

## Elements for a future brazilian standard for seismic resistance of concrete structures of buildings

Subsídios para uma futura normalização brasileira para resistência anti-Sísmica das estruturas de concreto de edifícios

S. H. C. SANTOS <sup>a</sup>

sergiohampshire@poli.ufrj.br

S. S. LIMA <sup>a</sup>

silvio@poli.ufrj.br

### Abstract

Due to its low seismicity, the technical tradition in Brazil is to not consider seismic forces in the design of civil structures. Only for some special projects, seismic effects have been considered. Nevertheless, considering the data already available, it can be shown that seismic effects in the structures cannot be disregarded "a priori" in Brazil. Some elements for a future seismic standardization for concrete structures of buildings in Brazil are presented herein. A comparative study between the seismic effects with wind ones, for a typical structure in the Southeast Region is presented, showing that in certain situations, the seismic forces can be the most critical ones. © 2005 IBRACON. All rights reserved.

Keywords: standardization; seismic analysis; concrete structures.

### Resumo

Devido à sua baixa sismicidade, a tradição técnica no Brasil, tem sido não incluir forças sísmicas nos projetos de estruturas civis. Somente em alguns projetos especiais estes efeitos têm sido considerados. No entanto, considerando-se os dados hoje disponíveis, constata-se que os efeitos sísmicos nas estruturas não podem ser descartados "a priori" no Brasil. Apresentam-se aqui alguns subsídios para uma futura normalização sísmica de estruturas de concreto de edifícios no Brasil. É feita uma comparação dos efeitos sísmicos com os de vento, para uma estrutura típica na Região Sudeste, mostrando que, em certas situações, as forças sísmicas podem ser as críticas. © 2005 IBRACON. All rights reserved.

Palavras-chave: normalização; análise sísmica; estruturas de concreto.

---

<sup>a</sup> D.Sc., Professor Adjunto da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro

## 1 Introdução

Devido à sua baixa sismicidade, a tradição técnica no Brasil, refletida em suas normas de projeto, tem sido não incluir forças sísmicas nos projetos de estruturas civis. Somente em projetos especiais, de grande importância social e econômica, como os de usinas nucleares, estes efeitos têm sido considerados.

No entanto, considerando-se os dados hoje disponíveis, pode-se constatar que os efeitos sísmicos nas estruturas não podem ser descartados "a priori" no Brasil. É necessário se definir para quais estruturas as cargas sísmicas devem ser consideradas e com que valores. Considere-se também a necessidade da integração técnica e econômica do Brasil com seus vizinhos, para a qual a definição de uma normalização sísmica compatível com as destes países é muito oportuna.

Apresentam-se aqui alguns subsídios para uma futura normalização sísmica de estruturas de concreto de edifícios no Brasil. Comparam-se os efeitos sísmicos com os de vento, para uma estrutura típica na Região Sudeste, mostrando que, em certas situações, as forças sísmicas podem ser as mais críticas.

## 2 Sismicidade no Brasil

O território Brasileiro apresenta baixa sismicidade, típica de uma região intraplacas. O estudo da sismicidade no Brasil, com base científica, começou nos anos 70. Desde esta década, dados sismológicos começaram a ser coletados, a partir de uma importante rede sismológica implantada, que está no momento em operação contínua.

Um estudo completo da sismicidade no território brasileiro não foi, no entanto, ainda elaborado. Um estudo de risco sísmico, a nível mundial, foi realizado pelo GFZ-Potsdam, e apresentado no "Global Seismic Hazard Map" [1]. Pode ser visto neste mapa, que o território brasileiro apresenta uma sismicidade muito baixa, com acelerações horizontais características normalmente inferiores a  $0,5 \text{ m/s}^2$ . Exceções a serem observadas são alguns estados do Nordeste, devido a sua posição com relação à falha do Atlântico Central, e a parte oeste das Regiões Norte e Centro-Oeste, devido à sua proximidade com a Cordilheira dos Andes.

Um estudo de Falconi [2] analisa normas de projeto de seis países sul-americanos (o Brasil não está incluído neste estudo). A partir desta análise se conclui, tendo em vista inclusive a continuidade geográfica do Brasil com seus vizinhos, que uma normalização anti-sísmica para o país é hoje indispensável.

Com base nas informações disponíveis, apresenta-se na Figura 1, uma proposta para acelerações horizontais características a serem consideradas no Brasil. Estas acelerações correspondem a uma probabilidade nominal de

90% de não serem excedidas em 50 anos (ou seja, a um período de retorno de referência de 475 anos).

## 3 Base Teórica para a Definição das Acelerações Características

A justificativa teórica para a proposta de acelerações horizontais mostrada na Figura 1, se baseia no estudo apresentado pelos autores [3] para a Região Sudeste. Considera-se que as conclusões obtidas para esta região possam ser estendidas para as demais regiões brasileiras.

Estudos detalhados da sismicidade na Região Sudeste foram resumidos por Almeida [4]. A seguinte expressão de recorrência sísmica, válida para esta região, é retirada desta referência:

$$\log(\Sigma N) = 4,44 - 1,28 M \quad (1)$$

$\Sigma N$  (frequência cumulativa anual) é o número total de terremotos com magnitude igual ou superior à magnitude  $M$  ("body-wave magnitude"  $m_b$ ), esperados em um intervalo de um ano na Região Sudeste.

