

Análise de Estruturas em Fundação Direta sob Ação de Sismo

Benjamin Ernani Diaz¹, Raissa Laubenbacher S. de Toledo²

¹Serv. Engenharia. B. Ernani Diaz Ltda. / ernani.diaz@gmail.com

²Serv. Engenharia. B. Ernani Diaz Ltda. / raissalst@gmail.com

Resumo

As edificações sísmo resistentes importantes possuem fundações preferencialmente diretas construídas sobre a rocha para reduzir os efeitos amplificadores do terremoto ao longo do maciço de fundação. Para estruturas de caráter usual, elas podem apresentar fundações diretas sobre solo de fundação com características adequadas, já que a pressão final na fundação não é elevada quando a edificação tem pouca altura. A laje de fundação nestes casos apresenta características geométricas de projeto em que a superfície de contato com o solo contempla endentações para transferir as forças horizontais sísmicas para o maciço, geralmente argiloso. A transferência de forças neste caso se dá de duas formas principais: por meio de forças horizontais aplicadas sobre as endentações e também por meio de forças horizontais aplicadas na interface entre o maciço do solo e a base da laje de fundação. É possível atualmente efetuar análises dinâmicas não lineares considerando estes dois efeitos, mas que deve ser feita no regime de histórico no tempo. Com base no espectro de resposta de projeto é necessário obter acelerogramas artificiais que reproduzam adequadamente a resposta de acordo com o espectro de resposta de projeto. Mas a amplificação das acelerações através da altura de solo da rocha até a base de fundação precisa ser determinada de antemão utilizando, por exemplo, o programa Shake. Se não for adotado o método direto, o que pode demandar modelos muito detalhados, a análise sísmica é feita utilizando os conceitos de métodos que na literatura recebem diversos nomes. Estes métodos são designados por métodos de subestruturação, como definido em C5.4 da norma ASCE 4-2016. A solução neste caso é obtida por soma da interação cinemática e da interação inercial. O trabalho mostra os detalhes de como são efetuadas as análises não lineares e os resultados obtidos de exemplos de estruturas simples submetidas a ação de sismos.

Palavras-chave

Análise sísmica; Estruturas sísmo resistentes; Análise sísmica não linear; Fundações; Interação solo-estrutura.

Introdução

Estruturas nucleares sísmo resistentes importantes possuem geralmente fundações diretas assentadas em rochas, para evitar que os efeitos da interação solo-estrutura (ISE) possam amplificar os efeitos do sismo de projeto. Este sismo na rocha aflorante é definido por meio de um espectro de resposta que depende da parcela do amortecimento crítico da estrutura, geralmente adotado igual a 5%. Os espectros de resposta podem ser também fornecidos para outros amortecimentos, tais como 7% para estruturas de concreto ou 4% para estruturas de aço. Entretanto, as estruturas sísmo resistentes podem ser assentes alternativamente sobre camadas de solos adequados, ou sobre estacas (como para a Central Nuclear de Angra, Unidade 2), ou sobre dispositivos especiais, etc. O problema

principal da análise destas estruturas diz respeito à interação solo-estrutura (ISE) sob ação de sismos, que geralmente são ações críticas para o dimensionamento das estruturas. Aqui será apresentado como se pode analisar uma estrutura sísmo resistente de concreto armado suportada em solo argiloso por meio de uma fundação direta efetuando uma análise não linear sísmica no histórico do tempo. Para isto, a laje de fundação precisa ser configurada com ressaltos espaçados ao longo da superfície inferior da laje de fundação para que a transferência dos esforços sísmicos ao maciço do solo seja feita por dois sistemas diferentes de transmissão de esforços, ou seja, pelas resistências horizontais efetuadas pelos ressaltos da laje de fundação e pelos efeitos de atrito e coesão existentes entre o solo e a superfície inferior da laje de fundação. Um exemplo de aplicação destes conceitos será apresentado. A vantagem principal desta forma de configurar a fundação é que os efeitos de enrijecimento provocados por fundações em estacas são evitados, o que poderia provocar esforços elevados decorrentes do enrijecimento provocado pelas estacas. Os esforços sísmicos induzidos à estrutura neste caso de fundação direta se tornam reduzidos em função do comportamento não linear da fundação.

