

1

Introdução

1.1. Relevância e Justificativa da Pesquisa

Os desastres naturais são hoje uns dos grandes problemas sócio-econômicos mundiais. Dentre os fenômenos que mais se destacam, se podem citar os terremotos, inundações e movimentos de massa. Estes fenômenos são objeto de interesse de grande parte de pesquisadores, planejadores e administradores públicos, pois acabam atingindo instalações importantes de infra-estrutura para um país como, por exemplo: oleodutos, gasodutos, aquedutos, estradas, linhas de transmissão, complexos industriais etc., bem como populações de centros urbanos.

Os fenômenos naturais como a chuva, terremotos, furações ou o vento, podem causar desastres quando superam certo limite de normalidade, medido geralmente através de um parâmetro. Os movimentos de massa são fenômenos naturais, atuantes na modificação do relevo de áreas montanhosas, os quais estão associados a vários fatores naturais que atuam nessas áreas os quais criam instabilidade nos taludes existentes. Com a ocupação humana dessas regiões esses processos naturais podem ser influenciados pela ação antrópica e sua ocorrência pode ser desastrosa, causando perdas de vidas humanas e prejuízos financeiros.

Atualmente a maioria dos esforços está centrada na análise de estabilidade, a qual deve ser contemplada desde vários pontos de vista, como são as possíveis rupturas globais, as quais envolvem o talude todo, as possíveis rupturas profundas e os deslocamentos superficiais. A instabilidade de taludes se traduz em uma série de movimentos que podem ser classificados baseados em distintos critérios.

- **Queda de blocos e partículas**

Ocorrem quando uma massa de solo ou de rocha deslocado do maciço por intemperismo caem por ação da gravidade. Uma queda de blocos é assim definida por uma ação de queda livre a partir de uma elevação, com ausência de superfície de movimentação.

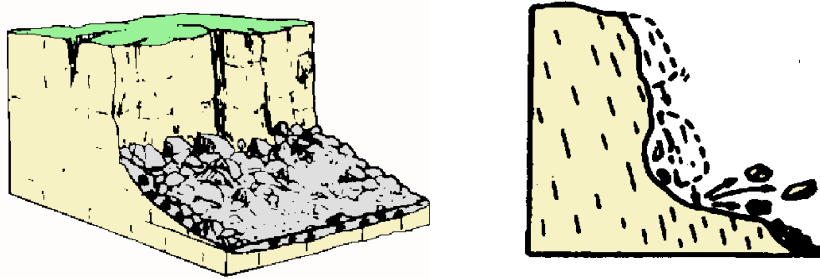


Figura 1.1 - Queda de blocos e fragmentos (Varnes, 1978).

- **Tombamento**

São movimentos geralmente associados à rocha, mas pode ocorrer em solos também, este movimento consiste na rotação para frente de uma das placas de rocha ou solo em torno a um eixo determinado. Nestes movimentos não se desenvolvem movimentos com cisalhamento interno.

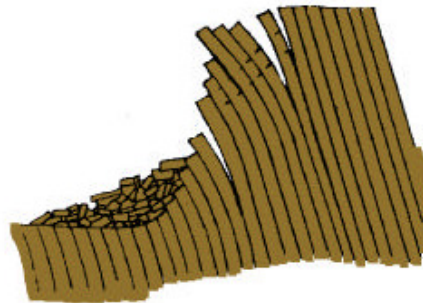


Figura 1.2 - Tombamento de colunas de rocha (Skinner, B.J.; Porter, S.C. 1992).

- **Escorregamento**

Movimentos que envolvem deformações e deslocamentos ao longo de uma superfície de ruptura bem definida. Neste caso, desenvolvem-se movimentos com cisalhamento interno onde o centro de gravidade da massa em movimento se desloca para baixo e para fora do talude devido à ação da gravidade, as velocidades nestes movimentos podem variar desde uma velocidade média ou

moderada até velocidades altas, a superfície de ruptura pode ter diferentes geometrias de acordo com o tipo de material presente no talude. Tal superfície pode ser rotacional quando os movimentos ocorrem numa superfície de ruptura circular em materiais homogêneos, ou translacional quando o movimento está associado a uma superfície de ruptura planar e ocorre quando há um contraste de resistência e permeabilidade entre os materiais. Este movimento é comum em solos residuais anisotrópicos. A superfície de ruptura também pode ser do tipo composto quando está associado a superfícies que tem qualquer forma. Este tipo é característico em solos residuais, geralmente ocorre em materiais heterogêneos e anisotrópicos.

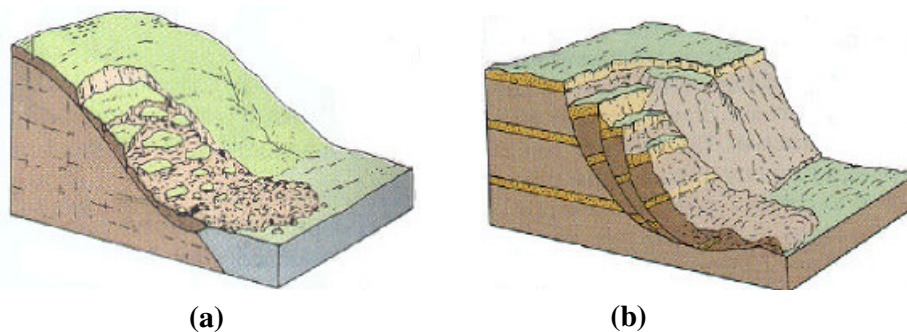


Figura 1.3 - Tipos de escorregamentos (a) Traslacional (b) Rotacional
(Skinner, B.J. & Porter, S.C , 1992).

