

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DA LONGARINA DE UMA PONTE EM CURVA HORIZONTAL AVALIADA COM DIFERENTES SEÇÕES TRANSVERSAIS

**MATHEUS AGUSTINI^{1*}; CAMILA VOLTOLINI MORETÃO²;
TAINÁ SARAMENTO³; YURI HENRIQUES DA SILVA⁴; ANDRIEI JOSÉ BEBER⁵**

¹Engenheiro Civil, UNIVALI, Itajaí-SC, matheus-agustini@hotmail.com;

²Acadêmica de Engenharia Civil, UNIVALI, Itajaí-SC, camilavoltolinim@hotmail.com;

³Engenheira civil, UNIVALI, Itajaí-SC, tainasaramento@hotmail.com;

⁴Engenheiro civil, UNIVALI, Itajaí-SC, yurihs@globo.com;

⁵Professor Doutor, UNIVALI, Itajaí-SC, andriei@univali.br;

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2018
21 a 24 de agosto de 2018 – Maceió-AL, Brasil

RESUMO: O conhecimento do comportamento estrutural de pontes com geometria irregular, como as pontes em curva horizontal, é relativamente restrito, quando comparado ao conhecimento relacionado às pontes de geometria convencional. Assim, este estudo foi desenvolvido com o objetivo de analisar o comportamento estrutural da longarina de uma ponte em curva horizontal avaliada com diferentes seções transversais. A longarina da ponte foi modelada, no *software* SAP2000[®], para duas tipologias de seção transversal retangular. Definiram-se para análise uma seção transversal cheia e duas seções transversais vazadas. Avaliando-se o comportamento estrutural da longarina, aferindo os valores de esforços internos resistentes, concluiu-se que a variação nos valores de tensões normal e tangencial máxima nessa, esteve diretamente associada às propriedades geométricas da sua seção transversal, especialmente, os momentos de inércia. O estudo das diferentes tipologias de seção transversal indicou a possibilidade de melhoria do comportamento estrutural de longarinas em curva horizontal quando essas são analisadas em seção transversal vazada, em face da pronunciada redução nos resultados das tensões normal e tangencial. Ainda, evidenciou-se a possibilidade de redução da área de seção transversal vazada de longarinas em curva horizontal, gerando, conseqüentemente, menor consumo de material, mantendo-se um comportamento estrutural mais satisfatório que a seção transversal cheia.

PALAVRAS-CHAVE: Ponte em curva horizontal, propriedades geométricas, esforços internos resistentes.

ANALYSIS OF THE STRUCTURAL BEHAVIOR OF THE BEAM FROM A HORIZONTALLY CURVED BRIDGE ASSESSED WITH DIFFERENT CROSS SECTIONS

ABSTRACT: The knowledge of the structural behavior of bridges with irregular geometry, such as horizontally curved bridges, relatively restricted, compared to the knowledge related to bridges of conventional geometry. In this way, this study was developed with the objective of analyzing the structural behavior of the beam of a horizontally curved bridge evaluated with different cross sections. The beam of the bridge was modeled in SAP2000[®] software for two types of rectangular cross-section. A full cross section and two box cross sections were defined for analysis. By evaluating the structural behavior of the beam, by measuring the values of internal stresses, it was concluded that the variation in the values of normal and maximum tangential stresses in this, was directly associated to the geometric properties of its cross section, especially the moments of inertia. The study of the different cross sectional typologies indicated the possibility of improving the structural behavior of horizontally curved beams of bridges when these are analyzed in a box cross section, due to the pronounced reduction in the results of the normal and tangential stresses. Also, it was possible to reduce the cross-sectional area of the box cross section horizontally curved beam, resulting in lower material consumption, maintaining a more satisfactory structural behavior than the full cross section.

KEYWORDS: Horizontally curved bridges, geometric properties, internal stresses.

INTRODUÇÃO

Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), anteriormente à evolução das técnicas de construção de pontes, os obstáculos eram, geralmente, transpostos em ângulo reto, em níveis baixos e com o menor comprimento possível, cabendo à rodovia, por meio de curvas e rampas, adaptar-se às obras de arte especiais (BRASIL, 2010).

