

Aplicação do Método de Hirosawa Adaptado à Realidade Brasileira em uma Estrutura com um Grau de Liberdade

Application of the Hirosawa Method Adapted to Brazilian Reality on a Single-Degree-of-Freedom Structure

Paulo de Souza Tavares Miranda(1); Tereza Denyse Pereira de Araújo(2)

(1) Mestre em Estruturas, Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil - Universidade Federal do Ceará

(2) Professora Doutora, Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil - Universidade Federal do Ceará

Campus Universitário do Pici, Bloco 710 - Fortaleza - Ceará - Brasil - CEP: 60455-760

Resumo

No ano de 2006, foi publicada no Brasil a norma NBR 15421 - Projeto de estruturas resistentes a sismos, que estabelece os requisitos exigíveis para a verificação da segurança das estruturas usuais relativamente às ações de sismos. Esta norma tem como objetivo diminuir os danos causados por estas ações em novas estruturas. Como a grande maioria dos edifícios existentes no Brasil foi construída sem levar em consideração as recomendações desta norma, faz-se necessário à aplicação de métodos de avaliação da vulnerabilidade sísmica nestas estruturas. Dentre os métodos de avaliação da vulnerabilidade sísmica existentes, destaca-se o método de Hirosawa, também conhecido como método japonês. Este método consiste na comparação do índice de desempenho sísmico da estrutura com o índice de solicitação sísmica. O índice de desempenho sísmico depende do subíndice de desempenho sísmico básico estrutural (encontrado a partir dos índices de resistência e ductilidade da estrutura), do subíndice de configuração estrutural e do subíndice de deterioração estrutural. Já o índice de solicitação sísmica depende do subíndice de solicitação sísmica básica, do subíndice de sismicidade, do subíndice topográfico e geotécnico e do subíndice de importância da edificação. Neste trabalho, o método de Hirosawa adaptado à realidade construtiva brasileira e considerando os parâmetros da NBR 15421:2006 é aplicado em uma estrutura com um grau de liberdade levando à comparação direta entre a resistência ao cisalhamento dos elementos verticais e as forças sísmicas horizontais.

Palavra-Chave: Vulnerabilidade, Hirosawa, Sismos

Abstract

In 2006 was published in Brazil the NBR 15421 – design of seismic resistant structures, which provides the necessary requirements for security verification of common structures under earthquakes. This code aims to reduce the damage caused by seismic actions in new structures. As the great majority of existing buildings in Brazil was built without taking into account the recommendations of this code, it is necessary to apply methods for evaluating the seismic vulnerability of these structures. Among the existing seismic vulnerability assessment methods, the Hirosawa method, also known as Japanese method is highlighted. This method consists in comparing the seismic performance index of the structure with the seismic judgement index. The seismic performance index depends on the structural basic seismic performance subindex (obtained from the structural strength and ductility index), the structural configuration subindex and the structural deterioration subindex. The seismic judgement index depends on the basic seismic judgement subindex, the seismic zone subindex, the topographical and geotechnical subindex and the construction usage subindex. In this work, the Hirosawa method adapted to the Brazilian constructive reality and considering the NBR 15421:2006 parameters is applied to a single-degree-of-freedom structure leading to a direct comparison between the vertical elements shear strength and seismic horizontal forces.

Keywords: Vulnerability, Hirosawa, Earthquakes

1 Introdução

Em decorrência de um forte abalo sísmico, determinada região pode sofrer consequências desastrosas relacionadas à perda de vidas humanas e elevados prejuízos financeiros. O grau de destruição de um terremoto não está associado somente à magnitude deste, ou seja, à sua energia liberada, mas também à capacidade das edificações de responder positivamente às ações sísmicas mantendo-se estáveis. O nível de destruição de um terremoto é representado através de sua intensidade, sendo, dentre as escalas de intensidade sísmicas conhecidas no meio técnico, a escala de Mercalli Modificada a mais utilizada. Em função das características resistentes das edificações, terremotos de mesma magnitude podem variar de intensidade.

