

Dimensionamento de Vigas de Concreto Armado com Abertura pelo Método de Bielas e Tirantes

Karolayne da Silva Demetrio¹, Caio Cesar Pereira de Aguiar²

¹CEUMA / Engenharia Civil / karolaynedemetrio@gmail.com

²CEUMA / Engenharia Civil / caio.aguiar@poli.ufrj.br

Resumo

Esse artigo apresenta um estudo sobre a aplicação do Método de Bielas e Tirantes no dimensionamento de vigas de concreto armado com aberturas em posições variadas, como uma alternativa mais eficiente, por conduzir ao equilíbrio interno das forças e um detalhamento mais claro, em comparação ao dimensionamento tradicional por flexão composta reta como abordado por LEONHARDT e MÖNNING (1978) e SÜSSEKIND (1985), cujo equilíbrio interno das forças na seção transversal não é atendido. Na Norma Brasileira (ABNT NBR 6118, 2014) em seu item 21.3.1. menciona que em estruturas cujo projeto exija a presença de aberturas, estas devem ser calculadas e detalhadas considerando a perturbação das tensões que se concentram em torno das aberturas, prevendo armaduras complementares dispostas no seu contorno, podendo essa verificação ser feita pelo método de bielas e tirantes.

Palavras-chave

Bielas e Tirantes; Descontinuidade Geométrica; Viga com Abertura; Concreto Armado.

1. Introdução

O projeto estrutural de edificações em concreto armado por vezes precisa se adequar aos projetos de instalações prediais, para uma perfeita compatibilidade entre disciplinas. Essa situação é muito comum em edificações de lajes maciças ou treliçadas, nas quais essas lajes necessitam se apoiar diretamente nas vigas em seu contorno, e no momento de se compatibilizar os projetos acaba sendo necessário ter de furar algumas vigas para a passagem de tubulações.

1.1 Histórico do método de Bielas e Tirantes

O método teve origem nos primórdios do século XX, com a analogia da treliça clássica de MÖRSCH (1909), aplicável somente nas regiões de regularidade de tensões e de deformações em vigas de concreto armado. Esta teoria foi sendo refinada com a contribuição de vários pesquisadores, até SCHLAICH *et al*, (1987) proporem generalizar a analogia da treliça para todas as partes de qualquer estrutura, sistematizando o Método de Bielas e Tirantes. São concentradas as tensões em elementos unidimensionais, sendo as tensões de compressão representadas por bielas, resistidas pelo concreto em seu contorno e as tensões de tração são representadas por tirantes, resistidos pelas armaduras devidamente posicionadas, tendo nós conectando as bielas aos tirantes e recebendo as ações.

A ABNT NBR 6118 (2014), em seu item 22, recomenda a adoção desse método para analisar as regiões de descontinuidade estática ou geométrica, como por exemplo as regiões de aberturas nas estruturas que se enquadram como região de descontinuidade geométrica.

Esse artigo é um resumo do trabalho de conclusão de curso de DEMETRIO (2019), que por sua vez é uma extensão dos estudos de AGUIAR (2018) onde é possível ver a aplicação desse método em diversos tipos de estruturas situadas em regiões de descontinuidade.

2. Metodologia de cálculo

O procedimento de análise adotado seguiu a sistemática a seguir:

- 1° Elaboração de modelos em elementos finitos com auxílio do SAP 2000, para visualizar a trajetória das forças e identificar os principais pontos tracionados próximo a cada abertura;
- 2° Elaboração dos modelos de bielas e tirantes, com auxílio do programa FTool, baseado na trajetória das forças;
- 3° Substituição das cargas distribuídas por forças concentradas nos nós;
- 4° Determinação da intensidade das forças normais de compressão nas bielas e de tração nos tirantes das treliças isostáticas;
- 5° Verificação das tensões de compressão nas bielas críticas e cálculo das áreas de aço necessárias nos tirantes verticais e horizontais na região das aberturas, assim como seus respectivos comprimentos de ancoragem;
- 6° Detalhamento das armaduras de maneira compatível com o posicionamento dos tirantes nos modelos elaborados.

