

Avaliação da Segurança de Estrutura Existente de Betão com Uma Metodologia para Abordagem de Resistência Global

Claudia Interlandi¹

Luis Oliveira Santos²

Sergio Hampshire de Carvalho Santos³

Luis Fernando Martha⁴

Resumo

A maioria das estruturas existentes precisa ser reavaliada de tempos em tempos, quer para verificar possíveis novos requisitos normativos de projeto, quer para incluir novas ações a serem consideradas ou ainda, para verificar a perda de capacidade estrutural da estrutura ao longo de sua vida útil. As ferramentas de análise probabilística foram desenvolvidas ao longo dos últimos anos de forma a possibilitar análises mais próximas da realidade da estrutura, por vezes mais realistas do que as definidas no projeto existente, seguindo os Estados Limites Últimos. Neste artigo é apresentada uma proposta de metodologia para estruturas existentes baseada nos conceitos do formato de resistência global, conforme definido no *fib* Model Code 2010, com uma avaliação dos coeficientes de confiabilidade, bem como a atualização Bayesiana das propriedades do material. A metodologia proposta é aplicada na reavaliação de uma ponte existente. Também é apresentada a metodologia proposta para estruturas novas, como forma comparativa entre os procedimentos.

Palavras-chave: teoria da fiabilidade, abordagem Bayesiana, segurança global, metodologia

1 Introdução

A necessidade de reabilitação de uma ponte pode advir da sua deterioração ao longo do tempo, da alteração de requisitos normativos ou da alteração da sua utilização, por exemplo pelo aumento da tonelagem permitida para o trânsito de veículos pesados.

Apresenta-se neste artigo uma proposta de metodologia para a avaliação da segurança de estruturas existentes com base probabilística. Este procedimento pode ser útil na decisão de realizar ou não a reabilitação de uma ponte existente.

O exemplo apresentado é de uma ponte localizada no Ceará, Brasil. A proposta de procedimento apresentada inclui uma reavaliação Bayesiana de resistência dos materiais da ponte, especialmente do betão, combinando dados disponíveis quando do projeto com dados obtidos posteriormente. Inclui também uma avaliação de segurança, através de um enfoque de Segurança Global, em que forças de projeto são majoradas até a ruptura da estrutura, sendo ao

longo desta majoração avaliadas as probabilidades de ruptura da mesma.

Também será apresentada a metodologia proposta para novas estruturas, como comparação entre as metodologias propostas.

Este trabalho resume parte da Tese de Doutorado desenvolvida pela primeira autora, orientada pelos demais autores, Interlandi [1]. Esta temática vem sendo desenvolvida por este grupo de pesquisadores e apresentada, por exemplo, em [2], [3] e [4].

2 Segurança estrutural

2.1 Formatos de segurança

De acordo com a NP EN 1990 [10], uma estrutura apresenta bom desempenho durante o período de vida útil para que foi construída quando cumpre certos requisitos gerais, ditos requisitos fundamentais, designadamente, de segurança, de utilização e de

1 Doutora, Lisboa, Portugal

2 Doutor Investigador Principal, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC Lisboa, Portugal

3 Doutor Professor Titular, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil

4 Luis Fernando Martha, Doutor Professor Associado Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil

durabilidade. Os requisitos de segurança visam garantir que as estruturas tenham capacidade de resistir a ações extremas, de baixa probabilidade de ocorrência, eventualmente sofrendo danos graves, mas controlados, de forma a minimizar o risco para a vida humana. Os requisitos de utilização pretendem assegurar um comportamento adequado das estruturas em condições normais de utilização. Os requisitos de durabilidade têm em vista que a deterioração da estrutura, ao longo da sua vida útil, não deve reduzir o seu desempenho abaixo do prescrito, tendo em conta o ambiente e o nível de manutenção previsto.

A generalidade da regulamentação internacional recorre ao conceito de Estado Limite para a proceder à verificação dos requisitos de segurança e de utilização. Estado Limite é uma condição apartir da qual a estrutura deixa de cumprir um ou mais requisitos, ficando prejudicada no desempenho das funções para que foi construída. Surgem, assim, os estados limites últimos, associados aos requisitos de segurança, e estados limites de utilização, associados aos requisitos de utilização.

A verificação da segurança envolve em geral alguma espécie de hipótese convencional do tipo $E \leq R$, em que E está relacionada com os efeitos das ações que atuam na estrutura e R diz respeito à capacidade resistente da estrutura face a esses efeitos.

2.2 Verificação da segurança através dos coeficientes parciais de segurança

Na verificação da segurança através dos coeficientes parciais de segurança, a variabilidade das ações e das características resistentes dos materiais é considerada por meio de valores representativos, nominais ou característicos, associados com coeficientes parciais de segurança g . Os valores característicos são definidos através dos valores médios, dos desvios padrão e da função de distribuição probabilística considerada. Os coeficientes parciais de segurança devem ser aferidos a partir de métodos probabilísticos.

2.3 Abordagem probabilística de segurança

A verificação da segurança através de uma abordagem probabilística consiste na determinação da sua probabilidade de falha (ou do seu índice de fiabilidade β), relativamente a uma dada função de falha. É uma abordagem também adequada para a avaliação da segurança de estruturas existentes.

