

# ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE UMA VIGA PRÉ-MOLDADA PROTENDIDA DIMENSIONADA AO ESFORÇO CORTANTE PRECONIZADO PELA NORMA BRASILEIRA

Gustavo Bevilacqua Maia <sup>1</sup>; Pedro Henrique Cerento de Lyra <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

<sup>2</sup> Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

**Resumo.** *O presente estudo aborda a análise de confiabilidade de uma viga protendida dimensionada ao esforço cortante, na situação de estado limite último, baseado na ponte-modelo padrão do Departamento de Estradas e Rodagens (DER) com vão de 40 metros. Já definido o sistema estrutural, foi necessário o cálculo da solicitação gerada pelo esforço cortante das cargas variáveis, definidos pelo software FTOOL e o dimensionamento de sua armadura transversal para a posterior análise da confiabilidade. Com isso, foi possível utilizar o Método de Monte Carlo através do software Microsoft Excel e realizar milhares de simulações para calcular a probabilidade de falha da estrutura. Com esses resultados, foi feita uma análise de confiabilidade comparando os índices de confiabilidade preconizados por normas internacionais e sua respectiva probabilidade de falha, podendo concluir se a ponte possui um alto, médio ou baixo risco para ruptura. De dois casos estudados, em apenas um o valor do índice de confiabilidade ficou maior do que o preconizado pelas normas.*

## Introdução

No Brasil, o modal predominante para o transporte de cargas e pessoas é o rodoviário. Por isso, se faz necessária a construção de rodovias que conectem o país e muitas vezes, a paisagem torna-se interferente nesse processo. Para evitar o desmatamento, há a construção de pontes rodoviárias. Porém, o projeto e o dimensionamento desse tipo de infraestrutura dependem de muitas variáveis e que nem sempre são previsíveis. Então, o estudo da probabilidade de falha, levando em consideração tais variáveis, é muito importante.

Dentre as variáveis, incluem as dimensões, a armadura e as forças que estão agindo sobre a viga, sendo elas a carga móvel, peso próprio e força de protensão. Com o estudo da confiabilidade, faz-se a variabilidade aleatória de ocorrência de cada uma e calcula-se a probabilidade de falha, que se dá quando os esforços resistentes são menores do que os esforços solicitantes. Esse resultado possibilita saber qual a influência de cada variável aleatória na probabilidade de falha.

A incerteza dos parâmetros envolvidos na análise estrutural é conhecida como um fator importante que influencia a segurança estrutural (Pulido *et al.*, 1992). A existência de incertezas nesses parâmetros contribui para que se tenha uma probabilidade não nula de que a estrutura não atenda aos objetivos para os quais ela fora concebida.

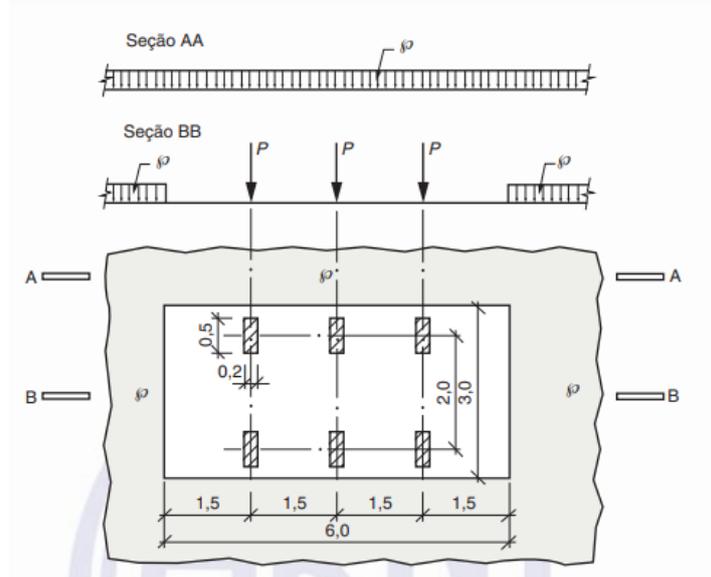
É imprescindível que a segurança das normas brasileiras seja feita de acordo com a teoria da confiabilidade estrutural, permitindo quantificar a segurança delas com base nas incertezas existentes e, com isso, calibrar as normas brasileiras já existentes. Além disso, um fator importante para os projetos é o fator financeiro, já que o Brasil é um país com problemas desse tipo, então é interessante essa calibração para adequá-las à realidade brasileira.

