

6 Conclusões e Sugestões

6.1 Conclusões

Um dos objetivos deste trabalho foi reunir, apresentar e discutir informações e métodos de como analisar o comportamento de obras de terra sob solicitação sísmica, do ponto de vista do engenheiro geotécnico. O assunto é complexo e pouco discutido no Brasil sob a alegação de que no país não existem terremotos de grande magnitude, esquecendo-se que uma análise sísmica é sempre necessária para obras de vulto (barragens, centrais nucleares, ...) mesmo porque a noção de baixo risco não significa risco inexistente ou segurança absoluta. Adicionalmente, a questão também é importante sob o ponto de vista da formação técnica de engenheiros, brasileiros ou não, que cada vez mais atuam em projetos de obras internacionais, muitas delas localizadas em zonas de alta atividade sísmica, como na costa ocidental da América Latina.

A estimativa da resposta sísmica de geo-estruturas é tarefa complexa, começando pela seleção do terremoto de projeto, i.e. da escolha de um carregamento que não se sabe quando atuará, nem qual sua duração ou magnitude. Engenheiros geotécnicos tendem a caracterizar uma análise sísmica como uma estimativa do valor da aceleração horizontal de pico no terreno (PGA), provavelmente porque necessitam deste único valor para cálculo da estabilidade de taludes por métodos pseudo-estáticos, e tendem a esperar uma amplificação da aceleração máxima do terremoto pelas camadas do solo de fundação.

Ora, amplificações ocorrem para frequências próximas à frequência de ressonância das camadas de solo. Caso a frequência predominante do terremoto estiver nesta faixa de valores, então a aceleração horizontal do terremoto será forçosamente amplificada. Caso contrário, as acelerações em outras frequências o serão, gerando eventualmente complicações se estas forem as frequências que concentram a maior energia do terremoto.

Neste trabalho analisou-se o comportamento de um sistema de contenção de rejeitos de bauxita localizado na Jamaica, em zona de atividade sísmica. A pesquisa envolveu a determinação da curva de ameaça sísmica para o sítio do projeto, construída com base em modelo probabilístico, envolvendo o levantamento de fontes sismogênicas regionais e a consulta ao catálogo de sismos históricos ocorridos na Jamaica. A curva de ameaça sísmica e o espectro de projeto uniformemente provável obtidos concordam com a maioria dos estudos recentes realizados na área do projeto (tabela 3.2), sendo ligeiramente maior do que os divulgados no *Jamaica Spectral Seismic Hazard Maps* (2006). Embora a fonte sismogênica PG seja a de maior atividade na ilha, a sismicidade no sítio do projeto é basicamente controlada pela fonte sismogênica JS2, de atividade moderada, conforme pode ser observado no estudo realizado para determinação dos parâmetros sísmicos, apresentado no Anexo 3.

Com relação ao comportamento dinâmico da geo-estrutura conclui-se que:

- O fator de segurança obtido na análise pseudo-estática ($FS^{pseudo} = 0,64$) evidentemente indica que o dique projetado é instável. Uma análise mais rigorosa, baseada no método dos elementos finitos com sismo de projeto determinado em estudo de ameaça sísmica, indica que apesar do dique apresentar deslocamentos permanentes significativos este não chega ao colapso como poderia uma análise pseudo-estática antecipar.
- De modo geral, uma análise mais complexa do problema é recomendada na literatura sempre que o fator de segurança pseudo-estático resultar inferior a 1,1 ou o fator de segurança estático for inferior a 1,8.
- Além da seleção do terremoto de projeto, outra etapa fundamental na análise da resposta dinâmica de solos é a escolha do tipo de amortecimento e de seus parâmetros. Normalmente utiliza-se o amortecimento histerético, independente da frequência e variável com o nível da distorção cíclica, descrito por funções empíricas estabelecidas dos resultados de ensaios de laboratório, para diversos tipos de solo. No programa computacional Plaxis 2D v.2011, utilizado nesta pesquisa, a formulação implantada é a do amortecimento de Rayleigh, variável com a frequência da excitação. Para escolha dos parâmetros de Rayleigh, fez-se uso do programa computacional SHAKE2000, comparando seus resultados, que incorpora o amortecimento

histerético, com os resultados do programa Plaxis, através de ajustes sucessivos dos parâmetros de amortecimento de Rayleigh.

- O uso dos contornos de campo livre no Plaxis forneceram resultados bastante razoáveis, como foi apresentado no cálculo da frequência natural de vibração da barragem de rejeitos. Na figura 5.22 pode ser observado que o modelo não amortecido ($\alpha_N = 1/4$, $\beta_N = 1/2$, $\alpha_R = 0$ e $\beta_R = 0$) atinge uma aceleração de pico quase constante, facilitando assim a obtenção da frequência fundamental de vibração mostrada na figura 5.23.
- Os deslocamentos permanentes máximos aconteceram na face do talude (figuras 5.25 e 5.26) com valores máximos de 0,619m no ponto B (deslocamento horizontal) e 0,393 no ponto E (deslocamento vertical). O rejeito a ser lançado apresentou um deslocamento horizontal permanente máximo de apenas 2,9 cm (ponto G) indicando a estabilidade da geo-estrutura nesta região.
- A estimativa de deslocamentos permanentes pelo método de Newmark parece fornecer resultados razoáveis apenas em situações onde a resposta dinâmica do maciço de solo é unidimensional. Para situações envolvendo mudanças de geometria e de materiais do maciço, com a consequente propagação 2D das ondas de tensão, os resultados computados pelo método dos elementos finitos e o método aproximado de Newmark tornam-se bastante desiguais.
- Finalmente, verifica-se o grande potencial de utilização do programa Plaxis para análises da resposta sísmica de depósitos de solo. Porém, este potencial somente se concretiza com uma adequada combinação de conhecimentos teóricos sobre fundamentos da resposta dinâmica de solos e de um necessário julgamento de engenharia na interpretação dos resultados que, no contexto da aplicação de carregamentos dinâmicos, geralmente são difíceis decisões.

6.2 Sugestões

Como sugestões para trabalhos futuros nesta linha de pesquisa, recomendam-se:

- Estimar a ameaça sísmica em sítios de projeto considerando diferentes leis de atenuação e magnitudes máximas esperadas nas fontes sismogênicas, estabelecendo processos de análises baseados em uma árvore lógica;
- Investigar o comportamento de solos na fase pós-sismo visto que a maioria das rupturas de talude acontece após a ocorrência do terremoto, devido à perda de resistência ao cisalhamento e da rigidez do material, bem como efeitos provocados pela redistribuição dos excessos de poropressão gerados pelo carregamento cíclico;
- Comparar os deslocamentos obtidos em avaliações do comportamento sísmico 2D (Plaxis 2D) com avaliações em modelos numéricos 3D (Plaxis 3D).