3 Comportamento estático e dinâmico de barragens de terra

3.1. Construção da barragem de terra

3.1.1. Distribuição dos recalques

A previsão dos campos de tensão e de deformação desenvolvidos durante a fase de construção de uma barragem de terra, tanto no seu próprio corpo, quanto no material de fundação, é um fator importante nesta etapa do projeto. Análises dinâmicas posteriores, de natureza não linear, necessitam da determinação prévia do estado de tensão como condição inicial do problema.

À medida que se constrói a barragem, recalques do solo vão acontecendo. O mecanismo básico para o cálculo de recalques ou deslocamentos verticais de uma barragem pode ser mais bem compreendido considerando um aterro de grande extensão (Law, 1975), como ilustrado na Figura 3.1, onde são assumidas as seguintes hipóteses: os deslocamentos são unidimensionais, não existem efeitos dependentes do tempo no comportamento do recalque (recalque de compressão secundária) e o meio é considerado homogêneo, isotrópico e com comportamento tensão deformação linear elástico.



Figura 3.1 - Construção de aterro de grande extensão por camadas sucessivas-Law, 1975.

O incremento da tensão vertical $\Delta \sigma_z$ em qualquer ponto situado na altura $z \le h$ devido à construção de uma camada de espessura H - h é considerado constante e é determinado por:

$$\Delta \sigma_{zz} = \gamma (H - h) \tag{3.1}$$

e o deslocamento vertical (devido a nova camada) do mesmo ponto pode ser calculado integrando-se o incremento de deformação vertical neste ponto ao longo da camada pré-existente usando a lei de Hooke, ou seja:

$$\Delta \rho = \int_0^h \Delta \varepsilon_{zz} dz = \int_0^h \frac{\Delta \sigma_{zz} dz}{E} = \frac{\gamma}{E} (H - h)h$$
 3.2

Da equação acima, nota-se que o recalque ρ é uma função da espessura da nova camada (H - h) e do aterro pré-existente h, com uma variação parabólica de acordo com a Figura 3.2, com um valor mínimo no topo do aterro (z = H) e um valor máximo na sua altura média (z = H/2).



Figura 3.2 - Perfil de recalque em um aterro, com valor máximo na altura média H/2 (Law, 1975).

Este padrão é bastante condizente com a distribuição de recalques observados na construção de barragens de terra/enrocamento e muito diferente daquela que seria obtida considerando-se apenas uma etapa de construção, na qual o recalque máximo estaria localizado na crista da barragem. Uma análise qualitativa similar poderia também ser demostrada para casos em que o módulo de elasticidade é considerado dependente do estado de tensão atuante no ponto.

3.1.2. Influência da anisotropia nos recalques

Devido ao processo de compactação das camadas de solo é esperado que venha a se obter uma estratificação horizontal, com módulos de elasticidade diferentes nas direções vertical e horizontal.

Law (1975) realizou uma análise paramétrica em barragem hipotética de tamanho médio, concluindo que o efeito mais significativo no comportamento do aterro é devido ao módulo de elasticidade na direção horizontal E_h . Se este for menor do que o valor considerado na condição isotrópica ($E = E_h = E_v$) os resultados calculados mediante a hipótese de isotropia ($E = E_h$) subestimam os recalques reais máximos em até aproximadamente 10%, à medida que E_h e v_h desviam-se dos valores isotrópicos.

3.1.3. Transferência de cargas

A transferência de carga ocorre como resultado de um deslocamento relativo ou uma diferença de compressibilidade dos materiais que formam a barragem. Na literatura são citados dois tipos de transferência de cargas em barragens, descritas a seguir.

Transferência de cargas do aterro para as ombreiras

Neste caso, a transferência de cargas é devida a recalques diferenciais no aterro ao longo do vale como também às diferenças de deformabilidade entre os materiais do aterro e enrocamento das ombreiras. Para considerar a influência destes recalques diferenciais é muitas vezes necessária uma análise tridimensional considerando a forma do vale, sua extensão, propriedades mecânicas e hidráulicas dos materiais da fundação, do aterro e das ombreiras.

