

5

Modelagem Numérica de Barragens de Terra

A modelagem numérica teve um rápido desenvolvimento a partir dos anos 60, com o surgimento do método dos elementos finitos. Os métodos numéricos inseridos nos diferentes programas conseguem soluções aproximadas da solução exata de diversas equações diferenciais que definem o equilíbrio. Além disso, obtêm-se as relações tensão x deformação que conformam as leis constitutivas dos diferentes modelos utilizados para representar o comportamento dos solos (Murrugarra, 1996). A engenharia sísmica geotécnica não podia ficar fora dos avanços computacionais. Logo, a avaliação dinâmica de uma barragem precisava de procedimentos baseados em métodos numéricos avançados que permitissem analisar as tensões, deformações e o comportamento da poropressão. Finn (1982), Ashok *et. al.* (1985) e Finn (1999) apresentam a evolução cronológica da engenharia sísmica geotécnica computacional. Neles se descrevem os numerosos programas que apareceram, tais como SHAKE (Idriss, 1992) e TARA-3FL (Finn & Yogendrakumar, 1989), os quais foram progredindo até ter a capacidade de efetuar, tanto a avaliação estática quanto a avaliação dinâmica pelo método de análise de tensões totais e/ou efetivas. Conseqüentemente, na atualidade, é possível escolher o programa mais adequado para a análise dos dados dos ensaios in-situ e de laboratório de acordo com a importância do projeto de engenharia.

No presente estudo, decide-se trabalhar com o programa comercial chamado FLAC (*Fast Lagrangian Analysis of Continua*), originalmente desenvolvido por Peter Cundall em 1986, e comercialmente liberado pela ITASCA *Consulting Group, Inc.* O FLAC tem a facilidade de modelar problemas dinâmicos com capacidade de executar cálculos bidimensionais e tridimensionais mais pesados sem requerer memória excessiva, fazendo dele um programa versátil e de grande aceitação na engenharia sísmica.

Descrevem-se, nos seguintes itens, as características principais utilizadas para simular os comportamentos estático e dinâmico de uma barragem de terra no programa FLAC, cujas aplicações serão ilustradas no seguinte capítulo.

5.1. Características gerais do programa FLAC

O programa FLAC utiliza uma formulação de diferenças finitas explícitas que executa uma análise lagrangeana. O termo explícito significa que o programa utiliza um tempo de processamento para resolver o problema sem armazenar a matriz de rigidez. A formulação lagrangeana torna possível a deformação da discretização gerada, adicionando os deslocamentos incrementais às coordenadas. A formulação constitutiva em cada passo de tempo do processamento pertence às pequenas deformações, mas quando for um conjunto de passos é equivalente a grandes deformações.

O método de diferenças finitas é uma das técnicas numéricas mais antigas utilizadas para resolver equações diferenciais. Neste método, cada derivada de um grupo de equações governantes é substituída por uma expressão algébrica escrita em termos de variáveis de campo (como a tensão ou o deslocamento) num ponto discreto no espaço. No método de elementos finitos (MEF) as quantidades do campo variam através de cada elemento usando funções específicas controladas por parâmetros. A fórmula consiste em ajustar estes parâmetros para minimizar os erros. Todavia, ambos os métodos produzem um grupo de equações algébricas para resolver, resultando em equações idênticas.

O MEF mistura frequentemente as matrizes dos elementos numa matriz de rigidez global, enquanto o método de diferenças finitas é relativamente eficiente para re-estruturar as equações de diferenças finitas a cada passo. Em geral, o método explícito trabalha melhor para simular sistemas não-lineares, instabilidades físicas e problemas com grandes deformações; mas não é eficiente para os problemas lineares simples.

Mesmo que o FLAC seja usado para resolver um problema estático, ele usa as equações dinâmicas de movimento na sua formulação, com o objetivo de assegurar que a metodologia numérica utilizada mantenha a condição estável quando o sistema físico modelado for instável (Itasca, 2005).

O FLAC contém uma linguagem de programação intrínseca chamada FISH (FLACish), que permite ao usuário definir novas variáveis e funções. Estas funções podem ser usadas para estender as utilidades do FLAC ou para

implementar novos modelos constitutivos. Além disso, o FISH tem uma biblioteca com algoritmos prontos, que podem ser chamados para ajudar na simulação das condições específicas da análise.

Adicionalmente, o FLAC apresenta-se de duas formas: modo de comandos (*command-driven mode*) e modo de menu (*menu-driven mode*). No primeiro caso, os comandos devem ser inseridos como dados de entrada para que o código opere. No segundo caso, todos os comandos podem ser acessados clicando no modo gráfico ou GIIC (*Graphical Interface for Itasca Codes*).

5.2. Mecanismo inicial da modelagem da barragem

O primeiro passo é definir um mecanismo inicial que permita resolver o problema, colocando todos os dados necessários para a posterior análise estática. Para cumprir este requerimento, no caso em que se esteja trabalhando no GIIC, precisa-se criar um projeto onde são organizados os diferentes estágios de processamento.

5.2.1. Configuração do projeto

A configuração da análise depende do tipo de resposta que se deseja obter. A configuração de fluxo (*config gwflow*) é usada no caso em que as poropressões existentes no projeto sejam variáveis (condição não drenada ou fluxo), conseqüentemente, também é necessário o uso da configuração que permite a atualização das tensões (*config ats*). A opção dinâmica (*config dyn*) é usada quando este tipo de análise for desejado. Em alguns casos é preciso o uso de variáveis extras para o desenvolvimento de algumas funções FISH. É importante ressaltar que o número de variáveis extras definidas no início do projeto influenciam a memória utilizada e, portanto, a velocidade de processamento do programa.

5.2.2. Geração de malha

A malha, cuja forma inicialmente é retangular ou quadrada, define a geometria do problema. As linhas ou colunas podem se distorcer para que seja obtida a forma desejada; adicionalmente, podem ser criadas áreas vazias ou nulas (sem discretização) e juntar ou aderir malhas para conseguir sistemas mais complexos. A malha é dividida em zonas, que por sua vez são formadas por nós unidos por linhas. Estas zonas podem aumentar ou diminuir de tamanho através de uma razão proporcional ao longo da malha. Em geral, sistemas com malha mais fina (mais zonas por unidade de comprimento) conduzem a resultados mais acurados. A relação entre a altura e a largura da zona também afeta a precisão da resposta. Se o modelo contiver diferentes tamanhos de zonas, então uma variação gradual em tamanho deve ser usada para maior exatidão. Como todo método numérico, os resultados vão depender da malha definida para representar o sistema físico. Como regra geral, é recomendável uma razão comprimento/altura de zona (*ratio*) tão próxima da unidade quanto possível, uma razão 5:1 é potencialmente inexata; e por sua vez, é válida uma relação máxima de 4:1 entre zonas vizinhas ou adjacentes (Itasca, 2005).

A geração de malha enfrenta a dificuldade de satisfazer ambos os requerimentos: minimizar a influência do contorno e fornecer zonas suficientes na região de interesse. Não é conveniente que se tenha grandes saltos em tamanhos de zonas entre diferentes regiões da malha. É melhor usar variações suaves e atribuir ao zoneamento desde a malha fina, na zona de interesse, até discretizações grosseiras, nas áreas próximas ao contorno.

Se for necessária a análise dinâmica, a malha deve ser gerada assegurando a propagação vertical das ondas do sismo através dos diferentes materiais que compõem a barragem. Para isso, são preparadas duas tabelas que permitam calcular o tamanho da malha com uma razão variável com a profundidade. A primeira tabela é usada para determinar o tamanho máximo da zona através de toda a profundidade do material. A segunda tabela utiliza a primeira e a geometria da barragem para obter a razão do tamanho das zonas (tanto na direção horizontal quanto na direção vertical), com objetivo de estabelecer um número de zonas

adequado para cada material (para que o cálculo não seja muito lento e não use muita memória do computador).

Existem muitos procedimentos para a geração da malha. O manual do programa FLAC explica os diversos comandos utilizados para criar a malha. O objetivo sempre é evitar zonas de forma triangular que originam uma geometria não adequada na malha, parando o processamento do programa especialmente na combinação da opção de grandes deformações (*set large*) com a análise dinâmica. Alguns ajustes são necessários para evitar problemas de degeneração geométrica das zonas devido ao duplo cálculo triangular (feito com 3 pontos) em cada zona. A revisão das zonas de cor amarela e/ou vermelha (as quais aparecem no modo GIIC) deve ser realizada para evitar este tipo de problemas nos cálculos posteriores.