3. Parâmetros de cálculo

A verificação das tensões de compressão foi realizada conforme os critérios definidos nos itens 22.1, 22.3.2, e 22.3.3 da norma ABNT NBR 6118 (2014).

- Fator de efetividade do concreto

$$\alpha_{v2} = 1 - \frac{f_{ck}}{250} \quad (1)$$

- Tensões resistentes do concreto:

Máxima tensão resistente de compressão no concreto em regiões sem tensões de tração transversais e em nós totalmente comprimidos (Nós CCC):

$$f_{cd1} = 0,85 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \quad (2)$$

Máxima tensão resistente de compressão no concreto em regiões com tensões de tração transversais e em nós com pelo menos dois tirantes (Nós CTT):

$$f_{cd2} = 0,60 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \quad (3)$$

Máxima tensão resistente em nós com somente um tirante (Nós CCT):

$$f_{cd3} = 0,72 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \quad (4)$$

- Cálculo da área de aço necessária em cada tirante, em função da sua respectiva força de tração.

$$A_s = \frac{F_{Sd}}{f_{yd}} \quad (5)$$

4. Cálculo de vigas com abertura por flexão composta reta

No nosso meio técnico tem sido tradicionalmente utilizado o dimensionamento da seção no meio de uma abertura conforme os critérios de flexão composta reta definidos por LEONHARDT e MÖNNING (1978) e SÜSSEKIND (1985), conforme ilustrado na figura 1.

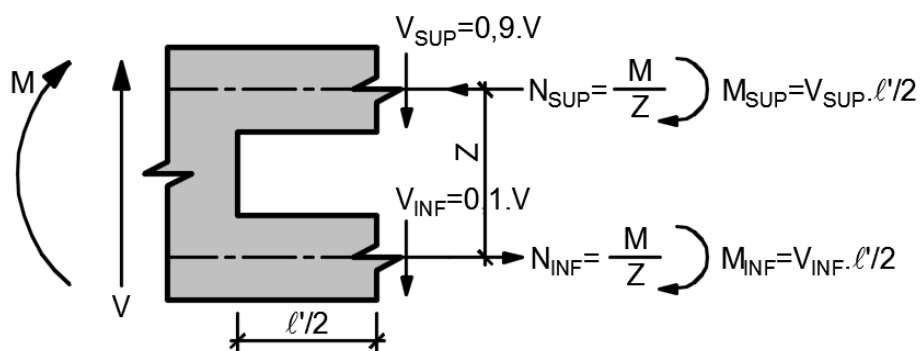


Figura 1 - Ilustração das forças internas no meio da abertura de acordo com os critérios de FCR.

Para o cálculo das armaduras complementares neste trabalho por flexão composta reta foi adotado um misto entre as propostas destes dois autores, assim como é realizado pelos programas automatizados disponíveis no mercado brasileiro.

Sendo adotado o comprimento máximo da abertura de $2.h$, o binário de forças é decomposto no centro do bloco comprimido e no centro da armadura tracionada (o que demanda a correção nos momentos dos banzos devido a essas excentricidades). A parcela de força cortante resistida pelo banzo comprimido é considerada como de 100% da força cortante no meio da abertura. No banzo tracionado é utilizada armadura transversal mínima e as armaduras de suspensão nas faces laterais da abertura são dimensionadas para 100% da força cortante no meio da abertura.

Apesar de, em ensaios, o detalhamento simétrico das armaduras resultante dessa metodologia de cálculo conduzir a uma carga de ruptura similar ao de uma viga equivalente sem abertura, não é possível se demonstrar o equilíbrio interno das forças na seção transversal, o que deve ser a primeira exigência a ser atendida para qualquer tipo de dimensionamento.

Logo avalia-se esse dimensionamento como incorreto e não recomendado.

5. Cálculo de vigas com abertura pelo Método de Bielas e Tirantes

A ABNT NBR 6118 (2014) nos seus itens 13.5.2.1 e 21.3.3 permite a dispensa de verificações adicionais nas vigas furadas, contanto que os furos estejam dentro de certos limites, como ilustrado na figura 2.