Para a definição de uma função probabilística de acelerações, foi considerado que esta distribuição é uniforme, podendo um sismo com uma certa magnitude ocorrer com igual probabilidade em qualquer ponto em uma circunferência de área equivalente, com raio igual a 400km, traçada em torno de um sítio a ser analisado na Região Sudeste.

É utilizada a função de atenuação proposta por Toro et al. [5] para o Centro e Leste dos Estados Unidos (CEUS). Admite-se que esta região apresente condições de atenuação semelhantes às do Sudeste do Brasil. Os resultados obtidos são apresentados graficamente na Figura 2, que expressa a equação ( $a_h$  em g):

$$\log_{10} T_M = 6,654 + 2,02 \log_{10} a_h \quad (2)$$

$T_M$  é o período de retorno de referência (em anos) de um terremoto com magnitude pelo menos igual a  $M$ , e é igual ao inverso da variável ( $\Sigma N$ ) definida na equação (1).

Na definição da aceleração horizontal característica, a consideração usual de que esta tenha uma probabilidade de 10% de ser excedida em 50 anos, correspondendo a  $T_M$  igual a 475 anos, levaria a uma aceleração característica de:

$$a_h = 0,011 \text{ g}$$

O valor característico proposto ( $a_h = 0,05 \text{ g}$ ), para estruturas usuais no Sudeste do Brasil, está associado às características específicas das excitações sísmicas, conforme mostram as Análises de Confiabilidade a seguir apresentadas e deve ser entendido como uma proposta em discussão.

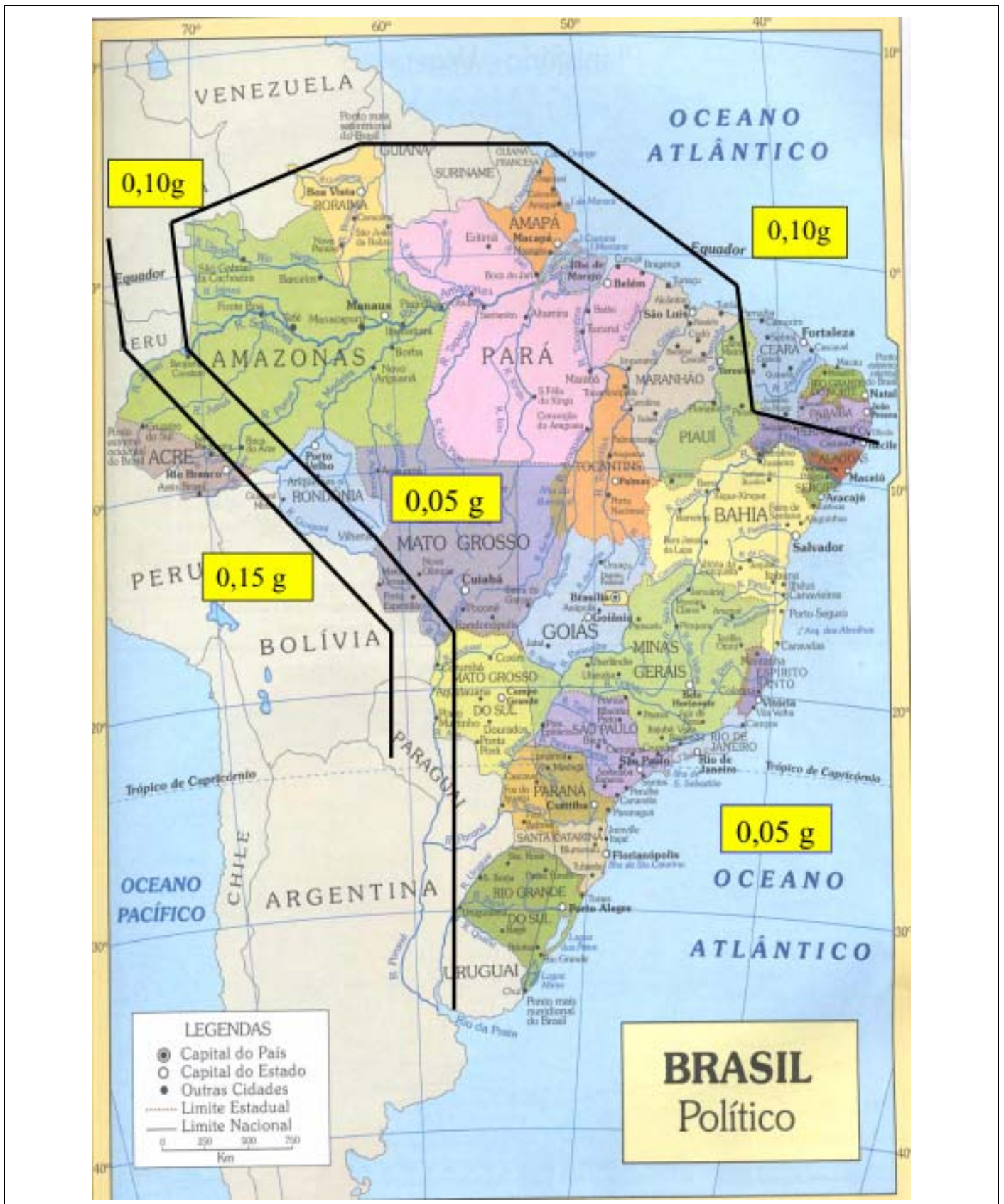


Figura 1 – Acelerações Horizontais de projeto.

