



ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CURVATURA NA DISTRIBUIÇÃO DE MOMENTO FLETOR DEVIDO A CARGA MÓVEL EM PONTES CURVAS

Arthur da Silva Rebouças

José Neres da Silva Filho

Valberllan Albuquerque Ribeiro

arthursr@gmail.com

jneres@ect.ufrn.br

valberllan.albuquerque@gmail.com

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Avenida Senador Salgado Filho 3000 - Campus Universitário, Lagoa Nova, 59078-970, Rio Grande do Norte, Natal, Brasil.

Resumo. *Nos últimos anos, a utilização de pontes curvas tem se intensificado devido a demanda por viadutos em centros urbanos congestionados. Contudo, a análise estrutural de pontes com geometria longitudinal curva apresenta maior complexidade do que as retas, devido ao acoplamento entre o momento fletor e o momento de torção, apresentando uma distribuição de esforços internos na superestrutura diferente das pontes retas. Portanto, com o objetivo de comparar a distribuição de momento fletor para as longarinas nesses tipos de geometrias, foram construídos 7 modelos numéricos variando o raio de curvatura global da ponte em 4 grupos (infinito, 100, 150 e 300 metros) e a disposição longitudinal das longarinas (retas, curvas e retas em ponte curva). Todos os modelos foram construídos utilizando o método dos elementos finitos por meio do programa comercial CSiBridge v17. A análise dessa distribuição foi realizada utilizando o conceito de Fatores de distribuição de momento fletor (Live Load Distribution Factor for Moment) na posição longitudinal mais crítica para estrutura sob atuação exclusiva de cargas móveis referentes ao TB-450 definido pela NBR 7188:2013. Os resultados revelaram que os fatores de distribuição de momento fletor aumentam com a redução do raio de curvatura para as longarinas externas a curva, chegando a diferenças percentuais locais de 38%. Além disso, nas pontes com longarinas curvas foi detectada uma distribuição mais uniforme de momento fletor do que nas pontes com longarinas retas.*

Palavras-Chave: *Pontes curvas, Repartição de cargas, Fatores de distribuição de carga móvel, Método dos Elementos Finitos.*

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a utilização de pontes curvas tem se intensificado, principalmente nos projetos de viadutos em áreas urbanas altamente adensadas, onde as possibilidades de utilização de traçados retilíneos são restritas.

Entretanto, as normas brasileiras relacionadas a carga móvel e pontes não indicam a metodologia para a determinação dos coeficientes de distribuição de carga móvel em pontes com traçado curvo, nem para traçado reto. Assim, decidiu-se investigar inicialmente quais os principais fatores que influenciam nessa distribuição e constatou-se, segundo Brockenbrough (1986), que a curvatura é o fator preponderante. Ela faz com que o centro de gravidade da superestrutura fique situado fora do seu eixo central, gerando um comportamento acoplado entre o momento de torção e o momento fletor como mostra a Fig.1.

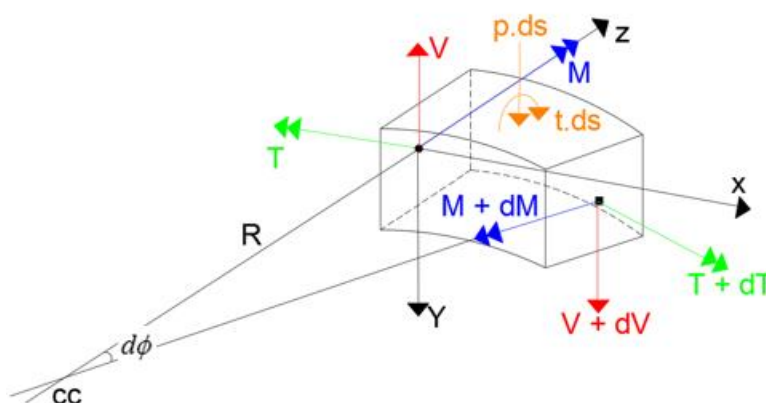


Figura 1. Elemento infinitesimal de viga curva. Adaptado de Barbosa (1997)

Esse acoplamento interfere diretamente na distribuição de carga móvel para as longarinas, o que torna o cálculo mais complexo e diferente dos obtidos para pontes retas.

A distribuição de carga móvel para longarinas de pontes retas tem sido objeto frequente de estudo, para sua determinação podem ser utilizadas diversas metodologias. No Brasil, a distribuição é definida pela curva de distribuição transversal de carga móvel por meio dos coeficientes de influência com base em métodos analíticos clássicos como os apresentados por Alves et al. (2004), Moura et al. (2016) e Jovem et al. (2016) e em métodos numéricos, como os utilizados nos modelos propostos por Judice et al. (2010) e Almeida et al. (2016), nos quais foi utilizado o método da carga unitária distribuída. Nos EUA, a distribuição é realizada via superfície de influência e simplificada pela AASHTO LRFD por meio dos *live loads distribution factors* (fatores de distribuição de carga móvel), determinados a partir dos estudos de Zokaie et al. (1991) e de Puckett et al. (2005).

Portanto, para analisar a distribuição de momento fletor devido a carga móvel em pontes curvas, tem sido utilizadas técnicas semelhantes as supracitadas, baseando-se em métodos numéricos. Nevling et al. (2006) avaliaram a precisão de diferentes níveis de análise, concluindo, com base em ensaios de campo, que a modelagem 3D via MEF apresentou a maior precisão. Kim et al. (2007) utilizaram elementos de casca e obtiveram resultados de fatores de distribuição de carga móvel mais precisos.

Assim, propõe-se a realização de uma análise comparativa da distribuição momento fletor devido à carga móvel entre pontes retas e curvas com seção transversal aberta de concreto protendido, pautada na variação da curvatura, utilizando a parcela móvel do veículo-tipo (TB-450) definido pela NBR 7188:2013.

1 METODOLOGIA

1.1 Características dos modelos propostos

Realizou-se uma análise paramétrica variando a relação de curvatura (comprimento do vão (L)/raio da linha central da ponte (R)), mantendo o comprimento do vão, com base nos limites definidos pela AASHTO LRFD (2014) para o ângulo central variando de 12° a 34° em pontes curvas de seção aberta. Assim, foram criados quatro grupos de modelos para estudo:

Grupo 01: Raio de curvatura igual a 150 metros (ângulo interno de 23°);

Grupo 02: Raio de curvatura igual a 300 metros (ângulo interno de 12°);

Grupo 03: Raio de curvatura igual a 100 metros (ângulo interno de 34°);

Grupo 04: Raio de curvatura infinito, que resulta em ponte com traçado longitudinal reto.

