



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de
maio de 2014
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Análise de um prédio residencial considerando normas sísmicas de diversos países

Ana Arai¹, Sergio Hampshire C. Santos², Silvio de Souza Lima³

(1) Professora Substituta (M.Sc.)/ UFRJ/ Departamento de Estruturas/ana_arai@poli.ufrj.br

(2) Professor Associado (D.Sc.)/ UFRJ/ Departamento de Estruturas/sergiohampshire@poli.ufrj.br

(3) Professor Associado (D.Sc.)/ UFRJ/ Departamento de Estruturas/sdesouzarlima@gmail.com

Resumo

Após a aprovação da Norma Brasileira de Projeto de Estruturas Resistentes a Sismos (NBR 15421), ficou clara a necessidade da comparação dos critérios explicitados nesta norma, com os de normas de outros países. Este estudo comparativo é aqui apresentado, considerando as normas de outros países sul-americanos (Venezuela, Colômbia, Equador, Peru, Chile e Argentina) e as normas Norte-Americana, ASCE/SEI 7/10, e Europeia, Eurocode 8. A análise comparativa se dá a partir dos resultados das análises sísmicas de um prédio padronizado, obtidos com as normas dos diversos países, considerando nestas análises os métodos de análise espectral e estática equivalente. Considerações contidas nas diversas normas são comentadas e discutidas. Diversos resultados numéricos são comparados, como esforços nas bases dos prédios e deslocamentos ao longo de sua altura.

Palavras-chave

Análise Sísmica; Normas Sísmicas; Análise Comparativas

1. Introdução

O objetivo deste artigo é apresentar uma comparação da Norma Brasileira de Projeto de Estruturas Resistentes a Sismos NBR-15421 (2006) com normas de resistência sísmica de diversos países sul-americanos, além das normas Americana ASCE/SEI 7 (2010) e Europeia, o EUROCODE 8 (2004) – Part 1. O estudo tem como foco os critérios para o projeto de edifícios convencionais (residenciais e comerciais).

Este estudo trata de alguns aspectos críticos das normas, entre os diversos que podem ser selecionados neste tipo de estudo comparativo.

Uma estrutura simples de edifício é analisada considerando-se as diversas normas, e os resultados obtidos com esse modelo são comparados. A análise é desenvolvida utilizando-se o programa computacional SAP2000 (CSI Computer & Structures, 2010).

O estudo será desenvolvido comparando-se as seguintes normas para projeto de estruturas resistentes a sismos: Americana, Europeia, Brasileira, Argentina, Chilena, Colombiana, Equatoriana, Peruana e Venezuelana.



2. Análise Comparativa

2.1. Definição do Zoneamento Sísmico e Aceleração Característica de Projeto

A maioria das normas em estudo tem um único parâmetro que define a sismicidade a ser considerada em cada local: o valor do ZPA (“zero period acceleration”), aceleração horizontal máxima de projeto em rocha (a_g). A Norma Americana ASCE/SEI 7 (2010) é a única neste estudo que utiliza mais de um parâmetro de aceleração (três) para a definição do espectro.

2.2. Definição da Forma dos Espectros Elásticos para Sismo Horizontal

De forma a tornar possível a comparação entre os espectros elásticos para sismo horizontal, definidos nas diferentes normas, é reproduzida na Figura 1, a Figura 3.1 do EUROCODE 8 (2004), que estabelece a forma do espectro de resposta elástica, incluindo os diversos parâmetros que o definem.

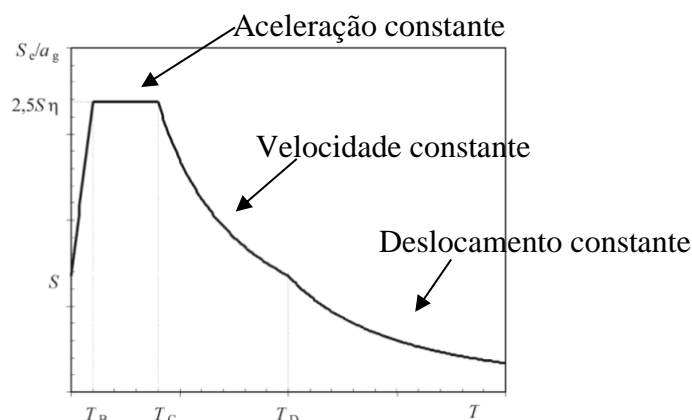


Figura 1 – Espectro de resposta elástica para sismo horizontal de acordo com o EUROCODE 8 (2004).