Transferência de cargas entre o núcleo e os espaldares

Desenvolve-se principalmente devido à diferença nas características de deformabilidade dos materiais que os compõem. Em consequência, uma região tende a se deslocar mais do que a outra sob ação do peso próprio, com mobilização de tensões cisalhantes ao longo das interfaces e transferência de carga entre estas regiões da barragem.

Law (1975) realizou uma análise paramétrica pelo método dos elementos finitos com o objetivo de estudar a transferência de cargas durante a etapa de construção de uma barragem de tamanho médio sob diferentes condições de rigidez relativa entre os materiais do núcleo e espaldares. Concluiu que os recalques, deformações e tensões na barragem são funções da rigidez do núcleo, da rigidez do espaldar e principalmente da razão entre estas (rigidez relativa): quanto mais rígido o espaldar, em comparação com a rigidez do núcleo, maior é a transferência de cargas do núcleo para os espaldares. Ainda que um incremento da rigidez dos espaldares possa reduzir o recalque no núcleo devido à transferência de cargas, uma diferença de rigidez muito grande pode também afetar a segurança da estrutura devido às baixas tensões resultantes desta transferência, facilitando o desenvolvimento de fissuras no núcleo.

A ocorrência de ruptura hidráulica pode também ocorrer como consequência direta da transferência de cargas do núcleo central aos materiais dos espaldares de uma barragem zonada. Esta transferência é mais crítica na fase de construção, onde a tensão principal mínima pode atingir valor muito baixo. O fenômeno de ruptura hidráulica acontece quando a poropressão desenvolvida no núcleo central devido à construção do aterro atinge o valor da tensão principal mínima, ocasionando fissuras no seu interior.

3.1.4. Trajetória de tensões na construção

As trajetórias de tensão total nos espaldares da maior parte dos diferentes tipos de barragens partem da origem do diagrama p, p'-q (Figura 3.3a). No caso de barragem zonada com núcleo de argila, no entanto, a trajetória de tensões efetivas é mais complexa (Figura 3.3b). Imediatamente após a compactação ocorre uma sucção p'_0 igual à tensão efetiva inicial, sendo a tensão total nesta etapa desprezível. O material não está completamente saturado, de modo que a construção do aterro acima do ponto considerado incrementará a tensão efetiva e reduzirá a sucção. No ponto X a poropressão torna-se positiva e o ar presente nos vazios diminuirá progressivamente até a saturação completa do material. Para que, em argilas moles, isto ocorra bastam poucos metros de aterro construído. Nesta etapa (o parâmetro de Skempton B≈1), os valores dos incrementos de tensão total e a tensão efetiva média p' não mudará muito. De fato, esta pode ainda reduzir-se até aproximar-se do estado crítico

54

(ponto C) devido ao cisalhamento do solo em condições não drenadas. O problema pode ser simplificado, assumindo-se que a argila se encontra saturada desde o início e considerando-se um valor da sucção inicial p_o* como mostrado na Figura 3.3b. Neste caso a trajetória de tensões efetivas é aquela indicada na Figura 3.3b pela linha tracejada.



Figura 3.3 - Trajetórias de tensão durante a fase de construção (Naylor, 1992).

3.2. Primeiro enchimento do reservatório

As considerações sobre o comportamento de barragens de terra e de enrocamento durante a fase do primeiro enchimento são bastante diferentes daquelas apresentadas durante a etapa da construção, principalmente em relação à compressibilidade. Nesta segunda etapa de vida da barragem, os carregamentos devido à elevação do nível de água no reservatório são aplicados em um intervalo de tempo relativamente curto, dando origem à ocorrência de movimentos complexos, observados em numerosas barragens.

Nobari e Duncan (1972), em uma detalhada revisão de casos históricos de movimentos em barragens causados pelo enchimento do reservatório, indicaram que a complexidade desses movimentos resulta de três diferentes causas: (1) a compressão devido ao umedecimento da fundação gera recalque não uniforme pois o montante da fundação é umedecido primeiro; (2) a compressão devido ao umedecimento do material de barragens homogêneas ou do espaldar de montante de barragens zonadas com núcleo central de argila produz recalques nesta região da barragem com movimentos na direção de montante e possíveis fissuras longitudinais; (3) o próprio carregamento ocasionado devido à pressão d'água ocasiona movimentos na direção de jusante.

