



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Análise da Distribuição Transversal de Cargas em Pontes Curvas

José Vittor Siqueira Cóco¹, Mayra Soares Pereira Lima Perlingeiro²,

Ricardo Valeriano Alves³, Luiz Antonio Vieira Carneiro⁴

¹Universidade Federal Fluminense / Departamento de Eng^a Civil / josevittor@id.uff.br

²Universidade Federal Fluminense / Departamento de Eng^a Civil / mayraperlingeiro@id.uff.br

³Universidade Federal do Rio de Janeiro / Departamento de Estruturas / valeriano@poli.ufrj.br

⁴Universidade Federal Fluminense / Departamento de Eng^a Civil / luizcarneiro@id.uff.br

Resumo

As estruturas de pontes e viadutos curvos, ao passo que apresentam maior flexibilidade de projeto, apresentam também dificuldades ao calculista durante o processo de análise estrutural, já que são estruturas um tanto mais complexas quando comparadas às pontes ou viadutos de trajetória retilínea. Para a análise de distribuição transversal dos esforços devidos às cargas móveis em estruturas curvas, por exemplo, são geralmente utilizadas ferramentas computacionais. No entanto, na ausência de normas que especifiquem os procedimentos de cálculo, a aplicabilidade de outros métodos pode ser testada em favor da simplificação dos meios e da agilidade na obtenção de resultados suficientemente satisfatórios. O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento da distribuição transversal dos esforços devidos à ação de cargas móveis atuantes sobre a superestrutura de pontes ou viadutos de tabuleiro com trajetória curva. De forma mais específica, propõem-se dois modelos de cálculo dos coeficientes de distribuição transversal: um modelo numérico, utilizando modelagem computacional, e um método analítico clássico, o método de Engesser-Courbon. A fim de verificar a dispersão de resultados entre os dois métodos, eles são ambos aplicados a um estudo de caso de um viaduto em concreto protendido, com seção transversal composta por múltiplas vigas pré-moldadas retas de tipo I e tabuleiro com trajetória curva. Também são calculados os trens-tipo devidos às cargas móveis como admitidos pela norma brasileira ABNT NBR 7188 (2013), a partir dos resultados obtidos pelos dois modelos de cálculo. Os resultados mostram que os métodos numérico e analítico não divergem de forma significativa quando aplicados sobre o caso estudado. Assim, para fins de simplificação dos cálculos, o método de Engesser-Courbon pode ser utilizado na análise de estruturas de tabuleiro curvilíneo com seções transversais similares à do estudo de caso testado.

Palavras-chave

Distribuição transversal; ponte curva; método de Engesser-Courbon; modelagem computacional.

Introdução

A expansão das cidades requer que os projetos de engenharia sejam mais flexíveis e se adaptem de maneira ótima a um ambiente em que o número de construções é crescente. As obras de arte especiais, caracterizadas necessariamente pela mudança do meio em que estão inseridas, requerem que haja integração de dois elementos principais durante o planejamento da obra: transposição dos obstáculos físicos urbanos sem a perda da funcionalidade. No caso de pontes e viadutos, as estruturas de trajetória curva se apresentam como uma boa solução, à medida que estruturas retas podem ser consideradas inviáveis de acordo com os obstáculos a serem vencidos.

Apesar de a solução cumprir com os dois elementos mencionados anteriormente, ela apresenta desvantagens relacionadas à análise estrutural: a curvatura do tabuleiro influencia na distribuição transversal de cargas e deve ser considerada durante a análise das cargas móveis, independentemente do método de cálculo escolhido. A análise estrutural de estruturas curvas é assunto estudado com maior proeminência desde o século passado. Como referência, a primeira norma norte-americana a definir procedimentos de cálculo para estruturas desse tipo data de 1976, a *AASHTO Guide Specifications for Horizontally Curved Bridges*.

Modificações foram feitas à norma ao longo dos anos, até que, em 1999, fosse adotado pela AASHTO um novo texto como norma padrão para uso em estruturas curvas, o *AASHTO Guide Specifications for Horizontally Curved Steel Girder Highway Bridges* (ITANI e RENO, 2000).

No Brasil, não há normas que tratem da análise estrutural de pontes ou viadutos curvos, sendo necessária a consulta das normas estrangeiras que, muitas das vezes, utilizam de metodologias pouco usuais em projetos realizados no Brasil.

O código *AASHTO Guide Specifications for Horizontally Curved Steel Girder Highway Bridges* (2003) define que a análise de distribuição transversal de pontes ou viadutos curvos deva ser realizada com apoio de método computacional refinado, como a aplicação do método dos elementos finitos sobre um modelo computacional tridimensional da estrutura estudada. O mesmo código concorda, por outro lado, que não há regras rígidas que impeçam o uso de métodos simplificados para realização de alguns cálculos, como o da obtenção dos coeficientes de distribuição transversal, desde que o método escolhido pelo calculista seja considerado competente quando comparado ao método computacional. Logo, métodos analíticos clássicos usualmente aplicados em outros tipos de estrutura, como o método de Engesser-Courbon, podem ser testados para devida validação.

