

## 5 Aspectos da modelagem numérica

Na presente pesquisa trabalhou-se com o programa computacional FLAC 2D v.7 (*Fast Lagrangian Analysis of Continua*), originalmente criado por Peter Cundall em 1986, e atualmente desenvolvido pela empresa americana ITASCA Inc. O programa apresenta muitos recursos para modelagem sísmica, sem necessitar de memória excessiva pois as integrações no tempo são explícitas, fazendo dela uma ferramenta muito útil, versátil e de grande aceitação na análise de respostas sísmicas de geoestruturas.

### 5.1. Características gerais do programa FLAC

O programa FLAC 2D foi desenvolvido com base no método das diferenças finitas com uma abordagem lagrangeana modificada que torna possível acompanhar no tempo a ocorrência de grandes deformações do contínuo, adicionando incrementos graduais de deslocamento às coordenadas dos nós. O FLAC resolve as equações da dinâmica de movimento, mesmo para problemas quase estáticos no domínio do tempo, apresentando vantagens para os problemas que envolvem a instabilidade física, tais como colapso. O modelo constitutivo em cada passo de tempo é formulado em termos de deformações infinitesimais, mas no conjunto dos passos o programa consegue simular a ocorrência de grandes deformações. É um código de uso geral que pode simular uma ampla gama de problemas mecânicos não lineares estáticos e dinâmicos com fluxo de fluido acoplado e interação solo-estrutura.

No método dos elementos finitos (MEF) as variáveis de campo podem variar no interior de cada elemento de acordo com funções de interpolação previamente estabelecidas produzindo, igualmente, um conjunto de equações algébricas que representam a solução aproximada do problema.

Os programas baseados no MEF montam geralmente uma matriz global com base nas matrizes de rigidez individuais dos elementos, muitas vezes necessitando de grandes recursos de memória computacional para solução do

sistema, enquanto que no método das diferenças finitas, com a utilização do algoritmo de integração explícito, a formação deste grande conjunto de equações não é necessária.

Outra importante diferença entre o programa FLAC 2D e programas de elementos finitos é que o primeiro resolve sempre a equação do movimento, mesmo em casos de problemas estáticos, o que o torna relativamente ineficiente para solução de problemas lineares simples, sendo mais recomendado para casos de sistemas altamente não lineares, situações de instabilidade física, problemas de grandes deformações e, naturalmente, para análises de problemas dinâmicos governados pela equação do movimento.

## 5.2.

### Modelagem estática

A modelagem estática abrange a caracterização adequada das propriedades mecânicas dos materiais utilizados e a simulação do processo de construção da barragem de terra. 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.

#### 5.2.1.

##### Modelos constitutivos

O comportamento constitutivo do material determina o tipo de modelo que melhor se ajusta à resposta real do sistema. No FLAC existem 14 modelos distribuídos em 3 grupos: a) modelo nulo (representação de material removido ou escavado); b) modelo elástico (isotrópico e transversalmente isotrópico); c) 11 modelos elasto-plásticos dentre os quais os modelos de Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Cam Clay Modificado, Hock-Brown, Strain Hardening / Strain Softening, CySoil Modificado e outros (Itasca, 2011).

Também existem seis modelos dependentes do tempo na opção Creep e dois modelos geradores de poropressão para a opção dinâmica. Os parâmetros de entrada para todos os modelos podem ser controlados ou modificados com uma linguagem própria de programação (FISH) ou pela linguagem de programação C++. A incorporação de outros modelos constitutivos de interesse do usuário é também possível com a criação de bibliotecas dinâmicas (*dynamic link libraries*, DLLs).

