

Análise comparativa entre métodos de alargamento e reforço de pontes de concreto armado

JOSÉ AFONSO PEREIRA VITÓRIO – DOUTOR EM ESTRUTURAS

SÓCIO DE VITÓRIO & MELO LTDA
PROFESSOR CONVIDADO DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UPE

I. INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta um estudo comparativo entre quatro métodos de alargamento de tabuleiros, aplicados a três sistemas estruturais de pontes rodoviárias típicas. Os sistemas estruturais escolhidos são representativos das pontes cadastradas nas rodovias federais brasileiras,

conforme dados do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. A análise dos esforços solicitantes e dos deslocamentos nas principais seções dos tabuleiros alargados por cada um dos métodos foi feita pelo Método dos Elementos Finitos. Os resultados obtidos permitiram concluir quais métodos se aplicam mais adequada-

mente a cada tipologia de ponte estudada, considerando o desempenho estrutural, as peculiaridades construtivas e os custos das obras de alargamento dos tabuleiros.

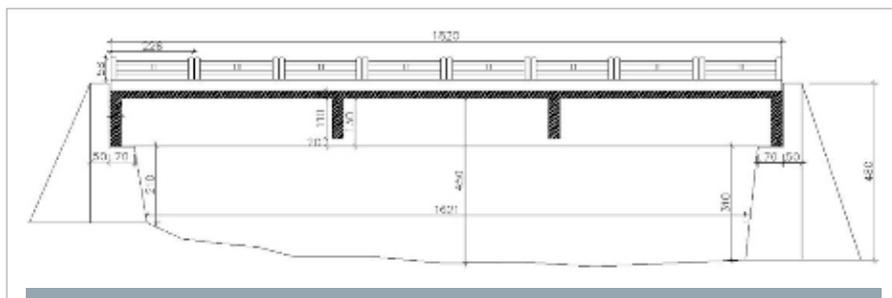
2. CONTEXTUALIZAÇÃO

A ausência de ações voltadas para a manutenção e avaliação das pontes existentes na malha rodoviária brasileira faz com que significativa quantidade dessas obras apresente problemas estruturais e funcionais. Dentre os problemas mais identificados estão o tabuleiro com gabarito transversal insuficiente e a desatualização das cargas móveis.

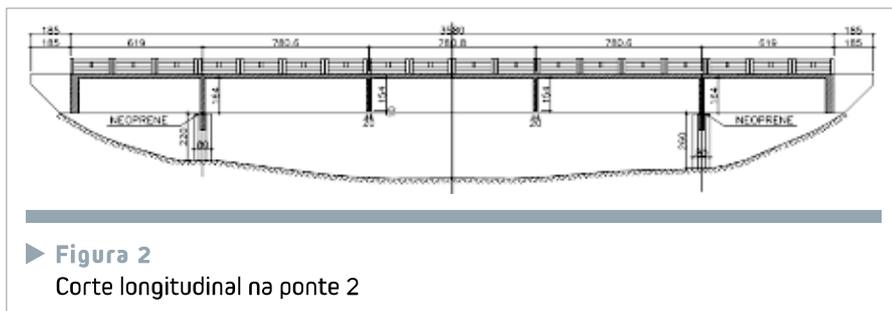
Nesse contexto, este artigo pretende contribuir para a melhoria dos projetos de alargamento e reforço de pontes rodoviárias de concreto armado, com base em uma análise comparativa entre quatro métodos construtivos usualmente utilizados no Brasil.

3. METODOLOGIA

Para a realização do estudo foram escolhidas três pontes existentes em rodovias federais, construídas entre



► **Figura 1**
Corte longitudinal na ponte 1



► **Figura 2**
Corte longitudinal na ponte 2



1960 e 1975. Todas apresentam características estruturais e geométricas que as classificam como Obras de Arte Especiais típicas, conforme dados do DNIT.

A primeira ponte, denominada ponte 1, tem um único vão e tabuleiro em duas vigas simplesmente apoiadas. A segunda (ponte 2) tem tabuleiro em duas vigas com um vão e dois balanços. A terceira (ponte 3) tem tabuleiro em duas vigas contínuas com dois tramos iguais.

As principais características das pontes estão indicadas nas figuras 1, 2 e 3, que mostram cortes longitudinais na geometria original de cada obra. A figura 4 mostra a seção transversal original, com 10m de largura do tabuleiro, que é a mesma para as três pontes, condição necessária para a análise comparativa.

