



XIV Congresso Brasileiro
de Pontes e Estruturas

Avaliação das Regras para Dimensionamento de Almas e Flanges de Estruturas de Pontes de Concreto

Jéssica Lopes Marques¹, Benjamin Ernani Diaz²

¹ Dep. Estruturas, Beton Stahl / jessicalopes@poli.ufrj.br

² Dep. Estruturas, SEBED / ernani.diaz@outlook.com

Resumo

Este trabalho é baseado no estudo sobre a validade das regras apresentadas no projeto de revisão da norma NBR 7187 para o dimensionamento de almas e flanges de pontes de concreto armado. Para isso, foi realizada uma comparação numérica entre a proposta da norma e a Teoria da Placa Fissurada (TPF), preconizado pelo CEB-FIP (1982). A TPF separa a espessura das placas em duas chapas secundárias superior e inferior, com esforços definidos somente no seu plano médio, sem momentos. Os estudos da TPF foram feitos por meio de planilha Excel utilizando um exemplo de ponte típica. Em normas europeias, as armaduras transversais de almas e de lajes de pontes são determinadas pela TPF, o que resultaria em volumes de estribos e de armaduras de costura mais elevados do que as prescrições normativas brasileiras. Portanto, foi proposto reduzir o fluxo crítico no dimensionamento, para levar em conta as reduções de armadura transversal causadas pela força cortante V_c nas verificações de estribos das almas e da armadura de costura nos flanges comprimidos. Verificou-se que, no dimensionamento da alma, à proporção que o momento transversal aumenta, o ramo do estribo necessário aumenta no lado tracionado e diminui no lado comprimido. Além disso, com a consideração das tensões verticais de compressão na seção superior da alma (causadas pelo peso próprio e cargas móveis), a armadura de estribos é reduzida uniformemente. A proposta da norma NBR 7187 não apresenta comentários sobre as forças axiais unitárias solicitantes no sentido vertical das almas. No caso do flange comprimido, os dimensionamentos mostraram que as armaduras de costura precisam levar em conta os momentos transversais e que a armadura superior de costura precisa ser maior do que a inferior no caso em estudo. Para os flanges tracionados, o dimensionamento pela TPF indica armaduras diferentes nas duas faces dos flanges.

Palavras-chave

Cisalhamento. Dimensionamento. Placa fissurada. Almas e flanges. Pontes.

Introdução

Este artigo é baseado no estudo sobre a validade das regras apresentadas na norma NBR 7187: Projeto de pontes, viadutos e passarelas de concreto – Procedimento em 2021 durante o seu processo de revisão, para o dimensionamento de almas e flanges de pontes de concreto armado.

A comparação numérica entre propostas da norma NBR 7187 e a avaliação feita aqui é baseada na Teoria da Placa Fissurada (TPF). Esta teoria foi apresentada inicialmente por Nielsen M. P. (1964) e readaptada por Baumann T. (1972). Em sequência, diversos estudos foram publicados, tais como: Leonhardt F. e Mönning E. (1975), CEB - FIP (1982) e Schulz M. (1988). E por fim, as regras sobre dimensionamento de placas foram apresentadas na norma europeia EN 1992-2: 2005 nos seus anexos LL e MM.

Atualmente, programas importantes de análise e de dimensionamento de estruturas, tais como o SAP2000, adotam estes procedimentos no seu dimensionamento de placas de concreto.

Busca-se por meio deste trabalho evidenciar as diferenças entre os critérios normativos comparando-os com um método mais sofisticado de dimensionamento, usando para isso a formulação da placa

fissurada baseada no trabalho de Theodor Baumann e de outros pesquisadores. A sua principal finalidade é contribuir na redução das diferenças significativas entre as metodologias normativas nacionais, buscando garantir uma maior segurança estrutural no projeto das obras de arte especiais. É utilizada uma planilha Excel, com as regras de dimensionamento definidas pelo CEB-FIP (CEB-FIP, 1982), designada por VeriCasca. Entretanto, estas regras não atendem as regras usuais de dimensionamento de almas de estruturas de concreto armado em que se considera que uma parte da força cortante é absorvida pelo concreto (V_c) determinada em função da tensão resistente à tração do concreto, conforme a NBR 6118: Estruturas de concreto armado – Procedimento (ABNT, 2014). Consideração similar é considerada no dimensionamento da armadura de costura de flanges comprimidos. Ou seja, o dimensionamento baseado na TPF de almas e de flanges comprimidos não é econômico por não levar em conta o V_c .

