

Análise numérica da distribuição de carga em pontes de madeira laminada colada

Numerical analysis of the load distribution in glulam bridges

RESUMO

Felipe Batista Irikura
felipeirikura@hotmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil

Jorge Luís Nunes de Góes
jgoes@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil

Um dos objetivos de um projeto estrutural é, além de garantir a segurança e estabilidade da estrutura, buscar seções menores de modo a garantir maior economia na obra, para isso deve-se conhecer quais as ações aplicadas na estrutura e feitas as devidas combinações calcular a seção ideal. No entanto as ações aplicadas sobre as estruturas não se dividem de forma igual em todas as suas partes e cabe ao engenheiro o trabalho de definir as combinações mais críticas à estrutura e como os carregamentos se distribuem por ela. Este trabalho apresenta o estudo da distribuição transversal de cargas na seção transversal de um modelo de ponte de MLC com vigamento múltiplo tanto de métodos analíticos quanto de modelos computacionais. Foram verificados os métodos mais utilizados em estruturas de pontes: Engesser-Courbon, Leonhardt, Fauchart, Guyon-Massonet, esses métodos foram então comparados com os modelos computacionais em elementos finitos (MEF), verificando suas convergências e a influência que o número de transversinas causa na distribuição dos carregamentos pelas longarinas.

PALAVRAS-CHAVE: Distribuição transversal. Engesser-Courbon. Leonhardt. MEF.

ABSTRACT

One of the objectives of a structural project is, in addition to guaranteeing the safety and stability of the structure, to seek leaner sections in order to guarantee greater savings in the construction, for that it is necessary to know which actions are applied in the structure and the appropriate combinations are calculated. The ideal section. However, the actions applied to the structures are not equally divided in all its parts and it is up to the engineer to define the most critical combinations to the structure and how the loads are distributed over it. This work presents the study of the transverse load distribution in the cross section of a glulam bridge model with multiple stringers using both analytical and computational models. The most used methods in bridge structures were verified: Engesser-Courbon, Leonhardt, Fauchart, Guyon-Massonet, these methods were then compared with the finite element computational models (FEM), verifying their convergences and the influence that the number of diaphragms cause in the load distribution by the stringers.

KEYWORDS: Transverse distribution. Engesser-Courbon. Leonhardt. FEM.

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autorial: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

As pontes ou Obras de Arte Especiais (OAE), como também são conhecidas, são estruturas de elevada importância no desenvolvimento das cidades durante a história. Um dos modelos mais simples e comum de ponte de madeira utilizado é o de ponte em viga, como dito por Ritter (1990). Esse modelo pode ser descrito como um tabuleiro apoiado por uma série de vigas longitudinais.

No caso das pontes em vigas a distribuição transversal das cargas pelas longarinas é estudo de diversos trabalhos, alguns dos métodos mais conhecidos e aplicados atualmente, e que são abordados nesse trabalho, são o de Engesser-Courbon, de Leonhardt, de Fauchart e o de Guyon-Massonet.

O método de Engesser-Courbon é derivado do método de cálculo das grelhas, ele se baseia na hipótese de que as transversinas apresentam rigidez infinita à flexão, garantindo a estrutura um comportamento de corpo rígido. O coeficiente de distribuição transversal de cada longarina é calculado pela Eq. (1), onde a parcela é calculada dependendo do número de longarinas (n), o distanciamento da longarina em análise do centro elástico da seção transversal da ponte (x_i), o distanciamento da aplicação do carregamento em relação ao centro elástico da seção transversal da ponte (e_j) e a somatória ao quadrado de todos os distanciamentos de todas as longarinas em relação ao centro elástico ($\sum x_n^2$).

$$R_i = \frac{1}{n} + \frac{e_j \cdot x_i}{\sum x_n^2} \quad (1)$$

De acordo com San Martin *apud* Oliveira, *et al.* (2017) o método de Engesser-Courbon só é recomendado para os casos que respeitem a Eq. (2), onde (2b) é a largura do tabuleiro, (L) o comprimento da ponte, ($\sum I_n$) a somatória das inércias das longarinas e ($\sum I_{Tn}$) a somatória das inércias das transversinas.

$$\lambda = \frac{2b}{2 \cdot L} + \sqrt[4]{\frac{L}{2b} \cdot \frac{E \cdot \sum I_n}{E \cdot \sum I_{Tn}}} \leq 0,3 \quad (2)$$

O método de Leonhardt considera que todas as transversinas da ponte são representadas por uma única transversina fictícia, localizada no centro do vão da ponte. Para isso é calculada uma inércia equivalente para essa transversina, utilizando a Eq. (3), que consiste em multiplicar a inércia da transversina por um coeficiente k que varia de acordo com o número de transversinas na ponte, mostrado na tabela 1.

$$I_{eq} = k \cdot I \quad (3)$$

Tabela 1 – Coeficiente k para o cálculo do momento de inércia equivalente

Número de transversinas espaçadas igualmente	Coeficiente k
1 ou 2	1,0
3 ou 4	1,6
5 ou mais	2,0

Fonte: Kaestner (2015).