Na abordagem probabilística, as grandezas E e R são modeladas como variáveis aleatórias. Uma vez atribuídas distribuições de probabilidade a E e a R , pode-se avaliar a probabilidade do evento $E > R$, ou seja, p_f (probabilidade de falha). Na abordagem

probabilística da segurança estrutural procura-se que a probabilidade p_f seja inferior a um valor previamente aceito como máximo admissível, p_{IT} .

2.4 Abordagem de segurança por Resistência Global

2.4.1 Generalidades

Nesta abordagem são tratadas as incertezas do comportamento estrutural, como definido pela condição de estado limite, no nível de segurança estrutural. Os efeitos das várias incertezas (de propriedades de materiais, grandezas geométricas, ações, etc.) estarão integrados em uma resistência de projeto global, que podem ser expressos por um fator de segurança global.

Os valores representativos (médios) das variáveis de segurança global e os fatores de segurança globais devem ser escolhidos de forma que os requisitos de fiabilidade para a verificação de estruturas existentes e para o projeto de novas estruturas, em termos de índices de fiabilidade β relacionados ao período de referência definido, sejam atendidos.

2.4.2 Abordagem Bayesiana

A abordagem Bayesiana em inferência estatística propõe-se a combinar dados obtidos de observações com avaliações ou julgamentos subjetivos. Na Análise de Fiabilidade, principalmente quando as amostras são disponíveis em número muito reduzido, a inferência estatística clássica não dá as respostas adequadas, pois não permite o uso da experiência anterior com modelos similares, nem a opinião dos especialistas da área. A abordagem Bayesiana surge como ferramenta indicada para o aproveitamento de toda a informação disponível, seja ela objetiva, fornecida pelos resultados de ensaios, ou subjetiva, ditada pela experiência, como exposto por Jacinto [8].

2.4.3 Fator de segurança global

As diversas incertezas presentes no dimensionamento estrutural são consideradas por meio da adoção de um fator de segurança global λ , como definido no Model Code 2010 da fib [5].

Esse fator único é adotado para a consideração conjunta das incertezas presentes no projeto, diferentemente do dimensionamento semi-probabilístico usual, em que são adotados coeficientes de segurança parciais para cada variável no projeto, como esquematizado na Figura 1.

O fator λ é utilizado para majorar uma ou mais cargas atuantes no modelo estrutural, até que se atinja a situação de colapso da estrutura. Ou seja, o valor numérico de λ que leva a estrutura ao colapso

é considerado como o fator de segurança global da análise realizada.

Para que a análise seja isenta de definições arbitrárias de valores característicos, na determinação da probabilidade de falha e do índice de fiabilidade β associado ao fator de segurança global λ , as variáveis de resistência e solitação são tomadas com os seus valores médios.

3 Metodologias

As metodologias com base probabilística para novas estruturas e para estruturas existentes é apresentada neste item, conforme publicado pela primeira autora em [1].

3.1 Metodologia para novas estruturas

É realizada a análise dos elementos estruturais, considerando a aplicação das ações críticas, concentradas nos nós e cargas próprias. Extraem-se as cargas aplicadas ao modelo atuando em cada elemento estrutural. Depois disso, o dimensionamento estrutural seguindo as recomendações normativas, considerando a abordagem semi-probabilística com os fatores de segurança padronizados e os valores característicos de resistência e carga no estado limite último.

Após a determinação das dimensões e armadura dos elementos estruturais, é realizada uma análise global de segurança. Uma análise não linear da estrutura é executada através de um programa de análise estrutural, onde é considerada a aplicação dos valores médios da carga crítica do modelo e do peso próprio. A resistência média dos elementos estruturais e a formação das rótulas plásticas são consideradas quando são atingidas as respectivas capacidades de resistência.

Em seguida, é determinado o fator de segurança global, através da relação entre a carga aplicada no momento do colapso e o valor médio da carga. Depois que os elementos estruturais são projetados no estado limite último e o fator de segurança global

é determinado pela abordagem de segurança global, as análises de confiabilidade são realizadas. É realizada a determinação dos níveis de segurança associados a cada elemento estrutural, efetuada através de uma análise probabilística no estado limite último. A determinação do nível de segurança associado ao comportamento global do elemento da estrutura é realizada por meio de uma análise probabilística.

As análises de confiabilidade são realizadas utilizando a função de falha associada aos parâmetros adotados λ , suas respectivas média, desvio padrão e tipo de distribuição probabilística como entrada e, como resultado, os índices de confiabilidade e probabilidades de falha para cada caso estudado.

Com os resultados obtidos nas análises de confiabilidade, podem ser realizadas comparações entre os índices de confiabilidade. Nessa comparação de resultados, pode-se analisar se os resultados obtidos na abordagem de segurança global são maiores que os valores obtidos na análise semi-probabilística, para as seções dos elementos estruturais adotados. Esta metodologia pode levar a uma otimização do projeto, com estruturas mais econômicas, sem afetar sua segurança.