Sabe-se do nível de limitações do método de Engesser-Courbon. Todavia, vê-se interesse em aplicar o método fora de suas condições usuais como forma de verificação de suas capacidades e possibilidades de emprego, bem como pelas razões de identificar qualquer eventual discrepância de resultado quando comparado a um método mais exato. Devido à simplicidade de sua formulação, à facilidade de aplicação e à rapidez na obtenção de resultados, ora muito satisfatórios em alguns casos, justifica-se a tentativa de uso do método de Engesser-Courbon para análise da distribuição transversal desde que seja feita uma comparação com método computacional.

Estudo de caso

Trata-se de um viaduto rodoviário. Sua superestrutura é composta por quatro vigas pré-moldadas protendidas de comprimentos diferentes, retas ao longo da direção longitudinal, e transversinas apenas nos apoios. A Figura 1 apresenta a planta em corte inferior, e a Figura 2, a vista de um corte na seção transversal de meio de vão da superestrutura.

Todos os elementos estruturais da superestrutura são compostos por concreto C35. As transversinas nos apoios possuem dimensões 0,20 x 1,00 m e garantem a rigidez do tabuleiro. As vigas possuem altura de 1,20 m e estão ligadas a uma laje em concreto armado de 0,20 m de espessura.

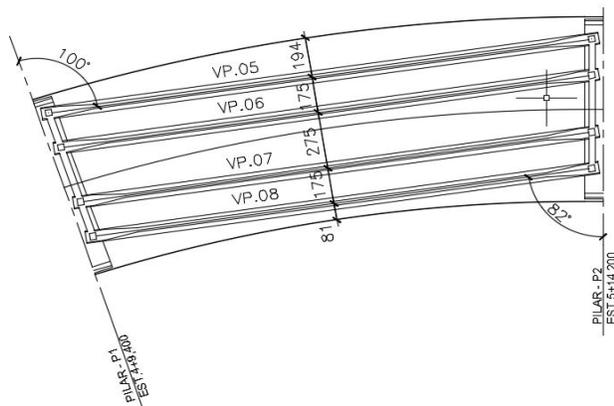


Figura 1 – Planta em corte inferior (dimensões em cm).

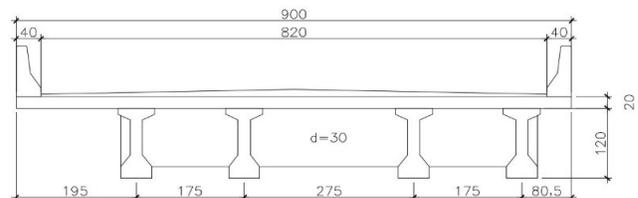


Figura 2 – Seção transversal de meio de vão (dimensões em cm).

A inércia das vigas isoladas varia de acordo com a proximidade dos apoios. As vigas apresentam, no meio de vão, seção transversal do tipo I e, nos apoios, seção transversal alargada (ver Figura 1).

Para cada uma das vigas isoladas nomeadas na Figura 1, foram obtidas as mesas colaborantes na seção de meio de vão de acordo com os procedimentos indicados na norma brasileira ABNT NBR 6118 (2014). As vigas apresentam mesas colaborantes diferentes entre si, pois não há simetria da posição das vigas em relação ao tabuleiro.

Método numérico

Foi desenvolvido um modelo tridimensional da superestrutura do estudo de caso supracitado, e obtidos, computacionalmente, utilizando o método dos elementos finitos (MEF), os coeficientes de distribuição transversal, por meio dos *softwares* AutoCAD e SAP2000.

A construção do modelo tridimensional foi feita com o uso do *software* AutoCAD, no qual foram definidos os elementos de área que compõem a laje. Estes foram desenhados radialmente, acompanhando a curvatura do tabuleiro. Quanto à forma, procurou-se uniformizar os elementos, dimensionando-os como elementos quadrangulares de área aproximadamente igual a $0,0625 \text{ cm}^2$ e proporção lado a lado de 1:2. Reitera-se que, para que a análise do modelo seja realizada com sucesso, os diferentes elementos devem ser ligados sempre nó a nó.

Logo, as arestas dos elementos da laje adjacentes às vigas devem respeitar as posições dos eixos das vigas e transversinas de apoio, assim como as larguras das mesas colaborantes já calculadas. Em alguns casos, foi necessário utilizar elementos triangulares nas regiões de interceptação da laje com os demais elementos estruturais ou nos limites das mesas colaborantes. A Figura 3 mostra um detalhe da disposição dos elementos de área da laje (em amarelo) próximos ao eixo de uma das vigas.