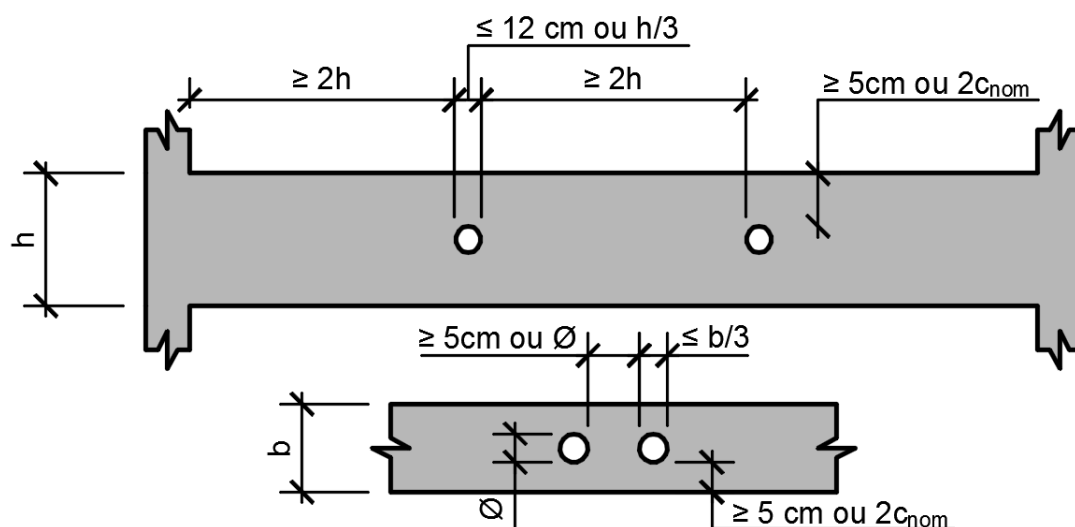


Figura 2 - Ilustração da vista lateral e inferior dos critérios de limites de furos em vigas.

A norma considera que os furos têm dimensões pequenas em relação às da viga e quando devidamente posicionados não afetam seu comportamento estrutural. Quando o furo ultrapassa esses limites, a norma passa a classificá-lo como abertura, sendo então suas dimensões relevantes em relação às da viga, podendo alterar seu comportamento estrutural. Devem um conjunto de furos muito próximos ser tratados como uma única abertura.

No seu item 21.3.1, a ABNT NBR 6118 (2014) reconhece que as aberturas geram uma perturbação das tensões em seu entorno, o que inviabiliza o cálculo tradicional analisando as forças elasticamente na seção, já que a hipótese de seções planas de Bernoulli (distribuição linear de tensões e deformações) não é mais aplicável.

Logo a viga deve ser calculada e detalhada segundo o método de bielas e tirantes.

5.1. Viga 1 – Modelo base de bielas e tirantes para viga sem abertura

Inicialmente foi estudada uma viga sem abertura como base para as demais vigas, em que serão introduzidas aberturas em posições variadas. Considera-se seção transversal de 20x60 cm, vão de cálculo de 6 m, pilares de apoio com 30x20 cm, carga solicitante característica de 30 kN/m, concreto C25 e aço CA-50.



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

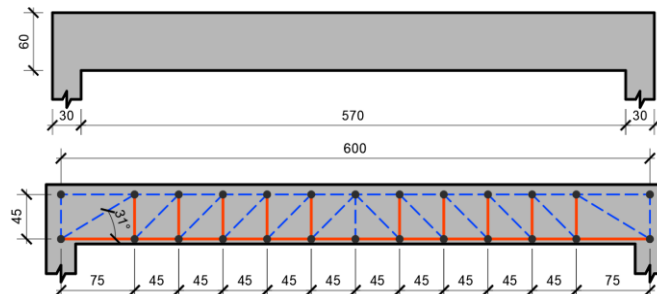


Figura 3 - Desenho de forma e modelo de bielas e tirantes da viga 1.

5.2. Viga 2 – Modelo de bielas e tirantes com abertura central pequena

Nesse modelo, o tamanho da abertura é superior ao recomendado pela norma, porém, não é grande o suficiente para alterar o comportamento da viga, posicionada em região de força cortante nula. A interferência com os elementos da treliça é mínima, não exigindo armadura complementar principal, somente armaduras de montagem.