3.2 Metodologia para estruturas existentes

A primeira e não trivial pergunta a fazer é “existe um desenho para esta estrutura?”. Para uma resposta positiva, o próximo passo é o conhecimento do grau de degradação desta estrutura, em caso de resposta negativa deve-se realizar um levantamento de campo o mais detalhado possível. Após, é obrigatória a obtenção dos dados reais do material estrutural, por meio de ensaios em concreto, por exemplo, fazendo uma verificação detalhada em todas as normas aplicáveis para este caso, com atenção especial para possíveis alterações normativas, principalmente no que se refere aos carregamentos aplicados.

O próximo passo é a execução de uma atualização Bayesiana da resistência dos materiais. Todos esses estudos fornecerão as informações necessárias para a tomada de decisão: elaborando um novo modelo estrutural ou atualizando o existente. Depois, os

Método semi-probabilístico

Resistência do betão → γ_c
 Resistência do aço → γ_s
 Carga permanente → γ_g
 Sobrecarga → γ_q



Abordagem por segurança global

Resistência do betão →
 Resistência do aço →
 Carga permanente → λ
 Sobrecarga →

Figura 1 – Incertezas e métodos semi-probabilísticos ' segurança global probabilística.

próximos passos são semelhantes para a metodologia de novas estruturas, quais sejam: a definição das cargas e resistências médias para a análise global, a definição das cargas variáveis críticas para esta análise e a execução da análise global para diferentes níveis de cargas variáveis com o respectivo cálculo de β para diferentes valores de λ .

Na análise final, a avaliação se para o existente λ_o se o β° é aceitável ou algum tipo de reforço é necessário para esta estrutura, para aumentar $\lambda_o \rightarrow \lambda_1$. Esta metodologia indicará se o nível de segurança que a estrutura apresentará em sua vida útil remanescente é aceitável.

4 Caso de estudo

4.1 Requisitos sísmicos

4.1.1 Requisitos sísmicos da NBR15421

Os requisitos gerais de resistência sísmica de estruturas e de resistência sísmica de edifícios são definidos na NBR 15421 [7]. As acelerações horizontais de referência em solo tipo “Rocha” são apresentadas no mapa de isosistas reproduzido na Figura 2, desta norma.

4.1.2 Requisitos sísmicos da revisão da NBR 7187

No caso específico do projeto de pontes, a NBR 7187 [6], presentemente em revisão, definirá requisitos complementares aos da NBR 15421 [7]. Para o Ceará (situado em Zona Sísmica 1), não é exigida análise dinâmica e as pontes devem resistir a cargas horizontais nas duas direções ortogonais, com valor igual a:

$$F_x = 0,01 w_x \quad (1)$$

onde

F_x – força sísmica de projeto em uma dada direção.

w_x – peso efetivo, incluindo o peso do tabuleiro e metade do peso dos pilares mais 20% da carga móvel em pontes rodoviárias e 30% em pontes ferroviárias.

Os coeficientes de resposta R (ou coeficientes de comportamento), no caso de pontes, serão mais severos do que os considerados no projeto de edifícios, como pode ser visto no Quadro 1. Estes coeficientes de resposta reduzem as forças obtidas em uma análise puramente linear para a avaliação das respostas não-lineares das pontes sob a ação sísmica.

O espectro de projeto que corresponde à região é apresentado na Figura 3, considerando-se os dados

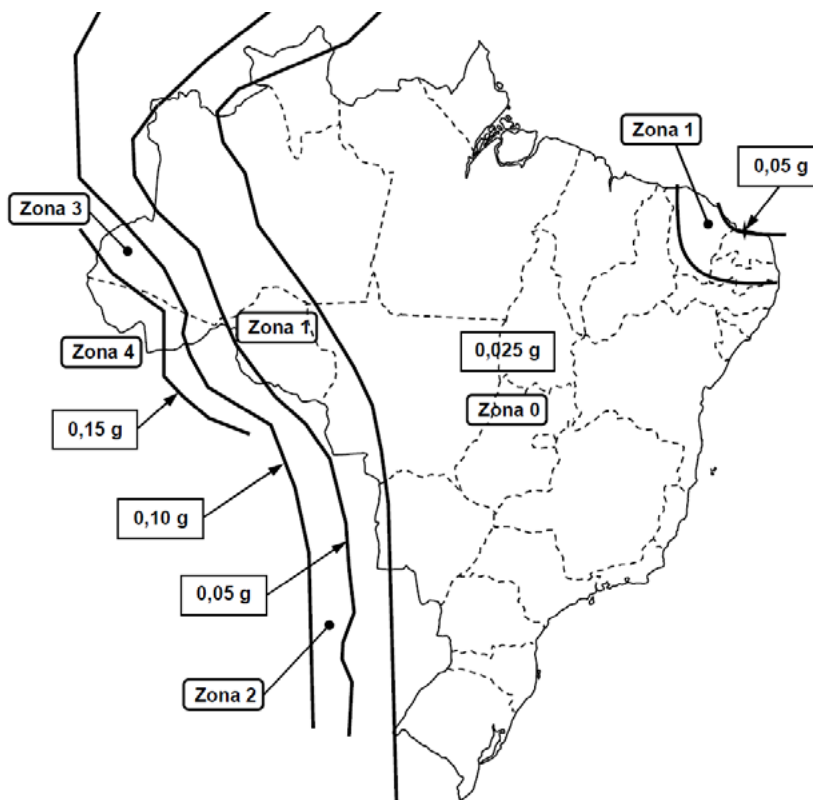


Figura 2 - Mapa das zonas sísmicas brasileiras.