Com base nas informações anteriores, são duas as formas de gerar a malha: usando o comando *gentabletop*, ou somente gerando linhas por meio de tabelas. No primeiro caso, a geração de zonas quadradas é maior, mas também o número de zonas, portanto, é difícil manter a homogeneidade no tamanho das zonas e é muito mais demorado o processamento do programa. No segundo caso, é difícil trabalhar na opção de grandes deformações porque, quando a estrutura for submetida a grandes solicitações de carregamento, a malha se deforma excessivamente.

O tipo de amortecimento utilizado na avaliação dinâmica também pode influenciar no número de zonas da malha. No caso em que se utilize o amortecimento Rayleigh, precisa-se fazer primeiro uma aferição com o objetivo de determinar o fator de redução do módulo de cisalhamento. Este último valor encontrado é multiplicado pelo módulo de cisalhamento máximo (G_{max}). Logo, a velocidade de cisalhamento será muito menor e, conseqüentemente, o número de zonas será maior. Os valores dos parâmetros de entrada para o FLAC serão diferentes, mas o propósito é chegar a respostas similares considerando amortecimentos maiores. A aferição será descrita posteriormente no item 5.4.4.

No caso que o programa não possa gerar malhas com um número de zonas elevado, deve-se aumentar a memória padrão que o programa utiliza (24.00 MBytes com dupla precisão) a partir de comandos descritos no manual (Itasca, 2005).

5.3. Modelagem estática

A modelagem estática abrange a caracterização adequada das propriedades mecânicas dos materiais utilizados e a simulação do processo real de construção da barragem. O sucesso desta análise depende da técnica para incorporar as características mecânicas no modelo numérico e, da adequada escolha das relações constitutivas. Aqui são descritos os principais itens que compõem a análise estática.

5.3.1. Modelos constitutivos

O comportamento constitutivo do material, associado às suas propriedades, determina o tipo de modelo tal que se ajuste à resposta real do sistema. No FLAC existem 11 modelos dispostos em 3 grupos:

Modelo nulo: usado para representar material removido ou escavado.

Grupo de modelo elástico: Este modelo fornece a mais simples representação do comportamento do material. Este modelo é válido para materiais contínuos e homogêneos que apresentam um comportamento tensão - deformação sem histerese no descarregamento. Este grupo é composto pelo modelo isotrópico e pelo modelo transversalmente isotrópico

Grupo de modelos plásticos: conformados por uma função de escoamento, uma função de endurecimento/amolecimento e uma lei de fluxo. O FLAC conta com 8 modelos plásticos: Drucker – Prager, Mohr – Coulomb, *ubiquitous - joint*, *strain hardening/softening*, *bilinear strain – hardening/softening ubiquitous – Joint*, *double yield*, *cam – clay* modificado e Hoek & Brown.

Também existem 5 modelos dependentes do tempo para a opção *creep* e 1 modelo gerador de poropressão para a opção dinâmica. Além disso, o FLAC fornece o código na linguagem de programação C⁺⁺ dos modelos intrínsecos descritos acima para que o usuário possa modificar ou criar seus próprios modelos como bibliotecas dinâmicas (*dynamic link libraries*, DLLs).

5.3.2. Propriedades dos materiais

O modelo elasto–perfeitamente plástico é utilizado para a simulação de uma barragem. Este modelo precisa de 6 parâmetros: 3 propriedades elásticas e 3 parâmetros de plasticidade. Os parâmetros elásticos consistem da massa específica (ρ), do módulo de cisalhamento (G) e do módulo de compressão volumétrica (K). Os parâmetros de plasticidade são a coesão (c), o ângulo atrito (φ) e o ângulo de dilatância (ψ).

O ângulo de dilatância é empregado em análises numéricas para corrigir a excessiva variação volumétrica negativa (expansão) do solo previsto pelo modelo Mohr – Coulomb com lei de fluxo associada. Os solos coesivos tendem a apresentar pouca dilatância ($\psi \sim 0$), com exceção das argilas fortemente pré-adensadas. Nas areias, a dilatância depende da densidade relativa e do ângulo de atrito; para areias de quartzo a ordem da dilatância pode ser aproximada por $\psi = \varphi - 30^\circ$ e para valores $\varphi < 30^\circ$ o ângulo de dilatância é geralmente considerado nulo. Um ângulo de dilatância positivo em condições drenadas implica que o solo sofrerá expansão contínua de volume, sem atingir a condição de estado crítico, o que é claramente irreal; em condições não drenadas, uma dilatância positiva associada à condição de não-variação de volume, leva à geração de poropressões negativas (sucção). Em uma análise não drenada, em termos de tensões efetivas a resistência do solo pode ser superestimada.

No caso em que alguma das propriedades for variável, o uso da linguagem de programação FISH permite efetuar um algoritmo que permita simular as condições requeridas. Por exemplo, para determinar o valor do módulo de cisalhamento estático G_{max} , se este parâmetro for dependente da tensão de confinamento, poderia ser usada a seguinte equação:

$$G_{max} = 21,7 * (K_{2,max}) * P_a \left(\frac{\sigma'_m}{P_a} \right)^{0,5} \quad (5.1)$$

na qual σ'_m é a tensão média efetiva e P_a é a pressão atmosférica (Seed, 1970; Byrne, 1991 e Morote, 2006). O parâmetro $K_{2,max}$ é um valor que expressa a influência do índice de vazios e da amplitude de deformação (Seed *et al.*, 1986, Kramer, 1996).

Se o valor do módulo de cisalhamento variar, conseqüentemente o valor do módulo de compressão volumétrica (K) também varia, calculando-se os valores por meio da equação para materiais elásticos usando o valor do módulo de cisalhamento (G) e o coeficiente de Poisson (ν):

$$K = \frac{2G(1+\nu)}{3(1-2\nu)} \quad (5.2)$$

Algumas condições de campo exigem a variação de outros parâmetros como, por exemplo, o ângulo de atrito, cuja aplicação será detalhada no item 6.2.

5.3.3. Interação fluido-mecânica

O fluxo de água ou outro tipo de fluido pode ser modelado independentemente com o cálculo mecânico (desacoplado), ou em paralelo (acoplado). O FLAC fornece 4 técnicas numéricas de solução: um esquema de fluxo básico (*basic flow scheme*) e 3 esquemas de fluxo rápido, que são o fluxo rápido saturado (*saturated fast flow*), o fluxo rápido não saturado (*unsaturated fast flow*) e a normalização do módulo de compressão volumétrica da água (*fluid bulk modulus scaling*). O método de fluxo básico torna mais lento o processamento com relação aos esquemas de fluxo rápido (Itasca, 2005). Para os três esquemas de solução, precisa-se como dado o coeficiente de compressão volumétrica da água (K_w), cujo valor real equivale a 2×10^6 kPa. Quando for utilizado o método de solução do esquema fluxo-fluido básico e a configuração mecânica estiver apagada, K_w pode ser estabelecido com um valor baixo para avaliar o lençol freático na condição permanente em um tempo muito curto, porém, a escala do tempo não será a real. Conseqüentemente, o procedimento de utilização de um módulo de compressão volumétrica baixo da água é muito útil quando o nível de água for requerido, mas o tempo obtido para chegar a esse estado não for importante (Itasca, 2005).

É necessário ressaltar que o valor da permeabilidade usada no FLAC é o coeficiente de mobilidade (k), que é o coeficiente do termo da poropressão na lei de Darcy, calculada como:

$$k = \frac{k_H}{g\rho_w} \quad (5.3)$$

onde k_H é a condutividade hidráulica comumente usada na lei de Darcy, g é a gravidade e ρ_w é a massa específica da água.

O coeficiente de mobilidade não é influenciado pelas propriedades do fluido, tais como a densidade da água e a viscosidade.

5.3.4. Condições iniciais e de contorno

As condições iniciais compreendem a aplicação de solicitações de carregamento estático ou de fluxo na estrutura para logo executar o primeiro processamento. Pode-se inicialmente avaliar a resposta estática somente da fundação (considerando assim como etapa inicial antes da construção), o processo construtivo através de camadas ou diretamente a etapa ao final da construção.