O programa também realiza análises hidromecânicas totalmente acopladas (interação fluido-sólido e sólido-fluido - *basic scheme flow*) ou parcialmente acopladas quando a interação fluido-sólido é preponderante no problema (esquemas de fluxo rápido saturado - *saturated fast flow* - e fluxo rápido não saturado - *unsaturated fast flow*). Nestes três esquemas é necessário considerar o módulo de variação volumétrica da água  $K_w = 2 \times 10^6$  kPa. Um quarto esquema é disponível (*fluid bulk modulus scaling*), bastante mais rápido do que os anteriores, que admite um valor do módulo de compressibilidade da água bastante mais baixo, para problemas de fluxo permanente, sem interação mecânica, onde a localização da posição final da linha freática é mais importante do que o tempo necessário em atingi-la.

### 5.2.2. Propriedades dos materiais

O modelo elasto-perfeitamente plástico de Mohr-Coulomb foi utilizado nesta pesquisa para a simulação do comportamento estático da barragem de terra. Este modelo necessita de 5 parâmetros para a sua completa definição: 2 parâmetros elásticos (módulo de cisalhamento  $G$  e módulo de compressão volumétrica  $K$ ) e três parâmetros relacionados com o comportamento plástico (coesão  $c$ , ângulo atrito  $\varphi$  e ângulo de dilatância  $\psi$ ) adicionando a eles a massa específica ( $\rho$ ).

O ângulo de dilatância é empregado em análises numéricas para corrigir a excessiva variação volumétrica negativa (expansão) do solo previsto pelo modelo de Mohr – Coulomb com lei de fluxo associada. Os solos coesivos tendem a apresentar pouca dilatância ( $\psi \sim 0$ ), com exceção de argilas fortemente pré-adensadas. Nas areias, a dilatância depende da densidade relativa e do ângulo de atrito; para areias de quartzo a ordem do ângulo de dilatância pode ser aproximada por  $\psi = \varphi - 30^\circ$  e para valores do ângulo de atrito  $\varphi < 30^\circ$  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 consequência, uma análise não drenada em termos de tensões efetivas pode levar a valores superestimados da resistência ao cisalhamento do solo.

No caso em que alguma das propriedades for variável, o uso da linguagem de programação FISH permite introduzir um algoritmo que permite simular as condições desejadas. Por exemplo, para determinar o valor do módulo de cisalhamento estático  $G_{max}$ , se este parâmetro for admitido dependente da tensão octaédrica efetiva, a seguinte equação pode ser utilizada:

$$G_{max} = 21,7 K_{2,max} P_{atm} \left( \frac{\sigma'_m}{P_{atm}} \right)^{1/2} \quad 5.1$$

onde  $\sigma'_m$  é a tensão média efetiva e  $P_a$  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 da deformação (Seed *et al.*, 1986, Kramer, 1996).

Similarmente, Kokusho & Esashi (1981), sugerem que o módulo cisalhante máximo é uma função da tensão efetiva média efetiva ( $\sigma'_m$ ) e o índice de vazios ( $e$ ), eles propuseram que o módulo cisalhante máximo ( $G_{max}$ ) para areias e dada pela Equação 5.2 e para argilas, a Equação 5.3 (Hardin *et al.* 1968).

$$G_{max} = \frac{8400(2,17 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_m)^{0,6} \text{ kPa} \quad 5.2$$

$$G_{max} = \frac{3270(2,973 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_m)^{0,5} \text{ kPa} \quad 5.3$$

Se o valor do módulo de cisalhamento variar conforme as Equações 5.1, 5.2 e 5.3 pode-se admitir variável também o módulo de compressão volumétrica  $K$ , calculando seu valor pela Equação 5.4, fornecida pela teoria da elasticidade linear, admitindo o coeficiente de Poisson  $\nu$  constante.

$$K = \frac{2G(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)} \quad 5.4$$

Outros parâmetros, como o ângulo de atrito, também podem ser considerados variáveis em função do estado de tensões.

