

Dimensionamento de Pontes Rodoviárias em Estrutura Mista de Aço e Concreto de acordo com a NBR 16694:2020.

Bernardo Quinet Barra¹, Rodolfo de Azevedo Palhares², Gabriela Martins Souza Brisola³

Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) / bernardo.quinet@engenharia.ufjf.br

Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) / Estruturas / palhares.rodolfo@engenharia.ufjf.br

Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) / Estruturas / gabriela.brisola@engenharia.ufjf.br

Resumo

É notável a opção cada vez mais recorrente por sistemas estruturais que se mostrem mais produtivos de serem executados, que permitam o melhor desempenho dos materiais, agilidade na montagem e maior facilidade no transporte das peças devido ao peso e comprimento dos elementos estruturais, como pode-se observar na execução de pontes rodoviárias em estrutura mista de aço e concreto. Assim, considerando os preceitos descritos pela ABNT NBR 16694:2020 sobre o projeto de pontes rodoviárias de aço e mistas, objetiva-se, no presente artigo, apresentar os conceitos e procedimentos para o dimensionamento de pontes rodoviárias em estrutura mista de aço e concreto, detalhando-se as características particulares das estruturas mistas aplicadas ao projeto de pontes, além de exibir uma demonstração do dimensionamento por meio de um exemplo de cálculo. Os cálculos são aplicados no dimensionamento de uma ponte biapoiada em estrutura mista composta por 4 vigas retas metálicas, espaçadas em 4,00 m entre si, que sustentam um tabuleiro de concreto armado. A estrutura foi idealizada para vencer um vão livre de 50,00 m e contempla pista de rolamento com 14,00 m de extensão e barreiras rígidas laterais de 0,50 m, totalizando largura de 15,00 m, conforme será apresentado. Desse modo, foi possível avaliar as particularidades envolvidas no modelo de cálculo desse tipo de projeto, o que permite concluir que, embora a ABNT NBR 16694:2020 seja referência indispensável nos projetos de pontes em estruturas mistas de aço e concreto, a norma brasileira ainda possui limitações, como, por exemplo, no que tange às orientações para a consideração dos efeitos provocados pelo fenômeno de retração do concreto e do gradiente de temperatura, sendo necessário recorrer a normas estrangeiras.

Palavras-chave

Pontes Rodoviárias; Estruturas mistas; Dimensionamento; Aço; Concreto; ABNT NBR 16694:2020.

Introdução

Com a constante evolução das técnicas construtivas e modelos de dimensionamento, atualmente, existem diversos tipos de sistemas estruturais utilizados na execução de pontes, cada um com suas particularidades. Entre os mais conhecidos, devem ser citadas as pontes em arco, em treliça, em vigas de alma cheia, em vigas caixão, em balanço sucessivo, as suspensas por cabos (pênseis), as estaiadas e as pontes em vigas retas mistas de aço e concreto. Estas últimas, devido às propriedades do aço e do concreto, quando combinadas, demonstram excelente desempenho em estruturas de pontes (SOUZA, 2012).

Em suma, estruturas mistas são aquelas compostas por materiais com diferentes características mecânicas que interagem entre si. As vigas retas mistas, por sua vez, são constituídas por perfis metálicos interligados a uma laje de concreto, de maneira que a solidarização dos dois materiais é garantida por elementos de ligação, denominados conectores de cisalhamento (PINHO et al., 2007). Tal sistema, norteará o objeto de estudo do presente artigo, que tem por objetivo apresentar, brevemente, as principais particularidades que envolvem o dimensionamento destas pontes, de acordo com as prescrições da ABNT NBR 16694:2020, que é a principal referência bibliográfica para os projetos de pontes rodoviárias em estruturas mistas.

Metodologia de Cálculo

Devido à grande complexidade e ao elevado volume de cálculos que o dimensionamento de uma ponte exige, será apresentado um breve formulário, contendo apenas algumas particularidades que envolvem esse processo para uma ponte em estrutura mista, limitando-se a parte das verificações que abrangem o dimensionamento das longarinas e dos conectores de cisalhamento (dispositivos de ligação das estruturas mistas). De maneira geral, os cálculos que compõem as etapas do dimensionamento devem ser realizados tanto para as fases construtivas, segundo a ABNT NBR 8800:2008, quanto para a fase final, conforme a ABNT NBR 16694:2020, onde já opera como um sistema misto. Isso se deve ao fato de que durante as etapas de transporte, montagem e logo após a montagem as condições de carregamento da estrutura são completamente distintas. As normas citadas descrevem as verificações necessárias em cada etapa, para os estados-limites últimos e de serviço, de acordo com os esforços aos quais cada elemento que compõe a estrutura estarão solicitados.

Conforme exposto acima, para que seja garantido o funcionamento adequado de uma estrutura mista, é necessário utilizar mecanismos de ligação que promovam a interação entre os perfis metálicos e a laje de concreto. De acordo com a ABNT NBR 16694:2020, em pontes não existe a possibilidade de se trabalhar com uma interação parcial entre o aço e o concreto, somente com a interação completa entre os dois materiais, devido aos problemas relacionados às forças de aceleração e frenagem dos veículos.

Para a determinação da resistência da estrutura frente aos diversos esforços solicitantes, como por exemplo os momentos fletores, as normas brasileiras descrevem que as propriedades geométricas da seção mista devem ser obtidas por meio da homogeneização teórica da seção formada pelo componente de aço e a laje de concreto. Neste caso, calcula-se uma largura efetiva da mesa de concreto e define-se a razão modular da seção (α_E), que relaciona os módulos de elasticidade do aço e do concreto. As propriedades dessa seção “transformada” também variam conforme a posição da linha neutra efetiva, que pode estar localizada na viga de aço ou na laje de concreto, e são obtidas para as ações de curta e de longa duração, como descrito nas equações de (1) a (9) da Tabela 1.