1.2 Materiais utilizados

Em todos os modelos foram utilizadas as mesmas características de material, definidas de acordo com a prática de projeto nacional e com a NBR 6118 (2014). A análise estrutural realizada segue o regime elástico-linear, ou seja, não foram consideradas fissurações ou plastificações que pudessem levar o concreto a seu Estado Limite Último, impulsionando os deslocamentos. Assim, ficou válida a hipótese dos pequenos deslocamentos e a análise estrutural foi feita na posição indeformada da estrutura. Por isso, os elementos estruturais de concreto foram considerados sem barras de aço, uma vez que o escopo da pesquisa está restrito a análise estrutural e, portanto, não trata sobre o dimensionamento desses elementos. As características mecânicas adotadas para todos os modelos estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características do material

Características do concreto	
Resistência característica (fck)	40 MPa
Módulo de Elasticidade	31870 MPa
Coefficiente de Poisson	0.2
Peso específico	25 kN/m ³

1.3 Geometria dos modelos

A Fig. 2 mostra a seção transversal adotada, a numeração das longarinas e as suas características geométricas calculadas por meio do CsiBridge v17. Os parâmetros que constam na tabela acima da seção transversal correspondem: A – Área de toda a seção transversal; J – Momento inércia a torção; Iycg – Momento de inércia em relação ao eixo y do centro de gravidade; Izcg – Momento de inércia em relação ao eixo z do centro de gravidade; ycg – Coordenada do centro de gravidade da seção, na direção de y; zcg – Coordenada do centro de gravidade da seção, na direção de z.

A título de avaliação da rigidez da seção transversal, não foram computadas a superfície de pavimentação da ponte e a área referente às barreiras de proteção. A seção transversal possui

o comprimento do balanço igual a 1.50 metros, medido do eixo da longarina externa até as extremidades da laje.

$A (m^2)$	6.325	$I_{y_{cg}} (m^4)$	3.5641	$Y_{cg} (m)$	7.5
$J (m^4)$	0.1893	$I_{z_{cg}} (m^4)$	122.8937	$Z_{cg} (m)$	-1.5293

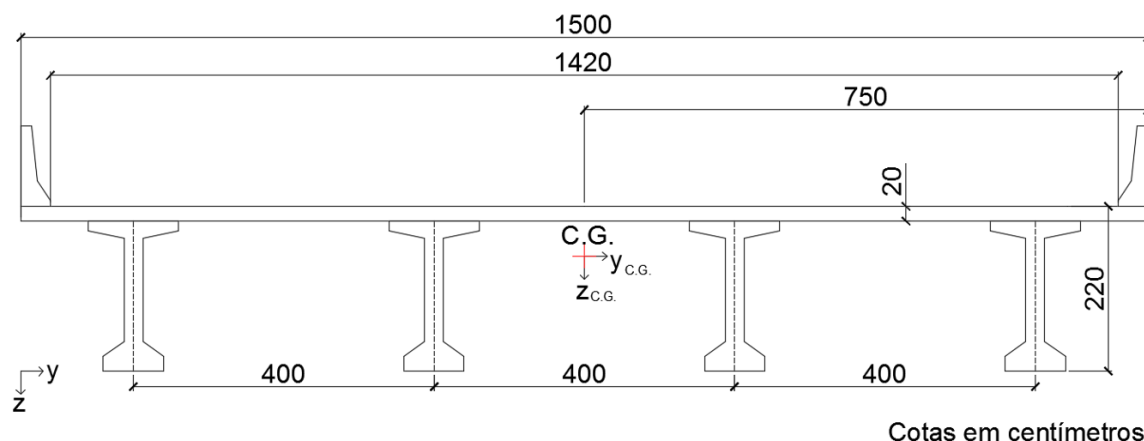


Figura 2. Seção transversal em viga tipo I pré-moldada

Todos os modelos possuem traçado longitudinal curvo da laje, que acompanha a linha central (“*layout line*”) da ponte, mantendo um raio fixo. Os limites de curvatura foram definidos pelo ângulo central da ponte, partindo de um valor nulo (ponte reta) até aproximadamente 34°. Dessa forma, apenas o raio variou para obter a curvatura desejada, visto que quanto maior o ângulo central, maior é a curvatura da ponte e menor deve ser o raio. A nomenclatura e as características dos modelos construídos podem ser visualizadas na Tabela 2. É importante destacar que todos os modelos foram construídos com uma transversina de meio de vão solidarizadas com a laje, medindo 1.80 metros de altura e 0.30 metros de largura, devido a necessidade de sua inserção, para garantir a eficácia na distribuição de momento fletor e o equilíbrio global da estrutura.

1.4 Aparelhos de apoio e condições de contorno

Com relação aos apoios, procurou-se manter as formas de vinculação já estudadas anteriormente por Samaan *et al.* (2002), mantendo as longarinas apoiadas diretamente sobre os encontros utilizando aparelhos de apoio que restringem apenas a translação vertical, sendo dois com restrições diferentes, como mostra a Fig. 3, onde são visualizados os graus de liberdade que foram restringidos. A nomenclatura das restrições segue a do CsiBridge v17.

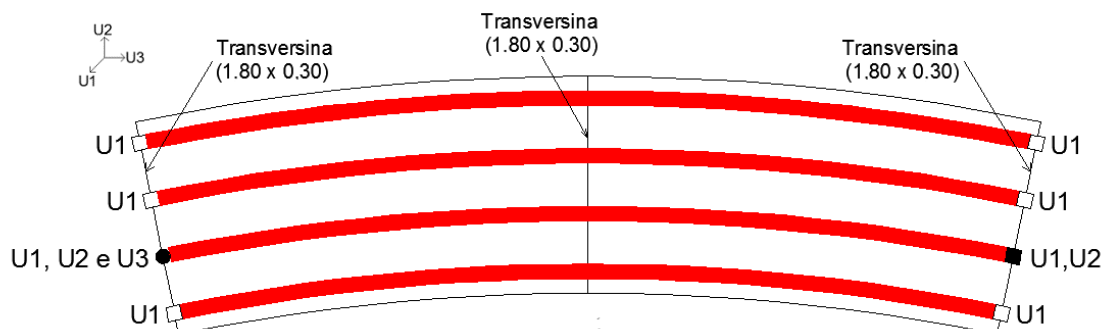


Figura 3. Condições de contorno e posicionamento das transversinas

Ao avaliar a ponte como um todo, é possível considerar uma restrição global de rotação de torção, visto que todos os aparelhos de apoio impedem a translação vertical.

1.5 Resumo dos modelos desenvolvidos

Como mencionado no item 1.3, foram definidos quatro grupos de modelos separados de acordo com o raio de curvatura. Os três primeiros grupos, G1 a G3, são compostos por dois modelos, cujas nomenclaturas foram definidas de acordo com suas respectivas geometrias, por exemplo, **M01 – PcLr-R150**: **P**onte **c**urva, **L**ongarinas **r**etas, raio de 150 metros. Já o grupo 4 foi composto por pontes de traçado longitudinal reto, para servir de parâmetro nas análises de curvatura efetuadas. Nesse grupo foi criado apenas um modelo com a seção transversal anteriormente mencionada. Os modelos construídos são apresentados na Tabela 2:

Tabela 2. Resumo dos modelos

Grupo	Modelo	Ângulo Central
1	M01-PcLr-R150	22.92°
	M02-PcLc-R150	22.92°
2	M03-PcLr-R300	11.46°
	M04-PcLc-R300	11.46°
3	M05-PcLr-R100	34.38°
	M06-PcLc-R100	34.38°
4	M07-PrLr-Rinfinito	0°

1.6 Ações

Nesta pesquisa foram consideradas apenas as cargas móveis do veículo-tipo TB-450 definido pela NBR 7188:2013, como mostra a Fig. 4, ou seja, o carregamento de multidão foi retirado da análise, por ser caracterizado como uma ação variável, mas não móvel.

