

## **Estudo de Viga Pré-Moldada Tipo I para Tabuleiro de Pontes Rodoviárias até 30m**

**Joaquim E. Mota<sup>1</sup>, Magnólia M. Campêlo Mota<sup>2</sup>, Juliana Jesus Gondim<sup>3</sup>.**

<sup>1</sup>Universidade Federal do Ceará / Professor do DEECC / [jemota@fortalnet.com.br](mailto:jemota@fortalnet.com.br)

<sup>2</sup>Universidade Federal do Ceará / Professora do DEECC / [magnolia.campelo@ufc.br](mailto:magnolia.campelo@ufc.br)

<sup>3</sup>Universidade Federal do Ceará / Enga. Civil / [julianaJesusg@gmail.com](mailto:julianaJesusg@gmail.com)

### **Resumo**

O sistema construtivo de tabuleiros de pontes rodoviárias com vigas tipo I pré-moldadas e protendidas evoluiu conjuntamente com os avanços no concreto e na técnica da protensão ao longo de toda a segunda metade do século XX, consagrando-se mundialmente como uma alternativa muito competitiva para pontes numa faixa de vão que vai de 12m até 50m, atendendo assim a um percentual muito elevado da demanda de obras d'artes especiais.

No Brasil os valores usualmente adotados para o pré-dimensionamento das vigas do sistema partem de uma esbelteza média  $(L/H)=18$  e de um espaçamento entre vigas dado por  $(L/36+2,0)(m)$  o que resulta numa faixa de entreixo entre 2,30m e 3,40m. ( $L$ =vão teórico,  $H$ =altura total do tabuleiro: viga+laje).

Neste artigo é apresentado um estudo de viabilidade de utilização de uma viga I pré-moldada e protendida pelo sistema de pré-tração com esbelteza média  $(L/H)=25$  com faixa de entreixo entre 0,50m (vigas justapostas) e 1,50m. A ideia é ofertar uma viga mais leve, com peso máximo de até 15 tf, permitindo a sua movimentação por equipamentos de pequeno e médio porte para ser utilizada em tabuleiros de pontes rodoviárias com vão de até 30m.

Os resultados finais são apresentados em forma de gráficos relacionando vão, armadura de protensão e entreixo, sendo úteis para avaliação de custos numa fase de elaboração de projeto básico e de propostas comerciais.

### **Palavras-chave**

Pontes rodoviárias; vigas pré-moldadas; concreto protendido.

### **Introdução**

Inaugurada no Rio de Janeiro, no início de 1949, a chamada ponte do galeão é a obra pioneira que marca o início da utilização da protensão e também do sistema construtivo de tabuleiros de pontes com vigas tipo I pré-moldadas e protendidas no Brasil. Detalhes históricos do projeto e da execução desta obra podem ser encontrados na magnífica obra "O Concreto no Brasil – Volume 1", Vasconcelos (2000).

Este sistema construtivo evoluiria conjuntamente com os avanços no concreto e na técnica da protensão ao longo de toda a segunda metade do século XX, consagrando-se mundialmente como uma alternativa muito competitiva para pontes numa larga faixa de vão que vai de 12m até 50m, atendendo assim a um percentual muito elevado da demanda de obras d'artes especiais.



**Figura 1 – Foto da construção da ponte do galeão.**

Os principais atrativos deste sistema construtivo são a redução dos prazos de obra e a eliminação do cimbramento. A protensão, por sua vez, viabiliza o sistema permitindo a utilização de vigas esbeltas com excelente desempenho e durabilidade. Sem a presença de nível de água elevado, situação de viadutos e pontes em rios temporários, a obra pode ser montada com o uso de guindastes, em caso contrário, recorre-se a equipamentos que se deslocam apoiando-se na própria mesoestrutura da ponte como é o caso das treliças lançadeiras. Praticamente a única limitação a ser considerada no sistema é a da disponibilidade dos equipamentos de movimentação.

No Brasil o sistema vem sendo utilizado de forma intensa e crescente seja na forma mais popular com protensão do tipo pós-tensão aderente com vigas moldadas em canteiro de pré-moldado junto à obra, seja com protensão do tipo pré-tração em pistas com vigas moldadas em fábricas.