A etapa de verificação da estrutura na fase construtiva, como já citado, é calculada conforme a conhecida metodologia prescrita pela ABNT NBR 8800:2008, e por isso não será descrita no decorrer do texto. Na etapa de dimensionamento da estrutura mista, as pontes possuem carregamentos particulares em relação as estruturas mais usuais, pois suportam cargas móveis, provindas dos veículos que nela circulam ao longo de sua vida útil. Para a análise estrutural e consideração destas cargas, devem ser seguidas as orientações da ABNT NBR 7188:2013, norma que descreve detalhadamente como considerar as cargas móveis rodoviárias e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas.

Nessa norma, a carga móvel rodoviária padrão, conhecida como trem-tipo, é representada pelo veículo TB-450, de 450 kN, composto por seis rodas que produzem cargas pontuais $P = 75$ kN. Tal veículo possui três eixos de cargas afastados entre si em 1,5 m, com área de ocupação de 18 m² e é circundado por uma carga uniformemente distribuída constante $p = 5$ kN/m², como mostra a Figura 1, retirada da norma.

Tendo em vista o fato de a carga móvel ser uma carga dinâmica, a estrutura é influenciada de maneira completamente diferente. No entanto, como ela depende da rugosidade do pavimento e na elaboração do projeto não se conhece exatamente qual a rugosidade do futuro pavimento, através de um levantamento estatístico foi desenvolvido um método para considerar seus efeitos. Dessa maneira, foram modelados os coeficientes de impacto de majoração de cargas, que transformam cargas estáticas (p) em cargas móveis (q).

Portanto, os valores característicos de carregamentos do trem-tipo devem ser ponderados pelo coeficiente de impacto vertical (CIV), coeficiente do número de faixas (CNF) e coeficiente de impacto adicional (CIA), sendo este último para as regiões a até 5 m das juntas estruturais e das extremidades. As forças horizontais devido à frenagem e e/ou aceleração (H_f) aplicadas sobre o tabuleiro da ponte são um percentual da carga característica dos veículos aplicados sobre o pavimento, na posição mais desfavorável.

Tais parâmetros, também apresentados detalhadamente pela ABNT NBR 7188:2013, estão explicitados pelos itens de (10) a (13) da Tabela 1.

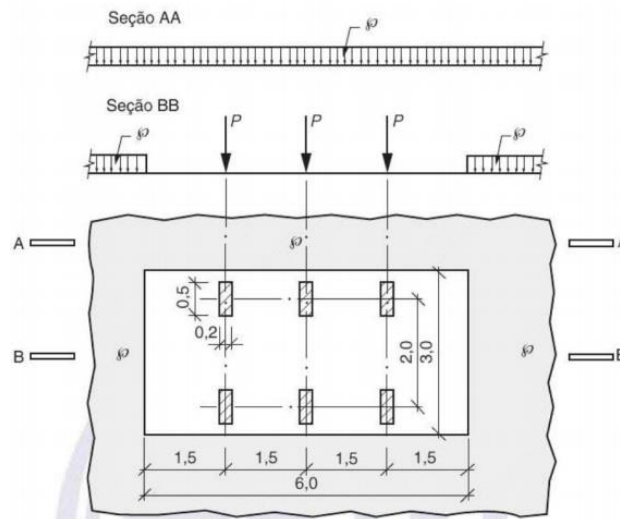


Figura 1 – Disposição das cargas do trem-tipo.

Na verificação quanto aos estados-limites últimos (ELU), as longarinas que compõem a estrutura da ponte devem ser analisadas quanto à resistência ao momento fletor e à força cortante. A verificação quanto à resistência à força cortante é realizada em conformidade com a ABNT NBR 8800:2008, e por isso não será apresentada. Contudo, observa-se a possibilidade de serem necessários de enrijecedores transversais de alma, principalmente para os perfis extremos, solicitados por cortantes de maior grandeza. Por outro lado, na análise quanto à resistência ao momento fletor solicitante, existem certas particularidades a serem consideradas. Em se tratando de uma seção mista, deve-se analisar de maneira separada as tensões que atuam nas faces superiores e inferiores, tanto do concreto como do perfil de aço. As tensões atuantes na face inferior do concreto e na face superior do aço não serão calculadas, visto que não são críticas para a seção. Diferentemente da verificação quanto à força cortante, o cálculo dessas tensões é realizado considerando as propriedades da seção mista, conforme exemplificado pelas equações (14) e (15) da Tabela 1.

Em consonância com as prescrições da ABNT NBR 16694:2020, que norteia o presente artigo, as combinações últimas de ações para as seções sujeitas à flexão devem considerar as ações permanentes totais, as ações acidentais e as cargas devidas ao tráfego dos veículos, com seus respectivos coeficientes de ponderação. Como a norma não contempla orientações detalhadas quanto aos efeitos de retração do concreto e do gradiente de temperatura, recorre-se às normas estrangeiras para considerar as tensões provocadas por tais efeitos na combinação das ações para o cálculo.