A intenção principal deste estudo é tentar adaptar as regras da TPF de modo a atender às normas tradicionais de dimensionamento de almas de estruturas com a consideração do V_c . A consideração de V_c é importante pois são pertinentes a normas importantes tais como as internacionais da FIB, as americanas da ACI e da AASHTO e as brasileiras.

Já as normas europeias curiosamente não consideram a parcela V_c . Este fato permite o uso do dimensionamento com base na TPF sem restrições. Em vista deste fato, itens da importante norma europeia EN 1992-2 não podem ser aplicadas diretamente.

É importante fazer a distinção entre os elementos de placas que possuem a atuação de forças axiais, momentos fletores e forças transversais e os elementos de chapas que possuem somente a atuação de forças no plano médio.

Análise Efetuada pelo Programa de Análise Estrutural

A análise estrutural é efetuada com um modelo da ponte de concreto armado de cunho acadêmico. O modelo está mostrado nas Figuras 1, 2 e 3. O programa de análise utilizado é o SAP2000. O modelo não considera a geometria correta dos planos médios das placas.

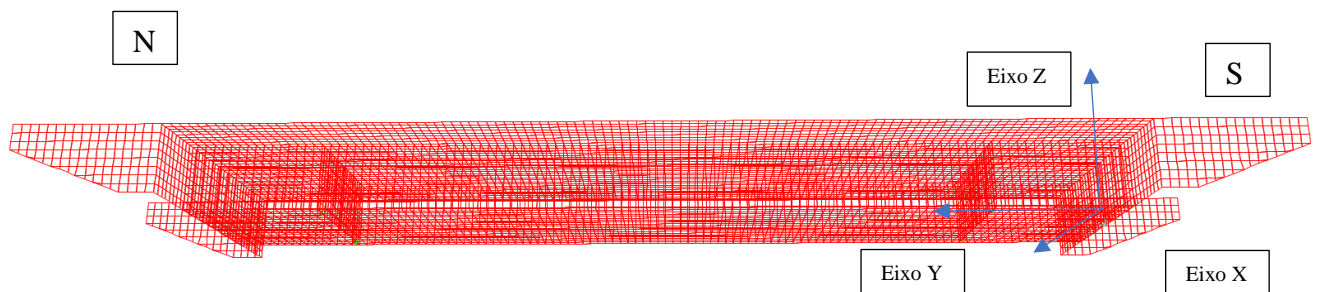


Figura 1-Vista espacial do modelo em perspectiva. Fonte: Marques, J. L. (2021)

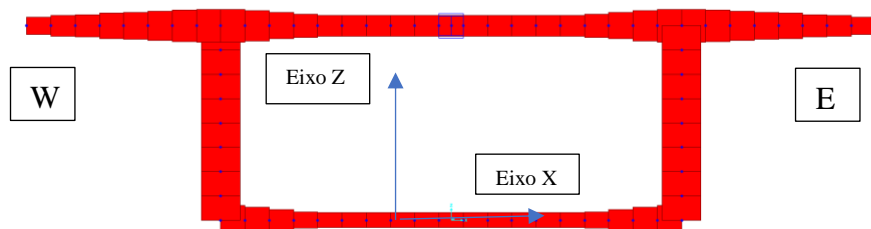


Figura 2- Seção transversal do modelo. Fonte: Marques, J. L. (2021)

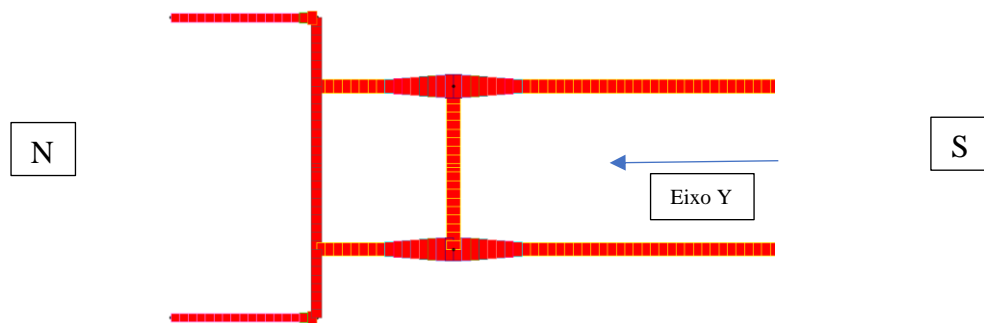


Figura 3- Seção horizontal. Mostrada a metade da ponte do lado Norte. Fonte: Marques, J. L. (2021)

No estudo, é utilizada uma ponte isostática de concreto armado. A seção da ponte é celular. A ponte tem estrutura com um vão central de 20m e dois balanços de 4m. São dispostas transversinas nos apoios e nas extremidades da viga. As dimensões referem-se aos planos médios dos elementos estruturais. A seção celular tem altura de 2m e largura de 4.75m. A largura transversal da laje superior é de 8.75m. São dispostos aparelhos de neoprene sob as transversinas de apoio.

