

Otimização da proporção entre balanço e vão de pontes de concreto armado de duas longarinas com base na fadiga das armaduras **Daniel Braz¹, José Neres da Silva Filho², Rodrigo Barros³, Normando Lima de Oliveira Filho⁴**

¹Universidade de Brasília / Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil /
danielhlbraz@gmail.com

^{2,3}Universidade Federal do Rio Grande do Norte / Departamento de Engenharia Civil /
jneres@ect.ufrn.br; barroscivil@gmail.com

⁴Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT/SR-PB /
normfilho@yahoo.com.br

Resumo

As pontes e viadutos estão sujeitos a cargas em movimento que causam oscilações de tensões e, conseqüentemente, a fadiga dos materiais constituintes, especialmente do aço. A fim de evitar danos estruturais e visando a otimização de projeto, são analisados quatro modelos de ponte de concreto armado de duas longarinas à luz das normatizações brasileiras e europeias. O modelo com proporção de 10% entre as dimensões do balanço e vão foi o mais satisfatório, não somente sobre o ponto da fadiga das armaduras de flexão, mas do ponto de vista econômico. Da comparação dos resultados gerados conclui-se que o tratamento normativo europeu é mais conservador que o brasileiro.

Palavras-chave

Fadiga; pontes de concreto armado; armaduras de flexão.

Introdução

As pontes e viadutos estão sujeitos a cargas em movimento que causam oscilações de tensões e, conseqüentemente, a fadiga dos materiais constituintes, especialmente do aço. Para que danos significativos não ocorram, a satisfação das verificações normativas é indispensável. Além da segurança estrutural, práticas de projeto otimizadoras são bem-vindas e estimuladas.

Com estes aspectos em mente, serão analisados quatro modelos de ponte de concreto armado de duas longarinas, cada um com uma proporção entre o balanço e o vão principal - fixos em 20 m para os quatro modelos -, à luz das recomendações normativas brasileiras e europeias. Dos resultados, será proposta a proporção mais eficiente (vão/balanço), sob o ponto de vista econômico (taxa de armadura) e da fadiga das armaduras.

Fadiga nas armaduras

Conceitua-se fadiga como um modo de ruptura que envolve a formação e crescimento de uma fissura em um componente estrutural, devido às deformações causadas por carregamentos variáveis no tempo (BARONI, 2010). A ruptura ocorre sem que o nível de tensões ultrapasse o limite elástico do material (CAIXETA, 2010). Potencialmente,

qualquer tensão que varie no tempo pode provocar ruptura por fadiga, sendo as mais críticas as variações de maior amplitude e aquelas em que há inversão de sinal (BRAZ, 2016).

No aço, a fadiga caracteriza-se pela ruptura a uma tensão inferior à tensão de escoamento quando submetido a uma dada amplitude de variação de tensões após um grande número de ciclos. Esta tensão, no entanto, deve ser superior ao respectivo limite de fadiga. Influem na fadiga o tipo de aço, as formas das nervuras, o diâmetro e curvatura das barras, emendas, ancoragens e amplitude de variação de tensão. Nota-se que o número de ciclos que ocasiona a fadiga em uma barra é maior quanto menor for a amplitude de variação de tensões na armadura.

Tratamentos normativos

A seguir, apresentam-se os principais aspectos normativos, nacionais e europeus, para o dimensionamento das longarinas dos modelos (Quadro 1) e análise da fadiga do aço das armaduras (Quadro 2).

Quadro 1 - Aspectos normativos do dimensionamento

NBR	Combinação	$F_d = \sum \gamma_g F_{gik} + \gamma_q (F_{q1k} + \sum \psi_{0j} F_{qjk})$
	Carga móvel	Carga rodoviária padrão TB-450
Eurocode	Combinação	$F_d = \sum \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$
	Carga móvel	<i>Load model 1</i> (Figura 1)

A ABNT NBR 7188:2013, além de definir o veículo de projeto TB-450, estabelece coeficientes de ponderação das cargas verticais móveis a saber: CIV (coeficiente de impacto vertical), CNF (coeficiente do número de faixas) e CIA (coeficiente de impacto adicional).