No programa FLAC tem-se diferentes opções para obter as tensões iniciais da estrutura:

- Usando como dado de entrada somente a gravidade e deixando que o processamento do programa obtenha as tensões iniciais;
- Considerando como valores conhecidos as tensões iniciais nos eixos X , Y e Z ; os quais são calculados manualmente utilizando o coeficiente de empuxo em repouso (K_o) que é definido como:

$$K_o = \frac{\sigma'_x}{\sigma'_y} \quad (5.4)$$

onde σ'_x e σ'_y são as tensões efetivas nos eixos X e Y respectivamente.

Se o solo for normalmente-adensado, o valor de K_o poderia ser calculado como:

$$K_o = 1 - \text{sen}\phi' \quad (5.5)$$

onde ϕ' é o ângulo de atrito efetivo (Jaky, 1948);

- Misturando os dois casos anteriores, em outras palavras, colocando como dados de entrada as tensões nos três eixos e a gravidade, e executando então o programa.

Se somente a tensão numa direção (X , Y ou Z) for dado de entrada, o programa calcula as tensões restantes considerando o modelo elástico e, portanto, considera o valor de K_o definido por:

$$K_o = \frac{\nu}{1-\nu} \quad (5.6)$$

onde ν é o coeficiente de Poisson.

Em relação às condições de contorno, dependendo das condições do problema a estrutura avaliada é fixada na base e nos extremos nos eixos X e Y . Adicionalmente, dependendo das condições do sítio, aplicam-se tensões ou pressões nos pontos da malha onde são necessárias. Convém desde já salientar que a convenção de sinais no FLAC segue a notação tradicional de resistência dos materiais. Na Figura 5.1 são ilustradas as diferentes condições de contorno que podem ser aplicadas numa barragem.

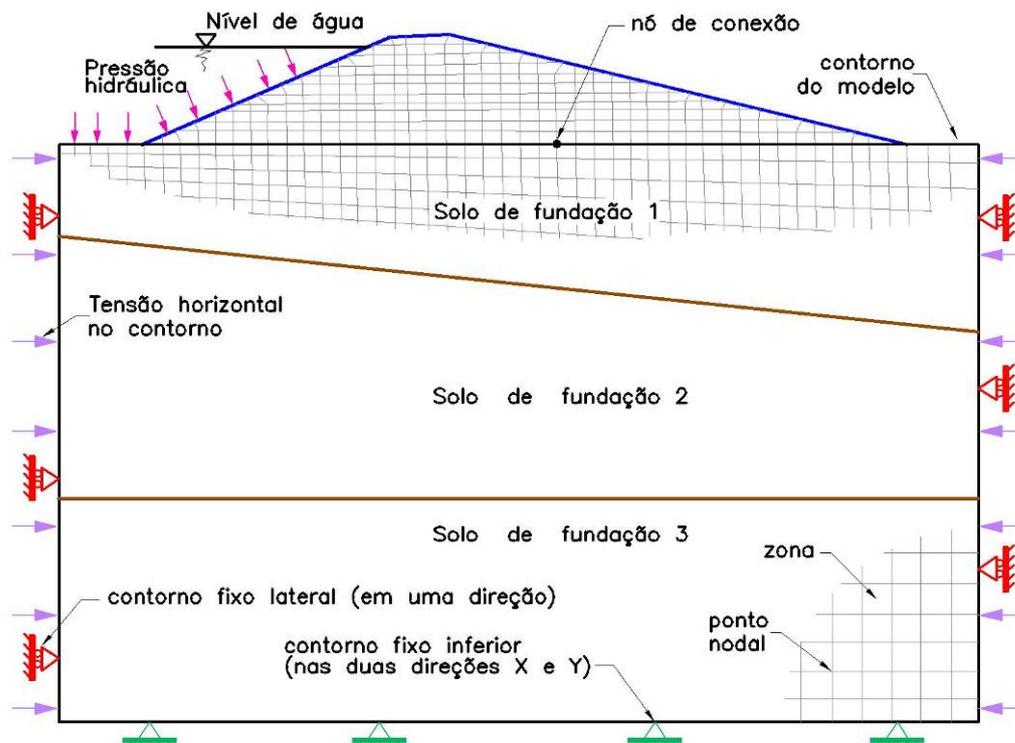


Figura 5.1 – Condições de contorno aplicadas à estrutura no programa *FLAC* (adaptado de Itasca, 2005).

5.4. Modelagem dinâmica

Para o cálculo da resposta da barragem devido a excitações sísmicas, precisa-se de condições de contorno especiais que ajudem a obter uma propagação adequada das ondas geradas pelo carregamento dinâmico. Além disso, o registro sísmico, se necessário, deve ser processado para ter um número de pontos que

abranja os valores máximos e evite o processamento lento. Finalmente, a eleição do amortecimento que se acople melhor às condições impostas pela solicitação sísmica cumpre um papel importante, já que dele depende conseguir as respostas reais da estrutura avaliada. Devido, às vezes, ao tempo de processamento demasiadamente longo, o FLAC fornece procedimentos para diminuir o tempo de cálculo da resposta. Este sistema é chamado de *dynamic multistepping*.

5.4.1. Processamento do registro da aceleração

Frequência de corte

No caso em que se precise de uma avaliação dinâmica, o registro sísmico que será introduzido no processamento tem papel importante para a geração da malha. O número de zonas que conforma a discretização depende da frequência de corte com que será filtrada a história no tempo do sismo.

Geralmente o dado mais facilmente obtido é a história da aceleração no tempo. Na maioria das vezes ela apresenta frequências elevadas, cujas amplitudes respectivas não precisam ser consideradas, já que a maior parte da potência do registro sísmico corresponde às frequências baixas. Tal fenômeno pode ser observado quando se plota a função densidade de espectro de potência (FDEP) da amplitude da transformada rápida de Fourier (*fast Fourier transform*, FFT) versus a frequência. Aquela frequência que permite ter uma perda de potência de um por cento ou menos se denomina frequência de corte (f_c).

Obtida a frequência de corte, procede-se a remoção das frequências superiores que este valor por meio da filtragem do registro sísmico, que para este caso seria um filtro de passa-baixa.

É importante ressaltar que também se pode aplicar o filtro de passa-alta e o filtro de passa-banda. O filtro de passa-alta é utilizado para remover as frequências menores, mas esta filtragem pode afetar o posterior processamento de integração. Os filtros de passa banda eliminam aqueles possíveis ruídos de frequências altas e baixas, simultaneamente.

O mais importante ao se aplicar os filtros é determinar a frequência de corte adequada, já que uma escolha ruim pode apagar parte do sinal de interesse e não remover aquelas frequências desnecessárias ao sinal, que gerariam uma malha

mais fina e conseqüentemente, causaria um tempo elevado de processamento e um grande consumo de memória.

Correção de linha base

Após a filtragem, o registro sísmico encontra-se com valores de aceleração, velocidade e deslocamento finais diferentes de zero. Às vezes, ocorre que os valores do acelerograma se encontram deslocados em relação à linha zero da aceleração. Este erro acontece porque o acelerograma não está perfeitamente nivelado no seu deslocamento devido à filtragem. Ainda que este erro possa ser inapreciável na aceleração, pode ser muito importante quando se obtêm a velocidade e o deslocamento pela integração, já que se contabiliza a área que existe entre a curva da aceleração e a linha base. Para ter uma idéia da importância deste erro, pode-se supor um deslocamento constante do acelerograma em relação à linha base de 0,001g, como se ilustra na Figura 5.2. Ao integrar com este erro, obtêm-se um incremento linear da velocidade. Procedendo uma nova integração nota-se um incremento parabólico do valor do deslocamento. Assim, o erro cometido no deslocamento, quando transcorridos 20 segundos, será de 196 cm.

