

4

Modelagem numérica

4.1.

Modelagem da fase de construção por camadas

No caso de barragens que são construídas por estágios tem se a necessidade de simular a sequência de construção por camadas, desta maneira Cloug & Woodward (1967) demonstraram a necessidade de implementar no método dos elementos finitos uma técnica incremental de aplicação dos carregamentos. Na análise de uma barragem homogênea com fundação rígida, aqueles autores chegaram à conclusão de que os deslocamentos esperados durante a construção de um aterro somente podem ser adequadamente previstos se a análise for executada sequencialmente seguindo-se a história da construção por camadas. Cada uma das quais envolve um análise separado, cuja informação é transferida para a próxima camada. A modelagem em camadas comparada com uma única camada influi apreciavelmente nos deslocamentos verticais, segundo a recomendação dada por Goodman (1963).

A etapa de construção da barragem em camadas é simulada por meio de uma análise tensão-deformação do maciço e da fundação para prevenir os valores das tensões, deformações e deslocamentos para o maciço geotécnico, verificando a ocorrência de zonas de plastificação e de ruptura, além de recalques diferenciais e de transferência de tensões. Nesta etapa a solicitação esta conformada só pelo peso próprio dos materiais que constituem as camadas da barragem.

4.1.1.

Número de camadas

É claro que durante a construção de uma barragem existe um grande número de camadas de pequena espessura em relação à altura final da mesma (entre 0,20 a 1 m), as quais não devem ser representadas exatamente durante a modelagem, por limitações computacionais, embora teoricamente pareça mais

preciso coincidir com o número real de camadas. Cada uma das quais envolve uma análise separada, cuja informação é transferida para a próxima camada.

O número necessário de camadas a considerar depende basicamente da informação requerida. Se o interesse é avaliar o comportamento do material da fundação, só se necessitam poucas camadas na simulação, podendo mesmo assumir, como ocorre com frequência, que todo o aterro é colocado em única camada. Se o interesse é o próprio aterro, no entanto, requer-se mais camadas, algumas poucas se o interesse principal é o cálculo de tensões mas um número maior se o objetivo é a determinação de deslocamentos (Clough e Woodward, 1967).

Clough e Woodward (1976) verificaram também que na análise de uma barragem homogênea, os valores dos recalques eram muito aproximados quando de sete a quatorze camadas eram utilizadas, tendo desta observação sugerido o emprego de apenas sete camadas. Naylor et al. (1981) indica que aproximadamente dez camadas tem sido utilizadas nas análises de grandes barragens, tipicamente, podendo este número ser consideravelmente reduzido com provavelmente poucos efeitos nos resultados.

4.2. Modelagem da fase do primeiro enchimento

4.2.1. Número de etapas de enchimento

Devido à menor amplitude dos carregamentos desta fase em relação à de construção, não é comum simular-se o enchimento do reservatório utilizando incrementos de níveis d'água. No entanto, Veiga Pinto (1983) realizou um estudo referente à influência do aumento gradual dos níveis d'água nos resultados obtidos durante a fase de enchimento. O estudo foi baseado no fato de que as análises feitas até aquela data não tinham conduzido a resultados em concordância com os observados nos protótipos e portanto, um modo de dissipar dúvidas e eliminar possíveis fontes de erros na simulação numérica seria a execução de uma análise incremental considerando o enchimento do reservatório em sucessivos incrementos dos níveis d'água.

A Figura 4.1 ilustra os deslocamentos verticais devido ao enchimento, obtidos em diversas análises incrementais realizadas por Veiga Pinto (1983). Da figura pode-se observar que ao se aumentar o número de incrementos de níveis

d'água NA ou incrementos de carga INC então diminuem consideravelmente os elevados deslocamentos negativos (e normalmente não observados nas estruturas reais) que se obtêm no espaldar de montante e na crista da barragem. Esta diminuição é mais acentuada no caso de mais níveis d'água do que incrementos de carga serem utilizados. Assim, aquele autor recomenda simular o enchimento do reservatório com um número de níveis d'água pelo menos igual ao das camadas da fase de construção, isto é, um valor igual ou superior a sete (sugestão de Clough e Woodward, 1967).

