

ARMSUSP: um aplicativo computacional para cálculo da armadura de suspensão em apoios indiretos

ARMSUSP: a software application for the design of hanger reinforcement in indirect supports

*Eduardo Marques Vieira Pereira(1); Ítalo Samuel da Silva Araújo(2);
Petrus Gorgônio Bulhões da Nóbrega(3)*

1 Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Natal, RN, Brasil.

E-mail: eduardo.marquesvp@gmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0436-9676>

2 Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Natal, RN, Brasil.

E-mail: italo.-samuel@hotmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2393-2612>

3 Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Natal, RN, Brasil.

E-mail: petrus.nobrega@gmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8597-0158>

Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, vol. 7, n. 1, p. 179-201, Janeiro-Junho 2020 - ISSN 2358-6508

[Recebido: Março 22, 2019; Aceito: Maio 05, 2020]

DOI: <https://doi.org/10.18256/2358-6508.2020.v7i1.3971>

Endereço correspondente / Correspondence address

Departamento de Arquitetura, Centro de Tecnologia,
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Campus
Universitário, Natal / RN, Brasil
CEP 59078-970

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*
Editora: Aline Zanchet

Como citar este artigo / How to cite item: [clique aqui/click here!](#)

Resumo

Uma situação usual nos projetos de estruturas de concreto é a dos apoios indiretos, notadamente o encontro de duas vigas, onde há uma viga apoio e uma viga apoiada. A norma brasileira de projeto de estruturas de concreto, NBR 6118:2014, para este caso, estabelece um único parágrafo de orientação, o qual, embora teoricamente correto, não apresenta qualquer detalhe que auxilie o engenheiro no projeto da armadura de suspensão. Neste aspecto, a omissão da NBR 6118 contrasta com diversas normas internacionais, que estabelecem vários requisitos; por exemplo, a definição dos comprimentos dos trechos de armação e de fatores de redução, dentre outros. O objetivo deste artigo é discorrer sobre o apoio indireto em vigas e apresentar o aplicativo ARMSUSP para o auxílio no cálculo desta armadura, o qual incorpora diversos critérios, e está disponível a todos que o desejem. Destaca-se a revisão bibliográfica apresentada para auxiliar a compreensão de um tema aparentemente simples, mas muitas vezes negligenciado pelos projetistas e nem sempre bem formulado nos documentos normativos. Por último, são feitos exemplos de cálculo, comparando as prescrições de várias normas e os parâmetros adotados em alguns programas computacionais brasileiros de projeto de estruturas.

Palavras-chave: Apoio indireto. Armadura de suspensão. Cruzamento de vigas.

Abstract

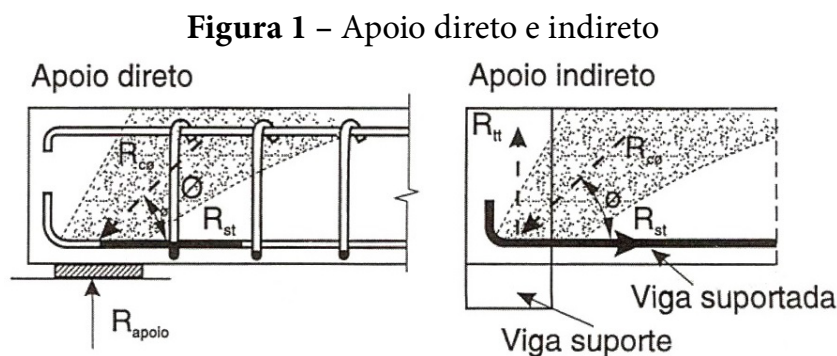
A usual situation in concrete structures designs is the indirect support, especially the crossing of two beams, where there are a support and a supported beam. The Brazilian code for the design of concrete structures NBR 6118: 2014, in this case, establishes a single guiding paragraph, theoretically correct, but with no detail that assists the engineer to plan the hanger reinforcement. In this respect, the omission of the NBR 6118 contrasts with several international codes, which set many requirements. For example, the definition of the reinforcement lengths, reduction factors, among others. The objective of this paper is to discuss the indirect support on beams and present the ARMSUSP software application to provide assistance in this reinforcement design, which incorporates several criteria. The review presented helps to understand a seemingly simple theme, often neglected by designers and not specifically defined by some codes. Finally, some examples of calculation are presented, comparing the code requirements and the parameters adopted in some Brazilian softwares of structural design.

Keywords: Indirect support. Hanger reinforcement. Beam crossing.

