



Superestrutura de Pontes em Vigas Calhas Sob Torção

Armando Santos Cerqueira Sobrinho¹, Ricardo Valeriano Alves², Flávia Moll de Souza³

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro / armandosobrinho@poli.ufrj.br

² Universidade Federal do Rio de Janeiro / valeriano@poli.ufrj.br

³ Universidade Federal do Rio de Janeiro / flaviamoll@poli.ufrj.br

Resumo

A superestrutura das pontes e viadutos está submetida a diferentes ações variáveis, sendo a carga móvel uma das mais significativas. Diferente das superestruturas em seção fechada, nas superestruturas em seção aberta as cargas excêntricas se distribuem de forma desigual entre suas vigas longarinas. Isso ocorre devido à baixa rigidez à torção destas seções transversais quando comparadas às seções celulares. Um dos métodos mais difundidos para avaliação da distribuição transversal da carga móvel em seção aberta é o conhecido Método de Courbon. Observa-se que, ao contrário de outros métodos propostos no decorrer da história da engenharia, a formulação de Courbon se manteve em uso por sua simplicidade e relativa precisão. Embora esse método considere a seção transversal indeformável, a rigidez à torção das vigas é desprezada. Desta forma, as cargas excêntricas despertam exclusivamente momentos fletores e solicitações de forças cortantes. Esse pressuposto tende a apresentar bons resultados na análise de seções compostas por vigas com baixa rigidez à torção, tais como tabuleiros constituídos de vigas múltiplas (aço ou concreto) com seção tipo "I". O objetivo deste trabalho é investigar as seções em vigas múltiplas do tipo calha, cuja rigidez à torção é bem superior à do tipo "I", no que concerne a armadura de cisalhamento (cortante e torção) a partir das solicitações obtidas pelo método de Courbon e pelo método dos elementos finitos, considerando a rigidez à torção das longarinas. São apresentados os resultados da investigação para 36 configurações de tabuleiros de vigas calhas, onde variou-se as alturas das vigas longarinas, espaçamento entre eixos das longarinas e vão.

Palavras-chave

Pontes rodoviárias; método de Courbon; Método dos Elementos Finitos; rigidez à torção; vigas calhas

Introdução

Os viadutos e pontes rodoviárias estão submetidos aos mais diversos tipos de carregamentos. As cargas móveis, em razão de sua natureza dinâmica, são determinantes no dimensionamento dos elementos portantes das pontes. A análise da obra de arte especial (OAE) como um sistema de grelha hiperestática é usual para o dimensionamento de superestruturas de vigas múltiplas.

A consideração de cargas móveis excêntricas em superestruturas pode gerar torção, cuja absorção pela estrutura depende da configuração da seção transversal. Em seções fechadas, como as seções celulares, a torção é resistida principalmente por um fluxo de cisalhamento uniforme (torção de Saint-Venant), enquanto em seções abertas com baixa rigidez à torção, esta solicitação é absorvida pelo empenamento da seção, resultando em flexão desigual nas longarinas. Superestruturas com rigidez à torção intermediária, como as de vigas calhas múltiplas, podem apresentar uma combinação desses comportamentos.

O Método de Courbon é um método difundido para avaliar a distribuição transversal de carga móvel em seções abertas, caracterizado por sua simplicidade e relativa precisão. No entanto, esse método despreza a rigidez à torção das vigas, assumindo seções transversais indeformáveis e considera que cargas excêntricas induzem apenas momentos fletores e forças cortantes. O objetivo deste artigo foi investigar a aplicação do Método de Courbon em superestruturas com seções em vigas calhas múltiplas, cuja rigidez à torção é superior à das seções "I", no que concerne ao dimensionamento da armadura de cisalhamento (cortante e torção),

comparando os resultados com aqueles obtidos pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). O trabalho aqui apresentado resume parte do projeto de graduação do autor (SOBRINHO, 2024), desenvolvido no curso de engenharia.

Conceitos fundamentais

O sistema estrutural em vigas (figura 1) é bastante difundido no país, seja pela especialização da mão de obra ou pela baixa complexidade construtiva para vencer pequenos e médios vãos. Somado a isso, o processo de industrialização no uso do concreto armado e protendido – a partir da difusão dos concretos pré-moldados e pré-fabricados – tornou a utilização do sistema de vigas vantajoso na construção de OAEs. Segundo EL DEBS (2021), as pontes em vigas correspondem a uma parcela de 93% das pontes cadastradas pelo DER-SP até o ano de 2001. Ainda segundo MENDES (2009), no território nacional, a parcela de pontes em vigas alcança 68% das OAEs catalogadas (figura 2), chegando possivelmente a fatias maiores se considerado o percentual das obras com sistema estrutural “Não informado”. Dessa forma, a presença e importância desse sistema estrutural para evolução das rodovias no país é marcante e evidencia uma tendência de especialização da mão de obra para construção e elaboração de projetos de pontes de múltiplas vigas.