(ver a NBR 15421 [7]): $ag = 0,05 \text{ g}$; $Ca = 2,5$ (Solo Tipo E); $ags0 = 0,125g$

4.1.3 Verificação estrutural das pontes em condições sísmicas – Resistência Global

O processo de verificação nos Estados Limites Últimos, pode ser refinado, considerando o Método da Resistência Global e a Atualização Bayesiana.

Numa abordagem probabilística tradicional, são definidas funções de falha, que consideram as variáveis probabilísticas relativas a resistências e solicitações, obtidas a partir dos valores médios e dos coeficientes de variação de cada uma das variáveis consideradas. Assim, pode ser obtido o correspondente índice de fiabilidade β .

Na abordagem de Resistência Global que é aqui considerada, que tem características de originalidade, é aplicado um coeficiente global de majoração das cargas λ para o cálculo das resistências requeridas, e para cada um destes valores de λ são avaliados os correspondentes índices de fiabilidade β .

Desta forma, pode-se determinar, para um caso analisado, o coeficiente global λ que corresponde a um requerido índice de fiabilidade β .

No caso de uma estrutura existente, como é o caso estudado, pode-se assim inferir se o índice de fiabilidade obtido nesta abordagem global pode ser ou não considerado como aceitável.

4.2 Geometria da ponte

São reproduzidos nas Figuras 4 e 5, uma imagem e um desenho de formas, dando uma ideia geral da geometria da ponte sobre o Rio Madeira, município de Sobral, estado do Ceará.

4.3 Modelo numérico tridimensional

Um modelo em elementos finitos foi desenvolvido para a análise sísmica espectral da ponte, no programa SOFISTIK [12]. Maiores detalhes desta análise podem ser encontrados em Santos *et al.* [13].

O modelo desenvolvido é reproduzido na figura 6. É também apresentado na Figura 7 o primeiro modo de vibração no sentido transversal, que apresenta a frequência de 3,935 Hz.

Apesar da ponte, estando localizada em Zona Sísmica 1, dispensar uma análise dinâmica, esta é processada, inclusive para confirmar a adequação desta dispensa.

Quadro 1 – Coeficientes de resposta para pontes

Sistemas sismo-resistentes	Pontes com detalhamento usual	Pontes com detalhamento especial
Estruturas em geral	1,5	2,5
Estruturas rigidamente ligadas ao solo, como encontros e pontes com tabuleiro rigidamente ligado aos encontros	1,0	1,0
Pontes em arco	1,2	2,0
Fundações	1,0	1,0

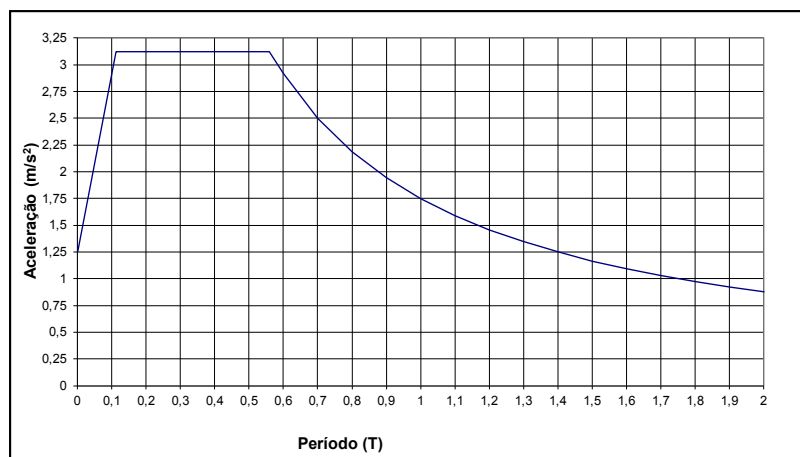


Figura 3 – Espectro de projeto (período vs. aceleração).

A Figura 8 apresenta o diagrama de momentos fletores no pórtico central devido ao sismo transversal.

4.4 Verificação estrutural da ponte em condições sísmicas

Foi realizada, no programa PCALC1 [14], a verificação da coluna com os esforços de sismo e com as armaduras existentes na seção crítica na base dos pilares do pórtico central para duas combinações de carga. A combinação 1 refere-se a uma situação em que a totalidade das cargas móveis está aplicada. A combinação 2 corresponde a uma combinação de sismo no sentido transversal juntamente com 20% das cargas móveis.

Constata-se que a seção, nesta verificação de Estado Limite Último, resiste às solicitações praticamente sem folga nas armaduras.

Quadro 2 – Combinação de solicitações

Combinação	Na (kN)	Mxd (kNm)	Myd (kNm)
1	-2634	22	0
2	-1625	1118	0

4.5 Verificação estrutural da ponte em condições sísmicas através da abordagem de Resistência Global

4.5.1 Atualização Bayesiana da resistência

O processo de verificação de segurança nos Estados Limites Últimos pode ser refinado, considerando o Método da Resistência Global e a Atualização Bayesiana.



