



Avaliação do efeito da nova legislação sísmica brasileira na segurança de pontes de existentes

Claudia Interlandi

Portugal, interlandiclaudia11@gmail.com,

Luís Oliveira Santos

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal

Luiz Fernando Martha

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil

Sérgio Hampshire C. Santos

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil

Resumo

A necessidade de reabilitação de uma ponte pode advir da perda de sua capacidade resistente por sua deterioração ao longo do tempo, pela ocorrência de um acidente ou por uma alteração de requisito normativo, como o aumento da tonelagem permitida para o trânsito de veículos pesados na ponte.

A revisão da Norma Brasileira NBR 7187, que estabelece novos requisitos relativamente à resistência sísmica de pontes de betão armado e pré-esforçado, suscita dúvidas sobre a satisfação destes novos requisitos por parte das numerosas obras de arte existentes, projetadas numa conjuntura em que não havia requisitos de resistência sísmica.

Algumas ferramentas de verificação da segurança baseadas em métodos probabilísticos têm sido desenvolvidas e, têm como objetivo desenvolver, nos métodos determinísticos, processos mais compatíveis com situações reais de colapso das estruturas, como a abordagem por Segurança Global.

Neste contexto propõe-se uma metodologia para a verificação da segurança das obras de arte existentes. Apresenta-se uma proposta de abordagem probabilística que combina o Método da Segurança Global e uma atualização Bayesiana da resistência do betão com uma avaliação da probabilidade de falha em cada etapa da análise, associando índices de fiabilidade e coeficientes de segurança global. São considerados os efeitos da nova ação sísmica, obtidos através de um modelo de análise tridimensional e com verificação da segurança através do método dos coeficientes parciais.

A metodologia é aplicada a uma ponte construída em 2018, situada no Nordeste brasileiro, projetada antes de promulgação de normalização sísmica brasileira específica para pontes.

Palavras-chave: Abordagem Bayesiana; Normalização; Segurança Global; Teoria da Fiabilidade

1 INTRODUÇÃO

A revisão da Norma Brasileira NBR 7187 [1], cuja publicação está prevista para o ano de 2021, inclui um anexo (Anexo B) que estabelece os requisitos exigíveis na verificação da segurança de pontes de

betão armado e pré-esforçado relativamente à ação sísmica, complementando os requisitos gerais relativos à resistência sísmica para estruturas estabelecidos na NBR 15421 [2], que é geral e aplicável a estruturas de edificações. Esta nova realidade normativa suscita, naturalmente, a dúvida relativamente à satisfação destes novos requisitos por parte das numerosas obras de arte existentes, projetadas numa conjuntura em que não havia requisitos de resistência sísmica. A eventual necessidade de reforço destas estruturas teria um custo associado muito significativo.

Nestas circunstâncias, neste trabalho apresenta-se uma metodologia para a verificação da segurança que é aplicada a uma ponte situada no Nordeste brasileiro, zona com uma sismicidade considerada média, projetada sem requisitos de resistência sísmica.

A metodologia utilizada é baseada na atualização Bayesiana de variáveis e na análise probabilística de segurança usando a Teoria da Fiabilidade, tendo sido desenvolvida a partir da formulação original apresentada por Jacinto [3]. Consiste, fundamentalmente, numa análise de resistência global com incremento progressivo de força devida à ação sísmica. Este conceito está expresso no fib Model Code 2010 [4], em seu item 4.6, a partir dos conceitos expostos, por exemplo, por Cervenka [5].

2 DESCRIÇÃO DA PONTE EM ANÁLISE

A metodologia proposta para a verificação da segurança das obras de arte projetadas e construídas antes da nova legislação sísmica foi aplicada a uma obra corrente: a ponte rodoviária sobre o rio Madeira, construída na avenida Perimetral, na cidade de Sobral, Estado do Ceará (Figura 1). Projetada pelos Engenheiros Hugo Mota e Joaquim Mota para a Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará, esta ponte está em serviço desde o início de 2018.