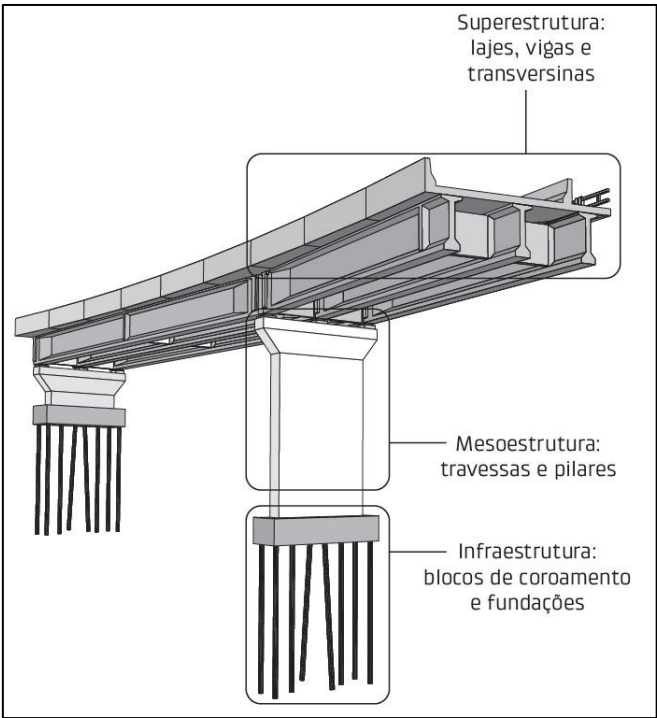


Figura 1 – Composição típica das pontes e viadutos (Fonte: VALERIANO, 2021)

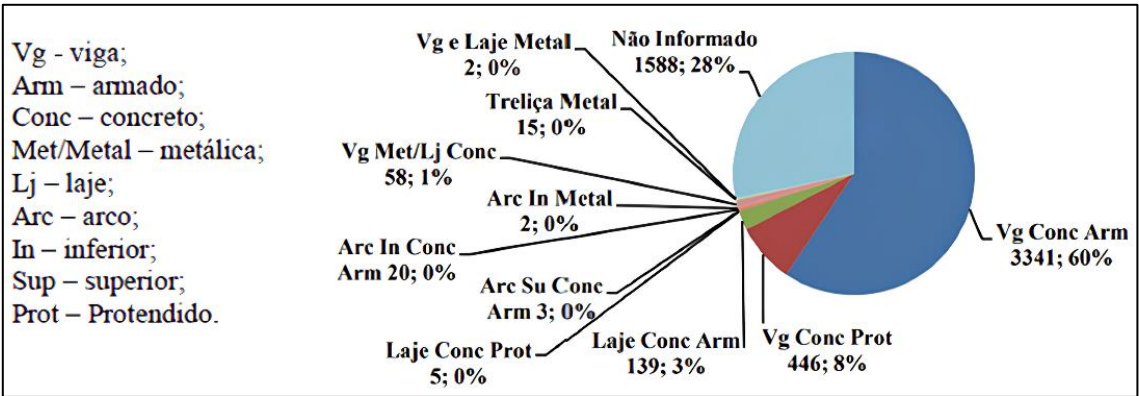


Figura 2 – Pontes catalogadas por sistema estrutural no Brasil (Fonte: adaptado de MENDES, 2009)

As seções transversais fechadas, denominadas também vazadas ou celulares, têm a característica de conter uma ou mais células em sua geometria. Comumente chamadas de vigas “caixão”, estas possuem ótima relação

resistência/peso e geralmente são utilizadas para vencer vãos da ordem 40 m a 130 m, com eixos retilíneos ou curvos. Sua elevada resistência à torção praticamente elimina o empenamento da seção transversal e consequentemente reduz bastante a interação entre os efeitos de flexão e torção. Dessa forma, modelos unifilares de barras tendem a representar bem o comportamento estrutural dessas estruturas. Quando submetido à uma carga excêntrica, o carregamento pode ser decomposto em dois sistemas de cargas simétrico e assimétrico. No sistema simétrico, são obtidos os momentos de flexão iguais em ambas as almas da seção celular, enquanto no sistema assimétrico a seção experimenta torção. A figura 3 ilustra a decomposição da aplicação da carga excêntrica.

