

Análise Sísmica de uma Ponte Considerando a Proposta de Revisão da NBR 7187

*Sergio Hampshire de C. Santos¹
Silvio de Souza Lima²
Rafael Costa da Hora³*

Resumo

Na proposta de revisão da NBR 7187 – Projeto de Pontes de Concreto Armado e de Concreto Protendido – estão sendo apresentados os requisitos mínimos de resistência sísmica para as pontes brasileiras. Tais requisitos, complementam os apresentados pela NBR 15421 – Projeto de Estruturas Resistentes a Sismo. Neste artigo é realizada a análise de uma ponte no Nordeste brasileiro, considerando a solicitação sísmica definida na referida proposta. A análise é realizada com a utilização de programa para análise de estruturas bastante utilizado no meio técnico brasileiro. Com isto pretende-se mostrar a metodologia da análise e possível impacto no projeto de novas pontes.

Palavras-chave: Análise sísmica, pontes.

1 Introdução

Quando da ação sísmica os pilares representam a parte mais frágil de uma ponte, enquanto que a superestrutura experimenta poucos danos. No geral, o cenário mais desfavorável para a superestrutura é a perda de apoio conforme mostrado na Figura 1. Por essa razão neste presente trabalho apenas as forças nos pilares serão objeto de estudo.



Figura 1 – Falha em apoio de ponte.

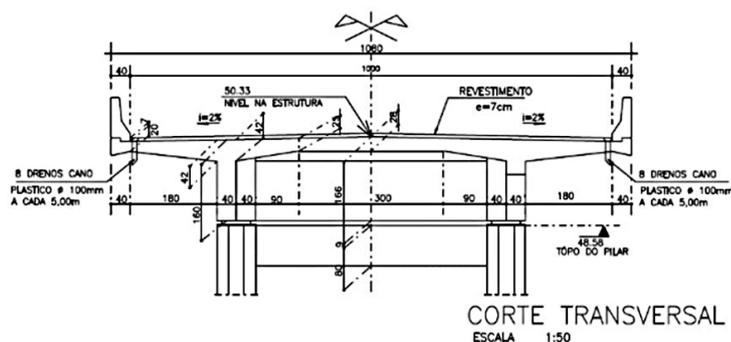


Figura 2 – Corte transversal.

1 Professor Titular da Escola Politécnica da UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, sergiohampshire@poli.ufrj.br

2 Professor Titular da Escola Politécnica da UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, silvio@poli.ufrj.br

3 Mestrando do Programa de Projeto de Estruturas da Escola Politécnica da UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, rafaelcostadahora@poli.ufrj.br

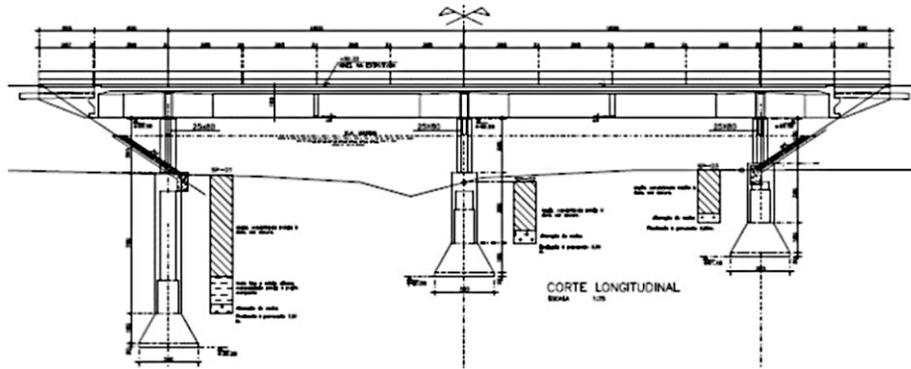


Figura 3 – Corte longitudinal.

A ponte analisada localiza-se no Estado do Ceará, nas proximidades da cidade de Sobral. É composta por dois vãos com continuidade, cada um com dezesseis metros de comprimento, apoiadas em três conjuntos pilar-tubulão de comprimento variável. Nas Figuras 2 e 3 são mostrados os cortes transversal e longitudinal, respectivamente. A superestrutura é composta por duas vigas de altura constante com a largura variando de 40 para 80 centímetros nos apoios. O concreto da superestrutura tem resistência $f_{ck} = 25$ MPa e o restante, meso e infraestrutura, $f_{ck} = 20$ MPa.