Todas as normas consideram, para a definição dos espectros, o amortecimento estrutural nominal de 5%. O EUROCODE 8 (2004) e a Norma Argentina INPRES-CIRSOC 103 (2013) definem parâmetros para a correção do amortecimento (parâmetro η), para amortecimentos diferentes de 5%, o que não é estabelecido nas outras normas analisadas.

2.3. Períodos de Recorrência

O período de recorrência sísmica para a maioria das normas estudadas é de 475 anos. Isto corresponde a uma probabilidade de 10% do sismo de projeto ser excedido em 50 anos.

Já a Norma Americana ASCE/SEI 7 (2010) é a única que define um período de recorrência de 2475 anos, o que corresponde a uma probabilidade de 2% do “input” sísmico ser excedido em



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



50 anos. Porém, por razões de viabilidade econômica das construções, essa norma define presentemente um fator de redução de $2/3$ a ser aplicado nas forças sísmicas resultantes da aplicação dos espectros obtidos com este período de recorrência.

2.4. Consideração da Amplificação e Liquefação do Solo e Interação Solo-Estrutura

Todas as normas analisadas classificam as condições de subsolo em função das velocidades de propagação de ondas secundárias (v_s), e/ou do número de golpes (N_{SPT}) registrado no ensaio de penetração *SPT* (“Standard Penetration Test”).

Para áreas em que o subsolo é não-homogêneo, todas as normas estabelecem critérios para a definição de parâmetros médios até uma certa profundidade (tipicamente os 30m mais superficiais), para a classificação do subsolo. É definido um certo número de Classes de Subsolo (entre três e cinco; por exemplo, no EUROCODE 8 (2004), são definidas as Classes A a D), desde subsolos muito rígidos até os mais deformáveis.

Como o fenômeno da amplificação no solo se apresenta de forma diferenciada em subsolos mais ou menos rígidos, a Classe de Subsolo irá condicionar a forma dos espectros de projeto. Em solos menos rígidos a amplificação no solo é maior, levando a maiores valores do coeficiente de amplificação (fator *S* no EUROCODE 8 (2004)). Além disso, a faixa de maiores acelerações dos espectros se desloca no sentido dos maiores períodos estruturais *T*.

Em todas as normas analisadas é definida uma Classe de Subsolo separada para os solos liquefazíveis, sem que sejam, no entanto definidos critérios para a consideração da liquefação. Critérios específicos para a consideração de efeitos de interação solo-estrutura podem ser encontrados no Capítulo 19 da ASCE/SEI 7 (2010), no Capítulo 6 da EUROCODE 8 (2004)–Parte 5, e na Norma Colombiana NSR-10 (2010) no seu apêndice A-2. Esses critérios não se encontram explicitados na maior parte das demais normas.

2.5. Classificação da Estrutura em Diferentes Níveis de Importância

Todas as normas analisadas reconhecem a necessidade de classificar as estruturas em Classes de Importância. Essa classificação implica em uma diferenciação em termos de confiabilidade, de acordo com o risco estimado e/ou das consequências de uma falha. Essa diferenciação de confiabilidade se traduz nas normas pela aplicação de um coeficiente de multiplicação a ser aplicado nas forças sísmicas avaliadas. As normas definem entre três e



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



quatro Classes de Importância. Em todas elas o fator de importância de referência $I = 1,0$ é associado a estruturas usuais, tais como edificações residenciais e comerciais.

2.6. Sistemas Sismo-Resistentes e Coeficientes de Modificação de Resposta

Todas as normas analisadas reconhecem a impossibilidade de requerer que as estruturas se comportem no regime elástico-linear, quando sujeitas a solicitações sísmicas extremas. Quando submetidas a essas solicitações, espera-se que as estruturas possam se comportar adequadamente no domínio não linear, desenvolvendo grandes deformações e dissipando uma grande quantidade de energia. Para isso, as estruturas devem ser projetadas e detalhadas de forma a assegurar essa capacidade de dissipação de energia.

Desde que um adequado grau de ductilidade seja assegurado à estrutura, é possível se transformar os espectros de resposta elásticos em espectros de resposta de projeto, aplicando-se coeficientes de modificação de resposta (coeficientes de redução R ou q), funções do material e do tipo da estrutura, em que a ductilidade considerada está implícita.