A submersão dos materiais dos espaldares pode conduzir, às vezes, a acentuadas deformações. Geralmente nestes materiais ocorrem recalques importantes, verificando-se uma rotação do corpo da barragem para montante na fase inicial do enchimento e, posteriormente, quando a pressão hidrostática atinge valores consideráveis, inverte-se o sentido daquela rotação para jusante.

Nobari e Duncan (1972), também indicaram que quatro efeitos separados ocorrem devido ao primeiro enchimento de uma barragem zonada (Figura 3.4), sendo as deformações compressivas as predominantes na combinação destes.

3.2.1. Pressão Hidráulica no Núcleo

Durante a fase de enchimento do reservatório, considera-se que a permeabilidade do núcleo é muito pequena em relação à permeabilidade do material do espaldar de montante, de tal modo que pode-se assumir a ocorrência instantânea de uma pressão hidrostática na face de montante do núcleo, como ilustrado na Figura 3.4a. Esta pressão hidrostática produzirá deslocamentos direcionados para jusante, chegando a ser apreciáveis na fase final do enchimento, com a inversão da rotação inicial da barragem de montante para jusante.





3.2.2. Pressão Hidráulica na Fundação e Subpressão no Núcleo Central

A aplicação de pressões hidrostáticas na fundação à montante do núcleo central origina recalques e rotação da barragem para montante, enquanto que a ocorrência de subpressão na base do núcleo central causa movimentos ascendentes e rotação da barragem para jusante. Na Figura 3.4b se ilustra a ocorrência destes efeitos.

As fundações de barragens de terra ou enrocamento são geralmente constituídas por rochas ou solo, suficientemente rígidos e estão parcialmente saturados, de modo que as deformações que podem ocorrer devido à ação destes dois efeitos é de pouco interesse prático.

3.2.3. Subpressão à Montante

Estas pressões se originam devido à submersão do espaldar de montante de barragens zonadas (enrocamento ou solos granulares) e tendem a causar deslocamentos verticais ascendentes, bem como rotações na barragem na direção de jusante, devido ao conhecido fenômeno do empuxo de Arquimedes (empuxo hidrostático). A Figura 3.4c é ilustrativa desta situação.

3.2.4. Colapso Devido à Saturação

Este fenômeno geralmente ocorre em solos siltosos, porém também pode acontecer no caso de pedregulhos e enrocamentos devido à redução da resistência dos materiais causada pelo umedecimento das superfícies de contato. Em uma barragem de terra ou enrocamento, o colapso ocorre devido à saturação dos materiais do espaldar de montante na etapa do primeiro enchimento, provocando recalques bem como rotações na barragem na direção de montante (Figura 3.4d).

O fenômeno de colapso devido à saturação foi constatado em diversas barragens de terra e enrocamento. Vários autores (Nobari e Duncan, 1972; Veiga Pinto, 1983, entre outros) verificaram a ocorrência de importantes recalques devidos ao colapso em ensaios triaxiais e edométricos considerando materiais inicialmente secos (pedregulho e enrocamento) e em seguida saturados a determinados níveis de tensão. Logo, faz-se necessário que os procedimentos de cálculo numérico ou analíticos incluam também em determinados casos a previsão de recalque por colapso devido à saturação. Nobari e Duncan (1972) e Naylor *et al.* (1989) apresentaram modelos simplificados para simular aproximadamente este fenômeno.