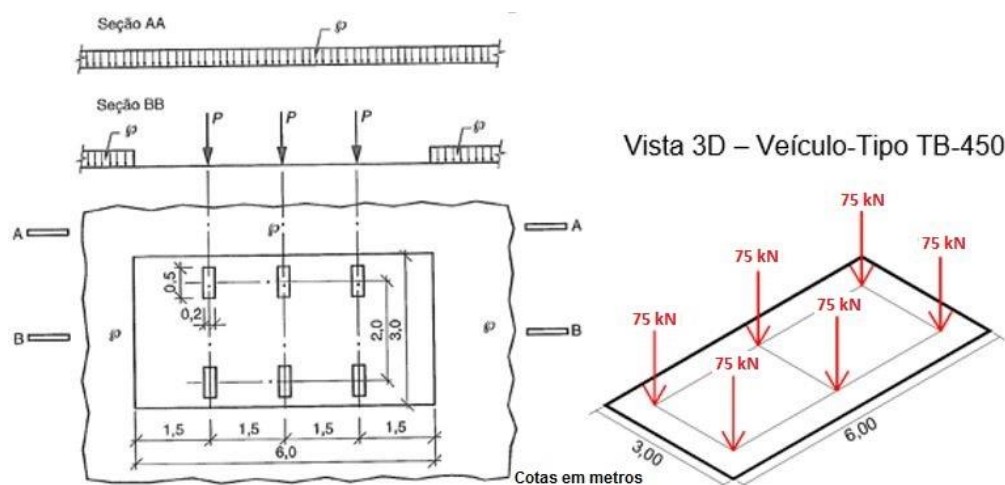


Figura 4. Veículo-tipo TB-450. Fonte: Adaptado de NBR 7188 (2013)

Foram avaliados quatro tipos de situações de carga para calcular os fatores de distribuição de momento fletor (FDMF) devido à carga móvel. Eles foram denominados como caso de carga geral e casos 01, 02 e 03. O caso de carga geral é aquele no qual o veículo-tipo passeia por toda estrutura, tanto na direção transversal como na longitudinal. O programa CsiBridge v17 realiza esse procedimento passando o veículo-tipo na largura da linha de carga definida pelo usuário (Fig. 5). Nesta pesquisa foi definida uma largura de 14.20 metros, visto que as barreiras têm 40 centímetros cada. Esse procedimento é realizado em todo o comprimento da ponte em uma quantidade de vezes determinada com base no comprimento máximo de discretização da linha de carga.

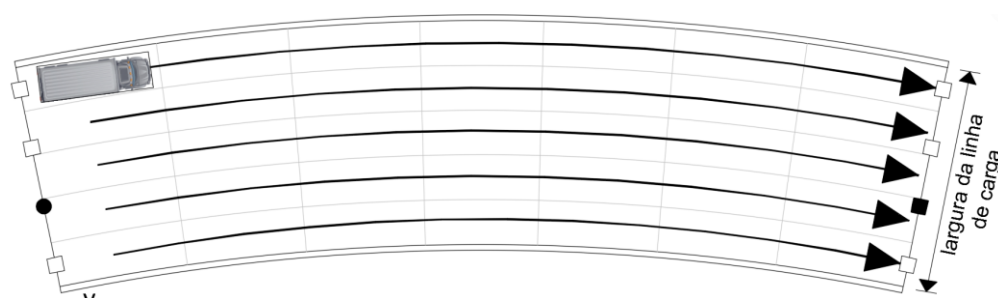


Figura 5. Passagem do veículo-tipo no tabuleiro para o caso geral

É importante destacar que o caso de carga geral fornece a envoltória de momento fletor em cada posição longitudinal da ponte, a partir da superfície de influência. Por isso, ao calcular os FDMF utilizando esse caso de carga, não é obtida uma parcela percentual do quantil total de momento fletor da ponte e sim, o máximo momento fletor sofrido pela longarina durante a passagem do veículo tipo em toda a ponte.

Para conseguir computar exatamente a parcela de momento fletor captada por cada longarina em relação ao total obtido na ponte, o veículo-tipo foi fixado em uma posição transversal determinada, passeando apenas ao longo do comprimento da ponte. O posicionamento de cada caso de carga pode ser visualizado nas Figs. 6a, b e c.

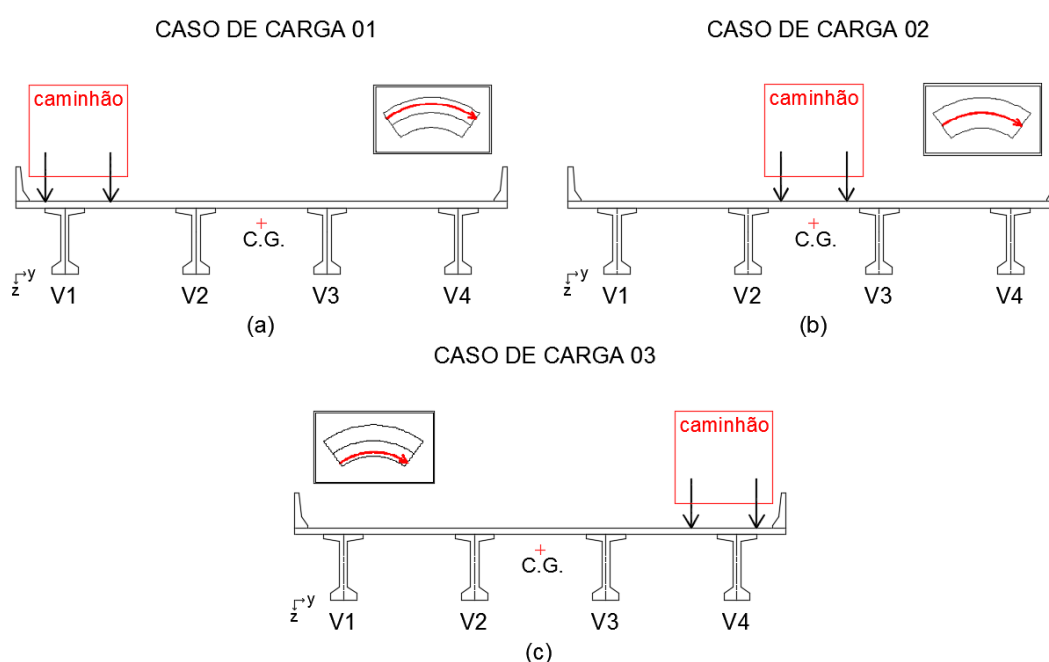


Figura 6. (a) Caso de carga 01 - veículo-tipo no lado externo da curva; (b) Caso de carga 02 - veículo-tipo na linha central da curva; (c) Caso de carga 03 - veículo-tipo no lado interno da curva

2 MODELAGEM NUMÉRICA

A modelagem numérica desta pesquisa foi realizada com base na revisão bibliográfica sobre o tema e no conjunto de elementos finitos que o software CsiBridge v17 fornece. De acordo com Fu & Wang (2015), a escolha do método de modelagem mais apropriado depende do tipo de informação que se deseja encontrar. Como buscava-se analisar a distribuição de esforços transversal em pontes curvas pela técnica dos fatores de distribuição de momento fletor (FDMF) devido a carga móvel, optou-se por utilizar modelos tridimensionais via método dos elementos finitos, devido a sua precisão, grande difusão em programas comerciais e principalmente por sua capacidade de visualização concisa dos resultados. Além disso, observou-se, com base em diversos estudos, que essa metodologia fornece resultados de fatores de distribuição de momento fletor devido a carga móvel mais próximos daqueles medidos em ensaios de campo.

