

5 Conclusões e Sugestões

Neste capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho, que tem por objetivo principal a aplicação das formulações da Análise Limite usando a ferramenta numérica do método de elementos finitos (MEF) no Problema de Estabilidade de Talude, acoplando a esta ferramenta as técnicas de programação matemática, nomeadamente, a técnica de programação cônica de segunda ordem (SOCP).

5.1. Conclusões

- Os resultados indicam a viabilidade de utilizar a Análise Limite como ferramenta de estudo para este tipo de problema.
- A programação matemática é uma ferramenta muito importante, já que através de distintos algoritmos permite resolver problemas de otimização de uma função com múltiplas variáveis, as quais estão sujeitas a restrições de igualdade e desigualdade.
- É possível colocar o problema de Estabilidade de Taludes como um problema de programação matemática. Neste trabalho usa-se a formulação mista para formular o problema da Análise Limite. As condições de equilíbrio são satisfeitas apenas globalmente, nas direções dos graus de liberdade do modelo. Elas representam as restrições de igualdade que formam um sistema de equações. As variáveis do projeto são as tensões em cada elemento da malha utilizada e o fator de colapso da estrutura. O critério de escoamento, definido para cada elemento da malha, são normalmente funções não lineares e representam as restrições de desigualdade. A função objetivo é o fator de colapso que deve ser maximizado.
- Os valores para o vetor inicial do processo de otimização influencia significativamente nos resultados quando se utiliza o otimizador do Matlab (*fmincon*). Nesse caso, recomenda-se utilizar a solução do problema na Análise

Linear Elástica como solução inicial para aumentar a eficiência computacional do algoritmo.

- Existem recursos computacionais que melhoram o tempo de processamento tais como: uso da matriz no formato esparsa, o uso de otimizadores para a solução do problema de programação matemática conjuntamente a mudança na forma de colocar o critério de resistência do solo nos problemas.
- Os exemplos de validação e alguns exemplos de aplicação mostram que a ferramenta numérica implementada utilizando tanto os otimizadores do Matlab e Mosek proporciona resultados (fator de segurança e fator de colapso) muito próximos.
- O algoritmo de otimização implementado utilizando o otimizador do programa Mosek e utilizando o critério de resistência na forma cônica quadrática foi mais eficiente em termos de tempo de processamento em comparação do que quando se utiliza o otimizador do Matlab que tem a tendência de incrementar o tempo de processamento exponencialmente à medida que se incrementa o número de elementos.
- Nos exemplos de validação se consegue perceber a eficiência da ferramenta implementada com o uso de otimizador do programa Mosek com o critério de escoamento na forma cônica quadrática utilizando um tempo máximo de 4.35 segundos nos casos dos exemplos em 2D e 7.39 segundos no caso do exemplo em 3D. Além disso, os resultados obtidos com a ferramenta implementada são muito próximos dos resultados obtidos via solução analítica ou com os resultados obtidos por outros pesquisadores. A validação no caso 3D é feita de maneira indireta, no qual se analisa um talude em estado plano de deformação para o qual o fator de segurança para o caso 2D e 3D e os fatores de segurança obtidos são bastante próximos.
- Nos dois primeiros exemplos de aplicação são analisados taludes homogêneos e um talude de material heterogêneo e os resultados obtidos são comparados com resultados do programa comercial de elementos finitos Plaxis 2D que utiliza a análise elastoplástica para seu desenvolvimento. A ferramenta da análise limite se torna mais eficiente quando se utiliza o programa Mosek com o critério de escoamento na forma cônica quadrática, empregando um tempo máximo de 3.96 e 3.61 segundos nos dois casos respectivamente do primeiro

exemplo (talude de solo homogêneo), e emprega um tempo de 3.63 segundos no segundo exemplo (talude de solo heterogêneo). Esses tempos em comparação do tempo utilizado pela análise elastoplástica com o programa Plaxis são menores. Pode-se dizer que a ferramenta da Análise Limite é competente em relação ao tempo de processamento frente à análise elastoplástica. Os fatores de segurança (*FS*) obtidos pelas diferentes análises são bastante próximos. As diferenças entre eles diminuem quando o número de elementos da malha de elementos finitos é incrementado. Além disso, o mecanismo de colapso obtido com o campo de velocidades de deformação via solução dual do problema de programação matemática no caso da análise limite, é muito parecido com o mecanismo de colapso obtido com o campo de deslocamentos que se obtém com a análise elastoplástica através do Plaxis.