### 5.2.3. Condições iniciais e de contorno

As condições iniciais compreendem a aplicação de solicitações de carregamento estático ou de pressão hidráulica na estrutura para então executar o primeiro passo de processamento. Pode-se inicialmente avaliar a resposta estática somente da fundação, considerando-a assim como etapa inicial antes da

construção da barragem propriamente dita, ou então simular a construção da barragem por etapas incrementais de construção ou, dependendo da situação, representá-la diretamente como uma estrutura final.

No programa FLAC 2D tem-se diferentes opções para introdução das tensões iniciais:

- Obtenção das mesmas pelo programa com base na solução de equilíbrio considerando apenas as forças de massa (peso específico dos materiais);
- Valores das tensões iniciais são previamente conhecidos e constituem-se em dados de entrada para o programa;
- Apenas os valores das tensões verticais são conhecidos; neste caso as tensões horizontais são calculadas com base no coeficiente de empuxo no repouso  $K_0$  definido pela teoria da elasticidade linear,

$$K_0 = \frac{\nu}{1-\nu} \quad 5.5$$

Em relação às condições de contorno, estas podem ser introduzidas como deslocamentos ou cargas hidráulicas prescritas ou, alternativamente, pela aplicação de valores de tensão e de pressão hidráulica conhecidos (Figura 5.1).

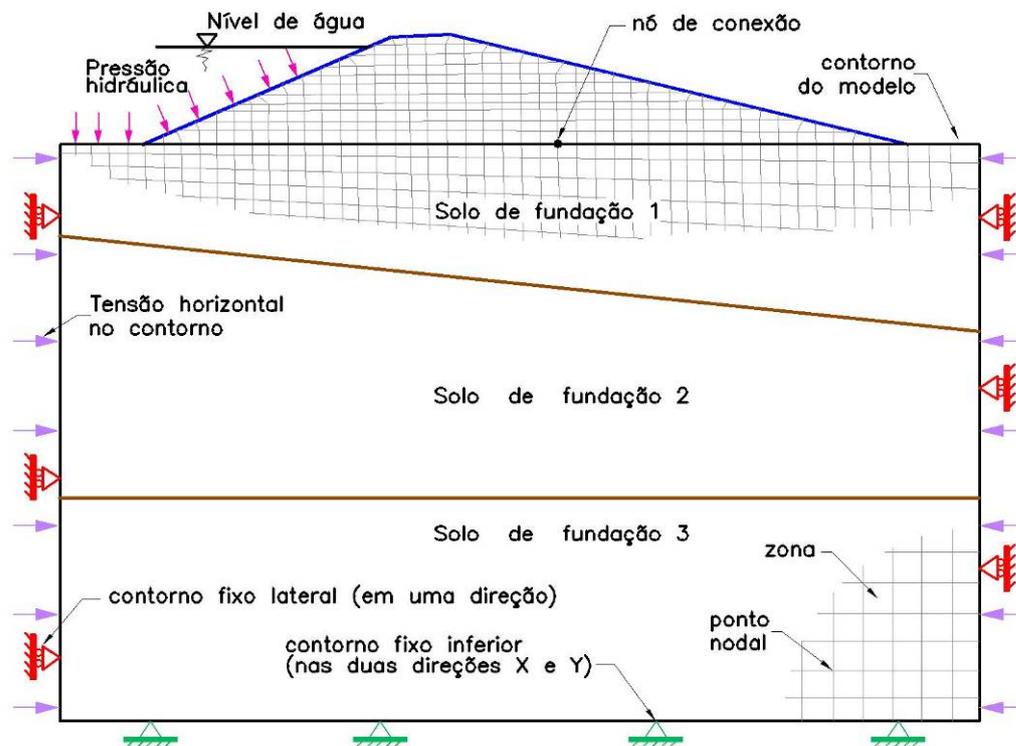


Figura 5.1 – Condições de contorno aplicadas à barragem e fundação no programa FLAC 2D (adaptado de Itasca, 2011).