A estrutura que será analisada aqui tem a seguinte definição geométrica mostrada na figura abaixo.

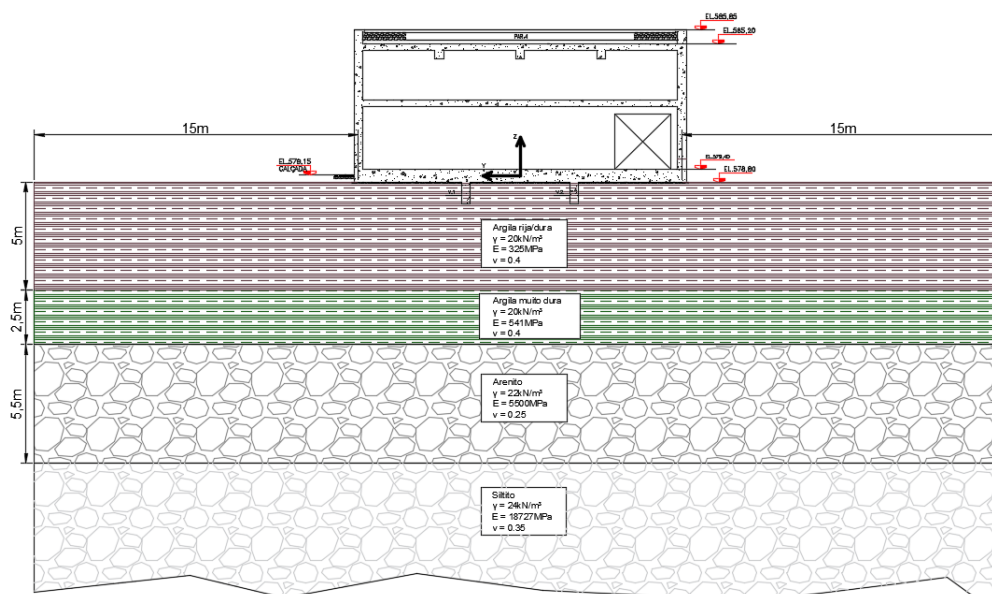


Figura 1 - Corte no sentido y da maior dimensão

As dimensões da edificação de concreto armado são 10m x 15m em planta e 7m em altura. A laje de fundação da edificação apresenta dentes na sua parte inferior para transferir forças horizontais ao solo de forma mais adequada. As camadas de solo e rocha de cima para baixo e suas propriedades estão apresentadas a seguir.

Tabela 1 - Propriedades das camadas de solo e rocha

| Solo ou Rocha | Altura camada (m) | Poisson ν | γ (kN/m ³) | NSPTmédio | E (MPa) | G (MPa) | Vs (m/s) |
|-------------------|-------------------|---------------|-------------------------------|-----------|---------|---------|----------|
| Argila rijá/dura | 5.0 | 0.40 | 20 | 18 | 325 | 116 | 241 |
| Argila muito dura | 2.5 | 0.40 | 20 | 34 | 541 | 193 | 311 |
| Arenito | 5.5 | 0.25 | 22 | - | 5 500 | 2 200 | 1 000 |
| Siltito | ∞ | 0.35 | 24 | - | 18 727 | 6 936 | 1 700 |

Ação sísmica

No caso do exemplo em questão o espectro de resposta de projeto é definido segundo o Regulatory Guide 1.60 da NRC 2014. A aceleração horizontal na rocha aflorante de pico (PGA), para período nulo do modelo padrão massa-mola, é adotada com o valor mínimo de 0.1g. A norma RG 1.60 define também um espectro de resposta para o terremoto vertical especificamente. É de se notar que a tendência moderna na definição de espectros de resposta no Brasil de sismos do tipo intraplaca (no interior da placa tectônica da América do Sul) é de definir espectros de resposta segundo a Eurocode 8 de 2004. Para fração do amortecimento crítico de 5% o espectro de resposta é definido pelo Tipo 2 na figura 3.3 da norma europeia EN 1998-1.