1 Introdução

Das primeiras lições da disciplina de Concreto Armado, nos cursos de Engenharia Civil, o aluno aprende os conceitos de apoio direto e apoio indireto das vigas. Condiciona-se a definir que na situação de uma viga apoiada em pilar, tem-se o apoio direto; e quando a viga se apoia em outra viga, tem-se o apoio indireto.

Não é de toda equivocada tal definição. Mas poderia ser compreendida de uma maneira mais precisa, observando-se os esforços internos da situação em questão. A Figura 1 ilustra os dois tipos de apoios.



Fonte: Adaptada de Fusco (2013).

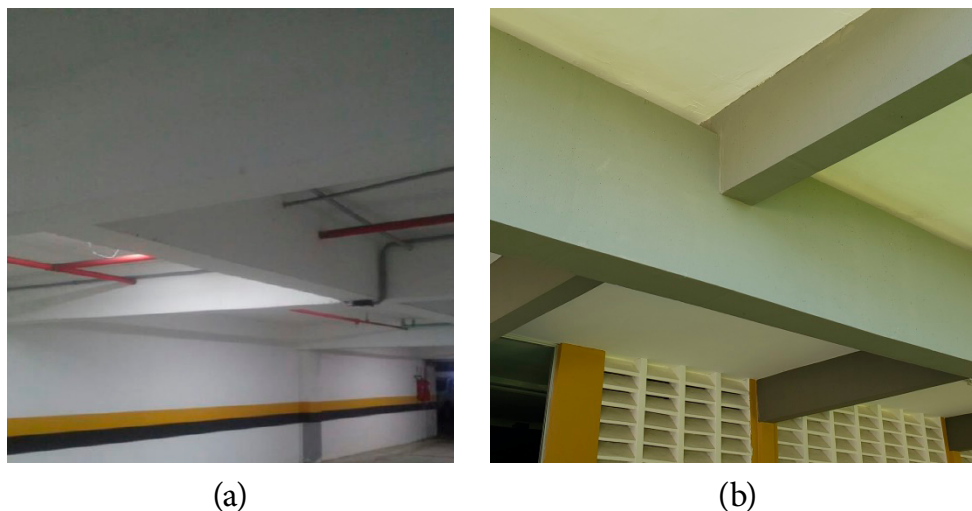
No apoio direto, a carga é transmitida diretamente pelas bielas de compressão, atuando na face superior do apoio. Não há qualquer inconveniente ou necessidade de alteração deste fluxo de esforços. No caso do apoio indireto, conforme Fusco (2013), o equilíbrio de esforços internos da viga suporte exige que no cruzamento das duas vigas haja uma armadura, dita de suspensão, funcionando como um tirante interno, que levante a força aplicada pela viga suportada ao banzo inferior da viga suporte, até o seu banzo superior.

A lógica deste tirante, e da suspensão da força, é condição implícita no desenvolvimento do modelo de treliça de Morsch: as cargas devem estar aplicadas no banzo superior da treliça, ou seja, na face superior da viga suporte.

Em recente trabalho, Baek (2016) reafirma uma advertência já conhecida: se a armadura de suspensão não for adequadamente dimensionada e detalhada na região deste encontro, uma falha prematura pode ocorrer. Mattock e Kumar (1992) já haviam verificado anteriormente que uma armadura de suspensão mal dimensionada e detalhada pode causar, inclusive, o escoamento prematuro da armadura longitudinal.

O encontro de vigas é uma situação corrente, absolutamente usual, nos projetos de estruturas das edificações. A Figura 2 ilustra grelhas de pavimentos reais em que aparecem vigas com apoios indiretos. A imagem (a) mostra encontros com vigas de mesma altura, e a imagem (b) apresenta vigas com alturas diferentes.

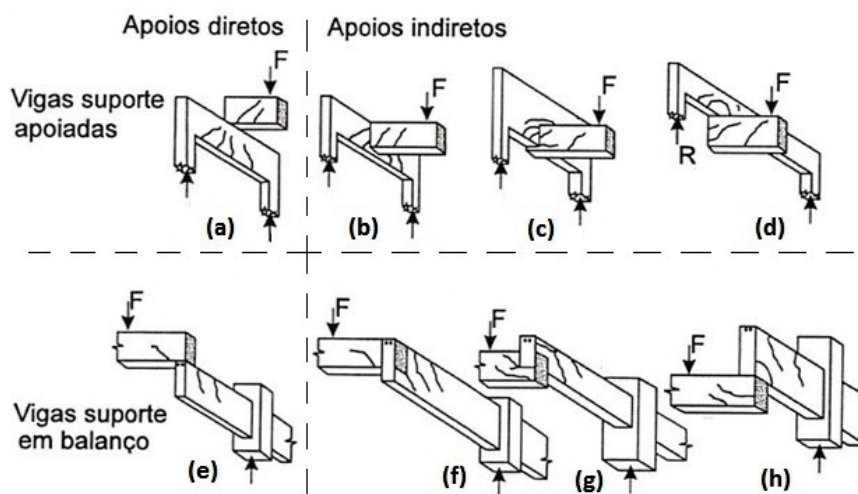
Figura 2 – Situações reais de cruzamento de vigas



Fonte: Acervo dos autores.