3.2.5. Trajetórias de tensão durante o primeiro enchimento

Durante o primeiro enchimento do reservatório, as trajetórias de tensões observadas dependem da posição do ponto na barragem e do tipo de barragem. Em barragens com núcleo central de argila as mudanças de tensão, especialmente as devidas aos efeitos do empuxo de Arquimedes no espaldar submerso de montante, leva a uma redução da tensão efetiva média (p') e a uma mudança brusca na direção das trajetórias de tensões efetivas durante o enchimento do reservatório. No espaldar de jusante, no entanto, esta mudança é desprezível. Esta situação pode ser ainda mais complexa se também for considerada a possibilidade de recalque por colapso. Em resumo, pode-se esperar uma mudança brusca na direção das trajetórias de tensões efetivas a partir das etapas iniciais do enchimento do reservatório, sendo a redução da tensão efetiva média (p') o fator dominante. Não é possível estabelecer uma forma geral para previsão das trajetórias de tensão, que dependerão do tipo do material do núcleo, da posição dos pontos avaliados, de efeitos vinculados ao tempo, etc.

As Figuras. 3.5 e 3.6 ilustram as diferentes trajetórias de tensões totais durante o primeiro enchimento seguidas pelos materiais do enrocamento e do núcleo central da barragem de Beliche (Veiga Pinto, 1983). Destas figuras podese observar o alívio das tensões médias (p) do material submerso e o acréscimo nos seus valores nos pontos situados na região não submersa localizada além do enrocamento de montante. Tem-se, em geral, uma diminuição na tensão desviadora (q).



Figura 3.5 - Trajetórias de tensão típicas no material de enrocamento ao longo da construção e primeiro enchimento (Veiga Pinto, 1983)



Figura 3.6 - Trajetórias de tensão típicas no material do núcleo central ao longo da construção e o primeiro enchimento (Veiga Pinto, 1983)

3.3. Comportamento sísmico

Uma barragem localizada nos países Andinos, durante sua vida útil, é susceptível a sofrer ações de um sismo. Por esta razão, é útil saber, nas fases preliminares do projeto, as características da resposta sísmica da barragem.

Uma das principais considerações que deve ser observada na análise do comportamento de barragens, é que uma eventual ruptura da estrutura pode ocasionar efeitos muito significativos em termos de perdas de vidas humanas e danos nas propriedades à jusante. Deste modo, deve-se considerar eventos sísmicos com magnitudes pouco frequentes no projeto de grandes barragens, admitindo-se, por exemplo, um período de retorno de 1000 anos, o mesmo utilizado nos casos de outras estruturas de grande importância.

3.3.1. Análise de estabilidade

Há quatro métodos geralmente citados na literatura para análise do comportamento de taludes de solo, englobando aspectos de estabilidade e de deslocamentos permanentes (servicibilidade) sob ação de carregamentos sísmicos.

O primeiro deles se refere às análises pseudo-estáticas nas quais os efeitos do terremoto são representados por pseudo-acelerações horizontal e vertical constantes que produzem forças inerciais aplicadas no centro de gravidade da massa deslizante. A primeira aplicação deste procedimento foi atribuída a Terzaghi (1950). É um método simples, atualmente incorporado em muitos programas computacionais para análise da estabilidade sísmica de taludes, considerando superfícies potenciais de ruptura planas, circulares e curvas, mas com precisão dos resultados dependente da precisão dos coeficientes sísmicos, empregados para definição das componentes da força de inércia, na representação das condições reais do problema.

E evidente que a utilização de um método onde as forças de inércia são admitidas constantes constitui-se, à primeira vista, numa abordagem simplificada para a complexa tarefa da análise dos efeitos dinâmicos transientes causados por excitações sísmicas em taludes de solo. As forças de inércia não atuam permanentemente em uma direção, flutuando, pelo contrário, rapidamente tanto em magnitude quanto em direção. Assim, mesmo que o fator de segurança resulte momentaneamente menor do que um, o talude não necessariamente experimentará um colapso súbito, mas pode sofrer algum deslocamento de caráter permanente. Além disso, por tratar-se de um método de equilíbrio limite, onde o solo é idealizado como material rígido-perfeitamente plástico, nenhuma informação a respeito dos campos de deformação e de deslocamento pode ser obtida.

