

6 Conclusões e sugestões

Esta dissertação teve como objetivo principal a investigação da influência do sistema de falhas que atravessa a mina a céu aberto Pampa de Pongo, Peru, em termos de geração de deslocamentos durante o processo de escavação, que atualmente atinge profundidades superiores a 900m, e da estabilidade de seus taludes contra a ruptura por cisalhamento.

Para atingir estes objetivo central foram empregados programas computacionais desenvolvidos especificamente para a engenharia geotécnica como o software Slide (RocScience), para análise 2D da estabilidade de taludes por método de equilíbrio limite, Phase2 (RocScience) e Plaxis 2D, para análises 2D tensão x deformação pelo método dos elementos finitos no estado plano de deformação e o programa computacional Plaxis 3D, para análises 3D pelo método dos elementos finitos. Em todas as análises efetuadas o critério de ruptura de Mohr-Coulomb foi adotado para quantificação da resistência ao cisalhamento das diversas litologias existentes na região de mineração. Especificamente, os estudos numéricos aqui apresentados envolveram sete tipos de rocha intacta além da consideração de propriedades específicas do sistema de falhas geológicas.

No decorrer das análises, outros objetivos secundários da pesquisa foram também contemplados: a) a influência nos resultados dos efeitos tridimensionais das simulações, comparando resultados obtidos por modelos numéricos 2D e 3D; b) influência nos resultados de modelagens 2D pelo método dos elementos finitos que empregam diferentes técnicas para representação das falhas em um meio contínuo, observadas entre os programas Phase2 (RocScience) e Plaxis, nas suas versões 2D e 3D.

Em relação a estes aspectos algumas conclusões, ou confirmação de resultados já reportados na literatura, podem ser feitas:

i) a geometria da potencial superfície de ruptura, bem como os valores dos fatores de segurança, calculados nas simulações 2D por método de equilíbrio limite (método de Morgenstern-Price) e dos elementos finitos, pouco diferem entre si, o que explica a ainda frequente utilização de métodos de equilíbrio limite na engenharia geotécnica, como também da nova e rápida aceitação do emprego do método de elementos finitos para estimativas da estabilidade de taludes em solo

ou rocha. Neste último caso, com a vantagem de não ser necessária a especificação a priori do tipo da potencial superfície de colapso (planar, circular, poligonal) bem como do particular método das fatias, com suas hipóteses simplificadoras específicas.

ii) fatores de segurança calculados em modelos 3D em geral resultaram levemente superiores aos correspondentes valores estimados nos modelos 2D, o que também explica a predominância de análises 2D na engenharia geotécnica à exceção, evidentemente, quando o problema é de natureza claramente tridimensional;

iii) na análise dos resultados obtidos na mineração Pampa de Pongo, percebe-se que os deslocamentos horizontais, principalmente, obtidos pelos programas 2D de elementos finitos Phase2 e Plaxis2 foram influenciados pela técnica utilizada por ambos os softwares para representação de falhas. No primeiro, pela utilização de elementos de junta onde é possível especificar diretamente as propriedades de rigidez e de resistência; no segundo, através de elementos de interface, onde a rigidez elástica é computada em função das propriedades dos elementos finitos vizinhos e de uma espessura virtual. Assim, é difícil conseguir uma comparação completa e detalhada visto que são necessários cuidados especiais para ajustar as mesmas propriedades das falhas em ambos os programas. De maneira geral, para o engenheiro geotécnico a metodologia do programa Phase2 é mais fácil de compreender porque as falhas são descritas fisicamente com suas respectivas propriedades definidas direta e explicitamente.

iv) em contrapartida, os resultados obtidos com os programas Plaxis 2D e Plaxis 3D, nas simulações com a ausência de descontinuidades, parecem ser de melhor qualidade em virtude da ferramenta disponível “update mesh” que permite a atualização da malha à medida que as deformações do maciço rochoso acontecem.

v) efeitos 3D na simulação do problema podem ser observados nas distribuições de deslocamentos ao longo dos vários perfis analisados. Um aspecto que chama a atenção logo no primeiro exame dos resultados é a influência nos valores dos deslocamentos verticais, praticamente inexistente nas modelagens 2D.

vi) fatores de segurança na seção 1-1 para a última, e atual, etapa de escavação (869m de profundidade) resultam inferiores 1,2; motivo de preocupação visto que este valor, por norma técnica brasileira, indica um limite inferior para taludes com baixo grau de segurança contra perdas de vidas humanas, danos ambientais e materiais.

vii) uma análise detalhada da estabilidade de taludes em maciços rochosos fraturadas por método de equilíbrio limite deveria incluir também a possível presença de zonas de alteração ao redor das falhas, conforme descrito no capítulo 5, para definição da resistência ao cisalhamento direcional. No caso particular da mineração Pampa de Pongo, devido à insuficiência de informações de campo, foram adotadas faixas de zonas de alteração de 2m, 3m e 4m, em ambos os lados da falha, porém sem mudanças significativas nos valores dos fatores de segurança assim calculados.

viii) a criação de malhas 3D não é tarefa simples em casos, como o investigado nesta pesquisa, onde a litologia é muito variável o que necessitou a execução de um procedimento especial, importando blocos de elementos gerados com base no programa computacional Autocad Civil 3D;

ix) em termos de tempos de processamento, o programa Phase2 demorou entre 2 a 6 minutos para a realização das análises tensão x deformação e de 4 a 10 minutos para determinação do fator de segurança em cada etapa de escavação, em média. Como o software exige a redefinição da geometria para cada fase de escavação, o tempo total foi aproximado a superior à uma hora. O programa Plaxis 2D consumiu entre 4 e 20 minutos para análises tensão x deformação e entre 20 a 60 minutos para os cálculos de estabilidade, enquanto que o programa Plaxis 3D, nas mesmas tarefas, demorou entre 3 a 6 horas (análise tensão x deformação) e entre 15 a 30 horas (estabilidade de taludes). Os tempos computados anteriormente são para cada seção avaliada, sendo valor mínimo obtido na análise feita sem descontinuidade e o valor máximo para o caso incluindo descontinuidades. De modo geral, para problemas 2D o programa Plaxis 2D é mais eficiente que o seu congênere Phase2 porque é possível utilizar o mesmo arquivo de dados de entrada para execução de todas as análises.

Durante o desenvolvimento da presente pesquisa foram observadas algumas limitações, as quais podem ser consideradas para as seguintes sugestões de futuros estudos:

i) A fim de obter uma modelagem mais completa que permita comparações com os deslocamentos medidos através de instrumentação, é sugerida a obtenção do estado de tensões *insitu*, pois este é um fator fundamental para determinação das tensões horizontais e obtenção dos deslocamentos horizontais e verticais, com maior importância para os deslocamentos horizontais.

ii) para uma melhor representação da modelagem 3D deve ser considerada a variabilidade da estratigrafia do maciço rochoso, tanto na profundidade quanto

no eixo transversal; para isso deve ser feita uma representação geológica tridimensional a fim de obter resultados mais representativos.