

A Utilização do Eurocódigo em Projetos de Alargamento e Reforço de Pontes Rodoviárias de Concreto

*José Afonso Pereira Vítório¹
Rui Manuel de Menezes e Carneiro de Barros²*

Resumo

A situação atual do tráfego nas rodovias brasileiras, caracterizada pelo aumento da quantidade e dos pesos dos veículos, tem gerado discussões e algumas publicações de trabalhos técnicos sobre as cargas transmitidas às Obras de Arte Especiais que compõem essas rodovias. É quase um consenso que o modelo de cargas móveis adotado desde 1984 pela NBR 7188, composto por um veículo-tipo de três eixos, oriundo de antigas normas alemãs, não corresponde às condições dos veículos reais no que se refere aos esforços transmitidos às pontes e viadutos. Na busca por um modelo mais apropriado, alguns pesquisadores identificam as cargas móveis do Eurocódigo como mais realistas e adequadas, por terem sido obtidas por meio de calibração do tráfego ao longo de anos e incluírem os efeitos dinâmicos. Por isso, o processo de modificação da NBR 7188 poderá também considerar um modelo nos moldes do que é adotado no Eurocódigo 1. Essa questão torna-se mais complexa nos casos de pontes existentes que necessitam passar por intervenções de alargamento e reforço para se adequarem aos novos gabaritos transversais adotados na ampliação da malha viária brasileira, pelo fato de a maioria delas ter sido projetada para cargas móveis ainda mais defasadas que as atuais.

É nesse contexto que este artigo pretende contribuir para ampliar o conhecimento nessa área ainda pouco explorada, realizando uma análise comparativa com o uso de elementos finitos, entre os modelos de carga LM1 (Load Model 1) do Eurocódigo 1 e do Trem-Tipo Classe 450KN da NBR 7188 em projetos de alargamento e reforço para três diferentes sistemas estruturais de pontes de concreto armado típicas das rodovias brasileiras.

Palavras-chave: alargamento, estruturas, eurocódigos, pontes, reforço.

1 Introdução

As pontes que compõem as malhas rodoviárias nos âmbitos federal, estaduais e municipais, também sofrem com a ausência de políticas de conservação das obras públicas no Brasil e significativa quantidade delas apresenta problemas de natureza estrutural, de gabarito transversal insuficiente para a demanda de tráfego e de desatualização quanto aos carregamentos móveis atualmente exigidos pelas normas vigentes.

Diante disso, este trabalho se propõe a fornecer elementos para a elaboração de projetos de alargamento e reforço de pontes rodoviárias convencionais de concreto armado, baseados na análise comparativa entre as cargas móveis da norma brasileira NBR 7188 e do Eurocódigo 1.

A comparação entre as cargas móveis do Eurocódigo e as da atual norma brasileira já tem sido objeto

de estudos nos projetos de pontes novas e produzido algumas publicações acadêmicas. Porém, ainda não existe conhecimento sobre este tema quando se trata da aplicação em projetos de alargamento e reforço de pontes rodoviárias existentes.

2. Modelos de Cargas Móveis Utilizados no Estudo

2.1 Modelo da Norma Brasileira

Na Figura 1 estão ilustrados os esquemas dos carregamentos móveis estabelecidos pela norma NBR 7188/84, atualmente em vigor no Brasil, que está em fase de estudos objetivando a revisão e atualização. Na Tabela 1 estão indicados os valores das cargas para as três classes de veículo-tipo.

1 Doutor em Estruturas pela Universidade do Porto, Portugal / afonsovitorio@gmail.com

2 Professor Doutor da Universidade do Porto, Portugal / rcb@fe.up.pt

2.2 Modelo do Eurocódigo

As normas europeias para projetos de estruturas (Eurocódigos Estruturais) definem quais as ações provocadas pelo tráfego de veículos em pontes rodoviárias por meio do Eurocódigo 1 (EN 1991-2): *Ações em estruturas. Parte 2: Ações de tráfego em pontes*. São considerados quatro modelos de carga, mas o modelo LM1 (Load Model 1) é o mais utilizado para verificações globais e locais. É constituído por cargas concentradas e cargas distribuídas.