A EN 1991-2:2003, por sua vez, estabelece quatro modelos de carga vertical possíveis, dentre os quais o utilizado nesta análise, o *Load model 1*, apresentado na Figura 1. Nesta constam os valores característicos de Q_{ik} (carga de eixo ou *tandem system* TS) e q_{ik} (uniformemente distribuída ou *UDL system*) com amplificação dinâmica para cada faixa de projeto.

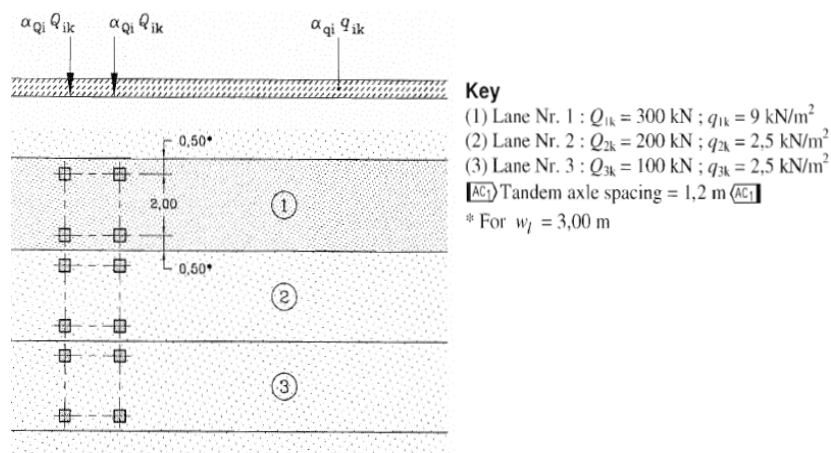


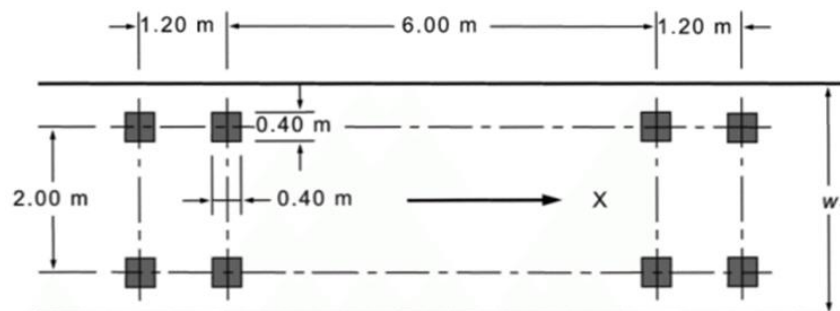
Figura 1 - Load model 1 (EN 1991-2:2003)

Quadro 2 - Aspectos normativos da análise da fadiga do aço das armaduras

NBR	Combinação	$F_{d,ser} = \sum_{i=1}^m F_{gik} + \psi_1 F_{q1k} + \sum_{j=2}^n \psi_{2j} F_{qjk}$
	Verificação	$\gamma_f \cdot \Delta\sigma_{SS} \leq \Delta f_{sd,fad}$
Eurocode	Combinação	$F_d = \sum G_{k,j} + \psi_{1,1} Q_{k,i} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} + Q_{fat}$
	Verificação	$\gamma_{F,fat} \cdot \Delta\sigma_{s,equ} (N^*) \leq \frac{\Delta\sigma_{Rsk} (N^*)}{\gamma_{S,fat}}$
	Carga móvel	<i>Fatigue load model 3</i> (Figura 2)

Conforme o Quadro 2, a verificação nacional da fadiga do aço é satisfeita se a máxima variação de tensão calculada $\Delta\sigma_s$ para a combinação frequente de cargas for, no máximo, igual $\Delta f_{sd,fad}$. Os valores desta resistência à fadiga são apresentados pela ABNT NBR 6118:2014, e.g. 185 MPa ($\phi = 20$ mm), 175 MPa ($\phi = 25$ mm) e 165 MPa ($\phi = 32$ mm) para armadura passiva, aço CA-50, 2×10^6 ciclos e barras retas ou dobradas com $D \geq 25\phi$.

Diferentemente da normatização brasileira, o Eurocode traz cinco modelos de carga móvel específicos para a análise da fadiga, dentre os quais o *Fatigue load model 3* (Figura 2), dotado de 120 kN por eixo.