Para efetuar a análise sísmica não linear é necessário determinar acelerogramas artificiais que reproduzam o espectro de resposta de projeto. Para o estudo em questão, a geração dos acelerogramas foi efetuada por meio do programa designado por Artquake, desenvolvido na Escola Politécnica-UFRJ por Rodrigo M. R. Rodrigues, orientado pelos professores Sergio H. C. Santos e Silvio S. Lima. (Santos, S. H. C., Lima, S. S., Rodrigues, R. M. R. 2014). É de se notar que os acelerogramas a serem determinados devem atender aos requisitos definidos na seção 2.4 da norma ASCE 43-05 (2015). Os acelerogramas são determinados nas 3 direções principais da estrutura, direções horizontais x e y e na direção vertical (para cima) z. Nas análises sísmicas não lineares os acelerogramas nas 3 direções principais são aplicados simultaneamente. A análise sísmica precisa ser efetuada para 7 conjuntos de acelerogramas artificiais, como exige a norma ASCE 43-05 (2015) na sua seção C3.3. É interessante notar que para cada fração especificada do amortecimento crítico da estrutura, o espectro de resposta, de um mesmo local, é diferente. Entretanto, a partir de diferentes espectros de resposta (variando o amortecimento) de um mesmo local, os terremotos artificiais, definidos por acelerogramas, devem ser essencialmente similares. O espectro de resposta de projeto e os respectivos acelerogramas devem ser determinados para uma rocha aflorante fictícia no local da obra. Estes acelerogramas devem sofrer uma deconvolução determinando-se um acelerograma agora localizado na sua posição real da rocha subjacente ao solo. A convolução e a deconvolução podem ser feitas com o programa Shake para acelerações horizontais. Dependendo da distância do nível da rocha real até o nível da base de fundação da edificação, a redução da intensidade do sismo na deconvolução pode variar. Verificou-se que a intensidade do sismo, no presente caso, caiu apenas 3%, passando de 0.1g para 0.097g. A deconvolução foi feita a 15m de profundidade, levando em conta as rochas arenito e um trecho do siltito. A convolução levou em conta, além das camadas de solo, as camadas de arenito e um trecho do siltito neste estudo.

A interação solo-estrutura por subestruturação

Em vista da dificuldade de criar modelos completos de solo e estrutura utilizando o método direto de análise, a interação solo-estrutura tem sido analisada por meio de vários métodos designados, em geral, por subestruturação na norma ASCE 4-16 (2016) no seu item C5.4. São apresentados ali vários métodos de subestruturação, mas o que normalmente é aplicado é o método designado usualmente por método das 3 etapas. Este método foi utilizado na análise dinâmica do Prédio do Reator da CN de Angra, Unidade 2. A fundação naquele caso foi projetada em estacas escavadas.

Para estudos mais detalhados sobre o método das 3 etapas a bibliografia SANTOS, S. H. C. (1980) pode ser consultada.

A análise é efetuada da seguinte forma. Inicialmente considera-se a estrutura de concreto sem massa sobre a superfície do terreno argiloso, mantendo-se a rigidez da estrutura de concreto. Aplicam-se na rocha subjacente ao maciço de solo as acelerações provocadas pelo sismo. Com a consideração somente do terreno rochoso e do argiloso é determinada a amplificação das acelerações de baixo para cima até a base da fundação da edificação sem massa. Esta fase é designada por interação cinemática.

Em seguida são determinadas as molas individualizadas (que representam o apoio sobre o solo) a que a estrutura está sujeita quando apoiada na camada superior do maciço do solo. Esta determinação será detalhada mais tarde em função das características desta fixação especial, que apresenta endentações e efeitos de atrito e coesão na interface entre o fundo da laje de fundação e a camada superior do maciço de solo. A dificuldade é a determinação dos coeficientes de amortecimento deste apoio simplificado por meio de molas representando a solo.

Utilizando as acelerações da interação cinemática na base de fundação é acrescentada a massa pertinente à estrutura de concreto e é efetuada uma análise dinâmica completa da estrutura de concreto apoiada no conjunto de molas devidamente determinadas. As acelerações são aquelas da interação cinemática. Esta fase é designada por interação inercial.

Os efeitos finais da estrutura num todo são obtidos somando os resultados da interação cinemática com a interação inercial. É interessante notar que as várias análises efetuadas são essencialmente não lineares em vista do comportamento não linear físico do solo. Assim, a consideração de soma da interação cinemática e da inercial é uma solução aproximada.