#### 5.2.4. Fator de segurança na estabilidade de taludes

O programa FLAC também fornece uma estimativa do fator de segurança global através de um método direto de simulação de colapso do talude, realizando uma série de simulações, num processo de tentativa e erro, com redução sucessiva dos valores dos parâmetros de resistência do modelo de Mohr-Coulomb,

$$c^{trial} = \frac{1}{F^{trial}} c \quad 5.6$$

$$\phi^{trial} = \frac{1}{F^{trial}} \phi \quad 5.7$$

O fator de segurança final corresponde ao valor de  $F^{trial}$  para o qual não há mais convergência do sistema de equações, isto é a condição de deslizamento iminente de certa massa do talude foi atingida. A identificação da potencial superfície de ruptura pode ser feita mediante análise da distribuição das deformações cisalhantes plásticas ou dos vetores de deslocamentos. O valor do fator de segurança assim determinado é bastante próximo daquele calculado por métodos de equilíbrio limite (as várias versões dos métodos das fatias) com a vantagem que não é necessária uma definição antecipada das potenciais superfícies de ruptura a serem sucessivamente verificadas.

### 5.3. Modelagem sísmica

#### 5.3.1. Condições de contorno

Análises efetuadas por métodos numéricos (método dos elementos finitos em especial) devem lidar com dificuldades relacionadas com a representação de regiões de solo onde o substrato rochoso situa-se muito além da região de interesse do problema. Uma técnica bastante utilizada em análises estáticas é truncar a malha a alguma grande distância e empregar *contornos elementares* (rígidos) como “aproximação” da real geometria do problema. De fácil implementação, produz resultados desastrosos em análises dinâmicas devido às reflexões de onda ocorridas nos contornos rígidos artificialmente introduzidos. É essencial assegurar que a radiação de energia para o infinito (condição de Sommerfeld, 1949) seja satisfeita.

Várias técnicas de contornos especiais para problemas dinâmicos foram propostas na literatura, dentre as quais a utilização de elementos infinitos (Medina e Penzien, 1982; Medina e Taylor, 1983), contornos de transmissão imperfeita (amortecedores) propostos por Lysmer e Kuhlemeyer (1969), contornos de transmissão perfeita (Lysmer e Waas (1972), Kausel e Roesset (1977)), técnicas híbridas associando o método dos elementos finitos com soluções analíticas (Gupta, 1980) ou com o método dos elementos de contorno (Mita e Takanashi, 1983), dentre outras. No programa FLAC 2D dois tipos de contorno para aplicações dinâmicas estão disponíveis: contornos de transmissão imperfeita (amortecedores) e contornos de campo livre.

### 5.3.1.1. Contornos de transmissão imperfeita

A técnica dos contornos de transmissão imperfeita foi apresentada por Lysmer e Kuhlemeyer (1969) como uma das primeiras tentativas para simular a condição de radiação. É baseada na consideração de que contornos silenciosos podem ser representados através de uma superfície convexa conectada a uma série de amortecedores viscosos cujas características são função das propriedades do solo local (Figura 5.2). Amortecedores viscosos são adequados para absorção de ondas de corpo  $P$  e  $SV$  mas funcionam de forma aproximada e imperfeita (daí a denominação de contornos de transmissão imperfeita) no caso de ondas de superfície (ondas  $R$ ), situação em que as constantes de amortecimento variam com a frequência da excitação  $\omega$ . A grande vantagem deste esquema é que pode ser facilmente implementado em programas computacionais operando tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. Não funcionam para situações de carregamento estático pois os amortecedores não possuem rigidez.

É necessário ainda ressaltar que no caso em que os contornos silenciosos são aplicados na base da malha, para simulação de uma base flexível, não se pode representar o sismo como histórias de aceleração ou de velocidade porque os amortecedores as anulariam. Neste caso o carregamento sísmico é prescrito em termos de tensões cisalhantes através da seguinte formulação

$$\tau = 2(\rho v_s) v_t \quad 5.8$$

onde  $\tau$  é tensão cisalhante,  $\rho$  a massa específica do solo no contorno,  $V_s$  a velocidade da onda S e  $v_t$  a velocidade tangencial da partícula de solo.