Em 2010, dois terremotos repercutiram mundialmente por suas grandes magnitudes e intensidades. O primeiro deles aconteceu no Haiti no dia 12 de janeiro e atingiu 7,0 graus na escala Richter. Os dados da catástrofe são impressionantes. Segundo relatório da ONU (2010), foram registradas mais de 222.000 mortes e mais de 2,3 milhões de pessoas desabrigadas. O relatório também mencionou perdas econômicas sofridas pelo país, que atingiram mais de 7,7 bilhões de dólares americanos. O segundo aconteceu no Chile no dia 27 de fevereiro e atingiu 8,8 graus na escala Richter. Foram registrados 521 mortes e o número de edificações danificadas superou a marca de 1,5 milhão (American Red Cross, 2011). Os efeitos deste terremoto foram sentidos em países vizinhos, inclusive no Brasil.

Estes dois terremotos representam um ótimo exemplo de como as edificações influenciam nas consequências de um evento sísmico. Embora o terremoto do Chile tenha atingido maior magnitude quando comparado com o terremoto do Haiti, os efeitos do primeiro terremoto, representados através dos danos observados, foram bem menores do que os do segundo. Isto se deve ao preparo adequado das edificações no Chile que as tornaram menos vulneráveis aos abalos sísmicos.

1.1 Atividades sísmicas no Brasil

O Brasil está situado sobre a placa tectônica sulamericana, sendo, portanto, um país de considerável estabilidade sísmica. A possibilidade de ocorrência de grandes terremotos é bastante remota, não podendo, no entanto, ser totalmente descartada.

O maior terremoto que o país já teve ocorreu há mais de 50 anos, na Serra do Tombador, no Mato Grosso, atingindo 6,6 graus na escala Richter. Outros registros que merecem destaque são: Manaus-AM (1963) com 5,1 graus, noroeste do Mato Grosso do Sul (1964) com 5,4 graus, Pacajus-CE (1980) com 5,2 graus, Codajás-AM (1983) com 5,5 graus, João Câmara-RN (1986 e 1989) com 5,1 grau e 5,0 grau respectivamente, Plataforma-RS (1990) com 5,0 graus, Porto Gaúcho-MT (1998) com 5,2 graus, divisa entre Acre e Amazonas (2007) com 6,1 graus. Em Itacarambi-MG, no dia 09 de dezembro de 2007 ocorreu um terremoto com 4,9 graus na escala Richter que provocou a primeira vítima fatal da história do Brasil além de deixar cinco feridos e várias casas destruídas.

A figura 1 mostra a sismicidade brasileira ocorrida desde a época da colonização até 1981. Observa-se que há uma maior concentração de terremotos na região Nordeste, mais precisamente nos estados do Ceará e Rio Grande do Norte; na região Sudeste, mais precisamente no sul do estado de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo; e a presença de terremotos de elevada magnitude na região Norte e Centro-Oeste.

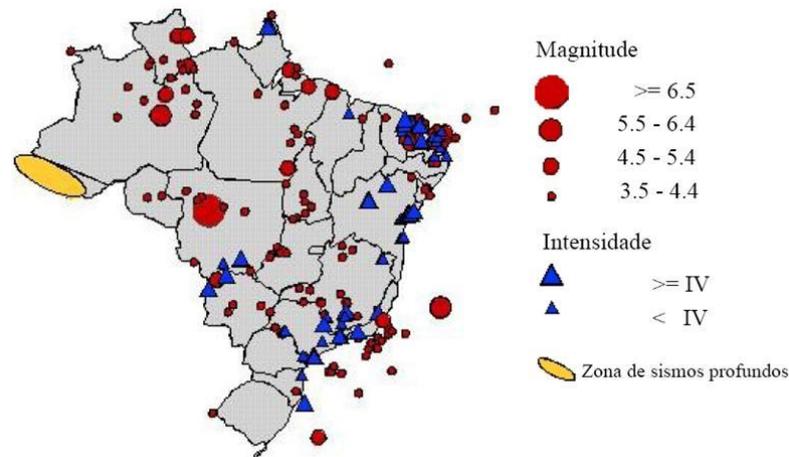


Figura 1 - Mapa da sismicidade brasileira (BERROCAL, 1984)