Dessa maneira, conforme descreve a norma alemã DIN EN 1993-1-11/NA, deve-se seguir o procedimento de homogeneização da seção mista. Para obtenção dos efeitos provenientes da retração do concreto, calcula-se o coeficiente de homogeneização para retração (α_r), através da relação entre as deformações plásticas e elásticas ($\varphi_n = 2,0$) e da deformação devido à retração (ε_r), de 2,5‰. Já para o caso das variações de temperatura na seção mista, considera-se o fator de homogeneização para ações de curta duração. Também utiliza-se nos cálculos o coeficiente de dilatação térmica do aço e do concreto (α), da ordem de $1,2 \cdot 10^{-5}$, e as variações de temperatura são analisadas para variações de $\pm 15^\circ\text{C}$. As equações utilizadas para o cálculo das tensões, em função dos parâmetros descritos, estão apresentadas de (16) a (24) na Tabela 1, onde as dimensões a_c e a_a podem ser obtidas geometricamente através da Figura 2 e S_a , S_c e S_m são, respectivamente, as áreas de aço, concreto e da seção mista.



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

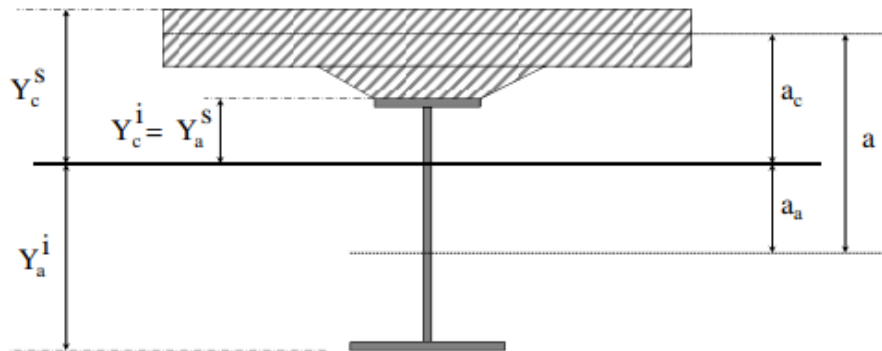


Figura 2 – Desenho esquemático de dimensões da seção mista.

Para seções semi-esbeltas e construções não escoradas, como é o caso do exemplo de cálculo que será apresentado, deve-se verificar a tensão na mesa inferior da viga de aço de acordo com a relação apresentada em (25), na Tabela 1, onde $M_{G,Sd}$ é o momento solicitante devido às ações aplicadas antes da cura do concreto e $M_{L,Sd}$ é o momento solicitante devido às ações aplicadas após a cura do concreto, sendo esse último para as ações de curta e longa duração.

De maneira a prosseguir com o cálculo das particularidades do dimensionamento de estruturas em vigas mistas, deve-se determinar o número de conectores de cisalhamento, bem como os espaçamentos necessários entre eles. Para isso, pelas equações (26) e (29) da Tabela 1 determina-se o número mínimo de conectores para meia viga, e por (27) e (28) verifica-se se as dimensões adotadas para o conector estão de acordo com os limites estabelecidos por norma. No exemplo que será apresentado foram utilizados conectores do tipo pino com cabeça (“stud bolts”) e, por isso, tais equações de verificação de dimensões são para este caso específico. Os espaçamentos longitudinais mínimos (e_{min}), máximos (e_{max}) e transversal mínimo ($e_{t,min}$) entre os conectores são calculados através dos itens (30) a (32) da Tabela 1.

Levando em consideração que, por se tratarem de perfis de grandes dimensões, a maioria das pontes são compostas por perfis soldados, como é o caso do exemplo a seguir, devem ser analisados os efeitos de fadiga na estrutura. O fenômeno é comum em estruturas de aço soldadas, pois no processo de solda é inevitável a introdução de tensões residuais e microfissuras adjacentes ao cordão de solda, fazendo com que as ligações e conexões soldadas sejam pontos potenciais para apresentar fadiga (LEITÃO et al., 2013). Dessa maneira, devem ser verificados diversos detalhes e elementos construtivos quanto aos parâmetros de fadiga, como indica a Tabela A.1 do anexo A da ABNT NBR 16694:2020.

Para efeito de demonstração, será apresentada a verificação dos conectores de cisalhamento aos efeitos de fadiga, onde calcula-se o limite admissível para a faixa de variação de tensões (σ_{SR}) e compara-se com o limiar (σ_{TH}), tabelado no anexo. No caso específico da verificação para os conectores pode-se determinar a força resistente do pino à fadiga (Z_R) e a força de cisalhamento solicitante de cálculo ($V_{d,fad}$), que possibilita obter a variação do fluxo de cisalhamento horizontal (f_R). Através da relação entre a força resistente e o fluxo de cisalhamento obtém-se o espaçamento necessário (e) entre conectores para a verificação da resistência à fadiga. As equações da sequência de cálculos descritos correspondem às listadas de (33) a (37) na Tabela 1.

Os cálculos e verificações para o dimensionamento da ponte, para efeitos de demonstração, se limitarão aos apresentados ao longo da metodologia de cálculo. Ressalta-se que as etapas não apresentadas são de extrema importância, porém muitas não foram descritas por não apresentarem distinções quanto aos métodos usuais de cálculo, como por exemplo: a) o dimensionamento do tabuleiro de concreto, dimensionado como uma laje unidirecional conforme as prescrições da ABNT NBR 6118:2014; b) as verificações das ligações parafusadas e dimensionamento de banzos e diagonais da ponte, que seguem as recomendações da ABNT NBR 8800:2008; c) as verificações quanto ao estado-limite de serviço (ELS), entre outras.