Se o solo fosse realmente rígido, as forças inerciais induzidas pelo terremoto seriam iguais ao produto das acelerações pela massa de material instável. No entanto, reconhecendo o fato de que solos não são materiais rígidos, e de que a aceleração máxima esperada é momentânea e atua apenas em um único sentido, os coeficientes sísmicos utilizados na prática devem corresponder a valores inferiores. Vários pesquisadores sugeriram valores de projeto (Seed, 1979; Hynes-Griffin e Franklin, 1984; Marcuson, 1981), mas não há uma regra fixa, única e simples para a seleção adequada destes coeficientes, a não ser o conhecimento de que devem estar baseados no nível antecipado de acelerações e corresponder a uma fração da aceleração horizontal máxima (PHA) esperada no sismo de projeto.

Outra limitação do método é a consideração clássica da instabilidade de taludes com um único modo potencial de ruptura da barragem. Na realidade, tem sido observado outros tipos de comportamento em barragens de terra (Seed *et al.*, 1969; Seed *et al.*, 1975; Makdisi e Seed, 1978; Seed, 1979), incluindo: (a) ruptura por fluxo devido à liquefação dinâmica em zonas de materiais não coesivos; (b) fissuras longitudinais perto da crista devidos a grandes deformações por cisalhamento e tração durante oscilações laterais; c) recalques diferenciais da crista e perdas de borda livre devido e deslizamentos laterais ou densificação dos solos; (d) fissuras transversais causadas por deformação de tração devida a oscilações longitudinais ou por respostas laterais diferentes nas proximidades das ombreiras e da zona da crista central; (e) rupturas por "piping" através de fissuras em zonas de solos coesivos.

As limitações do método pseudo-estático são conhecidas (*este conceito para análise dos efeitos de terremotos em taludes é muito impreciso, para dizer o mínimo* – Terzaghi, 1950) e uma detalhada análise de deslizamentos históricos (Seed *et al.*, 1969, 1975) mostram casos de ruptura de taludes mesmo quando o fator de segurança pseudo-estático calculado foi superior a 1. Exemplo é o colapso da barragem Lower San Fernando, sul da Califórnia, responsável na época por 80% do abastecimento d'água da cidade de Los Angeles, onde a crista da barragem foi rebaixada em 30 pés com deslizamento de talude na face de montante (Figura 3.7). Para esta obra, o fator de segurança pseudo-estático calculado no projeto foi igual a 1,3 considerando-se um coeficiente sísmico de 0,15.

Devido a estas dificuldades, têm sido empregados procedimentos alternativos para análise da estabilidade de taludes que levem em conta a ocorrência de deslocamentos permanentes do talude, como o clássico método de Newmark (1965), representativo do segundo tipo de métodos referenciados na literatura.



Figura 3.7 - Seção transversal da barragem de Lower San Fernando antes e após o sismo de 1971 (<u>http://quake.wr.usgs.gov/prepare/factsheets/LADamStory/Xsection.gif</u>)

Desde que a servicibilidade de um talude é controlada pelos deslocamentos permanentes causados pelo carregamento sísmico, procedimentos que permitam calculá-los fornecem em geral informações mais úteis do que apenas um fator de segurança. O método clássico de Newmark (1965) envolve a determinação de uma aceleração de escoamento, definida com base na força inercial necessária para que o fator de segurança pseudo-estático atinja o valor FS = 1. Em seguida, o procedimento utiliza o registro da história das acelerações do terremoto de projeto, integrando-o numericamente no tempo por duas vezes sempre que a amplitude da aceleração ultrapassar o valor da aceleração de escoamento previamente estabelecida. Como resultado destas integrações, obtém-se os deslocamentos permanentes acumulados, já que para fatores de segurança pseudo-estáticos inferiores a 1 (correspondentes a acelerações superiores à de escoamento) a massa de solo não está mais em equilíbrio, sofrendo aceleração devido às forças não balanceadas. Percebe-se assim que os deslocamentos permanentes são afetados pela duração do sismo bem como pela amplitude das acelerações.

A terceira classe geral de métodos é baseada no trabalho de Makdisi e Seed (1978) que apresenta um procedimento simplificado para previsão dos deslocamentos permanentes com base em algumas hipóteses simplificadoras e análises dos resultados obtidos com o método dos elementos finitos e o modelo de vigas de cisalhamento.