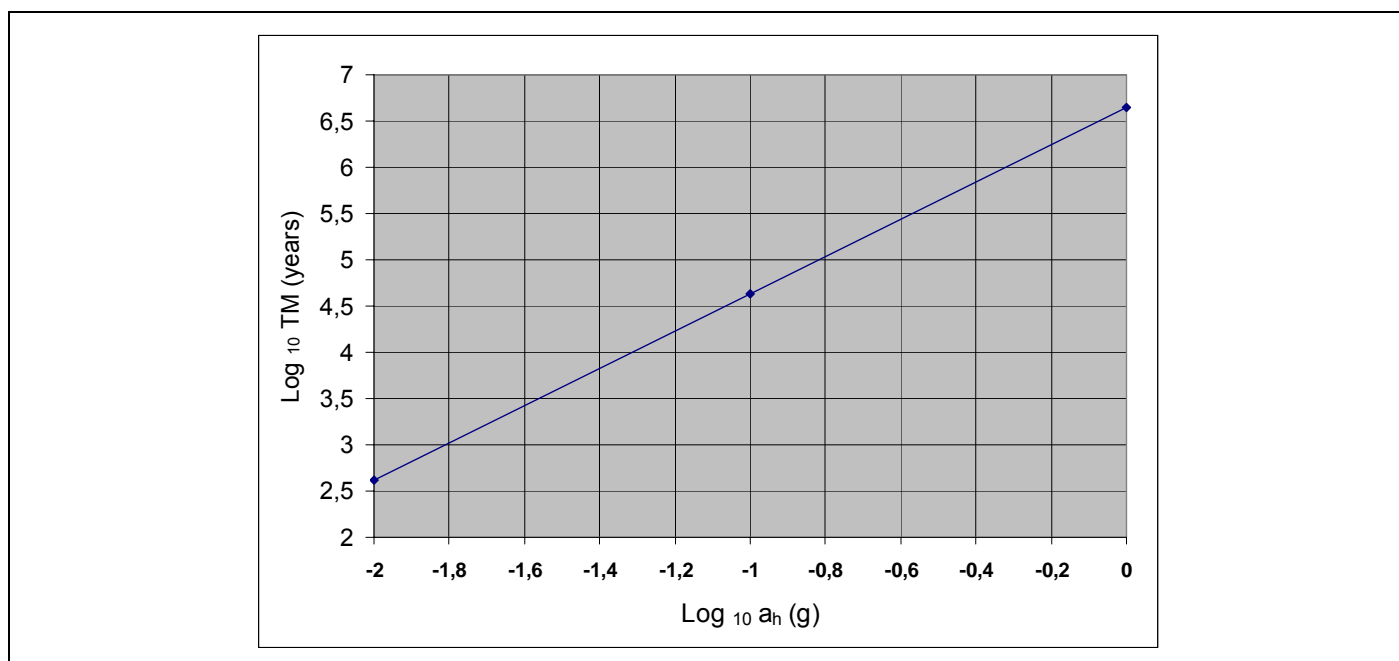


Figura 2 – Período de Recorrência ( $T_M$ ) das acelerações horizontais ( $a_h$ ).