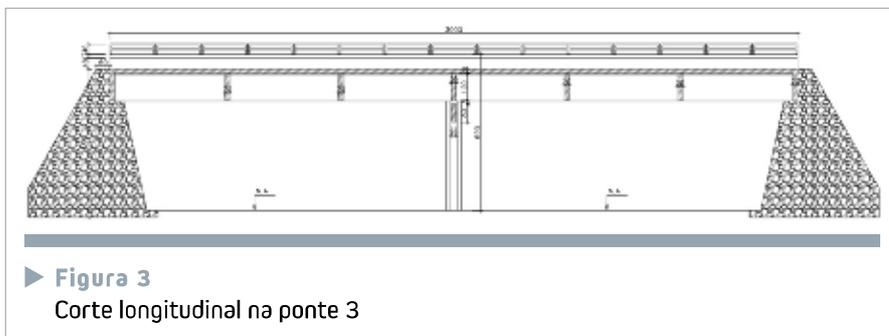
Foram realizadas inspeções e medições sobre as características geométricas e estruturais das três pontes, para garantir um estudo comparativo consistente entre os quatro métodos de alargamento e reforço relacionados a seguir: concreto armado moldado no local, vigas pré-moldadas de concreto, vigas mistas (aço e concreto) e protensão externa. A análise da estrutura foi linear, conforme a ABNT NBR 6118 (2014), sendo utilizado o software de elementos finitos STRAP para a discretização dos tabuleiros originais e dos tabuleiros alargados, de modo a obter e comparar os esforços e deslocamentos antes e depois dos alargamentos.

Nos tabuleiros originais foi usado o Trem-tipo Classe 360KN da ABNT NB-6 (1960), em vigor à época da construção das pontes. Nos tabuleiros alargados foi utilizado o Trem-tipo Classe 450KN da ABNT NBR-7188 (2013) atualmente em vigor.

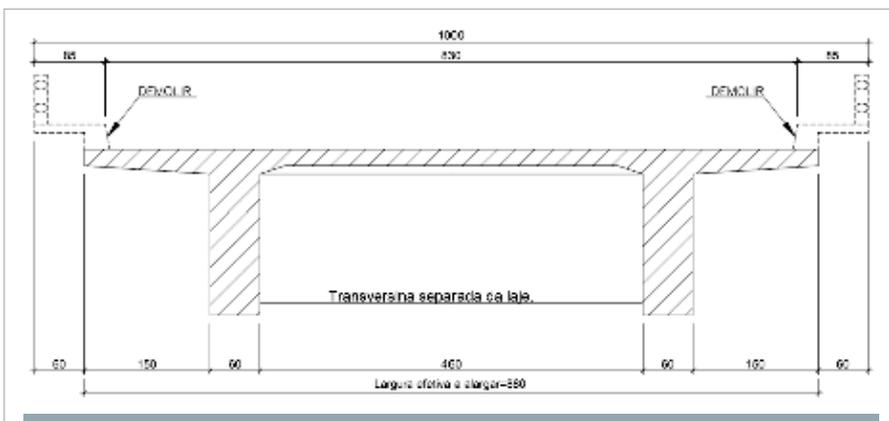
4. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS QUATRO MÉTODOS DE ALARGAMENTO E REFORÇO

Os tabuleiros alargados ficarão com 12,80m, que é o gabarito

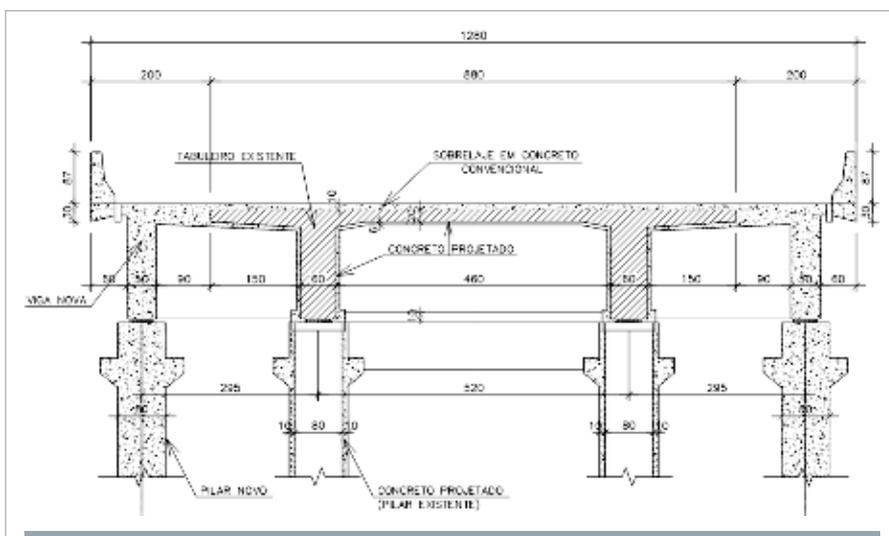
transversal utilizado nos projetos do DNIT para as pontes das rodovias de pistas simples. A seguir uma descrição sumária dos quatro métodos estudados.