O método de Fauchart, é utilizado para tabuleiros com múltiplas longarinas sem transversinas intermediárias, e diferentemente dos outros métodos considera a rigidez à torção das vigas. Ele consiste em transformar a seção transversal da ponte em um tabuleiro de um metro apoiado por molas que substituem as

longarinas. Para isso em cada longarina são calculados dois coeficientes de mola, um vertical, mostrado pela Eq. (4) e um transversal, mostrado pela Eq. (5), onde (E) e (G) são os módulos de elasticidade longitudinal e transversal, (I) é o momento de inércia da longarina e (I_t) o momento de inércia polar da longarina.

$$K_v = \left(\frac{\pi}{L}\right)^4 \cdot E \cdot I \quad (4)$$

$$K_t = \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \cdot G \cdot I_t \quad (5)$$

O método de Guyon-Massonet, ao contrário, dos demais métodos analíticos deste trabalho não trata a estrutura da ponte como uma grelha, mas como um meio termo entre uma grelha e uma placa ortotrópica. O método então analisa de maneira aproximada a distribuição transversal, assumindo que os carregamentos possam ser representados por uma carga senoidal distribuída paralelamente ao eixo longitudinal da ponte, Massonet (1950) repartiu a ponte de largura $2b$ e comprimento L em uma malha de dimensões finitas, adotando a dimensões transversais como (b_1) e as dimensões longitudinais como (l_1).

Para a solução do problema a partir do método de Guyon-Massonet é necessário calcular os parâmetros “ θ ” e “ α ”, pelas Eq. (6) e Eq. (7).

$$\theta = \frac{b^4}{L} \sqrt{\frac{\rho_L}{\rho_T}} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{\gamma_L + \gamma_T}{2\sqrt{\rho_L \cdot \rho_T}} \quad (7)$$

Onde ρ_L e ρ_T são calculados pelas Eq. (8) e (9), onde o (x) é substituído por (L) no caso das longarinas e por (T) no caso das transversinas, e o denominador varia com (b_1) para as longarinas e (l_1) para as transversinas.

$$\rho_x = \frac{E \cdot I_x}{b_1 \text{ ou } l_1} \quad (8)$$

$$\gamma_x = \frac{G \cdot I_{px}}{b_1 \text{ ou } l_1} \quad (9)$$

Os parâmetros calculados pelas Eq. (6) e Eq. (7) são então utilizados para selecionar as tabelas calculadas por Massonet, interpolando os valores das tabelas utilizando a Eq. (10).

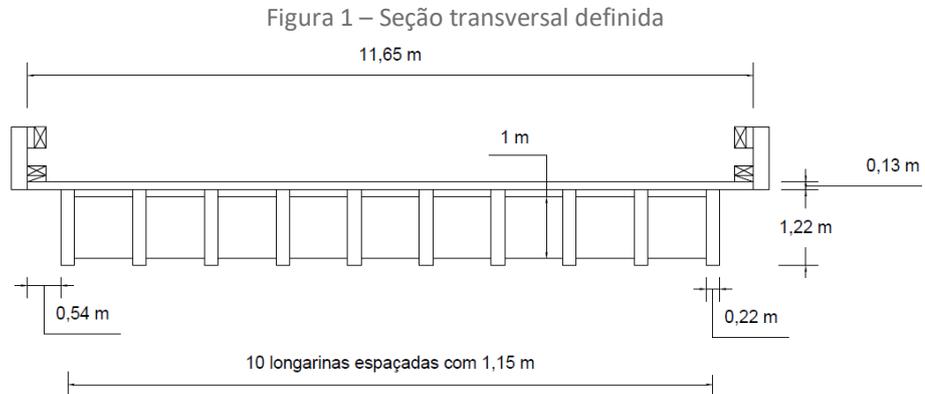
$$K_\alpha = K_0 + (K_1 - K_0)\sqrt{\alpha} \quad (10)$$

Com o advento e a evolução dos computadores foi possível a criação de um método numérico, aproximado, sem ser necessário o uso de ábacos ou tabelas para os cálculos. Baierle (2016) descreve o método dos Elementos Finitos como uma divisão do domínio de integração do problema em um número discreto de regiões de dimensões finitas, sem que sejam alteradas as propriedades do problema original.