Key
 w_1 : Lane width
 X: Bridge longitudinal axis

Figura 2 - *Fatigue load model 3* (EN 1991-2:2003)

Segundo o Anexo B da EN 1991-2:2003, para camadas novas de pavimento de boa rugosidade, adota-se fator de amplificação dinâmica $\phi_{fat} = 1,2$. Especificamente para a verificação do aço, as ações de eixo do *Fatigue load model 3* devem ainda ser multiplicadas por 1,75 (verificação da tensão em apoios intermediários em pontes contínuas) ou 1,40 (verificação em outras áreas) para determinação da amplitude de tensão $\Delta\sigma_{s,Ec}$. A partir desta calcula-se a amplitude de tensão solicitante $\Delta\sigma_{s,equ}$, sendo λ_s o fator de dano equivalente para fadiga que leva em conta condições específicas, como volume de tráfego, vida de projeto e dimensão do vão.

Salienta-se que o Eurocode considera a resistência à fadiga do aço das armaduras $\Delta\sigma_{Rsk}$, para barras retas e dobradas e 10^6 ciclos, independentemente do diâmetro das barras e igual a 162,5 MPa.

Modelos propostos

Os quatro modelos de pontes hiperestáticas, com f_{ck} de 50 MPa, aço CA-50 e vãos principais de 20 m são designados como (1) M1-B2m de balanços de 2 m; (2) M2-B3m de balanços de 3 m; (3) M3-B4m de balanços de 4 m; e (4) M4-B5m de balanços de 5 m.

A seção transversal dos três modelos possui 13,0 m de extensão, sendo 6,60 m entre os eixos das longarinas e 3,2 m entre estes eixos e as extremidades dos balanços. A superestrutura é composta por transversinas de 1,60 m de altura e bases de 25,0 cm, conforme a Figura 3, dispostas a coincidir com o meio do vão e apoios; por longarinas de 2,0 m de altura e bases que variam do meio do vão aos apoios de 50,0 cm para 60,0 cm (Figuras 4 e 5); lajes de 25 cm de altura; pavimento asfáltico com inclinação de 1% a partir do centro do tabuleiro - 13,1 cm de espessura no centro e 7,0 cm na extremidade. Além destes, as pontes contam com elementos complementares, como barreira lateral, pingadeira, aba lateral, cortina e laje de transição.

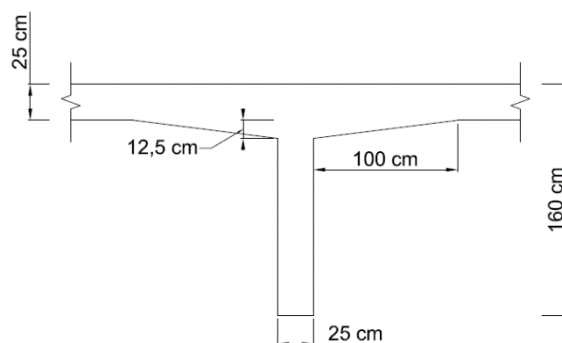


Figura 3 - Detalhes geométricos das transversinas

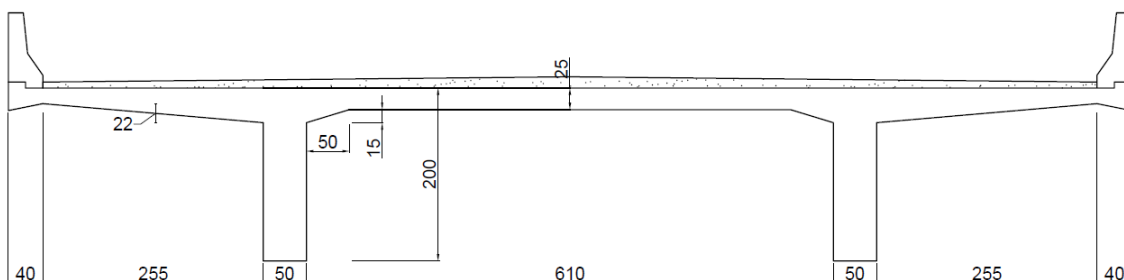


Figura 4 - Seção transversal na seção média dos vãos principais (cm)