Valores usualmente adotados no Brasil para o pré-dimensionamento das vigas do sistema partem de uma esbelteza média  $(L/H)=18$  e de um espaçamento entre vigas dado por  $(L/36+2,0)(m)$  o que resulta numa faixa de entreixo entre 2,30m e 3,40m. ( $L$ =vão teórico,  $H$ =Altura total do tabuleiro: viga+laje)

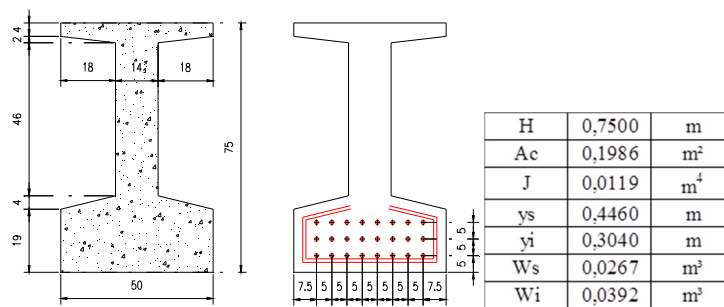
Neste artigo é apresentado um estudo de viabilidade de utilização de uma viga I pré-moldada e protendida pelo sistema de pré-tração com esbelteza média  $(L/H)=25$  com faixa de entreixo entre 0,50m (vigas justapostas) e 1,50m. A ideia é ofertar uma viga mais leve, com peso máximo de até 15tf, permitindo a sua movimentação por equipamentos de pequeno e médio porte para ser utilizada em tabuleiros de pontes rodoviárias com vão de até 30m.

Os resultados finais são apresentados em forma de gráficos relacionando vão, armadura de protensão e entreixo, sendo úteis para avaliação de custos numa fase de elaboração de projeto básico e de propostas comerciais.

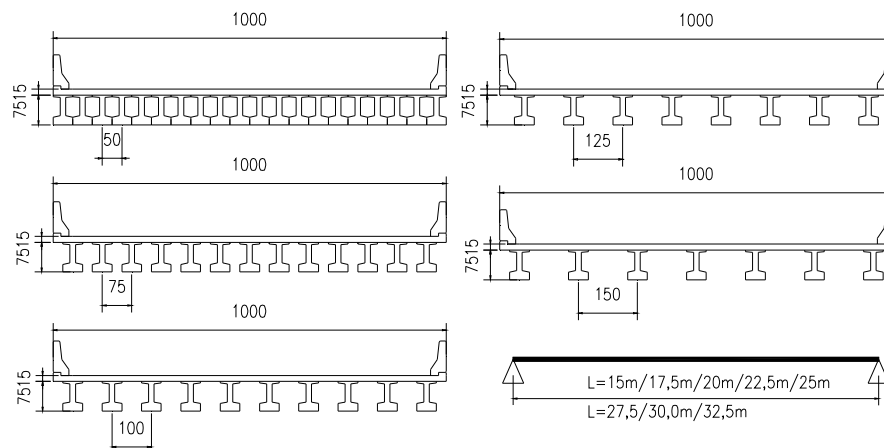
## Perfil Escolhido e Situações Analisadas

O perfil escolhido para análise tem uma geometria inspirada em uma viga apresentada para pontes rodoviárias numa publicação técnica da fábrica de estruturas pré-moldadas italiana RDB. Trata-se de um perfil tipo I com mesa inferior mais espessa para acomodação de três níveis de cordoalhas, ver figura 2.

Considerou-se para estudo um tabuleiro de ponte rodoviária com 10m de largura, com entreixo variando de 0,50m até 1,50m, e vão teórico variando de 15m até 32,5m conforme apresentado na figura 3. A laje tem uma espessura de 15cm complementando uma altura total de construção de 90cm para o tabuleiro.



**Figura 2 – Seção transversal da viga, níveis de cordoalhas e características geométricas.**



**Figura 3 – Seção transversal do tabuleiro, variação do entreixo e do vão.**

Para esta configuração geométrica tem-se uma variação de peso das vigas, valores de espessura média do tabuleiro e de esbeltez que estão exibidos na tabela 1.