Figura 1. Ponte sobre rio Madeira em Sobral, Ceará

A ponte sobre o rio Madeira é uma estrutura contínua com uma extensão total de 40 m, distribuída por dois tramos centrais com 16 m de vão e dois tramos extremos com 4 m de vão (Figura 2).

A superestrutura é formada por uma laje com 10,80 m de largura, apoiada sobre duas vigas longitudinais com 1,60 m de altura e 0,40 m de largura, que aumenta para 0,80 m na proximidade dos apoios. O tabuleiro dispõe também de vigas transversais nas secções de apoio e de meio vão dos tramos centrais.

A mesoestrutura é composta por três pares de pilares de seção circular, com diâmetro de 0,80 m, e altura variável, como assinalado na Figura 2.

O apoio do tabuleiro é composto por aparelhos de apoio de neoprene fretado.

O betão especificado para a superestrutura é de $f_{ck} = 25\text{Mpa}$ e o aço utilizado é o CA-50.

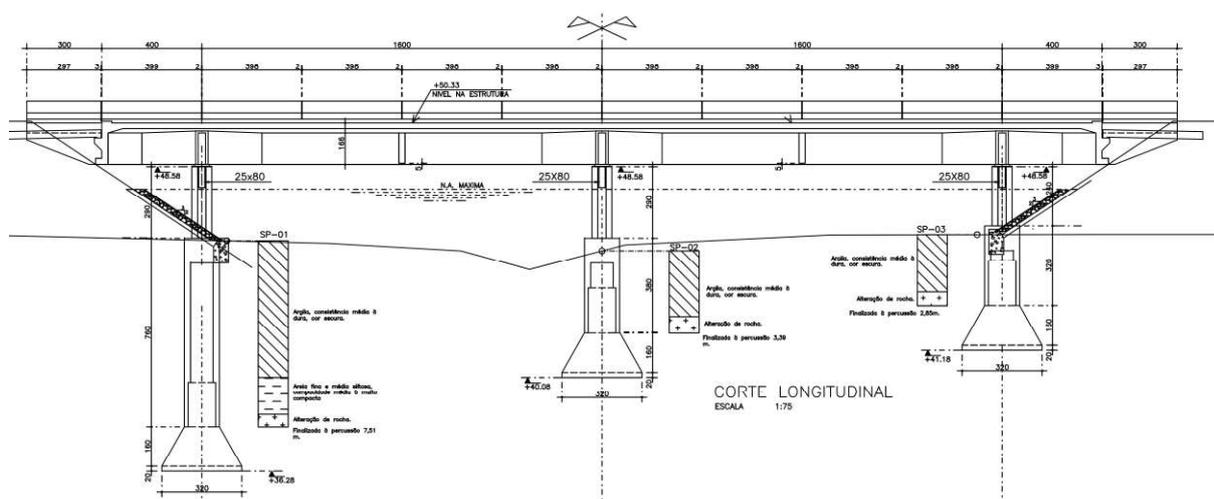


Figura 2. Ponte sobre rio Madeira em Sobral, Ceará: desenho de formas

A ponte está localizada numa zona de sismicidade média pelo que se torna necessária uma reanálise da estrutura considerando a ação sísmica prevista na NBR 7187 [1].

3 REQUISITOS DE VERIFICAÇÃO SÍSMICA DE PONTES NO BRASIL

É fornecida neste item uma breve descrição dos requisitos normativos para a verificação sísmica de estruturas de pontes no Brasil.

O zoneamento sísmico, apresentado na Figura 4, fornece o valor de a_g neste mapa; a_g é a aceleração horizontal de projeto na superfície de um terreno de Classe B (“Rocha”).