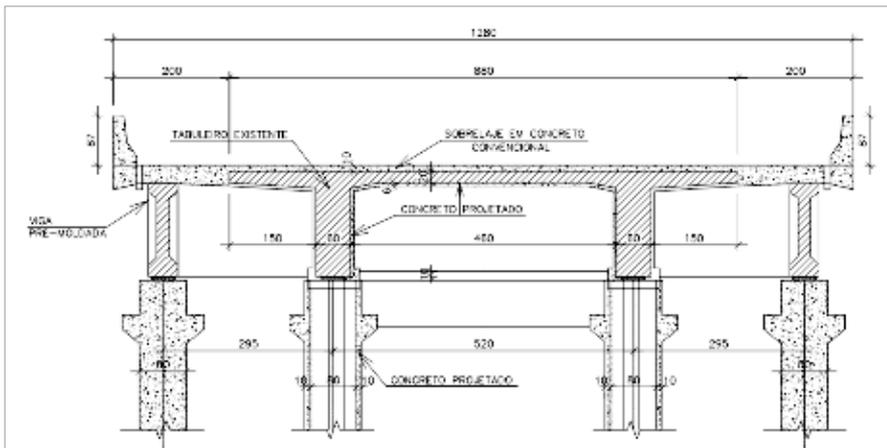
► **Figura 3**
Corte longitudinal na ponte 3



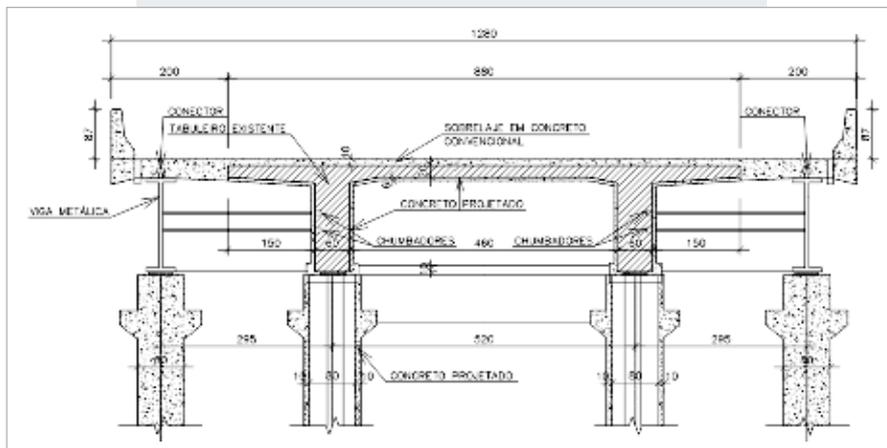
► **Figura 4**
Seção do tabuleiro original das três pontes



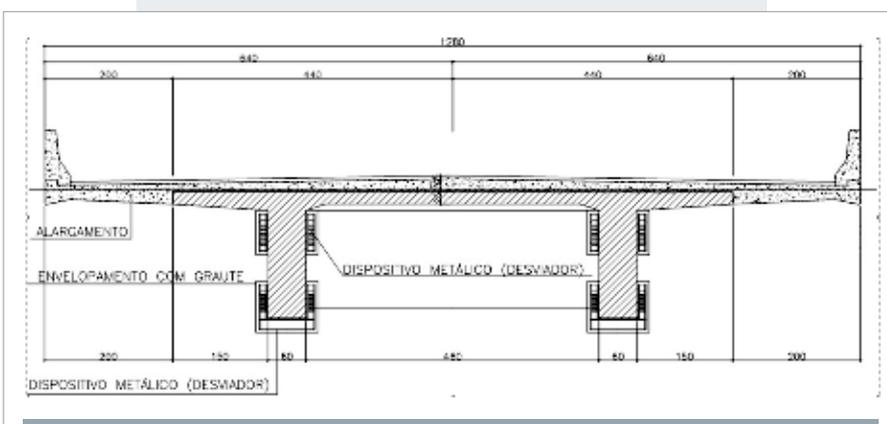
► **Figura 5**
Tabuleiro alargado com concreto armado moldado no local



► **Figura 6**
Tabuleiro alargado com vigas pré-moldadas



► **Figura 7**
Tabuleiro alargado com vigas mistas



► **Figura 8**
Tabuleiro alargado com protensão externa

4.1 Alargamento e reforço com concreto armado moldado no local

Trata-se de um dos sistemas mais utilizados no Brasil. Caracteriza-se pela incorporação de novas longarinas, lajes e transversinas ao tabuleiro existente por meio de concretagem "in loco", formando assim uma nova grelha, conforme mostra a figura 5, que ilustra a seção transversal das pontes estudadas depois de alargadas por esse método.