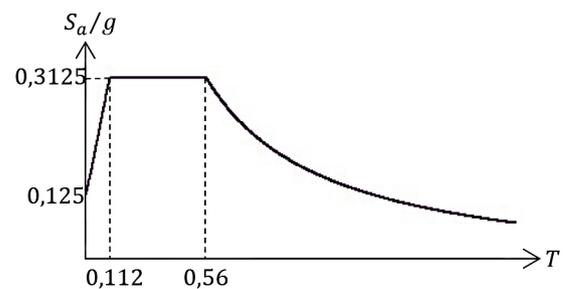


Figura 4 – Espectro de resposta utilizado.

2 A Ação Sísmica

A ação sísmica é caracterizada pelo espectro de projeto definido na NBR 15421, tendo sido adotada uma aceleração máxima de 0,125g. Esta aceleração é compatível com a aceleração sísmica na rocha definida na NBR 15421 para o Estado do Ceará ($a_g = 0,05g$) e para um terreno de Classe E. A Figura 4 mostra o espectro utilizado na presente análise.

Três categorias de utilização são definidas na revisão da NBR 7187, e seus respectivos fatores I de importância de utilização são mostrados na Tabela 1.

Na Tabela 2 estão os coeficientes R de modificação de resposta, utilizados para a determinação da resposta final a partir da resposta obtida elasticamente, que contemplam o comportamento não-linear das pontes durante o sismo.

Na análise deve ser considerado o peso efetivo da ponte, o qual deve contemplar as cargas permanentes atuantes, incluindo o peso do tabuleiro e metade do peso dos pilares, além de 20% da carga móvel para pontes rodoviárias e 30% para pontes ferroviárias. Com o peso efetivo é definida a massa a ser considerada na determinação das propriedades dinâmicas da ponte e no cálculo dos efeitos do sismo.

O detalhamento especial será definido na revisão da NBR 7187.

Tabela 1 – Categorias e fatores de importância.

Categoria	Utilização	Fator I
I	Pontes usuais, todas aquelas não classificadas como de categoria II e III.	1,0
II	Pontes essenciais, aquelas que devem estar operacionais após ocorrência do sismo de projeto, para veículos necessários às atividades ligadas a emergência, segurança e defesa.	1,25
III	Pontes críticas, aquelas que devem estar operacionais para todo tráfego após a ocorrência do sismo de projeto.	1,50

3 Modelo de Análise

Para a análise foi construído modelo 3D em elementos finitos, composto por elementos de barra para modelagem das longarinas, transversinas, pilares e tubulões e elementos de casca para modelagem da laje.

A ligação entre a longarina e a laje é realizada com a utilização de ligações rígidas, de forma a representar a ligação excêntrica existente entre esses elementos. A interação solo-estrutura é representada por meio da utilização de molas de comportamento linear, dispostas ao longo do comprimento dos tubulões, nas direções globais X e Y. Para fins de estudo utiliza-se o programa SOFiSTiK, versão 18. A Figura 5 mostra a representação 3D do modelo.

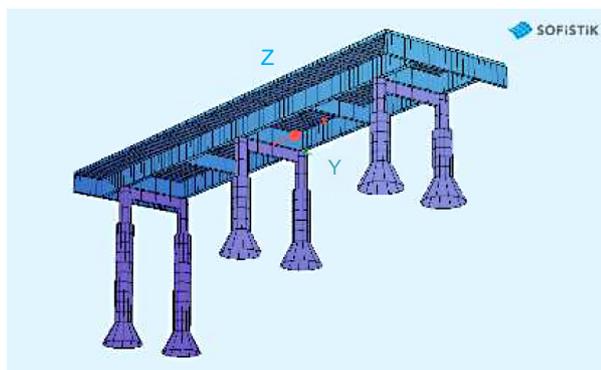


Figura 5 – Modelo SOFiSTiK.