**Tabela 1 – Peso das vigas, esbeltez e espessuras médias do tabuleiro.**

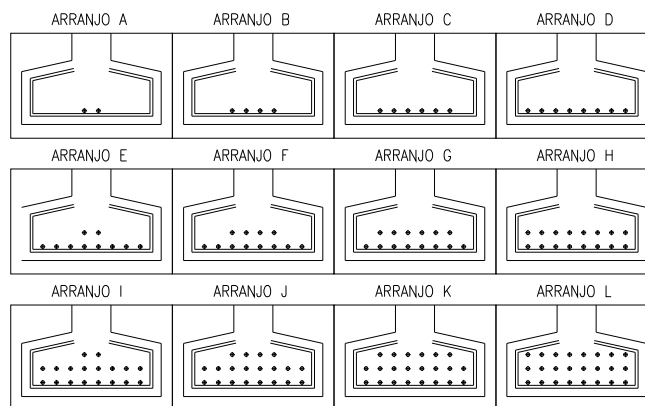
Vão(m)	15,0	17,5	20,0	22,5	25,0	27,5	30,0	32,5
Peso(tf)	7,4	8,7	9,9	11,2	12,4	13,7	14,9	16,1
Esbeltez	17	19	22	25	28	31	33	36
Intereixo (m)	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50			
Espessura Média (cm)	55	41	35	31	29			

A faixa de valores de peso atende ao limite previsto de 15tf para vãos até 30m. Já o consumo de concreto definido pela espessura média do tabuleiro variou de 29cm a 55cm que são valores competitivos com relação a outras alternativas de seções transversais em concreto.



**Figura 4 –Obra em fase de montagem. Ponte sobre o Rio Maranguapinho/Fortaleza/CE vão de 20m intereixo de 1m.**

A protensão do tipo pré-tração é implantada por cordoalhas  $\Phi 12.7\text{mm}$ , aço CP 190-RB, com tensão inicial de protensão na pista igual a 1400MPa. Foram considerados os 12 arranjos de cordoalhas que estão apresentados na figura 5.

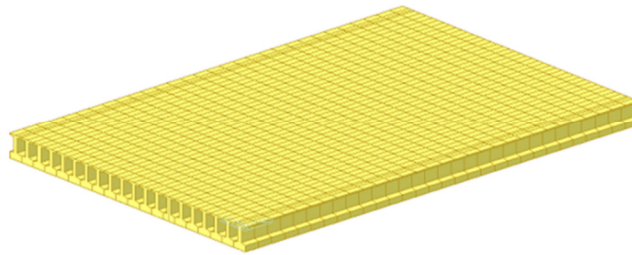


**Figura 5 – Arranjos de cordoalhas  $\Phi 12.7\text{mm}$ -CP190RB**

### Modelos de Análise para Obtenção dos Esforços

A análise do tabuleiro se dá em duas fases, a fase I de viga isolada e a fase II com as vigas trabalhando em conjunto interligadas pela laje do tabuleiro. Na fase I tem-se a situação de viga bi-apoiada, perfil simples, em que atuam a protensão, o peso próprio e o peso do concreto fresco da laje durante a etapa de sua execução. Na fase II tem-se um modelo bidimensional com o comportamento conjunto de vigas e laje em que atuam o peso dos guarda-rodas, peso do revestimento e a carga móvel.

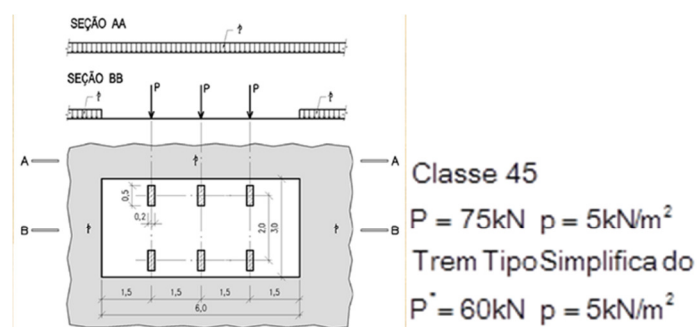
As diversas opções de tabuleiro da fase II foram modeladas pela combinação de elementos finitos de barras e de placa. Na figura 6 tem-se a configuração do caso de vão com 15m e intereixo 0,50m. Utilizou-se na análise o software comercial Midas Civil.