As lajes, as almas, as transversinas e as paredes são modeladas com elementos de casca (no caso placa plana) de concreto armado. Cada elemento tem dimensões de 0.25mx0.25m. As espessuras dos elementos são obtidas do desenho de fôrma do curso de Pontes do Departamento de Estruturas da Escola Politécnica da UFRJ. Os eixos globais estão mostrados nas figuras apresentadas. Os eixos locais 1, 2 e 3 das placas estão apresentados na Figura 4.

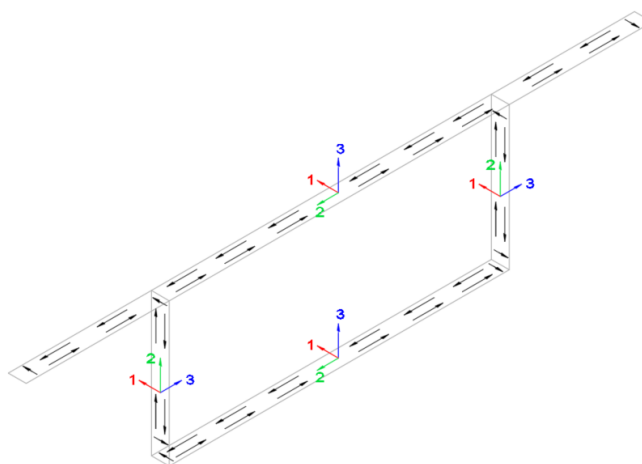


Figura 4- Eixos locais das almas e dos 2 flanges da estrutura. Representada a seção completa da ponte. Fonte: Marques, J. L. (2021).

As verificações são feitas nas seções: S_A, S_B, S_C e S_D, que estão indicadas na Figura 5.

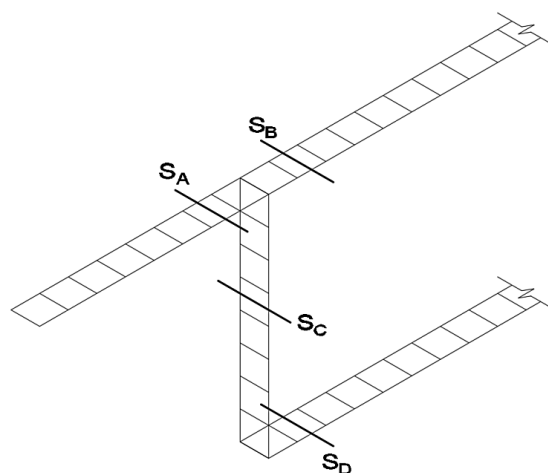


Figura 5- Identificação das seções para as quais foram feitas as verificações das armaduras transversais. Fonte: Marques, J. L. (2021)

As ações e as verificações seguem as normas NBR 7187, NBR 8681, NBR 6123, NBR 6118 e NBR 7187. As ações incluem: peso próprio da estrutura, peso do asfalto, peso das barreiras laterais, vento transversal, retração, variação de temperatura, empuxo de terra, carga móvel e impacto.

As solicitações cisalhantes são definidas usualmente por meio do fluxo de cisalhamento calculadas por $\tau \cdot b_w$ e designadas por v , em kN/m, onde τ é a tensão de cisalhamento e b_w a espessura da placa.

Na verificação da ponte, efetuada pelo programa de análise, são determinados os esforços internos das placas por meio das componentes dos seus esforços internos, definidos por: forças unitárias n_{11} , n_{22} , n_{33} (em kN/m), momentos unitários m_{11} , m_{22} , m_{12} (em kNm/m) e forças cortantes unitárias v_{13} , v_{23} (em kN/m). Numericamente os esforços internos dos elementos de placa são determinados automaticamente por meio de uma análise elástica. Haverá como sempre uma incoerência usual entre esforços de uma análise elástica e um dimensionamento baseado nas condições no ELU, que corresponderiam a uma análise não linear. Os esforços determinados no ELS precisam ser afetados pelos coeficientes de segurança normativos para o dimensionamento no ELU.