As normas definem estes coeficientes de modificação em função dos sistemas estruturais adotados e dos materiais utilizados. Os valores numéricos desses coeficientes são frequentemente definidos empiricamente nas normas, com base na experiência anterior.

2.7. Irregularidades Estruturais

Todas as normas analisadas recomendam estritamente (ver, por exemplo, o item 4.2.1 do EUROCODE 8 (2004)), os seguintes princípios básicos no projeto sísmico de uma construção: simplicidade e uniformidade estrutural, regularidade em planta e em elevação, resistência e rigidez bidirecional e à torção, comportamento de diafragma nos diversos pisos e fundação adequada.

A irregularidade em planta e em elevação é punida pelas normas, que nesses casos requerem métodos de análise mais elaborados e/ou requisitos mais rígidos para a consideração das forças sísmicas. Algumas normas, como a Chilena e Peruana, não apresentam nenhuma definição específica para a consideração dessas irregularidades.

2.8. Métodos de análise sísmica

Para estruturas simples e regulares, todas as normas analisadas permitem a aplicação de um método de forças horizontais estáticas equivalentes, nos casos em que a contribuição do modo



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de
maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



fundamental de vibração é preponderante nas respostas dinâmicas. As normas também definem fórmulas aproximadas para a avaliação dos períodos fundamentais das estruturas. O uso de dois modelos planos em cada uma das duas direções horizontais é tipicamente admitido somente em estruturas regulares e simétricas.

Todas as normas também permitem o uso do método espectral, por superposição modal das respostas. Nas normas analisadas, é exigido que, com o número de modos considerado, seja capturada pelo menos 90% da massa total da estrutura em cada direção ortogonal.

Para a combinação das componentes modais, a regra do CQC (Combinação Quadrática Completa) é considerada como a preferencial pela quase totalidade das normas, exceto pela Norma Peruana, que define outra regra de combinação modal.

Todas as normas, com exceção da Chilena NCH 433 (2009), admitem uma análise linear com históricos no tempo (*“time-history analysis”*). Algumas normas, como o EUROCODE 8, Colombiana, Equatoriana e a Venezuelana, admitem uma análise não linear no domínio do tempo. Algumas normas como o EUROCODE 8 (2004), a Colombiana NSR-10 (2010) e a Venezuelana COVENIN 1756 (2001) admitem também uma análise pseudoestática progressiva (*“pushover analysis”*).

2.9. Limitação das distorções

Todas as normas analisadas estabelecem uma limitação das distorções entre pisos, com o intuito principalmente de evitar danos a elementos não estruturais. Considera-se que esses danos são função da distorção em um piso, parâmetro adimensional igual ao deslocamento relativo entre os dois níveis acima e abaixo do piso considerado, dividido pela altura do piso.

3. Exemplo Numérico

3.1. Estrutura analisada

A Figura 3 apresenta a planta do pavimento tipo da edificação analisada (*“Model Building”*), e a Figura 2 o modelo estrutural elaborado no programa SAP2000. Observe-se que por simplicidade as lajes estão centradas com os eixos das vigas.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



O modelo idealizado para este estudo tem planta retangular e duplo eixo de simetria. A edificação tem 11 andares, pé direito de 3,65m, dimensões em planta de 20,1m x 55,3m e altura total do prédio igual a 45,15m.