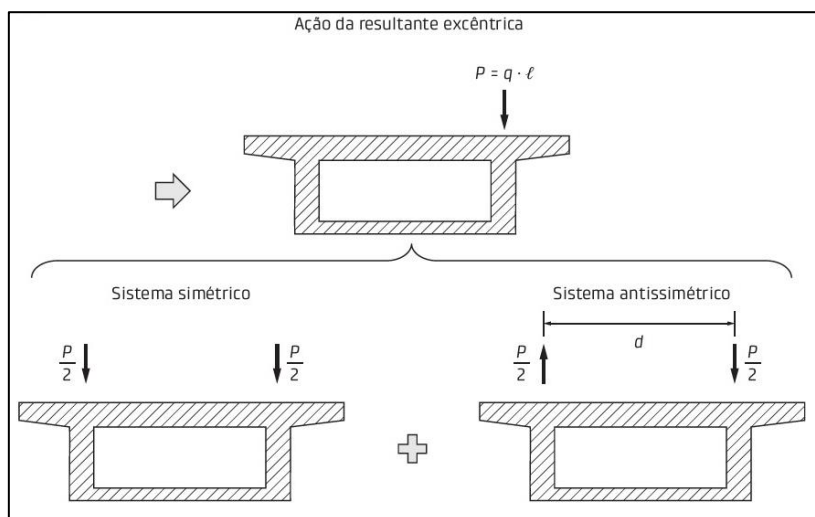


Figura 3 – Superposição de efeitos em seção celular sujeita à carga excêntrica
(Fonte: adaptado de VALERIANO, 2021)

Quando submetida às solicitações de torção, a seção transversal celular desenvolve um mecanismo de resistência interno que se manifesta por meio de um fluxo de cisalhamento que se desenvolve ao longo das paredes da seção. Esse fluxo, direcionado de forma a contrapor o momento torçor aplicado, confere à seção sua elevada rigidez à torção. A Figura 4 ilustra, de forma esquemática, esse fenômeno, evidenciando o caminho percorrido pelas tensões de cisalhamento. Ressalta-se que esse fluxo é constante entre as paredes da célula, e independe de sua espessura, como demonstrado pela equação 1.

$$\tau_b \cdot t_b = \tau_c \cdot t_c = \tau_d \cdot t_d = f \text{ (constante)} \quad (1)$$

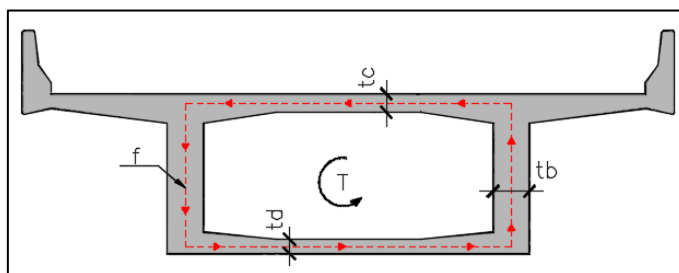


Figura 4 – Fluxo de cisalhamento em seção celular
(Fonte: SOBRINHO, 2024)

Sob a ação de carga excêntrica aplicada a uma superestrutura de OAE com rigidez transversal garantida por transversinas nos apoios e no meio do vão, o elemento estrutural tende a experimentar deslocamentos verticais e rotacionais de corpo rígido. Essa tendência de movimento, combinada com as restrições dos apoios isostáticos, induz o surgimento de tensões normais e tangenciais nas almas da seção transversal. A integração das tensões normais em cada alma resulta em momentos fletores de sentidos opostos, como ilustrado na Figura 5. O fenômeno de absorção de torque por momentos fletores em sentidos opostos resulta numa forma de “binário” de momentos, denominado bimomento.

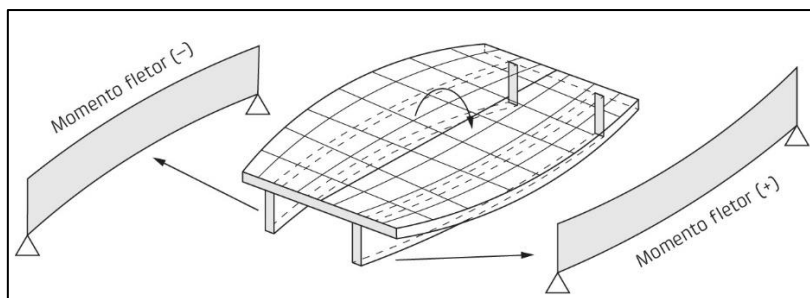


Figura 5 – Bimomento em superestrutura de seção aberta (Fonte: VALERIANO, 2021).

O dimensionamento ao cisalhamento de vigas de concreto armado utiliza o modelo de biela e tirante. A parcela que resiste à força cortante é composta pela contribuição do concreto e da armadura transversal (estribos). Em vigas submetidas à torção, a resistência é dada por uma faixa de área ao longo do perímetro da seção idealizada por Brandt, sendo resistida por armaduras longitudinais e estribos. A ABNT NBR 6118 (2023) estabelece critérios para o dimensionamento de vigas sob cortante e torção combinados.

Estudos de caso

Foram desenvolvidos 36 modelos computacionais em elementos finitos de superestruturas biapoiadas com seção transversal constituída por vigas calhas. As variáveis consideradas foram o número de longarinas (2, 3 e 4), o espaçamento inteiros (3,00 m e 4,00 m) e o vão (20,0 m, 25,0 m, 30,0 m, 35,0 m, 40,0 m e 45,0 m).

