



Metodologia de Cálculo de uma Ponte Mista com Vigas Múltiplas Conforme a AASHTO LRFD BRIDGE

Henrique de Paula Faria

UniCEUB – Centro Universitário de Brasília / Departamento de Engenharia Civil /
henrique.faria@ceub.edu.br

Resumo

As pontes em estruturas mistas com vigas múltiplas são bastante utilizadas nas estruturas rodoviárias e apresentam-se como uma solução econômica para as Obras de Arte Especiais. A economia refere-se ao transporte, içamento das vigas e alívio da meso e infraestrutura. Estas estruturas apresentam vigas metálicas do tipo I, justapostas, com um mínimo de 4 vigas apoiadas em aparelhos de apoio e fixadas entre si por treliças diafragmas que distribuem parte do carregamento transversal. As vigas são ligadas ao tabuleiro de concreto por conectores os quais permitem a transmissão dos esforços e a possibilidade dos dois materiais aço e concreto trabalharem juntos, caracterizando a estrutura mista. Nos projetos de pontes em vigas mistas utilizam-se perfis soldados assimétricos, os quais não têm limites de altura para sua fabricação e possibilitam uma otimização no projeto. Essa liberdade na definição da seção do perfil é um fator que possibilita uma economia final, deixando a estrutura mais leve. Em função da esbeltez das peças metálicas há necessidade da verificação da flambagem local e global do elemento metálico. As normas de aço brasileiras referem-se a estruturas de edificações e não apresentam referências para estruturas de Obras de Arte Especiais, ficando a critério do profissional projetista procurar norma internacional específica. Assim a proposta deste trabalho é apresentar critérios para uma metodologia de cálculo, deste tipo de estrutura, com o processo utilizado pela AASHTO LRFD BRIDGE para pontes mistas com vigas múltiplas do tipo I.

Palavras-chave

Pontes; Aço; Viga-I; AASHTO.

Introdução

As pontes mistas em vigas múltiplas são amplamente utilizadas em soluções de viga reta, quando se deseja diminuir o peso da estrutura e vencer vãos onde o concreto armado já não é econômico. As vigas metálicas possuem vantagens em relação à solução em concreto pré-moldado no que se refere ao peso, transporte, montagem e qualidade da obra.

Atualmente, no que se refere às normas brasileiras, não há norma específica para estruturas de ponte em aço. Para o projeto de uma ponte mista pode-se consultar a NBR-7187/2003 – Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido - Procedimento, NBR-7188/2013 – Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas e a NBR-8800/2008 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. A estrutura de uma OAE deve ser

verificada a solicitações de impacto e fadiga, as quais não são usuais nas estruturas de edificações e não possuem referencia na norma de aço.

Este trabalho visa contribuir para apresentar critérios na sequência de cálculo do dimensionamento de vigas mistas em pontes de vigas múltiplas. A metodologia de cálculo utilizada teve como referência a norma americana AASHTO LRFD-2012, 6th ed, no item específico: *Bridge Design Specifications*, a qual apresenta parâmetros para verificação da seção transversal com relação ao ELU e ELS.