No LM1, que é o principal modelo do Eurocódigo 1, as cargas móveis devem ser colocadas nas posições mais desfavoráveis de modo a obter as envoltórias dos esforços no elemento estrutural. O LM1 define a divisão da seção transversal do tabuleiro da ponte (w) em três pistas ideais (national lanes), nº 1, nº 2 e nº 3 para o posicionamento dos veículos tipo, e em uma área remanescente conforme a Figura 2. Na Tabela 2 são mostrados os critérios para a definição do número de faixas de tráfego e suas respectivas larguras. Na Tabela 3 estão indicados os valores característicos

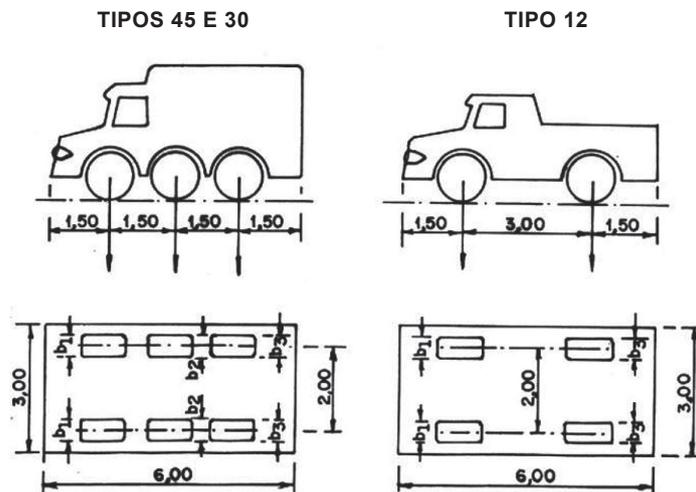


Figura 1 – Esquemas das cargas móveis estabelecidas pela norma brasileira. (Fonte: NBR 7188/84).

Tabela 1 – Valores das cargas móveis transmitidas pelos veículos conforme a norma brasileira. (Fonte: NBR 7188/84).

Classe da ponte	Veículo		Carga uniformemente distribuída				Disposição da carga	
	Tipo	Peso total		P		P'		
		kN	t_r	kN/m ²	kgf/m ²	kN/m ²		kgf/m ²
45	45	450	45	5	500	3	300	Carga p em toda a pista
30	30	300	30	5	500	3	300	Carga p' nos passeios
12	12	120	12	4	400	3	300	–

Key

- w Carriageway width
- 1 w Notional lane width
- 1 Notional Lane Nr. 1
- 2 Notional Lane Nr. 2
- 3 Notional Lane Nr. 3
- 4 Remaining area

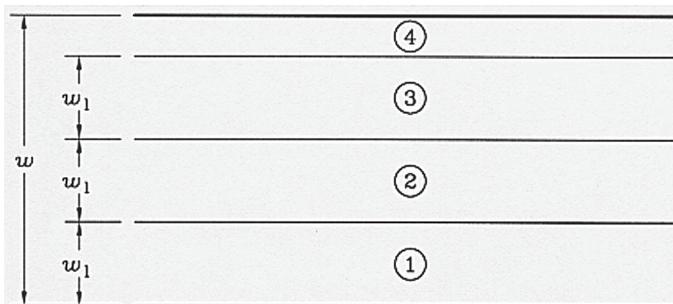


Figura 2 – Divisão de faixas do modelo LM1 (Fonte: Eurocódigo EN1991-2).

do modelo de carga LM1 que foi formulado levando em conta os efeitos dinâmicos.

A aplicação do modelo LM1 está ilustrada na Figura 3 conforme regras definidas no Eurocódigo, como as indicadas a seguir.

- Não mais que um veículo tipo deve ser aplicado em cada pista.

- Apenas veículos completos devem ser considerados.
- Cada eixo deve ser considerado com duas rodas idênticas com uma carga igual a $0,5\alpha_Q Q_k$. As cargas uniformemente distribuídas tem o valor de $\alpha_q q_k$ por m^2 de pista ideal.
- A área de contato de cada roda deve ser

Tabela 2 – Definição do número e largura das vias de tráfego (Fonte: Eurocódigo EN1991-2).

Carriageway width w	Number of notional lanes	Width of a notional lane w_l	Width of the remaining area
$w < 5,4 \text{ m}$	$n_l = 1$	3 m	$w - 3 \text{ m}$
$5,4 \text{ m} \leq w < 6 \text{ m}$	$n_l = 2$	$\frac{w}{2}$	0
$6 \text{ m} \leq w$	$n_l = \text{Int}\left(\frac{w}{3}\right)$	3 m	$w - 3 \text{ m} \times n_l$

Tabela 3 – Valores característicos do modelo LM1 (Fonte: Eurocódigo EN1991-2).