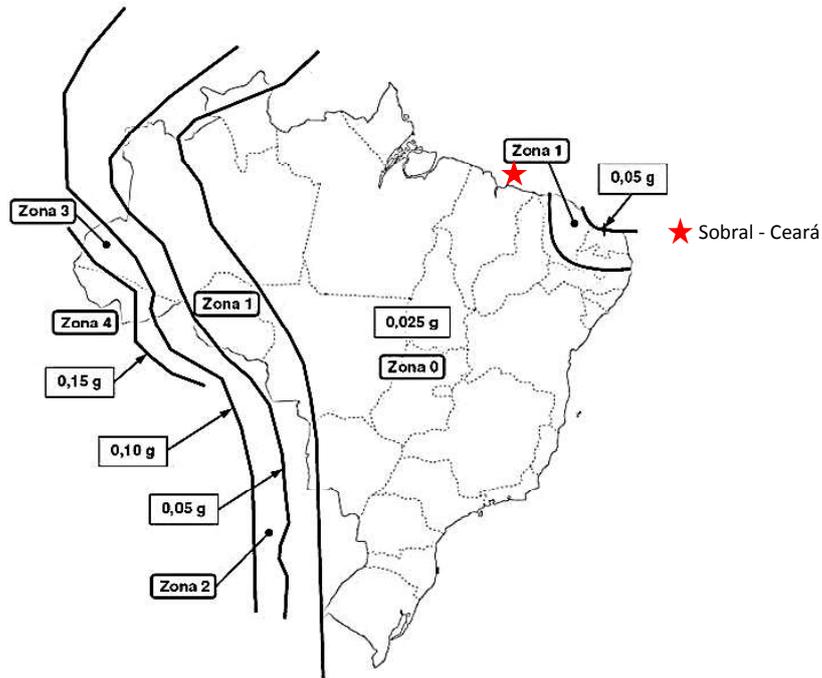


Figura 3. Zoneamento Sísmico Brasileiro - NBR 15421

No zoneamento definido pela NBR 15421 [2], observa-se que a maior parte do Brasil apresenta baixa atividade sísmica, mas em algumas regiões do Nordeste e na fronteira Noroeste as acelerações são mais altas e não podem ser desprezadas.

No Nordeste, as curvas de acelerações mais altas se explicam pela proximidade da região à falha Centro Atlântica, e na parte Noroeste, pela proximidade às bordas das placas tectônicas que seguem a costa do Pacífico e a Cordilheira do Andes.

4 ANÁLISE SÍSMICA DA PONTE

4.1 Definição do espectro de projeto

A análise sísmica da ponte que será aqui apresentada considera as recomendações normativas do anexo B da revisão da NBR 7187 [1].

A ponte foi considerada como usual, assim é considerado o Fator de Importância de Utilização $I = 1,0$. A ponte está localizada numa Zona Sísmica 1, com $a_g = 0,05g$. O solo é do Tipo E (mole), de acordo com os boletins de sondagem apresentados nos desenhos de formas da ponte (Figura 2).

Assim, é construído o espectro de resposta de projeto mostrado na Figura 4. Neste trabalho foi adotado conservadoramente o fator $R=1,0$.

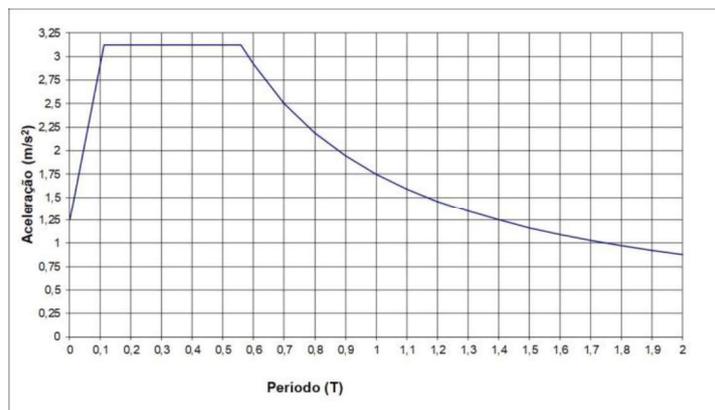


Figura 4. Espectro de resposta de projeto

4.2 Modelo numérico tridimensional

Um modelo numérico tridimensional de elementos finitos foi desenvolvido para a análise sísmica espectral da ponte, no programa SOFISTIK [6].