Figura 4 – Ponte da Madeira (Sobral, CE, Brasil).

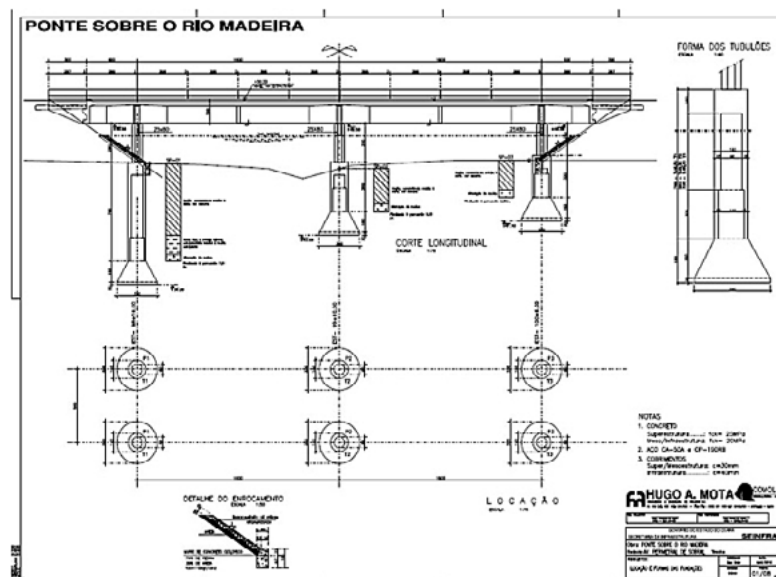


Figura 5 – Desenho de formas.

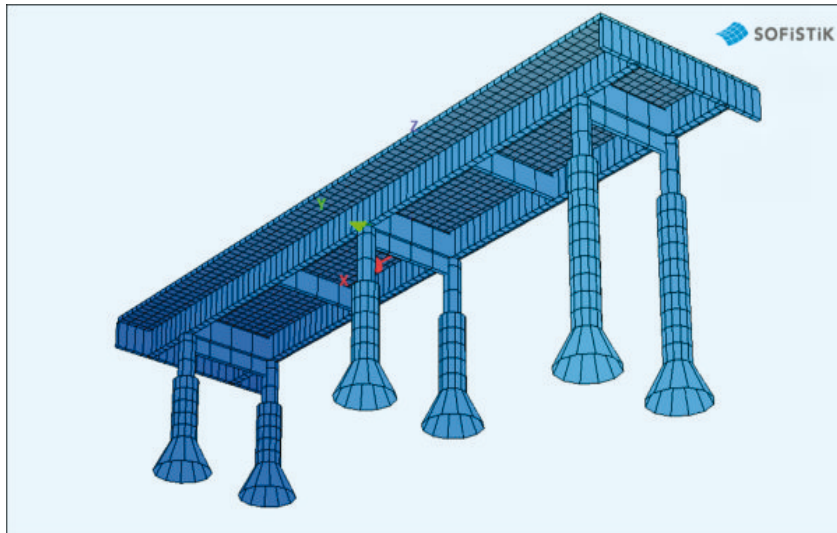


Figura 6 – Modelo tridimensional.

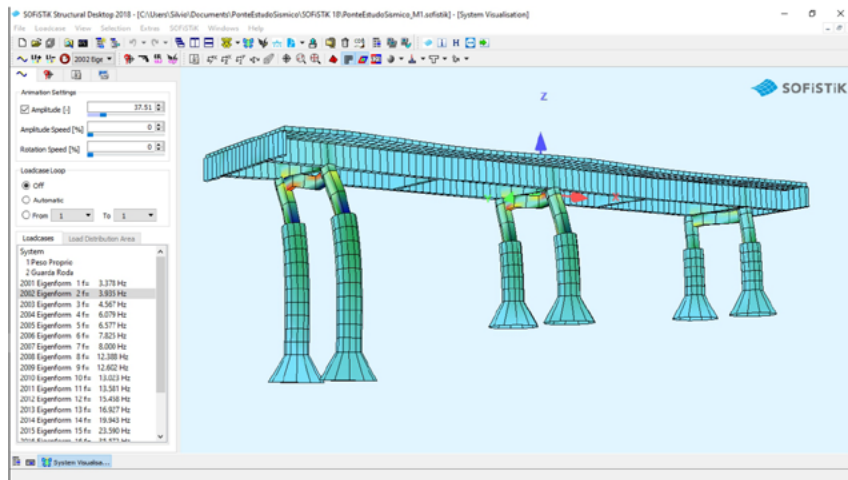


Figura 7 – 1º modo de vibração no sentido transversal.