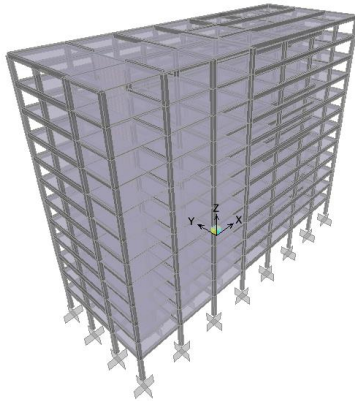


Figura 2– Perspectiva do modelo estrutural

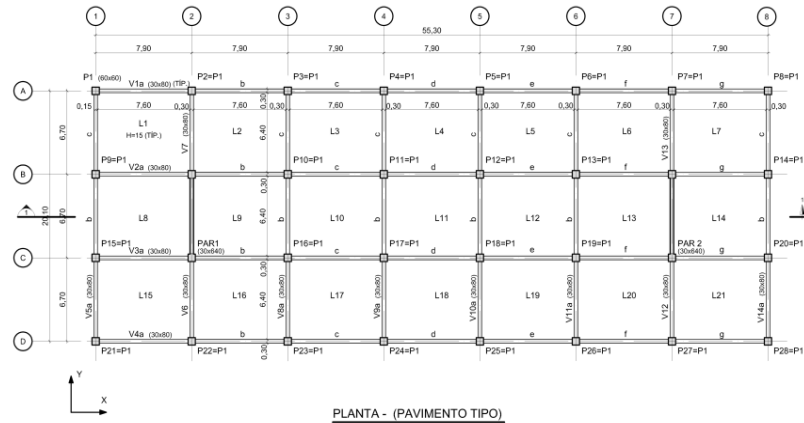


Figura 3 – Planta estrutural do pavimento tipo.

As dimensões das vigas são de 30 cm x 80 cm, e os pilares têm uma seção de 60 cm x 60 cm. As lajes têm espessura de 15 cm e os pilares-paredes são de 30 cm x 640 cm. O concreto da edificação tem resistência característica $f_{ck} = 28\text{MPa}$, módulo de elasticidade E_c igual a 32GPa e o peso específico é de 25kN/m³.

Além da massa dos elementos da estrutura, também foram consideradas as massas de revestimento no pavimento tipo e cobertura, como de 0,15t/m² e 0,05t/m², respectivamente, distribuídas uniformemente sobre as lajes. Também foram consideradas quatro massas concentradas de 90 t no topo da estrutura devido ao carregamento da caixa d'água, assim totalizando uma massa de 11.478 toneladas.

Na definição das propriedades geométricas dos elementos não foi considerada a redução de rigidez devido à fissuração, o que é conservador na determinação dos esforços.

Neste estudo foi considerada apenas a massa das cargas permanentes, conforme descrito nas normas Brasileira NBR-15421 (2006) e na Americana ASCE/SEI 7 (2010).

O edifício foi modelado de acordo com a teoria dos elementos finitos, por meio do programa de análise estrutural SAP2000. Foram utilizados elementos de barra que simulam pilares e vigas e elementos tipo “shell” que simulam as lajes e os pilares parede.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



3.2. Dados sísmicos considerados

Neste estudo comparativo, considerando-se o período de retorno de 475 anos, a aceleração de projeto na rocha foi considerada $a_g = 0,15g$. O nível de sismicidade analisado é baixo, para que seja possível a comparação das normas selecionadas para essa análise, já que esse é o maior nível de sismicidade considerado pela Norma Brasileira. Como somente a norma ASCE/SEI 7 (2010) considera o período de recorrência de 2475 anos, seu espectro de projeto apresenta valores numéricos bastante superiores aos das demais normas.

São realizadas duas análises, a primeira considerando-se a classe do terreno como rocha e a segunda como solo do tipo rígido. Os fatores de amplificação sísmica para fundação em rocha são iguais a um para todas as normas analisadas neste estudo. Já no caso de fundação em solo rígido, tipo D na NBR-15421 (2006), esses fatores variam de acordo em cada norma. No modelo o solo é considerado como apoio rígido, conforme permitido pelas normas.

Para a análise comparativa, os espectros definidos para cada norma são os elásticos. Isto significa que o coeficiente de modificação de resposta (R) é considerado igual a um.

Para a análise com todas as normas, o CQC (Combinação Quadrática Completa) foi utilizado para a combinação das contribuições modais.

3.3. Definição dos Espectros Elásticos para Sismo Horizontal

As Figura 4 e Figura 5 apresentam os espectros de resposta elástica para subsolo do tipo rocha e solo rígido, respectivamente.

4. Resultados

4.1. Frequências Próprias e Modos de Vibração

As análises espectrais foram realizadas com o programa SAP2000, para os dez espectros definidos para cada tipo de solo.

A Tabela 1 apresenta os valores dos períodos dos modos de vibração e os fatores de participação modal até o 10º modo de vibração.

O primeiro modo apresenta-se na direção X, o segundo na direção Y e o terceiro modo é de torção. Somente no 9º modo caracteriza-se um modo de vibração na direção vertical.