Este estudo tem por finalidade verificar a aplicabilidade e a convergência dos diversos métodos apresentados para o modelo de ponte proposto e verificar a influência do número de transversinas na distribuição transversal dos carregamentos.

MATERIAL E MÉTODOS

O modelo da ponte foi definido de acordo com o *Standard plans for timber bridge superstructures* (2001). Sua seção transversal é composta por 10 longarinas, como mostrado na Figura 1, sendo a ponte bi-apoiada, com vão de 20 metros e tabuleiro com espessura de 0,13 m.



Fonte: Autoria própria (2020).

A seleção do material utilizado na ponte foi feita com base no banco de dados de materiais do *software* Scia Engineer, do Grupo Nemetschek. Foi utilizado o material GL22h (EN 14080), sendo as principais propriedades utilizadas os módulos de elasticidade “E” (11032 MPa) e “G” (650 MPa) e a massa específica (410 kg/m³).

Com exceção dos métodos de Engesser-Courbon e Fauchart, nos quais o número de transversinas não influencia nos resultados, foram simulados 4 casos variando o número de transversinas intermediárias, sendo eles com 0, 1, 2 e 3 transversinas intermediárias.

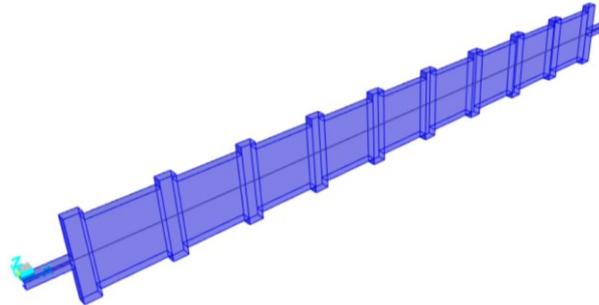
Para os resultados do método de Engesser-Courbon foi determinado o centro elástico da seção transversal da ponte, por se tratar de uma estrutura simétrica o mesmo coincide com o meio da seção, então foram medidos os distanciamentos dos eixos das longarinas em relação ao C.E. Com os dados obtidos, foi utilizada a Eq. (1) e foram obtidas 10 linhas de influência de reação de apoio, uma para cada longarina. Essa linha de influência é de forma linear, como pode ser visto nos resultados, devido ao comportamento de corpo rígido da estrutura.

Para os métodos de Leonhardt e Fauchart foi utilizado o *software* SAP2000, versão de avaliação 22, para serem obtidos os valores das linhas de influência hiperestáticas.

Para a modelagem dos casos no SAP2000 foi criada uma viga com 3 tipos de seção transversal, representando a seção transversal central da ponte. Essas 3 seções seriam o tabuleiro, a longarina e a transversina.

Para o método de Leonhardt foram utilizadas as 3 seções, sendo posicionadas conforme a existência das mesmas na seção transversal da ponte, mostrada na Figura 1. Sendo que a seção tabuleiro foi aplicada somente onde não existia nem longarinas, nem transversinas. As dimensões das seções respeitavam as dimensões das peças estruturais, sendo que a espessura delas respeitava a espessura utilizada para as transversinas, devido a variação da mesma nos diferentes casos.

Figura 2 – Viga representativa da seção transversal



Fonte: Autoria própria (2020).

Como as longarinas não se comportam como corpos rígidos (apoios rígidos ou móveis), elas se deslocam verticalmente, foi adotado no lugar um apoio tipo mola, sendo o coeficiente de mola desse apoio calculado utilizando o deslocamento causado em uma longarina bi-apoiada com uma carga unitária concentrada no meio do vão, com isso foi obtido um coeficiente de mola igual a 2203,57 kN/m.

Para o método de Fauchart foram utilizadas apenas as seções do tabuleiro e da longarina, sendo que na seção da longarina foi acrescido a espessura do tabuleiro para a altura da longarina, e nas partes onde deveriam existir transversinas só existem seções do tabuleiro, devido ao método não adotar transversinas intermediárias. Para os apoios foram calculados os coeficientes de mola utilizando as Eq. (4) e (5), resultando em $K_v=223,59$ kN/m, e $K_t=551,28$ kN/m.

Para o método de Guyon-Massonet foram calculados os parâmetros “ θ ” e “ α ”, como mostrado nas Eq. (6) e (7). Calculados os valores dos parâmetros, puderam ser identificadas com quais as tabelas, calculados por Massonet, que deveriam ser trabalhadas, e então, foram interpolados os valores por meio da Eq. (10) para ajustá-los para o grau de rigidez que a ponte possui.