Location	Tandem system TS	UDL system
	Axle loads Q_{ik} (kN)	q_{ik} (or q_{rk}) (kN/m ²)
Lane Number 1	300	9
Lane Number 2	200	2,5
Lane Number 3	100	2,5
Other lanes	0	2,5
Remaining area (q_{rk})	0	2,5

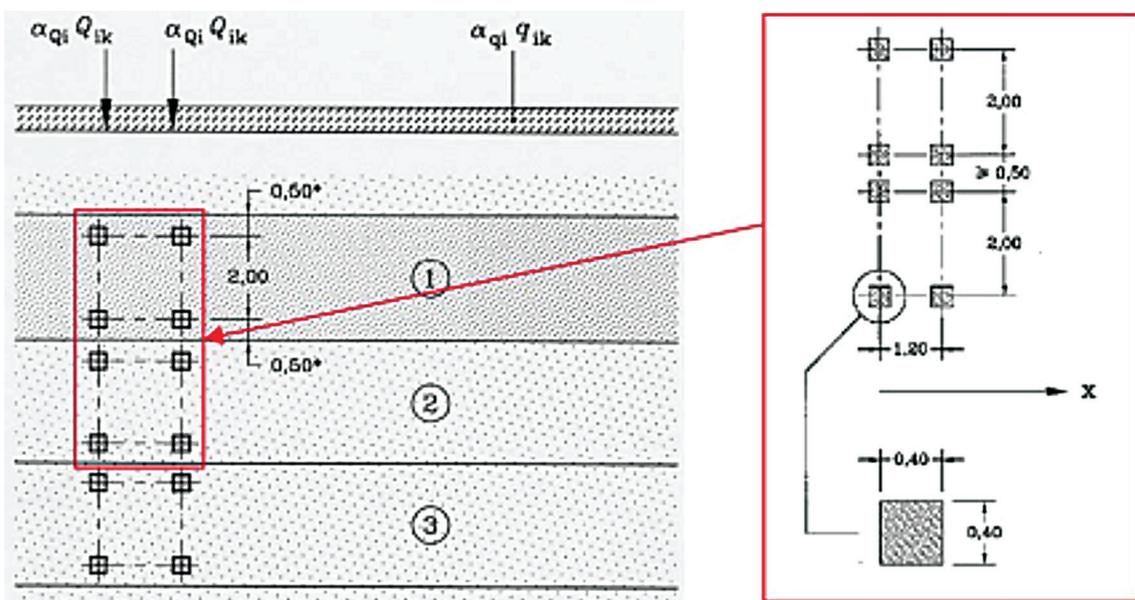


Figura 3 – Aplicação do modelo LM1 (Fonte: Eurocódigo EN 1991-2).

- quadrada de lado 0,4 m.
- Para uma análise local um veículo tipo deve ser considerado na posição mais desfavorável.
- As cargas uniformemente distribuídas devem apenas ser aplicadas nas zonas desfavoráveis das superfícies de influência quer longitudinal quer transversalmente.

Os coeficientes de correção para as cargas concentradas (α_Q) e para as cargas uniformemente distribuídas (α_q) assumem valores unitários para situações correspondentes a um tráfego industrial, internacional intenso e pesado.

Para composições de tráfego mais comuns

(estradas e autoestradas) os coeficientes alfa podem ser reduzidos entre 10% e 20% na pista 1.

3 Descrição das Pontes utilizadas no Estudo

Para a realização do estudo comparativo de alargamento, foram escolhidas três pontes existentes, construídas entre 1960 e 1975 em rodovias federais. Todas elas têm a mesma largura que era utilizada para o tabuleiro da pontes rodoviárias no referido período. As características referentes ao sistema estrutural, aos vãos e aos materiais empregados as classificam como Obras de Arte Especiais típicas das rodovias federais

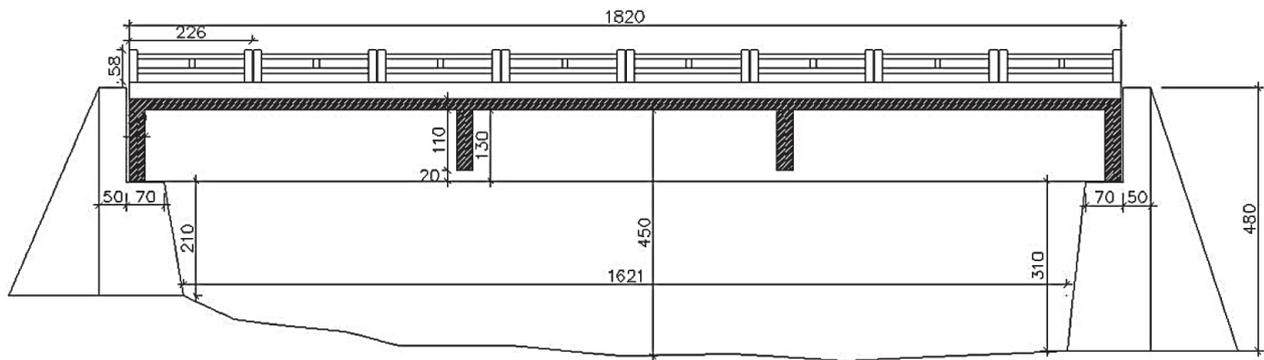


Figura 4 – Corte longitudinal na geometria original da ponte 1.