O dimensionamento da viga pré-moldada protendida levou em consideração apenas o esforço cortante em seu estado limite último (ELU), preconizado pela NBR 6118 (2014). Para o estudo da segurança, utiliza-se a teoria da confiabilidade tanto para o ELU quanto para o estado limite de serviço (ELS) ao analisar o esforço cortante de tais estruturas. Com o resultado, é possível medir o grau de segurança da ponte durante o seu tempo de vida.

## Carga móvel

Para descobrir o valor da carga móvel que atua sobre a ponte, utilizou-se o modelo-padrão TB-450 de carga móvel seguindo a NBR 7188 (2013).

Figura 1 - Modelo-padrão de carga móvel TB-450



Fonte: NBR 7188 (2013)

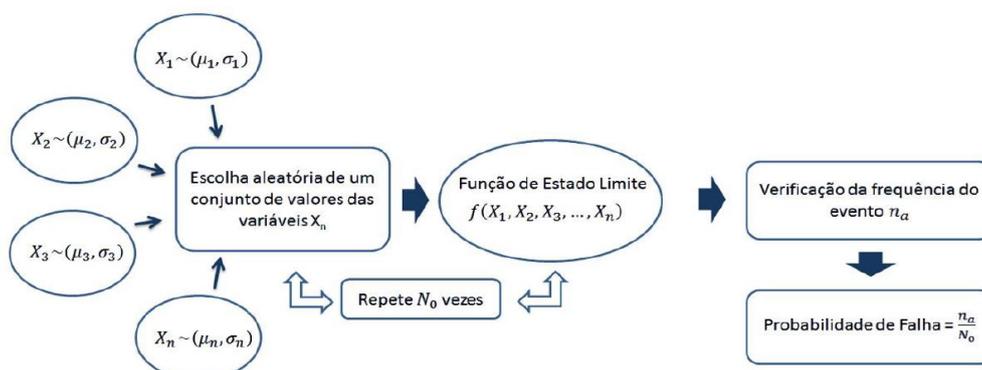
A ABNT NBR 7188 (2013) apresenta três coeficientes: o coeficiente de impacto vertical (CIV), o coeficiente de número de faixas (CNF) e o coeficiente de impacto adicional (CIA). O primeiro amplifica a ação da carga estática, simulando o efeito da carga dinâmica. Além disso, deve ser considerado no dimensionamento de todos os elementos estruturais. O segundo leva em conta a probabilidade de a carga móvel ocorrer em função do número de faixas. Já o último é destinado à majoração da carga móvel devido à imperfeição e/ou descontinuidade da faixa de rolamento.

### Método de Monte Carlo

Para o estudo da confiabilidade estrutural, utilizou-se o Método Monte Carlo. Esse método consiste em elencar as variáveis aleatórias do problema em questão e, através da média e do desvio-padrão de cada uma, gerar um número aleatório entre 0 e 1, que representa a probabilidade de a variável adquirir aquele valor e realizar milhares de simulações a fim de se obter a probabilidade de falha.

Esse método é robusto e confiável, porque não depende da função do estado-limite em questão e sim do número de simulações e de variáveis. Então, quanto mais simulações ocorrerem, mais preciso e confiável será o resultado.

Figura 2 - Fluxograma do Método de Monte Carlo.