No entanto, esses valores representavam os coeficientes calculados para placas, para obter os coeficientes semelhantes aos demais métodos foi necessário dividir os valores pela largura $2b$ da ponte e multiplicar pela largura de influência de cada longarina, para as longarinas externas o valor multiplicado era de 1,225 m, enquanto para as demais era de 1,15 m.

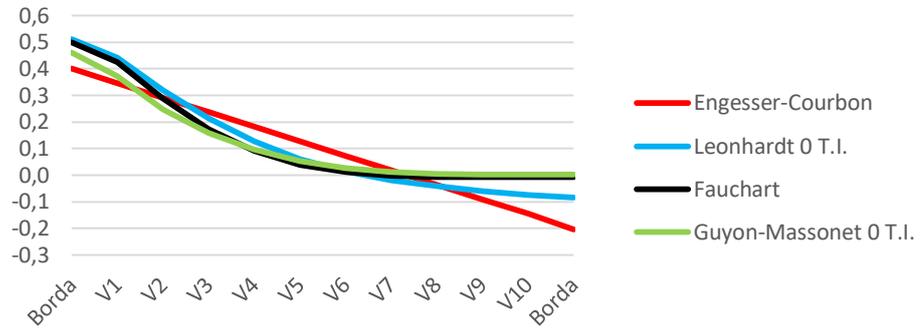
A modelagem em elementos finitos foi feita no *software* Scia Engineer, versão 19.1. Para a modelagem foram utilizados elementos de barra e elementos de placa, ou seja, elementos unidimensionais e elementos bidimensionais. Os elementos 1D utilizados formaram as vigas da ponte, tanto longarinas quanto transversinas, já os elementos 2D formaram o tabuleiro da ponte. Para todos esses elementos foram atribuídos o material GL22h, citado anteriormente.

Os modelos em MEF foram simulados com o trem-tipo brasileiro TB-450, na posição mais desfavorável, de acordo com a NBR 7188/2013.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

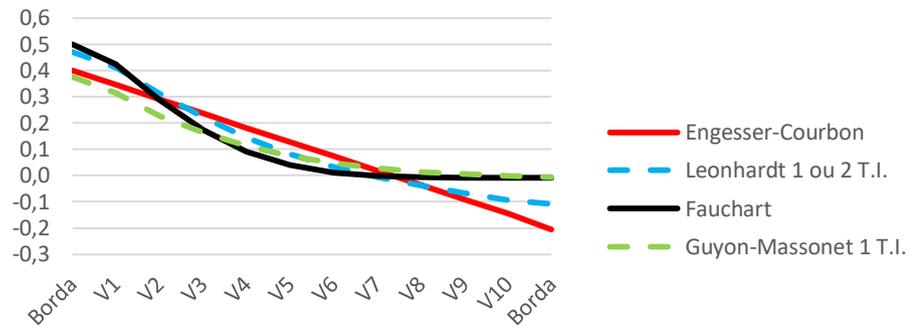
Realizando os processos apresentados na metodologia deste estudo puderam ser obtidos os coeficientes de distribuição transversal de cargas dos métodos analíticos, representados nas figuras 2, 3, 4 e 5.

Figura 3 – Coeficientes de distribuição transversal (caso sem transversinas intermediárias)



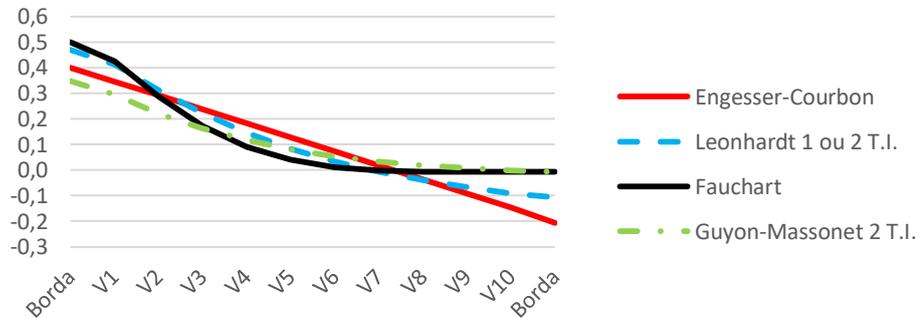
Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 4 – Coeficientes de distribuição transversal (com 1 transversina intermediária)