Até o 15º modo são capturados mais de 90% da massa total do prédio nas duas direções horizontais.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:

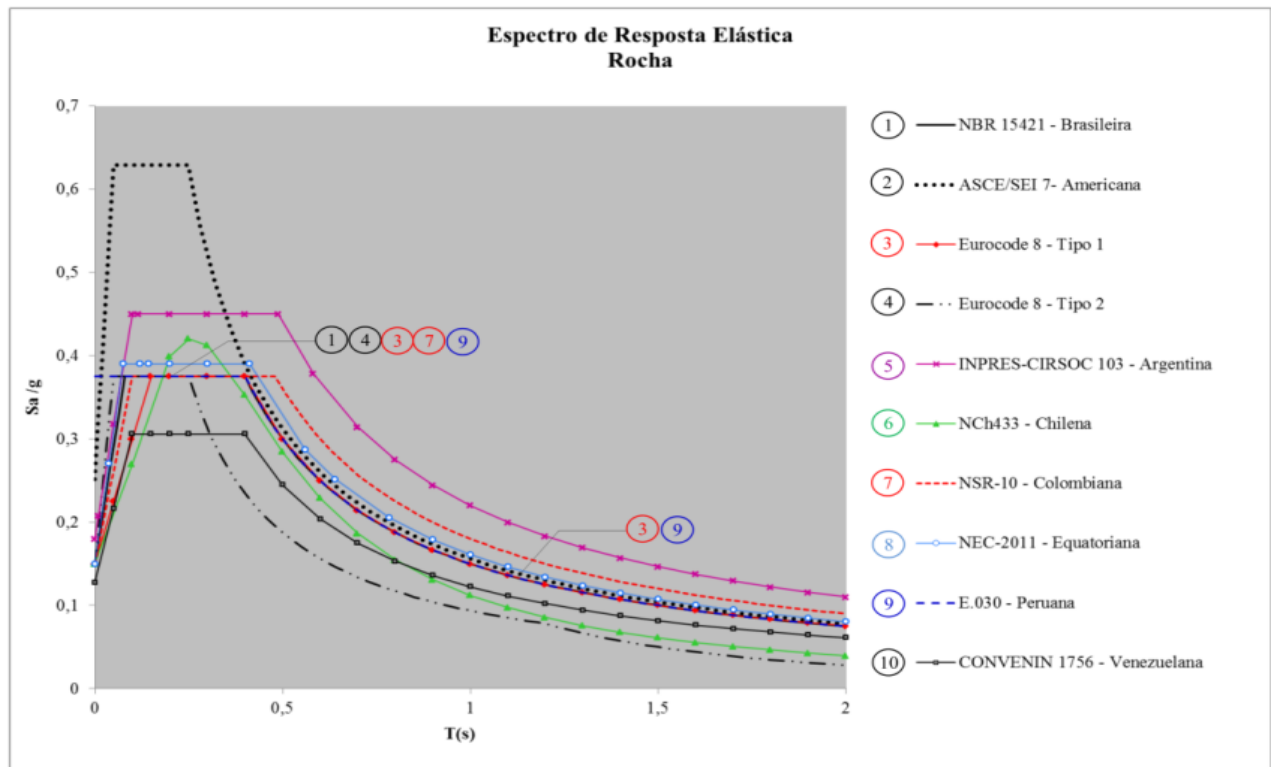


Figura 4 – Espectros de resposta elástica de acordo com as várias normas em rocha