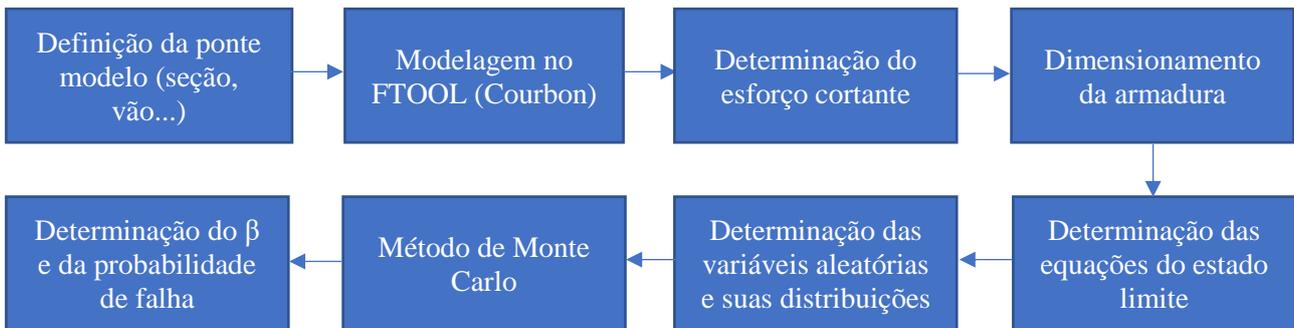


Fonte: Souza (2013)

## Material e Métodos

Para a realização do estudo, foi elaborado um fluxograma do trabalho feito.

Figura 3 – Fluxograma da Metodologia.



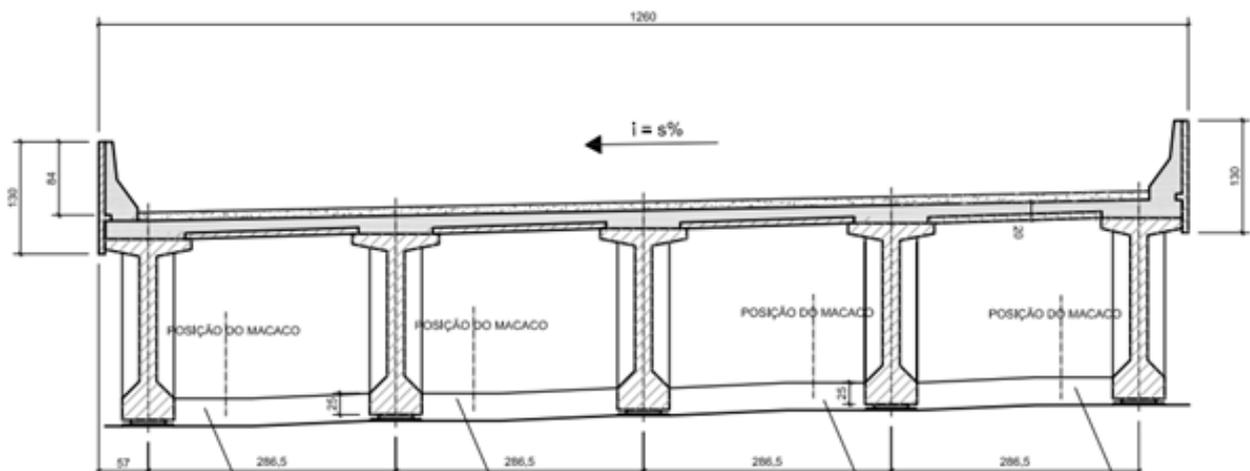
Fonte: Autor.

### Definição da ponte modelo

O objeto de estudo escolhido foi o projeto padrão do Departamento de Estradas e Rodagem (DER) dimensionada para a carga móvel rodoviária padrão TB-450 da NBR 7188 (2013).

A ponte é composta pelas faixas de rolagem, guarda rodas, longarinas de concreto protendidas, laje e transversina de concreto armado e possui um vão longitudinal de 40 metros de comprimento. Já a sua largura transversal é de 12,60 metros. A figura 4 apresenta a seção transversal da ponte modelo.