As longarinas adotadas eram do tipo viga calha com paredes de 22 cm de espessura e largura de 170 cm, com altura variável em função do vão. A largura das mesas colaborantes foi definida conforme a ABNT NBR 6118:2023. Transversinas de apoio nas extremidades e no centro do vão foram consideradas em todos os modelos.

As ações permanentes consideradas foram o peso próprio da superestrutura (longarinas e laje) e a sobrecarga permanente (barreira New Jersey e pavimento). As ações variáveis foram representadas pelo trem-tipo TB-450 homogeneizado, com a aplicação dos coeficientes de impacto vertical e de número de faixas aplicados de acordo com a ABNT NBR 7188 (2024).

A repartição transversal da carga móvel foi avaliada utilizando o Método de Courbon, com a obtenção dos coeficientes de repartição transversal (CRT) para superestruturas de duas, três e quatro longarinas. Adicionalmente, a distribuição transversal foi analisada pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) utilizando o *software* SAP2000, através da modelagem simplificada de barras e aplicação de cargas unitárias em diferentes posições transversais. Linhas de distribuição transversal de momento fletor e torção foram obtidas para cada configuração. Trens-tipo de flexão longitudinais foram determinados para ambos os métodos. Já para o trem-tipo de torção foi obtido apenas para o modelo em elementos finitos. As figuras 6 a 8 apresentam as de distribuição obtidas pelo método de Courbon e pelo MEF, para seção transversal com quatro vigas com afastamento inteiros de 3,00 m.

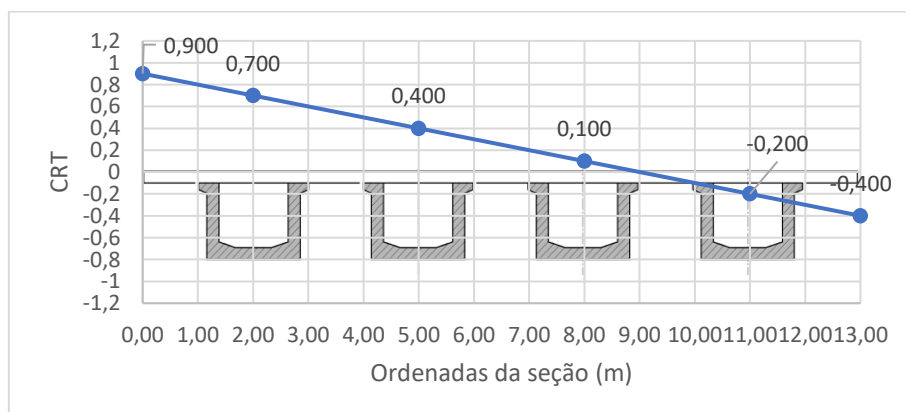


Figura 6 – Seção transversal das superestruturas de quatro vigas – CRT de flexão (Método de Courbon)

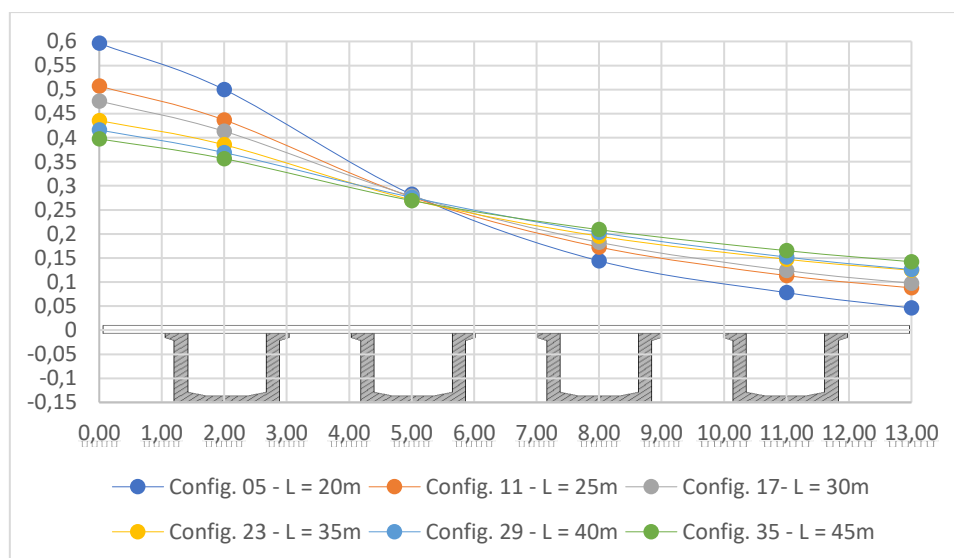


Figura 7 – Seção transversal das superestruturas de quatro vigas – CRT de flexão (MEF)