2.1 Elementos finitos empregados

O elemento de barra utiliza uma formulação tridimensional e pode ser utilizado para modelar elementos de viga, pilares e treliças tridimensionais e planos, além de grelhas e cabos. Neste trabalho, esse tipo de elemento será utilizado para modelar as longarinas pré-moldadas. O CsiBridge v17 utiliza elementos de barra com dois nós e seis graus de liberdade em cada nó, ou seja, são transmitidos automaticamente três deslocamentos e três rotações, uma em cada eixo de referência. O eixo longitudinal de cada barra é definido automaticamente como o de número 1 e os demais, de acordo com os eixos de referência.

Os elementos finitos de barra fornecem os resultados de momentos fletores e esforços cortantes nas duas direções transversais ao eixo longitudinal, momento de torção em torno do eixo axial e esforço normal. As representações dos resultados seguem o disposto na Fig. 7, bem como as convenções de sinal para os esforços positivos.

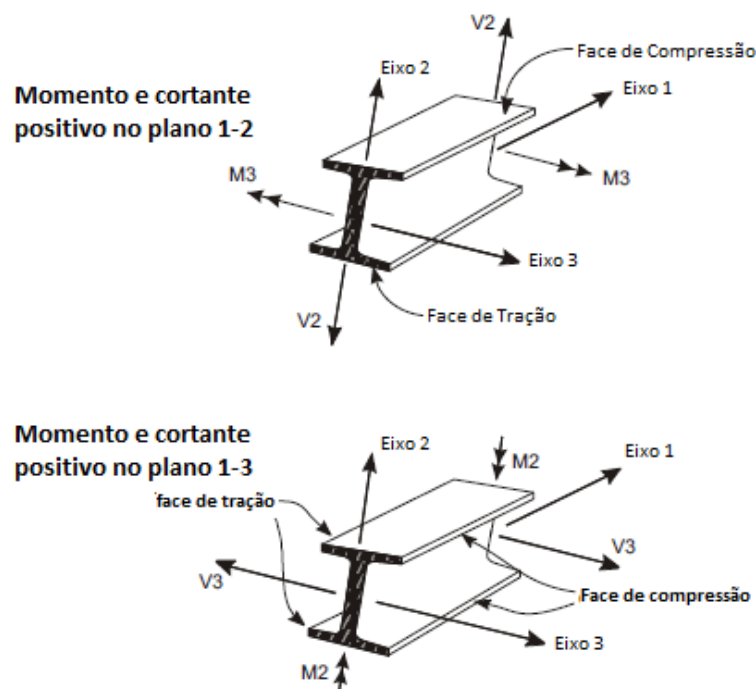
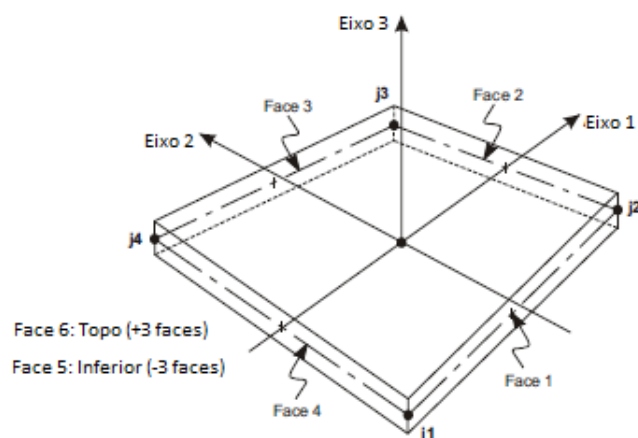


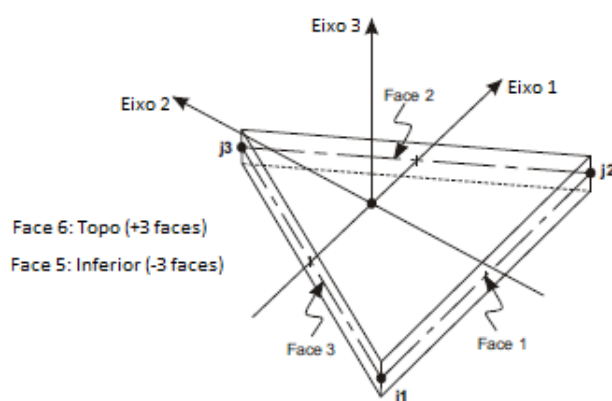
Figura 7. Esforços internos nos elementos barra. Fonte: Adaptado de CSI Reference Manual (2015)

O elemento de casca (shell) é um objeto de área utilizado para modelar placas e membranas, em suma, é um elemento que se comporta no plano, devido a sua pequena espessura. Esse tipo de elemento será utilizado para modelar as lajes em todos os modelos.

O CsiBridge v17 possui formulações de elementos de casca de 3 e 4 nós (Fig. 8), que combinam comportamento de membrana e de placa. Cada elemento possui seu sistema de coordenadas, definição de materiais e de cargas aplicadas, por isso, podem ter características isotrópicas e ortotrópicas.



Elemento de casca quadrilátero de 4 nós



Elemento de casca triangular de 3 nós

Figura 8. Tipos de elementos de casca na biblioteca do CsiBridge V17. Fonte: Adaptado de Csi Reference Manual (2015)

Segundo o *Csi Reference Manual* (2015), o cálculo da rigidez desses elementos é feito por meio de integração numérica, em que as tensões e os esforços internos são avaliados nos pontos de integração de Gauss e posteriormente extrapolados para os nós do elemento.

Os elementos de casca têm sempre seis graus de liberdade em cada nó e as restrições de movimento, bem como a passagem de esforços dependem das condições de contorno aplicadas a estrutura.

Os esforços internos nos elementos de casca são forças e momentos resultantes de integrações de tensões sobre a espessura do elemento. Para a casca homogênea utilizada nesta pesquisa, as forças internas são:

- Forças axiais e esforços cortantes de membrana (F11, F22 e F12);

- Momentos fletores, momentos de torção e esforços cortantes de placa (M_{11} , M_{22} , M_{12} , V_{13} e V_{23}).

É importante destacar que todas as tensões resultantes são forças e momentos por unidade de comprimento no plano da casca, presentes em cada ponto da superfície média do elemento. As convenções de sinal e posicionamento dos esforços internos e tensões são apresentadas na Fig.9. Tensões atuando na face positiva estão orientadas na direção positiva dos eixos locais do elemento. O momento positivo corresponde ao estado de tensão que varia linearmente na espessura do elemento e é positivo na parte inferior dele. Já as tensões de cisalhamento transversais são dadas em valores médios, já que sua distribuição é parabólica na espessura do elemento, fornecendo seu máximo na superfície média deste.