Figura 4 – Seção transversal da ponte. (Medidas em centímetros)



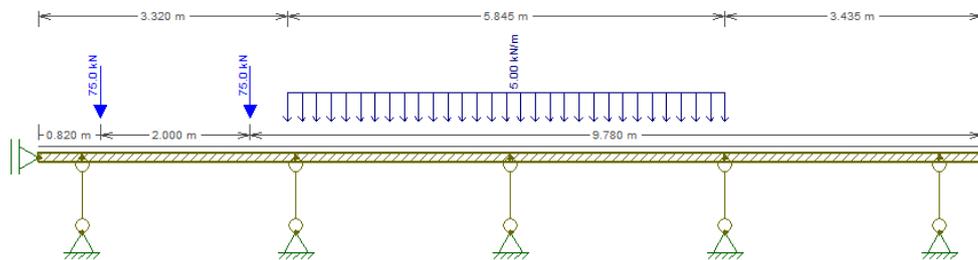
Fonte: DER

### Modelagem feita no FTOOL

Para a modelagem da seção transversal, utilizou-se o software *FTOOL*. As vigas em estudo foram modeladas seguindo o modelo elástico. Em seguida, adicionou-se a carga móvel para se

determinar o maior valor da força cortante através das linhas de influência. Para este trabalho, foi estudada apenas a viga de borda.

Figura 5 – Modelagem da seção transversal da ponte modelo junto com o trem tipo



Fonte: Autor.

A constante elástica das molas verticais segue a seguinte equação:

$$k_{vert} = \left(\frac{\pi}{L}\right)^4 * EI \quad (I)$$

onde

- $L$  largura do vão bi apoiado;
- $E$  módulo de elasticidade do concreto;
- $I$  momento de inércia da longarina.

Para os valores do módulo de elasticidade e momento de inércia, foi utilizado o memorial de cálculo PP-MC-C01/016 (2005) do projeto padrão estrutural da ponte modelo do Departamento de Estradas e Rodagem.

Como foi utilizado o método de Courbon, adota-se que no modelo há a presença da longarina e da transversina, que serve para evitar a torção da longarina e trabalhar a sua flexão.

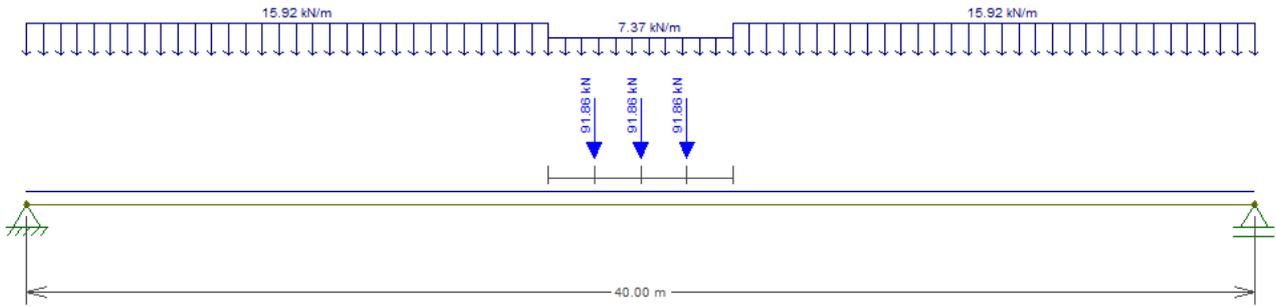
#### Determinação do esforço cortante

Após gerar a linha de influência pelo software *FTOOL*, foi encontrado três valores para a força cortante, sendo:

- $q$  força cortante concentrada
- $q_e$  força cortante distribuída exteriormente à carga móvel
- $q_i$  força cortante distribuída interiormente à carga móvel

Com esses três valores, modelou-se a ponte-modelo longitudinalmente, com vão bi apoiado de 40 metros e determinou-se a força cortante resultante do carregamento móvel.

Figura 5 – Modelo longitudinal com os valores das forças cortantes



Fonte: Autor.