Acelerações de “free-field”. Interação cinemática.

As acelerações determinadas na camada superior do solo no nível da fundação são designadas de acelerações de “free-field”, considerando as acelerações sísmicas aplicadas na rocha subjacente. Implicitamente é suposto que o maciço do solo e a rocha constituem um volume de solo e rocha de características constantes nas duas direções ortogonais horizontais do modelo, sem limite. Estas determinações são efetuadas por programas específicos, que levam em conta os efeitos físicos não lineares de rigidez das diversas camadas de solo e da variabilidade dos amortecimentos de cada camada de solo em função das deformações tangenciais. Para ser possível efetuar estas análises é necessário que parâmetros geotécnicos dinâmicos sejam determinados. Caso estes dados não estejam disponíveis, estimativas dos parâmetros geotécnicos precisam ser feitas baseadas nas sondagens disponíveis. Deve ser lembrado que os sismos são definidos na rocha aflorante no local da obra. Como usualmente a rocha se encontra em níveis mais profundos do que

o maciço do solo, é necessário adaptar os dados do sismo na rocha mais profunda efetuando um deconvolução por meio de programas específicos num maciço solo+rocha (por exemplo, programa Shake). A deconvolução determina a redução das acelerações em camadas mais baixas no sentido de cima para baixo. A seguir deve ser feita a convolução dos acelerogramas de baixo para cima, ou seja, da rocha até a base de fundação da edificação. Esta fase da análise sísmica por subestruturação é designada por interação cinemática. A norma brasileira NBR 15421 especifica qual a amplificação a ser adotada em função da classe do terreno. Para o exemplo deste artigo, com uma camada de argila rija a muito dura com 7.5m de altura, a norma brasileira estipula um fator de amplificação de 1.6 para a aceleração definida na rocha (neste caso, no topo do arenito). Foi efetuada uma análise com o Shake com características dinâmicas dos solos. A amplificação dos acelerogramas foi de 2.06 e 2.20 para os acelerogramas nas direções x e y, respectivamente (que são diferentes estatisticamente conforme o programa Artquake) incluindo, entretanto, as camadas de arenito e de siltito neste trabalho. A Figura 2 mostra a amplificação do acelerograma da camada de siltito até a base da fundação da edificação.

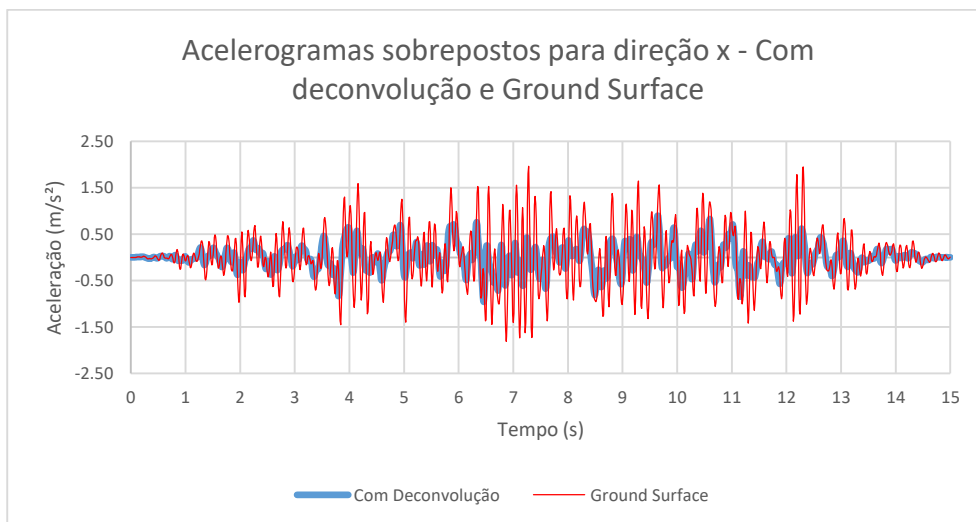


Figura 2 - Exemplo da amplificação do acelerograma da camada de siltito (com a deconvolução prévia) até a base de fundação no sentido x da menor dimensão.