A Figura 5 ilustra uma vista deste modelo, descrito com maiores detalhes em Santos *et al.* [7]. O primeiro modo de vibração, com uma frequência de 3,378 Hz, é no sentido longitudinal da ponte (Figura 6). O segundo modo de vibração, com a frequência de 3,935 Hz, corresponde ao 1º modo transversal (Figura 7).

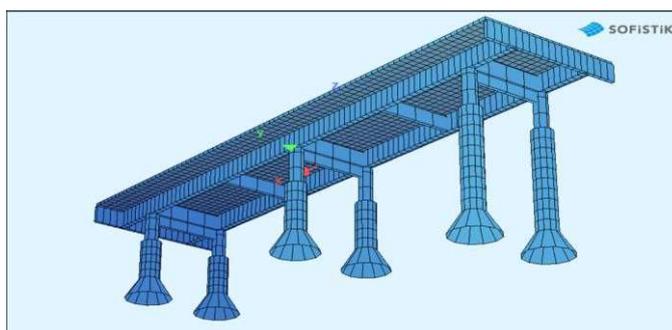


Figura 5. Modelo tri-dimensional da ponte

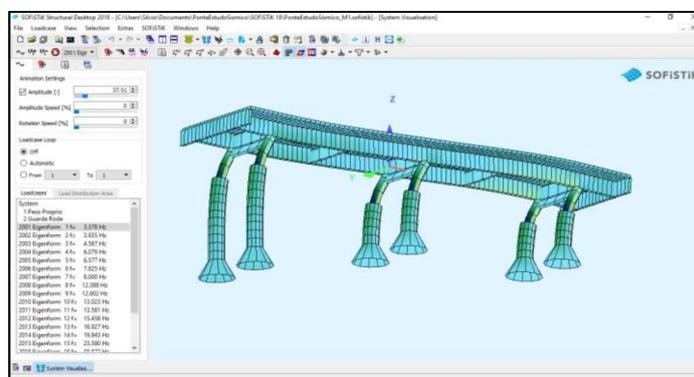


Figura 6. Primeiro modo de vibração (1º modo longitudinal)

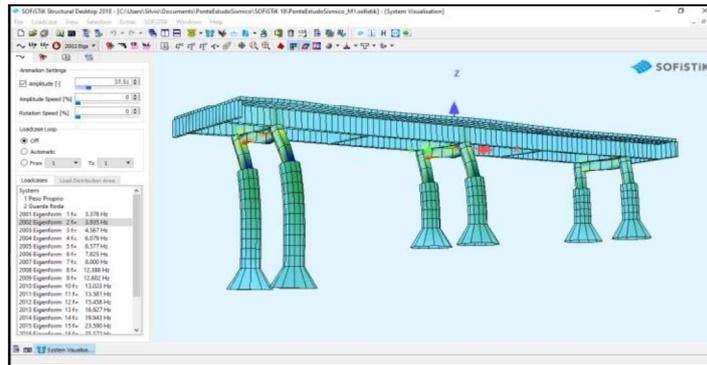


Figura 7. Segundo modo de vibração (1º modo transversal)

4.3 Resultados e verificação determinística

Resultados completos da análise sísmica realizada pelo SOFISTIK [6] são apresentados por Interlandi [8]. Apesar da ponte, estando localizada em Zona Sísmica 1, dispensar uma análise dinâmica, esta foi processada, inclusive para confirmar a adequação desta dispensa definida pela NBR 15421 [2].