4.2 Alargamento e reforço com o uso de vigas pré-moldadas de concreto

Esse sistema se caracteriza pelo uso de elementos compostos, cujas seções resistentes são constituídas por vigas pré-moldadas (de concreto armado ou protendido) de seção parcial, complementadas com lajes de concreto moldadas no local. O comportamento estrutural é regido pela transferência das tensões de cisalhamento na interface do concreto pré-moldado da viga com o concreto da laje moldado no local. O tabuleiro alargado com o uso desse sistema está ilustrado na figura 6.

4.3 Alargamento e reforço com o uso de vigas mistas

Esse método consiste no acréscimo de novas longarinas constituídas por perfis metálicos solidarizados à laje de concreto do tabuleiro por meio de conectores de cisalhamento. Uma das questões importantes a serem consideradas é a transmissão das tensões de cisalhamento ao longo da conexão entre a viga e a laje, conhecida como efeito "Shear Lag". A figura 7 ilustra a seção alargada com o uso de vigas mistas e transversinas metálicas.

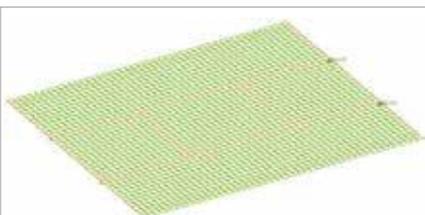




► **Figura 9**
Reforço das longarinas de uma ponte com protensão externa

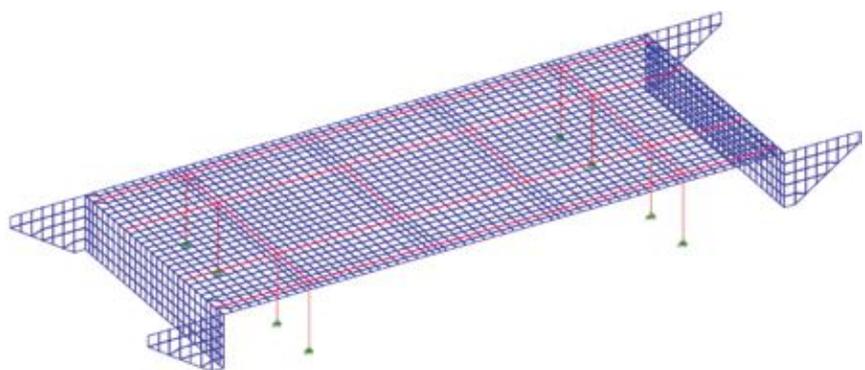
4.4 Alargamento e reforço com protensão externa

Trata-se de sistema bastante eficiente para ampliar a capacidade de carga das pontes que necessitam ser alargadas e reforçadas. A protensão externa aumenta a capacidade de carga das vigas principais e da laje do tabuleiro, diminui a fissuração, elimina as deformações e melhora a resistência ao cisalhamento. A figura 8 mostra o detalhamento da seção transversal alargada das pontes estudadas com a utilização desse sistema.



► **Figura 11**
Discretização do tabuleiro alargado da ponte 1 com protensão externa

No Brasil, grande parte dos reforços das longarinas existentes é feito com monocordoalhas agrupadas em feixes rentes às faces laterais das vigas e fixadas à estrutura por meio de desviadores de aço especial; tais desviadores são geralmente fixados às vigas com barras Dywidag, protendidas no sentido transversal. Na figura 9 está ilustrada a execução do reforço das vigas de uma ponte com protensão externa.



► **Figura 12**
Discretização do tabuleiro alargado da ponte 2 com vigas moldadas no local, vigas pré-moldadas e vigas mistas

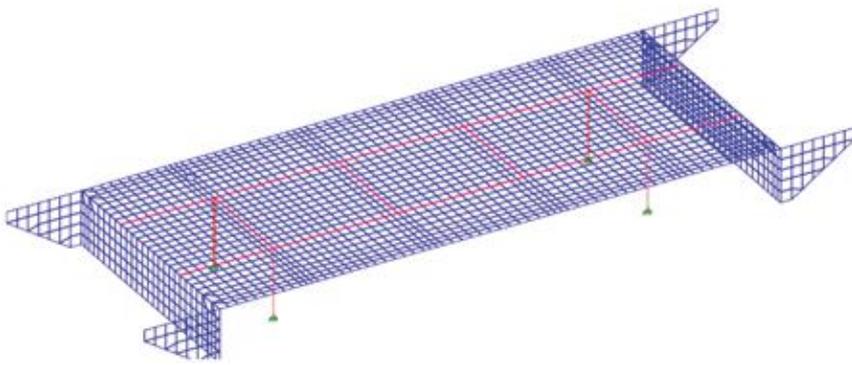


► **Figura 10**
Discretização do tabuleiro alargado da ponte 1 com vigas moldadas no local, vigas pré-moldadas e vigas mistas