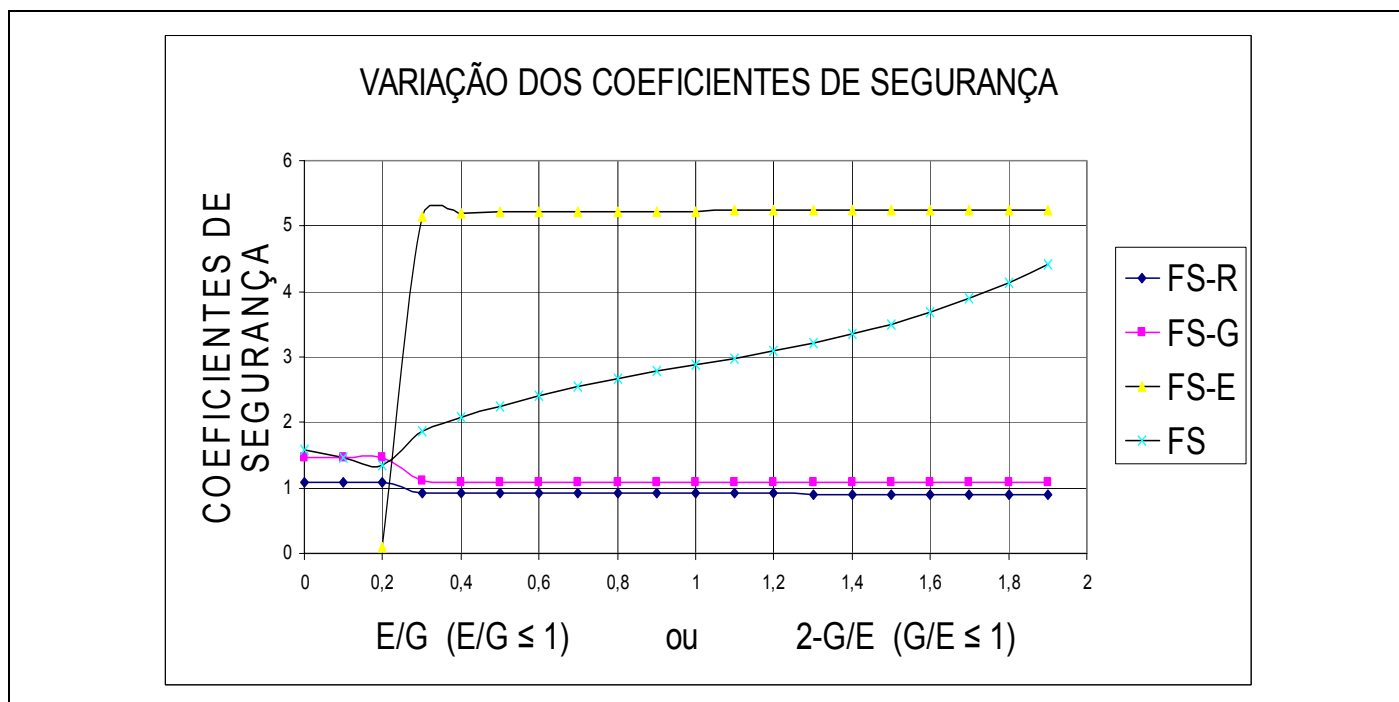


Figura 3 - Variação dos coeficientes de segurança com a relação carga sísmica / carga permanente.

#### 4 Análise dos Coeficientes de Segurança

Para a definição dos coeficientes de segurança, é desenvolvida uma Análise de Confiabilidade ("Reliability Analysis"). Este tipo de análise oferece uma alternativa aos processos convencionais de cálculo, considerando analiticamente as incertezas presentes na avaliação das variáveis de projeto. Os conceitos básicos de Análise de Confiabilidade aqui utilizados foram resumidos em [6].

Não existe normalização brasileira regulando a verificação dos níveis de confiabilidade requeridos para as estruturas.

Apenas como parâmetro de referência para as análises a serem apresentadas, adota-se um coeficiente de

confiabilidade de  $\beta=3,8$ , com base anual, correspondendo a uma probabilidade de falha, de  $7,2 \times 10^{-5}$  por ano.

A análise foi desenvolvida de acordo com os conceitos do "JCSS 2001" [7], para uma seção padrão de concreto armado, submetida à flexão simples. Foi definido um modelo probabilístico, considerando a distribuição estatística das variáveis de projeto envolvidas. Foram analisadas todas as relações possíveis entre cargas sísmicas

e cargas de caráter permanente (predominantes em estruturas prediais). A análise de confiabilidade foi feita com o programa COMREL [8].

Para cada uma das relações entre cargas sísmicas e permanentes é estudada a situação de "ponto de projeto", em que o índice de confiabilidade é o requerido, e há equilíbrio entre as variáveis envolvidas, em uma situação de estado limite último. São então avaliados os valores correspondentes dos coeficientes de majoração das cargas e de minoração das resistências.

A Figura 3 apresenta a variação destes coeficientes. Os coeficientes de minoração da resistência do aço (FS-R) e de majoração das cargas permanentes (FS-G) tendem claramente para 1,00, enquanto que o coeficiente de majoração das cargas sísmicas (FS-E) tende para 5,25. FS é o fator de segurança global. Fica claro que a aplicação dos coeficientes de majoração de cargas ( $\gamma_f = 1,0$ ) da NBR8681 [9], sobre as cargas características sísmicas, não atenderia às condições probabilísticas de segurança.