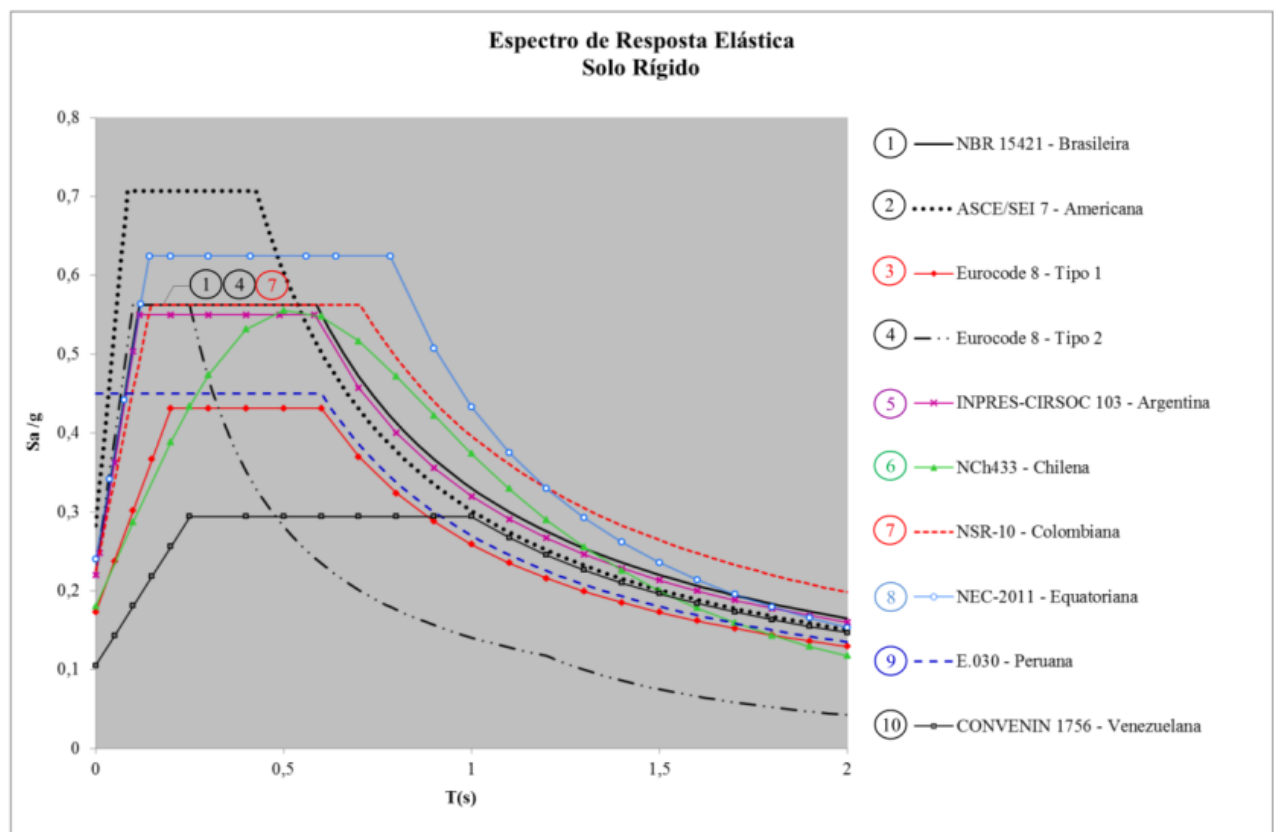


Figura 5 – Espectros de resposta elástica de acordo com as várias normas em solo rígido.



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Tabela 1 – Períodos e fatores de participação modal (SAP2000)

Mode	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
Unitless	(s)	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
1	1,683	0,848	0,000	0,000	0,848	0,000	0,000
2	1,114	0,000	0,725	0,000	0,848	0,725	0,000
3	0,956	0,000	0,000	0,000	0,848	0,725	0,000
4	0,550	0,093	0,000	0,000	0,941	0,725	0,000
5	0,317	0,030	0,000	0,000	0,971	0,725	0,000
6	0,289	0,000	0,165	0,000	0,971	0,890	0,000
7	0,253	0,000	0,000	0,000	0,971	0,890	0,000
8	0,218	0,013	0,000	0,000	0,984	0,890	0,000
9	0,189	0,000	0,000	0,399	0,984	0,890	0,399
10	0,164	0,000	0,000	0,000	0,984	0,890	0,399

4.2. Deslocamentos

Os deslocamentos são obtidos em análise espectrais em que é aplicada a regra do CQC para a combinação das componentes modais, e sem considerar a perda de rigidez devida à fissuração. Os deslocamentos obtidos (resultados em cm) no topo do prédio são apresentados nas Figuras 6 e 7, em rocha e solo rígido, para as direções X e Y.

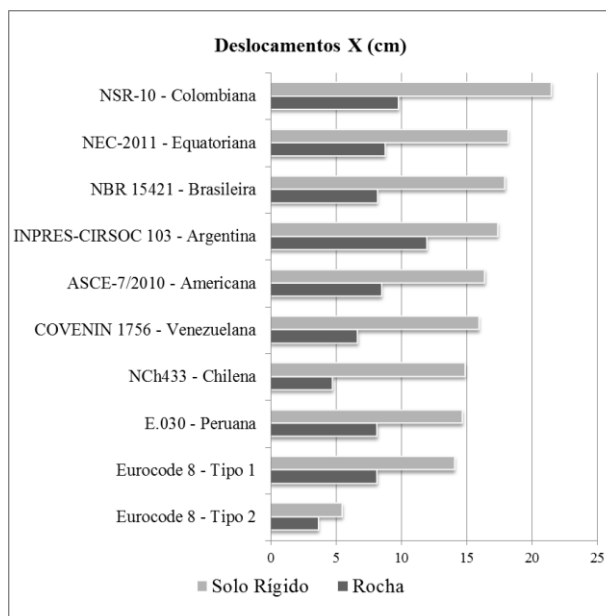


Figura 6 – Deslocamentos obtidos em rocha e solo rígido, Direção X.