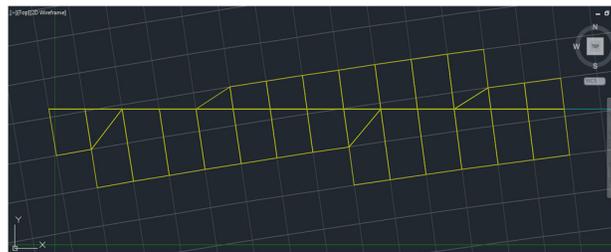


Figura 3 – Detalhe dos elementos de área da laje.

Analogamente aos elementos de área da laje, foram definidos os elementos de área das vigas e transversinas de apoio. A Figura 4 ilustra o conjunto dos elementos de área da laje (em amarelo), das vigas (em laranja) e das transversinas de apoio (em vermelho) no espaço.

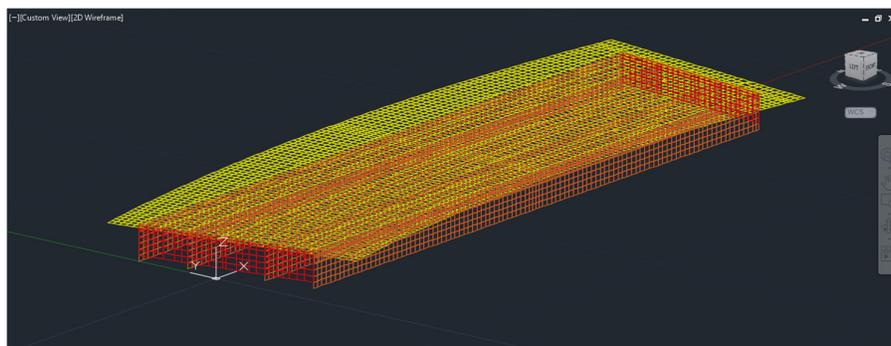


Figura 4 – Elementos de área do modelo tridimensional.

Fisicamente, as vigas e a laje estão rigidamente conectadas. No modelo, entretanto, os elementos de laje, posicionados no plano médio da espessura da laje, possuem uma espessura infinitesimal, havendo assim uma distância equivalente a 10 cm entre este plano e as fibras superiores dos elementos de viga. De forma a manter a rigidez entre os elementos de área que compõem o modelo, foram utilizados elementos de barra ligando cada um dos nós dos elementos de área da laje alinhados com os nós dos elementos de área das vigas.

Para definição das características físicas, importa-se o projeto para o SAP2000. Este *software* permite dividir os elementos em grupos, classificados neste projeto de acordo com o elemento estrutural que compõem (laje, vigas ou transversinas), e definir características gerais para os elementos que formam os grupos, como o material utilizado e a espessura real dos elementos.

Para fins de simplificação, as vigas tiveram sua inércia uniformizada ao longo de todo seu comprimento, utilizando sua seção de meio de vão. Além disso, devido à sua geometria em I, foi necessária uma simplificação de sua forma, mantendo sua área e inércia. Esta simplificação e um detalhe em 3D do modelo que destaca a geometria simplificada das vigas são mostrados nas Figuras 5 e 6.

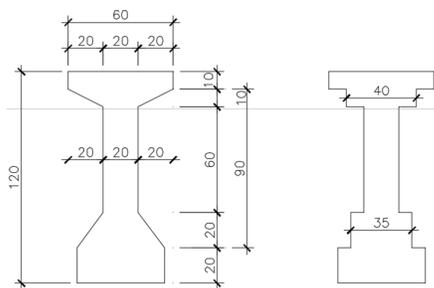


Figura 5 – Simplificação da seção transversal de meio de vão (dimensões em cm).

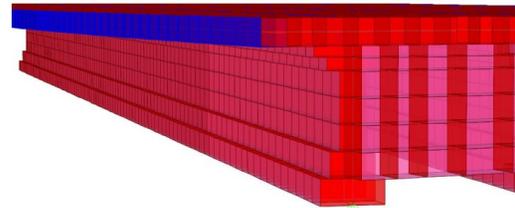


Figura 6 – Detalhe em 3D de uma viga.

Os elementos de barra de conexão tiveram suas características definidas de forma similar aos elementos de área, definindo-os como elementos em concreto C35 e de dimensões 20 cm x 20 cm. Como estes elementos são imaginários e têm o propósito de apenas garantir a rigidez das ligações, suas propriedades foram editadas de forma a anular sua massa e seu peso.