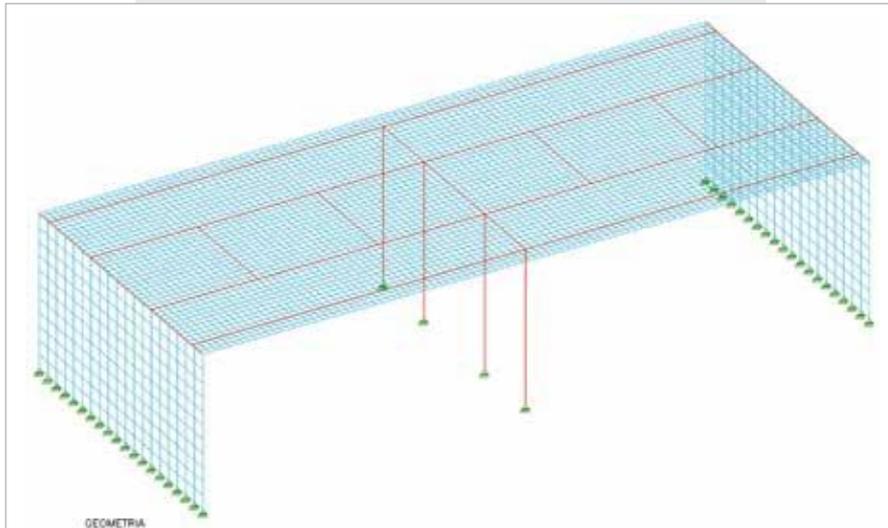
5. MODELO DE DISCRETIZAÇÃO DOS TABULEIROS

Nos projetos de pontes em geral, a utilização do método dos elementos finitos tem propiciado um elevado grau de precisão, obtido pelas modelagens utilizadas para cada situação. O modelo constituído por barras e elementos de casca, adotado neste estudo, é muito útil para tabuleiros em grelha de vigas. Nesses tabuleiros, que correspondem à maioria das pontes das rodovias brasileiras, tal modelo apresenta uma resposta consistente às ações atuantes, sejam nas pontes retas ou esconsas.

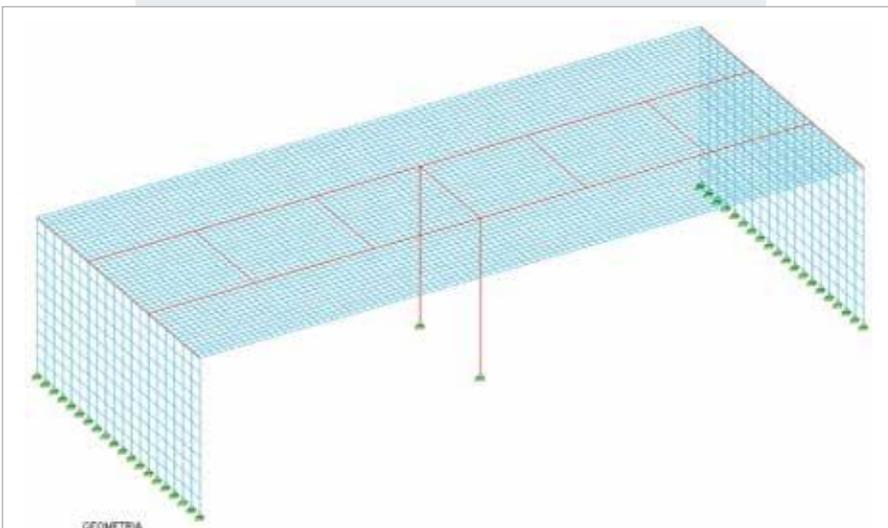
Nas figuras 10, 11, 12, 13, 14 e 15 estão ilustrados os modelos de discretização com elementos de barras



► **Figura 13**
Discretização do tabuleiro alargado da ponte 2 com protensão externa



► **Figura 14**
Discretização do tabuleiro alargado da ponte 3 com vigas moldadas no local, vigas pré-moldadas e vigas mistas



► **Figura 15**
Discretização do tabuleiro alargado da ponte 3 com protensão externa

(vigas) e elementos de casca (shell), aplicados aos tabuleiros alargados das três tipologias de pontes, com o uso do software STRAP. Também foram modelados os tabuleiros originais (antes do alargamento), que não são mostrados neste trabalho. Na análise dos tabuleiros originais, a resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) foi 20MPa. Para o concreto dos alargamentos o valor considerado foi 30MPa. Para os perfis metálicos das vigas mistas foi adotado o aço ASTM A572 G50. É importante esclarecer que este estudo é direcionado apenas para a análise dos tabuleiros e não inclui os aspectos relacionados às mesoestruturas e às fundações das pontes.