No ano de 2006, impulsionada pela verificação de maiores atividades sísmicas registradas no Brasil nos últimos anos e pela necessidade de adequação das normas técnicas brasileiras às exigências internacionais para uma maior integração econômica com outros países do mundo, como afirma SANTOS E LIMA (2005), a ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – elaborou e publicou a NBR 15421 – Projeto de estruturas resistentes a sismos.

A NBR 15421 (ABNT, 2006) estabelece os requisitos exigíveis para a verificação da segurança das estruturas usuais da construção civil relativamente às ações de sismos, visando a preservação de vidas humanas, a redução nos danos esperados em edificações e a manutenção da operacionalidade de edificações críticas durante e após um evento sísmico. Esta norma trata da obrigatoriedade da consideração das ações sísmicas nos projetos de novas estruturas.

Como há muitos edifícios brasileiros construídos antes da publicação desta norma, a aplicação de métodos de avaliação da vulnerabilidade sísmica das estruturas existentes faz-se necessária.

2 Métodos de Avaliação de Vulnerabilidade Sísmica

Vários são os métodos de avaliação de vulnerabilidade sísmica utilizados no mundo. Dentre eles podem ser citados os trabalhos de LANTADA *et al.* (2004), BERNARDINI (2000), ROSSETO e EINASHAI (2003), HIROSAWA (1992) e CALVI (1999). Estes métodos são classificados em três grupos: os qualitativos, os quantitativos e os experimentais. Os métodos qualitativos são indicados para uma avaliação inicial de um conjunto de estruturas, enquanto que os métodos quantitativos e experimentais são indicados para situações e edificações específicas, possuindo como vantagem a

indicação do comportamento da estrutura, em termos de evolução de danos, quando submetida a um abalo sísmico.

No Brasil, poucos trabalhos foram desenvolvidos na área de avaliação da vulnerabilidade sísmica de estruturas. No entanto, uma vez que é obrigatória a consideração das ações sísmicas em novas estruturas através da aplicação da NBR 15421 (ABNT, 2006), um método de avaliação de vulnerabilidade, ainda que qualitativo, deve ser introduzido no meio técnico, sendo importante sua aplicação pelo menos em edificações de uso essencial, como hospitais e instalações de Corpo de Bombeiros.

3 O método de Hirosawa

Dentre os métodos de avaliação da vulnerabilidade sísmica aplicados em escala mundial na avaliação de edificações de concreto, merece destaque o método proposto por HIROSAWA (1992), também conhecido como método japonês. Recentemente, no dia 11 de março deste ano, a estabilidade sísmica das estruturas japonesas foi testada pela atividade de um terremoto de magnitude de 8,9 graus na escala Richter. Embora o número de vítimas fatais tenha sido superior a nove mil, a grande maioria destas não foi provocada pelo desabamento das estruturas, mas sim pela ação dos *tsunamis*.

O método de Hirosawa possui três níveis de avaliação, sendo o primeiro de ordem qualitativa e os demais de ordem quantitativa. A base do método é a comparação entre a ação das forças sísmicas horizontais e a resistência ao cisalhamento dos elementos estruturais através da comparação direta do índice de solicitação sísmica, I_{s0} , e o índice de desempenho sísmico, I_s .

A resposta obtida da comparação destes índices leva a duas situações:

1. $I_s \geq I_{s0}$, a edificação tem segurança frente ao evento sísmico idealizado e pode continuar a ser usada sem a necessidade de reforço sísmico;
2. $I_s < I_{s0}$, a edificação tem um comportamento incerto frente ao evento sísmico idealizado.