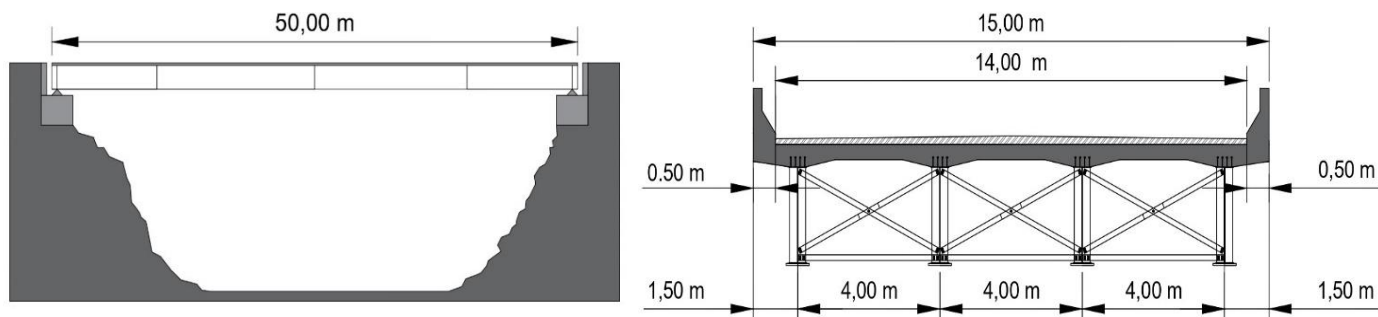
XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Tabela 1 – Formulário.

| | | | |
|--|--|--|--|
| $b < \begin{cases} 1/8 \text{ do vão da viga} \\ 1/2 \text{ da distância entre linhas de centro de vigas} \\ \text{distância da linha de centro da viga à borda de uma laje em balanço} \end{cases} \quad (1)$ | | $\alpha_E = E/Ec \text{ (curta duração)} \quad (2)$ | |
| | | $\alpha_E = 3E/Ec \text{ (longa duração)} \quad (3)$ | |
| $b_{tr} = b/\alpha_E \quad (4)$ | $y_{tr} = \frac{A_a \cdot y_a + A_c' \cdot (d + h_f + t_c/2)}{A_a + A_c'} \quad (5)$ | $W_{tr,i} = I_{tr}/y_{tr} \quad (7)$ | $W_{tr,s} = \frac{I_{tr}}{(d + h_f + t_c) \cdot y_{tr}} \quad (8)$ |
| Para LNE na viga de aço: | | $F_{hRd} < \begin{cases} C_d = \frac{0,85 \cdot f_{ck} \cdot b \cdot t_c}{1,40} \\ T_d = \frac{A \cdot f_y}{1,10} \end{cases} \quad (9)$ | |
| $I_{tr} = I_a + A_a \cdot (y_{tr} - y_a)^2 + \frac{b_{tr} \cdot t_c^3}{12} + A_c' \cdot \left(d + h_f + \frac{t_c}{2} - y_{tr}\right)^2 \quad (6)$ | | $CIV = \begin{cases} 1,35, \text{ para estruturas com vão menor do que } 10,0 \text{ m} \\ 1 + 1,06 \cdot \left(\frac{20}{Liv+50}\right), \text{ onde } Liv \text{ é o vão, em metros} \end{cases} \quad (10)$ | |
| $CIA = \begin{cases} 1,25, \text{ para obras em concreto ou mistas} \\ 1,15, \text{ para obras em aço} \end{cases} \quad (12)$ | | $H_f = 0,25 \cdot B \cdot L \cdot CNF \geq 135 \text{ kN}$ onde B é a largura efetiva da carga distribuída (em metros) e L o seu comprimento (13) | |
| $f_{dc} = \frac{M_{sd}}{\alpha_E \cdot (W_{tr})_s} \leq 0,85 f_{cd} \quad (14)$ | $f_{dt} = \frac{M_{sd}}{(W_{tr})_i} \leq f_{yd} \quad (15)$ | $\alpha_r = \alpha_{E,cd} (1 + 0,52 \varphi_n) \quad (16)$ | |
| $\sigma_C^S = +\varepsilon_r \cdot E_a \cdot \frac{S_a}{\alpha_r \cdot S_m(\alpha_r)} \cdot \left[1 - \frac{S_m(\alpha_r) \cdot a_a(\alpha_r)}{W_C^S(\alpha_r)}\right] \quad (17)$ | $\sigma_C^j = +\varepsilon_r \cdot E_a \cdot \frac{S_a}{\alpha_r \cdot S_m(\alpha_r)} \cdot \left[1 - \frac{S_m(\alpha_r) \cdot a_a(\alpha_r)}{W_C^j(\alpha_r)}\right] \quad (18)$ | | |
| $\sigma_a^S = -\varepsilon_r \cdot E_a \cdot \frac{S_c}{\alpha_r \cdot S_m(\alpha_r)} \cdot \left[1 + \frac{S_m(\alpha_r) \cdot a_c(\alpha_r)}{W_a^S(\alpha_r)}\right] \quad (19)$ | $\sigma_a^j = -\varepsilon_r \cdot E_a \cdot \frac{S_c}{\alpha_r \cdot S_m(\alpha_r)} \cdot \left[1 + \frac{S_m(\alpha_r) \cdot a_c(\alpha_r)}{W_a^j(\alpha_r)}\right] \quad (20)$ | | |
| $\sigma_C^S = \pm \alpha \cdot \Delta_t \cdot E_a \cdot \frac{S_a}{\alpha_{E,cd} \cdot S_m(\alpha_{E,cd})} \cdot \left[1 - \frac{S_m(\alpha_{E,cd}) \cdot a_a(\alpha_{E,cd})}{W_C^S(\alpha_{E,cd})}\right] \quad (21)$ | | | |
| $\sigma_C^j = \pm \alpha \cdot \Delta_t \cdot E_a \cdot \frac{S_a}{\alpha_{E,cd} \cdot S_m(\alpha_{E,cd})} \cdot \left[1 - \frac{S_m(\alpha_{E,cd}) \cdot a_a(\alpha_{E,cd})}{W_C^j(\alpha_{E,cd})}\right] \quad (22)$ | | | |
| $\sigma_a^S = \pm \alpha \cdot \Delta_t \cdot E_a \cdot \frac{S_c}{\alpha_{E,cd} \cdot S_m(\alpha_{E,cd})} \cdot \left[1 + \frac{S_m(\alpha_{E,cd}) \cdot a_c(\alpha_{E,cd})}{W_a^S(\alpha_{E,cd})}\right] \quad (23)$ | | | |
| $\sigma_a^j = \pm \alpha \cdot \Delta_t \cdot E_a \cdot \frac{S_c}{\alpha_{E,cd} \cdot S_m(\alpha_{E,cd})} \cdot \left[1 + \frac{S_m(\alpha_{E,cd}) \cdot a_c(\alpha_{E,cd})}{W_a^j(\alpha_{E,cd})}\right] \quad (24)$ | | | |
| $\frac{M_{G,sd}}{W_a} + \frac{M_{L,sd}}{W_{tr}} \leq f_{yd} \quad (25)$ | $n \geq F_{hRd}/Q_{Rd} \quad (26)$ | $h_s/d_s \geq 4 \quad (27)$ | $d_s \leq 2 \cdot t_s \quad (28)$ |
| $Q_{Rd} < \begin{cases} \frac{1}{2} \cdot \frac{A_{cs} \sqrt{f_{ck} \cdot E_c}}{\gamma_{cs}} \\ \frac{A_{cs} \cdot f_{u,cs}}{\gamma_{cs}} \end{cases}, \text{ onde } \gamma_{cs} = 1,25 \quad (29)$ | | $e_{t,min} = 2,5 \cdot d_s \quad (30)$ | $Z_R = \sigma_{SR} \cdot d^2 \quad (34)$ |
| | | $e_{min} = 6 \cdot d_s \quad (31)$ | $V_{d,fad} = \Psi_{1,fad}(Q_{TT}) \quad (35)$ |
| | | $e_{max} = 8 \cdot t_c \quad (32)$ | $f_R = \frac{V_{d,fad} \cdot A_c \cdot a_c}{\alpha_{E,cd} \cdot I_{tr,cd}} \quad (36)$ |
| $\sigma_{SR} = 238 - 29,5 \cdot \log(N), \text{ onde } N = n^o \text{ de ciclos em } 75 \text{ anos} = 2 \cdot 10^6 \quad (33)$ | | | $e = Z_R/f_R \quad (37)$ |