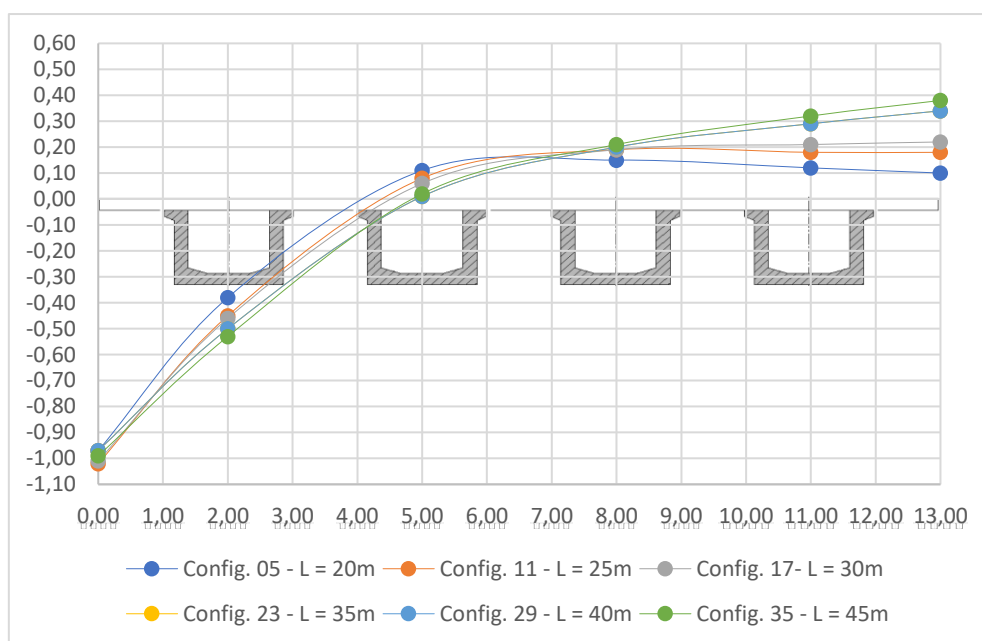


Figura 8 – Seção transversal das superestruturas de quatro vigas – CRT de torção (MEF)

O dimensionamento da armadura de cisalhamento da longarina de bordo (VL1) foi realizado a partir das solicitações de carga móvel determinadas por ambos os métodos. A combinação última normal de ações foi baseada nos coeficientes de ponderação definidos na ABNT NBR 8681:2003.

A armadura transversal (estribos) foi dimensionada utilizando o Modelo de Cálculo I da ABNT NBR 6118 (2023). No MEF, considerou-se a ação concomitante de força cortante e momento de torção. A avaliação da biela de concreto sob cortante e torção combinados não indicou falha por esmagamento em nenhuma viga de bordo.

Análise de resultados

A figura 9 resume as áreas das armaduras transversais, para as diversas configurações estudadas, segundo o método de Courbon e o MEF. Nota-se que a soma da área de aço total calculada a partir das solicitações de força cortante e de torção obtidas pelo MEF é inferior à calculada de acordo com Courbon, exceto nas configurações 24 e 36, indicando que o dimensionamento ao cortante a partir da distribuição de Courbon é conservadora. Embora não contabilize a presença da torção, o método de Courbon leva a solicitações de força

cortante mais elevadas que compensam a ausência da consideração da torção na análise. Observa-se também que, à medida que a largura da superestrutura aumenta (configurações 6; 12; 18; 24; 30; 36), a diferença entre as armaduras calculadas pelo método de Courbon e pelo MEF diminui, atingindo valores calculados a partir da distribuição de cargas por Courbon menores do que pelo MEF (configurações 24 e 36).

Isso se deve ao fato de que, quanto maior a largura da superestrutura, maior é a solicitação de torção, resultando em um aumento da área de aço calculada. Quando comparada a armadura de torção mínima que deve ser somada à armadura de combate ao cortante calculada pelo MEF, as armaduras obtidas a partir do método de Courbon se mostram sempre inferiores, indicando que, em termos de detalhamento, a armadura mínima de torção não é atendida pelas solicitações determinadas com base no método de Courbon.

A Figura 10 ilustra a diferença absoluta de armaduras obtidas a partir dos dois métodos utilizados.