**Figura 6 – Modelo do tabuleiro em elementos finitos de barras e placas.**

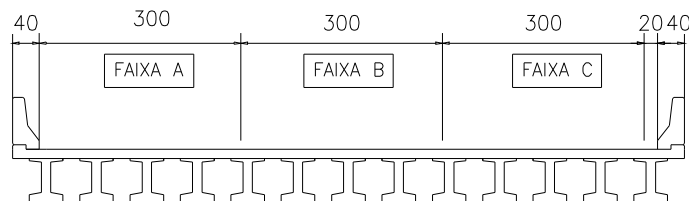
### Detalhes do Modelo de Elementos Finitos

- O material das vigas é um concreto tipo C40 ( $E_{cs}=30\text{GPa}$ ). As vigas têm seção transversal correspondente ao perfil composto incorporando a largura colaborante da laje que depende do entreixo.
- O material da laje é um concreto do tipo C40 ortotrópico com ( $E_{cs}=30\text{GPa}$ ,  $n=0,20$ ). A ortotropia é utilizada para impor um módulo de deformação com valor muito baixo para o material da laje no sentido longitudinal, paralelo às vigas, garantindo assim que toda a flexão longitudinal seja absorvida pelas vigas.
- A carga móvel adotada é a correspondente à classe 45 da norma brasileira NBR7188. Utiliza-se da simplificação permitida na norma considerando-se a carga de multidão  $p$  atuando também na área do veículo compensando-se com a redução no peso das rodas.



**Figura 7 – Trem tipo classe 45 da NBR7188**

- O veículo único pode percorrer a ponte pelas faixas A, B ou C definidas na figura 8 e a carga de multidão é disposta na área útil do tabuleiro na posição mais desfavorável para a solicitação analisada.



**Figura 8 – Faixas de tráfego do veículo de projeto TB45.**

- e) A amplificação dinâmica é considerada pela majoração dos esforços de carga móvel multiplicando-os pelo coeficiente de impacto vertical (CIV) definido na norma NBR7188 pela expressão:

$$CIV = 1 + 1,06 \times \frac{20}{(L_{iv} + 50)} \leq 1,35; L_{iv} < 200m \quad (1)$$

onde, neste caso,  $L_{iv}$  é o valor do vão teórico.

### Critérios de Projeto e Verificações

Na sequência apresentam-se os critérios de projeto considerados para a verificação das vigas.

#### a) Estabilidade Lateral

Uma verificação preliminar é a da estabilidade lateral da viga nas fases de movimentação e montagem. Tratando-se de um estudo genérico e não de projeto executivo específico, a estabilidade lateral pode ser examinada de forma expedita utilizando as expressões da NBR9062.

$$\frac{L}{b_f} \leq 50 \quad (2) \quad e \quad \frac{L \times h}{b_f^2} \leq 500 \quad (3)$$

onde

$L$  = vão teórico definido pelas distâncias entre as alças de içamento ou pontos de apoio.

$h$  = altura da viga.

$b_f$  = menor largura da região comprimida da viga, que na situação transitória é o talão inferior.

Para a faixa de vãos considerados, a tabela 2 apresenta os valores das expressões (02) e (03) acima.

**Tabela 2 – Verificação da estabilidade lateral, expressões da NBR9062.**

Limites	50	500
Vão=L(m)	$L/b_f$	$Lh/(b_f)^2$
15,0	30	45,0
17,5	35	52,5
20,0	40	60,0
22,5	45	67,5
25,0	50	75,0
27,5	55	92,5
30,0	60	90,0

Até o vão de 25m os valores das expressões são menores que os valores limites. Vigas com vão maior que 25m devem ter sua estabilidade lateral

verificada por análises mais aprofundadas como as expostas em El Debs (2017) ou utilizar de acessórios temporários de travamento durante o manuseio e a montagem.

## b) Verificações em Serviço – Estados Limites de Utilização

### b1) Verificação de Tensões no Ato da Protensão

No ato da protensão em que atuam simultaneamente apenas o peso próprio da viga e a protensão com perda imediata, exige-se:

- Respeitar o estado limite de compressão excessiva. Limitação da tensão de compressão máxima no concreto. Tensões calculadas no estágio I.

$$\sigma_{cc,m\acute{a}x} \leq 0,7 f_{ck,j} \quad (4)$$

- Respeitar o estado limite de formação de fissuras. Tensão de tração no concreto não ultrapassa o valor da tensão limite de formação de fissuras.

$$\sigma_{ct,m\grave{m}n} \leq \sigma_{ct,lim} = 1,2 \times 0,3 f_{ct,j}^{(2/3)} \quad (5)$$

O encurtamento do concreto para o cálculo da perda imediata foi obtido pela expressão que garante equilíbrio interno e compatibilidade de deformação aço-concreto logo após a liberação da protensão na pista:

$$\varepsilon_c = \frac{-n\varepsilon_b\rho\left(1+e_p^2\frac{A}{J}\right)}{1+n\rho\left(1+e_p^2\frac{A}{J}\right)} \quad (6)$$

onde

$\varepsilon_b$  = alongamento do aço na pista de protensão no ato da concretagem.