O fator 2 que acompanha a Equação 5.8 considera o fato de que as tensões aplicadas devem ser o dobro das observadas num meio infinito, já que a metade da energia é absorvida pelo contorno silencioso. Em certos casos, a superfície livre pode originar um incremento na velocidade da base do modelo. Assim, como etapa prévia da análise sísmica, deve-se avaliar a resposta na base do modelo onde a história de tensões descrita pela Equação 5.8 foi aplicada. Se a aceleração ou a velocidade na base não forem similares à do sismo de projeto, então deve-se gradualmente efetuar um ajuste, normalmente reduzindo o fator de 2 até que a resposta na base do modelo e do sismo de entrada coincidam (Cundall, 2009). Em geral, a resposta de contornos viscosos é mais eficiente quanto à excitação dinâmica está situada no interior da malha (Figura 5.2).

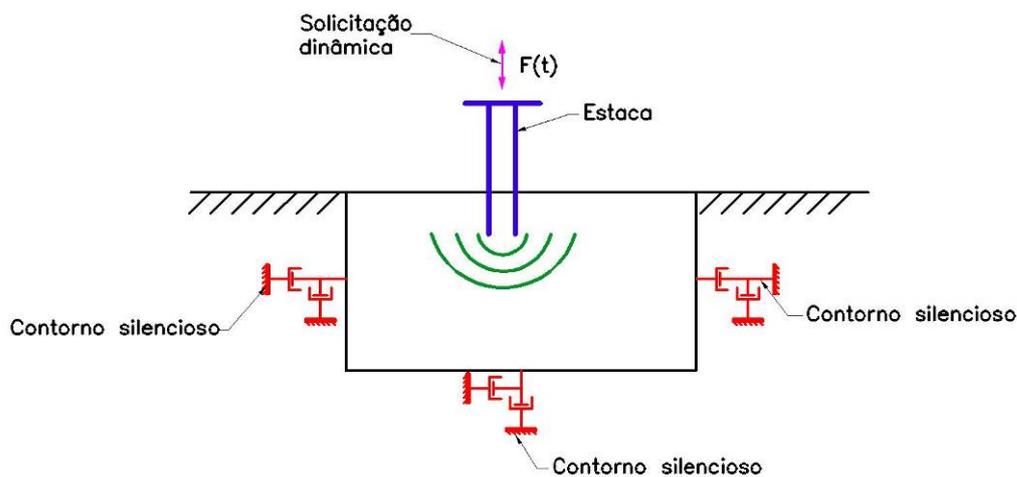
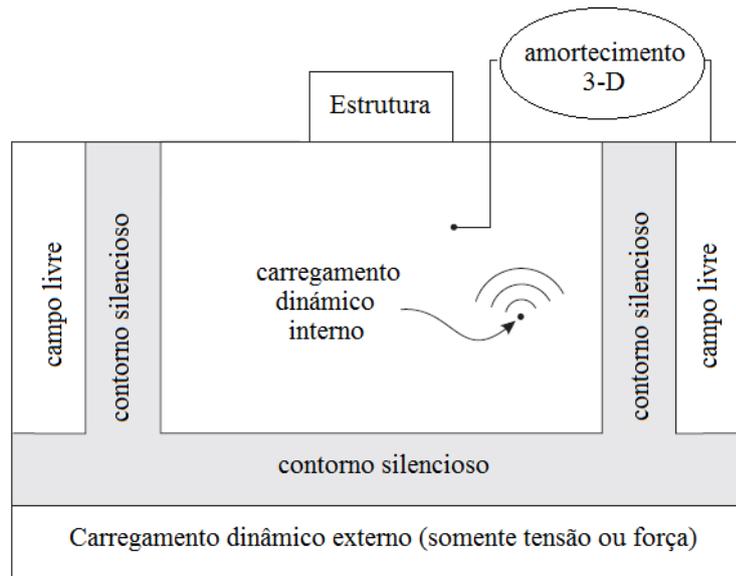
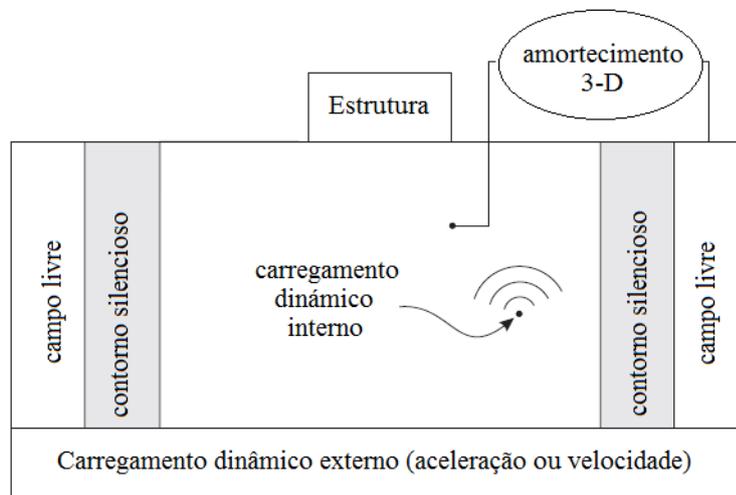