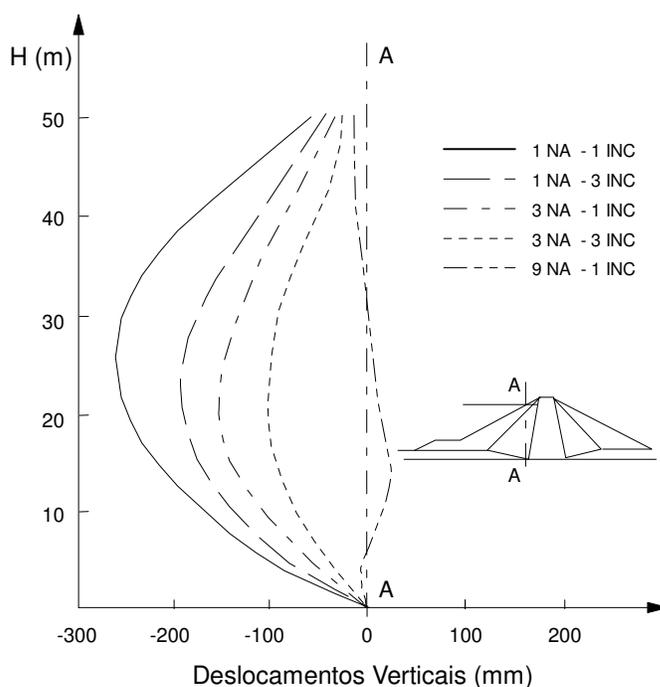


Figura 4.1 : Influência do número de níveis d'água e incrementos de carga nos deslocamentos verticais durante o enchimento do reservatório (de Veiga Pinto, 1983)

4.3. Modelagem da fase dinâmica

4.3.1. Transmissão de ondas

Distorções numéricas da propagação de ondas podem ocorrer em uma análise dinâmica em consequência da modelagem. Kuhlemeyer & Lysmer (1973) concluíram que para uma representação exata da transmissão da onda através do modelo, o tamanho do elemento Δl , deveria ser menor que aproximadamente

um décimo a um oitavo do comprimento de onda λ associado à maior frequência do registro de entrada.

$$\Delta l \leq \frac{\lambda}{10} \text{ a } \frac{\lambda}{8} \quad 4.1$$

onde λ é o comprimento de onda associado à frequência máxima que contém uma quantidade apreciável de energia, dada por:

$$f_{max} = \frac{C_s}{\lambda} \quad 4.2$$

onde C_s é a velocidade da onda de cisalhamento, cujo valor está dado pela equação 3.2. Com os valores de C_s e f_{max} e as equações mencionadas, pode-se calcular λ e conseqüentemente o Δl equivalente à dimensão máxima das zonas que compõem a malha.

4.3.2. Filtragem do registro sísmico

Para certas análises (por exemplo em registros exibindo altas velocidades de pico com rápidos intervalos de subida), a aplicação da equação 4.1 pode resultar em tamanhos de zonas e passos de tempo muito pequenos, implicando em tempos de processamento e quantidade de memória proibitivos. Em tais circunstâncias, o registro sísmico (história de acelerações, velocidades ou deslocamentos) deve ser tratado, reconhecendo-se que a maior parte da potência do sismo está contida nas componentes de baixa frequência. Este tratamento consiste em um processo de filtragem das altas frequências, para atingir uma malha com elementos maiores que pode ser utilizada sem significativa mudança nos resultados esperados.

O procedimento de filtragem pode ser executado com uma rotina de filtro passa-baixo¹ utilizando a técnica de Transformada Rápida de Fourier (FFT). O programa FLAC tem disponível uma rotina escrita na linguagem FISH, denominada FILTER.FIS, assim também o programa SeismoSignal está pronto para filtrar registros considerando-se determinada frequência de corte f_c .

Baixas frequências também podem ser filtradas através de uma rotina de filtro passa-alta, removendo-se aquelas cujo período é maior do que a duração

¹ Filtro passa-baixo é o nome comum dado a um circuito eletrónico que permite a passagem de baixas frequências e atenua a amplitude das frequências maiores que uma frequência de corte

do terremoto, pois as mesmas tendem a causar valores não nulos no final da história de velocidades e deslocamentos.