6. RESULTADOS DA ANÁLISE

6.1 Estudo das lajes alargadas

O estudo permitiu a obtenção dos valores dos esforços ao longo das lajes dos tabuleiros alargados pelos quatro métodos. Nas figuras 16 e 17 estão representados os diagramas dos momentos fletores transversais nas lajes das três pontes após o alargamento por cada método, cujos valores estão indicados nas tabelas 1 e 2. A análise dos esforços indicados no diagrama da figura 16 mostrou que o momento M_c representou um acréscimo de 24% quando comparado ao mesmo esforço nos tabuleiros originais, enquanto M_{ic} representou um acréscimo de 8%. Os momentos M_{bi} e M_i não existiam nas pontes originais.

Nos esforços do diagrama da figura 17 verificou-se que o momento M_{bc} foi aproximadamente três vezes maior que mesmo esforço nos tabuleiros originais, devido ao aumento da extensão dos balanços transversais da laje e das cargas móveis. Já o momento



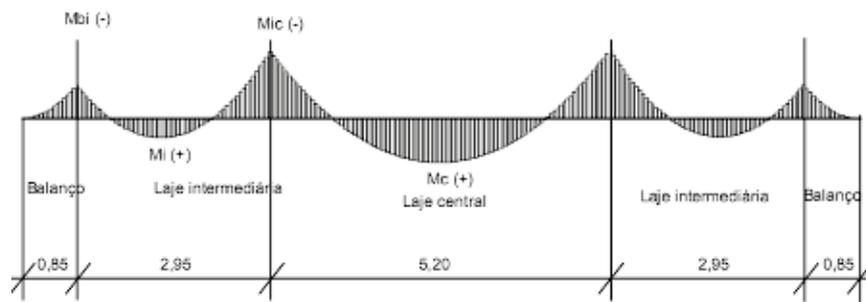
Mc teve um acréscimo de 7% quando comparado com o momento da laje central das pontes originais.

6.2 Estudo das longarinas

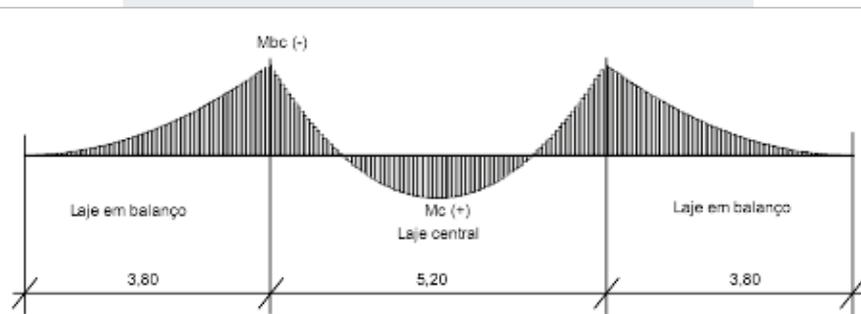
As modelagens dos tabuleiros alargados possibilitaram a obtenção dos esforços e dos deslocamentos nas duas longarinas existentes e nas duas longarinas que foram adicionadas. No caso do alargamento com protensão externa, foram calculados os esforços nas longarinas existentes.

Foram calculados os esforços e deslocamentos em todas as seções ao longo da extensão das longarinas. Neste texto são apresentados apenas os resultados das seções consideradas mais importantes para o estudo, que foram denominadas seções notáveis.

Nas tabelas 3, 4 e 5 estão indicados os valores dos momentos fletores, dos esforços cortantes e das flechas (imediatas e diferidas) nas seções notáveis das longarinas existentes e das longarinas novas dos tabuleiros alargados por cada um dos métodos. De modo geral, os valores obtidos estão compatíveis com as tipologias geométricas, estruturais e com as ações atuantes nos tabuleiros alargados objetos deste estudo. Apenas os esforços nas vigas mistas da ponte 2 (tabela 4) apresentaram valores bem menores, quando comparados aos obtidos nos outros métodos de alargamento. As causas de tais resultados estão relacionadas às próprias características da ponte (um vão e dois balanços) e à grande diferença de rigidez entre as vigas existentes de concreto e as vigas metálicas adicionadas para o alargamento do tabuleiro, que foi modelado como uma única grelha de quatro vigas. Isso está sendo objeto de estudo pelo autor em uma nova etapa da pesquisa.