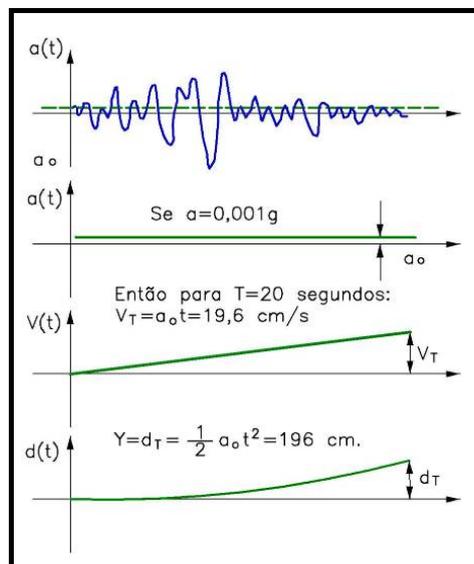


Figura 5.2 – Erros introduzidos nas velocidades e deslocamentos pela falta da correção da linha base no acelerograma. (Modificado de Hudson (1979), *apud* de Carreño *et al.* (1999)).

O FLAC tem uma função especial para efetuar esta correção de linha base. Ele pede como dado a velocidade filtrada e corrige o deslocamento para um valor muito próximo de zero. O algoritmo consiste em adicionar uma onda senoidal à história no tempo da velocidade para produzir um deslocamento final de zero.

Finalmente, cabe mencionar que existem muitos programas implementados especialmente para efetuar o processamento do registro sísmico. Entre os mais conhecidos estão o Degtra A4, BAP software (*Basic Strong-Motion Accelerogram Processing Software*), etc.

5.4.2. Discretização da malha para a transmissão de ondas

Kuhlemeyer & Lysmer (1973) concluíram que para uma representação exata da transmissão da onda através do modelo, o tamanho do elemento (no caso do FLAC seria zona) Δl , deveria ser menor que aproximadamente um décimo a um oitavo do comprimento de onda do carregamento dinâmico. Esta condição é expressa com a seguinte relação:

$$\Delta l \leq \frac{\lambda}{10} \text{ a } \frac{\lambda}{8} \quad (5.7)$$

onde λ é o comprimento de onda associado à frequência predominante que contém uma quantidade apreciável de energia.

A frequência de corte pode ser determinada com a seguinte relação:

$$f_c = \frac{v_s}{\lambda} \quad (5.8)$$

onde v_s é a velocidade da onda de cisalhamento é a sua vez:

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (5.9)$$

sendo G o módulo de cisalhamento e ρ a massa específica.

Se forem dados v_s e o valor mínimo de f_c e, misturando as equações (5.7) e (5.8), pode-se calcular o λ e conseqüentemente o Δl equivalente à dimensão máxima das zonas que compõem a malha.

5.4.3. Amortecimento mecânico

Todo material, quando submetido às forças atuantes em um sistema dinâmico, tem algum grau de amortecimento, do contrário, o sistema oscilaria indefinidamente. O amortecimento se origina pela perda de energia devido ao atrito interno no material intacto ou pela deformação irreversível (plasticidade ou

viscosidade). Quanto maior a viscosidade ou a plasticidade, maior energia de vibração pode ser dissipada. No FLAC, tanto a solução estática quanto a solução dinâmica apresentam amortecimento nas suas equações de movimento. Na solução estática, ou quase estática, a razão da mudança da energia cinética do modelo correspondente precisa de um amortecimento. Conseqüentemente o FLAC abrange 3 tipos de amortecimento: Amortecimento Rayleigh, amortecimento histerético e amortecimento local.

Amortecimento Rayleigh

Este tipo de amortecimento foi originalmente utilizado na análise dinâmica de estruturas e corpos elásticos para amortecer os modos de oscilação natural do sistema. Este amortecimento é aproximadamente independente da frequência num intervalo restrito de frequências específico. Ele é formulado como uma função das matrizes de massa e da rigidez seguindo a seguinte relação:

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K] \quad (5.10)$$

onde C é a matriz de amortecimento, α é a constante de amortecimento proporcional à massa e β é a constante de amortecimento proporcional à rigidez.

Na Figura 5.3 se apresenta a mudança do amortecimento crítico normalizado em relação à frequência. Para frequências de valores baixos, α é a constante predominante, conseqüentemente a massa é o fator prevalecente; enquanto para frequências com valores elevados a constante β domina o sistema e, portanto, a rigidez é a variável prevalecente. Para um único valor de frequência, que é a frequência mínima (f_{min}), o amortecimento Rayleigh está composto por partes igualmente proporcionais tanto de massa quanto de rigidez.

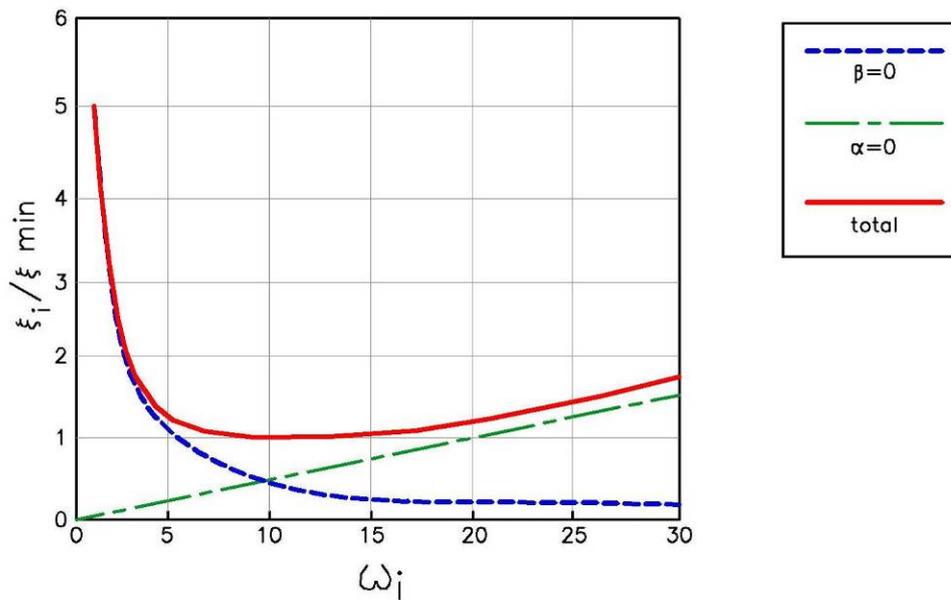


Figura 5.3 – Variação da razão de amortecimento crítico normalizado com a frequência angular (Itasca, 2005).

É importante ressaltar que o amortecimento Rayleigh somente pode ser usado para um intervalo limitado de frequências e envolve, para soluções explícitas, uma redução severa nos passos de tempo.

Amortecimento Histerético

O amortecimento histerético é uma simulação no domínio do tempo que utiliza a curva de degradação do módulo de cisalhamento para obter uma curva de tensão x deformação incremental. Este tipo de amortecimento, implementado no FLAC, utiliza os mesmos ensaios de laboratório utilizados no método linear equivalente (*equivalent linear method*, ELM) e busca obter uma simulação não linear utilizando um processo linear durante sua resolução.

O FLAC fornece quatro tipos de amortecimento histerético: o modelo padrão (*default model*), os modelos sigmoidais sig3 e sig4 (*sigmoidal models*) e o modelo Hardin/Drenevich (*Hardin/Drnevich model*).

No modelo de histerese padrão, a curva do módulo de cisalhamento *versus* a deformação cíclica é desenvolvida ajustando a curva de forma *s* para uma equação cúbica incluindo uma inclinação zero para as deformações menor e maior.

As curvas sigmoidais são monotônicas no intervalo definido e têm um comportamento assintótico apropriado, portanto, são as curvas que apresentam o melhor ajuste para representar a curva de degradação do módulo de cisalhamento.

Para o modelo de Hardin/Drnevich, de acordo com Itasca (2005), Hardin & Drnevich (1972) sugeriram a seguinte relação:

$$M_s = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_{ref}}} \quad (5.11)$$

onde M_s é o módulo secante da curva tensão x deformação e γ_{ref} é determinado como a deformação respectiva para o fator de redução do módulo de cisalhamento (G/G_{max}) igual a 0,5.

Para os quatro tipos de amortecimento hysterético, o fator de redução do módulo de cisalhamento é obtido diretamente de ensaios de laboratório desenvolvidos por Seed & Idriss (1970) e Hardin & Drnevich (1972), enquanto a razão do amortecimento crítico (ξ) é obtida pela relação:

$$\xi = \frac{W_d}{4\pi W_s} = \frac{1}{2\pi} \frac{A_{laço}}{G_{sec} \gamma_c^2} \quad (5.12)$$

na qual W_d é a energia dissipada no ciclo, W_s é a energia de deformação máxima, $A_{laço}$ é a área do laço de histerese e G_{sec} é o módulo de cisalhamento secante.