A resposta dinâmica do talude da barragem é obtida por meio de gráfico construído em função da profundidade da superfície de ruptura, normalizada em

relação à altura do talude, e da aceleração horizontal máxima nesta superfície normalizada em relação à aceleração horizontal máxima na crista da barragem.

Investigando o comportamento de vários taludes de barragens e aterros, reais e hipotéticos, considerando-se diferentes registros de acelerações reais e sintéticos, Makdisi e Seed (1978) determinaram a variação dos deslocamentos horizontais permanentes em taludes de solo como função da magnitude do terremoto (M = 6,5; 7,5 e 8,25) e da razão entre a aceleração de escoamento e aceleração horizontal máxima na superfície de deslizamento.

O quarto método para investigação do comportamento sísmico de taludes envolve a análise tensão x deformação do problema dinâmico, normalmente executada com auxílio do método dos elementos finitos ou outro método numérico como o das diferenças finitas, implementado no programa computacional FLAC 2D, utilizado nesta pesquisa. Os resultados podem descrever a história de tensões, efeitos de amortecimento, frequências naturais e a variação temporal do campo de deslocamentos na barragem, entre outros aspectos, mas a precisão dos mesmos dependerá fundamentalmente de uma representação satisfatória do comportamento tensão x deformação sob carregamento cíclico dos solos que formam a barragem e sua fundação.

3.3.2.

Fatores que influenciam a resposta sísmica

Durante um terremoto, barragens de terra exibem uma variedade de comportamentos complexos, inelásticos e não lineares. As condições ambientais nas fronteiras da barragem não são geralmente controláveis, com grandes regiões destas fronteiras participando durante a excitação, e a barragem interagindo tanto com a fundação quanto com o reservatório. Devido à complexidade deste problema de interação solo-fluido-estrutura, apresentam-se a seguir algumas das características da resposta sísmica da barragem.

3.3.2.1. Influência da Fundação

Para barragens de terra em regiões sísmicas, o comportamento das camadas de solo da fundação durante um terremoto é provavelmente mais crítico do que o comportamento da própria barragem. Isto é devido principalmente ao fato que, em contraste com controle da qualidade da construção do aterro, a maioria dos solos de fundação permanecem quase que

em seu estado natural, com exceção de determinadas zonas que podem ser substituídas por núcleos impermeáveis ou localmente melhoradas mediante processos de compactação ou injeção.

Dakoulas (1990) realizou um estudo paramétrico utilizando o modelo de "viga de cisalhamento", em uma barragem hipotética em vale retangular, mostrada na Figura 3.8, de 100 metros de altura, com uma velocidade de onda cisalhante S de 400 m/s e um parâmetro de não homogeneidade de 0,5 (para considerar a variação do módulo cisalhante com a altura da barragem). O estudo considerou uma camada de fundação com uma espessura de 50 metros.

Para uma relação entre velocidades de onda S no solo da fundação em relação à barragem igual a 0,5, isto é, considerando a camada de fundação mais compressível, resultou em deformações cisalhantes na fundação da ordem de quatro vezes maiores do que aquelas desenvolvidas no corpo da barragem, levando a amplificações de aceleração na crista de aproximadamente 2,3 vezes. Por outro lado, para uma relação entre velocidades de onda S igual a 2, isto é, simulando uma camada de fundação mais rígida, as deformações cisalhantes na fundação foram 5 vezes menores do que aquelas produzidas no corpo da barragem e as amplificações de aceleração na crista da barragem foi da ordem de 6,7 vezes.

Dakoulas (1990) concluiu então que as grandes deformações produzidas na fundação compressível levaram a uma dissipação muito mais significativa da energia de deformação e provocando, em consequência, uma maior redução das amplificações de acelerações.