- **Corridas**

São formas rápidas de escoamento, com velocidades altas (maiores de 10 km/h), é gerada pela perda de atrito interno no solo em virtude da destruição de sua estrutura em presença de água em excesso provocando a fluidificação. Este processo de fluidificação pode ser causado por:

- Adição de água em areias.
- Ações das solicitações dinâmicas.
- Processo de amolgamento no caso de argilas sensíveis.

A instabilidade do talude será deflagrada quando as tensões cisalhantes mobilizadas se igualarem à resistência ao cisalhamento como se pode ver na Figura 1.4. esta condição pode ser atingida com o aumento das tensões cisalhantes mobilizadas ou pela redução da resistência. Varnes (1978) divide os mecanismos deflagradores em dois grupos. A tabela 1.1 propõe uma classificação adaptada.

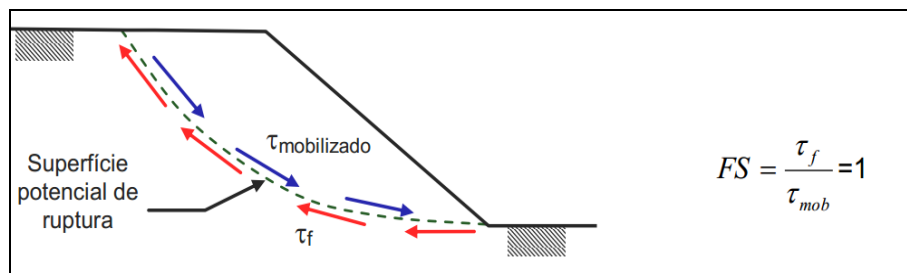


Figura 1.4 - Tensões cisalhantes mobilizadas frente à resistência ao cisalhamento.

Tabela 1.1 Fatores deflagradores dos movimentos de massa. (Varnes, 1978)

Ação	Fatores	Fenômenos geológicos/antrópicos
Aumento de solicitação	Remoção de massa (lateral ou de base)	-Erosão. -Escorregamentos. -Cortes.
	Sobrecarga	-Peso de água da chuva, neve, granizo. -Acumulo de material. -Peso da vegetação. -Construção de estruturas, aterros, etc.
	Solicitações dinâmicas	-Terremotos, ondas, vulcões, etc. -Explosões, tráfego, sismos induzidos.
	Pressões Laterais	-Águas em trincas. -Congelamento. -Material expansivo.
Redução da resistência	Características inerentes ao material (geometria, estruturas, etc.)	Características geomecânicas do material, tensões
	Mudanças ou fatores variáveis	Intemperismo: redução na coesão, ângulo de atrito Variação das poropressões.

O Brasil, devido às condições climáticas e grandes maciços montanhosos ao longo do seu litoral, está muito susceptível à ocorrência dos movimentos de massa. Além da frequência elevada devido às condições naturais, ocorre também um grande número de acidentes associados à atuação antrópica nas vertentes.

Uma das atuações antrópicas que mais preocupam, no Brasil, é a ocupação irregular das encostas por favelas, que acabam fazendo cortes nos taludes e desmatamentos, propiciando uma maior susceptibilidade à ocorrência dos movimentos de massa.

Recentes acontecimentos como os deslizamentos que ocorreram na região serrana de Rio de Janeiro (Figura 1.5), tragédia que se abateu sobre esta região não foi um caso isolado ou fortuito. Eventos semelhantes sempre ocorreram na Serra do Mar, que se estende do Rio de Janeiro e Espírito Santo até Santa Catarina. O mecanismo desses deslizamentos segue sempre um padrão conhecido e anunciado, no qual se tem a saturação do solo provocada por chuvas contínuas, seguida por curtos períodos de intensa precipitação pluviométrica, causando inundações e os movimentos de massas conhecidos como corridas de detritos e lama ou corridas, este foi o caso da Região Serrana do Rio de Janeiro no ano 2011 onde a chuva castigou as Regiões de Teresópolis, Petrópolis e Nova Friburgo.



Figura 1.5 - Deslizamentos ocorridos na região serrana de Rio de Janeiro.

Então do ponto de vista geotécnico existe a necessidade de conhecer o comportamento das estruturas geotécnicas frente à ação dos diferentes fatores mencionados anteriormente. Esta necessidade tem levado os engenheiros a realizar simulações geotécnicas usando programas especializados que são desenvolvidos a partir da solução das equações matemáticas que governam o problema. Muitos destas ferramentas existentes atualmente usam formulações numéricas como: Método dos Elementos Finitos (MEF), Método das Diferencias Finitas (MDF), Método dos Elementos Discretos (MED), os quais permitem

conhecer resultados de interesse para os engenheiros geotécnicos como o campo de tensões, velocidades, deslocamentos, fator de segurança da estrutura, e propagação de fissuras em maciços rochosos.