Seção Transversal da ponte

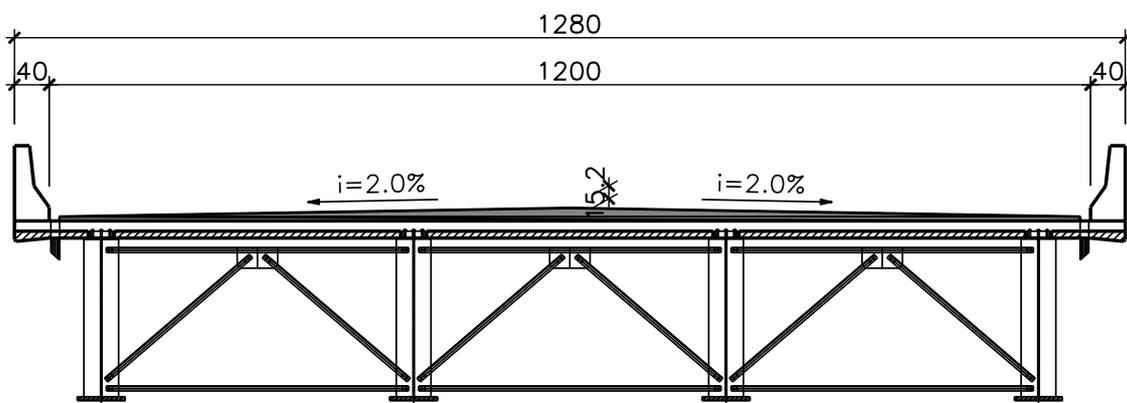


Figura 1 – Vigas múltiplas.

A seção transversal da Figura 1 refere-se a uma seção típica de vigas múltiplas, com largura de 12,80m para as necessidades de uma via com duas faixas de tráfego de 3,5m mais acostamentos de 2,5m de cada lado e barreiras de proteção tipo “New Jersey” com 0,40m.

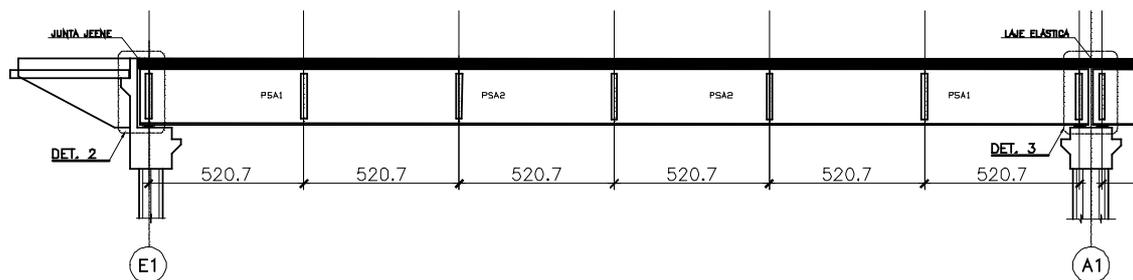


Figura 2 – Vista longitudinal.

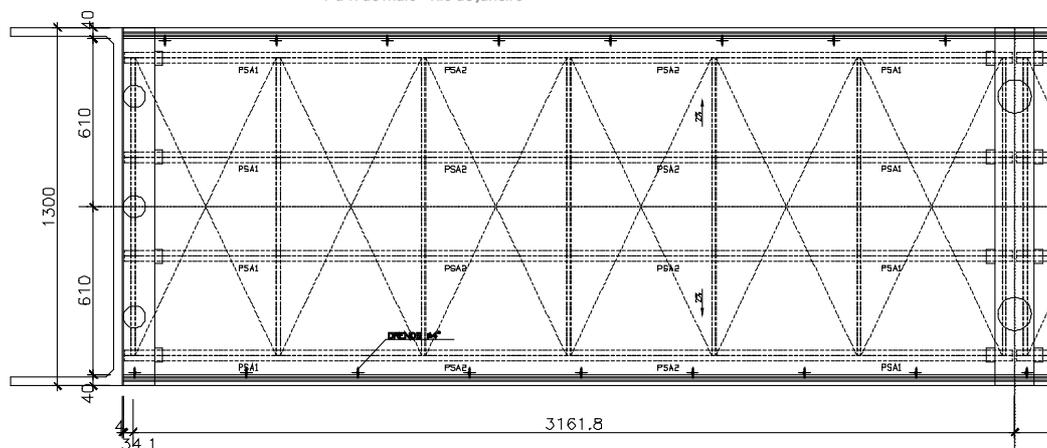


Figura 3 – Vista em planta e diafragmas.