Na Figura 5.4 são apresentadas as curvas do fator de redução do módulo para o amortecimento default e sig3, comparadas com o amortecimento desenvolvido no programa SHAKE (ver item 5.4.4). Observa-se uma boa correlação, porém, para a curva de amortecimento crítico, não há compatibilidade para deformações maiores a 0,01%, tal como se apresenta na Figura 5.5.

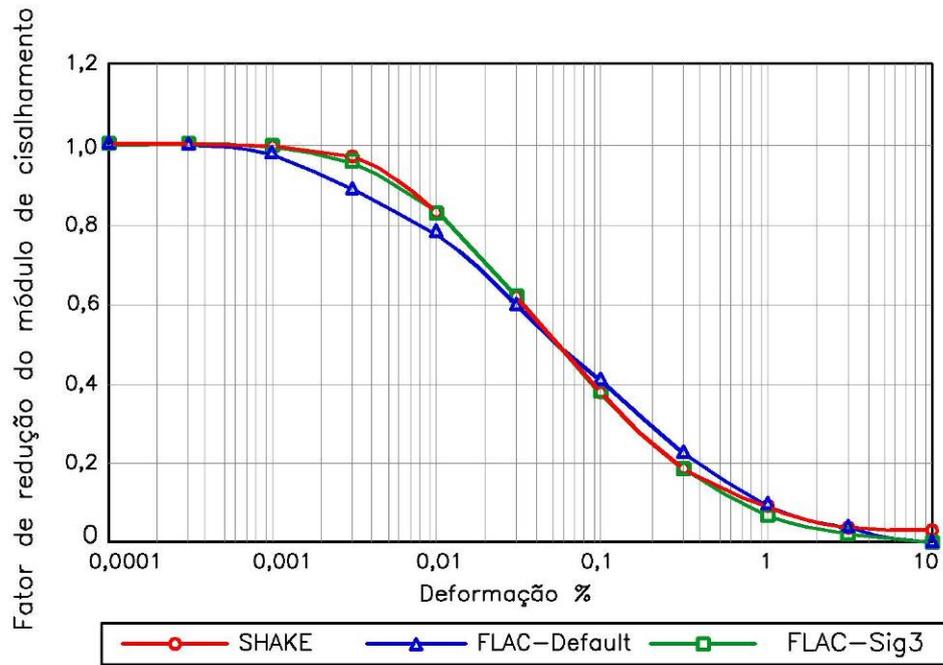


Figura 5.4 – Curvas do fator de redução do módulo de cisalhamento implementados no SHAKE e no FLAC (modificado de Itasca, 2005).

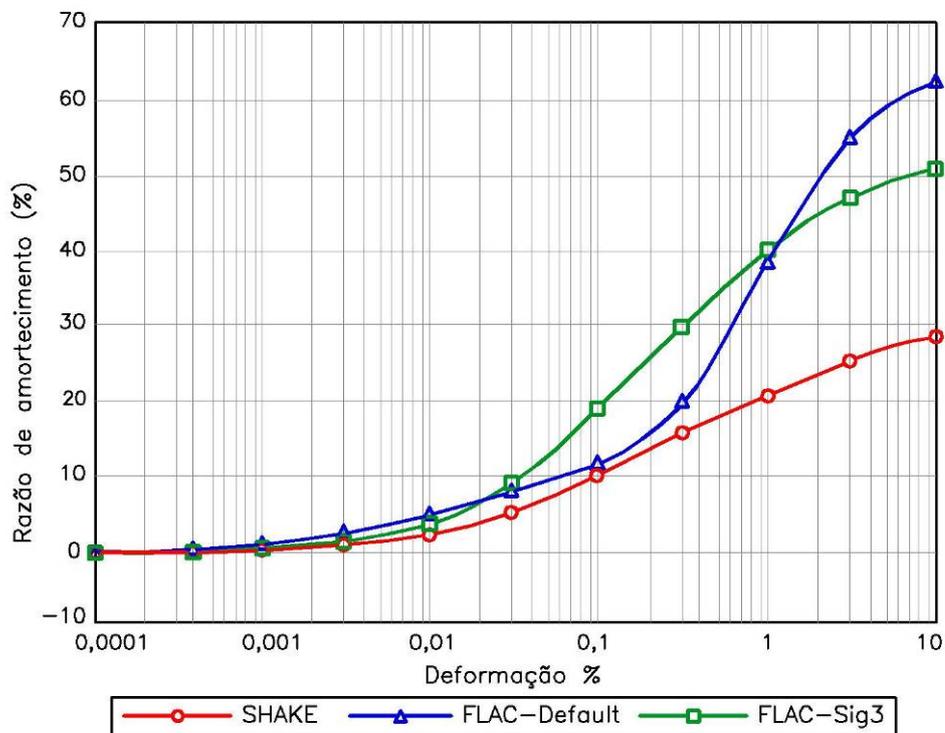


Figura 5.5 – Curvas da razão do amortecimento crítico implementados no SHAKE e no FLAC (adaptado de Itasca, 2005).

Na Tabela 5.1 são apresentados os parâmetros utilizados nos diferentes tipos de amortecimento que correlacionam com o limite superior da curva do módulo de cisalhamento e do amortecimento para areias, desenvolvido por Seed & Idriss (1970), e incluídas no programa SHAKE. Mais detalhes do amortecimento histerético implementado no FLAC podem ser encontrados em Itasca (2005).

Tabela 5.1 – Ajuste numérico para areias com as curvas de Seed & Idriss (1970). Adaptado de Itasca (2005).

Dados para o ajuste	Default	Sig3	Sig4	Hardin & Drnevich
Limite superior da Curva para areias (Seed & Idriss, 1970)	L ₁ =-3,325 L ₂ =0,823	a = 1,014 b= -0,4792 x ₀ =-1,249	a=0,9762 b= -0,4393 x ₀ =-1,285 y ₀ =0.03154	γ _{ref} = 0,06
Limite superior da Curva para argila (Seed & Idriss, 1970)	L ₁ =-3,156 L ₂ =1,904	a = 1,017 b= -0,5870 x ₀ =-0,633		

Convém desde já salientar que a formulação do amortecimento histerético implementada no FLAC não tem como objetivo cumprir a função de um modelo constitutivo, pelo contrário, esse amortecimento deve ser usado como um suplemento para os modelos não-lineares e não como uma opção para simular escoamento (Cundall, 2006-a).

Amortecimento Local

No amortecimento não viscoso local a força de amortecimento em um nó é proporcional à força desbalanceada. A direção da força desbalanceada é tal que a energia é sempre dissipada. Seu algoritmo consiste em amortecer a aceleração, adicionando uma massa aparente quando a velocidade é nula e removendo-a quando a aceleração for nula (i. e. nos instantes de velocidade máxima). Assim, a massa é conservada durante um ciclo de oscilação, mas a energia é removida do sistema por duas vezes.

De acordo com Itasca (2005), a quantidade de energia dissipada ΔW é proporcional à máxima energia de deformação transiente W e a razão $\Delta W/W$ é independente da frequência, podendo ser relacionada com uma razão de amortecimento crítico ξ através da relação proposta por Kolsky (1963):

$$\alpha_L = \pi\xi \quad (5.13)$$

onde α_L é o coeficiente do amortecimento local.

O amortecimento local implementado no FLAC pode também ser utilizado em análises dinâmicas, considerando um coeficiente apropriado para a propagação da onda. Este amortecimento é útil em problemas dinâmicos como uma aproximação para incluir o amortecimento histerético; porém, ele pode chegar a valores não reais quando a complexidade das formas de onda se incrementam.

5.4.4. Aferição com o programa SHAKE

Depois de obtido o sismo, o seguinte passo para a avaliação dinâmica é determinar os parâmetros dinâmicos de entrada para a análise no FLAC. Estes parâmetros são o fator de redução do módulo de cisalhamento e o amortecimento que serão obtidos através da aferição com o programa SHAKE.