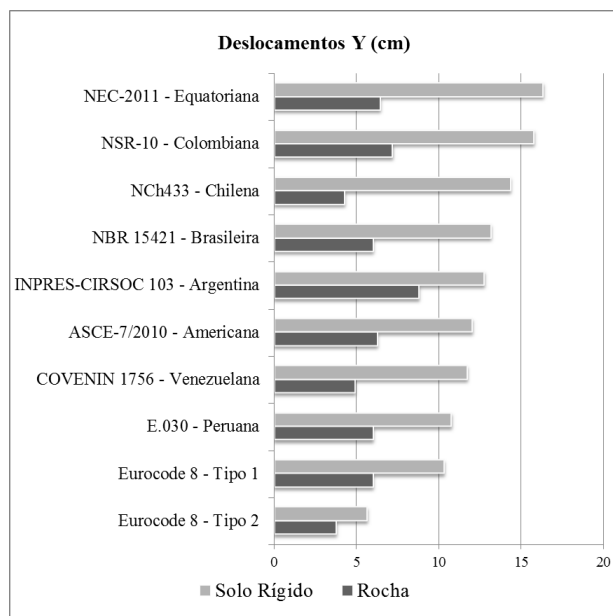


Figura 7 – Deslocamentos obtidos em rocha e solo rígido, Direção Y

4.3. Força Total na Base

As forças totais na base da estrutura (resultados em kN) obtidas através de análises espectrais e estáticas equivalentes são mostradas nas Figuras 8 e 9. Nessas análises os períodos de



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21,22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



vibração considerados são os dos dois primeiros modos, obtidos do modelo do SAP 2000, 1,683s e 1,114s, nas direções X e Y, respectivamente.

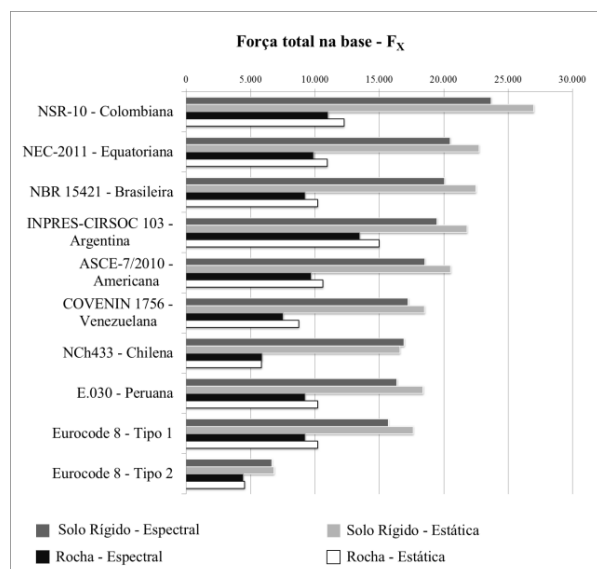


Figura 8 – Forças totais obtidas nas bases em rocha e solo rígido, Direção X.

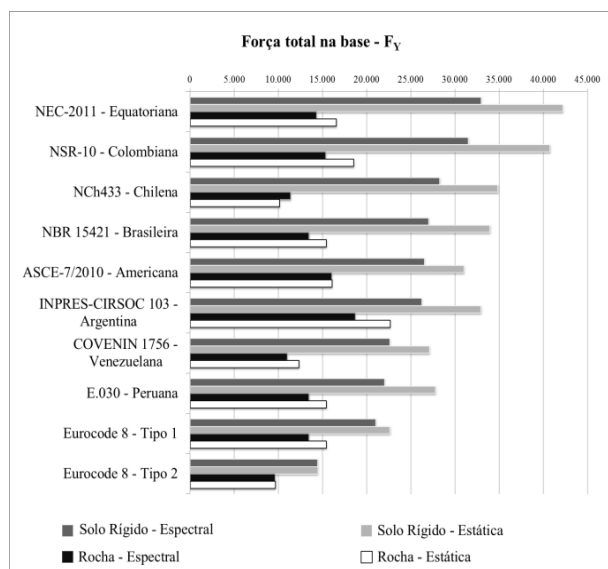


Figura 9 – Forças totais obtidas nas bases em rocha e solo rígido, Direção Y.