$e_p$  = excentricidade do cabo resultante em relação ao CG.

$A$  = área da seção transversal da viga.

$J$  = momento de inércia à flexão da seção da viga.

$n$  = fator de homogeneização ( $E_p/E_c$ ), relação entre os módulos de deformação aço-concreto no ato da protensão.

$\rho$  = taxa de armadura de protensão ( $A_p/A$ )

### b2) Verificação para combinação quase-permanente no tempo infinito.

Na combinação quase-permanente têm-se os efeitos das seguintes ações.

Fase I: peso próprio ( $g_0$ ) + protensão com perdas imediatas ( $p_0$ ) + peso do concreto fresco da laje ( $g_1$ ), todas atuantes no perfil simples da viga.

Fase II: peso dos guarda rodas e revestimento ( $g_2$ ) + efeito das perdas progressivas de protensão ( $pp$ ) + parcela quase-permanente da carga móvel, todas atuantes no perfil composto da viga.



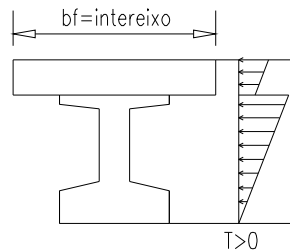
$$C_{qp} : g_o + g_1 + p_0 + g_2 + (\psi_2 \times q) + p_p \quad (7)$$

$\psi_2 = 0,3$  fator de combinação quase-permanente para ponte rodoviária conforme NBR8681.

Para esta combinação exige-se:

- Respeito ao estado limite de descompressão. Seção totalmente comprimida.

$$\sigma_{c,min} \geq 0 \quad (8)$$



**Figura 9 – Situação limite de tensões para combinação quase-permanente.**

As perdas progressivas da protensão foram avaliadas pelo processo simplificado apresentado no item 9.6.3.4.2 da NBR6118.

### **b3) Verificação para combinação frequente no tempo infinito.**

Na combinação frequente têm-se os efeitos das seguintes ações.

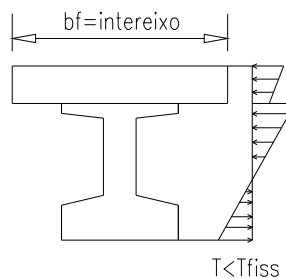
$$C_f : g_o + g_1 + p_0 + g_2 + (\psi_1 \times q) + p_p \quad (8)$$

$\psi_1 = 0,5$  fator de combinação frequente para ponte rodoviária conforme NBR8661.

Para esta combinação exige-se:

- Respeito ao estado limite de formação de fissuras.

$$\sigma_{ct,min} \leq 1,2 \times 0,7 \times 0,3 \times f_{ck}^{(2/3)}$$



**Figura 10 – Situação limite de tensões para combinação frequente.**



## c) Verificações em Estado Limite Último

### c1) Esforço Cortante

Apenas se verifica o não esmagamento da diagonal comprimida do concreto para o cortante máximo.

$$V_d = 1,35 \times (V_{go} + V_{g1} + V_{g2}) + 1,5 \times CIV \times V_q \leq V_{rd2}$$

$$V_{rd2} = 0,27 \times \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \times b_w \times d \quad (12)$$

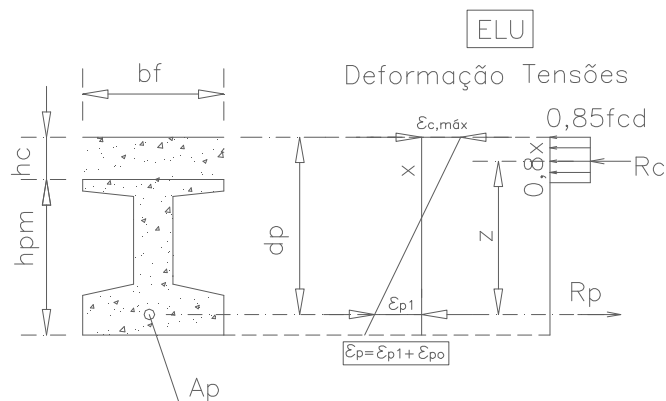
Adotou-se um limite:  $\frac{V_d}{V_{rd2}} \leq 0,80$ .