Na análise computacional, os coeficientes de distribuição foram obtidos com a passagem de carregamentos unitários distribuídos ao longo das vigas e sobre os balanços. Os diferentes carregamentos móveis são criados no SAP 2000 como *Load patterns* nomeadas de acordo com a viga ou balanço sobre o qual foram aplicados. A *Load pattern* referente ao balanço da esquerda (BAL,e) do modelo é mostrada na Figura 7.

Como artifício, foram obtidas as solicitações em cada uma das vigas devidas à aplicação dos diferentes *Load patterns*. Para isso, foi utilizada a ferramenta *Section Cut*, responsável pela integração das tensões nos elementos e pela devolução, no caso, dos momentos fletores resistidos por frações pré-definidas da seção transversal. Estas frações, chamadas de seções de corte, são definidas estabelecendo um plano formado por um quadrilátero, na seção de meio de vão. Convenientemente, foram escolhidas seções de corte para cada uma das vigas utilizando sua área de influência delimitada pela largura da mesa colaborante, já conhecida. Os resultados são calculados sobre um ponto específico do quadrilátero definido, tal que foi selecionado o centroide do conjunto formado pela viga isolada e mesa colaborante da laje.

Essas frações, chamadas de seções de corte, são definidas estabelecendo um plano formado por um quadrilátero, na seção de meio de vão. Convenientemente, foram escolhidas seções de corte para cada uma das vigas utilizando sua área de influência delimitada pela largura da mesa colaborante, já conhecida. Os resultados são calculados sobre um ponto específico do quadrilátero definido, tal que foi selecionado o centroide do conjunto formado pela viga isolada e mesa colaborante da laje.

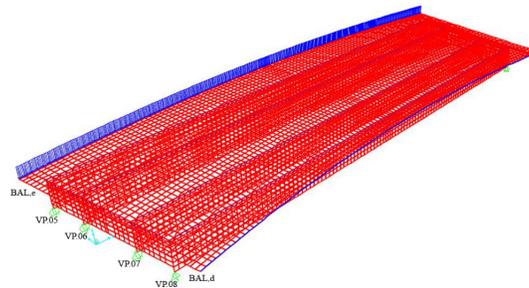


Figura 7 – Aplicação do carregamento unitário distribuído BAL,e.

Essas frações, chamadas de seções de corte, são definidas estabelecendo um plano formado por um quadrilátero, na seção de meio de vão. Convenientemente, foram escolhidas seções de corte para cada uma das vigas utilizando sua área de influência delimitada pela largura da mesa colaborante, já conhecida. Os resultados são calculados sobre um ponto específico do quadrilátero definido, tal que foi selecionado o centroide do conjunto formado pela viga isolada e mesa colaborante da laje.

A Tabela 1 resume, para as diferentes *Load patterns*, os momentos fletores M_y que solicitam as seções de corte, representativas de cada viga. Além disso, os coeficientes de distribuição das solicitações F_d são calculados como a razão entre M_y e a soma dos M_y calculados sobre todas as seções de corte. As Figuras 8 a 11 lustram as linhas de influência de distribuição transversal das vigas VP.05 a VP.08 obtidas pelo MEF.

Tabela 1 – Momentos fletores no meio do vão – MEF.

<i>Load Pattern</i>	Viga	M_y (kN.m)	SOMA M_y (kN.m)	F_d
BAL,e	VP.05	51,451	79,6	0,647
	VP.06	24,608		0,309
	VP.07	5,074		0,064
	VP.08	-1,581		-0,020
VP.05	VP.05	38,396	73,2	0,502
	VP.06	24,817		0,325
	VP.07	10,085		0,132
	VP.08	3,125		0,041
VP.06	VP.05	24,987	68,3	0,341
	VP.06	23,700		0,324
	VP.07	15,730		0,215
	VP.08	8,755		0,120
VP.07	VP.05	8,212	65,1	0,120
	VP.06	14,485		0,212
	VP.07	23,234		0,340
	VP.08	22,365		0,327
VP.08	VP.05	2,004	63,1	0,031
	VP.06	8,350		0,128
	VP.07	22,343		0,343
	VP.08	32,374		0,498
BAL,d	VP.05	-0,833	79,6	-0,013
	VP.06	5,343		0,085
	VP.07	21,406		0,339
	VP.08	37,137		0,589



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

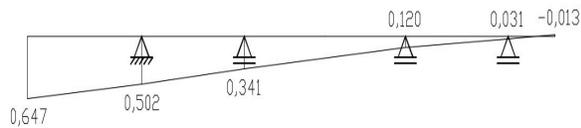


Figura 8 – Linha de influência de distribuição transversal da VP.05 - MEF.



Figura 9 – Linha de influência de distribuição transversal da VP.06 - MEF.

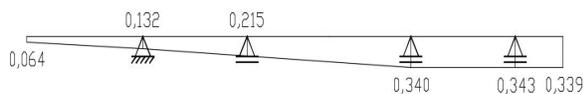


Figura 10 – Linha de influência de distribuição transversal da VP.07 - MEF.