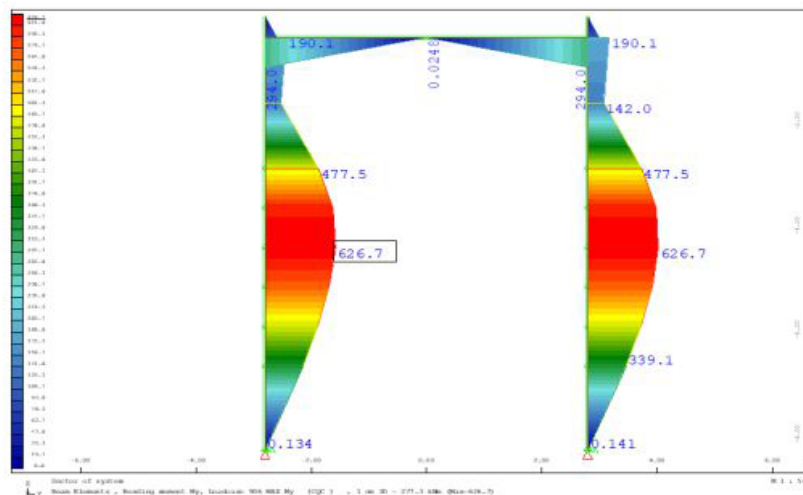


Figura 8 – Diagrama de momentos fletores no pórtico central devido ao sismo.

A Atualização Bayesiana foi aplicada aos ensaios de betão disponíveis, levando a uma redução do f_{ck} de 25 MPa para 24 MPa, considerando o processo descrito por Santos et al. [15]. Nesta análise de atualização, se considera:

- a) Dados do “conhecimento prévio”:
 - número de amostras arbitrado: $n_0 = 10$
 - resistência média: $\mu_0 = 30,9$ MPa;
 - desvio padrão: $s_0 = 3,09$ MPa

Estes valores foram escolhidos para corresponder à resistência característica desejada $f_{ck} = 25$ MPa da distribuição t-Student.

- b) Dados os testes atuais

Dos resultados do Controle Tecnológico do Concreto, foram retirados os valores de 25,7 MPa e 26,3 MPa, obtidos em ensaios a 28 dias no betão dos Pilares 3 e 4 da Ponte:

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

- c) Distribuição “a posteriori” (obtida com uma planilha no aplicativo Mathcad):

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

4.5.2 Definição das variáveis probabilísticas de solicitação

A função limite para a análise probabilística será expressa feita em termos de momentos resistentes e atuantes na base do pilar do pórtico central, considerada a seção crítica para a verificação de segurança. Postula-se que as vigas tenham resistência relativa inferior à dos pilares, sendo privilegiada a ruptura final de forma mais frágil nas colunas após a mais dúctil nos pilares. Então as últimas rótulas plásticas se formarão na base das colunas, como já se pode inferir do diagrama de momentos fletores apresentado na Figura 8.

$$F_{lim} = M_{res} - M_{atuante} \quad (2)$$

Para o cálculo dos momentos atuantes, será considerada uma relação de proporção entre os momentos máximos na coluna e a aceleração normativa máxima para solo Tipo B:

$$M_{atuante} = FATOR. acel \quad (3)$$

O fator de proporcionalidade é encontrado considerando que, na análise apresentada no item 5.4

o momento sísmico total de 1118 kNm corresponde a uma aceleração normativa de 0,05 g:

$$FATOR = \frac{1118}{0,05} = 22360 \quad (4)$$

A função de acelerações será definida a partir da relação entre períodos de recorrência e acelerações horizontais para a Região Nordeste que foi apresentada por Santos *et al.* [16]. A curva que representa esta relação está reproduzida na Figura 10 (“PGA”).

Também nesta figura está representada a função Gumbel que deve ser usada na análise probabilística para representar a Função de Recorrência (“Gumbel”). Também estão representados os períodos de recorrência de 475 anos e 2475 anos que foram usados como base para o ajuste da curva.

Função Gumbel:

$$p_f(a_h) = 1 - \exp[-\exp(-\alpha(a_h - u))] \quad (5)$$

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

4.5.3 Definição das variáveis probabilísticas de resistência

Para a definição das variáveis probabilísticas de resistência, relativamente ao momento na base, inicialmente deve-se reprocessar o programa PCALC com os valores médios das variáveis. Consideram-se os valores médios das resistências:

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 $N = 1391$ kN. Com estes dados em seus valores médios, o momento resultante médio é de 1560 kNm, ver Figura 11.

4.5.2 Análise probabilística da ponte

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

$$F_{lim} = MRES.MODRES - 22140.ACEL.MODCAR.FACTOR \quad (7)$$

Com base na Tabela 4.1, as variáveis consideradas na análise da ponte são definidas no Quadro 2.

É adotado para o momento resistente um Coeficiente de Variação de 0,1. Para os coeficientes de modelagem de resistência e de cargas são adotados média unitária e desvios padrão respectivamente de 0,05 e 0,10. A variável factor serve para imputar os fatores λ desejados.

A Análise de Fiabilidade é realizada com o programa VAP [17], aplicando o método FORM. A Figura 12 reproduz uma tela do programa. Este foi um processamento com $\lambda = 1$.

Este processamento, que corresponde a considerar todas as variáveis com seus valores médios apresenta os resultados (utilizado o Método FORM):

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

Este valor é bastante razoável para uma ruptura do tipo dútil e compatível com os Períodos de Recorrência definidos para sismo na NBR 15421.