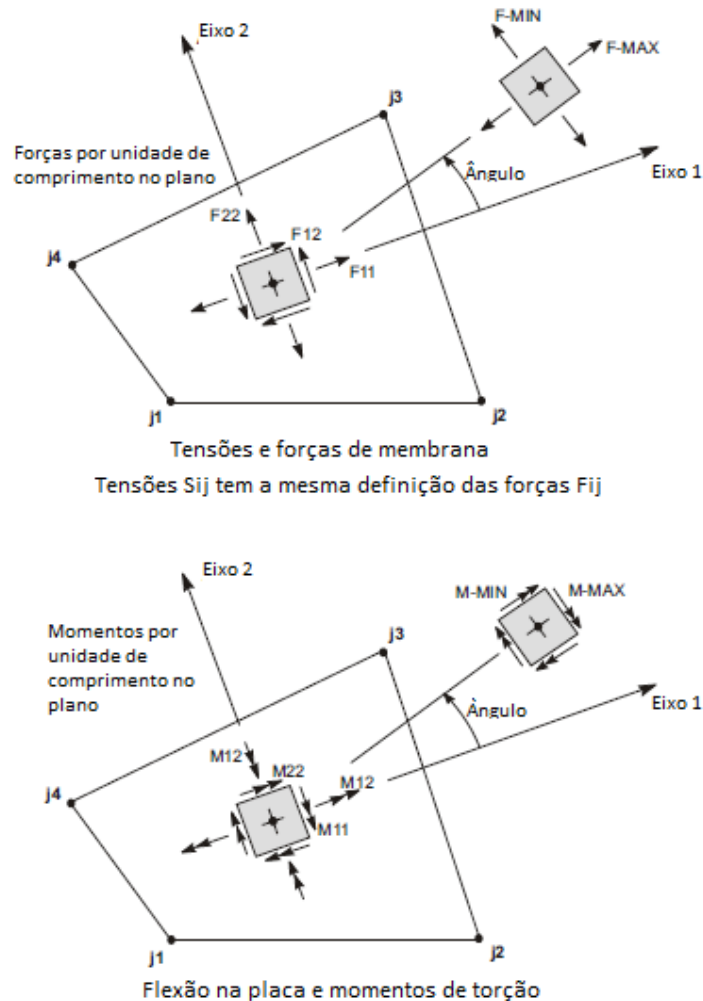


Figura 9. Esforços internos e tensões nos elementos de casca. Fonte: CSi Reference Manual (2015)

2.2 Modelos

Em todos os modelos foi definido um comprimento máximo de elemento igual a 1.20 metros na direção longitudinal da ponte, mantendo a proporção entre dimensões (“*aspect ratio*”) do elemento de no máximo 2.50, visto que a utilização de elementos menores demandou muito tempo em trabalho computacional para pouco ganho de precisão. Desse modo, a proporção do elemento ficou dentro dos limites sugeridos por Fu & Wang (2015) e Fatemi et al. (2016).

A. Modelo com longarinas retas

Essa modelagem foi utilizada nos modelos PcLr-R150, PcLr-R300, PcLr-R100 e PrLr-Rinfinito. Em todos eles foram adotados elementos de casca com 4 nós para a laje e transversinas, bem como elementos de barra para representar as longarinas pré-moldadas.

A ligação entre a laje e as longarinas foi feita por meio da metodologia de nó-mestre – nó-escravo (“*body constraint*”), em que o deslocamento do nó escravo acompanha o do mestre simulando um comportamento de corpo rígido entre eles, assim, a barra que representa a longarina foi posicionada no eixo central da mesa. Já a ligação da longarina com os apoios foi realizada com o emprego de barras rígidas de comprimento suficiente para transpor as transversinas de apoio e chegar até os aparelhos de apoio. A Fig. 10 apresenta a discretização desse modelo de ponte e a Fig. 11 mostra a ponte modelada com essa seção no CSiBridge. Nos aparelhos de apoios foram introduzidas molas de rigidez elevada ($K = 10^{11}$ kN/m) nos graus de liberdade que deveriam ser restringidos.

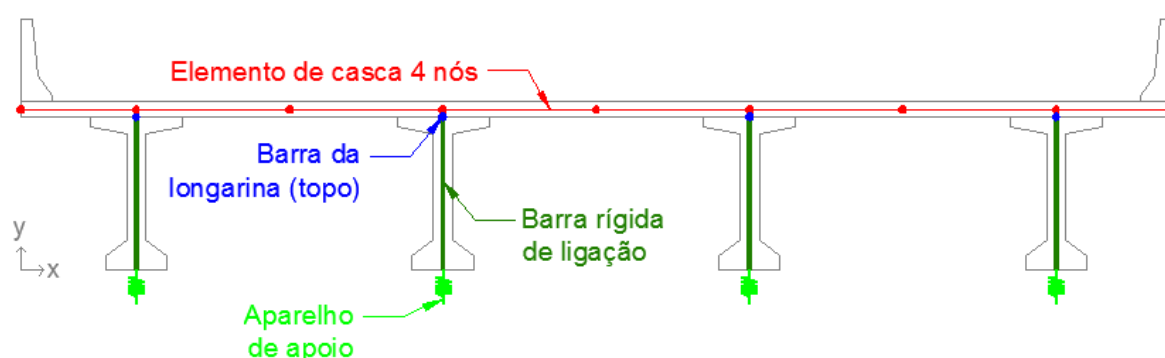


Figura 10. Discretização do modelo de ponte

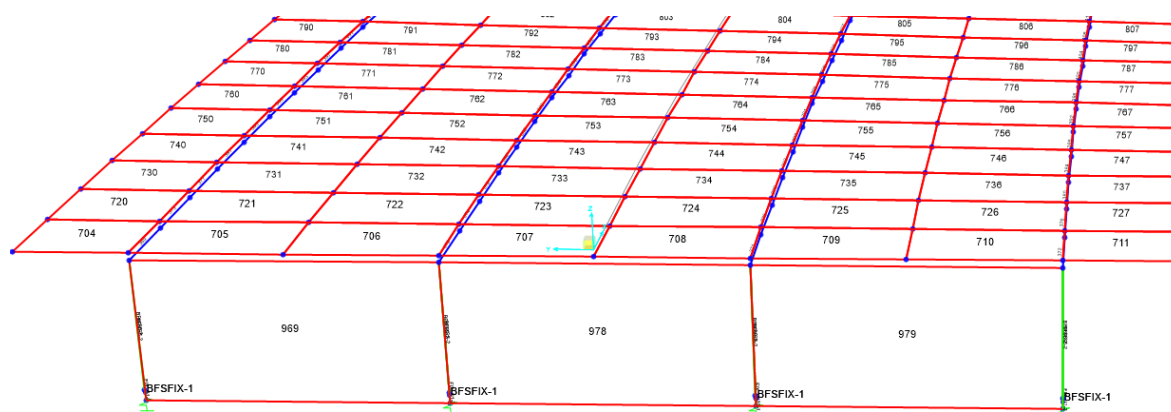


Figura 11. Modelo PcLr-R150 construído no CSiBridge V17

Nesses modelos com longarinas retas, optou-se por fixar a seção transversal ao longo da ponte, entretanto, devido a curvatura acentuada, foi necessário estender o tabuleiro na região interna da curva, para que a longarina fosse mantida reta e a ponte permanecesse biapoiada, sem nenhum apoio intermediário. É importante salientar que a introdução de um apoio intermediário, para manter a largura do tabuleiro na região central, reduzia o vão das longarinas pela metade, descaracterizando o processo comparativo do trabalho.