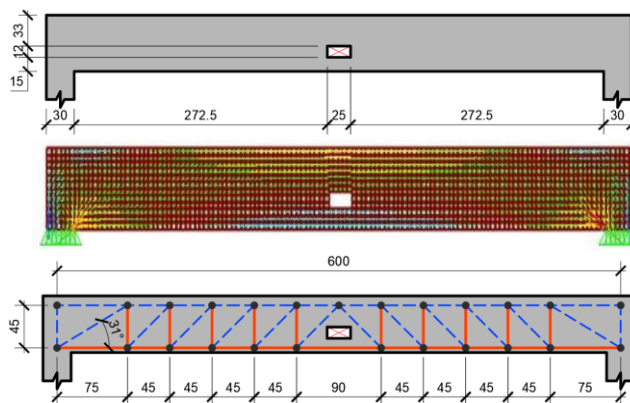


Figura 4 - Desenho de forma, trajetória das forças e modelo de bielas e tirantes da viga 2.

5.3. Viga 3 – Modelo de bielas e tirantes com abertura central

Nesse modelo não surge a necessidade de armadura de suspensão nas faces laterais da abertura.

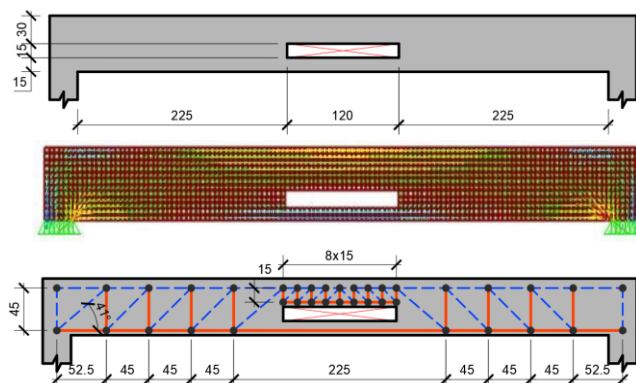


Figura 5 - Desenho de forma, trajetória das forças e modelo de bielas e tirantes da viga 3.



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

5.4. Viga 4 – Modelo de bielas e tirantes com abertura próxima ao apoio na parte superior

Nesse modelo, o caminho natural é a treliça ultrapassar a abertura pela parte de baixo, conduzindo a um detalhamento assimétrico.

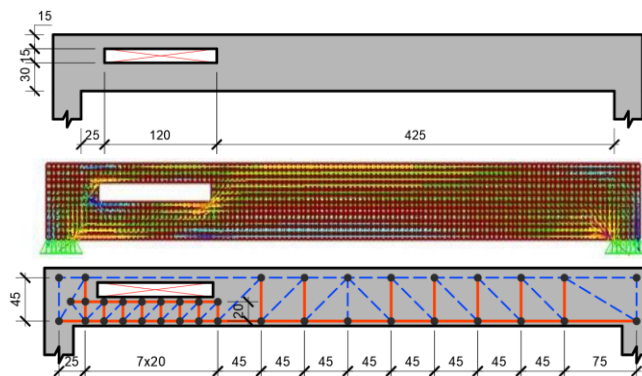


Figura 6 - Desenho de forma, trajetória das forças e modelo de bielas e tirantes da viga 4.

Nessa viga foi necessário posicionar a abertura 10 cm para a direita da posição original, ilustrada na figura 6, pois a biela inclinada que chega no apoio esquerdo não apresentou resistência suficiente, o que resultaria em esmagamento do concreto.

5.5. Viga 5 – Modelo de bielas e tirantes com abertura próxima ao apoio na parte inferior

Nesse modelo o caminho natural é a treliça ultrapassar a abertura pela parte de cima, conduzindo a um detalhamento assimétrico.