O índice de desempenho sísmico, I_s , depende do subíndice de desempenho sísmico básico estrutural, E_0 (encontrado a partir dos índices de resistência, C , e ductilidade, F , da estrutura), do subíndice de configuração estrutural, S_D , e do subíndice de deterioração estrutural, T_D .

$$I_s = E_0 \cdot S_D \cdot T_D \quad (\text{Equação 1})$$

Já o índice de solicitação sísmica, I_{s0} , depende do subíndice de solicitação sísmica básica, E_{s0} , do subíndice de sismicidade, Z , do subíndice topográfico e geotécnico, G , e do subíndice de importância da edificação, U .

$$I_{s0} = E_s \cdot Z \cdot G \cdot U \quad (\text{Equação 2})$$

4 O método de Hirosawa adaptado à realidade brasileira

MIRANDA (2010) usou os parâmetros da NBR 15421 (ABNT, 2006) e as características construtivas adotadas nas estruturas de concreto armado no Brasil e adaptou o primeiro nível de avaliação do método de Hirosawa, aplicável a edifícios de até oito pavimentos, à realidade predial brasileira.

Embora no método de Hirosawa original, sejam considerados como elementos verticais, os pilares curtos, os pilares e as paredes de concreto armado, na adaptação do primeiro nível de avaliação do método de Hirosawa à realidade brasileira, são considerados como elementos estruturais verticais somente os pilares de concreto. Isto porque nos edifícios de concreto armado no Brasil com no máximo oito pavimentos, limite imposto pelo próprio método, não é comum a presença de paredes de concreto nem de pilares curtos. As paredes de concreto estão normalmente presentes em edifícios altos, funcionando como elementos de contraventamento para limitação dos deslocamentos. Quanto aos pilares curtos, cujo comportamento é controlado pela ruptura frágil por cisalhamento, sua presença nas estruturas está condicionada à existência de elementos horizontais que limitem suas alturas livres. Em edifícios de até oito pavimentos, os pilares apresentam, salvo algumas exigências arquitetônicas, larguras de no máximo 30 cm. A presença de pilares curtos fica, portanto, condicionada à altura livre dos pilares de no máximo 60 cm.

Na determinação do índice de desempenho sísmico, I_s , o subíndice E_0 considerando apenas a capacidade resistente dos pilares é determinado pela Equação 3.

$$E_0 = \left\{ \left(\frac{n+1}{n+i} \right) \right\} \cdot a_1 \left[\frac{f_c}{20} \cdot \frac{(\tau_{c1} \cdot A_{c1} + \tau_{c2} \cdot A_{c2})}{W} \right] \cdot F_c \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo n o número de pavimentos; a_1 o fator de redução da capacidade resistente dos pilares de acordo com o deslocamento das paredes verificado no momento da ruptura das paredes; f_c a resistência do concreto à compressão; τ_{c1} resistência média ao cisalhamento no estado limite último dos pilares cuja altura livre dividida pela base da seção do pilar é menor que 6,0; τ_{c2} resistência média ao cisalhamento no estado limite último dos pilares cuja altura livre dividida pela base da seção do pilar é maior ou igual a 6,0; A_{c1} somatório das áreas de seção transversal dos pilares cuja altura livre dividida pela base da seção do pilar é menor que 6,0; A_{c2} somatório das áreas de seção transversal dos pilares cuja altura livre dividida pela base da seção do pilar é maior ou igual a 6,0; W o peso da estrutura (segundo a NBR 15421 (ABNT, 2006)) e F_c o índice de ductilidade dos pilares.

Os subíndices S_D e T_D são os mesmos recomendados pelo método de Hirosawa original.

Na determinação do índice de solicitação sísmica, I_{s0} , no método adaptado, o subíndice de solicitação sísmica básica, E_{s0} , assume o valor 0,83. Os valores do subíndice de sismicidade, Z , expostos na Tabela 1, correspondem aos valores das

acelerações sísmicas, a_g , da NBR 15421 (ABNT, 2006) divididos pela aceleração da gravidade g .