As seguintes combinações de cargas devem ser verificadas de acordo com a NBR 7187 [1]:

Combinação 1 : $F_d = 1,5 F_g + 1,5 F_q$ (Situação normal)

Combinação 2 : $F_d = 1,2 F_g + 1,0 F_e$ (Situação em sismo)

(índices das solicitações: d – cálculo; g – permanente; q – acidental; e – sismo)

A seção mais crítica para a verificação está localizada no Pilar 2 (central). A verificação da segurança desta secção aos esforços resultantes da ação do sismo, considerando a geometria e as armaduras existentes foi efetuada com o programa P-CALC [9]. A proposta dessa verificação é avaliar o índice de confiabilidade com a progressão da carga, inclusive para o Estado Limite Último normativo. Nesta verificação de Estado Limite Último, constatou-se que a seção resiste praticamente de forma exata aos esforços solicitantes.

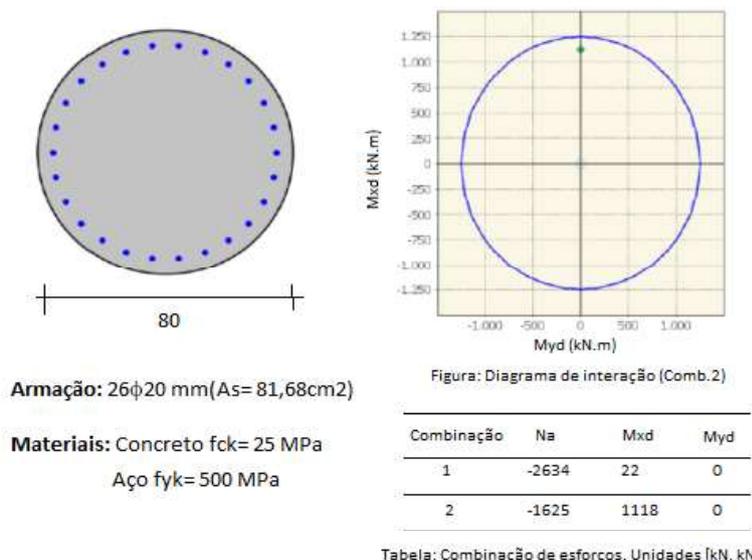


Figura 8. Verificação da seção crítica na base dos pilares através do P-CALC

5 VERIFICAÇÃO PROBABILÍSTICA DA SEGURANÇA DA PONTE

5.1 Atualização Bayesiana da resistência do betão

Para a atualização Bayesiana da resistência do betão, foi seguida uma metodologia que emprega a formulação originalmente apresentada por Jacinto [3], que combina conhecimentos prévio e atuais.

a) Conhecimento prévio:

Como conhecimento prévio, admite-se que cada betonada tenha sido adequadamente doseada para fornecer o f_{ck} requerido, considerando-se um coeficiente de variação de 10%.

Para n_0 (índice de confiança associado ao conhecimento anterior), será adotado $n_0 = 10$.

Os seguintes dados numéricos foram considerados, com relação ao “conhecimento prévio”:

- número de amostras: $n_0 = 10$; resistência média: $\mu_0 = 30,9$ MPa; desvio padrão: $s_0 = 3,09$ MPa

Estes valores correspondem à resistência característica desejada $f_{ck} = 25$ MPa na distribuição t-Student.

b) Dos testes atuais:

Dos resultados do Controle Tecnológico do Betão disponível são retirados os valores 25,7 MPa e 26,3 MPa, obtidos em ensaios a 28 dias no betão dos pilares 3 e 4. Para a análise:

- número de amostras: $n = 2$; resistência média: $\bar{x} = 26$ MPa; desvio padrão: $s = 0,42$ Mpa

c) Distribuição “a posteriori” (obtida com o aplicativo Mathcad [10]):

- resistência média: $\bar{x} = 30,1$ MPa; desvio padrão: $s = 3,54$ MPa; resistência característica: $f_{ck} = 23,77$ Mpa

d) Resultados mostrados na Figura 9:

- Curva em preto, referente ao betão dos ensaios atuais, numa distribuição probabilística Normal;
- Curva em azul, referente ao conhecimento prévio, numa distribuição probabilística t-Student;
- Curva em verde, referente à distribuição probabilística ajustada, ou seja, para as amostras do ensaio + 10 amostras de conhecimento prévio, numa distribuição probabilística t-Student.