► **Figura 16**
Diagrama dos momentos fletores nas lajes dos tabuleiros alargados com a adição de duas vigas



► **Figura 17**
Diagrama dos momentos fletores nas lajes dos tabuleiros alargados com protensão externa

► **Tabela 1 – Momentos nas lajes dos tabuleiros alargados com a adição de duas vigas**

Ponte / método de alargamento	Momentos fletores (kN.m/m)				
	Balanços (Mbi)	Lajes intermediárias (Mi)	Negativos da laje central (Mbc)	Positivos da laje central (Mc)	
Ponte 1	Concreto armado	-29,00	24,00	-68,00	30,00
	Vigas pré-moldadas	-24,00	25,00	-68,00	30,00
	Vigas mistas	-24,00	18,00	-70,00	30,00
Ponte 2	Concreto armado	-24,00	17,00	-66,00	33,00
	Vigas pré-moldadas	-21,00	17,00	-66,00	33,00
	Vigas mistas	-17,00	17,50	-82,00	32,00
Ponte 3	Concreto armado	-31,00	19,00	-57,00	25,00
	Vigas pré-moldadas	-27,00	-21,00	-56,00	25,00
	Vigas mistas	-17,00	20,00	62,00	24,00

► Tabela 2 – Momentos nas lajes dos tabuleiros alargados com protensão externa

Ponte	Lajes em balanço Mbc (kN.m/m)	Lajes centrais Mc (kN.m/m)
1	-266,00	29,00
2	-203,00	31,00
3	-239,00	26,00

7. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS

A análise comparativa forneceu várias informações sobre os desempenhos estruturais dos quatro métodos construtivos de alargamento dos tabuleiros das tipologias de pontes estudadas.

Para agregar maior consistência à análise, foi feita uma estimativa preliminar dos custos das obras

de alargamento dos tabuleiros pelos quatro métodos. Essa estimativa, mesmo não sendo apresentada neste texto, contribuiu para complementar as conclusões sobre os métodos que melhor se adequam a cada uma das três tipologias.

É possível, portanto, fazer as seguintes considerações sobre os resultados obtidos. O estudo da ponte 1 mostrou uma equivalência entre

► Tabela 3 – Esforços e deslocamentos nas seções notáveis da ponte 1

Método de alargamento	Longarinas existentes			Longarinas novas		
	Momento fletor (kN.m)	Esforço cortante (kN)	Flecha (cm)	Momento fletor (kN.m)	Esforço cortante (kN)	Flecha imediata + diferida (cm)
Viga concreto armado	5140	1060	3,60	3800	777	3,40
Protensão externa	7550	1350	4,50	–	–	–
Vigas pré-moldadas	5610	1120	3,70	2740	603	5,70
Vigas mistas	5760	1160	3,80	2040	327	2,00

► Tabela 4 – Esforços e deslocamentos nas seções notáveis da ponte 2

Método de alargamento	Longarinas existentes				Longarinas novas							
	Mom. fletor vão (kN.m)	Esforços cortantes vão (kN)	Mom. fletor balanço (kN.m)	Esforços cortantes balanço (kN)	Flecha total (cm)		Mom. fletor vão (kN.m)	Esforços cortantes vão (kN)	Mom. fletor balanço (kN.m)	Esforços cortantes balanço (kN)	Flecha imediata + diferida (cm)	
					Vão	Balanço					Vão	Balanço
Viga de concreto armado	4060	1450	-5140	1070	2,80	1,00	2650	921	-3370	686	2,80	0,80
Protensão externa	6420	2060	-8030	1610	3,40	0,80	–	–	–	–	–	–
Viga de concreto armado	4170	1460	-5150	1110	2,80	1,00	2240	811	-2690	595	2,96	0,81
Protensão externa	4310	1540	-6330	1250	2,80	0,90	1200	481	-1880	308	2,10	0,60



► Tabela 5 – Esforços e deslocamento nas seções notáveis da ponte 3

Método de alargamento	Longarinas existentes				Longarinas novas			
	Mom. fletor vão (kN.m)	Mom. fletor apoio (kN.m)	Esforço cortante (kN)	Flecha total (cm)	Mom. fletor vão (kN.m)	Mom. fletor apoio (kN.m)	Esforço cortante (kN)	Flecha imediata + diferida (cm)
Viga de concreto	2640	-3010	1140	2,30	1640	-2430	788	2,45
Protensão externa	3830	-4180	1470	2,60	–	–	–	–
Vigas pré-moldadas	2830	-3140	1200	2,30	1810	–	491	3,73
Vigas mistas	2800	-3110	1190	2,30	1730	–	453	1,78

as alternativas em concreto armado moldado no local, vigas pré-moldadas de concreto e vigas mistas. Essas três opções apresentaram desempenhos estruturais e econômicos bem aproximados, porém as duas últimas poderão ser ainda mais competitivas pelo fato de prescindirem de escoramento e terem mais agilidade construtiva. O uso de protensão externa ficou praticamente inviável para o vão dessa ponte (18m) por causa do alto custo.