A aferição consiste em ajustar a resposta de uma análise dinâmica unidimensional no FLAC com os resultados de uma simulação similar no programa SHAKE, com o objetivo de determinar o amortecimento mais apropriado para o uso na análise dinâmica bidimensional da barragem que se executará no FLAC.

O programa SHAKE permite calcular a resposta de um depósito de solo composto por camadas horizontais semi-infinitas, apoiado num espaço semi-uniforme submetido a ondas de cisalhamento propagadas verticalmente. A análise é feita por meio de um processo iterativo no domínio da frequência e considerando um comportamento linear equivalente (Idriss & Sun, 1992).

Inicialmente é preciso definir a seção da barragem a ser representada como uma coluna para a análise unidimensional e o tipo de amortecimento (histerético ou Rayleigh) a ser usado no programa, já que a aferição varia com o tipo de amortecimento.

Escolhem-se as curvas do fator de redução do módulo de cisalhamento e a razão de amortecimento para areias e argilas desenvolvidas por Seed *et al.* (1986), usadas no programa SHAKE, que representem adequadamente cada material. De acordo com a Tabela 5.1, os diferentes tipos de amortecimento histerético implementados no FLAC foram correlacionados com a curva do limite superior de

Seed & Idriss (1970), e não se têm parâmetros que correlacionam pedregulhos ou solos misturados tais como areia siltosa o silte argiloso.

A razão da deformação uniforme equivalente pela deformação máxima, dado de entrada no SHAKE, é obtida com a magnitude do sismo (M) por meio da equação:

$$razão = \frac{(M-1)}{10} \quad (5.14)$$

Com este valor se efetuam as iterações no programa SHAKE e se determina os valores de tensões, deformações e acelerações máximas usadas para as comparações com a resposta do FLAC. Morote (2006) afirma que no modelo linear equivalente também utiliza-se uma distorção média ou efetiva empiricamente estimada como 2/3 da deformação cisalhante máxima (0,65 de acordo com Seed & Martin, 1966).

No FLAC é gerada uma coluna, onde o número de zonas é igual ao número de camadas de solo modelado no SHAKE. Porém, neste último programa deve ser adicionada mais uma camada que corresponde ao material de fundação (rocha ou solo) na qual se induz o sismo. Considera-se, como condição de contorno inferior, uma restrição de deslocamentos em ambas as componentes (X e Y) e, como condições de contorno laterais, uma restrição de deslocamentos horizontais, para assim simular um comportamento unidimensional.

Cada camada no SHAKE representa uma zona no FLAC e tem as mesmas propriedades (que dizer massa específica ρ , valor de G , etc). Dos quatro tipos de amortecimento hysterético que o FLAC fornece, descritos no item 5.4.3, aquele que melhor se aproximar à resposta do SHAKE, será usado na análise dinâmica da barragem.

No caso em que a aferição for feita com o amortecimento Rayleigh, calcula-se a máxima deformação (ou deformação média) obtida no SHAKE para cada material e, com esse valor, determina-se o fator de redução (G/G_{max}) e o amortecimento por meio das curvas desenvolvidas por Seed & Idriss (1970) ou Seed *et al.* (1986). O fator de redução é usado para calcular o valor de G , logo, ele será utilizado para determinar v_s por meio da relação (5.9) e, finalmente, com este dado se pode gerar a malha tal como se descrito no item 5.4.2.

Para determinar a frequência predominante necessária como dado para utilizar o amortecimento Rayleigh executa-se uma análise dinâmica não amortecida da barragem.

Morote (2206) detalha que de acordo com Bray *et al.* (1995) o programa SHAKE, em virtude da incorporação do modelo linear equivalente, somente deve ser empregado para movimentos com $PHA^{rocha} \leq 0,35$ g. Segundo informações da literatura, o modelo linear equivalente não produz resultados confiáveis para situações onde $PHA^{solo} > 0,4$ g ou deformação cisalhante de pico exceder aproximadamente 2% (Kavazanjian *et al.*, 1997).

Han & Hart (2006) apresentam algumas aplicações práticas do uso do amortecimento histerético, assim como também fornecem algumas recomendações para o ajuste adequado com os dados de laboratório representados no programa SHAKE.

5.4.5. Condições de contorno dinâmicas

Na avaliação dinâmica, as condições de contorno estáticas causam a reflexão das ondas de propagação externas para o interior do modelo e não permitem a radiação de energia necessária. Este problema pode ser minimizado com o uso dos contornos de campo livre (*free field*) e contornos silenciosos (*quiet boundaries*).

Condições de campo livre

O campo livre permite modelar as condições de contorno para uma avaliação dinâmica e simular o meio que existiria sem a presença da estrutura (meio infinito) na direção horizontal, evitando inserir distâncias longas, que incrementam o número de zonas e, portanto o tempo de processamento. A técnica implementada no FLAC desenvolve a execução de um cálculo unidimensional de campo livre em paralelo com a discretização principal. Ambos os contornos laterais da malha principal são acoplados à malha de campo livre através de amortecedores viscosos para simular os contornos silenciosos.

O modelo de campo livre consiste de uma coluna unidimensional com uma zona de largura que simule o comportamento do meio estendido. A altura da coluna é igual à dos contornos laterais, sendo discretizados em n elementos que

correspondem ao número de zonas ao longo dos contornos laterais da malha principal, tal como na Figura 5.6.

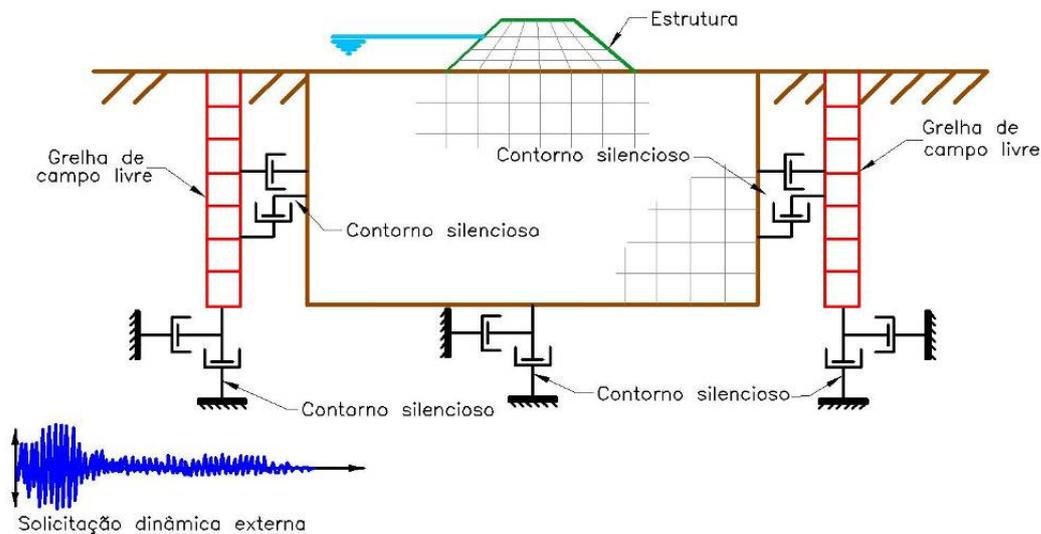


Figura 5.6 – Malha de campo livre (*free-field*) utilizada na avaliação dinâmica no FLAC (adaptado de Itasca, 2005).

As ondas planas que se propagam na direção ascendente não sofrem distorção porque o campo livre fornece condições idênticas às de um modelo infinito, já que as forças desbalanceadoras da malha de campo livre são aplicadas aos contornos da discretização principal. Se a malha principal for uniforme e não existir uma estrutura, os amortecedores laterais não serão ativados, porque a discretização do campo livre executará o mesmo movimento que a malha principal. Porém, se o movimento da discretização principal se diferencia daquele da malha de campo livre (devido à superfície da estrutura que irradia ondas secundárias) então os amortecedores absorvem energia de uma forma similar à ação dos contornos silenciosos.

Contornos silenciosos

Os contornos silenciosos, viscosos ou absorventes substituem a necessidade de utilização de grandes modelos para gerar contornos distantes, que conduzem a extensos processos computacionais, com o objetivo de evitar o problema da reflexão das ondas. De acordo com Itasca (2005), Lysmer & Kuhlemeyer (1969) projetaram este tipo de contorno composto por amortecedores independentes dispostos na direção normal e tangencial ao contorno do modelo. Os contornos silenciosos se ajustam melhor quando a solicitação dinâmica for interna (dentro da malha) tal como se ilustra na Figura 5.7.

