, relativas ao critério de ruptura. Apenas o critério de Drucker-Prager (1952) para casos tridimensionais foi implementado.

Para tornar a resolução mais eficiente, o problema de otimização foi colocado como um problema de programação cônica quadrática e resolvido pelo software comercial MOSEK (2012). Em uma programação cônica de segunda ordem, a função objetivo e as restrições de igualdade continuam sendo lineares, contudo o domínio das variáveis está restrito a um espaço cônico, implementado através das restrições de desigualdade. A grande vantagem de calcular a estabilidade por esses meios é a eficiência computacional desse método. Casos discretizados com aproximadamente dez mil elementos são resolvidos em questão de poucas dezenas de segundos.

No entanto, o objetivo deste estudo é o de avaliar a estabilidade de taludes através da determinação do fator de segurança e não de determinar cargas máximas

que possam ser aplicadas no solo. Para tanto, determinou-se o fator de segurança da encosta segundo a técnica da redução dos parâmetros de resistência do solo (Zienkiewicz et al., 1975). Dessa maneira, um fator de colapso foi calculado para cada fator de redução. O fator de segurança é o fator de redução para o qual o fator de colapso será 1, se este fator estiver majorando o peso próprio do material ou 0, se o fator de colapso estiver multiplicando uma força horizontal fictícia. Este último artifício foi pensado para tornar o problema mais estável, baseado no trabalho Sarma (1973) e já testado por Cruz (2013) e Tapia Morales (2013).

O mecanismo de colapso também pode ser visualizado, imprimindo-se as velocidades na geometria do problema. Como se verá, essas variáveis são encontradas resolvendo-se o problema dual associado ao problema de análise limite proposto. Para a formulação segundo o limite inferior, o problema dual será exatamente a formulação segundo o limite superior.

1.2. Objetivos

Este trabalho objetiva especificamente avaliar a eficácia da resolução de problemas tridimensionais de estabilidades de talude segundo a análise limite, colocada como um problema de otimização cônica quadrática. Para tanto, se comparou os fatores de segurança oriundos dessas análises com casos já resolvidos por meio de outros métodos, como equilíbrio limite e análise elastoplástica pelo método dos elementos finitos. Além dos fatores de segurança, também os mecanismos de colapso foram comparados.

Uma contribuição desta dissertação foi a de incorporar o efeito da poropressão na resistência do solo. O critério de ruptura leva em conta a tensão efetiva, função da tensão total e das poropressões atuantes. Dessa maneira, solos saturados apresentam menor resistência ao cisalhamento quanto maior a poropressão do solo. No entanto, quando não saturados, simula-se o aparecimento de uma coesão aparente, resultando em uma resistência maior.

Outra contribuição foi a de utilizar a análise limite em problemas de larga escala. Enquanto os exemplos até então propostos se limitavam a talude de algumas dezenas de metros, neste trabalho foi analisada a estabilidade da encosta em uma bacia hidrológica da ordem de 1 km².

1.3. Organização do trabalho

Além deste primeiro capítulo introdutório, este trabalho é organizado em mais quatro capítulos. O segundo capítulo, a seguir, apresenta a base teórica da análise limite, suas hipóteses e sua formulação como um problema de otimização. O capítulo também apresenta uma revisão bibliográfica sobre os trabalhos realizados até o momento, dando enfoque no uso da programação cônica quadrática e suas particularidades. Além disso, o capítulo faz uma revisão sobre o critério de ruptura utilizado neste trabalho, o de Drucker-Prager.

O terceiro capítulo desenvolve os detalhes da implementação numérica. Ele enfatiza quais elementos finitos foram usados, funções de interpolação e integração numérica, assim como destaca as transformações necessárias para colocar o critério de ruptura na forma cônica quadrática. Ao fim do capítulo se compreende as ferramentas numéricas utilizadas para encontrar tanto os fatores de colapso quanto o fator de segurança associado ao problema e seu mecanismo de colapso.

Os exemplos para a validação e comparação do programa com outros métodos estão apresentados no quarto capítulo. Esses exemplos são os mesmos de trabalhos encontrados na literatura. Alguns deles consideram o solo com poropressão nula enquanto outros a levam em conta.

Finalmente, o quinto e último capítulo resume as principais conclusões e aprendizados provindos do desenvolvimento deste trabalho. Ele também sugere futuras pesquisas, baseadas no conhecimento adquirido ao longo desta.