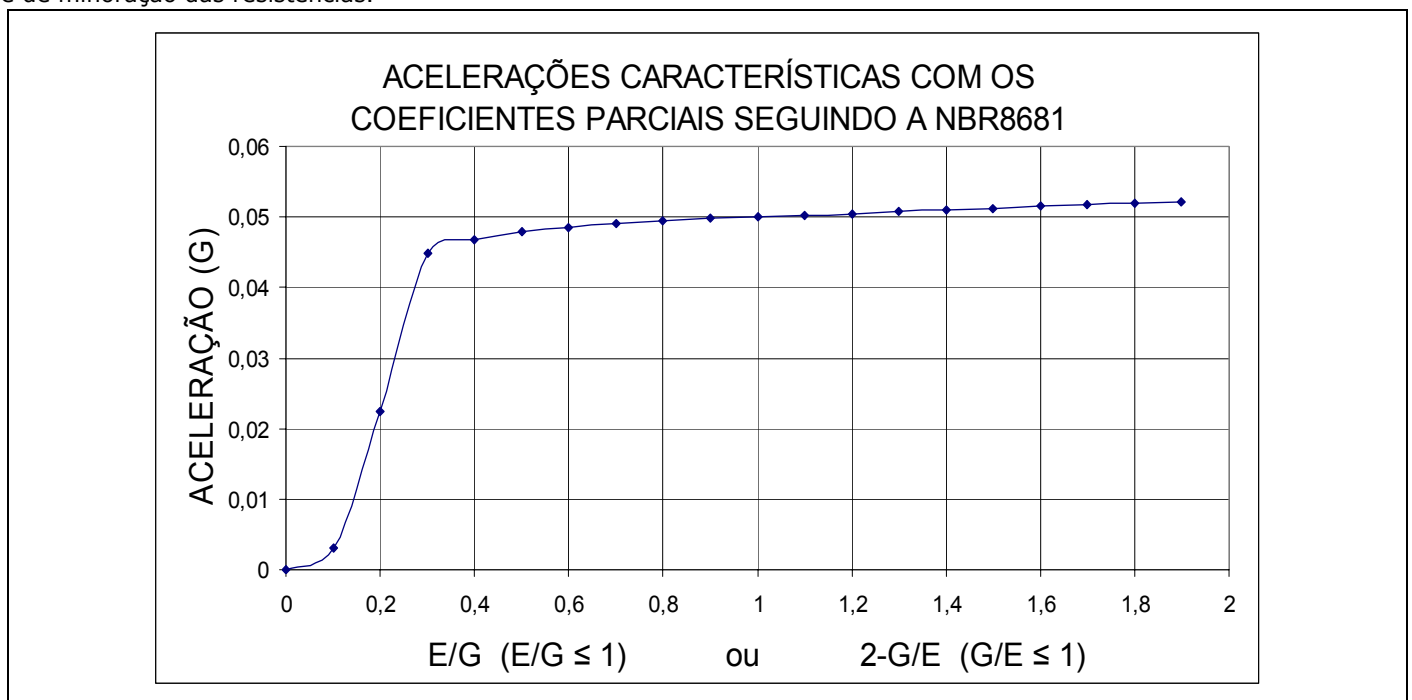


Figura 4 – Variação da aceleração de cálculo a adotar, com os outros coeficientes de acordo com a NBR8681.

Na Figura 4 é apresentada uma outra análise, onde os coeficientes FS-R e FS-G são fixados em 1,15 e 1,20, respectivamente, de acordo com a NBR 8681 [9], e é determinado o valor da aceleração horizontal resultante, que tende para  $a_{hd} = 0,045g$ .

Da análise da Figura 4 conclui-se que, para a Região Sudeste, a consideração da aceleração de projeto definida em  $a_h = 0,05g$  (da Figura 1), conduz a um valor adequado para a aceleração de cálculo:

$$a_g = 0,05g$$

Para o estudo comparativo realizado neste trabalho, entre forças horizontais causadas por vento e sismo em edifícios, adota-se a norma americana UBC-97 [10], descrita resumidamente no que se segue

## 5 Disposição do UBC-97 para o Projeto Anti-Sísmico

Apresenta-se a seguir um resumo de alguns itens relevantes do UBC-97, que poderá eventualmente servir como base para uma futura normalização sísmica brasileira. Outra norma internacional poderá vir a ser tomada como base, a partir do que vier a ser discutido em nosso meio técnico.

- A força horizontal total (V) poderá ser avaliada pelo "Método Estático" (Seção 1630.2) do UBC-97:

$$0,11 C_a I W \leq V = \frac{C_v I W}{R T} \leq \frac{2,5 C_a I W}{R} \quad (3)$$

Alternativamente, ou em situações especiais, poderá ser aplicado o "Método Dinâmico", conforme Seção 1631 do UBC-97.

- O fator de importância (I) pode ser tomado como  $I=1,00$  para prédios usuais (residenciais ou comerciais). Para outros casos, ver Tabela 16-K do UBC-97.
- O fator de redução da força sísmica (R), função da utilidade da estrutura, pode ser tomado como  $R=3,5$ , aplicável a pórticos de concreto armado detalhados de forma usual. Para outros casos, ver Tabela 16-N do UBC-97.
- Em edifícios residenciais e comerciais, W (peso total do edifício para sismo) corresponde somente às cargas permanentes. Para outros casos, ver item 1630.1.1 do UBC-97.
- O primeiro período próprio pode ser estimado pela expressão abaixo, aplicável para pórticos de concreto armado. Para outros casos, ver Seção 1630.2.2 do UBC-97.

$$T = 0,0731 (h_n)^{0,7} \quad (4)$$

$h_n$  = altura total do prédio (m)

- Os fatores sísmicos  $C_a$  e  $C_v$  são obtidos com os parâmetros adimensionais da Tabela 1 abaixo, em função do solo de fundação, multiplicando-os pela aceleração característica de projeto  $a_g$ . Distribuição da força horizontal total  $V$  para cada pavimento do prédio:

$$F_i = \frac{(V - F_T) w_i h_i}{\sum w_i h} \quad (5)$$

onde  $F_i$  é a força a aplicar ao pavimento de ordem  $i$ ,  $w_i$  é a parcela de  $W$  correspondente a este pavimento,  $h_i$  é a altura com relação à base deste pavimento  $i$  e  $F_T$  é uma força adicional a ser aplicada ao pavimento mais alto do prédio, dada por:

$$F_T = 0,07 T V \leq 0,25 V \quad (6)$$

ou

$$F_T = 0 \text{ se } T \leq 0,7s \quad (7)$$

## 6 Comparação entre os Efeitos de Vento e de Sismos

Um estudo comparativo foi apresentado em [3], para os efeitos globais de sismo e de vento, em prédios comerciais típicos, com número de pavimentos variando entre 1 e 50, localizados na cidade do Rio de Janeiro.