Um dos casos estudados pode ser visualizado na Fig. 12. Contudo, essa alteração geométrica não influencia nos resultados, visto que a análise está sendo feita com base nos fatores de distribuição de momento fletor nas longarinas devido a carga móvel, ou seja, não está sendo considerado o peso próprio, nem a parcela estática do TB-450. Além disso, o veículo passeia de forma idêntica em todos os modelos, ao longo da linha central e ao longo das extremidades indicadas na seção de ações.

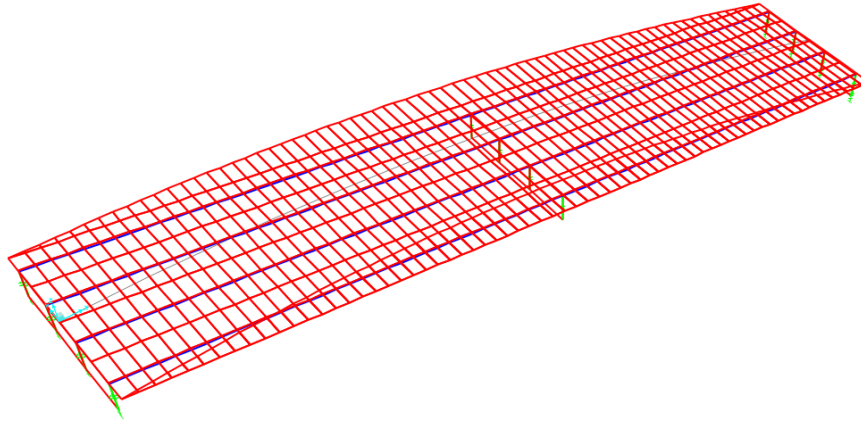


Figura 12. Modelo PcLr-R150 com alargamento do tabuleiro do lado interno da curva

B. Modelo com longarinas curvas

Os modelos PcLc-R150, PcLc-R300 e PcLc-R100 utilizam esse tipo de modelagem. Como foi utilizada a mesma seção transversal do item anterior, são utilizados os mesmos elementos finitos e a mesma discretização apresentada na Fig. 10. Entretanto, nesses modelos foram utilizadas longarinas curvas, representadas no programa por trechos retos de, no máximo, 1.0 metro de comprimento, o que fornece uma aproximação bastante satisfatória, mesmo para pontes com raios menores que 100 metros. Então, as longarinas desses modelos acompanham o traçado das bordas da laje ao longo de todo comprimento da ponte, não havendo empecilho geométrico para vencer todo o vão sem a necessidade de apoios intermediários (Fig. 13).

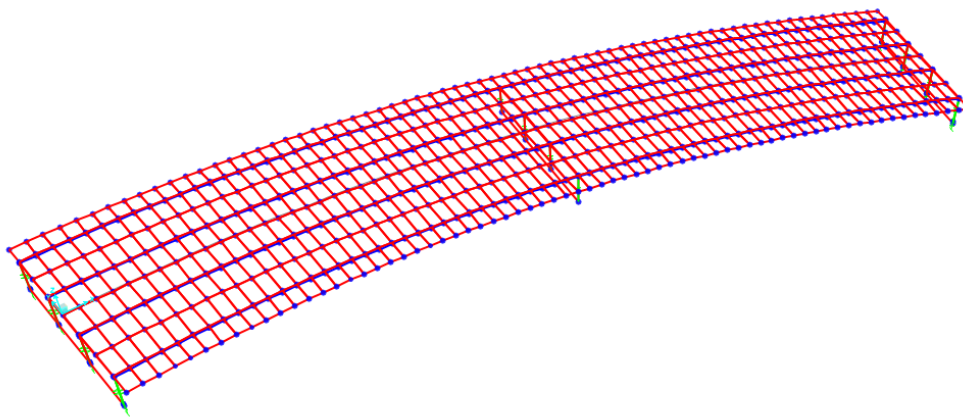


Figura 13. PcLc-R100, longarinas pré-moldadas e curvas

C. Modelo com geometria longitudinal retas

Conforme indicado na tabela 2, foi construído um modelo de ponte reta, como objeto de comparação. Desse modo, a discretização e os elementos finitos utilizados são exatamente os

mesmos correspondentes a seção transversal apresentada anteriormente. Contudo, como a ponte é reta, os elementos finitos conservaram o formato retangular seguindo o traçado retilíneo da ponte, como é possível visualizar na Fig. 14.

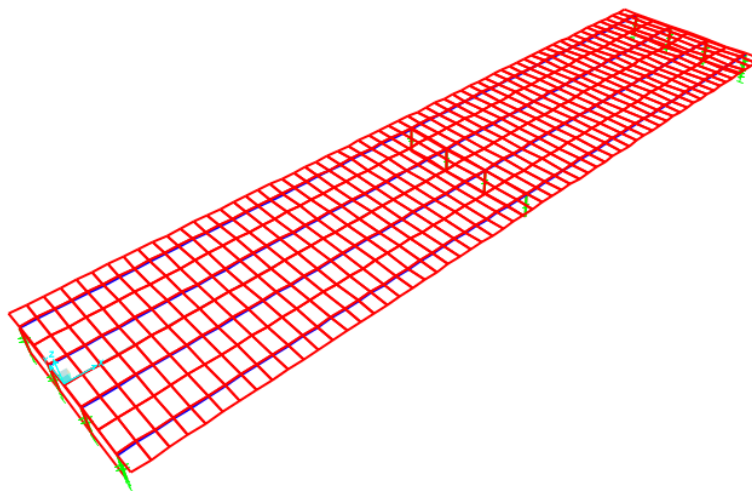


Figura 14. Modelo PrLr-Rinfinito, ponte reta em longarinas pré-moldadas

2.3 Fator de distribuição de momento fletor

Para averiguar como ocorre a distribuição de carga móvel em tabuleiros de pontes curvas foram utilizados os fatores de distribuição de momento fletor (FDMF). Eles foram determinados por meio da relação entre os resultados de momento fletor no meio do vão (seção longitudinal crítica) para cada longarina, obtidos dos modelos 3D apresentados ($M^{MEF,3D}_{longarina}$) e dos resultados de momento fletor para toda a ponte, obtidos por meio da modelagem da ponte como viga (*spine model*) (M^{1D}_{total}). É importante destacar que os resultados devem ser obtidos na mesma seção crítica, com modelos submetidos às mesmas cargas móveis. Em suma, os fatores de distribuição de momento fletor foram calculados de acordo com a Equação 1:

$$FDMF = \frac{M^{MEF,3D}_{longarina}}{M^{1D}_{total}} \quad (1)$$

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Como o objetivo da pesquisa é analisar a distribuição de esforços devido a carga móvel para as longarinas, não foi adotada nenhuma combinação de carga última para efeito de dimensionamento dos elementos estruturais, bem como não foram aplicadas cargas permanentes na estrutura. Além disso, os dados percentuais foram captados de duas formas: utilizando a diferença percentual global, que representa a subtração entre os percentuais de momento fletor encontrados em cada longarina em relação ao momento fletor total da seção; e a diferença percentual local, que foi definida como a mesma subtração só que em relação ao momento fletor na própria longarina.