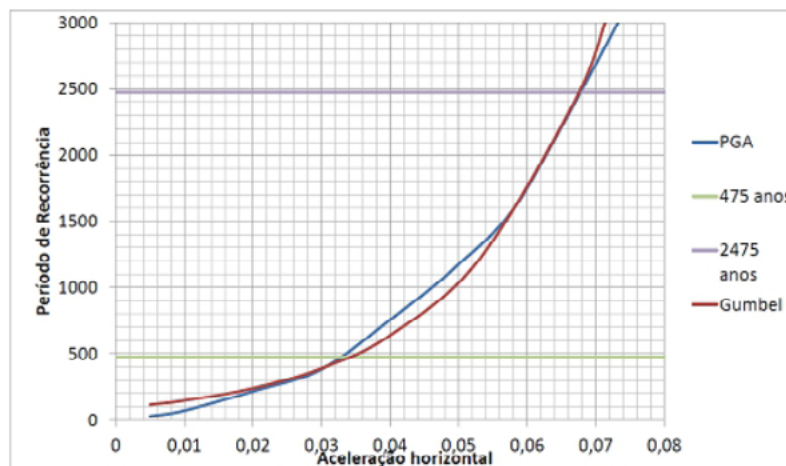


Figura 10 – Aproximação de Gumbel para a Função de Recorrência Sísmica.

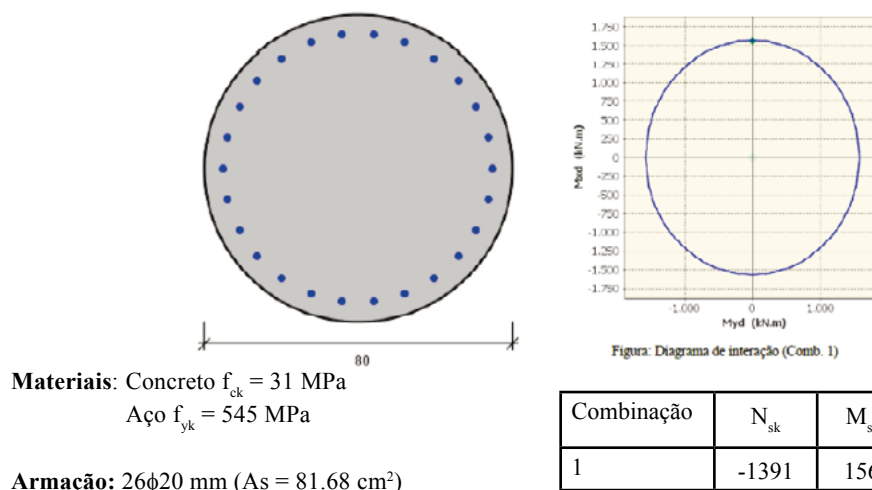


Figura 11 – Análise do pilar com valores médios das variáveis.

Quadro 2 – Variáveis probabilísticas para a análise de fiabilidade 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	0,10

A Figura 13 mostra os valores de β obtidos com diversos valores de λ , onde esta variável representa o valor da força horizontal sísmica aplicada, relativamente ao valor característico, obtido com o período de referência de 475 anos.

Valores aceitáveis de β são obtidos com a aplicação da aceleração característica (coeficiente de majoração igual a 1), o que é um indicativo da segurança da ponte em condições sísmicas.

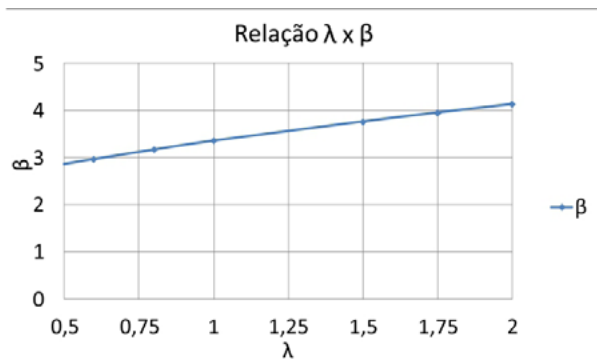


Figura 13 – Valores λ vs. β

Conclusões

Foram inicialmente apresentados os fundamentos do Método da Resistência Global, aplicando a Teoria da Fiabilidade e a Atualização Bayesiana.

A aplicação do método desenvolvido a uma ponte existente permitiu verificar que esta estrutura verifica as condições de segurança regulamentares apesar dos novos requisitos relativamente à ação sísmica. Esta verificação permite dispensar onerosas obras de reforço.

Apesar das relações entre o fator de segurança global (λ) e o índice de fiabilidade (β) serem intrínsecas ao exemplo estudado, assumindo valores próprios para cada estrutura, o método desenvolvido poderá ser utilizado na verificação da segurança de estruturas existentes, designadamente das numerosas obras de arte existentes no Nordeste brasileiro expostas às novas exigências das ações sísmicas.

Como principal vantagem do método proposto, está a possibilidade de se avaliar a necessidade ou não de reforço, do ponto de vista da segurança estrutural, diretamente em função da fiabilidade da estrutura perante novos requisitos normativos, ou seja, pela aceitação ou não da probabilidade de ruptura da ponte para novas condições de projecto.