Contudo, com a evolução das técnicas de construção e com as exigências do tráfego continuamente maiores, além da crescente necessidade de integração das pontes ao ambiente, o projeto geométrico, que define previamente o traçado da rodovia, passou a conduzir os projetos de obras de arte especiais, de maneira que pontes e rodovias possam estar perfeitamente integradas (BRASIL, 2010).

Para que a integração entre ponte e rodovia seja desenvolvida, em algumas situações peculiares as alternativas de projeto acabam atingindo alto grau de complexidade e execução, entrando em uma área da Engenharia Civil pouco disseminada. Têm-se, a exemplo disso, pontes com segmentos de níveis elevados, com grande esconicidade ou com curvaturas vertical ou horizontal.

O conhecimento do comportamento estrutural de pontes com geometria irregular, como as pontes em curva horizontal, é considerado relativamente reduzido, quando comparado ao conhecimento em relação às pontes de geometria convencional. Desta maneira, tem-se buscado cada vez mais avaliar o comportamento de estruturas com essas características singulares.

As pontes em curva horizontal são, na maioria dos casos, vistas como estruturas de complexidade elevada, uma vez que: (a) flexão e torção aparecem interligadas, tanto por condições de equilíbrio, quanto por condições de compatibilidade; (b) o aumento da curvatura torna consideráveis as solicitações de torção, que podem condicionar o aumento e a estabilidade da peça; e (c) o aumento da torção, por outro lado, determina um aumento da distorção, isto é, da deformação na seção transversal, que gera esforços transversais e longitudinais que não podem ser desprezados (STUCCHI, 1984; BARBOSA, 1997 apud LUCHI, 2001).

Bastos (2017) indica que a rigidez à torção de vigas está diretamente associada às dimensões da sua seção transversal, de modo que o aumento da largura ou altura são soluções comumente utilizadas por projetistas para aumentar a resistência à torção do elemento estrutural.

Desta maneira, a presente pesquisa foi desenvolvida com o objetivo de analisar o comportamento estrutural da longarina de uma ponte em curva horizontal avaliada com diferentes seções transversais, aferindo e comparando os valores de esforços internos resistentes dos diferentes modelos.

MATERIAL E MÉTODOS

A partir do estudo desenvolvido por Agustini e Beber (2017), que analisou o efeito de seis diferentes relações comprimento/raio de curvatura (L/R), como ângulo de abertura, nos esforços internos solicitantes de vigas em curva horizontal e constatou maior criticidade, aferindo os esforços internos solicitantes, na viga com maior ângulo de abertura e maior comprimento, idealizou-se uma ponte em curva horizontal, cuja longarina interna apresentasse as características geométricas da viga mais crítica do estudo de Agustini e Beber (2017), ou seja, uma viga de concreto armado com comprimento equivalente a 20,00 m, raio de curvatura de 8,01 m e ângulo de abertura de 143°.

As dimensões dos elementos estruturais do tabuleiro da ponte seguiram as recomendações previstas pela NBR 7187:2003, NBR 7188:2013 e DNIT 109/2009 – PRO.

Foram definidas as ações permanentes e variáveis atuantes na ponte, a partir das orientações da NBR 7187:2003 e da NBR 7188:2013.

O levantamento das ações permanentes transmitidas às longarinas indicou que essas foram oriundas do peso próprio dos elementos estruturais que compõem o tabuleiro da ponte. Como preconiza a NBR 7188:2013, para pontes rodoviárias, foi utilizado o veículo padronizado TB-450 para a determinação das ações variáveis. Ressalta-se que a carga móvel, determinada a partir do trem tipo, foi considerada como a única ação variável atuante na estrutura da ponte. Anteriormente ao traçado das envoltórias dos esforços internos solicitantes, a carga móvel foi ajustada por coeficientes de ponderação.