Nas Figs. 15 e 16 são apresentados os gráficos relativos ao caso de carga geral, que engloba os resultados máximos de momento fletor obtidos no tabuleiro, os demais resultados podem ser encontrados em Rebouças (2017). Após os gráficos são visualizadas as tabelas com as diferenças percentuais globais e locais referentes a cada um deles.

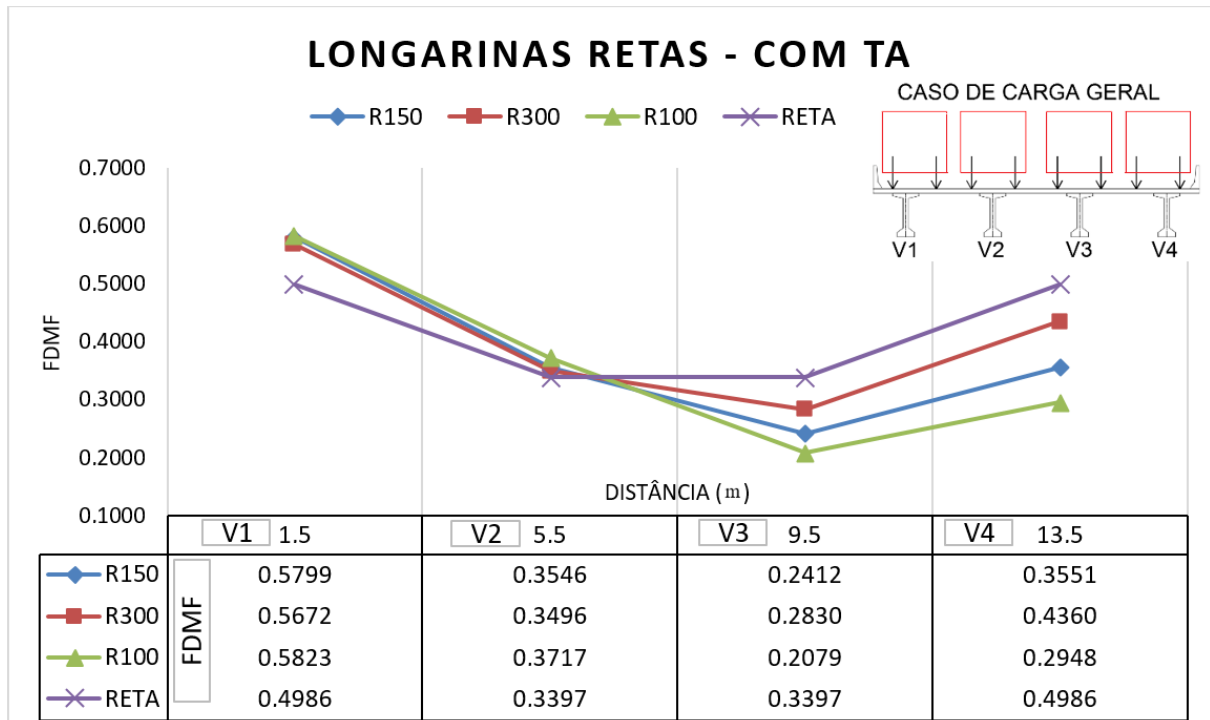


Figura 15. Variação do FDMF com a curvatura entre modelos de ponte curva com longarinas retas, caso de carga geral, com transversina de apoio

Tabela 3. Diferenças percentuais GLOBAIS em relação ao modelo de ponte reta

CC GERAL	Longarinas retas		
	R100	R150	R300
V1	8.362%	8.127%	6.856%
V2	3.199%	1.495%	0.987%
V3	-13.182%	-9.853%	-5.667%
V4	-20.384%	-14.358%	-6.264%

Tabela 4. Diferenças percentuais LOCAIS em relação ao modelo de ponte reta

CC GERAL	Longarinas retas		
	R100	R150	R300
V1	27.261%	22.258%	16.342%
V2	19.248%	9.752%	5.250%
V3	-33.308%	-25.367%	-14.785%
V4	-35.567%	-25.145%	-10.570%

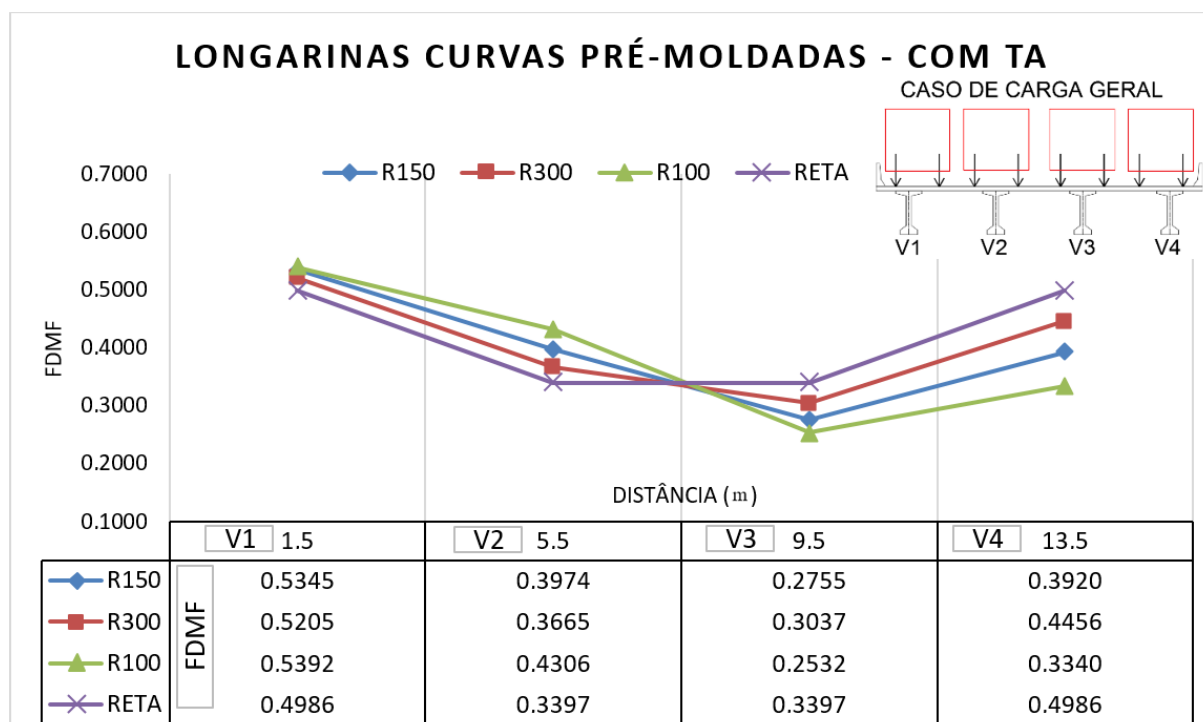


Figura 16. Variação do FDMF com a curvatura entre modelos de ponte curva com longarinas curvas, caso de carga 03, com transversinas de apoio

Tabela 5. Diferenças percentuais GLOBAIS em relação ao modelo de ponte curva

CC GERAL	Longarinas curvas		
	R100	R150	R300
V1	4.060%	3.583%	2.182%
V2	9.091%	5.771%	2.677%
V3	-8.652%	-6.416%	-3.598%
V4	-16.466%	-10.666%	-5.302%

Tabela 6. Diferenças percentuais LOCAIS em relação ao modelo de ponte reta

CC GERAL	Longarinas curvas		
	R100	R150	R300
V1	17.858%	12.679%	6.756%
V2	38.151%	22.984%	10.341%
V3	-18.774%	-14.731%	-8.554%
V4	-27.003%	-17.360%	-8.595%

Constatou-se primeiramente que os FDMF aumentaram, em valor absoluto, com o aumento da curvatura (consequentemente com a redução do raio) para todas as longarinas, em todos os casos de carga, em relação a ponte reta. Há uma espécie de crescimento gradual dos FDMF partindo do modelo de ponte reta até o modelo com raio igual a 100 metros, que apresentou a maior diferença percentual em valor absoluto.