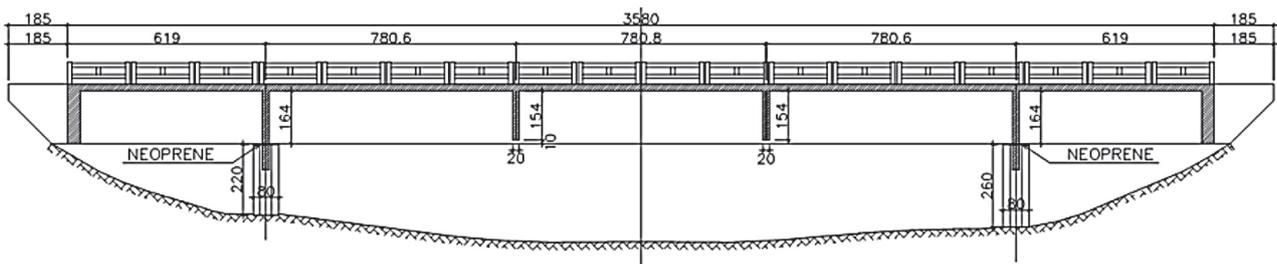


Figura 5 – Corte longitudinal na geometria original da ponte 2.

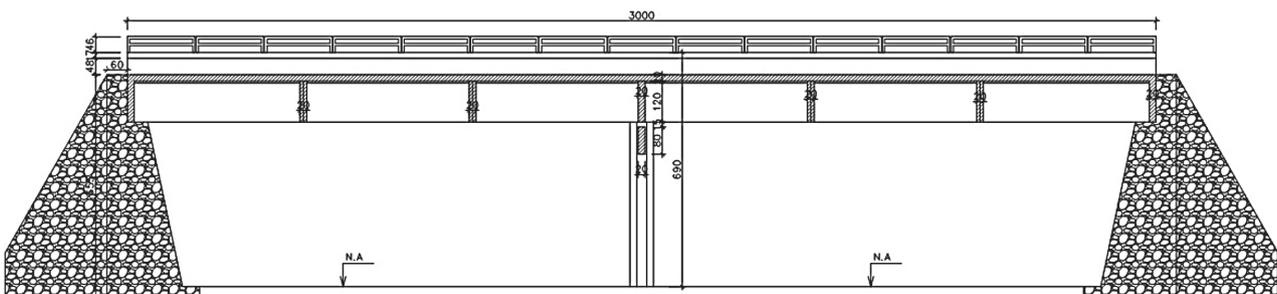


Figura 6 – Corte longitudinal na geometria original da ponte 3.

brasileiras, conforme dados do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), publicados por MENDES (2009).

É de fundamental importância esclarecer que este estudo é voltado para os aspectos relacionados ao tabuleiro (original e alargado) das pontes analisadas, ou seja, todas as modelagens e análises comparativas

realizados para o alargamento são limitadas a esse componente estrutural.

