

7 Conclusões e Sugestões

O propósito de toda dissertação é apresentar conclusões que possam ajudar no desenvolvimento científico do tema estudado e também fornecer idéias que possam ser base para futuras pesquisas. O presente trabalho esmera-se em cumprir esse objetivo. A seguir são apresentadas as conclusões finais e sugestões para posteriores trabalhos voltados para esta linha de pesquisa.

7.1. Conclusões

Estabelece-se aqui um fluxo de trabalho de modelagem estática, dinâmica e pós-sísmica de uma barragem de contenção de rejeitos de mineração. A partir de dados fornecidos pela investigação geotécnica em campo e ensaios de laboratório gera-se um modelo que represente as condições reais mais representativas, conservando porém a simplicidade do modelo. Esta metodologia prática permite simular os efeitos nos resultados devidos a mudanças das propriedades dos materiais (análise paramétrica), considerar as opções de fluxo em cada etapa de avaliação e determinar a resposta estática, dinâmica e pós-sísmica como função de tensões, velocidades, poropressões e deslocamentos.

Muitos dos fenômenos críticos associados com a estabilidade dinâmica de barragens e rejeitos são adequadamente simulados. Esses incluem os efeitos da aplicação de um registro sísmico com conteúdo de frequência variável, a amplificação da propagação vertical das ondas de cisalhamento horizontal através de meios compostos por diferentes tipos de material e o estudo do amortecimento que permite a dissipação da energia do movimento do terreno. Além disso, estuda-se a interação dinâmica entre a barragem e o rejeito, a geração e a redistribuição do excesso de poropressões, a perda de resistência e a análise de deformações.

Com relação à utilização do programa FLAC conclui-se que:

- A avaliação do comportamento da estrutura considerando a opção de grandes deformações ainda precisa de mais estudos. Se a malha gerada for complexa e

abranger muitas zonas, o desenvolvimento desta opção no programa torna-se muito difícil, seja pelas excessivas deformações obtidas ou pelo tempo muito longo de processamento. Se a aceleração máxima do sismo não for um valor muito elevado, os resultados com modelagem em pequenas deformações não se diferenciam muito daqueles com a modelagem em grandes deformações. Na realidade, a simulação é efetuada para grandes deslocamentos, mudando-se as coordenadas iniciais dos pontos da malha (formulação de Lagrangeana modificada).

- Confirma-se que o amortecimento hysterético ainda apresenta limitações, especialmente para casos de registros sísmicos complexos, com acelerações máximas muito elevadas. A resposta dinâmica apresenta acelerações e velocidades aceitáveis, mas os deslocamentos são excessivos. O amortecimento Rayleigh adequa-se melhor na análise dinâmica em qualquer caso, porém, para geometrias complexas precisa-se utilizar grandes valores de amortecimentos para gerar respostas de deslocamentos aceitáveis, mas esses valores elevados amortecem também a resposta em termos de velocidades e tensões.
- Às vezes a modelagem resulta em respostas elevadas nas áreas propensas a grandes deformações. Para evitar o desenvolvimento de falha e/ou ruptura em alguma zona antes da análise dinâmica, incrementar os valores de coesão torna-se uma técnica de modelagem muito útil. Contudo, também se pode transformar em uma limitação potencial por tenderem a fornecer valores de resposta abaixo das reais.
- As condições de contorno dinâmicas que o FLAC oferece também apresentam certas limitações. O contorno de campo livre (*free-field*) apresenta algumas dificuldades quando é usado com valores de amortecimento Rayleigh muito elevados ou acelerogramas muito intensos. Além disso, confirma-se a observação descrita no manual sobre a limitação do amortecimento local para caso de avaliações dinâmicas com registros sísmicos complexos, especialmente no uso de modelos constitutivos avançados como, por exemplo, o modelo de Byrne.
- Cumprova-se novamente as observações da literatura com respeito à aplicação de acelerações elevadas em análises da resposta dinâmica. No

modelo linear equivalente, incorporado no programa SHAKE, os valores de PHA^{rocha} maiores que 0,35g não produzem resultados confiáveis, já que este modelo, para valores altos de aceleração, não pode representar a ocorrência de deformações não-lineares e inelásticas.

- Dependendo da geometria do problema e, conseqüentemente, do número de zonas, o processamento dificulta-se pela capacidade de memória necessária. Às vezes o FLAC não apresenta memória suficiente e, portanto, tem-se que fazer modificações na malha. Se a quantidade de zonas e/ou o amortecimento usado na análise dinâmica e/ou o número de variáveis extras, utilizados em algoritmos criados no FISH, se incrementam, a execução do problema fica muito demorada.
- Na presente dissertação se apresenta, com base no treinamento para utilização do programa FLAC, boas técnicas e procedimentos para a simulação dinâmica de estruturas de terra com amortecimento, correção de linha base, processamento de registro sísmico, filtragem, considerações sobre tamanhos de zonas de malha, etc.