Determinação da rigidez da fundação da edificação sobre o maciço de solo

Como já comentado, a edificação apresenta, ao longo da superfície inferior da laje de fundação, várias endentações para que haja também transferências de cargas por meio de pressões horizontais sobre estes dentes verticais. Por outro lado, a transferência também é feita por meio de atrito e de coesão na interface entre laje e solo. Para avaliar esta distribuição entre estas duas formas de transferência de esforços, foram preparados vários modelos de análise. Eles são de dois tipos: estrutura+solo e estrutura+molas. Inicialmente foram preparados dois modelos do tipo estrutura+solo (ver Figura 3) para avaliar a rigidez da fixação por meio dos dentes e a rigidez solo-laje_de_fundação. No modelo (estrutura+solo) em que somente os dentes atuam para esforços transversais foi efetuada uma separação entre o fundo da laje e o topo do maciço argiloso. Num outro modelo (estrutura+solo) somente as ações de atrito e de coesão foram consideradas.

Como a edificação geralmente tem dimensões retangulares diferentes, estas análises foram feitas nas duas direções horizontais x e y . É de se notar que as rigidezes do solo para cargas permanentes e cargas sísmicas são bem diferentes. Para solos argilosos as propriedades dinâmicas dos solos podem ser medidas em função da velocidade de propagação de ondas, do NSPT ou também por meio de estimativas de propriedades obtidas por meio de citações bibliográficas. O curso de Fundações de Máquinas de SANTOS, 2016 fornece várias indicações bibliográficas sobre o assunto baseadas principalmente em formulações de Ohsaki e Iwasaki (1973).

Para esta primeira determinação de rigidez horizontal dos dentes e do efeito de atrito+coesão na interface concreto-solo devem ser preparados dois modelos separados. O primeiro modelo da estrutura+solo determina a rigidez horizontal dos dentes e o segundo modelo estrutura+solo a rigidez horizontal do efeito de coesão+atrito na interface concreto-solo. Estes modelos precisam ser avaliados mais tarde com o modelo completo de concreto da superestrutura e do maciço argiloso. As dimensões em planta do maciço do solo devem ser definidas em função das dimensões em planta da edificação. Deve ser lembrado que as rigidezes determinadas inicialmente precisam ser corrigidas mais tarde em virtude da interação entre os dois efeitos no maciço argiloso. Além disso, na verificação efetuada posteriormente na análise sísmica não linear final, os efeitos resistentes transversais devem ser reduzidos por coeficientes de segurança.

Os modelos utilizados nestas duas verificações são mostrados abaixo na Figura 3.

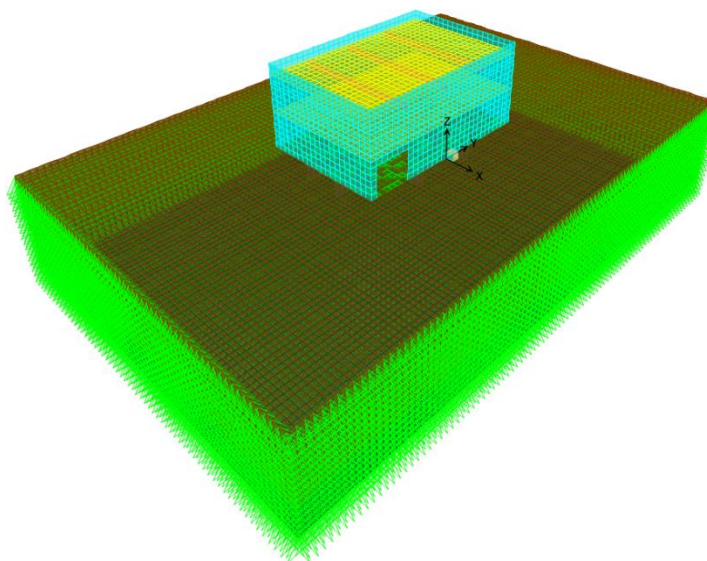


Figura 3 - Modelos diferentes para avaliar separadamente a rigidez relativa dos dentes e também da ligação fundo da laje de fundação e solo

Um terceiro modelo envolvendo estrutura+solo foi utilizado para determinar as rigidezes verticais e de “rocking” nas duas direções horizontais. Ele também é utilizado para aferir as molas impostas preliminarmente no quarto modelo quanto às rigidezes horizontais, como mostrado a seguir.