As figuras 2 e 3 apresentam a vista longitudinal e em planta da estrutura de uma ponte em aço com os diafragmas e elementos construtivos de contraventamento. Os diafragmas internos adotados são do tipo K a fim de possibilitar uma facilidade na montagem e instalação. Estes diafragmas também servirão para transferir solicitações devido ao vento e de elementos construtivos nas fases de construção das lajes e balanços, bem como atender aos requisitos de flambagem lateral das vigas.

Com relação aos diafragmas e barras de contraventamento, estes deverão ser previstos para distribuição dos esforços transversais e travar as mesas superiores dos perfis na fase de montagem. Embora as especificações de projeto da AASHTO sejam, de forma geral baseada em barras isoladas, o comportamento global da ponte deve ser considerado, principalmente nas várias etapas de construção. A estrutura durante a fase de montagem estará apenas com os perfis de aço e deverá ser suficientemente rígida para resistir aos esforços laterais do vento.

Pré-dimensionamento da Viga

1. Altura da Viga

A altura da viga é outra consideração extremamente importante que afeta a economia do projeto. A AASHTO apresenta uma tabela (2.5.2.6.3-1) com índices para a altura do perfil em função do tipo de estrutura, sendo a altura mínima sugerida da seção de aço em uma seção I composta e contínua, dada por $0,027L$, onde L é o comprimento da viga. Caso o vão seja isostático a recomendação é para uma altura mínima de $0,033L$.

Neste trabalho em questão, como a ponte é reta e isostática, adotou-se para a altura da viga a relação $0,033L$ ou $L/30$:

$$h = 0,033 \cdot L = 0,033 \cdot (30m) \cong 1,0m \quad (1)$$

2. Seção Transversal

Limite de proporcionalidade da espessura da alma sem enrijecedores longitudinais:

$$\frac{h}{t_w} \leq 150 \quad (2)$$

Logo:

$$t_{w(\text{min.})} = \frac{h}{150} = \frac{1000\text{mm}}{150} = 6,66\text{mm}$$

⇒ Adotado: $t_w = 9,5\text{mm}$

Para a determinação da largura da mesa superior, tem-se:

$$b_{fs} \geq \frac{h}{6} \quad (3)$$

Logo:

$$b_{fs} \geq \frac{h}{6} = \frac{1000}{6} = 166\text{mm} \cong 170\text{mm}$$

Em função da construtibilidade e estabilidade da viga, nas operações de içamento, a AASHTO recomenda a seguinte verificação:

$$b_{fs} \geq \frac{L}{85} \quad (4)$$

sendo que L é a distância entre as emendas.

Logo:

$$b_{fs} \geq \frac{L}{85} = \frac{10000}{85} = 117,65\text{mm}$$

Assim pode-se adotar um $b_{fs} = 170\text{mm}$ que atende aos critérios acima e também permite uma maior facilidade na instalação dos conectores.

A espessura mínima da mesa superior é dada por:

$$t_{fs} \geq 1,1 \cdot t_w \quad (5)$$

Logo:

$$t_{fs} \geq 1,1 \cdot 9,5 = 10,45\text{mm}$$

Em função da construtibilidade e estabilidade da viga a AASHTO recomenda uma espessura mínima de 0,75 polegadas (19,05mm). Tem-se:

$$t_{fs} = 19,05\text{mm} (3/4")$$

Além disso, a mesa superior deve satisfazer a seguinte condição:

$$\frac{b_{fs}}{2 \cdot t_{fs}} \leq 12 \quad (6)$$

Logo:

$$\frac{170}{2 \cdot 19,05} = 4,46 < 12$$

Portanto, esta condição também é satisfeita.