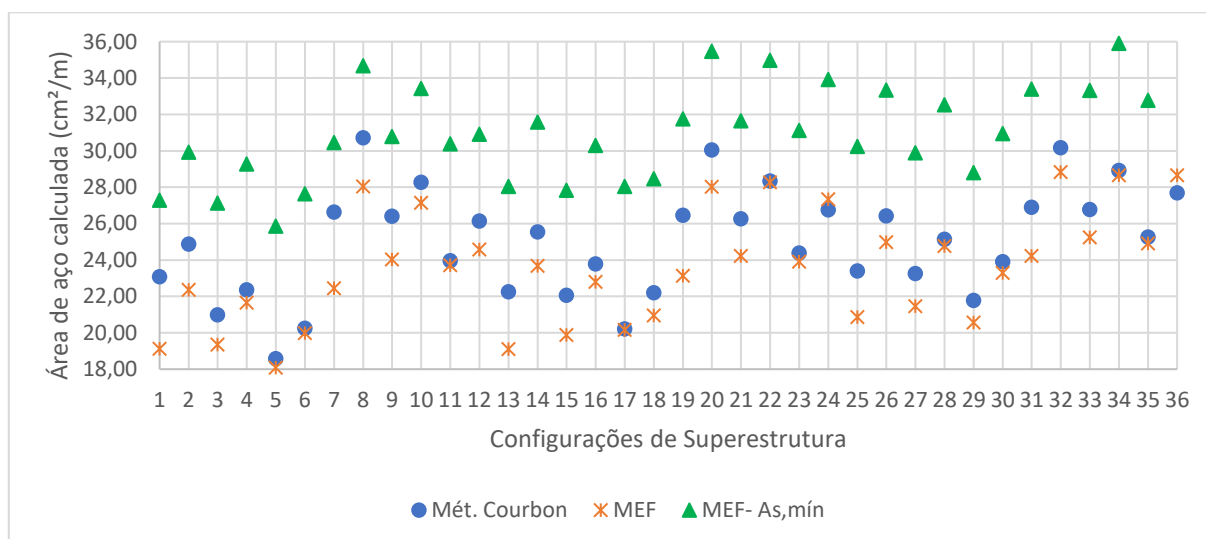


Figura 9 – Comparativo da área de aço de estribo calculada para a alma da viga

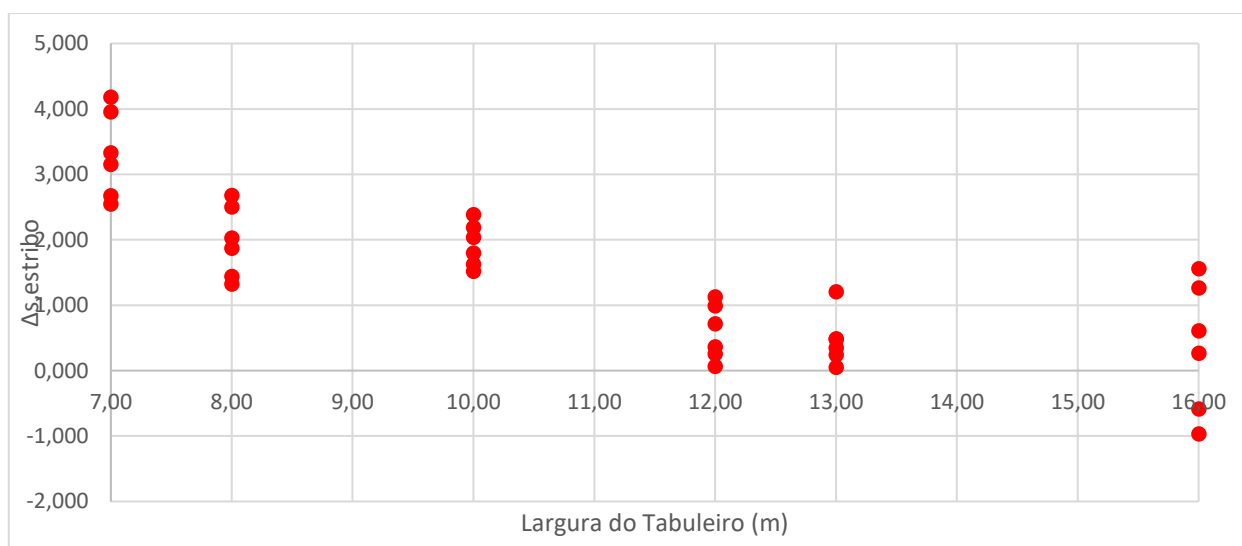


Figura 10 – Largura do tabuleiro versus diferença absoluta de armaduras transversal na alma

Com a finalidade de se comparar a área de aço das armaduras longitudinais de combate à torção com a área de aço da armadura de pele obrigatória em vigas com altura superior a 60cm (ABNT NBR 6118, 2023), nota-se que a área de aço obtida pelo dimensionamento à torção apresenta, por face, sempre valores inferiores à armadura mínima de pele recomendada para o combate da retração, como demonstrado pela figura 11. Para a mesa inferior da longarina, a área de aço longitudinal de combate à torção deve ser somada à armadura de flexão na face inferior, enquanto na face superior deve ser somada com a armadura de flexão da laje.