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

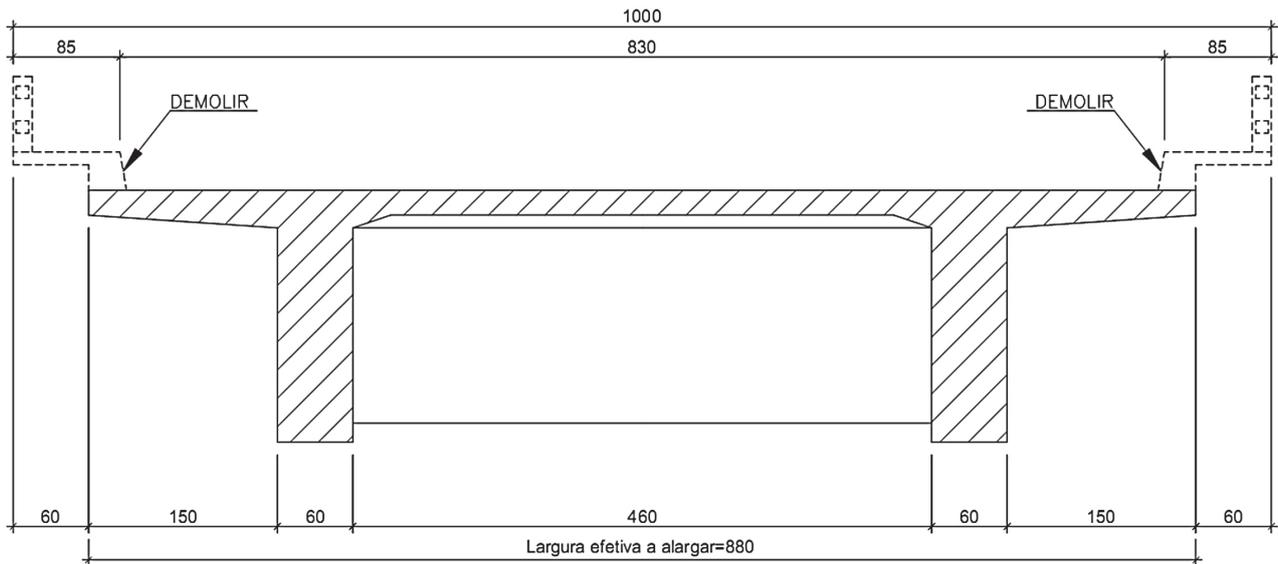


Figura 7 – Detalhe da seção transversal original e da largura efetiva considerada para o alargamento dos tabuleiros das três pontes.

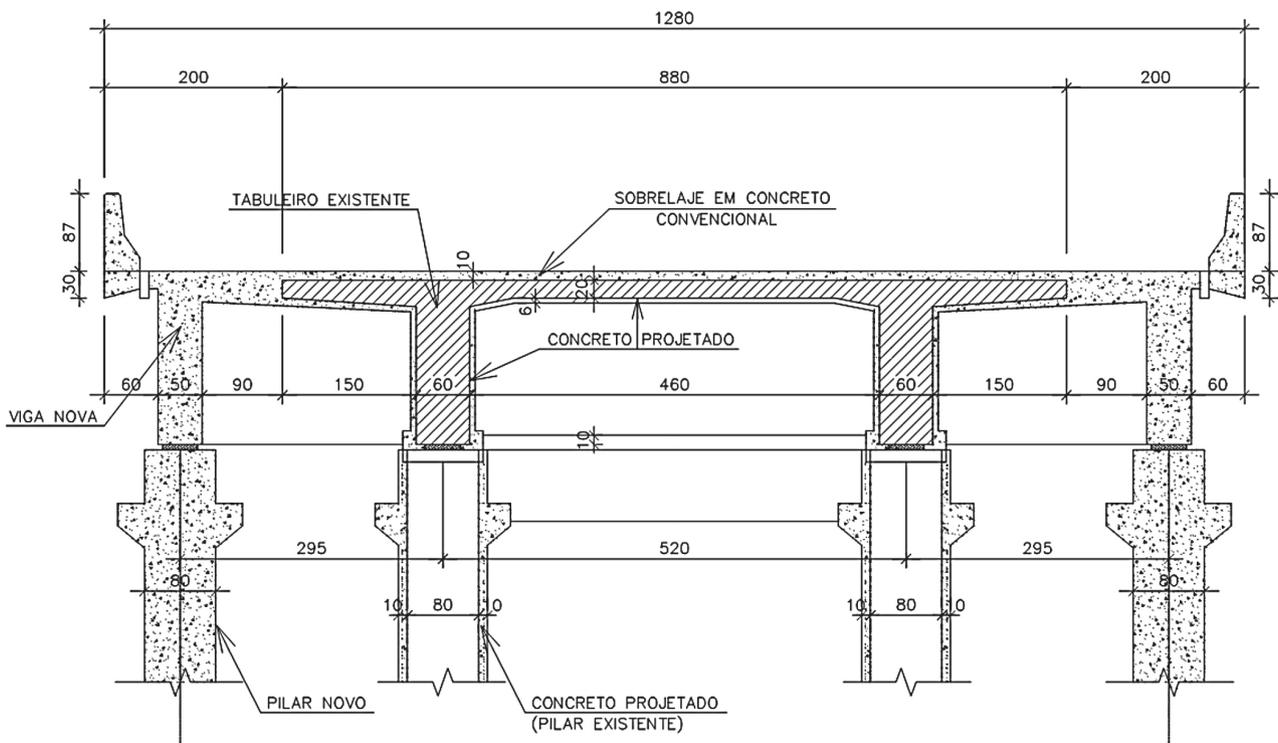


Figura 8 – Seção transversal após alargamento do tabuleiro das três pontes.