1.2. Estado da Arte

Os problemas de estabilidade dos taludes têm sido resolvidos, tradicionalmente, pelo método do equilíbrio limite (Chen, 1975). No método do equilíbrio limite, assume-se uma superfície de ruptura de forma simples que pode ser planar, circular, espiral logarítmica fazendo, ainda, hipóteses sobre a distribuição de tensões ao longo da superfície hipotética de ruptura (Chen, 1975). Desta maneira, o problema é resolvido pela estática, buscando a posição mais crítica da superfície de ruptura.

A solução destes problemas pode também ser obtida via Análise Limite o qual esta baseada nos teoremas limites da plasticidade (Drucker et. al., 1952). Os métodos da análise limite possuem uma base sólida, fundada em preceitos rigorosos da teoria matemática da plasticidade (Chen, 1975).

Os problemas de estabilidade de talude podem ser formulados via análise limite, permitindo a sua solução pelo MEF, conferindo à técnica generalidade e flexibilidade para tratamento de condições de contorno, geometria e carregamentos complexos. A programação matemática tornou-se uma ferramenta muito útil para a solução do problema de análise de limite, utilizando diferentes técnicas de programação para o desenvolvimento de tais problemas. As diferentes ferramentas numéricas utilizam otimizadores que ajudam a diminuir o tempo de processamento, tornando-se desta forma computacionalmente eficiente. Atualmente vários pesquisadores estão fazendo uso da técnica de programação conhecida como Programação Cônica de Segunda Ordem (SOCP, por suas siglas em inglês) a qual se mostra vantajosa quando é acoplada com otimizadores comerciais. Um dos principais algoritmos de SOCP é desenvolvido por Andersen et. al. (2003), o qual tem sido implementado no software Mosek (Mosek ApS, 2012), que mostrou-se vantajoso, devido que consideráveis problemas de grande escala utilizando este otimizador foram resolvidos com uma rapidez notável como

é mostrado nos trabalhos de Makrodimopoulos e Martin (2005, 2006); Krabbenhoft, Lyamin e Sloan (2006).

1.3. Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é aplicação das formulações da Análise Limite usando a ferramenta numérica do MEF no Problema de Estabilidade de Talude, e seu uso para a determinação do fator de segurança, acoplando a esta ferramenta as técnicas de programação matemática, sendo uma delas a técnica de SOCP.

De acordo com o objetivo principal descrito, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Difundir as técnicas da análise limite para estudo de problemas de estabilidade de taludes, estudando alguns casos para ver seu apropriado uso.
- Fazer uso da programação matemática para desenvolver a ferramenta numérica usando o MEF que permita encontrar o fator de segurança ao colapso das estruturas geotécnicas via análise limite.
- Mostrar que problema de análise limite em materiais geotécnicos, pode ser formulado como um problema SOCP.
- Estudar a eficiência da formulação e dos algoritmos do problema da determinação do fator de segurança de um talude via problema de otimização cônica quadrática.
- Mostrar o uso do método de redução da resistência do material para encontrar o fator de segurança (FS) das estruturas geotécnicas.
- Propor algumas sugestões para futuras pesquisas na aplicação da análise limite para a avaliação do fator de segurança do problema de estabilidade de taludes.

1.4. Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, iniciando com este capítulo introdutório (Capítulo 1), seguido do Capítulo 2, onde se faz uma revisão

bibliográfica da formulação do problema da análise limite, das considerações realizadas para o desenvolvimento da solução deste problema. Os teoremas de limite superior e inferior também são apresentados neste capítulo. Além disso, são incluídos neste capítulo os principais critérios de escoamento utilizados nos materiais geotécnicos. Também se revisa dentro deste capítulo alguns aspectos da programação cônica e seu uso no problema da análise limite.

No Capítulo 3 é descrita a ferramenta numérica baseada na formulação numérica de análise limite pelo MEF a qual é utilizada para o estudo da estabilidade do talude. Além disso, é apresentado como o problema de análise limite, no estudo de estabilidade de taludes pode ser colocado como um problema de programação matemática o qual pode ser resolvido utilizando a técnica de programação cônica da segunda ordem. Neste capítulo apresenta-se como a técnica de redução da resistência do material é acoplada à ferramenta dos elementos finitos para obter o fator de segurança da estrutura do talude.

No capítulo 4, apresentam-se alguns exemplos de validação e aplicação, onde se mostra o uso da ferramenta numérica implementada no problema de estabilidade de taludes via análise limite. Nos casos analisados fazem-se comparações na eficiência do algoritmo usando a formulação na forma convencional, na forma cônica quadrática, e usando o código comercial de otimização Mosek (Mosek ApS, 2012). Desta maneira compara-se a eficiência em termos de tempo de processamento da ferramenta implementada ao colocar o problema em diferentes formas.

No capítulo 5, apresentam-se as conclusões e as sugestões para próximos trabalhos relacionados a este trabalho de dissertação.