Com as rigidezes globais prepara-se um quarto modelo (estrutura+molas) em que o maciço de solo é eliminado e molas individuais são distribuídas ao longo dos dentes (molas horizontais) e ao longo da interface (molas verticais e horizontais). Motivada pela

simplificação do modelo, dá-se preferência à compatibilidade de rigidez aos efeitos de “rocking”. Entretanto, as molas introduzidas na direção horizontal na base da fundação do quarto modelo precisam ser comparadas com as do terceiro modelo (estrutura+solo). Verifica-se que as rigidezes do modelo (molas horizontais) para forças horizontais precisam ser corrigidas por fatores que são diferentes nas direções horizontais x e y.

Com as molas horizontais finalmente corrigidas nas duas direções horizontais, cria-se um quinto modelo (estrutura+molas), que é o modelo final, com o qual a análise dinâmica será efetuada. Como a análise dinâmica precisa ser efetuada com parâmetros de cálculo (parâmetros resistentes reduzidos) o efeito resistente de coesão, ao longo da interface estrutura-solo, precisa ser reduzido por um coeficiente redutor da resistência à coesão (corresponde aos coeficientes de ponderação das resistências do concreto e aço). Além disso, as molas verticais não podem estar sujeitas à tração, assim, as molas verticais são modeladas de modo a que não resistam à tração. O modelo final de análise é mostrado na Figura 4.

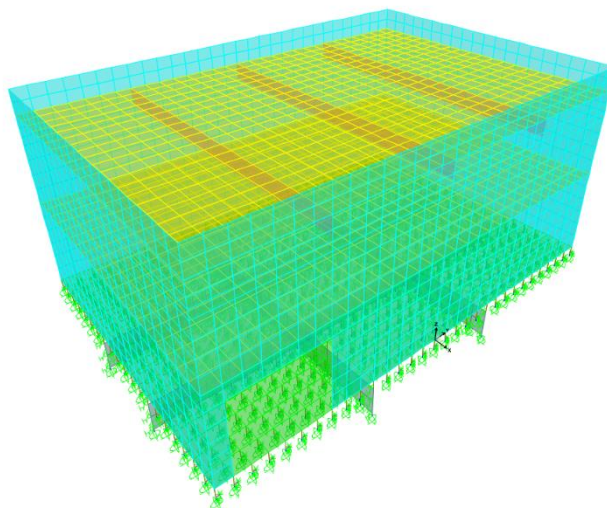


Figura 4 - Modelo 5 final com as molas horizontais e verticais representando o maciço de solo e rocha. O modelo tem comportamento não linear.

Análise dinâmica não linear no histórico do tempo

Em vista dos fatos descritos acima, a análise dinâmica efetuada precisa ser feita no regime do histórico do tempo (time-history), com as características do quinto modelo (estrutura+molas), para levar em conta os efeitos não lineares de separação vertical estrutura-solo e os deslocamentos horizontais relativos eventuais entre a estrutura-solo na interface horizontal da laje de fundação. Esta análise precisa ser efetuada com a consideração concomitante das cargas permanentes da superestrutura.

Verificou-se que os deslocamentos horizontais relativos entre o solo e a estrutura se mantiveram com valores aceitáveis. Este processamento indicou que as forças sísmicas induzidas na estrutura pela movimentação do solo movimentam a estrutura relativamente ao solo com deslocamentos relativamente baixos. Os dentes atuam favoravelmente também de forma eficiente, reduzindo os deslocamentos relativos estrutura-solo. As tensões verticais e horizontais aplicadas pela estrutura sobre o solo durante o evento sísmico se mantiveram reduzidas. Os gráficos de deslocamentos horizontais (aquí somente na direção x) e vertical estão apresentados nas Figuras 5 e 6 e as reações de apoio

nas direções horizontais (aqui somente na direção x) e vertical. Nota-se que os deslocamentos horizontais relativos são muito pequenos, na ordem de milímetros.

Os esforços necessários para o dimensionamento dos elementos estruturais da edificação são obtidos diretamente no modelo final de análise número 5 (estrutura+molas).