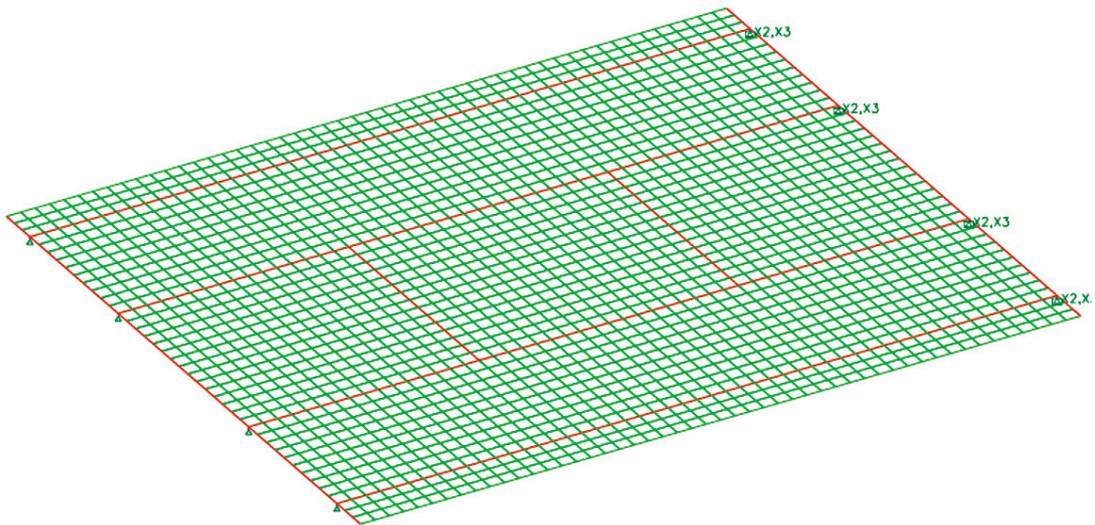


Figura 9 – Discretização do tabuleiro alargado da ponte 1.

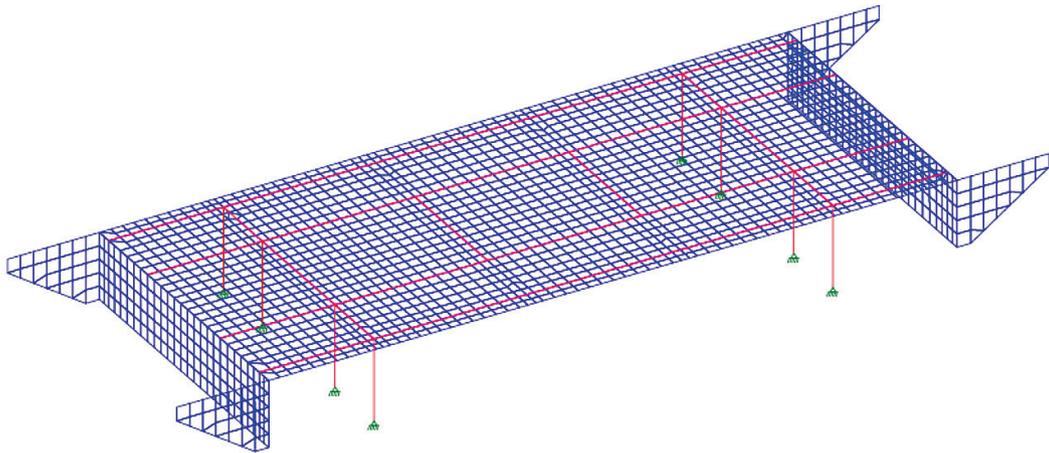


Figura 10 – Discretização do tabuleiro alargado da ponte 2.

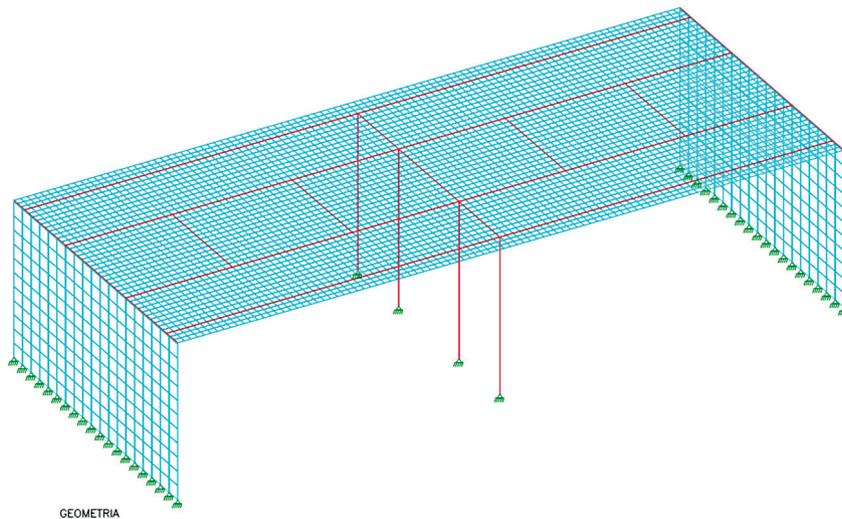


Figura 11 – Discretização do tabuleiro alargado da ponte 3.

As principais características dos sistemas estruturais, com as respectivas dimensões das três pontes, estão indicadas nas Figuras 4, 5 e 6 que representam um corte longitudinal na geometria existente de cada obra.