Exemplo de Aplicação

A aplicação dos cálculos, conforme a metodologia apresentada, será aplicada no dimensionamento de uma ponte bi apoiada em estrutura mista composta por 4 vigas retas metálicas, espaçadas em 4,00 m entre si, que sustentam um tabuleiro de concreto armado. A estrutura deve vencer um vão livre de 50,00 m e possui pista de rolamento com 14,00 m de largura e barreiras rígidas laterais de 0,50 m, conforme exposto na Figura 3. O aço que constitui os perfis é o ASTM A572 e o concreto possui f_{ck} de 30 MPa. Tendo em vista o extenso comprimento das vigas, elas possuirão emendas e serão divididas em 4 perfis, de modo que os perfis centrais possuam 15,00 m de comprimento e os perfis extremos 10,00 m. O tabuleiro de concreto armado tem 22,5 cm de espessura média e nas regiões onde é ligado às longarinas existem mísulas, também em concreto armado, de 7,5 cm de espessura. O pavimento, em concreto asfáltico, possui espessura média de 12,5 cm, e as barreiras rígidas, em concreto armado, têm 0,32 m² de área de seção transversal.



a) Seção Longitudinal.

b) Seção Transversal.

Figura 3 – Ponte rodoviária em estrutura mista de aço e concreto.

Considerando as dimensões idealizadas e as características dos materiais que compõem a estrutura, pode-se encontrar os carregamentos que atuam sobre a ponte. Utilizando-se da geometria apresentada e os pesos próprios dos materiais, expostos pela ABNT NBR 16694:2020, obteve-se as seguintes cargas atuantes, descritas pela Tabela 2.

Tabela 2 – Cargas que atuam na estrutura.

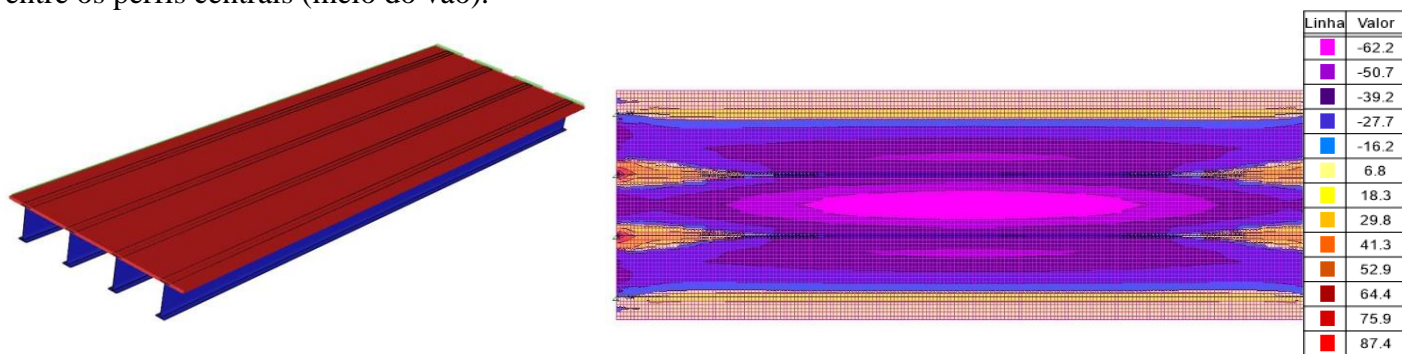
| Cargas Atuantes | | | | |
|---|-------|-------------------------------------|------------------------|----|
| Antes da cura (vigas de aço) | | Após a cura (vigas mistas) | | |
| Laje de CA (kN/m ²) | 5,625 | Barreira Rígida (kN/m) | 8 | |
| Estrutura Metálica (kN/m ²) | 2,10 | Rev. Asfáltico (kN/m ²) | 2,25 | |
| Escoramento (kN/m ²) | 0,20 | Trem-Tipo | P (kN) | 75 |
| Sobrecarga (kN/m ²) | 1,00 | | p (kN/m ²) | 5 |