Os dados considerados foram:

- Carga permanente nos pisos: 8 kN/m<sup>2</sup>
  - Área em planta de cada piso: 20m x 20m = 400m<sup>2</sup>
  - Pé-direito de cada pavimento = 3m.
  - Cargas sísmicas: de acordo com o descrito acima, com acelerações características iguais a 0,05g e solo rígido (tipo Sd).
  - Cargas de vento: de acordo com a NBR-6123 [11], com velocidade básica do vento igual a 35 m/s. Fatores  $S_1$  e  $S_3$  (topográfico e probabilístico) tomados iguais a 1,00.
- Os resultados das análises são apresentados nas Figuras 5 a 7.

Tabela 1 – Definição dos fatores sísmicos  $C_a$  e  $C_v$ .

Tipo de Solo	Descrição	Vs (Velocidade de propagação de ondas de cisalhamento)	SPT(indicativo), golpes/30cm	$C_a/a_g$	$C_v/a_g$
Sa	Rocha Dura	$V_s > 1500$ m/s	-	0,80	0,80
Sb	Rocha Média	$760$ m/s < $V_s$ < $1500$ m/s	-	1,07	1,07
Sc	Rocha alterada ou solo muito rígido	$360$ m/s < $V_s$ < $760$ m/s	>50	1,20	1,73
Sd	Solo rígido	$180$ m/s < $V_s$ < $360$ m/s	15 a 50	1,60	2,40
Se	Solo mole	$V_s < 180$ m/s	< 15	2,53	3,45

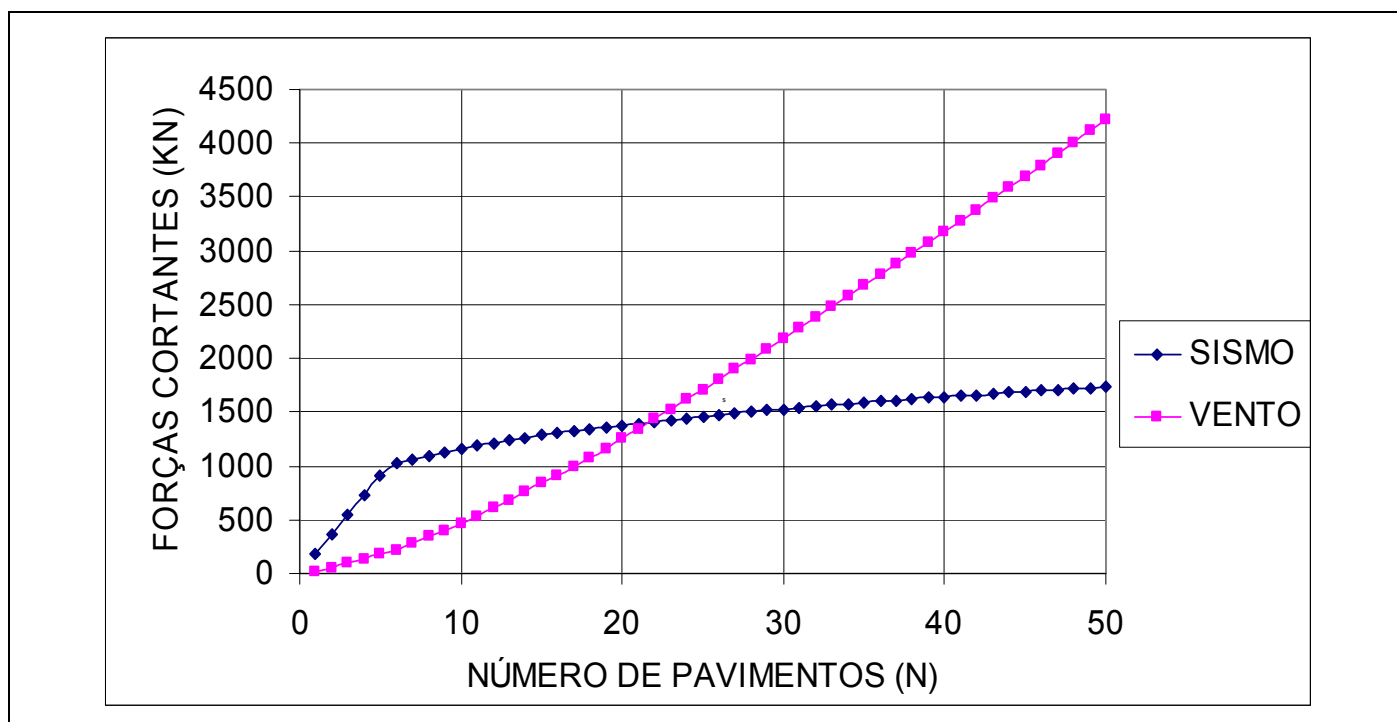


Figura 5 – Comparação entre forças horizontais totais, globais de cálculo.