Os valores do subíndice topográfico e geotécnico, G , expostos na Tabela 2, correspondem aos valores dos fatores de amplificação sísmica do solo para períodos de 0,0s extraídos da NBR 15421 (ABNT, 2006).

Tabela 1 - Subíndices de sismicidade do método de Hirosawa adaptado ao Brasil

Zona sísmica	Valores de Z
Zona 0	0,025
Zona 1	0,050
Zona 2	0,100
Zona 3 e 4	0,150

Tabela 2 – Subíndices topográfico e geotécnico do método de Hirosawa adaptado ao Brasil

Classe do terreno	G	
	$Z \leq 0,100$	$Z = 0,150$
A	0,8	0,8
B	1,0	1,0
C	1,2	1,2
D	1,6	1,5
E	2,5	2,1

Os valores do subíndice de importância da edificação, U , expostos na Tabela 3, correspondem aos fatores de importância de utilização, I , expostos NBR 15421 (ABNT, 2006).

Tabela 3 – Sub-índices de importância da edificação do método de Hirosawa adaptado ao Brasil

Categoria de utilização	U
I	1,00
II	1,25
III	1,50

No processo de adaptação do método, o índice de solicitação sísmica, I_{s0} , corresponde ao coeficiente sísmico, C_s , da NBR 15421 (ABNT, 2006).

$$C_s = \frac{H}{W} \quad (\text{Equação 4})$$

Sendo H as forças horizontais na base da estrutura. Como a NBR 15421 (ABNT, 2006) limita o coeficiente sísmico, C_s , inferiormente e superiormente, estes limites também são impostos ao índice I_{s0} . O limite inferior, $I_{s0,inf}$ é igual a 0,01 e o limite superior, $I_{s0,sup}$ é determinado pela Equação 5.

$$I_{s0,sup} = \frac{0,33 \cdot G_s \cdot Z \cdot U}{T_a} \quad (\text{Equação 5})$$

Sendo T_a o período natural aproximado da estrutura determinado pela NBR 15421 (ABNT, 2006) e os valores do subíndice G_s , expostos na Tabela 4, correspondentes aos valores dos fatores de amplificação sísmica do solo para períodos de 1,0s extraídos da NBR 15421 (ABNT, 2006).

Tabela 4 – Sub-índices G_s do método de Hirosawa adaptado ao Brasil

Classe do terreno	G_s	
	$Z \leq 0,100$	$Z = 0,150$
A	0,8	0,8
B	1,0	1,0
C	1,7	1,7
D	2,4	2,2
E	3,5	3,4

5 O método de Hirosawa em um sistema com um grau de liberdade

O fundamento básico do primeiro nível de avaliação do método de Hirosawa é a comparação entre a resistência ao cisalhamento dos elementos verticais dos pavimentos da estrutura com as forças cortantes horizontais provenientes de sismos e agindo em cada pavimento. Com a finalidade de comprovar tal afirmação, aplica-se o método em um sistema com um grau de liberdade. Neste caso, para o cálculo do índice de desempenho sísmico, I_s , utiliza-se a Equação 1 sendo o subíndice E_0 é determinado pela Equação 3.

Adotando os valores de F_c e a_1 iguais a 1,0, como sugere o método de Hirosawa original, e atribuindo valores unitários aos sub-índices S_D e T_D , uma vez que estes são estimados qualitativamente e influenciam toda a estrutura, pois agem como redutor da resistência sísmica, tem-se:

$$\left(\frac{n+1}{n+i} \right) \cdot \left[\frac{f_c}{20} \cdot \frac{(\tau_{c1} \cdot A_{c1} + \tau_{c2} \cdot A_{c2})}{W} \right] \geq I_{s0} \quad (\text{Equação 6})$$

Para aplicação em um sistema com um grau de liberdade, o termo $[(n+1)/(n+i)]$ (também chamado por OTANI (2000) de índice de pavimento, ϕ) não é aplicado, uma vez que este é usado na distribuição da força cortante para os diversos pavimentos.