O carregamento decorrente do trem-tipo, como visto na metodologia de cálculo, deve ser majorado pelos coeficientes de amplificação dinâmica. Dessa maneira, após efetuar os cálculos, são encontrados os resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficientes de amplificação e cargas móveis resultantes.

| Coeficientes de Amplificação Dinâmica | | | | | |
|--|-------------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------------------|---------|
| Coeficiente de Impacto Vertical | | Coeficiente do Número de Faixas | | Coeficiente de Impacto Adicional | |
| CIV | 1,21 | CNF | 1,00 | CIA | 1,25 |
| Forças Horizontais de Frenagem e Aceleração: | | | | | Hf (kN) |
| | | | | | 187,5 |
| Carga Móvel Majorada: | Geral | | Aproximação | | |
| | Qg (kN) | 91 | Q5 (kN) | 113,75 | |
| | qg (kN/m ²) | 6,1 | q5 (kN/m ²) | 7,63 | |

Visando obter os esforços gerados pelos carregamentos calculados, recorreu-se ao Método dos Elementos Finitos (MEF), onde a estrutura foi discretizada em elementos de casca e de barra, formando uma malha de elementos finitos. Os resultados foram obtidos a partir do programa STRAP, que dispõe de avançados recursos para a elaboração de diversos modelos, como um módulo específico para a análise estrutural de pontes, utilizado para o exemplo em questão. Tal tecnologia permite visualizar as situações mais críticas geradas pelo trem-tipo, através de simulações do veículo transitando sobre a ponte. A Figura 4 a) apresenta uma renderização do modelo desenvolvido, já a Figura 4 b) apresenta um exemplo de mapa de contorno gerado pelo software, no caso, para os momentos máximos provocados pelo trem-tipo. Os resultados obtidos para cada carregamento são resumidos pela Tabela 4, e as seções analisadas 1, 2 e 3 se referem, respectivamente, à extremidade das longarinas, à emenda do perfil extremo com o perfil central e à emenda entre os perfis centrais (meio do vão).



a) Modelo renderizado.

b) Mapa de contorno dos momentos máximos devido ao trem-tipo (valores em kNm/m).

Figura 4 – Interface do programa de análise estrutural por MEF.

Tabela 4 – Resumo dos esforços nas seções das vigas laterais e internas.

| Viga de Borda | | | | |
|---------------|--------------|----------------|-----------------|-----------|
| Esforços | Peso Próprio | Rev. Asfáltico | Barreira Rígida | Trem-Tipo |
| M2 (kNm) | 5671 | 1639 | 1068 | 5658 |
| M3 (kNm) | 8883 | 2572 | 1553 | 8817 |
| Q1 (kN) | 603 | 174 | 134 | 781 |
| Q2 (kN) | 371 | 108 | 61 | 428 |
| Q3 (kN) | 0 | 0 | 0 | 188 |
| Viga Interna | | | | |
| Esforços | Peso Próprio | Rev. Asfáltico | Barreira Rígida | Trem-Tipo |
| M2 (kNm) | 5893 | 1729 | 304 | 5661 |
| M3 (kNm) | 9163 | 2685 | 589 | 8446 |
| Q1 (kN) | 639 | 188 | 13 | 859 |
| Q2 (kN) | 380 | 112 | 29 | 427 |
| Q3 (kN) | 0 | 0 | 0 | 216 |

Para efeitos demonstrativos, escolheu-se o perfil central da viga interna para mostrar os resultados das verificações propostas pela metodologia de cálculo. Para esse perfil, conforme os métodos de pré-dimensionamento normatizados, propôs-se um perfil soldado similar aos da série VS, porém com espessuras e larguras diferentes entre a mesa superior e inferior. Para sistemas mistos com emendas, a bibliografia



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

recomenda a utilização de perfis centrais e extremos com mesas de mesma espessura e variação na largura, ou mesma largura e variação de espessura (PINHO et al., 2007). Dito isso, o perfil selecionado possui 240 cm de altura (d), mesa superior com 55 cm de largura (b_s) e 2,50 cm de espessura (t_s), mesa inferior com 70 cm de largura (b_i) e 5 cm de espessura (t_i) e alma de 1,9 cm de espessura (t_w). De posse das características do perfil, obteve-se as propriedades geométricas da seção mista, para ações de curta e longa duração, como revela a Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades geométricas da seção mista.