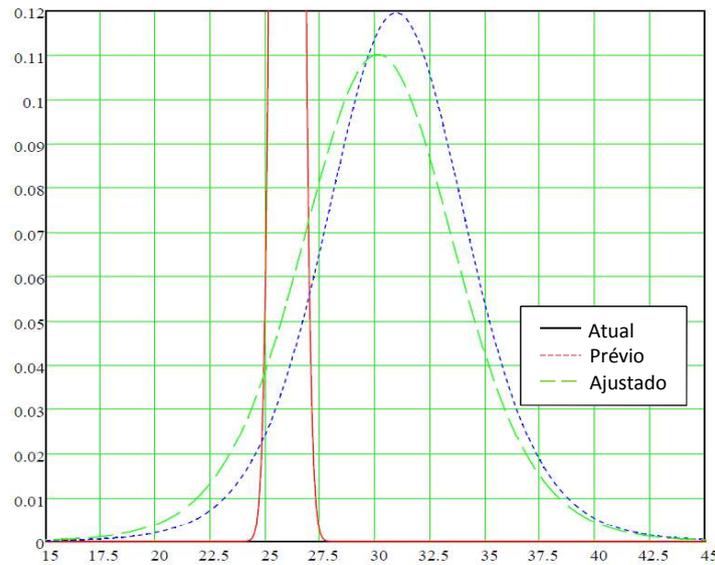


Figura 9. Gráfico de distribuição de resistências do betão

A consideração da atualização Bayesiana, aplicada aos ensaios disponíveis, leva a uma redução do f_{ck} de 25 MPa para 24 MPa (valor a ser adotado).

5.1.1 Definição das variáveis probabilísticas de solicitação

A análise probabilística será feita em termos de momentos resistentes e atuantes:

$$F_{lim} = M_{res} - M_{atuante} \quad (1)$$

Será considerada uma relação entre momentos máximos na coluna e aceleração na base:

$$M_{atuante} = FACTOR \cdot accel \quad (2)$$

O fator de proporcionalidade é encontrado considerando que o momento sísmico total de 1107kN corresponde a uma aceleração de 0,05 g:

$$FACTOR = \frac{1107}{0,05} = 22140 \quad (3)$$

A função de acelerações é definida a partir da relação entre períodos de recorrência e acelerações horizontais para a Região Nordeste que foi apresentada por Santos *et al.* [11]. A curva que representa esta relação está reproduzida na Figura 10 ("PGA").

Também nesta figura está representada a função Gumbel que é usada na análise probabilística e os períodos de recorrência de 475 anos e 2475 anos usados como base para o ajuste da curva.

Função Gumbel:

$$p_f(a_h) = 1 - \exp[-\exp(-\alpha(a_h - u))] \quad (4)$$

$$\alpha = 49,32; u = -0,09093; \mu = u + \frac{0,577}{\alpha} = -0,07923; \sigma = \frac{\pi}{\sqrt{6} \cdot \alpha} = 0,026 \quad (5)$$