Conforme publicação da AASHTO/NSBA (2012), *Steel Bridge Design Handbook*, a largura da mesa inferior é definida, na região de momento positivo, pelas tensões na mesa e que deverá ser verificada na análise do perfil na combinação do estado limite de serviço. A relação da largura da mesa inferior com a espessura segue a mesma relação da equação 6, porém deverá atender ao disposto da equação 7. A espessura deverá ter um incremento de 1/8 de polegada ou 3,175mm.

$$0,1 \leq \frac{I_{yc}}{I_{yt}} \leq 10 \quad (7)$$

Onde I_{yc} é igual ao momento de inércia na mesa comprimida do perfil metálico em relação ao eixo vertical no plano da alma e o I_{yt} é igual ao momento de inércia da mesa tracionada sobre o eixo vertical no plano da alma.

Assim para a largura da mesa inferior será adotada uma largura maior que a mesa superior, igual a 200 mm e espessura de 22,22mm (7/8"), e verificado conforme a equação 6.

$$\frac{200}{2 \cdot 22,22} = 4,50 < 12$$

E para o atendimento da equação 7, tem-se:

$$\frac{I_{yc}}{I_{yt}} = \frac{\frac{19,05 \cdot (170)^3}{12}}{\frac{22,22 \cdot (200)^3}{12}} = 0,53$$

Assim para a seção em questão, atende a relação I_{yc} / I_{yt} que é maior que 0,53 e menor que 10.

Carregamentos

1. Carga Permanente

A carga permanente é todo o peso próprio dos elementos da estrutura e será dividido em carga permanente antes da cura (DC1) e carga permanente depois da cura (DC2). A carga permanente antes da cura é indicada por (DC1) que representa o peso próprio da estrutura metálica, concreto não endurecido e formas. A carga permanente depois da cura é indicada por (DC2) que representa o peso próprio dos elementos posteriores ao endurecimento do concreto tais como a barreira, pavimento e guarda-corpo.

A carga permanente devido ao recapeamento futuro da rodovia é representado por (DW) e a carga devido aos eventuais equipamentos e operários durante a construção é indicado por (CLL).

2. Carga Móvel

Será adotada a NBR-7188/2013 - Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. A ponte em questão possui carga móvel rodoviária padrão TB-450, com veículo tipo de 450 kN, circundado por uma carga distribuída constante de 5 kN/m², conforme indicado na figura 5.

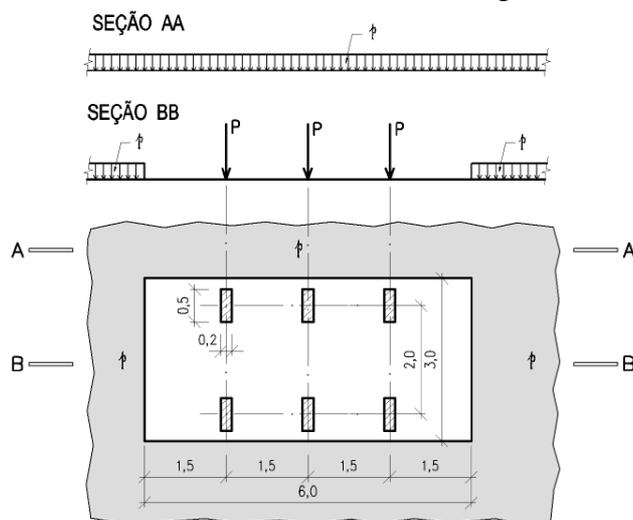


Figura 5 – Disposição de cargas móveis

3. Combinações de carga

As combinações de carga serão adotadas conforme prescreve a AASHTO 2012, rev. 6th, tabela 3.4.1-1 do item 3.4.