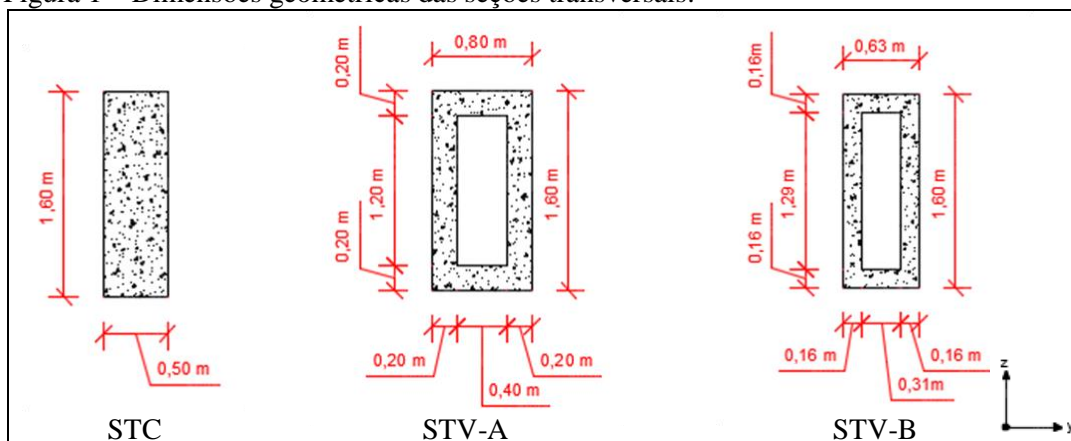
A partir da determinação das envoltórias de esforços internos solicitantes, a longarina interna da ponte em curva horizontal foi modelada, no *software* SAP2000®, para duas tipologias de seção

transversal retangular. Definiram-se para análise uma seção transversal cheia e duas seções transversais vazadas.

As dimensões das seções transversais vazadas foram determinadas a partir das propriedades geométricas da seção transversal cheia (STC). Enquanto a seção transversal vazada A (STV-A) dispôs de uma área de seção transversal correspondente à seção STC, as dimensões da seção transversal vazada B (STV-B) foram definidas de modo que essa e a seção STC apresentassem o mesmo momento de inércia polar (Figura 1).

Buscou-se comparar os valores de tensões apresentados na longarina interna da ponte avaliada, analisada com as diferentes tipologias de seção transversal. Dessa forma, avaliaram-se os esforços internos resistentes da longarina para as seções STC, STV-A e STV-B. Para todas as análises, tomaram-se como referência de comparação os valores provenientes da seção transversal retangular cheia.

Figura 1 – Dimensões geométricas das seções transversais.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 correlaciona os valores máximos de tensões normal e tangencial na longarina interna da ponte em curva horizontal, avaliada com seção STC, STV-A e STV-B, com os seus valores de momento de inércia em relação aos eixos Y e Z, e momento de inércia polar.

A área das seções transversais analisadas não foi considerada nesta correlação, uma vez que essa não manifesta influência no comportamento estrutural da longarina, apenas no consumo de material e determinação das ações permanentes.

Considerando-se a Figura 2, faz-se possível perceber que as longarinas de seção STC e STV-B não demonstraram variação expressiva nos valores de tensão normal máxima no elemento estrutural. No entanto, justificou-se a mínima redução desses valores da seção STC, quando relacionada à seção STV-B, ao fato de a primeira apresentar maior momento de inércia em relação ao eixo Y. Ainda, a longarina com curvatura de seção STV-A, que dispõe do maior valor de momento de inércia em relação ao eixo Y, obteve o menor resultado de tensão normal máxima.