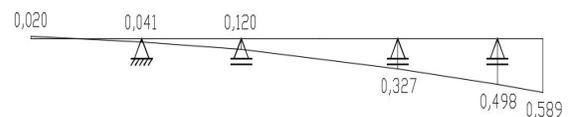


Figura 11 – Linha de influência de distribuição transversal da VP.08 - MEF.

As linhas de distribuição transversal são carregadas pelo veículo-tipo 450 para o cálculo dos trens-tipo de flexão, de acordo com procedimento indicado na norma brasileira ABNT NBR 7188 (2013). Os trens-tipo de flexão correspondentes a cada uma das linhas de influência das Figuras 8 a 11 são apresentados nas Figuras 12 a 15.

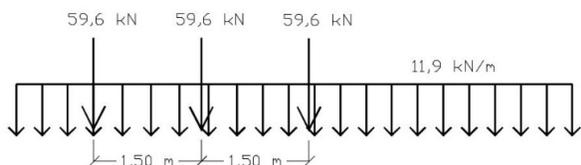


Figura 12 – Trem-tipo de flexão da VP.05 - MEF.

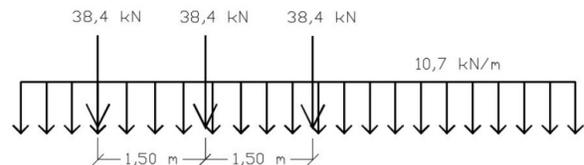


Figura 13 – Trem-tipo de flexão da VP.06 - MEF.

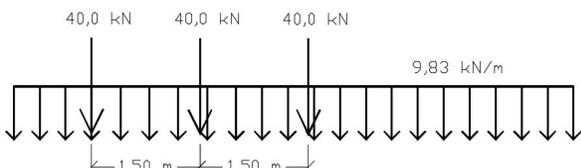


Figura 14 – Trem-tipo de flexão da VP.07 - MEF.

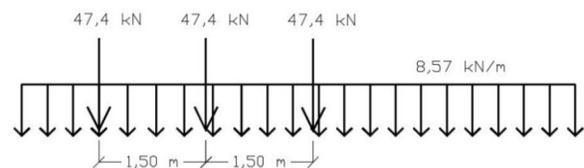


Figura 15 – Trem-tipo de flexão da VP.08 - MEF.

Método de Engesser-Courbon

Utilizou-se o método de Engesser-Courbon como método simplificado para fins de comparação. Com sua primeira formulação publicada por Beyer, atribuída ao engenheiro Engesser e posteriormente desenvolvido pelo francês Courbon em 1940, este método é uma das primeiras tentativas em determinar a linha de influência de distribuição de cargas para seções transversais de múltiplas vigas (SAN MARTIN, 1981). A simplicidade de cálculo é justificada pelo fato do método ser baseado em hipóteses simplificadoras (ALVES *et al.*, 2004):

- o tabuleiro da ponte é apresentado como uma grelha, formado por elementos de viga paralelos ao longo do eixo longitudinal, de extensão predominante (vigas), e transversal, de menor extensão (transversinas);
- as vigas são admitidas deformáveis e idênticas;
- a rigidez à flexão é infinita para todas as transversinas;
- os efeitos de torção são desprezíveis;

e) as hipóteses básicas da resistência dos materiais são válidas (material homogêneo; a Lei de Hooke e o Princípio de Saint-Venant válidos; as vigas sujeitas apenas a pequenos deslocamentos, as seções planas mantidas planas após a deformação do tabuleiro).

A hipótese (a) sugere que as vigas são apoiadas umas sobre as outras e os deslocamentos dos nós são iguais para ambos os elementos no ponto de cruzamento. As hipóteses (b) e (c) consolidam a ideia da hipótese (a) ao sugerirem que são desprezíveis as deformações das transversinas em relação às deformações das vigas.

Quando o tabuleiro é carregado verticalmente ao longo do eixo principal da ponte, a superestrutura tem um deslocamento transversal ao longo de uma extensão.

O eixo das transversinas, portanto, reto sob configuração inicial, é mantido reto sob configuração deformada. Esta relação linear da deformação das transversinas corresponde às flechas das vigas em relação ao centro elástico da seção transversal. Considerando-se um carregamento unitário, é possível calcular as reações em cada uma das vigas a partir dos coeficientes de distribuição transversal de carga, dados pela Equação 1.

$$\text{Coeficiente de distribuição transversal} = \frac{1}{n} + \frac{x_i \cdot x_j}{\sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (1)$$

onde: n é o número de vigas; x_i é a distância do centro elástico da transversina ao eixo da viga cuja reação deseja ser conhecida; e x_j é a distância do centro elástico da transversina ao ponto de aplicação da carga unitária.