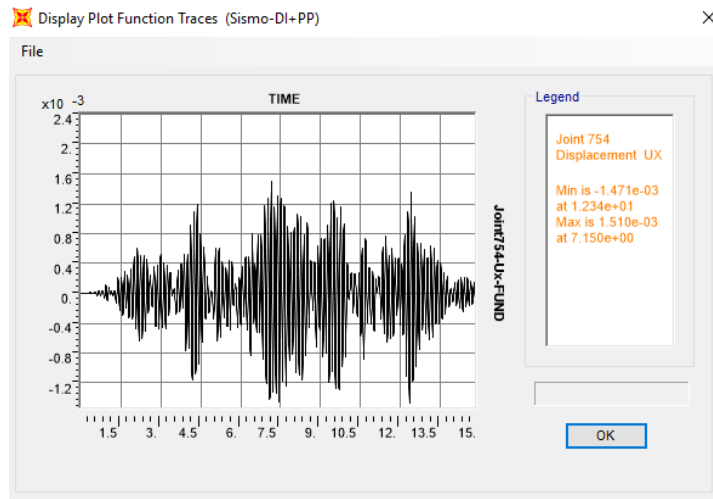


Figura 5 - Deslocamentos relativos na direção x

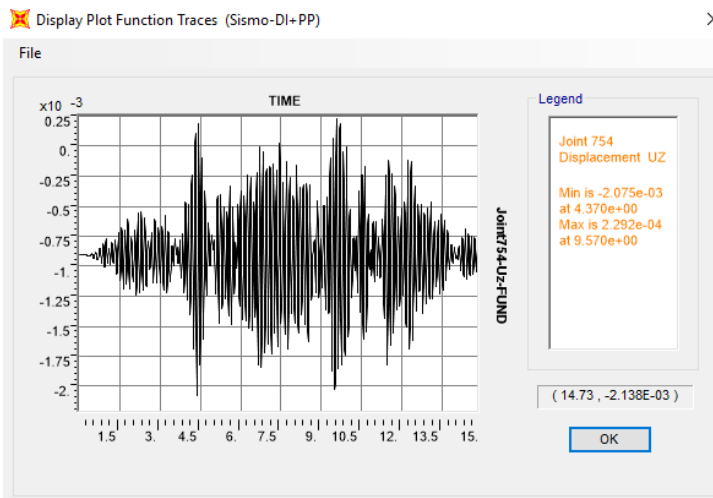


Figura 6 - Deslocamentos relativos na direção vertical z

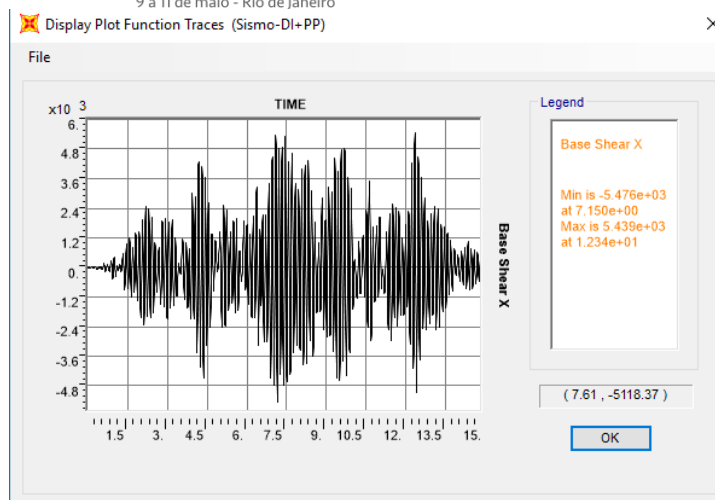


Figura 7 – Reação total horizontal de apoio na direção x

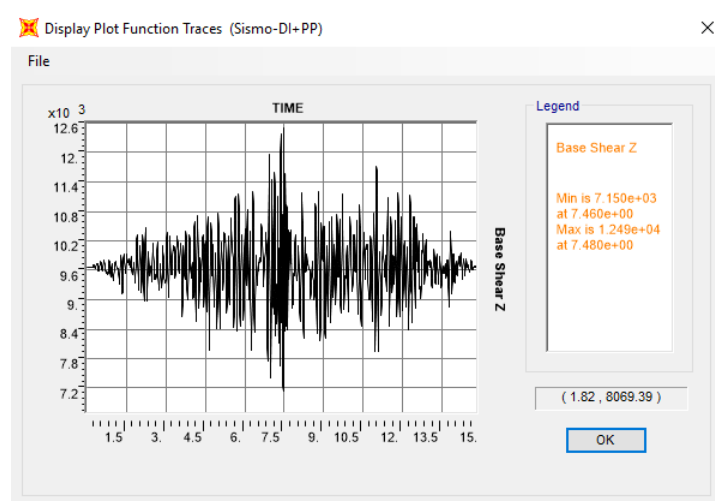


Figura 8 - Reação total vertical de apoio na direção z

Comentários sobre a consideração do amortecimento do modelo de análise

É importante assinalar que na análise dinâmica efetuada, a favor da segurança, os efeitos atenuantes do amortecimento do solo não foram considerados.

Na realidade, em função do comportamento não linear do solo, utilizando modelos completos designados por Métodos Diretos na norma ASCE-4, por meio de programas especiais que conseguem determinar as deformações no solo em cada intervalo de tempo da análise dinâmica, é possível acompanhar as perdas de energia por histerese do solo e também por propagação de ondas. No presente estudo esta análise não foi realizada, a favor da segurança.

Conclusões

Mostrou-se como se consegue efetuar uma análise dinâmica de uma edificação simples assentada em argila com fundação direta em que a laje de fundação apresenta endentações para reduzir os deslocamentos horizontais durante um sismo.

O sismo de projeto foi representado por meio de acelerogramas sintéticos de modo que o espectro de resposta obtido com o acelerograma sintético cobre de forma adequada o espectro de resposta de projeto.

Os acelerogramas, definidos na rocha aflorante, foram transformados pelo programa Shake. Eles tiveram sua intensidade reduzida por meio de uma deconvolução até a rocha mais competente formada por siltito. Mais tarde este acelerograma foi novamente ampliado no sentido de baixo para cima por meio de uma convolução até a base da fundação da edificação.

O modelo de análise foi definido associando molas horizontais e verticais ao longo da laje de fundação e dos dentes projetados. As rigidezes horizontais e vertical, deste modelo de análise final, foram comparadas com as rigidezes da edificação apoiada num maciço de solo e rocha.