Em relação à avaliação da estrutura estudada:

- O fator de segurança estático é um valor aceitável, contudo, não é muito elevado. As superfícies potenciais de ruptura são desenvolvidas no enrocamento, o que era esperado, já que o talude muito íngreme é uma ameaça potencial na estabilidade da barragem.
- A magnitude do sismo escolhido no presente trabalho foi deliberada, com o objetivo de analisar o comportamento dinâmico da barragem sob condições muito conservadoras. Possivelmente na região onde está localizado a barragem na Argentina, o sismo de maior magnitude seria entre 0,2g a 0,3g.
- As respostas dinâmicas mais elevadas encontra-se a uma altura média do talude de enrocamento e no pé do talude. A superfície do rejeito aparenta se comportar-se como um material estável. Surpreendentemente, a crista da barragem tampouco manifesta ameaça alguma, o que não era previsto. Uma causa poderia ser a elevada coesão utilizada nesta área para evitar a ruptura no começo e durante o processamento dinâmico.
- A não-ocorrência de liquefação no rejeito, para uma aceleração de pico extremamente elevada e uma altura do depósito de rejeito maior que 100m,

tampouco era esperada. Novamente, o elevado valor de amortecimento utilizado provavelmente seja a causa da ausência desse fenômeno. Porém as poropressões foram elevadas em algumas zonas do rejeito.

- O procedimento de análise pós-sismo desenvolvido com o FLAC é satisfatório. Os fatores de segurança, obtidos pelo método de simulação do colapso, encontram-se dentro do intervalo admissível. O processamento pós-sismo no FLAC permite a obtenção de fatores de segurança em condições não-drenadas e drenadas e possibilitam a comparação entre os mesmos para tomar-se o menor desses valores. O fator de segurança pós-sismo adotado é o obtido em condições não-drenadas, estado mais crítico para a barragem e o rejeito. Mesmo assim, não foi possível gerar um fator de segurança para o caso de drenagem parcial.
- O procedimento no FLAC, comparado a outros métodos descritos na revisão bibliográfica, aparenta gerar valores mais conservadores embora, para o nível de risco e importância da barragem, possam ser considerados satisfatórios.
- A maior dificuldade em análises pós-sismo é determinar os parâmetros de resistência dos diferentes materiais. Seriam necessários vários e complexos ensaios de laboratório para caracterização do comportamento dinâmico do material, porém acarretando aumento de custos e de tempo no desenvolvimento do projeto.
- Para fins de projeto, a aplicação do modelo de Byrne se justifica pela capacidade do modelo na previsão dos valores de poropressão, em contraposição com o modelo de Mohr-Coulomb ou outro modelo elastoplástico (UBCSand, por exemplo).

Finalmente, verifica-se o grande potencial do programa FLAC como ferramenta de projeto para análises dinâmicas. Os resultados bem sucedidos da modelagem confirmam que a combinação dos conhecimentos teóricos com o adequado julgamento de engenharia permite converter o FLAC em uma ferramenta poderosa para a compreensão do mecanismo de deformação e/ou ruptura da barragem.

7.2. Sugestões

A presente dissertação teve muitas limitações em relação ao tempo do processamento do FLAC. Assim, foi necessário deixar algumas avaliações que poderiam complementar o trabalho desenvolvido. Como sugestões para trabalhos futuros entende-se que sejam interessantes as seguintes análises adicionais:

- Com ajuda de C^{++} , modificar o modelo intrínseco do amortecimento histerético do FLAC e melhorar o ajuste das curvas de amortecimento em relação às curvas de Seed (1986) para os diferentes materiais. Além disso, continuar a avaliação do comportamento deste amortecimento, até encontrar as causas que originam os deslocamentos superdimensionados.
- Na realidade, a barragem é construída por estágios (ou etapas). Neste estudo este sistema de construção da estrutura não foi considerado. Seria interessante poder simular as etapas de escavação e enchimento tanto dos materiais do aterro como do material depositado (como a água ou rejeito). Esta modelagem permitiria obter tensões e deformações muito mais próximas da realidade.
- Realizar a análise dinâmica da estrutura estudada no FLAC com a opção de grandes deformações, tentando diminuir a um valor aceitável os passos de tempo dinâmico. Efetuar comparações das respostas dinâmicas desenvolvidas para ambos os amortecimentos, histerético e Rayleigh. Previamente, efetuar as aferições dos dois tipos de amortecimento com a resposta dinâmica obtida pelo programa SHAKE.
- Parte da metodologia da análise pós-sismo, que consiste em analisar o potencial de liquefação, não foi efetuada. Portanto, sugere-se analisar a liquefação por qualquer método descrito no item 3.2, utilizando os dados do projeto. Convém salientar que, para as presentes condições de simulação, não ocorreu liquefação na estrutura, porém, possivelmente utilizando um menor valor de amortecimento que o usado e, controlando o nível de deslocamento e deformações, o fenômeno de liquefação poderia ocorrer.
- Avaliar o comportamento da barragem com o modelo UBCsand. Possivelmente, no caso em que a liquefação não ocorra, esse modelo se

comporte de modo semelhante ao modelo de Mohr-Coulomb. Comparar os resultados obtidos com o as respostas dos modelos de Finn e/ou de Byrne.

- Comparar os fatores de segurança obtidos com os calculados pelo método de equilíbrio limite. Pesquisar a influência do valor de amortecimento aplicado no fator de segurança calculado.
- Realizar uma avaliação pós-sismo utilizando o programa computacional GEOSTUDIO, obtendo-se a geração de poropressões através do aplicativo SEEP e exportadas ao aplicativo QUAKE para previsão da resposta dinâmica da estrutura, incluindo a possibilidade de liquefação. Adicionalmente, análises de estabilidade com base em métodos de equilíbrio limite também podem ser facilmente efetuadas com o aplicativo SLOPE/W.