$$\left[\frac{f_c}{20} \cdot \frac{(\tau_{c1} \cdot A_{c1} + \tau_{c2} \cdot A_{c2})}{W} \right] \geq I_{s0} \quad (\text{Equação 7})$$

O termo $f_c/20$ pode ser excluído da equação por se tratar apenas de um fator de redução da resistência.

$$\frac{\sum(\tau_{ci} \cdot A_{ci})}{W} \geq I_{s0} \quad (\text{Equação 8})$$

Como o índice de solicitação sísmica, I_{s0} , corresponde ao coeficiente sísmico, C_s , da NBR 15421 (ABNT, 2006) tem-se:

$$V_{Rd,i} \geq V_{Sd,i} \quad (\text{Equação 9})$$

Sendo $V_{Rd,i}$ a resistência ao cisalhamento dos elementos verticais e $V_{Sd,i}$ as forças cortantes horizontais provenientes do sismo.

5.1 Exemplo de aplicação

O pórtico da figura 2 tem seção constante (pilares e viga) de 20x40cm e executado em terreno, classificado segundo a NBR 15421 (ABNT, 2006), como classe C e zona sísmica 2. O concreto possui f_{ck} de 20 MPa.

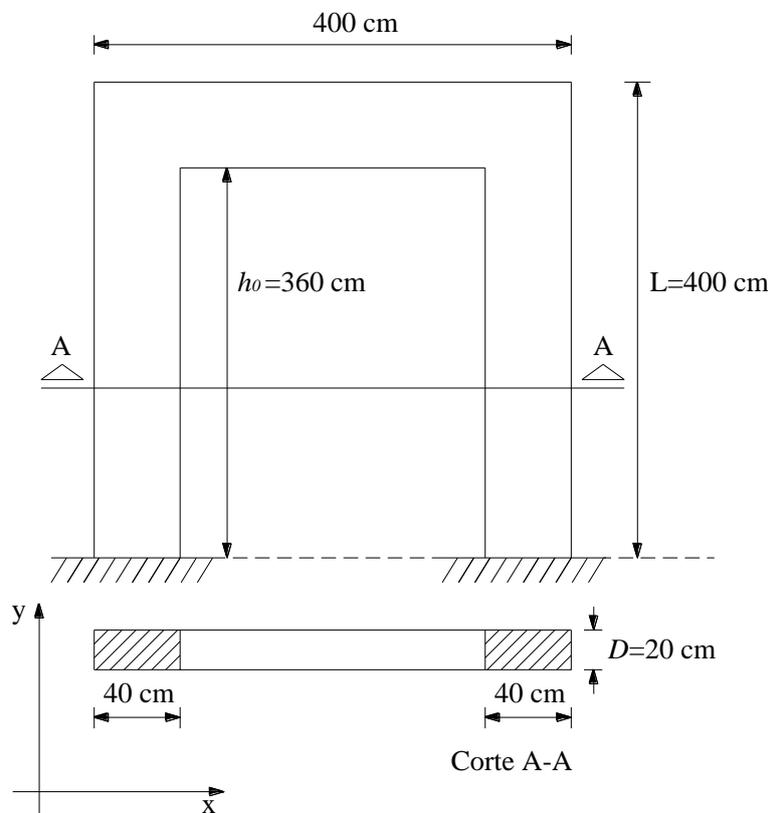


Figura 2 – Pórtico em concreto armado

Para a estrutura ser considerada segura, no primeiro nível de avaliação do método de Hirosawa, é necessário que:

$$V_{Rd,i} \geq V_{Sd,i} \Leftrightarrow I_s \geq I_{s0} \quad (\text{Equação 10})$$

A relação entre as alturas livres e a base da seção dos pilares é maior que 6, desta forma, o somatório de suas seções transversais correspondem a A_{c2} . S_D e T_D assumem, neste exemplo, valores unitários devido à regularidade estrutural do pórtico e a consideração de ausência de deterioração. Portanto, o índice de desempenho sísmico I_s é dado por:

$$I_s = \left[\frac{f_c}{20} \cdot \frac{(\tau_2 \cdot A_{c2})}{W} \right] \quad (\text{Equação 11})$$

Sendo o peso da estrutura W igual a 22,4 kN, e adotando o valor de τ_{c2} igual a 0,7 MPa (segundo as recomendações do método de Hirosawa original) obtém-se $I_s=5$.

