ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE UMA VIGA PRÉ-MOLDADA PROTENDIDA DE UMA PONTE DIMENSIONADA NO ESTADO LIMITE DE SERVIÇO PELA NORMA BRASILEIRA

Rodrigo Augusto Maciel [1]; Pedro Henrique Cerento de Lyra [2]

[1] Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);
[2] Professor Assistente da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *O presente trabalho aborda a análise de confiabilidade de uma viga protendida, na situação de estado limite de serviço, baseado no projeto padrão de uma ponte com vão de 40 metros do Departamento de Estradas e Rodagem (DER). Através do estudo de métodos estatísticos e da modelagem numérica, pode-se verificar a segurança estrutural. Já definido o sistema estrutural da ponte e considerando as solicitações geradas pelo seu peso próprio e cargas variáveis, definidas através do software LIP, foi possível realizar diversas simulações no Microsoft Excel, utilizando o Método de Monte Carlo Cru, que resultaram em probabilidades de falhas ou sucesso. E com esses resultados foi feita uma análise de confiabilidade estrutural comparando os índices de confiabilidade estabelecidos por normas ou comitês internacionais e sua respectiva probabilidade de falha, podendo concluir se a ponte teria um risco alto, médio ou baixo para ruptura. Para todos os casos estudados o valor do índice de confiabilidade ficou acima do valor alvo para estruturas com custo relativo alto da medida de segurança.*

Introdução

Atualmente, o diferencial de um engenheiro civil é elaborar um projeto seguro e com o menor custo possível, porém não se tem a certeza de que os materiais utilizados e o modo de execução dos mesmos vão se comportar de acordo com suas características teóricas. Com isso um projeto de engenharia civil não depende apenas do projeto em si e sim das finitas variáveis que as rodeiam desde a elaboração até a execução. Então, faz-se necessário o estudo da probabilidade de falha do projeto envolvendo as finitas variáveis.

Uma ponte é um componente importante para o transporte, assim, se houver uma falha, poderá acarretar em diversos problemas financeiros e sociais, por essa razão, é necessário o estudo da segurança destas estruturas. Sabendo que o custo empregado em uma estrutura 99% segura é muito maior que uma estrutura 95% segura, deve-se combinar segurança com economia.

O estudo da segurança é avaliado através da confiabilidade, tanto para o estado limite de serviço (ELS) quanto para o estado limite último (ELU). Essa confiabilidade está relacionada com o grau de confiança em que a estrutura suporta durante seu tempo de vida.

Não existe uma estrutura 100% segura, ou seja, sem falhas, devido à incerteza de sua constituição. Assim, para que haja confiança no método, é necessário uma qualidade nos parâmetros do modelo matemático usado para análise das equações de estado limite.

A necessidade de controlar amostras que garantissem a qualidade do produto oferecido ganhou grande importância no período pós revolução industrial, uma vez que os produtos começaram a ser produzidos em uma grande escala. Para isso, utilizou-se dos estudos estatísticos para identificar possíveis falhas no sistema. Com o avanço tecnológico, a utilização de programas computacionais possibilitou fazer diversas análises com uma precisão maior e uma economia de tempo e custo.

A Tabela 1 abaixo apresenta os estudos de confiabilidade nos últimos 10 anos que visa calibrar a norma e melhorar a utilização dos coeficientes de seguranças.

Tabela 1 – Resumo de alguns estudos realizados na área da confiabilidade estrutural.

O que estudou	Autor	Ano
A não conformidade de concretos quanto à sua resistencia a compressão	Santiago	2011
O quanto a mudança de uma variável influencia no dimensionamento da estrutura	Eraso	2011
Estudou a probabilidade de falha de cada elemento de forma isolada	Santos	2012
Avaliaram o índice de confiabilidade ao considerar diferentes cargas aplicas sobre vigas	Nowak e Racokzy	2013
A aplicação do método de confiabilidade sobre diversos aspectos do dimensionamento estrutural	Souza	2013
Simularam um exercício de dimensionamento estrutural	Froderberg e Thelandersson	2014
A relação da confiabilidade de estruras com a sensibilidade do sistema quando é realizada a variação de parametros de dimensionamento	Moreira e Pantoja	2016

Fonte: Autor.