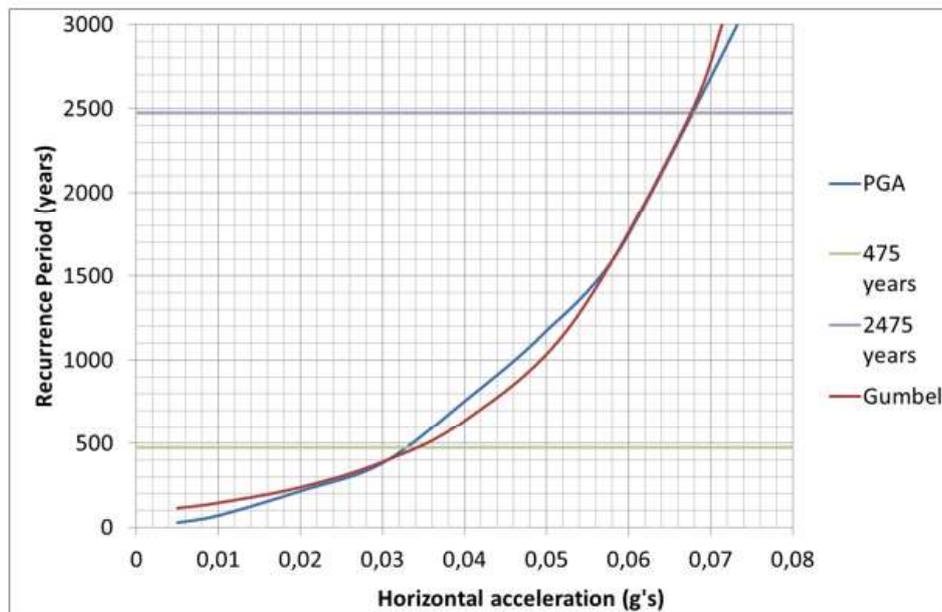


Figura 10. Aproximação de Gumbel para a Função de Recorrência

5.1.2 Definição das variáveis probabilísticas de resistência

Para definir a variável de resistência, relativamente ao momento na base, deve-se processar o programa P-CALC [9] com os valores médios das variáveis, como definido no *fib* 2010 [4]. Tem-se:

Betão: $f_{cm} = 1.328 \cdot 24000 = 31872$ kPa; Aço: $f_{ym} = 1.089 \cdot 500000 = 544500$ kPa

A carga normal é considerada com seu valor característico $N = 1390,6$ kN. Com estes dados em seus valores médios, o momento resistente médio é de 1560 kNm, obtido no P-CALC [9].

Para a análise probabilística, a seguinte equação é finalmente considerada:

$$F_{lim} = MRES.MODRES - 22140.ACEL.MODCAR.FACTOR \quad (6)$$

As variáveis consideradas na análise da ponte são definidas na Tabela 1.

Tabela 1 - Variáveis probabilísticas para a análise de confiabilidade da ponte

VARIÁVEL	DISTRIBUIÇÃO	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
Momento resistente	Normal	1560	156
Modelagem da resistência	Normal	1,00	0,05
Aceleração	Gumbel	-0,079	0,026
Modelagem das cargas	Normal	1,00	1,00

A Análise de Confiabilidade é feita com o programa VAP [11], aplicando o método FORM. A Figura 11 reproduz uma tela do programa. Esta tela corresponde a um processamento com $\lambda = 1$.

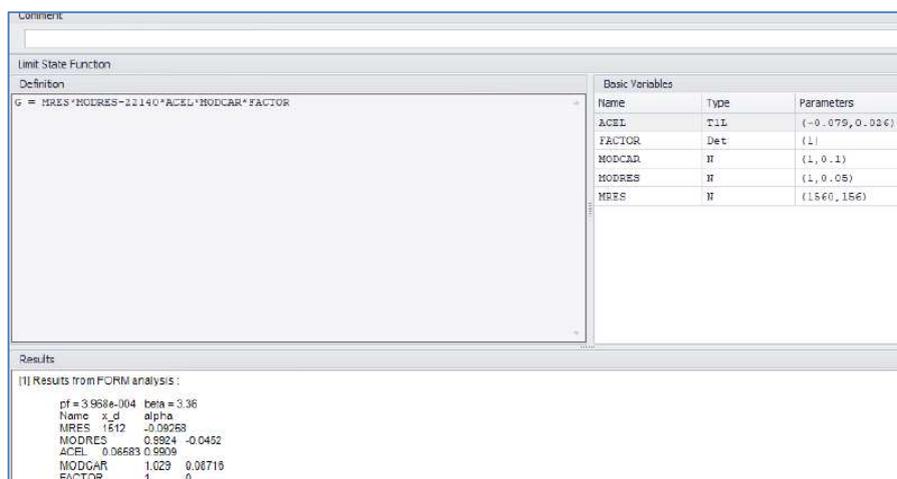


Figura 11. Análise probabilística do pilar

Este processamento apresenta os resultados (utilizado o Método FORM):

Índice de confiabilidade: $\beta = 3,36$; Probabilidade de falha: $p_f = 3,968 \times 10^{-4}$

Este valor é bastante razoável para uma ruptura do tipo dúctil.