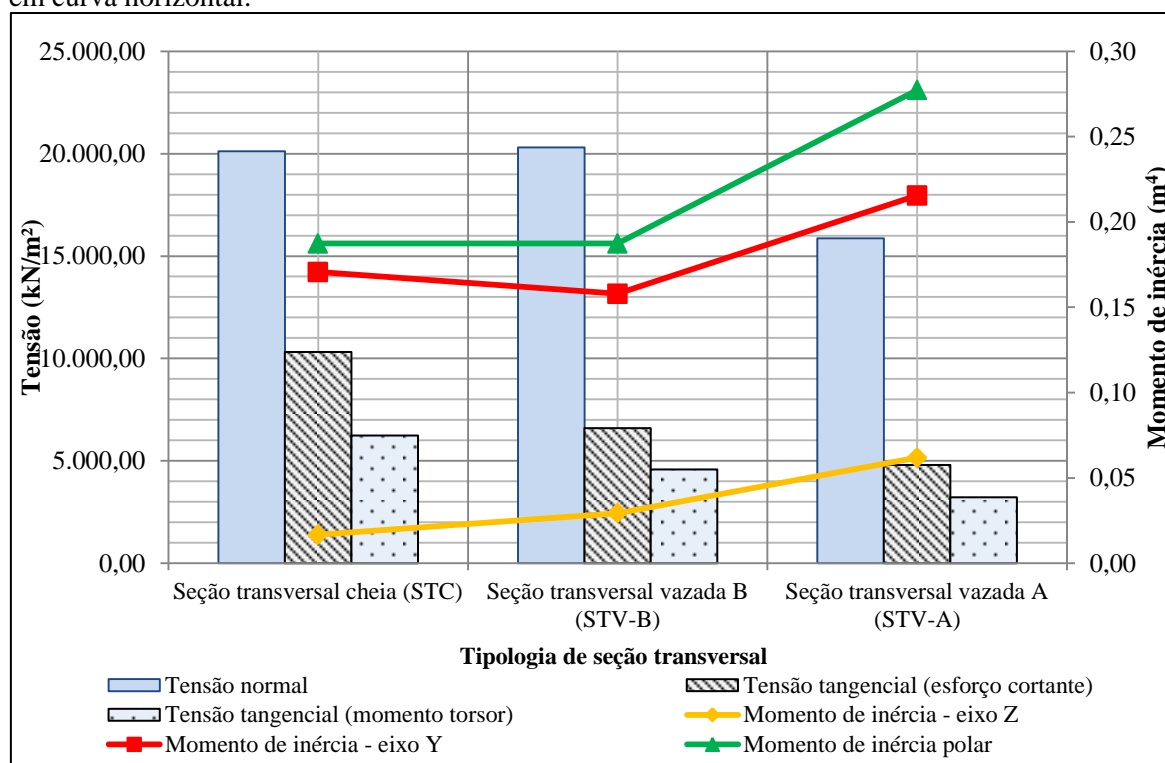
Certificou-se que, ao mesmo tempo em que as longarinas de seções transversais vazadas indicaram maiores valores de momento de inércia em relação ao eixo Z, quando relacionadas às longarinas de seção STC, essas apresentaram os menores valores máximos de tensões tangenciais devido ao esforço cortante e momento torsor.

À vista disso, pode-se constatar que o momento de inércia em relação ao eixo Z interfere no comportamento estrutural de vigas com curvatura horizontal nos valores de tensões tangenciais devido ao esforço cortante e momento torsor. Assim, uma vez pronunciada a redução dos resultados das tensões devido esforço cortante e momento torsor, o uso das seções transversais vazadas para a longarina interna da ponte com curvatura horizontal se mostrou mais satisfatório.

Não obstante, mesmo para a tensão normal, a seção STV-A apontou o melhor comportamento, visto que apresentou os menores resultados. No entanto, o uso da seção STV-B não é inviabilizado, uma vez que a variação exibida com essa em relação à seção STC foi considerada de caráter não expressivo.

Na avaliação dos resultados, constatou-se que a longarina, estudada nas seções STC, STV-A e STV-B, apresentou resultados máximos de tensões normal e tangencial na região dos apoios. Tal comportamento foi justificado, uma vez que a região dos apoios dos elementos estruturais estudados neste trabalho indicou os maiores valores de esforços internos solicitantes nas envoltórias de esforços apresentadas.

Figura 2 – Tensão máxima na peça relacionada às propriedades geométricas da longarina da ponte em curva horizontal.



CONCLUSÃO

Avaliando-se o comportamento estrutural da longarina interna da ponte em curva horizontal, aferindo os valores de esforços internos resistentes, concluiu-se que a variação nos valores de tensão normal máxima nos elementos estruturais, estudados para diferentes tipologias de seção transversal, está diretamente associada aos seus valores de momento de inércia em relação ao eixo Y. Ainda, enfatiza-se que uma vez que há o aumento no valor de momento de inércia em relação ao eixo Y da seção transversal, há a redução dos valores de tensão normal máxima na peça.

