

# 1

## Introdução

A estabilidade de taludes ainda forma parte dos problemas principais para a engenharia geotécnica, apesar dos progressos realizados e a compreensão do mecanismo de ruptura do talude, sua análise tem sido geralmente insuficiente para evitar uma série de ruptura de taludes naturais ou artificiais (produzidos pelo homem), causando grande perda de vidas e propriedades ao redor do mundo. Vários pesquisadores têm dedicado tempo e o esforço para obter um melhor entendimento da estabilidade de taludes. Inicialmente Fellenius (1927), o qual sugeriu o método das fatias, assim com o percurso do tempo, vários outros métodos foram propostos com a intenção de facilitar a análise da estabilidade de taludes, sendo todos estes métodos convencionais baseados no conceito do equilíbrio limite, no qual uma série de pressupostos é feito pra satisfazer o equilíbrio de forças e momentos na formulação do fator de segurança.

Os métodos de equilíbrio limite propostos para a análise de estabilidade de taludes são avaliados pela redução da resistência do solo por um determinado fator que leve ao solo a uma condição incipiente da ruptura, durante tal processo cada ponto da superfície de ruptura dentro da massa do solo é assumido no estado critico simultaneamente e o fator de segurança se considera como constante ao longo da superfície de ruptura. Contudo, tem-se que as soluções de equilíbrio limite negligenciam as condições de compatibilidade e as relações tensão-deformação das leis constitutivas que simulam o comportamento do solo, de modo que a solução do fator de segurança calculado com os métodos de equilíbrio limite é adequada no caso em que seja independente das condições antes mencionadas.

Muitas pesquisas têm mostrado que todos os pontos da superfície de deslizamento não falham simultaneamente no estado crítico, sendo a ruptura progressiva, e o comportamento do solo é dependente ou influenciado pelos seguintes fatores: (i) história e tensões (NA, PA); (ii) relação tensão-deformação (leis constitutivas); (iii) trajetória de tensões (a sequência de construção de um aterro ou escavação de um talude); (iv) a dependência da resistência do solo sobre

a distribuição de tensões dentro da massa de solo e a trajetória de tensões na ruptura (amolecimento ou endurecimento). Portanto, a presença do método dos elementos finitos se faz presente na análise de estabilidade de taludes com Clough e Woodward (1967), sendo propostas uma série de modificações e avanços na formulação dos elementos até a presente dissertação.

Outro aspecto importante na análise de estabilidade de taludes é a consideração da rotação das tensões principais ao longo da superfície de ruptura nos solos moles como o caso de argilas normalmente adensadas, onde a resistência não drenada diminui à medida que a direção da tensão principal maior se desvia da vertical ( $i = 0^\circ$ ) em direção à horizontal ( $i = 90^\circ$ ). O ângulo  $i$  é definido como o ângulo entre a vertical e a direção da tensão principal maior.

Para um determinado solo, por exemplo, o modo de compressão ( $i = 0^\circ$ ) mostra um comportamento frágil (relação deformação-amolecimento), com o pico de tensão gerado a pequenas deformações, enquanto o modo de extensão ( $i = 90^\circ$ ) resulta em um comportamento muito mais resiliente, onde o pico da tensão ocorre a grandes deformações, cerca de 10 vezes maior do que o modo de compressão.

A trajetória de tensões que o solo experimenta em um talude depende da localização do elemento no solo. Por exemplo, nas proximidades da crista a potencial superfície de ruptura se encontra sob a condição de carregamento semelhante à compressão em deformação plana, enquanto que um solo perto do pé do talude está sendo carregado no modo de extensão em deformação plana. Segundo Ladd (1986) a trajetória de tensões na porção intermediária pode ser simulada pelo modo simples de cisalhamento direto.

Em contraste, a maioria dos solos encontrados na natureza são inherentemente anisotrópicos por causa do modo de deposição ou a metamorfose das tensões após a deposição, ou ambos. Há evidências consideráveis na literatura, mostrando que a estabilidade de taludes é influenciada pela não homogeneidade e anisotropia na resistência (Lo, 1965; e outros).