Confiabilidade estrutural

A confiabilidade de uma estrutura é definida como a probabilidade que a estrutura não falhe ao desempenhar suas funções, (Nowak e Collins, 2013).

A confiabilidade depende da variabilidade de ocorrência, uma vez que há muitas incertezas. Esta pode ser definida como a probabilidade de os esforços resistentes serem menores que os esforços solicitantes, ou seja, havendo chance de ocorrer uma falha na estrutura, visto que a capacidade de carga do elemento não suporta a capacidade nele atuando. Sendo assim, estudou-se a probabilidade de falha da ponte em questão, utilizando o Método de Monte Carlo com o auxílio dos softwares AutoCAD, LIP e Excel.

Monte Carlo Cru

Uma vez que o resultado esperado seja próximo da realidade, a simulação de Monte Carlo Cru gera um conjunto de amostras, que simulam diversas iterações, relatando o desempenho da estrutura em questão. Porém, a precisão do resultado obtido é suscetível ao tamanho da amostra, ou seja, quanto maior o tamanho da amostra, maior será a precisão do resultado.

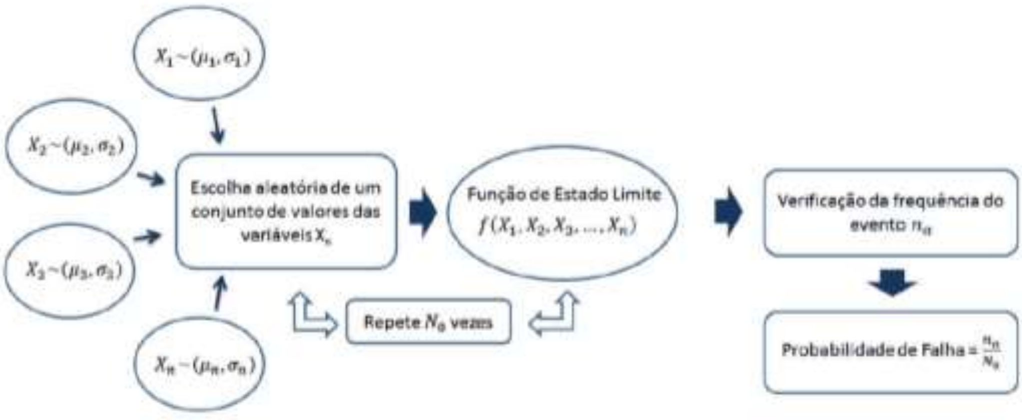
Segundo Ribeiro (2009) por se tratar de uma técnica de amostragem, ela está sujeita a erros de amostragem, portanto para que seus resultados sejam mais precisos e confiáveis é necessário a utilização de amostras com grande número de simulações. Portanto, foi realizado um pouco mais de 1.000.370 de simulações para que garantisse o resultado mais próximo da realidade.

Para o critério de segurança estar satisfeito é necessário que o resultado entre a relação da solicitação com a resistência seja maior que zero.

O método tem como objetivo gerar diversas amostras a partir de simulações, a fim de verificar a ocorrência de falha do evento com base no tamanho da amostra levando em consideração a média, variância e desvio padrão.

A figura 1 apresenta o fluxograma que dever ser realizado para utilizar o método de Monte Carlo.

Figura 1 – Fluxograma do Método de Monte Carlo.