Não obstante, destaca-se que na avaliação do comportamento estrutural da longarina interna da ponte em curva horizontal estudada nesta pesquisa, analisada para as diferentes tipologias de seção transversal, concluiu-se que o valor de momento de inércia em relação ao eixo Z de uma seção transversal interfere diretamente nos resultados de tensões tangenciais devido ao esforço cortante e momento torsor de vigas com curvatura horizontal. Desta maneira, as vigas com seção transversal vazada, que apontaram os maiores valores de momento de inércia em relação ao eixo Z, se mostraram mais satisfatórias, uma vez pronunciada a redução dos resultados das tensões devido esforço cortante e momento torsor.

Ainda, o estudo da seção STV-A indicou a possibilidade de redistribuição de uma mesma área de seção transversal cheia em uma seção transversal vazada, melhorando o comportamento estrutural de longarinas com curvatura horizontal e ocasionando em uma redução expressiva dos valores de esforços internos resistentes.

De mesmo modo, a seção STV-B apontou, mesmo que inferior à seção STV-A, a possibilidade de melhoria das propriedades geométricas e consequente comportamento estrutural de longarinas de desenvolvimento curvo, avaliando os resultados de esforços internos resistentes. No entanto, a seção STV-B ainda apresentou a possibilidade de melhoria do comportamento estrutural de

longarinas em curva horizontal, associada à redução da área de seção transversal quando comparada a uma seção transversal cheia referência, gerando, conseqüentemente, menor consumo de material.

Avaliando-se a possibilidade de aplicação das seções STV-A e STV-B à longarina interna da ponte com curvatura horizontal, conclui-se que as duas seções apresentam vantagens consideráveis em relação à seção STC, no entanto, não é possível determinar a melhor entre essas, uma vez que uma é superior à outra quando analisados diferentes aspectos. Enquanto a seção STV-A apresentou resultados expressivamente menores para todas as tensões máximas no elemento estrutural, a seção STV-B possibilitou a redução dos valores de tensão tangencial associada à redução de área da seção transversal.

Vale ressaltar que as seções transversais estudadas não foram avaliadas sob o aspecto de dimensionamento de armaduras, bem como não foram realizadas as verificações do estado limite último e de serviço das estruturas. Desta maneira, recomenda-se o estudo do dimensionamento das longarinas apresentadas nesta pesquisa, a fim de verificar a viabilidade real de aplicação das seções transversais apresentadas e ainda, avaliar o impacto gerado pelos esforços de torção no dimensionamento das armaduras transversais.

Além disso, recomenda-se a análise de seções transversais de características geométricas diferentes das avaliadas neste estudo. Uma vez determinada a possibilidade de melhoria das características geométricas das seções transversais vazadas, mesmo com a sua redução de área, em comparação a uma seção transversal cheia referência, faz-se possível buscar por dimensões de uma seção transversal vazada ideal, com as propriedades geométricas requeridas para o um determinado comportamento estrutural da peça, porém, com a máxima redução de área possível sem que esse seja comprometido.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7187: Projeto e execução de pontes de concreto armado e protendido. Rio de Janeiro, 2003.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7188: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro, 2013.
- Agustini, M.; Beber, A. J. Avaliação da influência do refinamento da malha de elementos finitos e da geometria de vigas curvas nos valores de esforços internos solicitantes. In: CRICTE. Congresso Regional de Iniciação Científica em Engenharia, 28, Ijuí, 2017. Anais... Ijuí: [s.n.], 2017. p.1-4.
- Bastos, P. S. S. Torção em vigas de concreto armado. 2017. 111 p. Apostila Universitária. Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2017.
- BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Divisão de Capacitação Tecnológica. Manual de projeto de obras de arte especiais. Rio de Janeiro, 1996. 225p.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de recuperação de pontes e viadutos rodoviários. Rio de Janeiro, 2010. 161p.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. DNIT 109 – PRO: Obras complementares - Segurança no tráfego rodoviário - Projeto de barreiras de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2009. 16 p.
- Luchi, L. A. R. Protensão em vigas celulares curvas. 2001. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.