Figura 5.2 - Contornos de transmissão imperfeita (amortecedores).

A aplicação do carregamento sísmico na base do modelo pode ser feita mediante a história de acelerações, de velocidades, de tensões ou de forças. As duas primeiras são aplicadas nos casos de fundação sobre base rígida enquanto que as duas últimas para fundações sobre bases flexíveis (Figura 5.3). A hipótese de base rígida não é muito recomendável porque todas as ondas nela incidentes são refletidas novamente para o interior da malha, possivelmente causando superestimativa da resposta da estrutura.



(a) Base flexível



(b) Base rígida

Figura 5.3 - Tipos de Carregamento dinâmico e contornos de a) base flexível, b) base rígida (Itasca 2011).

### 5.3.1.2. Contornos de campo livre

Contornos de campo livre consistem de colunas unidimensionais de elementos justapostas em cada contorno lateral da malha principal (Figura 5.4) onde se considera a propagação 1D de ondas cisalhantes verticais. Caso estas colunas estejam suficientemente afastadas da barragem não haverá diferença, nos contornos comuns, entre o movimento da malha principal e das colunas laterais e os amortecedores laterais não serão ativados. Caso o movimento da discretização principal se diferenciar daquele das malhas de campo livre, devido

à influência da estrutura, então os amortecedores passam a absorver energia de forma similar aos contornos de transmissão imperfeita anteriormente descritos. Contornos de campo livre são particularmente eficientes quando a fonte excitante é externa à malha principal, como no caso de carregamentos de origem sísmica.

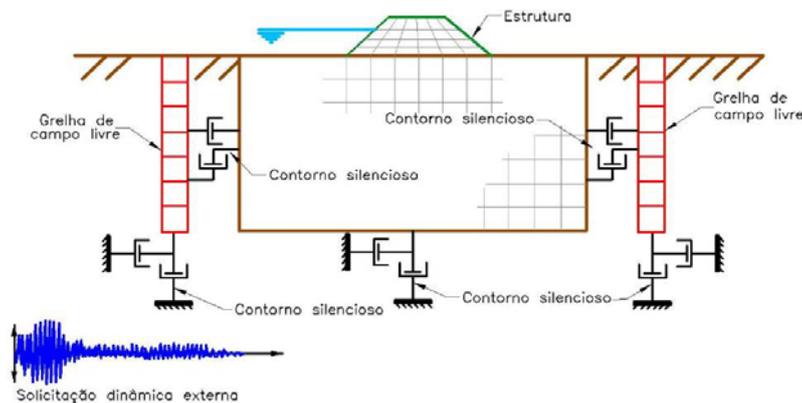


Figura 5.4 – Contornos laterais de campo livre (adaptado por Loayza (2009)).