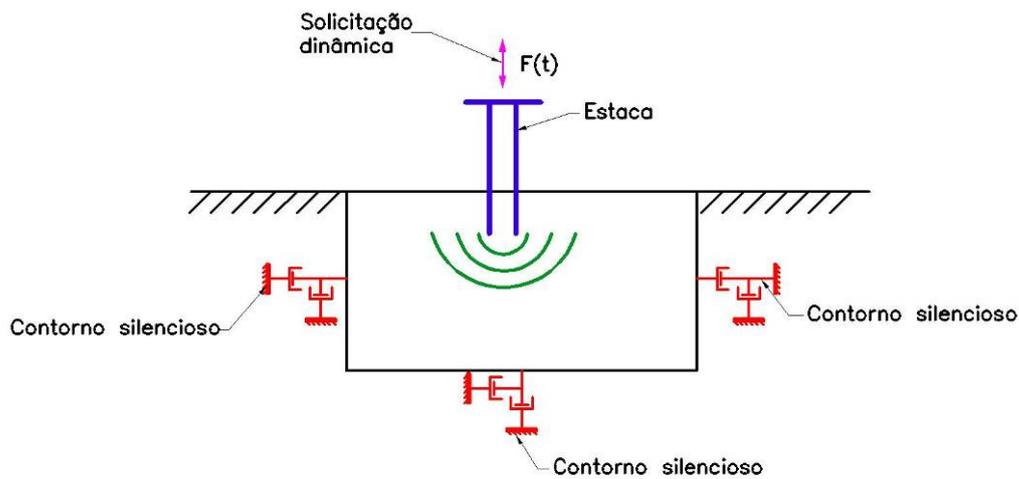


Figura 5.7 – Modelagem do contorno silencioso implementado no FLAC (modificado de Itasca, 2005).

A pesar de esta técnica ter a vantagem de trabalhar no domínio do tempo, ela pode ser efetiva somente para ângulos de incidência maiores de 30° , pois para ângulos menores ela ainda absorve energia, mas não é perfeita. No caso a solicitação for aplicada na base da malha, ela minimiza a reflexão das ondas de propagação e, portanto, a energia na direção vertical. É necessário ressaltar que no caso em que os contornos silenciosos sejam aplicados, não se pode induzir o sismo como aceleração ou velocidade, porque o efeito destes contornos se anularia. Neste caso se aplicaria o movimento sísmico de entrada como uma condição de contorno de tensão. Uma onda de velocidade pode ser transformada em uma onda de tensão através das seguintes fórmulas:

$$\sigma_n = 2(\rho v_p) v_n \quad (5.15)$$

$$\sigma_t = 2(\rho v_s) v_t \quad (5.16)$$

onde σ_n e σ_t são as tensões normal e cisalhante, ρ é a massa específica, v_p é a velocidade da onda P , v_s é a velocidade da onda S e v_n e v_t são as velocidades normal e tangencial da partícula.

O fator 2 que acompanha as equações (5.15) e (5.16) considera o fato de que as tensões aplicadas devem ser o duplo do que as observadas num meio infinito, já que a metade da energia é absorvida pelo contorno silencioso. Em certos casos, se o modelo for superficial, a superfície livre pode originar um incremento na velocidade da base. Assim, na execução de uma análise dinâmica, deve-se primeiramente avaliar-se a resposta na base da estrutura. Se a aceleração e/ou a

velocidade na base não foram similares às do sismo, então se deve efetuar um ajuste, reduzindo o fator de 2 até que a resposta da estrutura na base e o sismo de entrada coincidam (Itasca, 2005). Quispe (2008) apresenta um exemplo deste caso, usando um fator de 1,15 com o objetivo de concordar os registros na base de modo satisfatório.

5.5. Fator de segurança

O fator de segurança utilizado na análise de estabilidade de taludes é um procedimento mais que necessário na avaliação estática e dinâmica de uma barragem.

O cálculo do fator de segurança implementado no FLAC aplica a técnica de simulação do colapso ou da redução da resistência (*strength reduction technique*) desenvolvida por Dawson *et al.* (1999).

A análise de estabilidade é realizada por meio de fatores de segurança experimentais (*trial factors of safety*, F^{trial}), ajustando os valores de coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ) de acordo com as equações:

$$c^{trial} = \frac{1}{F^{trial}} c \quad (5.17)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{1}{F^{trial}} \tan \phi\right) \quad (5.18)$$

O F^{trial} para o qual ocorre o colapso da estrutura pode ser determinado com mais eficiência utilizando o método de agrupamento e biseção (*bracketing and bisection*). Primeiro definem-se os primeiros limites inferior e superior do agrupamento. O limite inferior inicial é um valor de F^{trial} é qualquer para o qual a simulação converge, enquanto o limite superior inicial é qualquer valor de F^{trial} para o qual a modelagem não converge. Após este passo, é testado o valor médio dos limites. Se a simulação convergir, então o limite inferior é substituído pelo novo valor. Do contrário, o novo valor substituirá ao limite superior. Este processo é repetido até que a diferença entre os dois limites seja menor que uma tolerância especificada.

A principal vantagem desta técnica é que a superfície de ruptura crítica pode ser determinada automaticamente e a desvantagem consiste em um tempo de processamento muito elevado.

5.6. Limitações do FLAC

Todo programa tem suas vantagens e desvantagens, portanto, o FLAC não poderia ser a exceção. Apesar de apresentar muitas vantagens, ele também possui limitações, que levam a uma análise individual da sua aplicabilidade para cada caso. O programa FLAC, quando comparado com outros programas implementados com o MEF, tem a desvantagem de possuir um tempo de processamento elevado devido aos muitos passos curtos de tempo necessários para a solução do problema. No FLAC, um sistema simples linear pode ter um tempo de processamento igual ao de um problema moderadamente complicado. Conseqüentemente, o usuário deverá decidir, dependendo do seu objetivo, se é ou não de interesse trabalhar com o FLAC.

5.6.1. Simulação em pequenas e grandes deformações

A literatura explica que para o caso da avaliação da liquefação, a modelagem no programa FLAC deveria ser processada no modo de grandes deformações (Youd et al., 2001), porém, há alguns casos em que, dependendo das condições da solicitação, não faz diferença entre a avaliação com pequenas ou com grandes deformações.

Por exemplo, no exemplo No. 18 do manual do FLAC procedeu-se a comparação de resultados entre ambos os modos, de pequenas e grandes deformações. Se o valor da aceleração máxima for igual ou menor a 0,3g a resposta da estrutura é praticamente igual em ambos os modos. Se a avaliação for desenvolvida com um valor máximo de aceleração de 0,5g, são obtidas diferenças tanto nos deslocamentos e tensões quanto nas poropressões em diferentes pontos de localização da estrutura, tal como se observa na Figura 5.8.