Um ponto importante da utilização deste método é permitir uma outra forma de avaliação, neste caso da estrutura de forma global, definindo então, a necessidade ou não de reforço, do ponto de vista da segurança estrutural.

Referências

- [1] INTERLANDI, C. – Safety assessment of reinforced concrete structures with a global resistance approach. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2020.
- [2] INTERLANDI, C.; MARTHA, L. F.; SANTOS, S. H. C. Confiabilidade em Estruturas de Concreto Armado: Abordagem Bayesiana – Um Estudo de Caso. Anais do 59º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, 2017.
- [3] INTERLANDI, C.; MARTHA, L. F. C. R.; SANTOS, S. H. C. Confiabilidade em Estruturas de

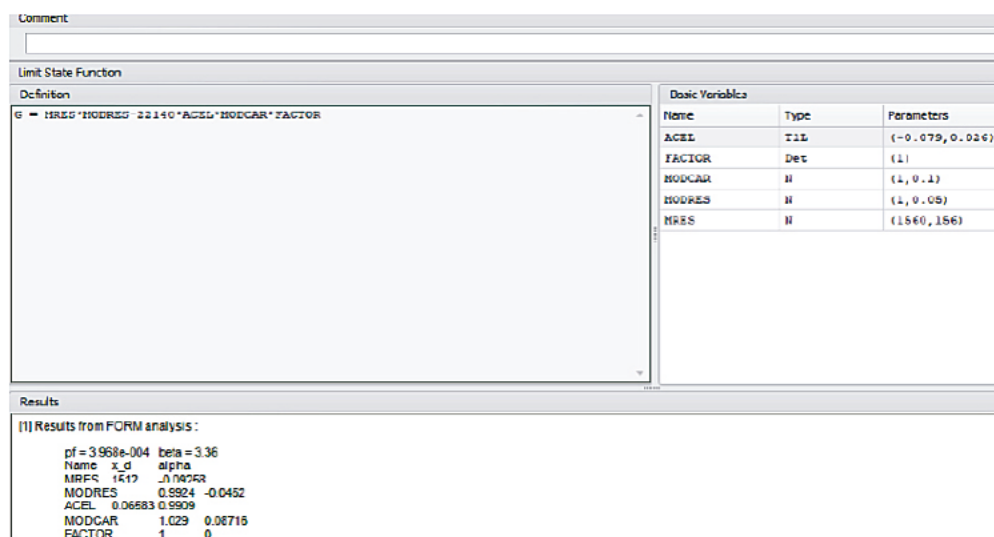


Figura 12 – Análise probabilística da coluna.

Concreto Armado: Estudo Comparativo entre Enfoques de Estado Limite Último e de Segurança Global. X Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, Rio de Janeiro, 2018.

[4] INTERLANDI, C.; MARTHA, L. F. C. R.; SANTOS, S. H. C. Confiabilidade em Estruturas de Concreto Armado: Estudo Comparativo entre Análises no Estado Limite Último e por Segurança Global. Encontro Nacional de Betão Estrutural 2018, Lisboa, 2018.

[5] fib – International Federation For Structural Concrete – Model Code for Concrete Structures 2010, (2013).

[6] NBR 7187 – Projeto de pontes, viadutos e passarelas de concreto – Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro (versão revista para publicação em 2021).

[7] NBR 15421 – Projeto de Estruturas Resistentes a Sismos – Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 2006.

[8] JACINTO, L. – Avaliação de segurança de pontes existentes. Abordagem probabilística bayesiana. Tese de Doutoramento. Universidade Nova de Lisboa, 2011.

[9] CERVENKA, V. – Reliability-based non-linear analysis according to fib Model Code 2010. <https://doi.org/10.1002/suco.201200022>, 2013.

[10] NP EN 1990. Eurocódigo – Bases para o projecto de estruturas. IPQ, Instituto Português da Qualidade, Caparica, 2009.

[11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15421 – Projeto de Estruturas Resistentes a Sismos – Procedimento. Rio de Janeiro (2006).

[12] SOFiSTiK AG. DYNA – Dynamic Analysis Manual, versão 18, 2017.

[13] SANTOS, S. H. C., SOUZA LIMA, S., HORA, R. C. Análise Sísmica de Uma Ponte Considerando a Proposta de Revisão da Norma NBR 7187. Engenharia Estudo e Pesquisa, Vol. 20 nº 1. ISSN 2316-591X, 2020.

[14] PCALC1 – Programa para dimensionamento de pilares. TQS Store.

[15] SANTOS, S. H. C.; MARTHA, L. F.; INTERLANDI, C. “Reliability Evaluation of Structural Safety Factor Using a Global Resistance Approach”. IABSE Symposium, Guimarães, 2019.

[16] SANTOS, S. H. C., SOUZA LIMA, S.; SILVA, F. C. M. The Seismological Basis of the Brazilian Standard for Seismic Design, 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Toronto, Canada, July 25-29, 2010, Paper No. 135. 2010.

[17] Petschacher Software und Projektentwicklungs GmbH – PSP, Software. VAP – Variables Processor, Version 4.0; 2017.