### Dimensionamento da armadura

Com o esforço cortante determinado, foi possível dimensionar a armadura transversal da viga pré-moldada utilizando a NBR 6118 (2014).

As equações utilizadas foram:

$$V_{sd} = V_q * \gamma_q + V_g * \gamma_g - V_{p\infty} \quad (\text{II})$$

$$V_{Rd2} = 0,27 \left( 1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) f_{cd} b_w d \quad (\text{III})$$

$$V_c = 0,6 f_{ctd} b_w d \quad (\text{IV})$$

$$V_{sw} = V_{sd} - V_c \quad (\text{V})$$

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{sw}}{0,9 d f_{ywd}} \quad (\text{VI})$$

Onde

- $V_{sd}$  força cortante de cálculo solicitada na seção
- $V_q$  força cortante devido ao carregamento móvel
- $\gamma_q$  coeficiente de segurança para o carregamento móvel ( $\gamma_q = 1,50$ )
- $V_g$  peso próprio da viga
- $\gamma_g$  coeficiente de segurança para carga permanente ( $\gamma_g = 1,35$ )
- $V_{p\infty}$  protensão após todas as perdas imediatas e progressivas
- $V_{Rd2}$  força cortante resistente de cálculo
- $f_{ck}$  resistência característica à compressão do concreto
- $f_{cd}$  resistência de cálculo à compressão do concreto
- $b_w$  largura da alma da viga
- $d$  altura útil
- $V_c$  parcela da força cortante absorvida pelo concreto
- $f_{ctd}$  resistência do concreto à tração direta
- $f_{ywd}$  tensão na armadura transversal passiva
- $V_{sw}$  parcela da força cortante solicitante resistida pela armadura transversal
- $\frac{A_{sw}}{s}$  armadura transversal por unidade de comprimento da viga

### Determinação das equações do estado-limite

Abaixo estão representadas as duas equações do estado-limite que serão utilizadas para realizar o teste de confiabilidade através do método de Monte Carlo, sendo a primeira referente à armadura transversal e a segunda, à biela de compressão.

$$g_1(x) = \frac{A_{sw}}{s} 0,9 d f_{yw} + 0,6 f_{ctm} b_w d - (V_g + V_q - V_{p\infty}) \quad (\text{VII})$$

$$g_2(x) = 0,27 \left( 1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) f_{cd} b_w d - (V_g + V_q - V_{p\infty}) \quad (\text{VIII})$$

### Determinação das variáveis aleatórias e suas distribuições

Na Tabela 1 estão apresentadas todas as variáveis aleatórias que foram utilizadas nesse estudo, tais como suas distribuições, seus valores médios e desvios-padrões.

Tabela 1 – Distribuição e valores das variáveis aleatórias

<b>VÃO DE 40 METROS</b>							
<b>V.A</b>	<b>Unidade</b>	<b>Distribuição</b>	<b>Valor</b>	<b><math>\mu</math></b>	<b>C.V</b>	<b>s</b>	<b>Fonte</b>
$A_{sw}/s$	mm <sup>2</sup> /mm	Normal	1,12	1,12	0,01	0,0112	Santiago et al. (2019)
d	mm	Normal	2100	2100	4+0,006 $\mu$	16,6	Santiago et al. (2019)
$b_w$	mm	Normal	200	200	4+0,006 $\mu$	5,2	Santiago et al. (2019)
$f_{yw}$	N/mm <sup>2</sup>	Normal	500	610	0,04	24,4	Santiago et al. (2019)
$f_{ctm}$	N/mm <sup>2</sup>	Normal	1,70	1,819	0,015	0,027285	Santiago et al. (2019)
$f_{ck}$	N/mm <sup>2</sup>	Normal	35	41,65	0,13	5,4145	Santiago et al. (2019)
$f_{cd}$	N/mm <sup>2</sup>	Normal	25,90	30,821	0,13	4,00673	Santiago et al. (2019)
$V_g$	N	Normal	852090	852090	0,015	12781,35	Santiago et al. (2019)
$V_q$	N	Gumbel	547300	547300	0,55	301015	Ellingwood et al. (1980)
$V_{p\infty}$	N	Normal	746100	746100	0,15	111915	Santiago et al. (2019)

### Método de Monte Carlo

Com as variáveis aleatórias definidas, tais como as suas distribuições, médias e desvio-padrão, realizou-se o teste da confiabilidade através do Método de Monte Carlo utilizando o software Excel. Para tal, foi necessário baixar e habilitar o complemento NtRand para que a inversa da função da distribuição Gumbel fosse disponibilizada para uso.