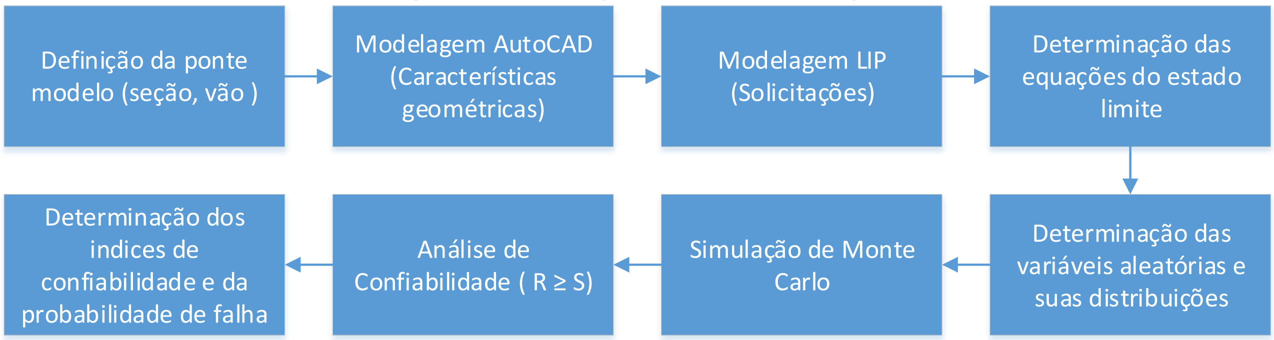


Fonte: Souza (2013).

Materiais e Métodos

A figura 2 apresenta o fluxograma realizado para o trabalho.

Figura 2 – Fluxograma da Metodologia.

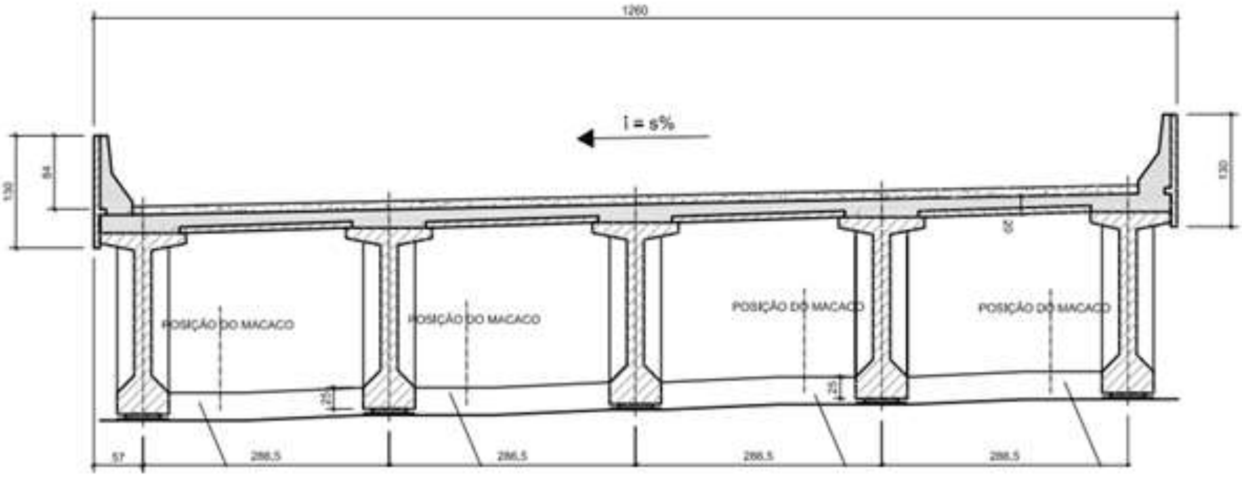


Fonte: Autor.

Preliminarmente, foi escolhida o projeto padrão do Departamento de Estradas e Rodagem (DER) dimensionada para carga móvel rodoviária padrão TB-450 da NBR 7188 - *Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estrutura*.

A superestrutura da ponte é composta por guarda rodas, pavimento, longarinas de concreto protendido, laje e transversinas de concreto armado, possui um vão longitudinal de 40 metros de comprimento e uma largura transversal de 12,60 metros. A figura 3 apresenta a seção transversal da ponte escolhida.

Figura 3 – Seção transversal da ponte. (Medidas em centímetros)



Fonte: DER

<u>Modelagem 2D no AutoCad</u>

As características geométricas da seção transversal (área e momento de inércia) da ponte foram obtidas através pelo programa AutoCad.

<u>Modelagem numérica no software LIP</u>

Com os dados das características geométricas, a ponte foi modelada no software LIP, utilizando carga móvel rodoviária padrão TB-450 da NBR 7188, para encontrar os esforços solicitantes.