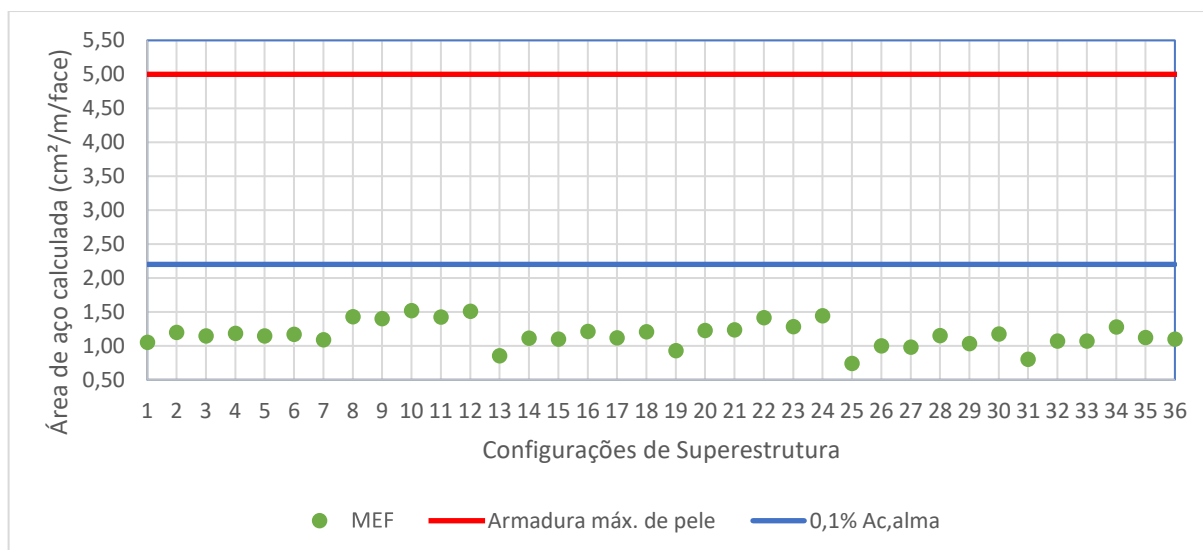


Figura 11 – Armadura longitudinal de torção por face

A figura 12 apresenta as relações entre as solicitações de projeto e os valores resistentes calculados segundo os métodos de Courbon e dos elementos finitos. Nota-se que, em ambas as situações a biela é solicitada de maneira equivalente, todavia, esse valor não ultrapassa o limite definido pelo item 17.7.2.2 da ABNT NBR 6118 (2023).

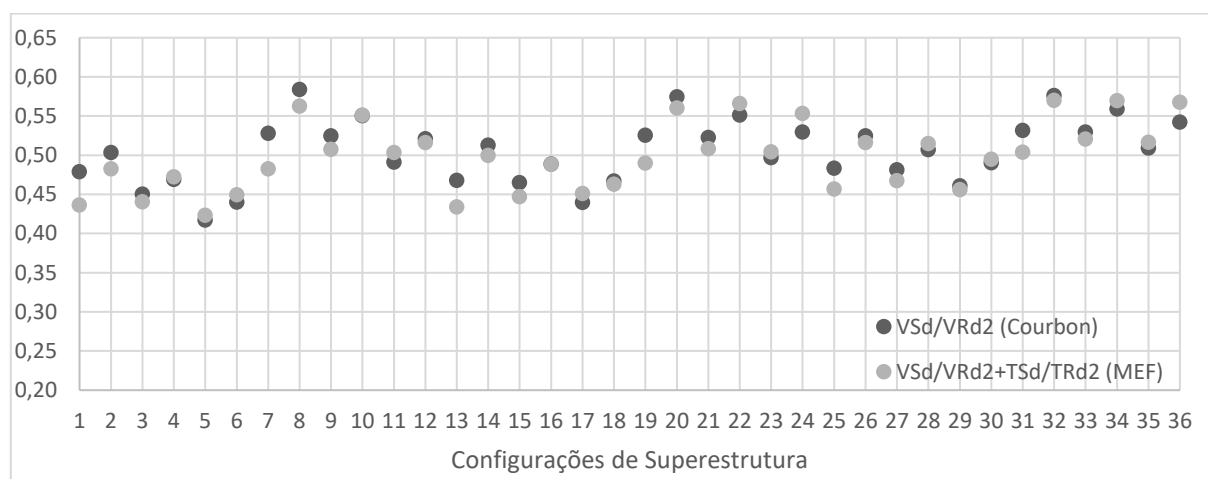


Figura 12 – Razão entre solicitação de projeto e resistência da biela de concreto

Conforme ilustrado na figura 13, as forças cortantes obtidas pelo método de Courbon são superiores às do MEF. Isso reforça o fato de que o método de Courbon, ao superestimar as forças cortantes, resulta em estribos com área de aço equivalente aos dimensionados pelo MEF, que considera a combinação de torção e força cortante.