Na análise utiliza-se o método espectral, conforme constante na proposta de revisão da norma. Na combinação das respostas modais é utilizado o método CQC, assim como para a combinação dos efeitos direcionais (sismos na direção X e Y). Importante é observar que a combinação ou superposição dos valores máximos de cada modo, para a obtenção de uma resposta global da estrutura, é sempre uma questão de discussão. Com certeza a simples soma dos valores máximos da resposta modal, leva a resultados poucos prováveis, pois tais máximos dificilmente ocorrerão no

mesmo instante. O método da Raiz Quadrada da Soma dos Quadrados (SRSS), muito utilizado, apresenta resultados aceitáveis, desde que as frequências dos modos estejam suficientemente afastadas, caso contrário os resultados são pouco conservadores. O método da Combinação Quadrática Completa (CQC) é o mais adequado, em especial quando da existência de frequências próximas. Por esse método, a resposta total máxima E_{max} de um determinado efeito é dada por:

$$E_{max} \cong \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \rho_{ij} E_{i,max} E_{j,max}} \quad (1)$$

$E_{i,max}$ e $E_{j,max}$ são os picos das respostas dos modos i e j e ρ_{ij} o coeficiente de correlação entre os respectivos modos, calculado por

$$\rho_{ij} = \frac{8 \sqrt{\xi_i \xi_j (\xi_i + r \xi_j)} r^{3/2}}{(1-r^2) + 4 \xi_i \xi_j r (1+r^2) + 4 (\xi_i^2 + \xi_j^2) r^2} \quad (2)$$

onde ξ_i e ξ_j representam os fatores de amortecimento dos modos i e j , respectivamente, e r é a razão entre as frequências dos modos j e i . Sendo o amortecimento modal constante e igual a ξ , o coeficiente de correlação se simplifica para:

$$\rho_{ij} = \frac{8 \xi^2 (1+r) r^{3/2}}{(1-r^2)^2 + 4 \xi^2 r (1+r)} \quad (3)$$

Entretanto, os valores obtidos, seja pelo CQC ou SRSS, são os máximos e não necessariamente simultâneos. Situações existem em que são necessários os valores simultâneos, por exemplo no caso de pilares sujeitos à flexão composta oblíqua. Considerando-se dois efeitos quaisquer, o valor mais provável do efeito R simultâneo com o efeito Γ , segundo Gupta (1990), é dado por:

Tabela 2 – Coeficientes R de modificação de resposta.

sistema sismo-resistente	ponte com detalhamento usual	ponte com detalhamento especial
estruturas em geral	1,5	2,5
estruturas rigidamente ligadas ao solo, como encontros e pontes com tabuleiro rigidamente ligados aos encontros	1,0	1,0
pontes em arco	1,2	2,0
fundações	1,0	1,0

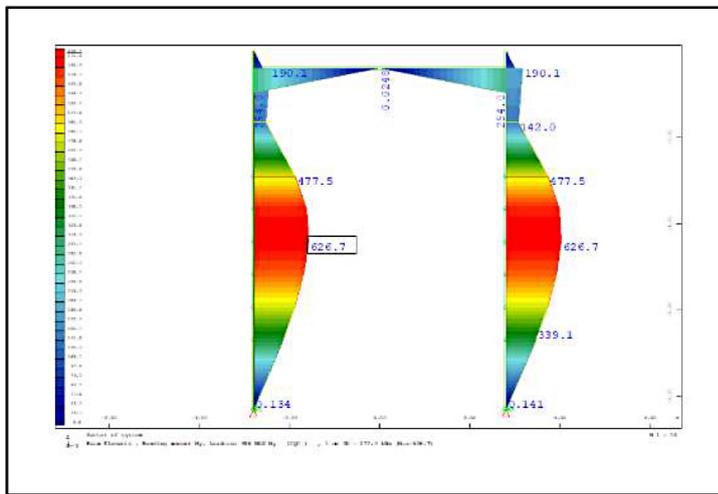


Figura 6 – Momento fletor, devido ao sismo, no conjunto pilar tubulão central, na direção transversal da ponte, resultado do SOFiSTiK.

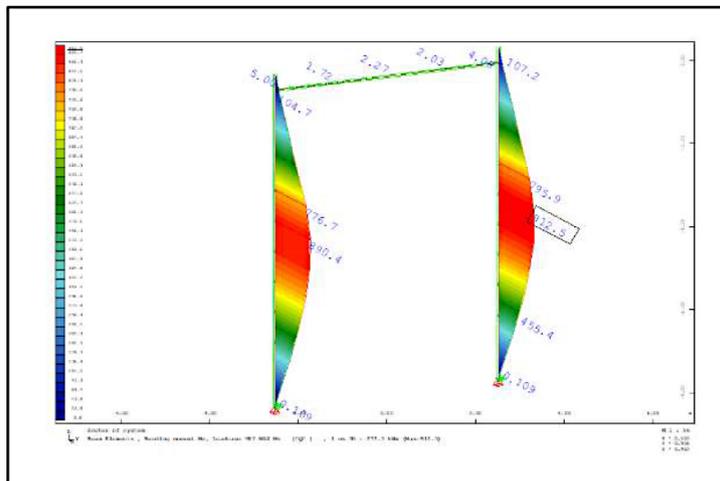


Figura 7 – Momento fletor, devido ao sismo, no conjunto pilar tubulão central, na direção longitudinal da ponte, resultado do SOFiSTiK.