Combinação 1 (ELU) = $1,25.DC + 1,5.DW + 1,75.(LL+IM)$

Combinação 2 (ELU) = $1,25.DC + 1,5.DW + 1,4.WS$

Combinação 3 (ELS-deformação) = $1,0.DC + 1,0.DW + 1,3.(LL+IM)$

Combinação 4 (ELS-fadiga) = $1,50.(LL+FAD)$

Sendo:

DC = carga permanente (peso próprio da estrutura DC1 e DC2);

DC1 = carga permanente antes da cura, laje, estrutura metálica e formas/escoramento;

DC2 = carga permanente depois da cura devido ao pavimento, barreiras tipo “New Jersey” ou guarda corpos;

WS = carga devido ao vento (NBR 6123/1988);

DW = carga devido a recapeamento futuro (7.1.2 - NBR 7187/2003);

CLL = carga devido a equipamentos e operários durante a construção;

LL = carga móvel (TB-450; NBR-7188/2013);

IM = coeficiente de impacto incidido na própria carga móvel (NBR-7188/2013);

FAD = coeficiente devido à fadiga incidido na carga móvel (1,15 conforme AASHTO 2012);

Cálculo

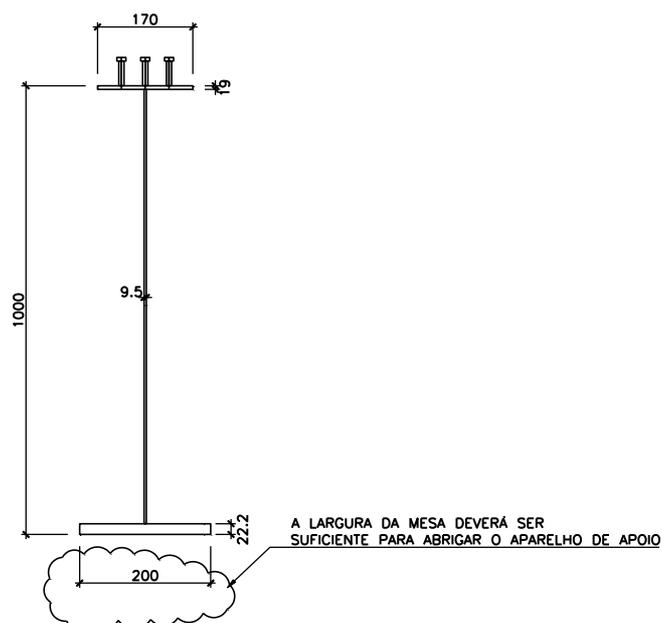
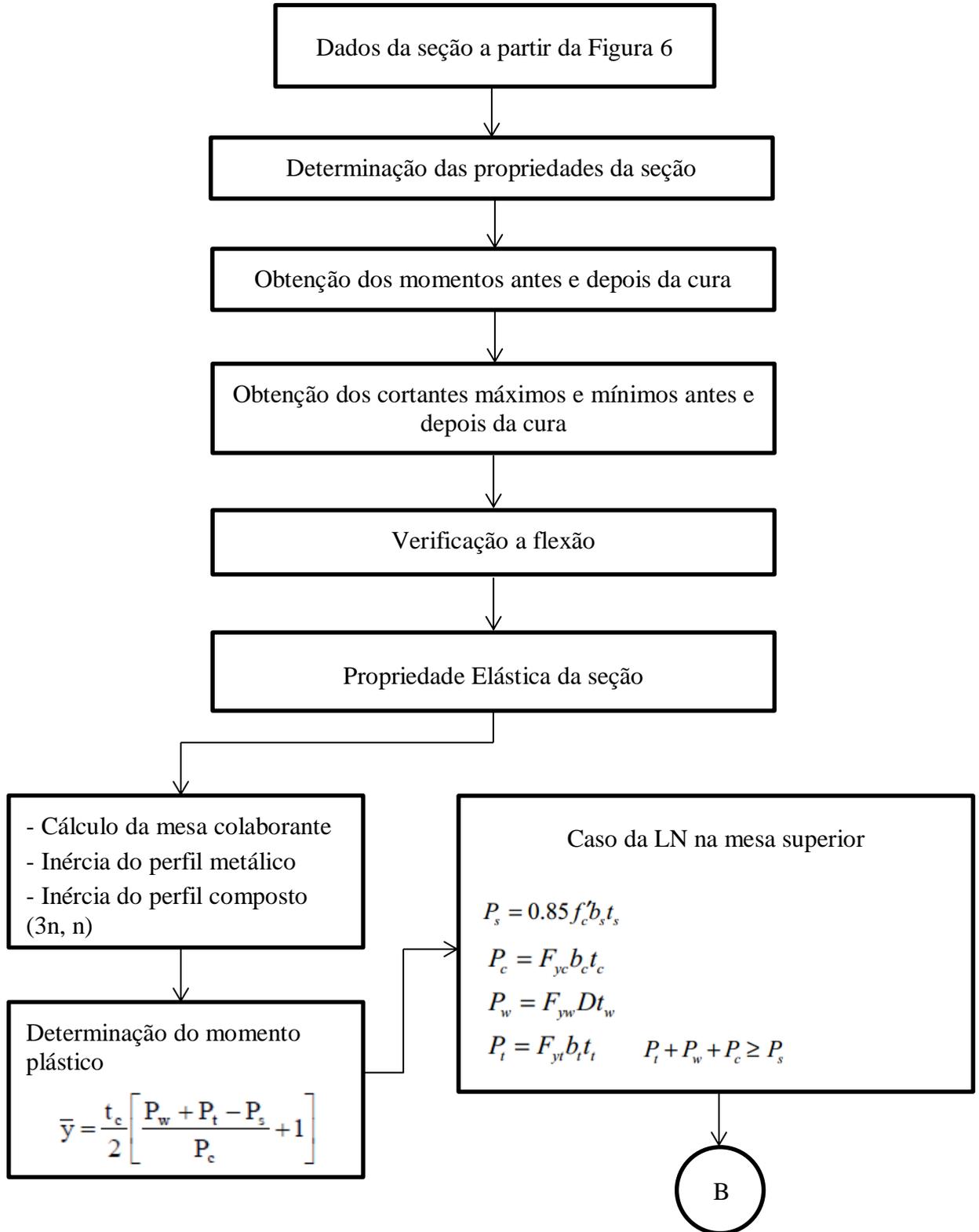
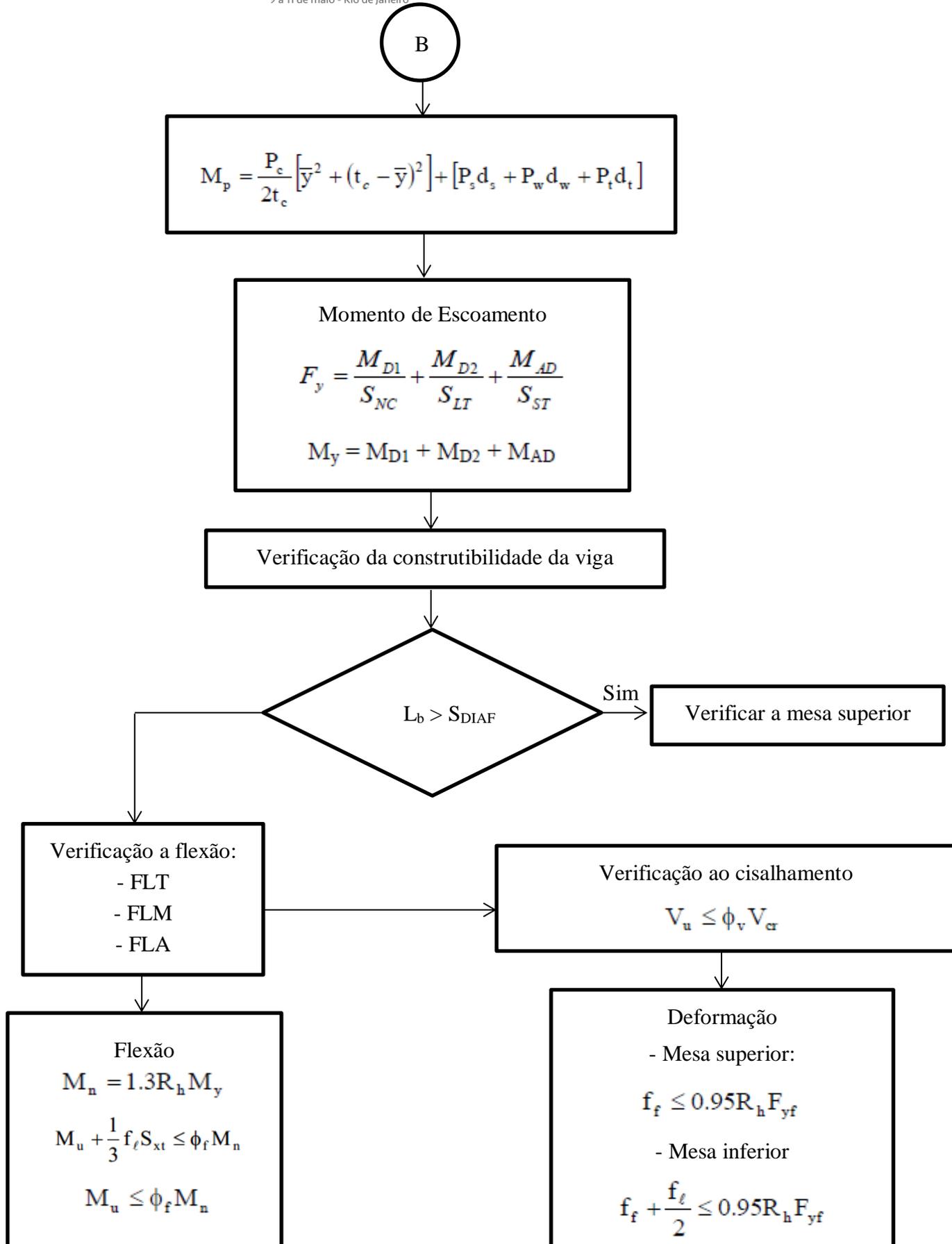