### c2) Flexão

É feita a verificação do equilíbrio interno da seção do meio do vão que é a mais solicitada à flexão. As armaduras ativas devem garantir segurança à rutura:

$$M_d = 1,35 \times (M_{go} + M_{g1} + M_{g2}) + 1,50 \times CIV \times M_q^+ \leq M_u$$

A armadura ativa existente deve ser maior ou igual à armadura necessária para o estado limite último, portanto não deve haver necessidade de complementação com armaduras passivas.



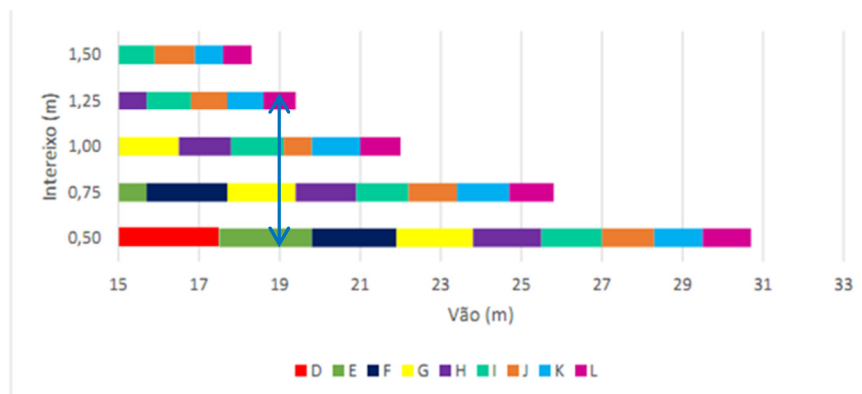
**Figura 11 – Equilíbrio no estado limite último de flexão**

## Resultados

Todos os critérios acima foram implementados numa planilha Excel de forma a automatizar as verificações. Usando as ferramentas de otimização da planilha é possível se obter rapidamente para cada situação de projeto analisada as combinações de interesse e arranjo de armadura que atendem satisfatoriamente aos critérios de projeto.

Os resultados são então organizados em gráficos de barras como o apresentado na figura 12, onde é possível visualizar o campo de aplicação da seção estudada dentro do domínio dos intereixos e arranjos de armadura considerados.

Para um vão de 19m por exemplo, seria possível utilizar as seguintes opções: (Intereixo/Arranjo = I/A: 0,50/E ; 0,75/G ; 1,00/I ; 1,25/L)



**Figura 12 – Visualização do campo de aplicação da viga estudada.**

## Conclusões

Desenvolveu-se uma metodologia automatizada para a determinação do campo de aplicação de uma viga tipo I pré-moldada para tabuleiro de pontes rodoviárias. Acredita-se que esta ferramenta seja útil para empresas de pré-moldados no desenvolvimento de família de produtos e para projetistas na fase elaboração de projeto básico de superestruturas de pontes rodoviárias.

## Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 6118, Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 9062, Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado – Procedimento. Rio de Janeiro, 2017
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 8681, Ações e Segurança nas Estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 7188, Carga Móvel Rodoviária e de Pedestres em Pontes, Viadutos, Passarelas e outras estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro, 2013
- EL DEBS, Mounir K., Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações, 2ª Edição, Ed. Oficina de Textos, 2017
- MANUALETO RDB, Guida per la Progettazione e la Costruzione Edilizia, Edizioni FAG, Milano, 1997
- GONDIM, Juliana J. , Avaliação de Viga de Concreto Pré-Moldado para Pontes Rodoviárias com Vão entre 15 e 35 metros. Monografia de Projeto de Graduação, Curso de Engenharia Civil da UFC, 2016.
- VASCONCELOS, A. C., O Concreto no Brasil, volume 1, Ed. Copiare, São Paulo, 1985