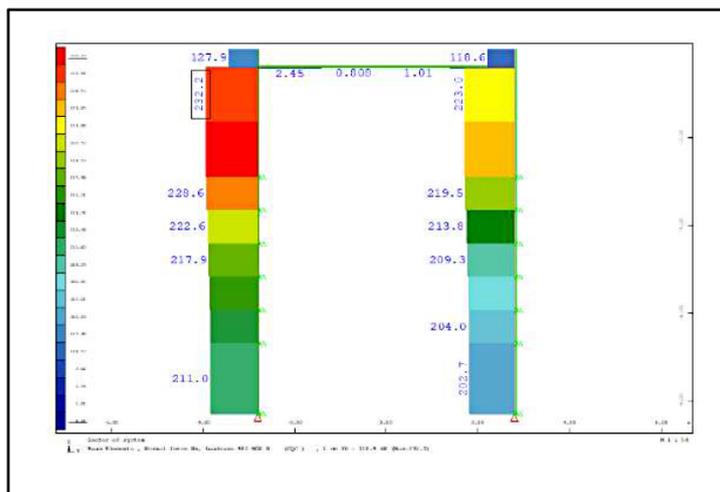


Figura 8 – Força normal, devido ao sismo, no conjunto pilar tubulão central, resultado do SOFiSTiK.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \rho_{ij} \Gamma_i R_j}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \rho_{ij} \Gamma_i \Gamma_j}} \quad (4)$$

Γ_i e R_i são os valores modais dos efeitos Γ e R , respectivamente. Ao contrário de outros programas de análise, o SOFiSTiK apresenta nos seus resultados os

valores máximos juntamente com os simultâneos, conforme será mostrado.

4 Resultados Obtidos

Nas Figuras 6, 7 e 8 são mostrados os diagramas

Tabela 3 – Solicitações simultâneas decorrente da ação sísmica.

Number	x [m]	LC	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mt [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
10003	0.000	902	242.6	85.11	- 269.03	- 3.28	188.52	- 34.23
		903	75.6	273.24	- 66.30	- 3.60	46.42	- 107.02
		904	- 241.2	- 66.96	270.55	3.08	- 189.59	27.13
		905	- 158.9	- 196.08	166.42	5.01	- 116.55	77.76
		906	241.2	66.90	- 270.54	- 3.08	189.59	- 27.11
		907	- 77.6	- 273.21	68.59	3.64	- 48.02	107.03
		902	242.6	85.11	- 269.03	- 3.28	- 147.77	- 140.61
	1.250	903	75.6	273.24	- 66.30	- 3.60	- 36.46	- 448.57
		904	- 241.2	- 66.96	270.55	3.08	148.59	110.83
		905	- 158.9	- 196.08	166.42	5.01	91.47	322.87
		906	- 241.3	- 67.40	270.54	3.08	148.60	110.96
		907	- 76.0	- 273.24	66.85	3.61	36.76	448.57

Tabela 4 – Solicitações de origem não sísmica.

N	Vy	Vz	Mt	My	Mz
peso próprio					
-912,4	-1,59	3,57	0,0	-9,41	0,63
guarda roda					
-90,3	-0,21	2,25	0,0	-8,09	0,08
revestimento					
-161,6	-0,37	-0,10	0,0	0,38	0,15
carga móvel					
-833,2	-1,07	-3,55	0,0	-3,78	1,77

Tabela 5 – Combinações últimas.