4.3.3. Correção da linha base

O processo de correção da linha base pode ser usado para prescrever velocidade e deslocamento residuais nulos ao final do movimento do terremoto.

Este processo, mostrado na Figura 4.2, pode ser explicado como:

- a) Integração no tempo da história das acelerações para obter a história das velocidades. Neste cálculo, a velocidade final pode resultar não nula como na Figura 4.2a;
- b) Integração no tempo da história das velocidades para obter a história dos deslocamentos, pode resultar também em um deslocamento final não nulo (Figura 4.2b);
- c) Seleção de uma onda de velocidade de baixa frequência de forma que a velocidade e deslocamento finais tornam-se nulos. Esta onda pode ser uma função polinomial ou periódica com parâmetros livres (Figura 4.2c) que podem ser ajustados para obtenção dos resultados desejados, como mostrado na Figura 4.2d.

Se a correção da linha base não for executada, a história das acelerações não corrigidas resultará em um erro linear na história das velocidades e em um erro quadrático na história dos deslocamentos (Kramer, 1996).

Outra técnica para correção da linha base é aplicar um deslocamento adicional no final dos cálculos, se for constatada a existência de um deslocamento residual no modelo. Isto pode ser feito aplicando-se uma velocidade fixa na malha com o objetivo de reduzir os deslocamentos à zero. Esta ação não afetará o mecanismo de deformação do modelo.

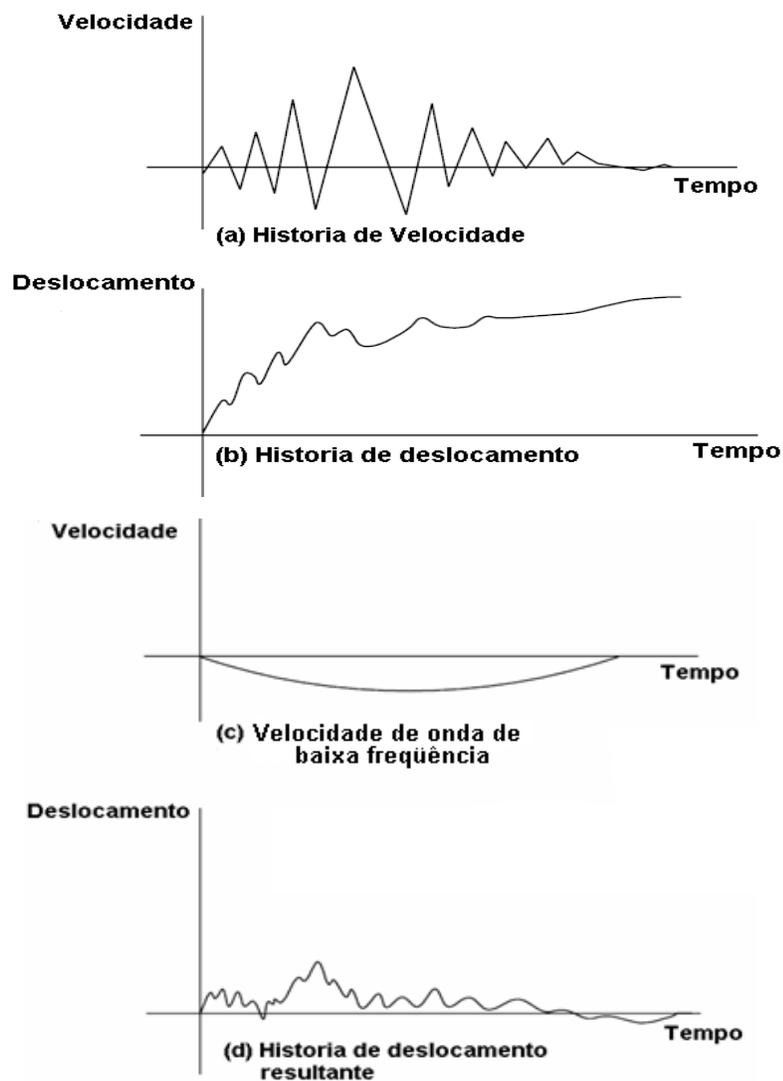


Figura 4.2- Processo de correção da linha base (manual do FLAC v.5).