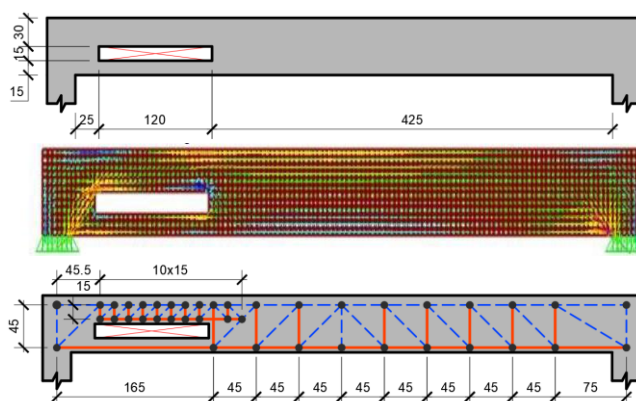


Figura 7 - Desenho de forma, trajetória das forças e modelo de bielas e tirantes da viga 5.

6. Comparativo entre as metodologias

Com o objetivo de se comparar a diferença entre as necessidades de aço entre a metodologia usual de flexão composta reta e o Método de Bielas e Tirantes confeccionou-se a tabela 1.



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

Tabela 1 – Comparativo entre as áreas de aço.

| | Biela e Tirantes | | | Flexão Composta Reta | | |
|--------|-----------------------------|--|--|---------------------------------------|--|--|
| | A_s (cm ²) | $A_{Sw,lateral}$ (cm ²) | $A_{Sw,banzo}$ (cm ² /m) | $A_{S1}+A_{S2}$ (cm ²) | $A_{Sw,lateral}$ (cm ²) | $A_{Sw,banzo}$ (cm ² /m) |
| Viga 3 | 1,16 | - | 3,4 | - | - | - |
| Viga 4 | 14,3 | 8,8 | 13,3 | 13,6+6,2 | 2x1,9 | 4,65 |
| Viga 5 | 15,0 | 6,2 | 11,9 | 9,9+8,0 | 2x1,9 | 4,65 |

A seguir é ilustrada a diferença que se tem no detalhamento entre as duas metodologias, onde as barras pretas representam a armadura principal da viga e as armaduras mínimas e as barras em azul são as armaduras complementares calculadas junto às aberturas.

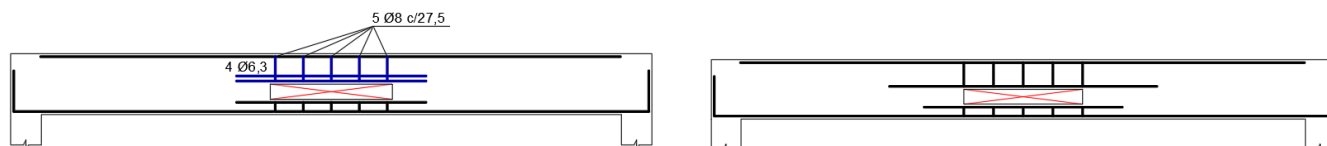


Figura 8 – Detalhamento por bielas e tirantes e por flexão composta reta da viga 3.

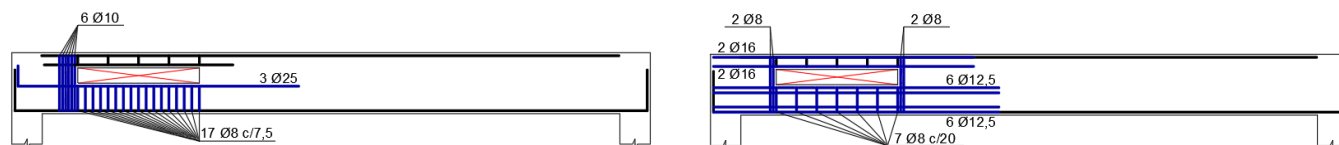


Figura 9 – Detalhamento por bielas e tirantes e por flexão composta reta da viga 4.