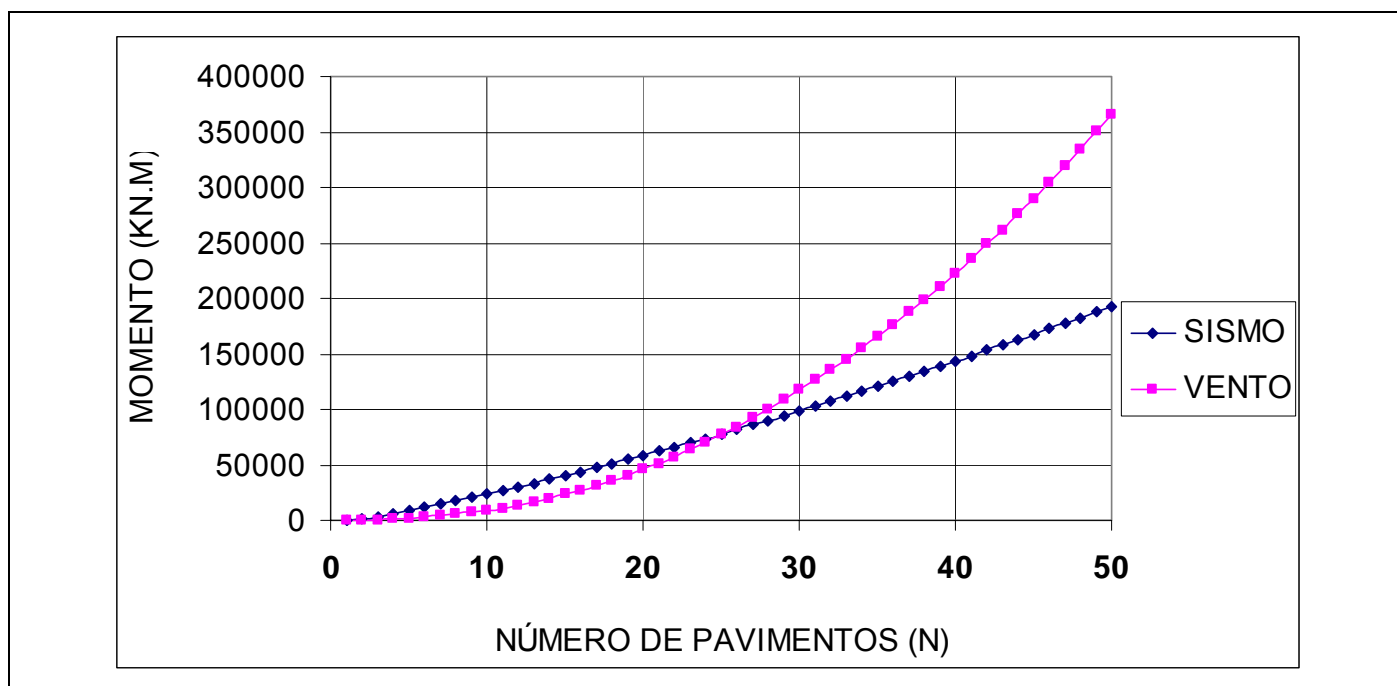


Figura 6 – Comparação entre momentos nas bases, globais de cálculo.