4.3.4. Carregamento dinâmico

O carregamento dinâmico pode ser aplicado sob a forma de história acelerações, velocidades e deslocamentos; no caso de trata-se de uma fundação sobre base rígida (rocha) e como história de tensões ou forças em bases flexíveis modelada com contornos silenciosos (solo), segundo Perez (2013).

Para transformar a onda sísmica em termos de tensões, deve-se converter primeiramente a uma onda de velocidades e empregar a seguinte equação:

$$\sigma_n = 2(\rho C_p)v_n \quad 4.1$$

$$\sigma_t = 2(\rho C_s)v_t \quad 4.2$$

onde σ_n e σ_t são as tensões normal e cisalhante, ρ é a massa específica, C_p é a velocidade da onda P , C_s é a velocidade da onda S e v_n e v_t são as velocidades normal e tangencial da partícula. O fator 2 considera que as tensões aplicadas devem ser o dobro as observadas num meio infinito, já que a metade da energia é absorvida pelo contorno silencioso.

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 forem similares às do sismo, deve-se efetuar um ajuste, reduzindo o fator de 2 até que a resposta da estrutura na base e o sismo de entrada coincidam (Itasca, 2005).

4.3.5. Condições de contorno

Para configurações 2-D do problema, os contornos no lado esquerdo e direito do modelo devem ser aplicados como fixos horizontalmente. Nestas condições, os contornos silenciosos ou “absorventes” são utilizados para simular um meio infinito.

Existem vários métodos para aplicar um os contornos silenciosos (Ross, 2004 apud Perez, 2013). No PLAXIS, os contornos adsorventes viscosos podem ser introduzidos, baseados no método descrito por Lysmer e Kuhlmeyer (1969). Segundo este método os contornos silenciosos são usados amortecedores para absorção das ondas incidentes. Os coeficientes de relaxamento c_1 e c_2 by default, no programa estão configurados aos valores de 1,0 e 0,25 respectivamente. As componentes de tensões normais e cisalhantes absorvidas pelo amortecedor são expressas como:

$$\begin{aligned} \sigma_n &= c_1 \rho C_p u_x \\ \tau &= -c_2 \rho C_s u_y \end{aligned} \quad 4.3$$

onde: ρ é a massa específica do solo, C_p e C_s são as velocidades das ondas P e S respectivamente, c_1 e c_2 são os coeficientes de amortecimento.

De acordo com White W. et al (1977), estes coeficientes $c1$ e $c2$ dependem do valor do coeficiente de Poisson ν como apresentados na.

Tabela 4.1- Valores de $c1$ e $c2$ em função do coeficiente de Poisson ν
(White et al, 1977 apud Bustamante, 2010)

Coeficiente de Poisson ν	$c1$	$c2$	Coeficiente de Poisson ν	$c1$	$c2$
0	0,959	0,769	0,25	0,986	0,744
0,05	0,967	0,761	0,3	0,986	0,742
0,1	0,975	0,756	0,35	0,992	0,74
0,15	0,982	0,751	0,4	1,007	0,746
0,2	0,986	0,747	0,45	1,011	0,773

Visone (2008) afirma que ao colocar os limites laterais suficientemente longe da zona central com deslocamentos horizontais livres FHD (Free Horizontal Displacements), os efeitos devido à reflexão das ondas sobre os contornos podem ser negligenciados. Ele sugere melhores resultados são obtidos usando FHD em vez de contornos absorventes.

4.3.6.

Amortecimento mecânico

Sistemas dinâmicos naturais contém algum grau de amortecimento da energia de vibração, caso contrário oscilariam indefinidamente. O amortecimento do material explica o comportamento inelástico dos materiais, pois parte da energia interna do ciclo de carregamento é absorvida pelo material durante o ciclo de descarregamento, fazendo com que ambas as trajetórias não sejam coincidentes, o que caracteriza materiais inelásticos.