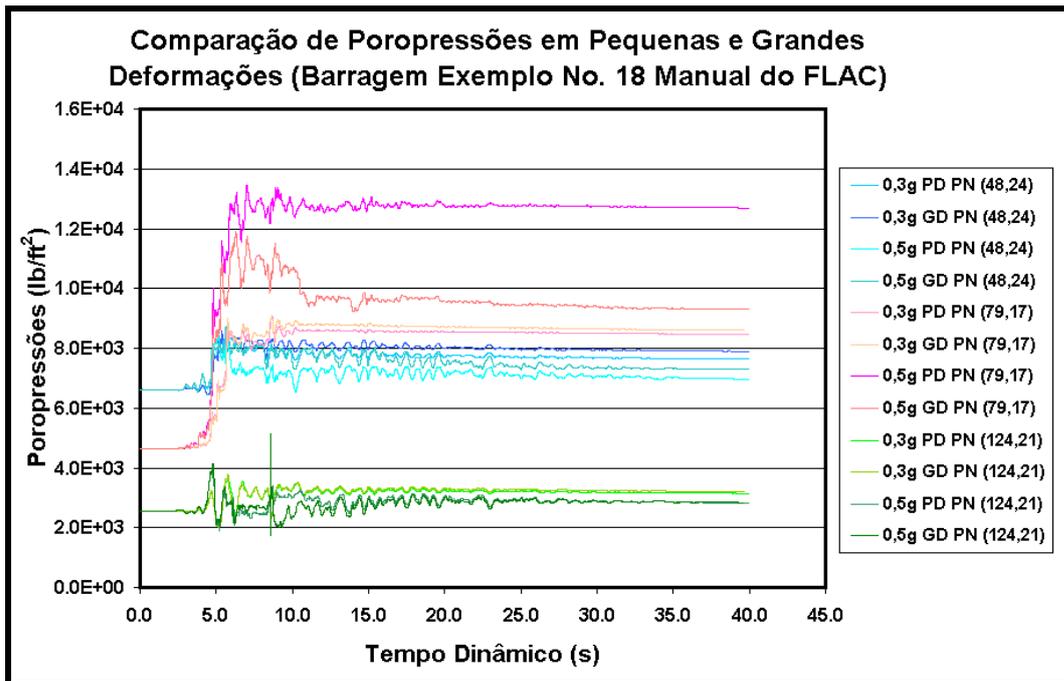


Figura 5.8 – Comparação para pequenas deformações (PD) e grandes deformações (GD), do comportamento da poropressão durante o sismo em diferentes pontos nodais da barragem do exemplo No. 18 do manual do FLAC.

De acordo com Itasca (2005), pode ser que a similaridade das respostas de alguns pontos nodais da barragem, observadas na Figura 5.8, como por exemplo do ponto nodal (124, 21), se deva ao fato da modelagem do *free field* ser a mesma tanto para pequenas deformações (PD) quanto para grandes deformações (GD); todavia, na maioria dos pontos nodais da malha as diferenças são consideráveis como no ponto nodal (79,17).

A modelagem do programa FLAC para grandes deformações é, na realidade, para grandes deslocamentos, porque as coordenadas iniciais dos pontos da malha mudam de acordo com os deslocamentos obtidos durante o processamento, chamando-se esta técnica de sistema lagrangeano, tal como já foi mencionado no item 5.1.

Uma das principais desvantagens do programa FLAC é que as zonas podem chegar a se deformar além do limite aceitável pelo programa, originando-se um erro que faz parar o processamento, aparecendo uma mensagem de “*bad geometry*”. Este caso, dependendo das condições do problema (tais como a malha e o valor da aceleração máxima do sismo), pode ser resolvido com o seguinte procedimento:

- Gerando novamente a malha inicial, tentando evitar zonas triangulares e forçando a malha a ter, no possível, somente zonas quadradas, já que estas zonas se ajustam melhor à análise de plasticidade (Itasca, 2005).
- Aplicando valores elevados de coesão e/ou ângulo de atrito nas zonas que sejam afetadas por estas deformações excessivas.
- Colocando a opção “*large strain-mode*” somente para avaliação dinâmica no intervalo pico do sismo.
- Usando uma composição de amortecimento local com amortecimento Rayleigh, pois o amortecimento histerético demonstra ter alguns problemas quando a aceleração do sismo é muito elevada e intensa.
- Avaliando a possibilidade real de se ter um sismo com grandes acelerações na zona estudada.
- Diminuindo o passo do tempo (comando *dydt* no FLAC).

Às vezes, contudo, apesar de se aplicar estas tentativas de solução não se chega a modelar a estrutura para grandes deformações. Este foi o caso do presente estudo, razão pela qual o exemplo de aplicação do capítulo 6 foi processado para pequenas deformações.

5.6.2. Uso do amortecimento mecânico

O principal problema do amortecimento histerético implementado no FLAC é a inconsistência do amortecimento crítico observada na Figura 5.5 e descrita no item 5.4.3. Infelizmente, o valor dos parâmetros de ajuste que utilizam os quatro tipos de amortecimento histerético do FLAC são padronizados e não podem ser modificados pelo usuário. Conseqüentemente, é quase impossível evitar essa diferença em relação ao amortecimento proposto por Seed & Idriss (1970). Uma solução é implementar o amortecimento histerético na linguagem C⁺⁺ criando assim uma aplicação própria do usuário.

Quando são realizadas comparações entre o FLAC e o SHAKE, as curvas de amortecimento diferem entre si, porque a resposta do SHAKE é obtida com base em resultados de ensaios de laboratório desenvolvidos por Seed & Idriss (1970), enquanto o amortecimento histerético do FLAC busca ajustar-se numericamente à equação (5.12).

Cundall (2006-b) afirma que o amortecimento histerético teve, no início, problemas em algumas sub-versões para simular o laço histerético. Atualmente o erro já foi corrigido, porém, ele precisa ainda acumular mais experiência em simulações não-lineares.

Convém desde já ressaltar que é importante assumir esta limitação e procurar que os valores da razão de amortecimento crítico obtidos na implementação afetem o mínimo nos resultados, conseguindo uma aproximação à resposta real da estrutura avaliada.

O amortecimento Rayleigh ajusta-se adequadamente à resposta no SHAKE, mas não tanto quanto o amortecimento histerético. A desvantagem é o tempo necessário para se obter a resposta, que dependendo do número de zonas é até 10 vezes maior. O aumento no número de zonas na malha é causado pelos valores de G , muito menores que no caso de se usar o amortecimento histerético, devido à influência do fator de redução do módulo de cisalhamento. Conseqüentemente os passos de tempo são tão pequenos que o tempo de processamento torna-se insustentável com a tecnologia de processamento disponível atualmente.

5.6.3. Unificação dos tempos de processamento

Um dos objetivos da presente dissertação é apresentar a resposta estática, dinâmica e pós-sísmica da estrutura. Seria ideal poder plotar estas respostas num único gráfico que englobasse os três resultados. Às vezes, alguns dos diferentes tempos de processamento presentes na configuração do projeto (mecânico, dinâmico e/ou fluxo) têm que ser apagados em alguma etapa da análise. Esta ação impede a junção dos diferentes estágios, impedindo a obtenção de uma única resposta total da estrutura.

5.6.4. Uso limitado do fator de segurança

O fator de segurança implementado no FLAC somente é aplicado para os modelos Mohr-Coulomb e *ubiquitous-joint*. Neste trabalho foi necessário determinar o fator de segurança para a estrutura, cujo material de rejeito utilizava o modelo Finn e/ou Byrne. Este foi obtido calculando a resposta dinâmica com o

modelo de Byrne e mudando em seguida para o modelo Mohr-Coulomb para determinar somente o fator de segurança.

Além disso, estimar o fator de segurança implica em um consumo de memória, em alguns casos, muito maior que a obtenção da solução dinâmica e às vezes não representa superfícies de ruptura crítica reais. Conseqüentemente, é necessário aplicar algumas técnicas de modelagem como, por exemplo, incrementar o valor da coesão e/ou ângulo de atrito nas zonas que apresentam deformação excessiva (unicamente para a etapa do cálculo de fator de segurança).

5.7. Observações

Na avaliação para grandes deformações, o problema da elevada deformação da malha é resolvido na nova versão FLAC 6.0, o qual fornece um comando chamado *rezone* que regeira uma malha nova mais regular, substituindo a discretização distorcida e transferindo para a nova malha toda a informação da anterior. Este processo de “transferência” de propriedades, tensões, velocidades, deslocamentos e poropressões é efetuado por meio de um mapeamento em volume (*mapping-in-volume*) e interpolação em cada ponto da malha (*interpolation-at-a-point*) com o objetivo de corrigir a distorção do elemento (Han *et. al*, 2008).

Acima foram descritas as principais características do FLAC e alguns procedimentos recomendados para as suas aplicações. O objetivo deste capítulo é fornecer uma ajuda para melhor entender como trabalha o FLAC, minimizando a procura de informação no volumoso manual. Não se pretende descrever aqui a teoria utilizada no programa, que pode ser revisada no respectivo manual.

Finalmente, a utilização deste programa, comparando com outras implementações de elementos finitos, torna-se mais complicada. O FLAC exige um domínio moderado de seus inumeráveis comandos e atributos assim como noções, pelo menos básicas, do FISH. Com este nível de conhecimento, o programa torna-se, sem dúvidas, um dos mais completos softwares geomecânicos atualmente disponíveis.