Na Figura 7 está representada a seção transversal original dos tabuleiros das três pontes. É importante observar que para alargar o tabuleiro faz-se necessário eliminar o trecho correspondente aos passeios de pedestres das pontes originais, o que significa demolir 0,60 m de cada lado. Assim, a largura efetiva do tabuleiro a alargar passa a ser 8,80 m, sendo necessário, portanto, acrescentar 2,00 m de cada lado para que seja obtida a largura final de 12,80 m, que é o gabarito mais utilizado atualmente nas pontes das rodovias federais brasileiras de pistas simples.

A Figura 8 mostra a seção transversal do tabuleiro das três pontes após o alargamento, incluindo os detalhes relacionados à recuperação e reforço que forem necessários. Também estão indicados os consoles que devem ser implantados para o posicionamento dos macacos utilizados para a substituição dos aparelhos de apoio.

4 Estudo Comparativo

4.1 Modelagens do tabuleiro

As análises foram realizadas com a utilização do software de elementos finitos Strap, a partir das discretizações dos tabuleiros originais e dos tabuleiros alargados das três pontes, tendo sido considerado para os tabuleiros originais os carregamentos e propriedades dos materiais adotados na época em que as obras foram executadas. Para os tabuleiros alargados foram utilizadas as cargas móveis atuais da norma brasileira

e as cargas móveis do modelo LM1 do Eurocódigo, de modo a permitir uma análise comparativa dos dois modelos de cargas.

As Figuras 9, 10 e 11 mostram os modelos de discretização dos tabuleiros alargados com o uso de elementos de barra para as vigas e elementos “Shell” para as lajes.

4.2 Resultado do Estudo comparativo

As modelagens realizadas permitiram obter os esforços e deslocamentos ao longo dos tabuleiros alargados de modo a estabelecer uma comparação entre os dois sistemas normativos utilizados.

A seguir são feitos comentários sobre os esforços nas lajes e longarinas, que foram obtidos com a utilização da norma brasileira e do LM1. A Figura 12 ilustra esquematicamente a configuração dos momentos fletores nas lajes das 3 pontes após o alargamento, para a realização da análise comparativa dos resultados com a utilização das duas normas.

Na laje central, foi obtido para o momento máximo positivo ($M_c +$) o valor de 30 $kN.m/m$ para o cálculo feito com a NBR 7188. Quando foi utilizado o modelo LM1 o valor passou para 33 $kN.m/m$, o que significa um acréscimo de 10%.

Os momentos negativos da laje central (M_{ic}), que correspondem ao momento negativo dos balanços das lajes originais, tem, em média, 69 $kN.m/m$ pela norma brasileira e 82 $kN.m/m$ pelo Eurocódigo. Tais momentos, para a configuração original das lajes, tinham um valor da ordem de 64 $kN.m/m$, de modo que os momentos das lajes nessas regiões de apoio tiveram um acréscimo de 8% pelas normas brasileiras e de 28% pelo Eurocódigo.

No caso das novas lajes intermediárias os momentos fletores positivos médios (M_i) são da ordem de

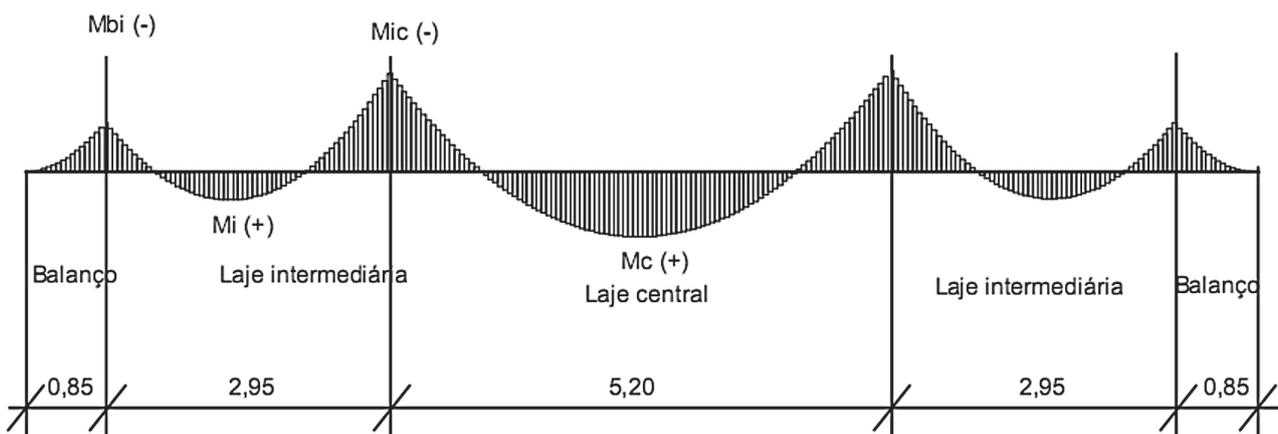


Figura 12 – Ilustração esquemática com a nomenclatura dos momentos nas lajes do tabuleiro alargado.