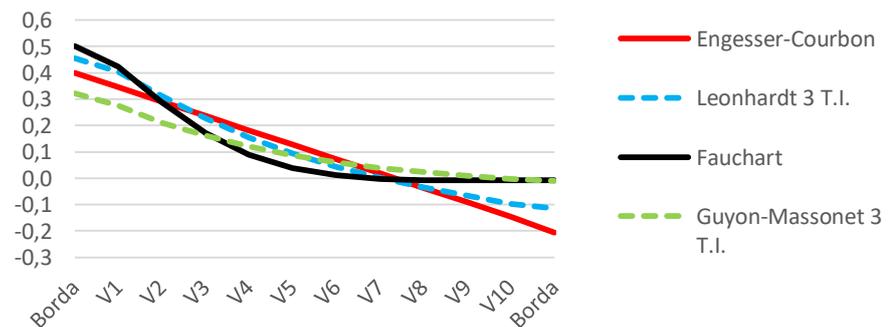
Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 5 – Coeficientes de distribuição transversal (com 2 transversinas intermediárias)



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 6 – Coeficientes de distribuição transversal (com 3 transversinas intermediárias)



Fonte: Autoria própria (2020).

Foi escolhido um método analítico para ser comparado com o modelo de elementos finitos, como os valores obtidos pelo método de Engesser-Courbon para esse modelo de ponte não respeitava a condição imposta pela Eq. (2), foi utilizado o método de Leonhardt. Para comparação do resultado analítico e do resultado numérico o veículo tipo é posicionado sobre a linha de influência obtida pelo método analítico, para obter os quinhões de parcela de carga na longarina, e assim calcular o deslocamento na longarina causado no método analítico, e a diferença pode ser observada na tabela 2.

Tabela 2 – Comparação do deslocamento máximo, em mm, da longarina de extremidade esquerda V1

	Leonhardt	MEF	Diferença (%)
0 T.I.	94,560	87,571	-7,98%
1 T.I.	93,500	87,326	-7,07%
2 T.I.	93,500	87,258	-7,15%
3 T.I.	92,370	87,155	-5,98%

Fonte: Autoria própria (2020).

CONCLUSÃO

Ao analisar os dados obtidos, verificamos que os métodos analíticos apresentam resultados com valores próximos, e conforme são aumentados os números de transversinas na ponte os métodos tendem a se aproximar dos valores de Engesser-Courbon, devido ao aumento do número de transversinas resultar em um aumento da rigidez transversal do tabuleiro, aproximando-se da rigidez infinita caracterizada pelo método Engesser-Courbon.

No deslocamento do modelo em elementos finitos pode-se perceber a mesma tendência, ao ser aumentado o número de transversinas o deslocamento foi reduzido, implicando que houve uma melhor distribuição dos carregamentos por entre as longarinas, de modo que se fosse aumentado o número de maneira suficiente a ponte poderia adotar o comportamento de um corpo rígido.

A diferença entre os deslocamentos do modelo de elementos finitos comparados com o de Leonhardt foi de aproximadamente 8%, podendo essa diferença ser causado devido as simplificações do método analítico, como por exemplo a desconsideração da rigidez a torção das longarinas, bem como a rigidez da laje do tabuleiro, enquanto o modelo numérico em elementos finitos leva em consideração essas contribuições.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste projeto agradecem ao Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação pelo fomento financeiro, o Programa de Educação Tutorial do Ministério da Educação e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Campo Mourão.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7188**: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

BAIERLE, F. A. **Contribuições a análise de pontes empregando o método dos elementos finitos**. 2016. 93p. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil – Universidade de Santa Cruz do Sul. Santa Cruz do Sul, 2016.

KAESTNER, C. L. **Dimensionamento de longarinas protendidas com a consideração das etapas construtivas**. 2015. 182 p. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

MASSONET, C. **Méthode de calcul des ponts à poutres multiples tenant compte de leur résistance à la torsion**, 1950. *International Association for Bridge and Structural Engineering publications*, vol. 10. Zurique, 1950.

OLIVEIRA, C. J.; FIGUEIREDO, D.; FRANZKE, P. D.; OLIVEIRA, L. O. S. Distribuição de cargas na seção transversal de pontes com vigamento múltiplo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 59., 2017, Bento Gonçalves. **Anais do 59º Congresso Brasileiro do Concreto**. Bento Gonçalves, 2017.

RITTER, M. A. **Timber Bridges: Design, Construction, Inspection, and Maintenance**. 944 p. Washington, DC, 1990.

WACKER, J. P.; SMITH, M. S. **Standard plans for timber bridge superstructures**. *General Technical Report FPL-GTR-125*. 53 p. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2001.