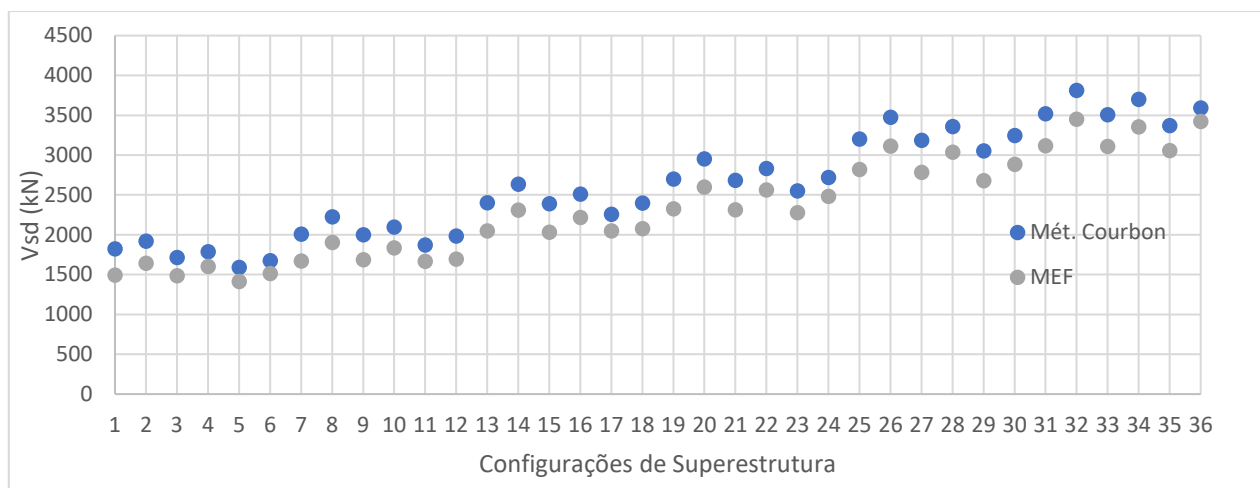


Figura 13 – Diferença absoluta entre solicitações de forças cortantes de projeto por Método de Courbon e MEF

Conclusão

A questão central deste estudo foi avaliar a aplicabilidade do método de Courbon em superestruturas de vigas múltiplas tipo "calha", que possuem elevada rigidez à torção. Para isso, foram comparadas as armaduras de cisalhamento obtidas pelo método de Courbon e pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), considerado mais preciso. Foram analisadas 36 configurações de superestruturas de pontes com vigas calha, e constatou-se que as armaduras determinadas pelos dois métodos apresentam diferenças significativas.

O método de Courbon calcula apenas a armadura dos estribos da alma, enquanto o MEF, por considerar a rigidez à torção da seção, também determina as armaduras das mesas superior e inferior da viga calha. Contudo, em termos de detalhamento global, ambos os métodos fornecem resultados equivalentes. Em relação à área de aço, o método de Courbon mostrou-se conservador, principalmente em tabuleiros estreitos e com menor espaçamento entre longarinas. Quando somadas as armaduras de cortante e de torção calculados pelo MEF, os valores obtidos se tornam comparáveis aos do método de Courbon.

As armaduras longitudinais definidas pelo MEF mostraram-se inferiores à armadura mínima de pele, que já contempla a torção, exceto na mesa inferior, onde a armadura de flexão passiva exige verificação. No entanto, como o método de Courbon apresenta solicitações superiores ao MEF, sugere-se que ele forneça uma margem de segurança adicional.

Conclui-se que o método de Courbon é conservador para superestruturas com vigas calhas múltiplas, garantindo armaduras suficientes para resistir às solicitações de torção do MEF. No entanto, recomenda-se investigar a necessidade de armaduras adicionais para flexão transversal da laje e flexão passiva da longarina.

Referências bibliográficas

ALVES, E.V.; ALMEIDA, S.M.F.; JUDICE, F.M.S., 2004, Métodos de análise estrutural de tabuleiros de pontes em vigas múltiplas de concreto protendido, Engevista, Niterói – Rio de Janeiro, v.6, n.2, p. 48-58,. Disponível em < www.periodicos.uff.br >. Acesso em: 01 dez.2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.

_____. NBR 7187: Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido -

Procedimento. Rio de Janeiro, 2021.

_____. NBR 7188: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro, 2024.

EL DEBS, M. K. Pontes de concreto com ênfase na aplicação de elementos pré-moldados. 1ª Edição. São Paulo. Oficina de texto, 2021.

GERE, J. M., GOODNO, B. J., 2010, Mecânica dos Materiais. 7ª Edição. São Paulo. Cengage Learning.

HAUKAAS, T., 2017, Warping Torsion, University of British Columbia.

HIBBELER, R. C., 2010, Resistência dos Materiais. 7ª Edição. São Paulo. Pearson Prentice Hall.

HICKS, S. 2011. Design of members subjected to torsion. SCI Publication.

SAPOUNTZAKIS, E. J., MOKOS, V. G., 2003, Warping shear stress in nonuniform torsion by BEM.

SOBRINHO, A. S. C., Superestrutura de pontes em vigas calhas sob torção. Projeto de graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2024.

VALERIANO, R. Pontes. 1ª Edição. São Paulo. Oficina de texto, 2021.