Em vista disso, foi possível constatar que a aplicação de formato curvo à ponte leva a um acréscimo significativo de momento fletor na longarina posicionada no lado externo da curva (V1), quando comparado aos valores obtidos em pontes retas nas geometrias estudadas. Isso ocorreu por causa do acréscimo de comprimento desta longarina e devido sua distância do centro de gravidade global da ponte, gerando um momento de torção que aumenta o momento fletor. Como consequência, observou-se uma redução nos valores de FDMF para as longarinas do lado interno da curva (V4), com uma diferença percentual global mais significativa do que nas longarinas V1. Nesse caso, a redução se deve ao encurtamento do comprimento da longarina e ao momento de torção, que aqui, reduz o valor do momento fletor.

Ao analisar todos os casos de carga e tipos de seção transversal separados, observou-se que a maior diferença percentual total de FDMF ocorreu entre os modelos de pontes curvas com longarinas retas (M01, M03 e M05) e o modelo de ponte reta (M07), atingindo uma diferença percentual global de 8.362% para a longarina V1 (aumento máximo) e de -20.384% para a longarina V4 (redução máxima).

Tais resultados estão em consonância com os trabalhos de Cho *et al.* (2014) e Khalafalla. (2009), o que nos leva a concluir que as longarinas de uma ponte curva não podem ser dimensionadas utilizando uma análise estrutural de ponte reta, pois há diferenças percentuais de FDMF muito significativas para todas as longarinas da seção transversal, mesmo para o raio de 300 metros. Entretanto, deve ser dada maior atenção as longarinas V1 e V2 (lado externo à curva), devido ao acréscimo de momento fletor que chega a ser de 27.261% para longarinas retas e de 38.151% para longarinas curvas nas pontes com raio de 100 metros.

4 CONCLUSÕES

A inserção de curvatura a ponte impacta consideravelmente na distribuição de momento fletor devido a carga móvel para as longarinas. Primeiramente porque há uma migração de momento fletor para as longarinas localizadas no lado externo da curva (posição mais distante do centro de gravidade), que ocorre devido aos valores significativos de momento de torção que atuam na ponte e ao acoplamento entre ele o momento fletor.

Além disso, com base dos modelos estudados, constatou-se que esse acréscimo é proporcional ao raio de curvatura, ou seja, quanto menor o raio de curvatura, maior é a porcentagem de momento fletor que vai para as longarinas externas a curva (V1 e V2) e menor é a porcentagem nas longarinas internas a curva (V3 e V4).

Ademais, ao analisar as duas configurações de longarinas (retas e curvas) num traçado de ponte curva, conclui-se que nas pontes curvas com longarinas retas há uma maior concentração de momento fletor na longarina externa a curva (V1) devido a maior porção de laje que se encontra na região de influência dessa longarina. Paralelo a isso, a utilização de longarinas curvas fornece uma distribuição de momento fletor mais igualitária para as longarinas, o que pode resultar em uma economia construtiva considerável.

REFERÊNCIAS

- AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials (2014). LRFD Bridge Design Specifications. 7th ed., Washington, USA.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7188: 2013 – Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: 2014 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- Almeida, V.S., Alves, R.V., Judice, F.M.S., 2016. Distribuição Transversal para Pontes em Vigas Múltiplas Protendidas. *IX Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas*
- 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*, v. 6, n. 2, p. 48-58.
- Barbosa, R.L., 1997. *Pontes Curvas Unicelulares em Regime Elástico*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo/São Paulo.
- Brockenbrough, R.L., 1986. Distribution Factors for Curved I-Girder Bridges. *Journal of Structural Engineering*, vol. 112, n. 10, p. 2200-2215.
- Cho, D.; Park, S.; Hong, S. (2014): Evaluation of Girder Distribution Factor in PSC Girder Bridge with Curved Concrete Slab Based on AASHTO Specifications. *Arab Journal of Science Engineering*, vol. 39, p. 7635-7646.
- Fatemi, S.J.; Mohamed Ali, M.S.; Sheikh, A.H. (2016): Load distribution for composite steel-concrete horizontally curved box girder bridge. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 116, p. 19-28.
- Fu, C. C.; Wang, S. (2015) *Computational Analysis and Design of Bridge Structures*, 1ª ed, CRC Press, Boca Raton, Flórida.
- Jovem, T.P., Rebouças, A.S., Silva Filho, J.N., Diógenes, H.J.F., Mata, R.C., 2016. Análise comparativa da distribuição de carga em pontes hiperestáticas de concreto armado com múltiplas longarinas por meio de modelos analíticos clássicos e do método dos elementos finitos. *IX Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas*.
- Judice, F.M.S., Perlingeiro, M.S.P.L., Diaz, B.E., Lima, S.S., 2010. Avaliação da Distribuição de Cargas em Tabuleiros de Pontes sem Transversinas Internas – 2ª Parte. *III Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas*.
- Khalafalla, I.E. (2009) *Curvature Limitations in Bridge Codes*. M.A.Sc. Thesis. Ryerson University, Toronto, Ontario, Canadá, 210 p.
- Kim, W.S.; Laman, J.A.; Linzell, D.G. (2007): Live Load Radial Moment Distribution for Horizontally Curved Bridges. *Journal of Bridge Engineering*, vol. 12, n. 6, p. 727-736.
- Moura, M.W., Ferreira, M.W., Real, M.V., Santos, G.C., 2016. Comparação do Método de Fauchart e do Método dos Elementos Finitos na Avaliação da Distribuição de Esforços Transversais em Pontes Rodoviárias. *IX Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas*.
- Nevling, D.; Linzell, D.; Laman, J. (2006): Examination of Level of Analysis Accuracy for Curved I-Girder Bridges through Comparisons to Field Data. *Journal of Bridge Engineering*, vol. 11, n. 2, p. 160-168.

Puckett, J. A., Huo, X. S., Patrick, M. D., Jablin, M. C., Mertz, D., & Peavy, M. D., 2005. Simplified Equations for Live-Load Distribution in Highway Bridges, International Bridge Engineering Conference, TRB: 6IBECS-069.

Rebouças, A.S., 2017. *Análise da distribuição de momento fletor devido a carga móvel em pontes curvas de concreto armado*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Samaan, M.; Sennah, K.; Kennedy, J.B. (2002): Positioning of bearings for curved continuous spread-box girder bridges. Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 29, p. 641-652.

Zokaie, T., Osterkamp, T.A., Imbsen, R.A., 1991. Distribution of Wheel Loads on Highway Bridges. National Cooperative Highway Research Program, Report 12-26.