Como a ponte em estudo é de concreto armado, a análise elástica se distancia das condições não lineares no ELU, especialmente quando os flanges e as almas são estudados. Segundo a norma brasileira NBR 6118, no seu item 14.2.3, são feitas observações em que o dimensionamento das peças deve ser sempre feito por regras inerentes à teoria do concreto armado no ELU. É importante assinalar que a TPF é inerente a um nível elevado da teoria no ELU. Pode-se efetuar a análise elástica de uma estrutura de concreto armado modelando as barras necessárias de CA50 nos trechos das almas e dos flanges em tração e reduzindo a rigidez axial das placas no sentido longitudinal para zerar as tensões longitudinais de tração no ELS. Entretanto esta modelagem especial mais sofisticada não é feita neste estudo.

Dimensionamento das Armaduras das Almas e Flanges

A seguinte sistemática para a determinação das armaduras referentes aos esforços longitudinais das placas (n_{11} , n_{12} , n_{22} , m_{11} , m_{12} , m_{22}) e aos esforços transversais (v_{13} , v_{23}) é adotada:

-Para os esforços longitudinais são utilizadas as regras da TPF conforme o anexo LL da norma europeia da EN-1992-2.

-Para os esforços transversais são utilizadas as regras de dimensionamento transversal segundo os critérios descritos que serão apresentados mais adiante. O estudo efetuado não se estende quanto à generalização da TPF para os esforços transversais, conforme Anexo MM da norma EN-1992-2.

A TPF separa a espessura das almas e dos flanges em duas chapas secundárias nos seus dois bordos (superior e inferior, conforme eixos locais), com esforços definidos somente no seu plano médio (sem momentos). A espessura da chapa comprimida é adotada usualmente como $0.3 \cdot h$, onde h é a espessura total da alma ou flange, pelo programa de dimensionamento. Ou pode ser definida de forma

sofisticada em verificações específicas. Essa espessura no trecho comprimido da placa pode ser reduzida, diminuindo as armaduras calculadas, por aumento do braço interno de alavanca, mas aumentando as tensões longitudinais e inclinadas no concreto.

Na TPF os esforços solicitantes das duas chapas extremas representam, resumidamente, os elementos resistentes da placa da alma e dos flanges para as solicitações longitudinais e transversais nas placas. Estes esforços são determinados de acordo com o anexo LL da norma europeia EN-1992-2. Os esforços solicitantes nestas chapas extremas são definidos de forma mais simples pelas componentes unitárias designadas por n_1 , n_{12} , n_2 (em kN/m) da chapa superior e inferior, segundo eixos locais 1 e 2, paralelos aos eixos 1 e 2 do elemento da placa original. São usados índices nas direções 1 e 2 para seguir o padrão do artigo original do CEB-FIP.

O dimensionamento das chapas extremas das placas segue as regras definidas na publicação CEB-FIP (1982). Estas regras estão reproduzidas na Tabela 1. A planilha VeriCasca está baseada nestas regras. A planilha verifica em que caso de uma determinada condição está o problema e efetua os dimensionamentos de acordo com as regras do caso determinado. É necessário notar que o caso 1 da Tabela 1 implica em considerar que o ângulo θ (inclinação das bielas) seja igual a 45° . Sendo assim, é inconsistente com a regra normativa de adotar o valor de θ variável dentro de certos limites. Os sinais dos esforços da Tabela 1 seguem as regras: tração (positivo), compressão (negativo).

Tabela 1 – Procedimentos adotados pelo programa empregado para o dimensionamento de um elemento de área de concreto armado (CEB-FIP de 1982)

Caso	Condição	Força de tração na armadura por unidade de comprimento		Força de compressão por unidade de comprimento
		n_{Des1}	n_{Des2}	f_c
1	$n_1 \geq - n_{12} $ $n_2 \geq - n_{12} $	$n_1 + n_{12} $	$n_2 + n_{12} $	$-2 n_{12} $
2	$n_1 < - n_{12} $ $n_2 > \frac{n_{12}^2}{n_1} > - n_{12} $	0	$n_2 - \frac{n_{12}^2}{n_2}$	$n_1 + \frac{n_{12}^2}{n_1}$
3	$n_1 > \frac{n_{12}^2}{n_2} > - n_{12} $ $n_2 < - n_{12} $	$n_1 - \frac{n_{12}^2}{n_2}$	0	$n_2 + \frac{n_{12}^2}{n_2}$
4	$n_1 < - n_{12} $ $n_2 < \frac{n_{12}^2}{n_1}$	0	0	$\frac{n_1 + n_2}{2}$
5	$n_1 < \frac{n_{12}^2}{n_y}$ $n_2 < - n_{12} $	0	0	$-\sqrt{\left(\frac{n_1 - n_2}{2}\right)^2 + n_{12}^2}$

É efetuado o dimensionamento nas seções anteriormente definidas, carregando a ponte com cargas móveis distribuídas dispostas atuando transversalmente sobre todo o tabuleiro, de acordo com linhas de influência longitudinais de forças cortantes. O veículo é posicionado no balanço ou na laje interna por causa da sua importância quanto aos momentos transversais de laje.