No programa PLAXIS existem dois tipos de amortecimento: o *amortecimento do material*, devido às propriedades viscosas, atrito e desenvolvimento da plasticidade; e o *amortecimento numérico*, devido à formulação dos elementos finitos.

4.3.6.1. Amortecimento de Rayleigh

No PLAXIS como na maioria de códigos de FE, o amortecimento do material é simulado com a conhecida formulação do amortecimento de Rayleigh. O amortecimento de Rayleigh foi originalmente usado na análise dinâmica de estruturas e corpos elásticos para amortecer os modos de oscilação natural do sistema. As equações são expressas de forma matricial, onde a matriz de amortecimento $[C]$ é utilizada com componentes proporcionais às matrizes de massa $[M]$ e de rigidez $[K]$.

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad 4.4$$

onde α = constante de amortecimento proporcional à massa e β = constante de amortecimento proporcional à rigidez

Para baixas frequências do sistema, a primeira componente α é dominante, enquanto que para altas frequências β é mais relevante. (Figura 4.3)

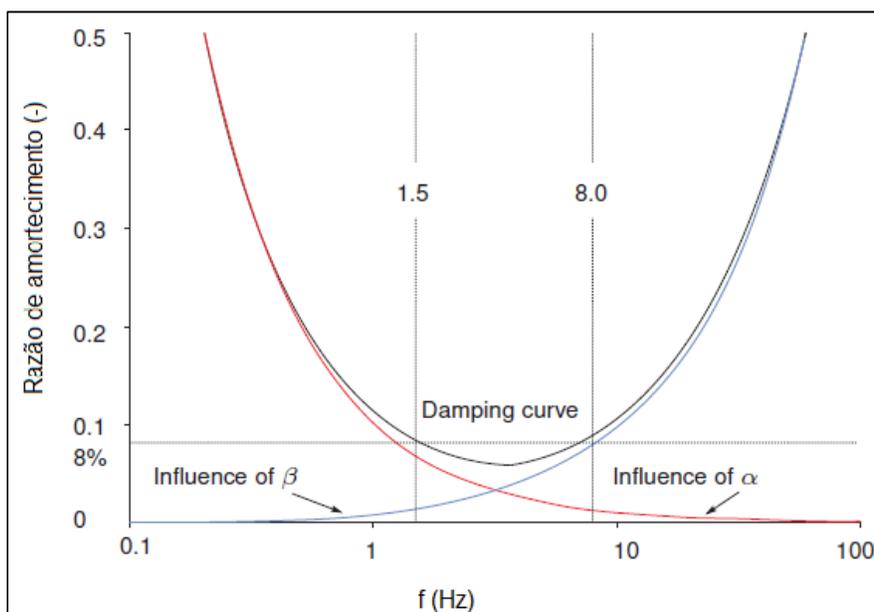


Figura 4.3 - Influência dos parâmetros de amortecimento de Rayleigh. (PLAXIS, 2010)

Para um sistema com múltiplos graus de liberdade, a razão de amortecimento crítico, ξ_i , em qualquer frequência angular do sistema, ω_i , pode ser escrita como (Bathe e Wilson, 1976):

$$\alpha + \beta \omega_i^2 = 2 \omega_i \xi_i \quad 4.5$$

ou

$$\xi_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_i} + \beta \omega_i \right) \quad 4.6$$

A Figura 4.3 mostra a variação da razão de amortecimento crítico normalizado em relação à frequência angular ω_i . Três curvas são mostradas: para componentes de massa e rigidez isoladamente e a soma de ambas as componentes. A curva representando a soma de ambas as componentes atinge um valor mínimo em:

$$\xi_{\min} = (\alpha \beta)^{\frac{1}{2}} \quad 4.7$$

$$\omega_{\min} = (\alpha / \beta)^{\frac{1}{2}} \quad 4.8$$

ou

$$\alpha = \xi_{\min} \omega_{\min} \quad 4.9$$

$$\beta = \xi_{\min} / \omega_{\min} \quad 4.10$$

A frequência mínima é escrita como

$$f_{\min} = \omega_{\min} / 2\pi \quad 4.11$$

Note que somente na frequência f_{\min} o amortecimento de Rayleigh é composto por partes iguais de amortecimento proporcional à massa e proporcional à rigidez.