Por outro lado se tem que as abordagens determinísticas tradicionais de estabilidade de taludes utilizam estimativas do valor único para cada variável considerada no cálculo da estabilidade de taludes, de modo que a saída desta análise é uma estimativa determinística do valor único, determinando se o talude é estável ou não, podendo ser expressa como um fator de segurança, o qual, ao mesmo tempo pode representar uma interrogante determinada dentro do projeto.

Atualmente a capacidade para modelar com precisão o desempenho do talude é comprometida por uma série de incertezas nas propriedades do solo consideradas na modelagem do problema, sendo estas incertezas inevitáveis devido aos materiais principalmente naturais com que lida a engenharia geotécnica. Estas propriedades podem ser obtidas a partir de ensaios de campo e/ou de laboratório, variando de acordo com certos critérios de variação como: a localização do ponto de exploração, número de amostras, métodos de amostragem (intacta ou disturbada), métodos de execução de ensaios de laboratório, interpretação dos resultados de ensaios de laboratório, método de análise, erro instrumental e erro humano, sendo considerados estes critérios como incertezas, o resultado é que o comportamento exato do talude não pode ser previsto com precisão, motivo pelo qual uma abordagem determinística clássica forneceria resultados pouco confiáveis.

Consequentemente, a abordagem probabilística oferece um tratamento sistemático das incertezas correspondentes às propriedades dos materiais envolvidos na análise de estabilidade de taludes. Em termos de probabilidade, as incertezas podem ser relacionadas quantitativamente para a confiabilidade de um projeto.

### **1.1. Objetivos**

Os objetivos principais da presente dissertação são: (1) encontrar as diferenças entre a utilização do método dos elementos finitos e os métodos de equilíbrio limite em condições de deformação plana; (2) investigar as distribuições de tensões ao longo da superfície de ruptura de acordo com as distribuições de tensões iniciais, medindo o comportamento das zonas em extensão e compressão; (3) familiarização com os conceitos de confiabilidade; (4) determinar as diferenças entre os três métodos probabilísticos (i.e., monte carlo, hipercubo latino, estimativas pontuais alternativas).

Nesta dissertação foram considerados diversos exemplos de aplicação principalmente em solos coesivos, estes exemplos foram previamente analisados por diversos pesquisadores, a fim de comparar os resultados obtidos. O método dos elementos finitos foi utilizado para as análises numéricas nas quais o

equilíbrio, compatibilidade, relações tensão-deformação e condições de contorno foram satisfeitas sem nenhum pressuposto. O comportamento do solo foi simulado nas análises numéricas pelos modelos: Mohr Coulomb e Cam Clay Modificado.

## **1.2. Organização da dissertação**

Nesta secção apresenta-se a organização desta dissertação. O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica da evolução através da história dos principais conceitos envolvidos na presente dissertação.

Conceitos gerais sobre as abordagens probabilísticas considerando a aplicabilidade dos elementos finitos, como também as principais limitantes dos métodos de equilíbrio limite na análise de estabilidade de taludes são apresentadas nos Capítulos 2 e 3. Além disso, apresenta-se a influência da anisotropia do solo considerada na análise de estabilidade de taludes.

A referência teórica sobre a análise de confiabilidade na estabilidade de taludes é apresentado no Capítulo 4, dando ênfases aos métodos utilizados nos exemplos de aplicação.

O Capítulo 5 mostra os exemplos e resultados obtidos dos diversos exemplos de aplicação analisados na presente dissertação. Continuando com a apresentação das conclusões e sugestões de pesquisas futuras mostradas no Capítulo 6, que engloba as conclusões mais relevantes obtidas dos exemplos de aplicação, e finalmente o Capítulo 7 apresenta as referências utilizadas no desenvolvimento da presente dissertação.