Na análise da alma, na sua seção superior, existe uma força vertical de compressão provocada pelo peso da laje e das cargas móveis. Já na sua seção inferior o peso do flange inferior provoca forças verticais de tração na alma. Estas forças unitárias precisam ser levadas em conta.

Para a determinação da força cortante na alma e torção da seção celular são utilizadas as *section cuts* do programa de análise, já que as regras normativas são diferentes nestes dois casos. Nas seções

estudadas, comenta-se que o fluxo de cisalhamento do modelo utilizado, para a torção total, incluiu sempre fluxos relevantes nos dois balanços transversais da laje. Este fato não é usualmente considerado nos projetos usuais.

Regras Normativas sobre Estribos e Armadura de Costura

O dimensionamento transversal pelas normas NBR 6118 e NBR 7187 é definido pelas seguintes regras importantes:

- Consideração da força cortante V_c no dimensionamento da armadura de estribos das almas (item 17.4.2.3 da NBR 6118).
- Não são consideradas parcelas de fluxo v_c na verificação à torção na expressão de T_{Rd3} (Item 17.5.1.6 da NBR 6118).
- São consideradas parcelas de fluxo v_c para a armadura de costura entre almas e flanges somente quando o flange é comprimido (anexo E da proposta da NBR 7187).
- O dimensionamento de estribos é efetuado aqui pelo método II com o ângulo $\theta=37.5^\circ$ (item 17.4.2.3 da NBR 6118).
- São permitidos momentos transversais limites na alma com reduções efetivas de b_w e com a verificação adicional de $(V_{Sd}/V_{Rd2}+T_{RSd}/T_{Rd2}) \leq 1$ (anexo F da proposta da NBR 7187).
- A armadura longitudinal à flexão da viga é aumentada, quando ocorre força cortante, por meio da decalagem vertical determinada por $M_d/z + |V_d| * \cot(\theta)/2$ (item 17.4.2.2 c da NBR 6118).
- A armadura longitudinal nas paredes da célula em seção celular para a torção é determinada pela expressão de T_{Rd4} . (item 17.5.1.6 da NBR 6118).

Verificações Efetuadas no Estudo

Dimensionamento das almas

Com as ressalvas e os comentários já apresentados, são efetuados os dimensionamentos da armadura vertical das almas (nas regiões superior e inferior). A Figura 6 mostra as forças atuantes no elemento de casca de espessura h que foram levadas em conta no dimensionamento das armaduras. Na Figura 6 a variável h_{sup} indica a espessura da chapa superior e h_{inf} indica a espessura da chapa inferior.

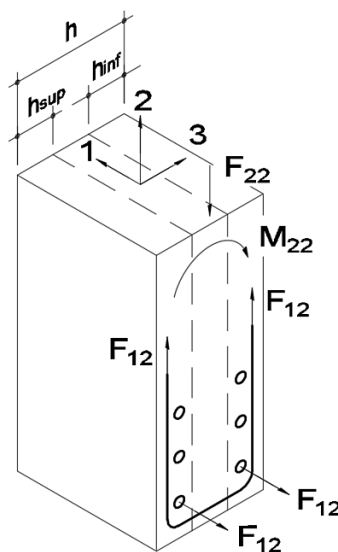


Figura 6 – Esforços atuantes nos elementos de chapa da alma da seção celular.

Para considerar a parcela V_c no dimensionamento das almas usando também a TPF, é calculado o fluxo reduzido F_{12} que deve ser imposto à placa fissurada para se obter a armadura de cisalhamento obtida pela norma NBR 6118. O fluxo local já reduzido, F_{12} , é determinado por:

$$F_{12} = \left(\frac{A_{sw} + A_{90}}{s} \right) f_{ywd} = \frac{V_{sw}}{0,9 d (\cot \alpha + \cot \theta) \sin \alpha} + \frac{T_{Rd3}}{2A_e \cot \theta} \quad (1)$$

O ângulo θ adotado é $37,5^\circ$. A expressão (1) considera que a TPF leva em conta diferentemente um ângulo $\theta = 45^\circ$.

O momento de flexão transversal M_{22} foi obtido por meio do programa de análise estrutural. A força normal de compressão F_{22} , a qual é decorrente do peso próprio da laje superior e da carga móvel, reduz a armadura transversal. Esta força é desprezada pela norma brasileira, portanto foi feita uma análise comparativa considerando a força de compressão e a desprezando.