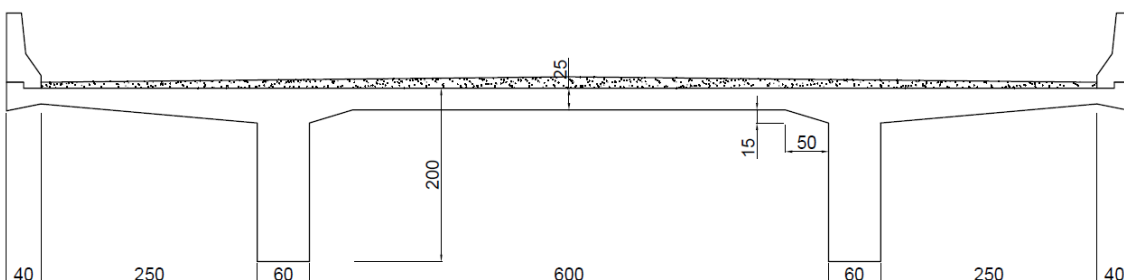


Figura 5 - Seção transversal nos apoios (cm)

Conhecidas as geometrias dos elementos, levantam-se as ações permanentes diretas sobre as pontes. Para tal, consideram-se os pesos específicos de 25 kN/m^3 para o concreto armado e 24 kN/m^3 para o pavimento asfáltico, além de uma carga adicional de recapeamento de 2 kN/m^2 . Os valores resultantes são expostos na Tabela 1. Adiante, apresenta-se o esquema estrutural representativo dos quatro modelos. Destes, são determinadas as intensidades de momento fletor permanente direto sobre as longarinas.

Tabela 1 - Ações permanentes diretas

Ações permanentes	Valor
Peso próprio da meia seção transversal na seção de meio de vão	98,40 kN/m
Peso próprio da meia seção transversal na seção de apoio	102,73 kN/m
Peso das transversinas e mísulas intermediárias	35,27 kN
Peso das transversinas e mísulas nos apoios	34,69 kN
Pesos da cortina, aba lateral, mísula no encontro e laje de transição	287,59 kN

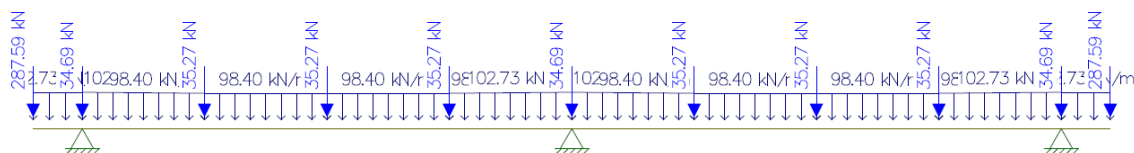


Figura 7 - Esquema estrutural das longarinas (Ftool v. 3.01)

As intensidades de momento variável para o dimensionamento são definidas a partir das cargas móveis apresentadas (TB-450 e *Load model 1*).

Das envoltórias resultantes, definem-se as seções T para as longarinas, segundo critérios da seção 14.6.2.2 *Largura colaborante de vigas de seção T* da ABNT NBR 6118:2014 e da seção 5.3.2.1 *Effective width of flanges* da EN 1992-1-1:2004. As seções resultantes dos critérios normativos são explicitadas na Tabela 2.

Conclusões

Com base nos momentos fletores de projeto, obtidos a partir das combinações de ações apresentadas no Quadro 1, determinam-se as áreas de armadura de flexão segundo os procedimentos normativos em análise. As armaduras calculadas são expostas na Tabela 2.

Tabela 2 - Armaduras de flexão

Modelo	Posição	NBR				Eurocode			
		Positiva		Negativa		Positiva		Negativa	
		Seção	n°φ	Seção	n°φ	Seção	n°φ	Seção	n°φ
M1-B2m	Apoio extremo	254 x 200		60 x 200	9φ20	257 x 200		60 x 200	26φ16
	Seção média	254 x 200	37φ20	50 x 200		257 x 200	30φ25	50 x 200	4φ25
	Apoio central	254 x 200		60 x 200	37φ25	257 x 200		60 x 200	42φ25
M2-B3m	Apoio extremo	224 x 200		60 x 200	10φ25	428 x 200		60 x 200	10φ32
	Seção média	224 x 200	36φ20	50 x 200		428 x 200	25φ25	50 x 200	4φ25
	Apoio central	224 x 200		60 x 200	22φ32	428 x 200		60 x 200	24φ32
M3-B4m	Apoio extremo	174 x 200		60 x 200	38φ16	418 x 200		60 x 200	15φ32
	Seção média	174 x 200	37φ20	50 x 200		418 x 200	15φ32	50 x 200	4φ25
	Apoio central	174 x 200		60 x 200	21φ32	418 x 200		60 x 200	24φ32
M4-B5m	Apoio extremo	112 x 200		60 x 200	14φ32	404 x 200		60 x 200	19φ32
	Seção média	112 x 200	14φ32	50 x 200	7φ20	404 x 200	37φ20	50 x 200	7φ20
	Apoio central	112 x 200		60 x 200	20φ32	404 x 200		60 x 200	37φ25