O software LIP é fornecido pela empresa TQS e foi desenvolvido pelo engenheiro Sander David Cardoso Junior. É um software que determina os esforços solicitantes nas longarinas para as cargas permanentes e para a carga móvel de acordo com a NBR7188. A análise de distribuição transversal de cargas é feita pelos métodos Courbon/Engesser ou processo Fauchart, utilizados respectivamente para pontes com e sem transversinas intermediárias.

<u>Determinação das equações do estado limite</u>

Abaixo são apresentadas as quatro equações do estado limite que serão utilizadas para a verificação da confiabilidade estrutural, sendo duas para o ato da protensão e duas para a situação de operação:

$$g_1(x) = -\sigma_{t,ato} + [(P_0 - \Delta P_i).\left(\frac{1}{A} - \frac{e_b}{W_{s,ato}}\right) + \frac{M_{pré}}{W_{s,ato}} \qquad \text{(Equação 1)}$$

$$g_2(x) = \sigma_{c,ato} - \left[(P_0 - \Delta P_i).\left(\frac{1}{A} + \frac{e_b}{W_{i,ato}}\right) - \frac{M_{pré}}{W_{i,ato}} \right] \qquad \text{(Equação 2)}$$

$$g_3(x) = \sigma_{c,ope} - \left[(P_0 - \Delta P_i).\left(\frac{1}{A} - \frac{e_b}{W_{s,ato}}\right) + \frac{M_g}{W_{s,ato}} + \frac{M_q}{W_{s,ope}} \right] \qquad \text{(Equação 3)}$$

$$g_4(x) = -\sigma_{t,ope} + \left[(P_0 - \Delta P_i).\left(\frac{1}{A} - \frac{e_b}{W_{i,ato}}\right) - \frac{M_g}{W_{i,ato}} - \frac{M_q}{W_{i,ope}} \right] \qquad \text{(Equação 4)}$$

Onde:

$\sigma_{c,ato}$ é a tensão admissível de compressão no ato da protensão;

$\sigma_{c,op}$ é a tensão admissível de compressão na operação;

$\sigma_{t,ato}$ é a tensão admissível de tração no ato da protensão;

$\sigma_{t,op}$ é a tensão admissível de tração na operação;

P_0 é a força de protensão inicial;

e_b é a excentricidade do cabo;

A é a área da seção transversal;

$W_{i,ato}$ é o módulo resistente à flexão da fibra inferior no ato da protensão;

$W_{s,ato}$ é o módulo resistente à flexão da fibra superior no ato da protensão;

$W_{i,op}$ é o módulo resistente à flexão da fibra inferior na operação;

$W_{s,op}$ é o módulo resistente à flexão da fibra superior na operação;

ΔPi são as perdas imediatas da força de protensão;

$\Delta Pinf$ são as perdas totais da força de protensão;

$M_{pré}$ é o momento fletor devido ao peso próprio da viga pré-moldada;

M_g é o momento fletor devido ao peso da ponte;

M_q é o momento fletor devido as cargas variáveis;

Determinação das variáveis aleatórias e suas distribuições

Na Tabela 2 são apresentadas as variáveis aleatórias e suas respectivas distribuições utilizadas para este estudo.

A Distribuição Normal é bastante utilizada pois possui uma simetria em relação à média e uma curva em formato de sino. Seu valor máximo é onde a média, mediana e moda são concomitantes e por isso representa a distribuição de muitas variáveis aleatórias utilizadas no projeto.

A Distribuição de Gumbel está associada com valores máximos e mínimos de um determinado fenômeno, por isso ela melhor se encaixa na variável de momento fletor variável (Mq).

Tabela 2 –Distribuição e valores das variáveis aleatórias.