| Vigas Internas - Perfis Centrais | | | | | | | |
|--------------------------------------|------------|-------------|----------|--------------------|----------------|------------------|------------------|
| Largura efetiva da mesa de concreto: | | | b (m) | Posição da LN: | Cd (kN) | Td (kN) | FhRd (kN) |
| | | | 4,00 | | 16392,86 | 29144,66 | 16392,86 |
| Ações de Curta Duração | α_E | btr,cd (cm) | ytr (cm) | LNE na viga de aço | $I_{tr}(cm)^4$ | $W_{tr,i}(cm^3)$ | $W_{tr,s}(cm^3)$ |
| | 8 | 50,00 | 184,18 | | 22005516,60 | 119476,01 | 256425,40 |
| Ações de Longa Duração | α_E | btr,ld (cm) | ytr (cm) | LNE na viga de aço | $I_{tr}(cm)^4$ | $W_{tr,i}(cm^3)$ | $W_{tr,s}(cm^3)$ |
| | 23 | 17,39 | 142,75 | | 15628566,72 | 109478,49 | 122822,33 |

Para o cálculo das tensões geradas pelos efeitos de retração do concreto e variação de temperatura, basta seguir o breve roteiro indicado na metodologia, de modo a analisar as dimensões da seção mista geometricamente e aplicar as equações correspondentes. Os resultados são explicitados na Tabela 6, a seguir.

Tabela 6 – Resultados dos efeitos de retração e gradiente de temperatura.

| Retração | | | | | | | | |
|--------------------------|----------------------------|-------------|-----------|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| α_r | ϵ_r | btr,cd (cm) | ytr (cm) | LNE na viga de aço | $I_{tr}(cm)^4$ | $W_{tr,i}(cm^3)$ | $W_{tr,s}(cm^3)$ | $A_{aço}(cm^2)$ |
| 16,32 | 0,25 | 24,51 | 155,30 | | 17557243 | 113053 | 153073 | 929 |
| $A_{conc}(cm^2)$ | $A_{mista,\alpha_p}(cm^2)$ | $Y_c^s(cm)$ | $a_c(cm)$ | $a_a(cm)$ | $\sigma_c^s(kN/cm^2)$ | $\sigma_c^i(kN/cm^2)$ | $\sigma_a^s(kN/cm^2)$ | $\sigma_a^i(kN/cm^2)$ |
| 9000 | 1480,72 | 114,70 | 103,45 | 61,39 | 0,00 | 0,04 | -2,68 | -0,36 |
| Gradiente de Temperatura | | | | | | | | |
| α | $\Delta t(^\circ C)$ | btr,cd (cm) | ytr (cm) | LNE na viga de aço | $I_{tr}(cm)^4$ | $W_{tr,i}(cm^3)$ | $W_{tr,s}(cm^3)$ | $A_{aço}(cm^2)$ |
| 0,000012 | 15 | 50 | 184,18 | | 22005517 | 119476 | 256425 | 929,25 |
| $A_{conc}(cm^2)$ | $A_{mista,\alpha_p}(cm^2)$ | $Y_c^s(cm)$ | $a_c(cm)$ | $a_a(cm)$ | $\sigma_c^s(kN/cm^2)$ | $\sigma_c^i(kN/cm^2)$ | $\sigma_a^s(kN/cm^2)$ | $\sigma_a^i(kN/cm^2)$ |
| 9000 | 2054,25 | 85,82 | 74,57 | 90,27 | 0,06 | 0,09 | 2,74 | 0,56 |

Ao prosseguir com o dimensionamento, verifica-se a resistência ao momento fletor. Utilizando os coeficientes de ponderação e fatores de combinação para cada material, conforme detalha a ABNT NBR 16694:2020, e as equações descritas na metodologia de cálculo, encontra-se os resultados da Tabela 7. Na mesma tabela também se encontram os resultados da verificação quanto à tensão na mesa inferior da viga de aço, também de acordo com os coeficientes e fatores estabelecidos pela norma. Analisando-se os resultados e os comparando com os valores limites, observa-se que a verificação da segurança estrutural quanto ao ELU para o momento fletor está atendida, assim como a tensão na mesa inferior da viga.



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

Tabela 7 – Verificação do ELU de resistência à flexão e tensão na mesa inferior do perfil.

| Viga Interna - Perfil Central | | | |
|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|--|
| fdc (kN/cm ²) | 0,85fdc (kN/cm ²) | fdt (kN/cm ²) | fyd (kN/cm ²) |
| 1,24 | 1,82 | 26,52 | 31,36 |
| $M_{G,sd} (kNm)$ | $M_{L,sd}^{LD} (kNm)$ | $M_{L,sd}^{CD} (kNm)$ | $\frac{M_{G,sd}}{W_a} + \frac{M_{L,sd}}{W_{tr}}$ |
| 12157,47 | 4390,45 | 12669,00 | 28,66 |

Por fim, determinou-se o número e as características dos conectores de cisalhamento, seguindo as recomendações da ABNT NBR 16694:2020 e ABNT NBR 8800:2008 em todos os procedimentos que seguem. Foram escolhidos conectores cujas dimensões e propriedades do aço que os compõem foram descritas e verificadas na Tabela 8. Em seguida, obteve-se a resistência dos conectores, que no caso, corresponde ao ELU de esmagamento do concreto. Desse modo, foi possível calcular o número necessário de conectores para meia viga, certificando-se de que os espaçamentos estão dentro dos limites. Considerando que o espaçamento encontrado não é usual, por ser muito pequeno, adotou-se uma distribuição de 3 linhas de conectores, ou seja, 3 stud-bolts por seção, garantindo-se que os novos espaçamentos continuariam dentro dos limites. Os resultados descritos se encontram na Tabela 9.