No programa PLAXIS o amortecimento de Rayleigh é especificado através dos parâmetros α e β , e fazem parte das propriedades de cada material. (Figura 4.4).

Como o amortecimento em solos é praticamente independente da frequência, podemos estimar ξ_{\min} (conforme a Tabela 3.2) e calcular ω_{\min} como aproximação da frequência angular predominante do sistema não amortecido.

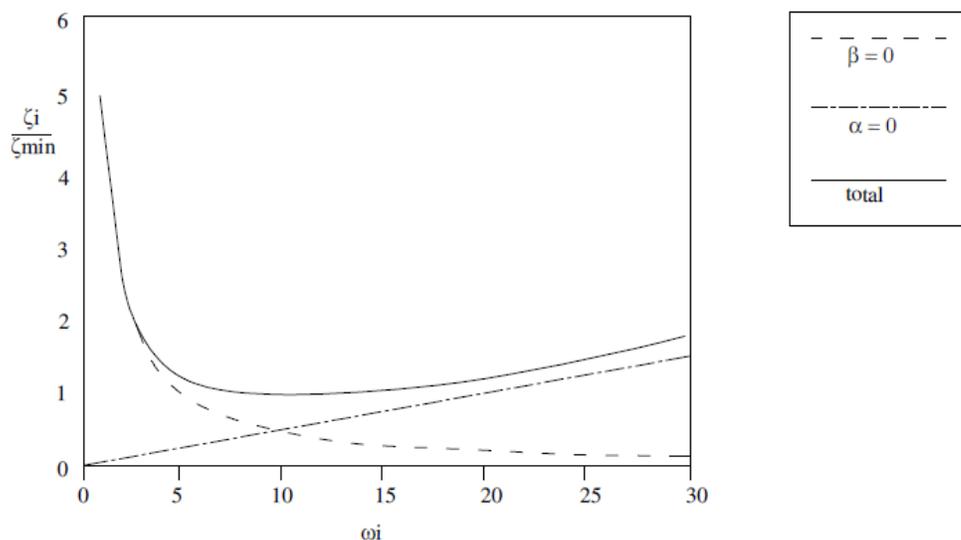


Figura 4.4-Variação da razão de amortecimento crítico normalizada em relação à frequência angular. (Itasca, 2005 apud Bustamante, 2010)

Tabela 4.2- Valores típicos da razão de amortecimento crítico (Richart et al., 1970, apud Bustamante, 2010).

Tipo de solo	Razão de amortecimento crítico	Referência
Pedregulho e areia seca	0,03 – 0,07	Weissmann e Hart (1961)
Areia seca e saturada	0,01 – 0,03	Hall e Richardt (1963)
Areia seca	0,03	Whitman (1963)
Areia seca e saturada Pedregulho	0,03 – 0,06	Barkan (1962)
Argila	0,02 – 0,05	Barkan (1962)
Areia siltosa	0,03 – 0,10	Stevens (1965)
Areia seca	0,01 – 0,03	Hardin (1965)

4.3.6.2. Amortecimento histerético

O modelo linear equivalente tem sido usado por muitos anos para calcular a resposta dinâmica de maciços de solos e rochas e no estudo de problemas de propagação de ondas. O método não captura diretamente qualquer efeito não

linear, pois assume linearidade durante o processo de resolução. Funções que descrevem a degradação do módulo de cisalhamento (Figura 2.24 e Figura 2.25) e aumento da razão de amortecimento com os níveis das deformações cisalhantes são utilizadas e já foram apresentadas.

Uma motivação adicional para utilização dos dados obtidos em ensaios cíclicos de laboratório em um modelo de amortecimento histerético é que a necessidade de amortecimentos adicionais, como o de Rayleigh, seria eliminada. O amortecimento de Rayleigh é pouco usual entre os usuários de programas computacionais envolvendo solos ou rochas, pois envolve uma drástica redução no passo de tempo da solução e, conseqüentemente, um significativo acréscimo no tempo de processamento.