A análise dinâmica foi efetuada com os acelerogramas amplificados e com um modelo em que a rigidez do solo foi determinada de forma numérica por meio de modelos em que os maciços de solo e rocha são representados.

A conclusão mais importante desta análise é que é preferível não resistir aos movimentos sísmicos horizontais por meio de fundações mais rígidas horizontalmente apoiadas em estacas. Na realidade, durante o evento do sismo, o deslocamento do solo é um movimento aleatório em que a cada instante muda de direção. Assim a edificação se movimenta com valores muito baixos horizontalmente. A movimentação do solo mudando constantemente de direção não é capaz de movimentar muito a edificação em relação ao solo subjacente.

Referências

- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. ASCE Standard 4-16 – Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures, 2016.
- SANTOS, S. H. C. Um Modelo semi-analítico em Elementos Finitos para Interação Inercial em Análise Sísmica. Dissertação de Mestrado, COPPE, UFRJ, 1980.
- NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. Regulatory Guide 1.60. Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants. Rev. 2, 2014.
- EUROCODE 8. BS EN 1998-1:2004. Design of Structures for Earthquake Resistance. 2004.
- SANTOS, S. H. C., LIMA, S. S., RODRIGUES, R. M. R. ARTQUAKE, A new software for generation of artificial time-histories. Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering. 2014.
- SCHNABEL, P., LYSMER, J., SEED, H. B. SHAKE-A computer program for conducting linear seismic responses analyses of horizontally layered soil deposits, 1972.
- IDRISS, I. M., SUN, J. I. SHAKE91. Program modified based on the original SHAKE program. 1991.
- SANTOS, S. H. C. Apostila de Fundações de Máquinas. Departamento de Estruturas, Escola Politécnica, UFRJ, 2016.
- ABNT. Norma NBR 15421-Projeto de estruturas resistentes a sismos-Procedimento. 2006