Dakoulas (1990) também investigou os efeitos da variação da espessura da fundação na barragem, mantendo desta vez uma relação constante e igual a 1 entre as velocidades de ondas S no corpo da barragem e no solo de fundação. O autor concluiu que as amplitudes das deformações cisalhantes na camada de fundação foram apenas ligeiramente afetadas pelas variações de espessura da mesma considerando razões de espessura da fundação/altura da barragem entre 0,25 a 1, mas as acelerações e deformações cisalhantes ocorridas no interior da barragem variaram em aproximadamente 50%. Além disso, à medida que a espessura diminuiu, o efeito de flexibilidade da fundação também decresceu, tendendo a incrementar as deformações cisalhantes dentro do corpo da barragem e aproximando sua resposta à de uma barragem sobre fundação rígida. Os efeitos da espessura da fundação na resposta sísmica de barragens foram, porém considerados por Dakoulas muito menos importantes do que aqueles devido à variação de rigidez do solo de fundação.



Figura 3.8 - Barragem e fundação em vale retangular (Dakoulas, 1990)

3.3.2.2. Efeitos da Não Linearidade dos Materiais

Os efeitos da não linearidade dos materiais no comportamento dinâmico de barragens foram reportados por diversos autores (Prevost *et al.* 1985; Gazetas, 1987; Dakoulas, 1990; Abdel-Ghaffar e Scott, 1981, entre outros). O comportamento não linear dos materiais da barragem está associado fundamentalmente às amplitudes do movimento sísmico. Para excitações de pequena amplitude o comportamento do sistema é essencialmente linear, enquanto que excitações de grande amplitude induzem uma resposta plástica altamente não linear dos materiais. Isto pode ser verificado na Figura 3.9 onde a excitação de maior amplitude (ü_g=0,20g) causa, em relação à análise linear, significativas reduções de amplificação, especialmente nas proximidades das frequências de ressonância.

Os efeitos da não linearidade na amplificação são bastante interessantes. Nos espectros de resposta da aceleração, o pico da ressonância do primeiro modo observado em análises lineares é substancialmente reduzido nas análises não lineares (Dakoulas, 1990). Uma excitação com uma frequência próxima da fundamental tende a desenvolver grandes deformações cisalhantes (já que estas são afetadas principalmente pelos primeiros modos de vibração) e, portanto, a induzir altos valores de amortecimento e grande degradação de rigidez dos materiais; ambos os efeitos tendem a restringir a resposta da aceleração. Por outro lado, uma excitação com alta faixa de frequências causa menores deformações cisalhantes e, consequentemente, baixos valores de amortecimento e pouca degradação dos módulos cisalhantes dos materiais presentes no sistema.

3.3.2.3. Efeitos da Geometria do Vale

A hipótese de deformação plana é válida somente para barragens infinitamente extensas submetidas a movimentos síncronos na base. Para o caso de barragens construídas em vales estreitos, a presença de ombreiras relativamente rígidas origina efeitos de natureza tridimensional, incrementando as frequências naturais e tornando as formas modais de deslocamento mais agudas à medida que o vale se estreita.

Makdisi et al. (1982) realizaram comparações entre resultados obtidos com modelos 2-D e 3-D de barragens em vales triangulares e retangulares. Os autores utilizaram modelos de barragem de 30 metros de altura, constituídos por materiais elásticos com velocidades de ondas S constante de 153 m/s e razão de amortecimento ξ =0,1. As comparações foram apresentadas em termos da frequência natural calculada pela análise tridimensional em relação à obtida na análise de deformação plana (2D) para diferentes valores do comprimento da barragem normalizado em relação a sua altura L/H (Figura 3.10). É possível observar-se que para relações L/H \geq 5, as frequências naturais da barragem em vale retangular são 5% maiores do que as correspondentes para o caso de deformação plana, enquanto que para vales triangulares as mesmas são 30-40% maiores. Para valores pequenos de L/H (2 ou 3) as frequências naturais da barragem em vales triangulares chegam a ser 60-80% maiores do que as calculadas com o modelo de deformação plana.