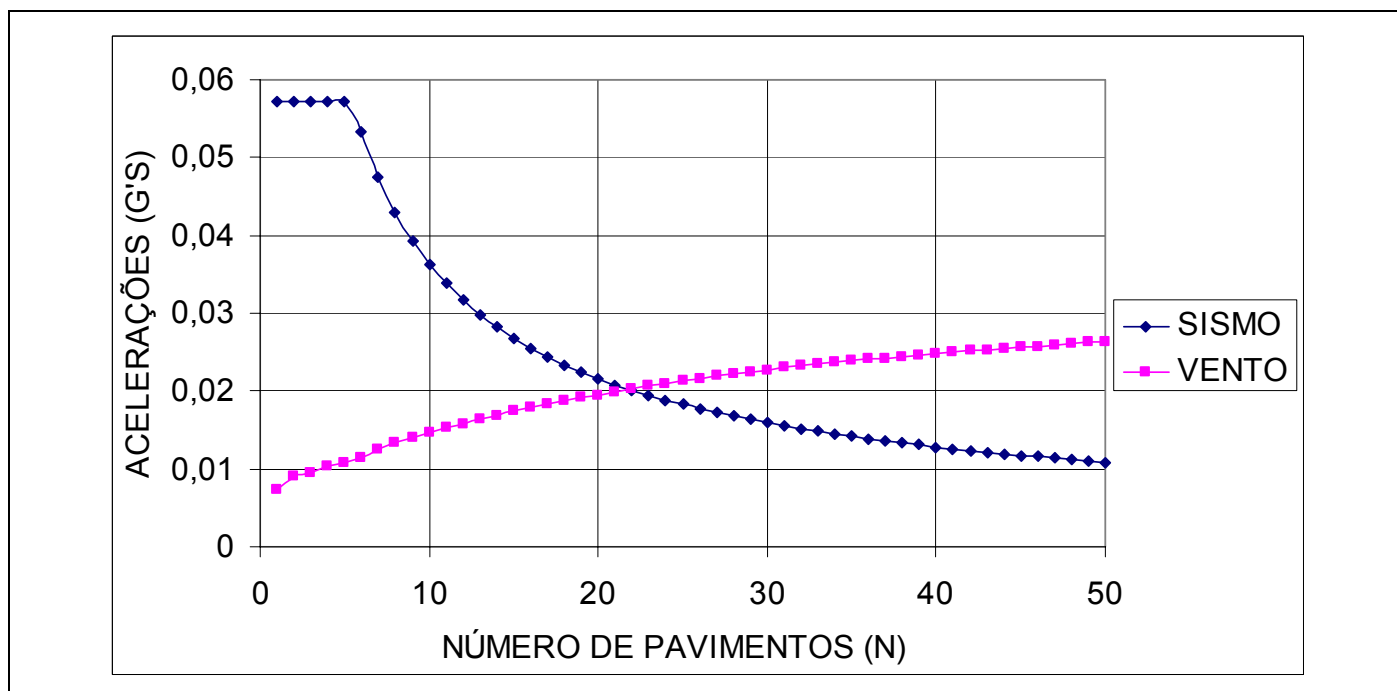


Figura 7 – Comparação entre acelerações horizontais médias de cálculo.

As forças horizontais totais de cálculo (ou seja, as cargas de vento e sismo estão afetadas pelo fator  $\gamma_f = 1,4$  e  $1,0$  respectivamente) nas bases dos prédios são comparadas na Figura 5. Os momentos globais de cálculo relativos às bases são comparados na Figura 6. As forças sísmicas são maiores do que as de vento para prédios de até 21 pavimentos, e os momentos sísmicos maiores para prédios de até 25 pavimentos.

Uma comparação entre as acelerações horizontais médias para os dois carregamentos é apresentada na Figura 7.

Estas acelerações são obtidas dividindo-se as forças horizontais totais pelo peso total dos prédios. As acelerações horizontais médias sísmicas são maiores que as de vento para prédios de até 21 pavimentos.

## 7 Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

Apresentaram-se neste artigo alguns subsídios para uma futura normalização brasileira para o projeto anti-sísmico de estruturas de concreto.

A comparação apresentada entre as forças de sismo e de vento em prédios comerciais típicos é indicativa e particular para os valores numéricos considerados, mas mostra que, em certos casos, as forças sísmicas podem ser as mais críticas no projeto.

Deve-se observar que o período de retorno a ser considerado para os sismos de projeto, os respectivos valores característicos das acelerações de projeto e as probabilidades de ruína a serem aceitas em condições sísmicas, são pontos colocados para discussão entre a comunidade técnica brasileira.

Uma possibilidade a ser estudada é a definição de uma "Zona Sísmica Zero" no Brasil, em que, através de uma simples comparação com os efeitos de vento e com os decorrentes das imperfeições globais, de acordo com o item 11.3.3.4.1 da NBR 6118 [12], dispensaria a consideração dos sismos.

Outros estudos de Confiabilidade poderão ser desenvolvidos no futuro, considerando, por exemplo, o cisalhamento, a flexão composta com compressão, etc., assim como considerando outros possíveis coeficientes pré-definidos de confiabilidade.

## 8 Referencias Bibliográficas

- [1] - GeoForschungsZentrum-Potsdam, Global Seismic Hazard Map. In: [www.gfz-potsdam.de/pb5/pb53/projects/en/gshap/menue\\_gshap\\_e.html](http://www.gfz-potsdam.de/pb5/pb53/projects/en/gshap/menue_gshap_e.html). (1999).
- [2] - Falconi RA, Espectros Sísmicos de Riesgo Uniforme para Verificar Desempeño Estructural en Países Latinoamericanos, XI Seminario Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, Mendoza, Argentina, 2003.
- [3] - Santos SHC, Souza Lima, S, Estudo da Zonificação Sísmica Brasileira Integrada em um Contexto Sul-Americano, XVIII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, Buenos Aires, 2004.
- [4] - Almeida, AAD. Análise Probabilística de Segurança Sísmica de Sistemas e Componentes Estruturais, Tese (doutorado), PUC/Rio de Janeiro; 2002.
- [5] - Toro GR, Abrahamson NA, Schneider JF, - Model of Strong Ground Motions from Earthquakes in Central and Eastern North America: Best Estimates and Uncertainties. *Seismological Research Letters* 68; 1997; 41-57.
- [6] - Santos SHC, Éboli CR, Análise de um Pórtico de Concreto Armado Utilizando os Conceitos de Confiabilidade Estrutural, 46º Congresso Brasileiro de Concreto, Florianópolis, 2004.
- [7] - Joint Committee on Structural Safety (JCSS), Probabilistic Model Code, 2001.
- [8] - Reliability Consulting Programs (RCP GmbH). COMREL & SYSREL Users Manual - DEMO Version, 1998.
- [9] - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 8681 - Ações e segurança nas estruturas - Procedimento, Rio de Janeiro, 2003.
- [10] - International Council of Building Officials (ICBO). Uniform Building Code (UBC97), Whittier, 1997.
- [11] - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 6123 - Forças devidas ao vento em estruturas, Rio de Janeiro, 1988.
- [12] - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento, Rio de Janeiro, 2004.