### Determinação da probabilidade de falha

Através do software Excel e do método de Monte Carlo, foi possível obter as probabilidades de falha pelas simulações em (IX) e os índices de confiabilidades em (X).

$$P_f = \frac{n(g(X) \leq 0)}{N} \quad (\text{IX})$$

$$\beta = \frac{E[g(X)]}{\text{var}[g(X)]} \quad (\text{X})$$

Onde

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

## Resultados e Discussão

A tabela 2 apresenta as probabilidades de falha para cada equação do estado-limite e a tabela 3, os respectivos índices de confiabilidade.

Tabela 2 – Probabilidade de Falha.

	Número de Ocorrências De Falhas	Número de Eventos	Probabilidade de Falha
$g_1$	6234	1.046.902	5,95E-03
$g_2$	136	1.046.902	1,30E-05

Fonte: Autor.

Tabela 3 – Índice de confiabilidade para as equações do estado-limite utilizando o Método de Monte Carlo.

	$g_1$	$g_2$
<b>Média</b>	1095950	2259403
<b>Desvio Padrão</b>	326326,4	495768,1
<b>Beta</b>	3,358	4,557

Fonte: Autor.

Como o  $\beta$  é mundialmente usado, existem valores de referência em normas e comitês internacionais. Na tabela 4, são apresentados os valores da norma ACI 318, dos Estados Unidos da América e a EN1990:2004, Eurocódigo.

Tabela 4 – Valores de  $\beta_{alvo}$

Referência	$\beta_{alvo}$
ACI 318	3,5
EN1990:2004 – “Basis of structural design”	3,8

Fonte: Autor.

## Conclusões

O estudo realizado neste artigo foi especificamente para a viga de borda da ponte-modelo do Departamento de Estradas e Rodagens, porém para outros modelos e para as outras vigas podem ter modelos e situações mais críticas.

Analisando os valores dos índices de confiabilidade gerados nesse estudo, conclui-se que o índice da equação  $g_1$  não satisfaz nenhum dos valores preconizados pelas normas americana e europeia (Tabela 4). Entretanto, o índice da equação  $g_2$  satisfaz os valores alvo de ambas as normas.

Portanto, pode-se concluir que a armadura transversal dimensionada no estudo não foi satisfeita para atingir o valor de  $\beta_{alvo}$  das normas.

## 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.
- BASTOS, PAULO SÉRGIO. *Dimensionamento de vigas de concreto armado à força cortante*. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Março/2021. Notas de Aula. Universidade Estadual Paulista
- BRAGA, Walter de Almeida *et al.* *MEMÓRIA DE CÁLCULO – PROJETO PADRÃO ESTRUTURAL – TABULEIRO DE 12,60 m x 40,00 m*. [S.L.]: Dersa, 2005. 52 p.
- LYRA, P. H. C. de *et al.* *Reliability analysis of a prestressed bridge beam designed in serviceability limit state as recommended by NBR 6118 and 7188*. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 13, n. 2, p. 380-397, 19 abr. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952020000200010>.
- SANTIAGO, WAGNER CARVALHO *et al.* *Reliability-based calibration of main Brazilian structural design codes*. Latin American Journal Of Solids And Structures, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 1-28, 05 ago. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1679-78255754>.
- SANTOS, DANIEL MIRANDA *et al.* *Reliability of beams designed in accordance with Brazilian codes*. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, [S.L.], v. 7, n. 5, p. 723-746, 18 fev. 2014.