### 5.3.2. Discretização da malha para a transmissão da onda

Na aplicação de métodos numéricos para determinação da resposta dinâmica de maciços de solo alguns cuidados especiais devem ser também tomados em relação ao tamanho máximo dos elementos presentes na discretização.

Kuhlemeyer e Lysmer (1973) verificaram que a dimensão do elemento na direção de propagação da onda é de fundamental importância, pois elementos grandes são incapazes de transmitir movimentos produzidos por excitações de altas frequências. Recomendaram então, como sugestão empírica, que o tamanho do elemento para uma eficiente transmissão do movimento não ultrapasse  $1/8$  do menor comprimento de onda esperado nas camadas de solo. Em estudos mais detalhados, Celep e Bazant (1983) e Mullen e Belytschko (1982) concluíram que a relação  $1/10$  é um valor mais aconselhado para várias configurações de malha e tipos de elementos.

Para maior eficiência computacional, é desejável que o número de elementos da discretização seja o menor possível. Como o tamanho do elemento é controlado pelos critérios referidos anteriormente, a minimização do

número de elementos se converte em um problema de maximização dos tamanhos aceitáveis de elementos na malha.

### **5.3.3. Frequência de corte**

A maioria dos registros de aceleração de terremotos apresenta frequências elevadas (terremotos no Peru entre 2 Hz - 10 Hz), cujas amplitudes não precisam ser consideradas por pouco contribuírem para a energia total do sismo. Por outro lado, se consideradas obrigam a diminuição do tamanho máximo dos elementos, em consequência aumentam o número total de elementos da discretização e o tempo de processamento da análise, já que os comprimentos de onda diminuem com o aumento da frequência da excitação.

Uma frequência máxima, chamada frequência de corte, é então selecionada de tal forma que a potência do terremoto até a frequência de corte apresente uma perda de 1% ou menos em relação à potência original do sismo. A potência do sismo é determinada pela função densidade de espectro de potência (FDEP).

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

Baixas frequências também podem ser filtradas através de um filtro de passa-alta, removendo-se aquelas cujo período é maior do que a duração do terremoto, pois as mesmas tendem a causar valores não nulos no final das histórias de velocidades e deslocamentos.

É também possível aplicar filtros de passa-banda que eliminam possíveis ruídos de frequências altas e baixas, simultaneamente.

O mais importante ao se aplicar os filtros é determinar um frequência de corte adequada, já que uma escolha inadequada pode desconsiderar parte do sinal de interesse, alterando portanto o carregamento sísmico, ou não remover aquelas frequências desnecessárias, que gerariam uma malha mais fina e, conseqüentemente, um tempo elevado de processamento.

### **5.3.4. Ajuste espectral no domínio do tempo**

O objetivo deste procedimento é reduzir os desvios existentes, entre o espectro obtido no registro sísmico e o espectro alvo, em uma faixa de período

importante da estrutura, preservando ao máximo as características não-estacionárias (importantes numa análise não linear) do registro sísmico inicial.

O processo é feito mediante a adição de *wavelets* de duração finita levando em conta as faixas de períodos limitados pelo registro sísmico de entrada. Este pacote de *wavelets* é adicionado ao registro de acelerações com amplitudes e fases apropriadas, de tal maneira que o pico de cada resposta seja ajustado à amplitude do espectro alvo. Este método preserva todas as características de faseamento do sismo assim como a variação no tempo e o de frequências do movimento do solo (Somerville, 1988). Os registros resultantes têm um espectro de resposta elástico, coincidente com o espectro alvo com certo grau de tolerância. Este procedimento foi proposto por Kaul (1978) e estendido por Lilhanand e Tseng (1987). a ajuste espectrais considerando vários valores de amortecimento.