Figura 3.9 - Resposta não linear e linear na seção central de uma barragem sobre camada de fundação submetida a excitações harmônicas de 0,05g e 0,20g (Dakoulas, 1990)

Mejia e Seed (1983) apresentaram comparações entre os resultados de análises dinâmicas bi e tridimensionais de duas barragens localizadas em vales triangulares com taludes bastante diferentes. Uma das geometrias correspondia de Oroville, relação comprimento/altura à barragem com L/H de aproximadamente 7, enquanto que a outra representava a mesma seção da barragem de Oroville mas em um vale mais estreito (L/H=2). Aqueles autores sublinharam dois aspectos em suas conclusões. O primeiro foi que nas análises realizadas os níveis médios da degradação dos módulos e os acréscimos de amortecimento foram aproximadamente os mesmos nos modelos 2-D e 3-D; as altas frequências obtidas no modelo 3-D foram devidas principalmente ao efeito do incremento da rigidez decorrente da geometria do vale. A segunda observação foi que comparações das frequências naturais obtidas em análises 2-D e 3-D são indicadores de somente um aspecto do comportamento tridimensional de barragens de terra, e que a concordância entre as frequências naturais de vibração dos modelos 2-D e 3-D de uma barragem pode não necessariamente significar uma concordância das respostas sísmicas de ambas as estruturas. É desejável, portanto estudar-se os efeitos da natureza tridimensional do problema sobre os parâmetros geotécnicos utilizados na avaliação da resposta sísmica da barragem, seja em relação à previsão de deformações ou em análises de estabilidade.



Figura 3.10 - Comparação entre respostas tridimensional (3D) e de deformação plana (2D), para barragens em vale triangular e retangular (Makdisi *et al.*, 1982)

Mejia e Seed (1983) concluíram finalmente que em análises de deformação plana da barragem de Oroville (L/H≈7) foram observados leves efeitos da geometria do vale devido ao fato que os valores calculados das tensões cisalhantes foram 20% maiores do que aqueles determinados em análise tridimensional, enquanto que as acelerações mostraram-se bastantes sensíveis às condições de contorno. Para barragens localizadas em vales mais inclinados que aquele da barragem de Oroville, os resultados parecem indicar que as análises de deformação plana não podem simular corretamente o comportamento da obra, e que nestes casos é necessário executar-se análises tridimensionais para obtenção de resultados satisfatórios.

3.3.2.4. Amplificação na Crista

Indicou-se na seção 3.3.2.2 que a não linearidade dos materiais tende a reduzir a amplificação na barragem. Da comparação das Figuras. 3.9a e 3.9b pode-se observar que para um sismo de 0,20g de aceleração máxima (a qual provavelmente induzirá não linearidade nos materiais), o movimento nas frequências mais altas afetam significativamente as acelerações na crista da barragem, sendo, porém de menor impacto a maiores profundidades. Excitações de baixa frequência, no entanto, apresentam valores de amplificação quase da

mesma ordem de grandeza tanto na crista da barragem quanto abaixo dela. Este fato é bastante importante porque a faixa de frequências dos terremotos peruanos é relativamente alta (2-10Hz), o que provocaria problemas devido a amplificações de aceleração nas proximidades da crista. Assim, percebe-se desde já a conveniência de no método dos elementos finitos discretizar-se adequadamente a parte superior da barragem, onde frequentemente ocorrem os maiores danos.

O fenômeno de amplificação das acelerações na crista foi reportado em diversas publicações da literatura: nas análises de resposta sísmica da barragem de Santa Felicia (Abdel-Ghaffar e Scott, 1979), da barragem de Ullum (Oldecop, 1992), e nos registros obtidos na barragem de El Infiernillo (Marsal e Ramirez, 1967), etc.

A não linearidade dos materiais está associada à magnitude do abalo sísmico. O parâmetro dinâmico mais importante na análise da resposta sísmica de obras geotécnicas é o módulo cisalhante G. Este depende fundamentalmente da deformação cisalhante induzida pelo terremoto, tanto em solos granulares, quanto em solos coesivos. Portanto, fortes excitações sísmicas tendem a provocar grandes deformações cisalhantes, degradando o módulo cisalhante dos materiais que compõem a barragem e colaborando para seu comportamento tensão x deformação altamente não linear. Este aspecto, relacionado com o modelo constitutivo do solo sob carregamento sísmico, será discutido no próximo capítulo.