A Figura 12 mostra os valores de β obtidos com diversos valores de λ , onde esta variável representa o “fator de segurança global” para a carga sísmica. Valores aceitáveis de β (acima de 3) são obtidos com o coeficiente de majoração igual a 1, o que é o usualmente definido nas normas sísmicas.

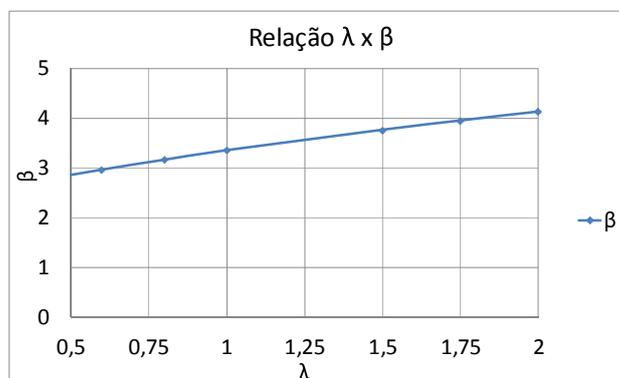


Figura 12. Valores $\lambda \times \beta$

6 CONCLUSÕES

As análises da ponte existente indicaram que o projeto das pontes nesta região de média sismicidade, considerando somente as cargas permanentes e móveis, pode cobrir também as solicitações sísmicas.

Este processo pode ser ainda mais refinado, considerando o Método da Resistência Global e a Atualização Bayesiana. Os resultados indicam que nas normas de projeto podem haver situações em que a segurança das estruturas, avaliada do ponto de vista probabilístico possa estar insuficiente. Por outro lado, podem também indicar que haja uma reserva, de um ponto de vista probabilístico.

REFERÊNCIAS

- [1] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2003) NBR 7187 - Projeto de pontes, viadutos e passarelas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro.
- [2] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2006) NBR 15421 - Projeto de estruturas resistentes a sismos – Procedimento. Rio de Janeiro.
- [3] Jacinto, L. (2011). Avaliação de segurança de pontes existentes – abordagem probabilística Bayesiana. Tese de Doutorado, Universidade Nova de Lisboa.
- [4] *fib* (2013) Model Code for Concrete Structures 2010. International Federation for Structural Concrete .
- [5] Cervenka, V. (2013) Reliability-based non-linear analysis according to *fib* Model Code 2010. *Structural Concrete*, 14, No. 1.
- [6] SOFISTiK AG. (2017) DYNA - Dynamic Analysis Manual, versão 18.
- [7] Santos, S. H. C.; Monteiro Jr, M. T. R., Martha, L. F. C. R.; Interlandi, C. (2019). Reliability Evaluation of Structural Safety Factor Using a Global Resistance Approach. IABSE Symposium, Guimarães.
- [8] Interlandi, C. (2020). Safety assessment of reinforced concrete structures with a global safety factor approach. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PhD Thesis.
- [9] P-CALC, TQS STORE (2020), in: <https://store.tqs.com.br/apps/p-calc/ejm1se496l>
- [10] Santos, S. H. C., Lima, S. S., Hora, R. C. (2020). Análise Sísmica de Uma Ponte Considerando a Proposta de Revisão da Norma NBR 7187. *Engenharia Estudo e Pesquisa*, Vol. 20 nº 1.
- [11] Santos, S. H. C., Lima, S. S.; Silva, F. C. M. (2010). The Seismological Basis of the Brazilian Standard for Seismic Design, 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Toronto, Canada.
- [12] Petschacher Software und Projektentwicklungs GmbH - PSP Software (2017). VAP – Variables Processor, Version 4.07.