Para as solicitações máximas do problema na designada seção 2 (na coordenada $Y=22\text{m}$ com momentos longitudinais positivos) é inicialmente determinada a armadura de estribos necessária para a força cortante e o momento de torção pela NBR 6118. Em seguida, é verificado o momento transversal admissível adicional na alma segundo o Anexo F da proposta da NBR 7187. Como o momento transversal solicitante é inferior ao momento adicional permitido, os estribos suportam o momento transversal segundo a proposta da NBR 7187. Não foi possível efetuar cálculos mais esclarecedores neste caso.

Em vista disto, foi efetuado um exercício hipotético investigativo, em que a espessura da alma é mantida com o valor de $0,4\text{ m}$. Os momentos transversais são aumentados e as espessuras das chapas tracionadas ou comprimidas da placa são modificadas. Com a planilha VeriCasca (utilizando a TPF), é possível adotar espessuras de placas coerentes com as zonas de compressão e tração das chapas, provocadas pelos momentos transversais hipotéticos. O valor solicitante é reduzido para F_{12} definido na expressão (1) para levar em conta o V_c .

Com a finalidade de estudar o comportamento da estrutura mediante o aumento do momento de flexão transversal, as armaduras foram dimensionadas considerando as seguintes solicitações simultaneamente:

- Caso 1: Força F_{12} e momento transversal M_{22} ;
- Caso 2: Força F_{12} e momento transversal M_{22} majorado em 50%;
- Caso 3: Força F_{12} e momento transversal M_{22} majorado em 100%;
- Caso 4: Força F_{12} e momento transversal M_{22} majorado em 400%.

Os valores do momento M_{22} foram majorados até ultrapassarem o valor limite determinado conforme o Anexo F do Projeto de Revisão ABNT NBR 7187 (2020).

Em seguida, foi feita uma análise introduzindo a força normal de compressão F_{22} , a qual não é levada em consideração pela norma brasileira. Nesta análise o momento de flexão transversal também foi sendo majorado, de modo que o dimensionamento das armaduras foi realizado para as seguintes solicitações simultâneas:

- Caso 5: Forças F_{12} e F_{22} e momento transversal M_{22} ;
- Caso 6: Forças F_{12} e F_{22} e momento transversal M_{22} majorado em 50%;
- Caso 7: Força F_{12} e F_{22} momento transversal M_{22} majorado em 100%;
- Caso 8: Força F_{12} e F_{22} momento transversal M_{22} majorado em 400%.

Os resultados do dimensionamento das armaduras longitudinais (a_x) e das armaduras transversais (a_y) bem como a tensão de compressão no concreto (σ_c) para cada situação de estudo estão apresentados na Tabela 2 para a combinação em ELU com o veículo posicionado na extremidade do balanço transversal.

Tabela 2 – Armaduras necessárias na parte superior da alma para a combinação com o veículo posicionado na extremidade do tabuleiro

SEÇÃO 2 - VEÍCULO NA EXTREMIDADE DO TABULEIRO						
Esforços Considerados na Análise	Face Superior (tracionada)			Face Inferior (comprimida)		
	a_x	a_y	σ_c	a_x	a_y	σ_c
	m ² /m	m ² /m	kPa	m ² /m	m ² /m	kPa
$F_{12}; M_{22} = 1,0 \times M_{22}$	0,00040	0,00056	-4978	0,00055	0,00039	-2995
$F_{12}; M_{22} = 1,5 \times M_{22}$	0,00040	0,00065	-4978	0,00055	0,00030	-2995
$F_{12}; M_{22} = 2,0 \times M_{22}$	0,00040	0,00073	-4978	0,00055	0,00022	-2995
$F_{12}; M_{22} = 4,0 \times M_{22}$	0,00040	0,00106	-4978	0,00046	0,00000	-3041
$F_{12}; M_{22} = 1,0 \times M_{22}; F_{22}$	0,00040	0,00038	-4978	0,00055	0,00013	-2995
$F_{12}; M_{22} = 1,5 \times M_{22}; F_{22}$	0,00040	0,00046	-4978	0,00055	0,00005	-2995
$F_{12}; M_{22} = 2,0 \times M_{22}; F_{22}$	0,00040	0,00054	-4978	0,00052	0,00000	-3001
$F_{12}; M_{22} = 4,0 \times M_{22}; F_{22}$	0,00040	0,00087	-4978	0,00033	0,00000	-3388

OBS.: a_x corresponde à armadura longitudinal e a_y corresponde ao estribo, ambos na alma.