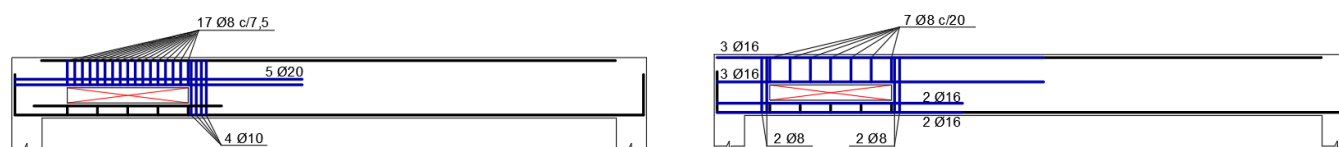


Figura 10 – Detalhamento por bielas e tirantes e por flexão composta reta da viga 5.

7. Conclusão

É de se concluir que o Método de Bielas e Tirantes é bem eficiente para se dimensionar estruturas situadas em regiões de descontinuidade, principalmente com o auxílio de programas de elementos finitos para se observar a trajetória das forças.

Em comparação ao método de dimensionamento à flexão composta reta, pode-se perceber que o método de bielas e tirantes exige menos armadura complementar longitudinal e mais armadura complementar transversal detalhadas de forma assimétrica, porém garantindo o equilíbrio estático das forças internas.

Como conclusão desta pesquisa os autores sugerem as seguintes recomendações para a locação de abertura em vigas, quando necessário, para uma melhor concepção estrutural:

1° Não introduzir abertura próximo ao apoio de maneira a interromper a biela inclinada ao chegar ao apoio, pois isto ocasionará na perda de estabilidade da viga (recomendando-se um afastamento mínimo de $0,6.h$ da face do apoio, de maneira que a biela fique com uma inclinação máxima próximo de 60° , o que não dispensa a verificação da biela inclinada);

2° Deixar uma altura suficiente no banzo comprimido da abertura ($h_{\text{banzo}} > x$), para não romper o concreto;

3° Deixar uma altura suficiente no banzo tracionado da abertura ($h_{\text{banzo}} \geq 15 \text{ cm}$), de maneira a permitir a acomodação das armaduras, assim como uma boa concretagem;

4° Sempre que possível, introduzir a abertura na região de força cortante nula, onde terá uma menor influência na estrutura;

5° Dar preferência para posicionar a abertura mais próxima do banzo tracionado, pois essa geometria conduz a um modelo de bielas e tirantes com tirantes verticais menos solicitados, o que resulta numa menor taxa de aço nas armaduras transversais complementares.

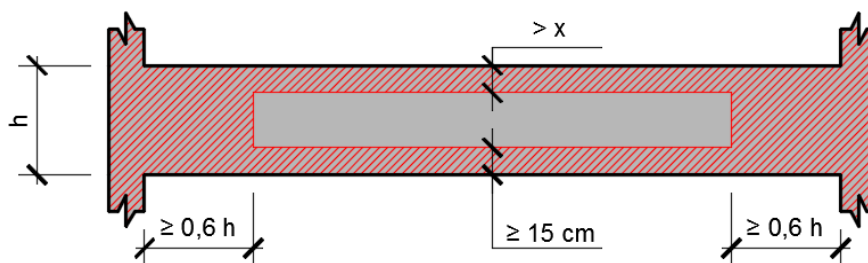


Figura 11 - Ilustração das regiões não recomendadas (em vermelho) para se introduzir aberturas em vigas.

Referências

- AGUIAR, C. C. P., Dimensionamento de estruturas especiais de concreto armado pelo método de bielas e tirantes. Dissertação de Mestrado, Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118, Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- DEMETRIO, K. S., Dimensionamento de vigas de concreto armado com abertura pelo método de bielas e tirantes. Trabalho de Conclusão de Curso, CEUMA, São Luís, MA, Brasil, 2019.
- LEONHARDT, F., MÖNNING, E., Construções de concreto, volume 3: princípios básicos sobre a armação de estruturas de concreto armado. Ed. Interciência Ltda, Rio de Janeiro, 1978.
- MÖRSCH, E., Concrete-steel construction. The engineering news publishing company. 1909.
- SCHLAICH, J., SCHAFFER, K., JENNEWEIN, M., Toward a consistent design of structural concrete. Journal of the PCI, Vol. 32, No.3, May/June 1987.
- SÜSSEKIND, J. C., Curso de concreto, volume II: concreto armado. Ed. Globo, Rio de Janeiro, 1985.