21 *kN.m/m* quando obtidos pelas normas brasileiras e de 26 *kN.m/m* quando calculados pelo Eurocódigo, o que implica em um acréscimo de 24% quando é utilizada a norma europeia.

A seguir é feito um resumo dos resultados obtidos para as solicitações (momentos fletores e esforços cortantes) e deslocamentos máximos nas principais seções (denominadas seções notáveis) das longarinas novas e antigas dos tabuleiros alargados das 3 pontes estudadas. Os valores estão indicados nas tabelas 4, 5 e 6.

5 Conclusão

Os resultados obtidos da análise comparativa entre a norma NBR 7188 e o modelo LM1 do Eurocódigo quando aplicado a projetos de alargamento de pontes rodoviárias típicas de concreto armado, mostram que existem, de modo geral, acréscimos nas solicitações obtidas pelo LM1 cujas intensidades dependem do sistema estrutural e dos vãos da ponte. No caso das longarinas novas e das existentes no tabuleiro original as tabelas acima

Tabela 4 – Solicitações e deslocamentos nas seções notáveis após alargamento da ponte 1.

Norma utilizada	Longarinas existentes			Longarinas novas		
	Momento fletor (<i>KN.m</i>)	Força cortante (<i>KN</i>)	Flecha (<i>cm</i>)	Momento fletor (<i>KN.m</i>)	Força cortante (<i>KN</i>)	Flecha imediata + diferida (<i>cm</i>)
Norma brasileira	5140	1060	3,60	3880	777	3,40
Eurocódigo	5540	1120	3,70	4170	847	3,70

Tabela 5 – Solicitações e deslocamentos nas seções notáveis após alargamento da ponte 2.

Norma utilizada	Longarinas existentes					Longarinas novas						
	Mom. fletor vão (<i>KN.m</i>)	Forças cortantes vão (<i>KN</i>)	Mom. fletor balanço (<i>KN.m</i>)	Forças cortantes balanço (<i>KN</i>)	Flecha total (<i>cm</i>)	Mom. fletor vão (<i>KN.m</i>)	Forças cortantes vão (<i>KN</i>)	Mom. fletor balanço (<i>KN.m</i>)	Forças cortantes balanço (<i>KN</i>)	Flecha imediata + diferida (<i>cm</i>)		
	Vão		Balanço			Vão		Balanço		Vão		
NBR 7188	4060	1450	-5140	1070	2,80	1,00	2650	921	-3370	684	2,80	0,80
Eurocódigo	5020	1560	-6510	1300	3,10	1,40	3140	993	-4420	836	3,20	1,80

Tabela 6 – Solicitações e deslocamentos nas seções notáveis após alargamento da ponte 3.

Norma utilizada	Longarinas existentes				Longarinas novas			
	Mom. Fletor Vão (<i>KN.m</i>)	Mom. Fletor Apoio (<i>KN.m</i>)	Força Cortante (<i>KN</i>)	Flecha Total (<i>cm</i>)	Mom. Fletor Vão (<i>KN.m</i>)	Mom. Fletor Apoio (<i>KN.m</i>)	Força Cortante (<i>KN</i>)	Flecha Imediata + Diferida (<i>cm</i>)
NBR 7188	2640	-3010	1140	2,30	1640	-2430	788	2,45
Eurocódigo	2950	-2970	1190	2,30	1800	-2460	829	2,48

mostram que para a ponte com vigas simplesmente apoiadas o acréscimo nas solicitações são de no máximo 9%. Na ponte em balanço tais acréscimos podem chegar a 26% enquanto que nas pontes com dois vãos os acréscimos são de no máximo 11% nos momentos positivos. As flechas (imediatas e diferidas) também são superiores quando calculadas pelo Eurocódigo mas todos os valores obtidos encontram-se dentro dos limites admissíveis.

É possível concluir, portanto, nessa etapa do estudo, que o modelo LM1 do Eurocódigo é bastante realista, produz solicitações compatíveis em projetos de alargamento e reforço de pontes rodoviárias e deve ser utilizado como uma das referências no processo de modificação da NBR 7188.

Referências

- ABNT. NBR 7188 – Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestres, Rio de Janeiro, 1984.
- EN1991-2 Eurocode 1 – Actions on structures – Part 2: Traffic loads on bridges CEN, 2002.
- MENDES, P.T.C. – Contribuição para um modelo de gestão de pontes de concreto aplicado à rede de rodovias brasileiras (Tese de Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- 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), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal (2013).