VÃO DE 40 METROS								
V.A	**Unidade**	**Distribuição**	**λ**	**Valor**	**μ**	**CV**	**s**	**Fonte**
$\sigma_{c,ato}$	N/mm²	Normal	1,19	27	32,13	0,15	4,8195	Santiago E Beck
$\sigma_{c,op}$	N/mm²	Normal	1,19	35	41,65	0,15	6,2475	Santiago E Beck
$\sigma_{t,ato}$	N/mm²	Normal	1,03	-4,0716	-4,193748	0,183	0,76745588	(Hueste et al.);(Bartlett e MacGregor)
$\sigma_{t,op}$	N/mm²	Normal	1,01	-4,4478	-4,492278	0,183	0,82208687	(Hueste et al.);(Bartlett e MacGregor)
P_o	N	Normal	1	8425000	8425000	0,015	126375	(Caprani, Mayer e Siamphukdee)
e_b	mm	Normal	1	938	938	0,015	14,07	(Caprani, Mayer e Siamphukdee)
A	mm²	Normal	1	688000	688000	0,025	17200	(Caprani, Mayer e Siamphukdee)
$W_{i,ato}$	mm³	Normal	1	363000000	363000000	0,039	14157000	(Caprani, Mayer e Siamphukdee)
$W_{s,ato}$	mm³	Normal	1	365000000	365000000	0,038	13870000	(Caprani, Mayer e Siamphukdee)
$W_{i,op}$	mm³	Normal	1	476000000	476000000	0,044	20944000	(Caprani, Mayer e Siamphukdee)
$W_{s,op}$	mm³	Normal	1	992000000	992000000	0,073	72416000	(Caprani, Mayer e Siamphukdee)
ΔP_i	N	Normal	1	865000	865000	0,3	259500	(JCSS)
ΔP_{inf}	N	Normal	1	6566,6925	6566,6925	0,3	1970,00775	(JCSS)
M_{pre}	N.mm	Normal	1,03	3303776000	3402889280	0,08	272231142	(Rakoczy e Nowak)
Mg	N.mm	Normal	1,05	6862230000	7205341500	0,05	360267075	(Rakoczy e Nowak)
Mq	N.mm	Gumbel	1,615	4630450000	7478176750	0,18	1346071815	(Rakoczy e Nowak)

Fonte: Autor.

Simulação de Monte Carlo

Conhecida as quatro equações do estado limite, utilizou-se o software Excel para fazer as simulações de Monte Carlo e encontrar a probabilidade de falha da ponte. Foi necessário o uso de um complemento do Excel o NtRand, para que a inversa da função da distribuição de Gumbel fosse habilitada para uso.

Determinação do índice de confiabilidade e a probabilidade de falha

Utilizando o Software Excel e Monte Carlo, foi possível obter as probabilidades de falha pelas simulações através da Equação 4 e os índices de confiabilidades através da Equação 5.

$$P_f = \frac{n(g(X) \leq 0\ )}{N} \qquad \text{(Equação 4)}$$

$$\beta = \frac{E[g(X)]}{\sqrt{Var[g(X)]}} \qquad \text{(Equação 5)}$$

Sendo:

$n(g(X) \leq 0)$ é o número de ocorrências de falhas;
N é o número de eventos;
$E[g(X)]$ é o valor esperado (média);
$Var[g(X)]$ é a variância da função de falha;

Resultados e Discussão

A Tabela 3 apresenta as probabilidades de falha para cada equação do estado limite e o

Tabela 3 – Probabilidade de Falha.

	Número de Ocorrências De Falhas	Número de Eventos	Probabilidade de Falha
g1	54	1.000.370	5,40E-05
g2	14.870	1.000.370	1,49E-02
g3	102	1.000.370	1,02E-04
g4	54.703	1.000.370	5,47E-02

Fonte: Autor.