KALYANSHETTI e SHRIRAM (2013) notam que, devido às hipóteses simplificadoras, é esperado que os coeficientes de distribuição transversal calculados pelo MEC sejam distorcidos em relação aos valores dos mesmos coeficientes quando calculados por um método numérico ou outro analítico de maior confiabilidade, mesmo quando os primeiros são considerados, a priori, válidos. A partir de algumas das não conformidades do método, estes autores verificaram que os coeficientes de distribuição para as vigas das extremidades tendem a valores iguais ou superiores aos das vigas internas.

Apresenta-se na Figura 16 a simplificação da estrutura do estudo de caso, na seção de meio de vão, como modelo em grelha. O centro elástico (C.E.) é localizado no eixo de simetria das posições dos apoios do modelo de seção transversal.

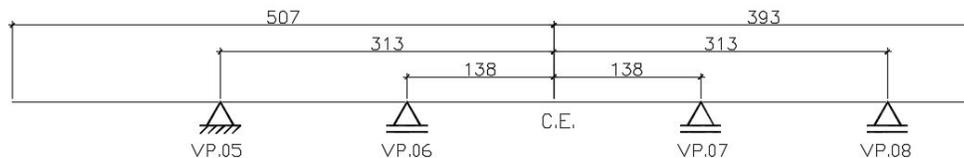


Figura 16 – Modelo em grelha da seção transversal de meio de vão (dimensões em cm).

Os pontos de aplicação da carga unitária são dados sobre os próprios apoios do modelo de seção transversal, isto é, sobre cada uma das vigas, de forma similar ao realizado no modelo computacional. Neste caso, como a Equação 1 fornece uma relação linear dos resultados obtidos para uma determinada viga, ou seja, as linhas de influência de distribuição transversal calculadas pelo MEC são representadas por retas, os coeficientes correspondentes à aplicação da carga unitária nos balanços são obtidos graficamente. A Tabela 2 contém um resumo das variáveis necessárias ao MEC e dos coeficientes de distribuição transversal F_d .

As Figuras 17 a 20 representam as linhas de influência de distribuição transversal das vigas VP.05 a VP.08 obtidas pelo MEC.

Os trans-tipo de flexão correspondentes a cada uma das linhas de influência das Figuras 17 a 20, calculados da mesma forma que aqueles obtidos pelo MEF, são apresentados nas Figuras 21 a 24.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Tabela 2 – Fatores de distribuição transversal – MEC.

i	x_i (m)	j	x_j (m)	F_d (VP.05,j)	F_d (VP.06,j)	F_d (VP.07,j)	F_d (VP.08,j)
VP.05	-3,13	VP.05	-3,13	0,669	0,435	0,065	-0,169
VP.06	-1,38	VP.06	-1,38	0,435	0,331	0,169	0,065
VP.07	1,38	VP.07	1,38	0,065	0,169	0,331	0,435
VP.08	3,13	VP.08	3,13	-0,169	0,065	0,435	0,669
SOMA x_i^2 (m ²)	23,4						
n	4						

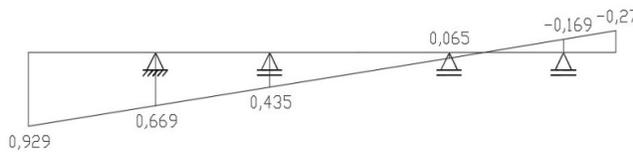


Figura 17 – Linha de influência de distribuição transversal da VP.05 - MEC.

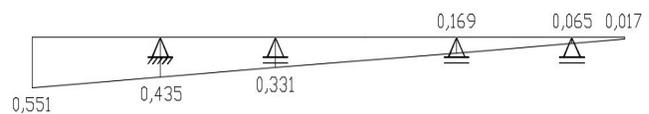


Figura 18 – Linha de influência de distribuição transversal da VP.06 - MEC.

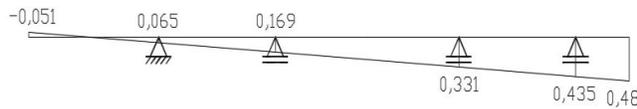


Figura 19 – Linha de influência de distribuição transversal da VP.07 - MEC.

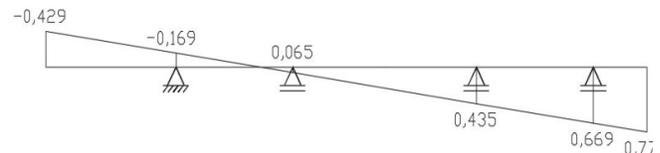


Figura 20 – Linha de influência de distribuição transversal da VP.08 - MEC.