É verificado neste exercício que à proporção que o momento transversal aumenta hipoteticamente, o ramo do estribo necessário aumenta no lado tracionado e diminui no lado comprimido, como previsto. Além disso, com a consideração das tensões verticais de compressão na seção superior da alma (causadas pelo peso próprio e cargas móveis), a armadura de estribos é reduzida uniformemente, como esperado. A proposta da norma NBR 7187 não apresenta comentários sobre as forças axiais unitárias solicitantes no sentido vertical das almas.

Com relação à armadura longitudinal segundo a TPF, para a ação da força cortante nas almas, o valor calculado pela TPF pode ser descartado, já que esta armadura é considerada necessariamente pela decalagem vertical da armadura principal de flexão (item 17.4.2.2. c da NBR 6118). A armadura longitudinal para a ação do momento de torção é ligeiramente maior no caso investigado, porque o ângulo θ é considerado com o valor de 37,5°. Pela TPF, adota-se o ângulo θ internamente de 45°.

Dimensionamento para os Flanges Comprimidos

Aqui é considerado o fluxo nos flanges e não força cortante na seção como na proposta da NBR 7187, já que é possível obter os fluxos pela análise, nos casos mais gerais.

Pelo Anexo E da proposta da NBR 7187, o fluxo solicitante pode ser reduzido pelo fluxo v_c calculado utilizando o método II para a verificação da alma (item 17.4.2.3 da NBR 6118) por meio das regras normativas: adota-se $v_c = 0.6 \cdot f_{ctd} \cdot h_f$ para o fluxo solicitante de cálculo $v_{Sd} \leq 0.6 \cdot f_{ctd} \cdot h_f$; adota-se $v_c = 0$ para $v_{Sd} = V_{Rd2}/d$; e interpola-se v_c para valores intermediários de v_{Sd} . O fluxo reduzido a ser considerado no dimensionamento \underline{v}_{Rsd} pela TPF é:

$$\underline{v}_{Rsd} = v_{Sd} - v_c \quad (2)$$

Usando o dimensionamento clássico com a TPF, quaisquer condições de fluxo nos flanges podem ser analisadas.

É preciso atentar que, com a ocorrência de força cortante seccional longitudinal, o flange comprimido sofre uma tração longitudinal adicional (geralmente descartada) calculada por $V_{sd} \cdot \cot\theta/2$ (corresponde indiretamente ao prescrito no item 17.4.2.2 c da NBR 6118).

Os dimensionamentos com a TPF mostraram que as armaduras de costura precisam levar em conta os momentos transversais e que a armadura superior da armadura de costura dos flanges comprimidos precisa ser maior do que a inferior no caso em estudo. Ocorre também outra condição de ações em que somente atua o momento transversal do peso próprio da laje e a força cortante longitudinal se mantém elevada, ocasionando uma armadura necessária mínima de costura também na face inferior do flange.

Dimensionamento para os Flanges Tracionados

O fluxo de cisalhamento nos flanges tracionados precisa ser avaliado em função da disposição da armadura principal longitudinal de tração (disposta na alma e no flange), conforme regras tradicionais. No estudo feito, foi considerado que 30% da armadura longitudinal estaria instalada fora da alma. No SAP2000 este fator pode ser modificado a critério do usuário.

Neste caso, não é permitida a redução do fluxo solicitante pelo v_c pela proposta da NBR 7187. Os momentos transversais são obtidos com a análise do modelo da ponte. O dimensionamento pela TPF indica armaduras diferentes nas duas faces dos flanges.

No caso da armadura longitudinal nas paredes, a norma NBR 6118 considera que a torção total atuante na célula principal é uma torção de Saint Venant.

Conclusões

Os estudos da teoria da placa fissurada foram feitos por meio da planilha designada por VeriCasca. Com relação aos estudos comparativos entre a teoria da compressão diametral em concreto armado, as propostas do Projeto de Revisão ABNT NBR 7187 (2020) e a NBR 6118 (2014) foi constatado que em todos os casos de dimensionamento a força no estribo não é constante sob a ação do momento transversal. A aplicação da teoria da chapa fissurada por meio da planilha VeriCasca mostrou que as forças nos estribos se modificam durante a aplicação do momento transversal.

A perna do estribo na face tracionada pelo momento transversal aumenta enquanto que a armadura da perna na face comprimida reduz. Isto implica em aumento da armadura de estribos em geral quando há momento transversal, o que contraria a proposta de norma. Inclusive a armadura necessária obtida conforme critérios da NBR 6118 (2014) mostraram-se deficientes quando comparada a armadura necessária obtida pela teoria da chapa fissurada.