N	Vy	Vz	Mt	My	Mz
combinação última excepcional					
-2068,6	53,1	-176,0	-2,19	101,4	-20,0
combinação última normal					
-2796,5	-4,5	3,0	0,0	29,3	3,7

de momento fletor nas direções transversal e longitudinal da ponte e o diagrama de força normal, sendo todos valores máximos, devidos à ação sísmica, respectivamente, e para o conjunto pilar tubulão central. O SOFiSTiK fornece além dos valores máximos dos esforços, também os valores simultâneos, conforme mostrado na Tabela 3, onde a coluna LC refere-se ao caso de carga (Load Case), sendo: 902 Normal Máximo, 903 Cortante y Máximo, 904 Cortante z Máximo, 905 Momento de Torção Máximo, 906 Momento Fletor y Máximo e 907 Momento Fletor z Máximo. Para cada um destes casos de carga, na linha horizontal correspondente tem-se as solicitações simultâneas. Na coluna “Number” tem-se o número do elemento e na “x” a distância da seção até a extremidade inicial do elemento. Resultados semelhantes são obtidos para os elementos de casca, *etc.*

5 Conclusões

Ressalta-se a importância da utilização de esforços simultâneos devidos à ação sísmica, por consistência e coerência. Apesar de muitos sistemas de análise não os fornecerem, os mesmos podem ser obtidos pelo projetista, com algum esforço, com a utilização, por exemplo, da equação 4. Uma simples inspeção da Tabela 3 mostra o quanto pode ser desfavorável a consideração das solicitações máximas considerados como simultâneos, em uma combinação de carga.

A combinação da carga de origem sísmica, com as demais, deve ser feita conforme o item 5.1.3.3 da NBR 8681:2003, sendo a combinação resultante uma combinação última excepcional de cargas. Os coeficientes de majoração são iguais aos valores: cargas permanentes $\gamma_g = 1,2$; cargas variáveis $\gamma_g = 1,0$ e carga excepcional $\gamma_{exc} = 1,0$. O sismo é considerado como uma carga excepcional. Considerando o elemento 10003, ver Tabela 3, do modelo utilizado, que corresponde ao topo do pilar central, tem-se para esforços de origem não sísmica os valores mostrados na Tabela 4, unidades kN e kNm.

Na Tabela 5, para efeito de comparação, estão as combinações últimas excepcional (com o sismo) e a normal, unidades kN e kNm. Na obtenção da combinação última excepcional considerou-se ser a ponte de Categoria I, com fator de importância $I = 1,0$ (consultar Tabela 1) e detalhamento usual com coeficiente de modificação de resposta $R = 1,5$ (consultar Tabela 2), já que a seção em estudo pertence ao pilar

central. O posicionamento da carga móvel corresponde ao máximo valor de força normal no pilar em estudo. Comparando-se as duas combinações pode se esperar que o impacto econômico, para estruturas em condições semelhantes, embora exista, deva ser relativamente pequeno.

6 Agradecimentos

Agradecemos aos engenheiros Joaquim Mota e Hugo Mota, que gentilmente cederam o projeto da ponte analisada.

7 Referências

- ABNT NBR 8681:2003. Ações e segurança nas estruturas – Procedimento.
- ABNT NBR 15421:2006. Projeto de estruturas resistentes a sismos – Procedimento.
- ABNT NBR 8681:2003. Ações e segurança nas estruturas – Procedimento.
- CHEN, W., DUAN, L. Bridge Engineering Seismic Design, CRC Press, 2003. ISBN 978-0-8493-1683-8.
- CHOPRA, A. K. Dynamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering, Pearson Education Inc., 2007. ISBN 0-13-156174-X.
- CLOUGH, R. W., PENZIEN, J. Dynamics of Structures, McGraw-Hill, Inc. 1975. ISBN 0-07-011392-0.
- GUERREIRO, L. Revisões de Análise Modal e Análise Sísmica por Espectro de Resposta. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1999.
- GUPTA, A. K. Response Spectrum Method in Seismic Analysis and Design Procedure. Blackwell Scientific Publications, Inc., 1990. ISBN 0-632-02755-X.
- GUPTA, A. K.; CHU, S. L. Probable Simultaneous Response by the Response Spectrum Method of Analysis. Nuclear Engineering and Design, vol. 44, nº 1, p. 93-95, 1997.
- SOFiSTiK AG. DYNA-Dynamic Analysis Manual, versão 18, 2017.
- SOUZA LIMA, S., SANTOS, S. H. C. Análise de Dinâmica de Estruturas, Editora Ciência Moderna Ltda., 2008. ISBN 978-85-7393-584-4.
- WILSON, E. L.; DER KIUREGHIAN, A.; BAYO, E. P. A Replacement for the SRRS Method in Seismic Analysis. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 9, nº 2, p. 187-194, 1981.