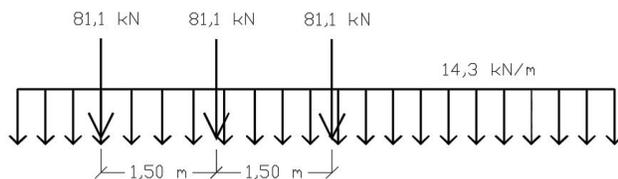


Figura 21 – Trem-tipo de flexão da VP.05 - MEC.

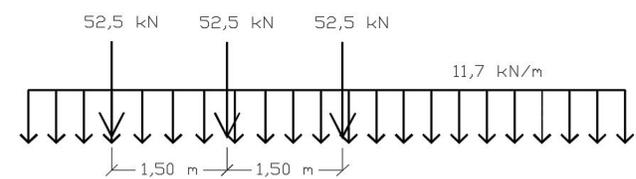


Figura 22 – Trem-tipo de flexão da VP.06 - MEC.

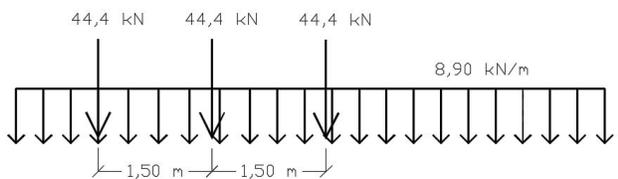


Figura 23 – Trem-tipo de flexão da VP.07 - MEC.

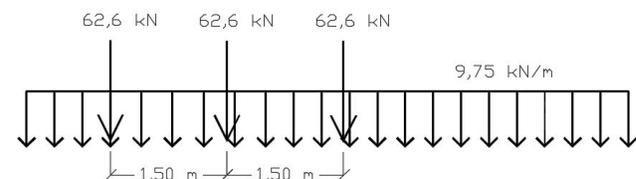


Figura 24 – Trem-tipo de flexão da VP.08 - MEC.

Comparação entre os resultados

Os gráficos das Figuras 25 a 28 apresentam a sobreposição das linhas de influência de distribuição transversal das quatro vigas. Observa-se que, em todos os gráficos, o MEC produz resultados que se distanciam do MEF, ao passo que a carga unitária é aplicada com mais proximidade das extremidades da laje.

Isso ocorre de forma mais acentuada, no caso, no balanço da esquerda, de maior comprimento que o balanço oposto.

Além disso, percebe-se que as linhas de influência das vigas das extremidades apresentam, em geral, maiores divergências que as das vigas intermediárias, o que é esperado, considerando as limitações do método.

A fim de mensurar o impacto que as divergências entre os métodos têm sobre a análise dos esforços devidos à ação das cargas móveis, as vigas VP.05 a VP.08 foram carregadas com seus respectivos trens-tipo de flexão, calculados tanto pelo MEF quanto pelo MEC, e foram obtidos os momentos fletores máximos $M_{máx}$.

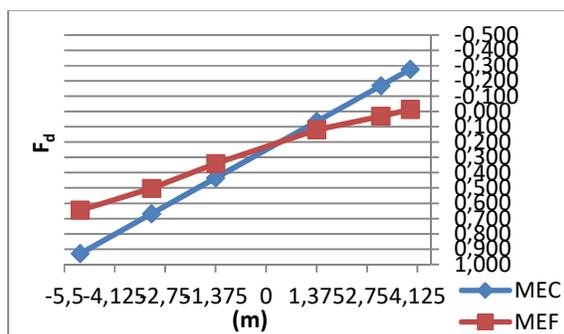


Figura 25 – Comparação de linha de influência de distribuição transversal da VP.05 – MEF e MEC.

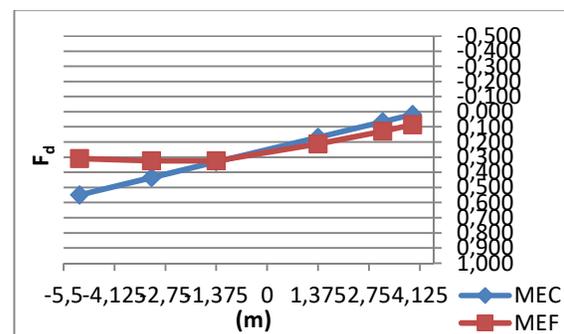


Figura 26 – Comparação de linha de influência de distribuição transversal da VP.06 – MEF e MEC.

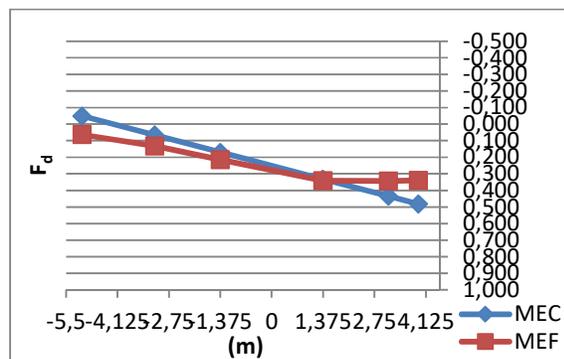


Figura 27 – Comparação de linha de influência de distribuição transversal da VP.07 – MEF e MEC.