Para o índice de solitação sísmica, I_{s0} , adota-se $E_s=0,83$; $Z=0,100$; $G=1,2$ e $U=1,0$, obtendo-se I_{s0} igual a 0,1. O passo seguinte é a verificação dos limites de I_{s0} . O limite inferior de I_{s0} é 0,01 e o limite superior é calculado através da Equação 5 e corresponde a 0,35. Na verificação dos limites inferior e superior de I_{s0} , tem-se $I_{s0,inf} < I_{s0} < I_{s0,sup}$. A estrutura é considerada segura, uma vez que $I_s > I_{s0}$.

6 Conclusão

O estudo do método de Hirosawa adaptado à realidade brasileira em uma estrutura com um grau de liberdade comprova a base do método que é a comparação direta entre a resistência ao cisalhamento dos elementos verticais, $V_{Rd,i}$, e as forças sísmicas horizontais, $S_{Rd,i}$. O método de avaliação adaptado utilizado neste trabalho pode ser também aplicado na avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios em estruturas de concreto armado de até oito pavimentos (MIRANDA, 2010), servindo como análise inicial do comportamento das estruturas de concreto armado brasileiras frente aos abalos sísmicos.

7 Referências

AMERICAN RED CROSS MULTI-DISCIPLINARY TEAM. **Report on the 2010 Chilean earthquake and tsunami response: U.S. Geological Survey**. Open-File Report 2011-1053, 68 p. [<http://pubs.usgs.gov/of/2011/1053/>]. 2011.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15421: projetos de estruturas resistentes a sismos: procedimento**: Rio de Janeiro, 2006.

BERNARDINI, A. “**La Vulnerabilità Degli Edifici: Valutazione a Scala Nazionale Della Vulnerabilità Sismica Degli Edifici Ordinari**”, Research Report, CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Rome, Italy. 2000.

BERROCAL, J. *et al.* **Sismicidade do Brasil**. Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, Brasil, 1984.

CALVI, G.M. **“A Displacement-Based Approach for Vulnerability Evaluation of Classes of Buildings”**, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 3, No. 3, pp. 411-438. 1999.

HIROSAWA, M. **Retrofitting and Restoration of Buildings in Japan**. International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Lecture Note of Seminar Course, 1992.

LANTADA, N., et al. **“Risk Scenarios for Barcelona, Spain”**, Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, Paper No. 423. 2004.

MIRANDA, P. S. T. **Avaliação da Vulnerabilidade Sísmica na Realidade Predial Brasileira**. Fortaleza. 2010.

ONU – Organização das Nações Unidas, **Report of the United Nations in Haiti 2010 - Situation, Challenges and Outlook**. United Nations. 66 p. 2010. [www.onu-haiti.org].

OTANI, S., **Seismic Vulnerability Assessment Methods for Buildings in Japan**. Earthquake Engineering and Engineering Seismology. Volume 2, Number 2, September 2000, pp. 47-56.

ROSSETO, T.; ELNASHAI, A. **“Derivation of Vulnerability Functions for European-Type RC Structures Based on Observational Data”**, Engineering Structures, Vol. 25, No. 10, pp. 1241-1263. 2003.

SANTOS, S. H. C.; LIMA, S. S. **Elements for a Future Brazilian Standard for Seismic Resistance of Concrete Structures of Building**. Ibracon Structural Journal, Number 1, p. 47-62. 2005.