Existem, por óbvio, diversas configurações geométricas distintas para as vigas suporte e suportada (ou apoio e apoiada), como a Figura 3 ilustra. Se a viga suportada, inclusive, estivesse por cima da viga suporte (arranjos “a” e “e”), isto não constituiria uma situação de apoio indireto, mas de direto (do ponto de vista de transmissão do esforço). A viga suportada pode ainda ter a sua face inferior em elevação mais baixa que a própria face inferior da viga suporte (arranjos “c”, “d”, “g” e “h”), caracterizando o que se chama de “viga pendurada”. Perceba-se que existem vigas em nível (pelo topo ou pela base) ou em desnível, as quais podem ter diferentes alturas. São diversos os arranjos, com maior ou menor implicação no cálculo da armadura de suspensão.

Figura 3 – Tipos de arranjos de vigas

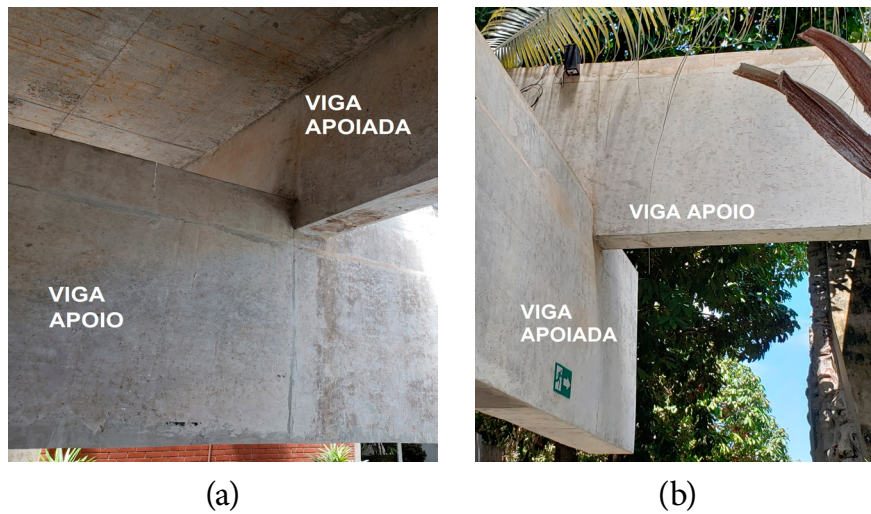


Fonte: adaptada de Fusco (2013).

A Figura 4 ilustra situações reais, absolutamente distintas, de cruzamentos de vigas de grandes dimensões. Na imagem (a) tem-se uma viga apoiada na região superior da viga suporte constituindo, como já comentado, uma situação de apoio

direto. Neste caso, a armadura de suspensão requerida é nula. Na imagem (b) tem-se o inverso. A viga suportada está pendurada na viga apoio, e a armadura de suspensão aqui é fundamental.

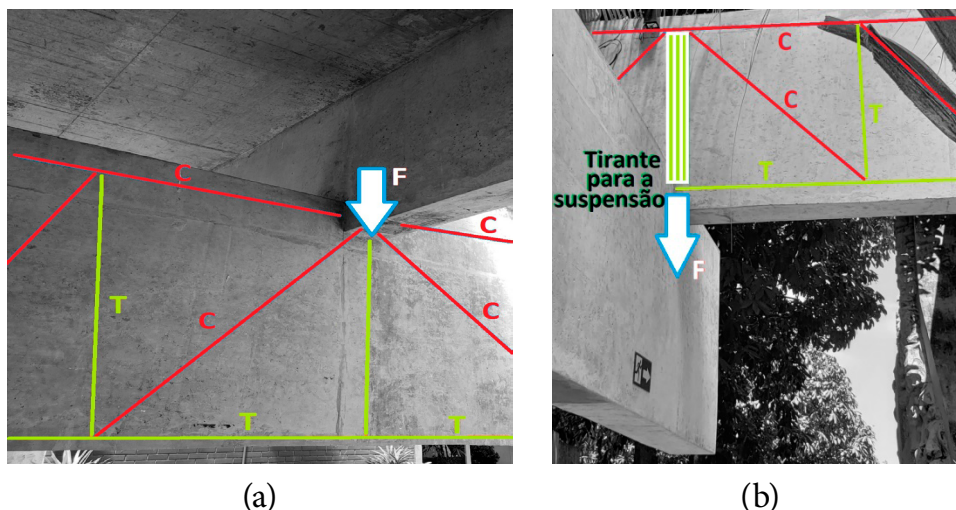
Figura 4 – Cruzamentos de vigas de grandes dimensões



Fonte: acervo dos autores.

