

5 Considerações finais

Este trabalho procurou averiguar a estabilidade de taludes tridimensionais através da análise limite. O teorema do limite inferior foi então colocado como um problema de otimização cônica quadrática e combinado ao método dos elementos finitos. A reformulação do problema de otimização não linear para de otimização cônica de segunda ordem torna a sua resolução muito rápida. Esta comparação foi bem apresentada no trabalho de Cruz (2013). Para tanto, é preciso que o critério de ruptura do material possa atender ao formato do espaço cônico quadrático, como é o caso do critério de Drucker Prager.

Como resultado da análise, se obtém o fator de segurança da encosta assim como o seu mecanismo de colapso. Os exemplos de validação da ferramenta provêm de artigos que fazem uso de outras técnicas para o cálculo da estabilidade, como equilíbrio limite e análise elastoplástica por elementos finitos. Foram testados tanto exemplos de solos com poropressão nula quanto casos em que há distribuição de poropressão no solo, podendo assim simular solos saturados ou não saturados.

Nos exemplos com poropressão nula, os fatores de segurança gerados pela análise limite ficaram sempre maiores daqueles com os quais foram comparados. A diferença percentual entre os resultados foi da ordem de 10%. Uma boa justificativa para essa diferença seria os diferentes critérios de ruptura utilizados. Enquanto os exemplos da literatura fazem uso do critério de Mohr Coulomb (por vezes também atendendo a uma lei de fluxo não associada), na análise limite o de Drucker Prager foi utilizado.

Portanto, uma primeira sugestão para trabalhos futuros seria de implementar a análise limite tridimensional tendo como critério de ruptura o de Mohr Coulomb. Como a equação deste critério tridimensional não pode ser colocada na forma cônica quadrática, sugere-se que se faça uso da otimização semidefinida (Krabbenhoft et al, 2008; Martin e Makrodimopoulos, 2008). Este tipo de otimização é computacionalmente tão eficaz quanto a programação cônica

quadrática e é adequada para lidar com o critério de Mohr Coulomb em 3D, como já vem sendo feito em alguns trabalhos.

Na verdade, mesmo com o solo saturado ou não saturado o mesmo padrão foi observado. No entanto, para o exemplo do talude natural em Oregon, retirado do trabalho de Borja et al. (2012), existem outras explicações para o FS resultante da análise limite ser mais elevado do que o que se esperava. Borja et al. (2012) não confirmaram haver ruptura do talude para os parâmetros de resistência estipulados e, ao longo de todo o artigo, eles se referiam a mecanismos de deformação, fazendo apenas suposições sobre o provável mecanismo de colapso do talude.

Também vale atentar para o fato de que métodos diferentes de análise de estabilidade costumam gerar resultados diferentes. Sloan (2013) compara o fator de segurança obtido por análise limite para o exemplo de talude com camada fraca com os encontrados através de equilíbrio limite e também de análise elastoplástica. Para ambas análises houve diferença nos FS obtidos. A diferença percentual entre, por exemplo, o resultado de Sloan e provindo da análise elastoplástica realizada através do PLAXIS foi de 5.5%. Ou seja, a análise limite neste caso também gerou fatores de segurança maiores.

Apesar dessas diferenças na determinação do fator de segurança nos exemplos testados, o método impressionou, ao longo de todo o trabalho, ao prever adequadamente a área que colapsa. O mecanismo de colapso foi sempre previsto com muita exatidão em relação aos resultados dos artigos com os quais foi comparado.

Além disso, o método de análise limite proposto por este trabalho é atrativo pela grande rapidez em solucionar grandes problemas. Malhas de geometria complexas, em problemas que levam em conta a poropressão do solo, e com 250 mil nós foram resolvidos em aproximadamente 1 hora. Em situações menos adversas, é possível obter o resultado na ordem de centenas de segundos.

Outro padrão que se repetiu ao longo do trabalho foi do fator de segurança diminuir com o aumento da discretização da malha. No primeiro exemplo simulado, o do talude infinito com poropressão nula, isto também aconteceu para o fator de colapso. Apesar dos fatores de segurança não divergirem de mais de 3% entre os de malha mais refinada e os de menos, isto indica que o cálculo para o fator de segurança é aproximado por cima. Portanto, outra sugestão seria a de implementar

elementos finitos com outras funções de interpolação, de maneira a que o fator de segurança fosse aproximado por baixo. Isto poderia ser alcançado, segundo Zouain et al. (2014) se as tensões foram interpoladas linearmente no elemento e as velocidades, consideradas constantes.

Para o exemplo do talude natural de Oregon, realizou-se primeiramente a análise de fluxo. Ela foi simulada através do programa desenvolvido por Miqueletto (2007) que faz uso do método dos elementos finitos para resolver a equação de Richards para análise de fluxo em solos saturados ou não saturados. O programa de Miqueletto tem a vantagem de possibilitar a resolução de problemas de grande escala em um tempo razoável e com economia de memória computacional. Com os dados de poropressão no solo, é possível então proceder à análise de estabilidade. Como cada um desses programas utiliza elementos finitos de formatos diferentes (um usa hexaedros e o outro, prismas) esta transformação mesmo sendo parcialmente automática requer um esforço manual. Uma boa sugestão seria de automatizar completamente o fluxo de informação entre estes dois programas.

Outro trabalho possível, baseado neste, seria o de incorporar materiais com baixos ângulos de atrito. Na implementação atual, esta configuração não é executável pois a matriz D da Eq. (3.22), que transforma o vetor de tensões no auxiliar \mathbf{p} , ficaria não invertível.

O último exemplo desta dissertação, o da encosta na bacia do Quitite, levantou outra questão importante sobre a aplicabilidade da análise limite para problemas de larga escala. Apesar de gerar resultados plausíveis, esta técnica delimita uma área de ruptura por análise. Esta área será, portanto a mais instável da região. Para contornar isso, foi proposto que se façam análises sucessivas. Para cada nova análise, os nós que anteriormente indicavam ruptura seriam então impostos como fixos, assim como é feito na atribuição da condição de contorno.

Em problemas em que o método do talude infinito não é uma boa suposição, a análise limite se torna interessante por levar em conta toda a complexidade que envolve problemas tridimensionais. Nesse contexto, a análise limite é uma boa opção para entender mais detalhadamente o mecanismo de colapso de regiões susceptíveis indicadas por métodos mais simples, como o proposto por Miqueletto (2007) que leva em conta as hipóteses do talude infinito.