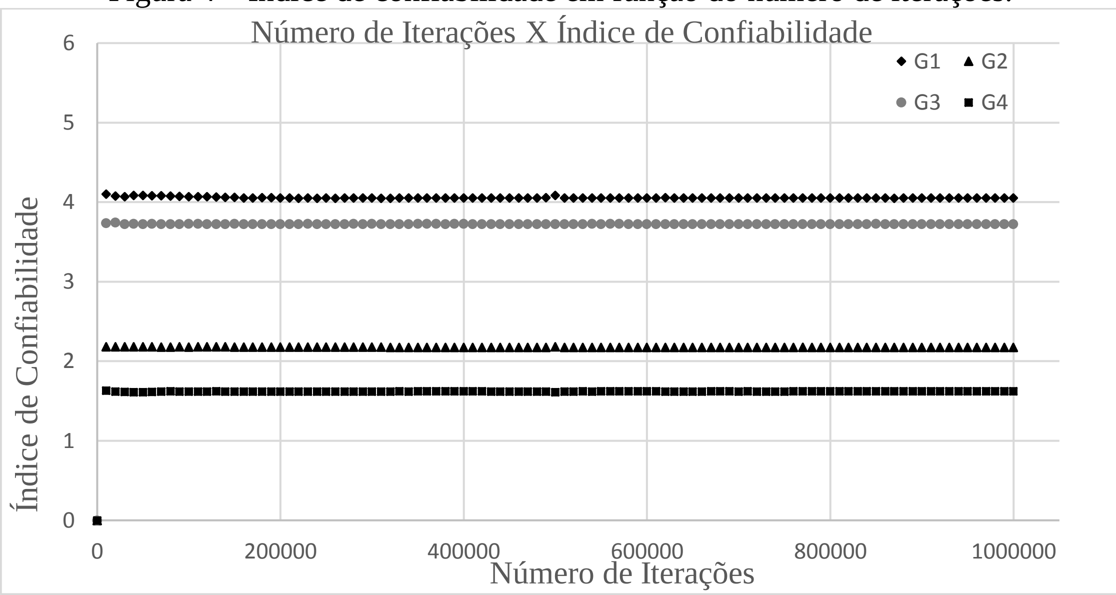
Tabela 4 – Índice de confiabilidade para as equações do estado limite utilizando o Método de Monte Carlo Cru.

	g1	g2	g3	g4
Média	5,069	10,962	23,731	2,901
Desvio Padrão	1,249	5,045	6,378	1,788
Beta	4,058	2,173	3,721	1,622

Fonte: Autor.

O número de simulações é importante, pois o índice de confiabilidade é bem sensível com esse número, como é mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Índice de confiabilidade em função do número de iterações.



Fonte: Autor.

Como o beta é mundialmente usado, existem valores de referência em normas e comitês internacionais. Abaixo é apresentado na Tabela 5 esses valores alvos.

Tabela 5 – Valores de Beta alvo

Referência	β_{alvo}
EN1990:2002 – "*Basis of structural design*"	2,9
JCSS 2000b (custo relativo alto da medida de segurança)	1,3
JCSS 2000b (custo relativo moderado da medida de segurança)	1,7
JCSS 2000b (custo relativo baixo da medida de segurança)	2,3

Conclusões

O estudo realizado neste trabalho foi especificamente para a seção do meio do vão de uma viga bi apoiada, porém, para outros sistemas estruturais podem ter casos mais críticos.

Ao analisar os valores de índice de confiabilidade somente G1 e G3 (Equações 1 e 3) apresentam valores maiores em relação ao valor de referência da EN1990:2022 (Tabela 8).

Já para o caso do custo relativo alto da medida de segurança da JCSS2000b, onde o valor de referência é igual a 1,30, todas as equações dos estados limites possuem valores maiores. Somente no caso do custo relativo moderado da medida de segurança, o caso G4 (equação 4) possui valor de beta menor que o preconizado pela JCSS2000b.

A adoção de distribuições diferentes para as variáveis aleatórias altera significativamente os valores de probabilidade de falha ou índice de confiabilidade.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; (2014) *Projeto de estruturas de concreto - Procedimento - NBR 6118*. Rio de Janeiro, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; (2013) *Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas - NBR 7188*. Rio de Janeiro, Brasil.

BARTLETT, F. M., AND J. G. MACGREGOR; (1996) *Statistical Analysis of the Compressive Strength of concrete in Structures*. ACI Materials Journal 93 (2): 158–168.

CAPRANI, C. C., MAYER M. M. E SIAMPHUKDEE K. *Reliability analysis of a Super-T prestressed concrete girder at serviceability limit state to AS 5100:2017*. Australian Journal of Structural Engineering.

JCSS. 2000b. *Probabilistic Model Code – Part 1*. Joint Committee on Structural Safety

NOWAK, A. S., e K. R. COLLINS; (2013) *Reliability of Structures*. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press.

RAKOCZY, A. M., E A. S. NOWAK; (2013) *Reliability-based Sensivity Analysis for Prestressed Concrete Girder Bridges*. PCI Journal.