Para a determinação dos momentos de fadiga das armaduras utilizam-se as combinações definidas no Quadro 2 e os veículos de projeto TB-450 e *Fatigue load model 3*. Com os momentos obtidos calculam-se as amplitudes de tensões solicitantes sobre as armaduras e os respectivos fatores de fadiga, dados pela razão entre as tensões solicitantes e as resistentes definidas em norma. Fatores superiores à unidade indicam a necessidade de se majorar a área de aço das armaduras de flexão para resistir aos efeitos da fadiga. Os fatores obtidos e as taxas de armadura - corrigidas quando necessário - são expostos na Tabela 3.

Tabela 3 - Fatores de fadiga e taxas de armadura obtidos

Modelo	Balanço/vão	Posição	NBR				Eurocode			
			f.f	ω	f.f _{médio}	ω _{média}	f.f	ω	f.f _{médio}	ω _{média}
M1-B2m	10%	Apoio extremo	0,355	0,24%			1,577	0,69%		
		Seção média	0,677	1,16%	0,471	0,971%	2,663	4,44%	1,827	2,421%
		Apoio central	0,380	1,51%			1,241	2,13%		
M2-B3m	15%	Apoio extremo	0,401	0,41%			1,794	1,20%		
		Seção média	0,699	1,13%	0,510	1,005%	3,160	4,50%	2,121	2,656%
		Apoio central	0,430	1,47%			1,409	2,27%		
M3-B4m	20%	Apoio extremo	0,407	0,64%			1,748	1,76%		
		Seção média	0,693	0,97%	0,525	1,004%	3,190	4,48%	2,146	2,882%
		Apoio central	0,474	1,41%			1,500	2,41%		
M4-B5m	25%	Apoio extremo	0,463	0,94%			1,833	2,33%		
		Seção média	0,855	1,12%	0,616	1,133%	3,335	4,61%	2,282	3,161%
		Apoio central	0,530	1,34%			1,678	2,54%		

Os resultados demonstram que a fadiga das armaduras, representada pelo fator de fadiga médio, tende a crescer com o aumento da proporção entre balanço e vão como indica a Figura 8 e a Tabela 3.