O cálculo dos parâmetros para a verificação dos conectores à fadiga, conforme detalha a Tabela 10, resulta em espaçamento superior ao adotado anteriormente. Visando estar a favor da segurança, manteve-se o espaçamento antes encontrado, obtendo-se, ao final, 27 linhas de 3 conectores espaçados em 57 cm entre si.

Tabela 8 – Características dos conectores.

| Propriedades Geométricas dos Conectores | | | | | | | |
|---|---------|------------------------|-----------|--------------------------|--------------------------|-------|------------|
| ds (cm) | hs (cm) | Asc (cm ²) | Aço | fy (kN/cm ²) | fu (kN/cm ²) | hs/ds | 2,5ts (cm) |
| 2,2 | 15 | 3,80 | ASTM A108 | 34,5 | 41,5 | 6,82 | 6,25 |

Tabela 9 – Resistência, espaçamento e quantidade de conectores.

| Resistência dos conectores | | | | |
|----------------------------------|------------|---------------------------------|------------|--------------|
| ELU de Cisalhamento do Conector: | QRd1 (kN) | ELU de Esmagamento do Concreto: | QRd2 (kN) | QRd (kN) |
| | 134,47 | | 126,20 | 126,20 |
| Nº de conectores para meia viga: | | | | |
| Vigas Centrais | | | | |
| et,min (mm) | | emin (mm) | | emax (mm) |
| 55 | | 132 | | 1800 |
| n | ecalc (mm) | Nadotado: | eadot (mm) | et,adot (mm) |
| 130 | 193 | 44 | 569 | 150 |

Tabela 10 – Resultados para a verificação dos conectores à fadiga.

| Verificação dos Conectores à Fadiga | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|---------------------|--------------------------|----------------|-------------------------|------------------------|--------|--------------------------|----|--------|----|
| Viga Interna - Entre Q2 e Q3 | | | | | | | | | | |
| N (75 anos) | σ_{sr} (MPa) | Z _R (kN/stud) | $\psi_{1,fad}$ | V _{d,fad} (kN) | f _R (kN/cm) | e (cm) | Para 3 conectores/linha: | | | |
| 2,00E+06 | 52,12 | 25,23 | 0,5 | 213,5 | 0,81 | 30,99 | e (cm) | 57 | linhas | 27 |

Considerações Finais

A partir do exemplo prático apresentado, foi possível demonstrar a aplicação de diversas particularidades que o roteiro de dimensionamento de uma ponte em vigas retas mistas de aço e concreto engloba. Entretanto, vale frisar que os cálculos e verificações expostos ao longo do texto representam apenas uma pequena parcela do roteiro, limitando-se à apenas algumas especificidades do dimensionamento.

Das etapas que não foram contempladas no decurso do artigo, além das já citadas ao final da metodologia de cálculo, deve-se enfatizar a importância do dimensionamento dos aparelhos de apoio, responsáveis pela ligação entre as vigas e os elementos de suporte nas extremidades do vão, de modo a assegurar uma distribuição de cargas uniforme entre os elementos estruturais.

Os aparelhos de apoio podem ser constituídos por diversos tipos de materiais e são projetados para o tipo e a magnitude das cargas que recebem. Na maioria dos casos, são constituídos por materiais metálicos e elastoméricos, e vários deles são catalogados pelos fabricantes, que informam suas dimensões, seus valores admissíveis de deslocamento e a carga que suportam (VIEIRA, 2013). É de extrema importância destacar que, no cálculo desses aparelhos, são considerados os carregamentos horizontais devido aos efeitos do vento e de aceleração e frenagem dos veículos, o que é indispensável para o dimensionamento de estruturas de grande porte. Destarte, sugere-se como conteúdo para trabalhos futuros e de continuidade a este, dar ênfase na temática que abrange os aparelhos de apoio de pontes rodoviárias em estrutura mistas.

Ademais, como visto no decorrer do trabalho, recorreu-se ao uso de uma norma estrangeira. Contudo, ressalta-se que a ABNT NBR 16694:2020, ainda que seja uma norma recente, é referência indispensável para o dimensionamento de pontes em estruturas mistas de aço e concreto. O presente trabalho busca colaborar com a literatura na produção de exemplos práticos, de modo a acrescentar e promover a discussão sobre possíveis aprimoramentos de pontos específicos nas normas técnicas brasileiras.

Por fim, vale destacar que o exemplo de cálculo da ponte em vigas mistas demonstra a possibilidade de se vencer vãos maiores, se comparado às obras em vigas de concreto protendido, por exemplo, que é um sistema estrutural comumente utilizado no país em obras de pontes.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 16694: Projeto de Pontes Rodoviárias de Aço e Mistas de Aço e Concreto, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 8800: Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7188: Carga Móvel Rodoviária e de Pedestres em Pontes, Viadutos, Passarelas e outras Estruturas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.
- DEUTCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN), National Annex - Nationally determined parameters - Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-11: Design of structures with tension components, Berlin, 2010.
- LEITÃO F. N. e SILVA I. A. R., Análise de Fadiga de Pontes Rodoviárias Mistas (Aço-Concreto) Submetidas ao Tráfego de Veículos. Dissertação de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.
- PINHO, F. O. e BELLEI, I. H., Pontes e Viadutos em Vigas Mistas, Instituto Brasileiro de Siderurgia e Centro Brasileiro da Construção em Aço. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- SOUZA, V. J. L., Contribuição ao Projeto e Dimensionamento da Superestrutura de Pontes Rodoviárias em Vigas Mistas de Aço e Concreto. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil, 2012.
- VIEIRA, M. I. C., Tipologia, Instalação, Funcionamento e Manutenção dos Diversos Tipos de Aparelhos de Apoio em Obras de Arte. Trabalho Final para a Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2013.