No estudo da ponte 2, a melhor alternativa foi a protensão externa, pelo fato de reduzir as deformações nos balanços e a fissuração nas longarinas existentes. Essa alternativa mostrou-se competitiva com o método de vigas pré-moldadas, mas a protensão apresenta um desempenho estrutural mais satisfatório, principalmente quando comparado à vigas pré-moldadas em balanço.

Ainda na ponte 2 verificou-se que os métodos com o uso do concreto armado moldado “in loco” (em torno de 36% mais caro) e de vigas mistas (em torno de 22% mais caro), são pouco competitivos econômica e estruturalmente. O primeiro pela grande

densidade de armaduras de flexão e de cisalhamento nos balanços das vigas. O segundo, pelo alto custo das peças metálicas (enrijecedores e diafragmas) necessárias para combater os efeitos da flambagem lateral, com distorção causada pelo momento fletor negativo nos balanços das vigas mistas.

A análise da ponte 3, que pode até ser considerada um caso típico das pontes em vigas contínuas de concreto armado, mostrou que a melhor alternativa para o alargamento é a adição de vigas de concreto armado moldado no local; porém, também ficou evidente que a utilização de vigas mistas pode ser competitiva quando utilizadas como longarinas simplesmente apoiadas, com lajes de continuidade nos apoios. É importante lembrar que os alargamentos com concreto moldado no local, mesmo questionáveis por causa de algumas dificuldades construtivas (fôrmas, escoramentos, maiores prazos, etc), ainda continuam sendo utilizados em pontes de pequeno porte, especialmente nas rodovias localizadas em regiões mais distantes e em locais de difícil acesso.

O resumo das melhores opções de alargamento obtidas no estudo está na tabela 6. A indicação de mais de um método por tipologia significa que não há grandes diferenças entre os desempenhos estruturais e construtivos, e que também há uma razoável equivalência de custos entre eles (variação máxima da ordem de 10%). Tais diferenças poderão ser compensadas conforme as peculiaridades de cada caso, que dependerão dos locais das obras, dos tipos de fundações e de outros fatores que possam interferir no resultado final da obra de alargamento e reforço.

► Tabela 6 – Melhores opções de alargamento por tipologia de ponte

Ponte	Melhor método obtido do estudo
1	Concreto armado moldado no local Vigas pré-moldadas de concreto Vigas mistas
2	Protensão externa Vigas pré-moldadas de concreto
3	Concreto armado moldado no local Vigas mistas

8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Diante dos resultados obtidos, é possível chegar às seguintes conclusões e recomendações:

► Considerando a carência no Brasil de literatura apropriada para a avaliação de pontes existentes, a escolha da melhor opção de alargamento e reforço depende dos estudos de cada caso específico, que deverão incluir os seguintes fatores: tipologia estrutural da ponte; características de

resistência dos materiais; estado de conservação e condições das fundações – esses fatores permitirão uma análise comparativa mais consistente dos desempenhos estruturais, funcionais e de custos das possíveis soluções;

► O fato de os projetos de reforço e alargamento de pontes existentes serem realizados com o uso de normas elaboradas para o dimensionamento de pontes novas pode causar distorções quanto aos níveis de confia-

bilidade aceitáveis, com implicações nas reais condições de estabilidade e nos custos de execução das obras;

► Finalmente, recomenda-se que, a exemplo de outros países, seja priorizado o investimento em estudos e pesquisas que definam procedimentos mais avançados, inclusive normativos, para estabelecer padrões aceitáveis de confiabilidade às avaliações estruturais e à segurança das pontes existentes, incluindo a utilização de métodos probabilísticos. ➤

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NB6. Cargas móveis em pontes rodoviárias. Rio de Janeiro, 1960.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto-Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7188. Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro, 2013.
- [4] VITÓRIO, J. A. P. Um estudo comparativo sobre métodos de alargamento de pontes rodoviárias de concreto armado, com a utilização das normas brasileiras e eurocódigos. Tese de Doutorado na Universidade do Porto, Portugal, 2013.