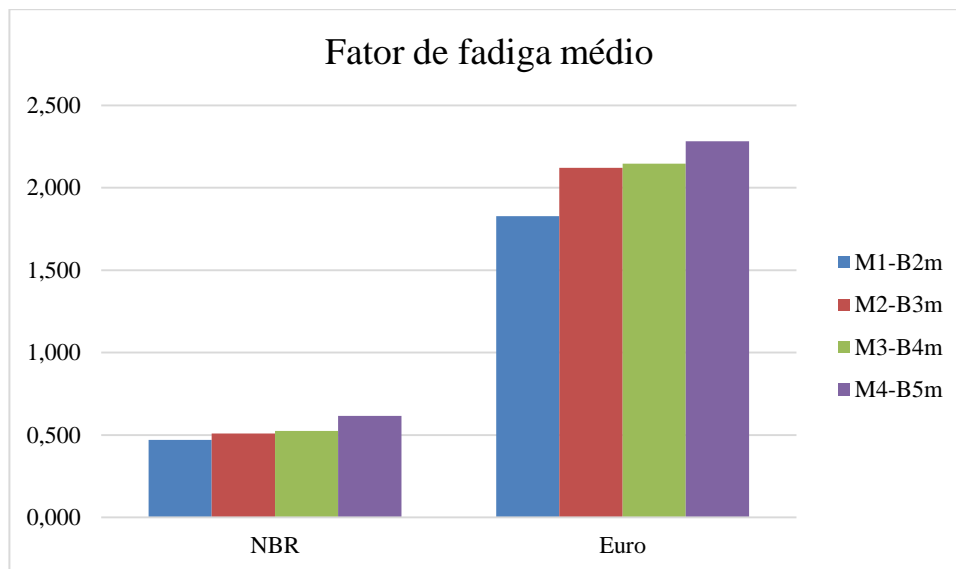


Figura 8 - Gráfico comparativo dos fatores de fadiga médios

Dos modelos estudados, o M1-B2m apresentou a menor taxa de armadura média por ambos procedimentos normativos, conforme indicado na Figura 9. Portanto, a proporção de 10% entre as dimensões do balanço e do vão principal é a mais satisfatória, não somente do ponto de vista da fadiga das armaduras de flexão, mas do ponto de vista econômico. Este é um indicativo de que, havendo diferentes possibilidades de dimensão de balanço ao projetista, considerando fixas as dimensões dos vãos principais, é preferível a opção por balanços menores.

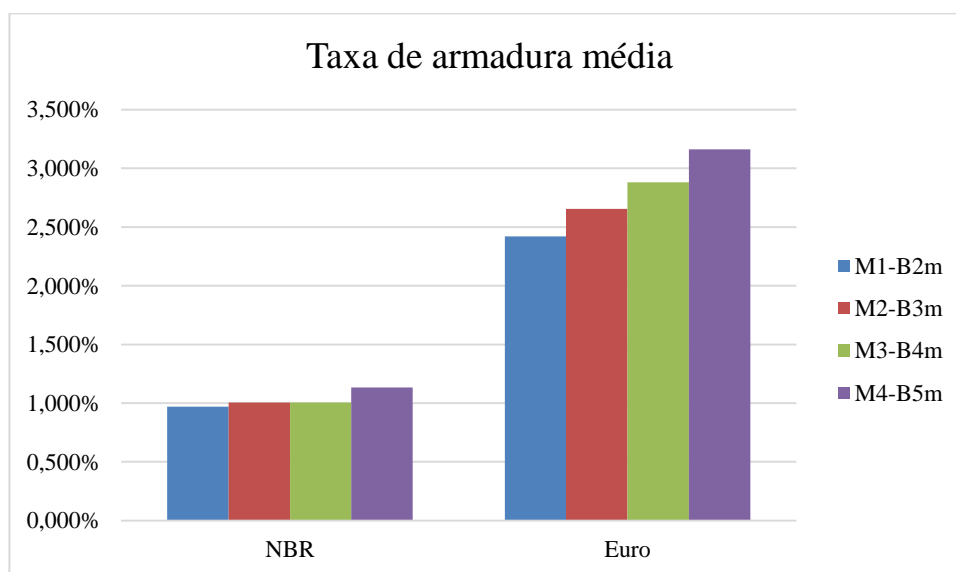


Figura 9 - Gráfico comparativo das taxas de armadura médias



Ao comparar-se os resultados gerados pelos tratamentos normativos estudados, conclui-se que o tratamento normativo europeu se mostrou mais conservador que o brasileiro no que diz respeito à fadiga das armaduras e ao dimensionamento. Este comportamento é um reflexo do rigor normativo europeu que adota veículos de projeto e coeficientes de majoração das cargas específicos para a fadiga, bem como um único valor de resistência à fadiga para as diferentes bitolas de armadura.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7187: Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7188: Carga móvel rodoviária e de pedestre em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. 2 ed. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- BARONI, Henriette Justina Manfredini. Simulação da vida útil de fadiga do concreto em vigas de tabuleiro de pontes em função do fluxo de veículos pesados. 2010. 284 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- BRAZ, Daniel Higor Leite. Avaliação da fadiga à flexão em pontes hiperestáticas com duas longarinas retas em concreto armado. 2016. 82 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.
- CAIXETA, Edielce Cristina. Investigação experimental da fadiga em lajes de pontes com ou sem pré-lajes. 2010. 173 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1990: Eurocode: Basis of structural design. Brussels, 2005.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1991-2: Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges. Brussels, 2003.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1992-1-1: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels, 2004.
- MARTHA, Luiz Fernando. Ftool - Two-Dimensional Frame Analysis Tool, versão 3.01. Rio de Janeiro, 2015.