Figura 6 – Seção após a cura do concreto

Fluxograma





Conclusão

O presente trabalho teve o objetivo de aplicar a formulação da norma americana de pontes em vigas mistas, AASHTO 2012, em um modelo de ponte brasileiro. Neste modelo foi utilizada uma seção transversal usual em nossas rodovias, com 12,80m de largura, comprimento de 30m em estrutura isostática, barreiras tipo “New Jersey” nas extremidades e bem como carga móvel de norma TB-450, NBR 7188/2013.

As pontes de vigas múltiplas são amplamente utilizadas com vigas mistas e o grande desafio é utilizar vigas com almas esbeltas. A norma americana apresenta também formulações para análise de perfis esbeltos, não compactos, os quais não foram tratados neste trabalho.

No método de cálculo da AASHTO 2012, esta apresenta também a formulação para determinação da distribuição transversal da carga móvel nas vigas múltiplas, a fim de obtenção dos esforços de flexão e cisalhamento com resultados aceitáveis. Os resultados obtidos através da formulação tais como momentos fletores e esforços cortantes foram utilizados no cálculo de verificação de todos os elementos metálicos da superestrutura da ponte exemplo. A mesoestrutura e infraestrutura da ponte não foram analisados.

Os resultados do cálculo foram satisfatórios e comparados com exemplo semelhante na bibliografia utilizada, para uma estrutura com alma não esbelta de perfil compacto.

Referências

- AASHTO (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- AASHTO/NSBA, (2012). Steel Bridge Design Handbook Design Example 1: Three-Span Continuous Straight Composite Steel I-Girder Bridge, AASHTO/NSBA Steel Bridge Collaboration.
- 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.
- PINHO, O. F. e BELLEI, I. H., (2007). Pontes e Viadutos em Vigas Mistas, Manual de Construção em Aço, IBS/CBCA.
- PFEIL, W., (1990). Pontes em concreto armado. Rio de Janeiro; LTC, Vol 1.