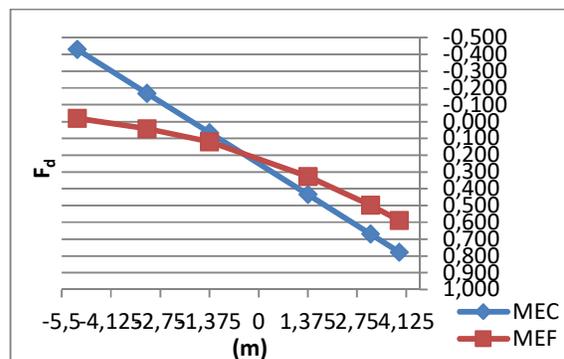


Figura 28 – Comparação de linha de influência de distribuição transversal da VP.08 – MEF e MEC.

A Tabela 3 resume os esforços encontrados e os compara em função das razões, em porcentagem, dos esforços produzidos pelos trens-tipo calculados pelo MEF e pelo MEC.

Novamente, as maiores diferenças são identificadas nas vigas das extremidades. A maior diferença ocorre na VP.05, viga mais próxima ao balanço de maior comprimento, e corresponde a 19,4%. Conclui-se que um maior comprimento de influência da laje pode causar esforços mais conservadores se calculados pelo MEC, pois, ao compararmos a diferença encontrada na viga VP.05 àquela encontrada na VP.08, viga mais próxima ao balanço oposto, equivalente a 13,5%, tem-se esforços 5,9% maiores.

As vigas intermediárias apresentam melhores resultados pelo MEC. A viga VP.07, inclusive, possui resultados muito similares para ambos os métodos.

Tabela 3 – Comparação de momentos fletores máximos devidos à carga móvel calculados pelo MEF e MEC.

Viga	Método	$M_{máx}$ (kN.m)	$M_{máx}$ (MEF)/ $M_{máx}$ (MEC)
VP.05	MEC	3649	80,6%
	MEF	2942	
VP.06	MEC	3268	88,3%
	MEF	2886	
VP.07	MEC	2670	99,7%
	MEF	2663	
VP.08	MEC	2997	86,5%
	MEF	2592	

Conclusões

Conclui-se que, apesar das diferenças entre as linhas de influência de distribuição transversal obtidas pelos dois métodos, explicitadas nas Figuras 27 a 30, os resultados finais, considerando os esforços causados pela ação das cargas móveis, são relativamente próximos, como mostra a Tabela 3. Além disso, de modo geral, os resultados produzidos pelo MEC são conservadores, já que em todos os casos as diferenças entre os valores obtidos para os esforços pelo MEC e MEF são positivas.

Do ponto de vista econômico, é fato que o uso de métodos mais sofisticados, como o MEF, seja o ideal. No entanto, deve-se levar em conta o custo de cálculo recorrente de cada método: o MEF requereu prolongamento do tempo de cálculo, principalmente na construção do modelo. O MEC, por outro lado, permitiu que os mesmos objetivos fossem alcançados através de uma ferramenta matemática relativamente simples que, aplicada a uma planilha para automatização do processo de cálculo, produz resultados quase que imediatos. Frente ao custo computacional da aplicação do MEF, os resultados obtidos pelo MEC, embora apresentem diferenças não desprezíveis, são suficientemente competentes. Logo, chega-se à conclusão de que o MEC, quando aplicado a estruturas curvas similares ao estudo de caso, pode ser utilizado.

Referências

- AASHTO, Guide Specifications for Horizontally Curved Steel Girder Highway Bridges. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C., 2003.
- ALVES, E. V., ALMEIDA, S. M. F., JUDICE, F. M. S., Métodos de Análise Estrutural de Tabuleiros de Pontes em Vigas Múltiplas de Concreto Protendido. ENGEVISTA, v. 6, n. 2, p. 48-58, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, NBR 7188:2013 – Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ITANI, A. M. e RENO, M. L., Bridge Engineering Handbook: Horizontally Curved Bridges. Boca Raton, CRC Press, 2000.
- KALYANSHETTI, M. G., SHRIRAM, R. P., Study of Effectiveness of Courbon's Theory in the Analysis of T-beam Bridges. International Journal of Scientific & Engineering Research, v. 4, n. 3, 2013.
- SAN MARTIN, F. J., Cálculo de Tabuleiros de Pontes. São Paulo, Livraria Ciência e Tecnologia, Editora LCTE, 1981.