Com relação ao dimensionamento da parte superior da alma que se encontra submetida à compressão vertical, a proposta de norma não leva em conta este efeito. Sendo que há redução dos estribos quando estas forças de compressão são levadas em conta. Na parte inferior de pontes é necessário levar em consideração a força de tração vertical adicional aplicada pelo peso da laje inferior na alma. Com a teoria da chapa fissurada isto é levado em conta automaticamente. Na proposta de norma este assunto não foi comentado.

Além disso, o critério apresentado pelo Projeto de Revisão ABNT NBR 7187 (2020) limita o momento fletor transversal a um determinado valor. Caso o momento solicitante seja superior ao momento transversal limite a norma não apresenta uma solução ao problema. Por outro lado, empregando a teoria da placa fissurada, a utilização de momentos maiores do que os limites impostos pela proposta da norma foram aplicados e sempre foi possível determinar os estribos.

Com o que diz respeito ao dimensionamento dos flanges tracionados e comprimidos, na proposta do Projeto de Revisão ABNT NBR 7187 (2020) a regra de dimensionamento só é válida para perfis abertos com mesas de compressão simétricas. Com a utilização da teoria da chapa fissurada não há necessidade de restringir o uso no dimensionamento de armaduras de costura nos flanges comprimidos.

A norma NBR 6118 (2014) não leva em conta que existe uma armadura longitudinal necessária quando há fluxo de cisalhamento devido à força cortante. No dimensionamento pela teoria da compressão diametral isto é levado em conta e é determinada uma armadura longitudinal que deve ser instalada adicionalmente. Nas normas esta consideração é apresentada por meio da decalagem vertical das armaduras de flexão no caso do dimensionamento das almas de vigas.

No dimensionamento pela planilha VeriCasca, o procedimento da teoria considerada adota um ângulo de inclinação das bielas de compressão do concreto de $\theta = 45^\circ$. No dimensionamento segundo a NBR 6118 (2014) foi imposto uma armadura de estribos adotando um ângulo de $\theta = 37,5^\circ$. Isso faz com que exista diferenças nos valores da armadura determinados pela planilha VeriCasca.

Em normas europeias as armaduras de lajes de pontes são determinadas pela teoria da placa fissurada. O emprego destas regras, sem maiores considerações, implicaria em volumes de estribos e de armaduras de costura mais elevados do que as prescrições normativas definidas em normas brasileiras. Para evitar este problema foi proposto reduzir o fluxo crítico no dimensionamento com base na TPF, para levar em conta as reduções de armadura transversal causadas pela força cortante V_c nas verificações de estribos das almas e da armadura de costura nos flanges comprimidos, respectivamente.

Foi mostrado que o método sugerido consegue resolver de forma direta o problema com base numa planilha sem muitas sofisticções, aplicando as regras definidas nas publicações CEB-FIP de 1982 e na norma europeia EN 1992-2 de pontes.

Algumas complementações dos métodos apresentados são ainda necessárias para obter resultados mais consistentes, em especial com referência ao ângulo θ normativo e o da TPF.

Um fato importante deve ser sempre levado em conta. O valor de V_c depende da resistência à tração do concreto. Assim, devem ser feitas considerações no projeto relativas à queda da resistência à tração pelo efeito Rüsçh, para cargas permanentes e à queda de resistência a tração por fadiga em pontes.

Referências

- MARQUES, J. L. Análise da interação entre armadura transversal de costura e armadura de flexão da laje em pontes de seção celular. Trabalho de Conclusão de Curso, Politécnic, UFRJ, Rio de Janeiro, 2021.
- BAUMANN, T; Tragwirkung zur orthogonaler Bewehrungsnetze beliebiger Richtung in Flächentragwerke aus Stahlbeton. DAFS, Heft 217, Ernst & Sohn, Berlin, 1985.
- CEB-FIP. Manual on Bending and Compression, Bulletin d'Information 141, Construction Press, London, 1982.
- SCHULZ, M. Verificação geral de peças de Concreto Armado baseada no modelo da Chapa Fissurada. Tese de doutorado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 1988.
- AFNOR. Norme Européenne NF EN 1992-2, Eurocode 2-Calcul des structures en béton – Partie 2 - Ponts en béton - Calcul et dispositions constructives, Annexe LL et Annexe MM, AFNOR, La Pleine Saint-Denis, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT, 2014, NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT, 2020, projeto de revisão da NBR 7187: Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido – Procedimento. Rio de Janeiro.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION CEN, 2005. EN 1992-2 Eurocode 2: Calcul des structures en béton - Part 2: Ponts en béton – Calcul et dispositions constructives. CEN, Bruxelles.