- Nos exemplos da primeira aplicação pode-se ver que o mecanismo de colapso obtidos através da análise limite e a análise elastoplástica, são concordantes com o tipo de material que compõe o talude. No caso do talude composto por material com baixa coesão e alto atrito a superfície de ruptura é superficial. No caso do talude composto por material de alta coesão e baixo atrito a superfície de ruptura é profunda.
- No segundo exemplo pode-se ver que o mecanismo de colapso através da análise limite e a análise elastoplástica, são concordantes com os materiais que compõem o talude. Neste caso a superfície de ruptura passa pelo material com menor resistência ou seja o material mais superficial.
- No terceiro exemplo de aplicação efetua-se uma a análise de um talude infinito com a frente de umedecimento avançando dentro de um solo não saturado, o cálculo do fator de segurança é feito para cinco diferentes profundidades de infiltração e para o caso de fluxo permanente via análise limite, acoplado à ferramenta desenvolvida o otimizador do programa Mosek. Os resultados se aproximam aos valores do fator de segurança obtidos via solução analítica na profundidade de 1.0 m do solo. Pode-se concluir que o plano potencial de ruptura se encontra na profundidade de 1.0 m. O tempo da análise varia entre 1.57 a 1.83 segundos.
- No quarto exemplo de aplicação é analisado um talude de uma encosta natural da zona montanhosa de Mettman Ridge no estado americano de Oregon, que

foi analisado por R. Borja (2011). Os valores dos fatores de segurança obtidos para os tempos $t = 0, 24, 25.7$ horas são de 1.43, 1.24 e 1.086 respectivamente. Quando é utilizada a ferramenta da análise limite acoplado otimizador do Mosek e usando o critério de resistência na forma cônica quadrática, os tempos de processamento da análise são de 2.69, 1.79 e 1.75 segundos respectivamente. Os resultados foram comparados com os obtidos por Borja através do método do equilíbrio limite sendo estes muito parecidos aos obtidos com a ferramenta implementada.

- No quinto exemplo de aplicação se estuda o caso do talude confinado (3D). Pode-se concluir que a ferramenta implementada utilizando otimizador do Mosek torna-se eficiente para problemas de grande escala, empregando 1.32 minutos para uma malha refinada com 3300 elementos, onde o fator de segurança é de 1.60 sendo este maior do que no caso de estado de deformação plana devido ao efeito do confinamento do talude.
- O uso do conceito da dualidade é importante na solução dos problemas via programação matemática por que através dele é possível obter através da solução do problema dual e, através dos multiplicadores de Lagrange desse problema, informações importantes e adicionais. Esses multiplicadores estão associados ao problema dual. No caso de problemas de estruturas geotécnicas, as velocidades de deformação associadas aos multiplicadores de Lagrange do problema primal, baseado no Teorema de Limite Inferior, representam as variáveis deste problema no problema dual associado ao Limite Superior. Estas variáveis permitem obter o mecanismo de colapso da estrutura.

5.2. Sugestões

- Existem problemas de grande importância na Engenharia Geotécnica onde o colapso é causado pelas forças sísmicas, como são os casos das barragens, taludes naturais, rejeitos de mineração, etc. A proposta é, então, elaborar uma formulação para abordar esta classe de problemas e efetuar a implementação numérica da análise limite.

- Neste trabalho se utiliza alternativamente para melhorar a eficiência do algoritmo implementado uma ferramenta de otimização comercial como é o caso do programa Mosek, por que como se percebeu não é só necessário mudar o critério de escoamento da forma convencional para a forma cônica quadrática como também se deve utilizar um algoritmo de otimização de forma eficiente como o algoritmo de pontos interiores do otimizador do Mosek. Devido a esta constatação, torna-se muito útil programar um algoritmo desse tipo que permita uma solução eficiente do problema de programação cônica quadrática.
- É importante ter em conta que para casos de geometrias muito irregulares será necessário fazer a implementação com outros tipos de elementos como podem ser elementos triangulares em 2D e tetraédricos em 3D, os quais inclusive podem ser até quadráticos ou cúbicos.
- Sugere-se um estudo mais sofisticado do problema de percolação de água no solo, onde a ferramenta de análise limite consiga interagir dinamicamente com uma implementação do problema de fluxo transiente do solo, ou seja realizar uma análise completa do problema fluxo acoplado à estabilidade de taludes.