5. Conclusões

Devido à forma espectral definida no EUROCODE 8 para o Tipo 2 de espectro, os deslocamentos e forças totais na base obtidos de acordo com essa norma são substancialmente menores do que os obtidos com os outros espectros. Os valores de aceleração dos espectros analisados são bem menores para o espectro do tipo 2 do EUROCODE 8, quando comparados com os das demais normas analisadas.

Quanto à comparação entre solo rígido e rocha, constata-se uma alteração nos espectros bastante diferenciada entre as normas. Isso aponta para a necessidade de um estudo específico de amplificação sísmica no solo em diferentes situações geotécnicas.

Observe-se que, conforme esperado, as forças horizontais totais obtidas com as forças estáticas equivalentes quase sempre fornecem resultados praticamente iguais e conservadores com relação aos obtidos nas análises espectrais.

As diferenças nas formas dos espectros de projeto podem levar a discrepâncias nos resultados superiores a 100%. Existem diferenças importantes decorrentes da variedade dos parâmetros que consideram a influência das características do subsolo. Além disso, em todas as normas



VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



sul-americanas, a forma dos espectros é definida apenas por um parâmetro, a aceleração máxima no solo. O EUROCODE 8 (2004) define dois tipos de espectro, associados à magnitude que prepondera na análise do risco sísmico da região. Já na ASCE/SEI 7 (2010), a forma do espectro é definida de forma mais completa, por três parâmetros. Esse é um ponto essencial, a ser investigado com maior profundidade em estudos futuros.

Outro ponto a ser mais bem estudado em próximos trabalhos diz respeito à definição dos períodos de recorrência. As normas americanas, como a ASCE/SEI 7 (2010), já redefiniram esse parâmetro de 475 anos para 2475 anos. Essa redefinição implica em um importante acréscimo nas forças sísmicas, relativamente às atualmente definidas nas normas de projeto.

6. Referências

- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE), ASCE/SEI 7-10: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. Reston, Virginia, United States, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 15421, Projeto de Estruturas Resistentes a Sismos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.
- BRASIL, R. M. L. R. F.; SILVA, M. A., Introdução à Dinâmica das Estruturas. Ed. Edgard Blucher, Brasil, 2013.
- CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE LOS REGLAMENTOS NACIONALES DE SEGURIDAD PARA LAS OBRAS CIVILES, Reglamento INPRES-CIRSOC 103, Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes – Parte 1 – Construcciones en General. Buenos Aires, 2013.
- COMISIÓN ASESORA PERMANENTE PARA EL RÉGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES, NSR-10: Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. Bogotá, 2010.
- COMITÉ EJECUTIVO DE LA NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN, NEC-11: Norma Ecuatoriana de la Construcción – Peligro Sísmico y Requisitos de Diseño Sismo Resistente. Quito, 2011.
- CSI COMPUTERS & STRUCTURES, INC., SAP2000, Integrated Software for Structural Analysis & Design, Version 14. CSI Inc, Berkeley, California, USA, 2010.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, EN 1998-1:2004 – Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance, ECS. Brussels, 2004.
- FUNDACIÓN VENEZOLANA DE INVESTIGACIONES SISMOLÓGICAS (FUNVISIS), Norma Venezolana COVENIN 1756:2001-1, Edificaciones Sismorresistentes, Parte 1: Articulado. Caracas, 2001.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (INN), NCh 433.Of1996 – Modificada en 2009: Diseño Sísmico de Edificios. Santiago, 2009.
- MINISTERIO DE VIVIENDA, CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO, Norma E.030: Reglamento Nacional de Edificaciones – Diseño Sismorresistente. Disponível em: <www.urbanistasperu.org>. Lima, 2006.
- SANTOS, S. H. C.; LIMA, S. S. and ARAI, A., Comparative Study of Seismic Standards in South American Countries. 35th International Symposium on Bridge and Structural Engineering, London, 2011.
- SANTOS, S. H. C.; LIMA, S. S.; ARAI, A., Comparative Study of Codes for Seismic Design of Structures. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais [online]. vol.5, n.6, pp. 812-819, 2012.