São empregados basicamente a curva de degradação do módulo G (ou G_{sec}) e o valor correspondente da razão de amortecimento crítico ξ é obtido da 3.7.

4.3.6.3. Amortecimento numérico

A implementação numérica de problemas dinâmicos, a formulação do tempo de integração constitui um fator importante para a estabilidade e precisão do processo de cálculo. A integração explícita e implícita são dois programas de integração do tempo comumente usados. No PLAXIS está implementado o programa de integração implícita de Newark. Com este método, o deslocamento e a velocidade em um ponto em tempo $t + \Delta t$ são expressos respectivamente como:

$$u^{t+\Delta t} = u^t + u^t \Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha_N \right) u^{..t} + \alpha_N u^{t+\Delta t} \right] \Delta t^2 \quad 4.12$$

$$u^{..t+\Delta t} = u^{..t} + \left[(1 - \beta_N) u^{..t} + \beta_N u^{..t+\Delta t} \right] \Delta t \quad 4.13$$

Os coeficientes α_N e β_N , os quais não devem ser confundidos com os coeficientes de Rayleigh, determinam a precisão do tempo de integração numérica. Para a determinação destes parâmetros, diversas sugestões são propostas na literatura, os valores típicos são: $\alpha_N = 0,25$ e $\beta_N = 0,50$ (PLAXIS vs 2010).

O amortecimento numérico tem grande influência sobre a resposta dinâmica de um sistema geotécnico, esta questão deve ser especialmente

considerada quando a sinal de um terremoto precisa ser processada preliminarmente (Visone, 2008).

4.3.7. Efeitos da geometria do modelo de elementos finitos

Jiryaei (2010) avalio os efeitos da altura H e largura lateral da fundação: B nas soluções obtidas no método de elementos finitos em uma barragem de terra homogênea. Ele demonstrou que no caso que o comprimento lateral da fundação (B) é maior que o dobro da altura da barragem (H), os deslocamentos permanentes não são sensíveis e permanecem inalteráveis. Além disso, observou que o conteúdo das frequências da resposta da aceleração na crista da barragem varia consideravelmente com o acréscimo da dimensão lateral da fundação (B) respeito à altura H a mais do dobro, mas as amplitudes da resposta da aceleração não mudam significativamente. Jiryaei (2010) propus que no modelo dos elementos finitos a extensão lateral da fundação B deve ser eleita menor que o dobro da altura H da barragem, caso contrário os deslocamentos calculados da resposta e o conteúdo de frequências da resposta da aceleração seriam irreais.

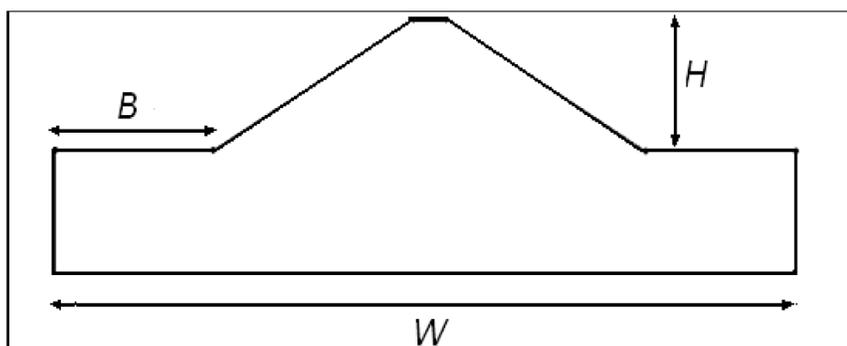


Figura 4.5 - Elementos da barragem: altura H , largura lateral da fundação B e largura da base da fundação W . Jiryaei (2010)

Ao respeito Amorosi (2007) mostrou o caso para obter resultados aceitáveis na análise da resposta, tive que estender a largura de malha de elementos finitos oito vezes sua altura. Esta sugestão foi depois adotada por Visone (2008) para minimizar a influência nos contornos nos resultados obtidos.