A Figura 5 apresenta as mesmas vigas da Figura 4, agora acrescidas do esquemático da treliça resistente da viga de apoio. Observe-se que na imagem (a) a força “F” (equivalente à reação da viga apoiada) está no banzo superior da viga suporte, em acordo com o modelo de treliça idealizado, e na imagem (b) é evidente a percepção da necessidade da armadura de suspensão para “levantar” esta força do banzo inferior para o banzo superior.

Figura 5 – Esquemático das treliças resistentes das vigas-apoio



Fonte: acervo dos autores.

A norma brasileira de projeto de estruturas de concreto, ABNT NBR 6118 (2014), doravante chamada de NBR 6118:2014, aborda a necessidade da armadura de suspensão de forma demasiadamente sucinta no seu item 18.3.6: “Nas proximidades de cargas

concentradas transmitidas à viga por outras vigas ou elementos discretos que nela se apoiem ao longo ou em parte de sua altura, ou fiquem nela pendurados, deve ser colocada armadura de suspensão”.

Em que pese o raciocínio deste item ser correto, a economia de palavras foi de tal forma exagerada que não foram feitas indicações de percentuais das armaduras a serem colocadas em uma viga ou em outra (é possível distribuir nas duas vigas), e em que comprimentos de trechos (a fim de não haver um congestionamento inviável da armadura, e ter-se ainda uma extensão eficaz), ou acerca da possível aplicação de um coeficiente minorador ou majorador, função de algum arranjo indicado na Figura 3, ou mesmo da dispensa desta armadura, sob certas condições, dentre outros aspectos.

A responsabilidade recai por completo sobre o projetista, que se encontra desamparado por sua principal norma de consulta. Diferentemente, diversas normas internacionais e artigos técnicos mostram-se mais detalhados acerca do assunto, dando a entender que o tema deveria ser tratado com maior atenção. Trazem indicações mais completas, embora às vezes significativamente distintas entre elas, apontando para um não consenso, mas sempre afastadas do tratamento exageradamente simplista feito pela NBR 6118:2014.

O objetivo deste artigo é discutir o tema dos apoios indiretos em vigas e os seus parâmetros de cálculo pertinentes, apresentando um aplicativo que foi desenvolvido especificamente para este fim, e que está democraticamente disponibilizado, de forma gratuita, a todos que o desejarem. Ademais, aqui se apresenta um conjunto de referências que, diferentemente da NBR 6118:2014, mostram-se mais objetivas e úteis no enfrentamento desta questão.

O aplicativo referido é denominado ARMSUSP, encontrando-se no espaço de aplicativos “TQS Store”, hospedado no site da “TQS”, uma das maiores desenvolvedoras nacionais de programas computacionais para o projeto de estruturas de concreto, podendo ser acessado e livremente baixado pelo link “<https://store.tqs.com.br/apps/armsusp/juhrlo3err>”.

À primeira vista pode-se imaginar que este tema está exaurido, não havendo o que discutir, pois se trata de uma situação prática usual e plenamente resolvível. Verdade parcial. É usual e resolvível sim, mas não se observa consenso ao se estudar as diversas referências. E, como já discutido, a carência informativa da NBR 6118:2014 impõe a consulta à bibliografia estrangeira, muito divergente entre si.

A contribuição do presente trabalho é apresentar uma síntese e uma discussão das prescrições acerca do tema, juntamente com a apresentação do aplicativo computacional desenvolvido que as reúne e que pode ser usado na prática de projeto, além do contexto do ambiente acadêmico. Destaca-se que, em complemento ao constante na bibliografia internacional, este artigo analisa ainda os critérios adotados nos dois principais programas brasileiros utilizados para o projeto de estruturas de concreto (CAD/TQS e AltoQi Eberick), a fim de averiguar como este item é por eles tratado.

2 Desenvolvimento do Aplicativo ARMSUSP

O ARMSUSP é um aplicativo computacional que, utilizando-se das linguagens de programação Java e HTML, é capaz de realizar os cálculos adequados e exibir resultados do dimensionamento e detalhamento das armaduras de suspensão, transversal de cisalhamento e longitudinal das vigas de maneira simples e com a consideração de diversos critérios.

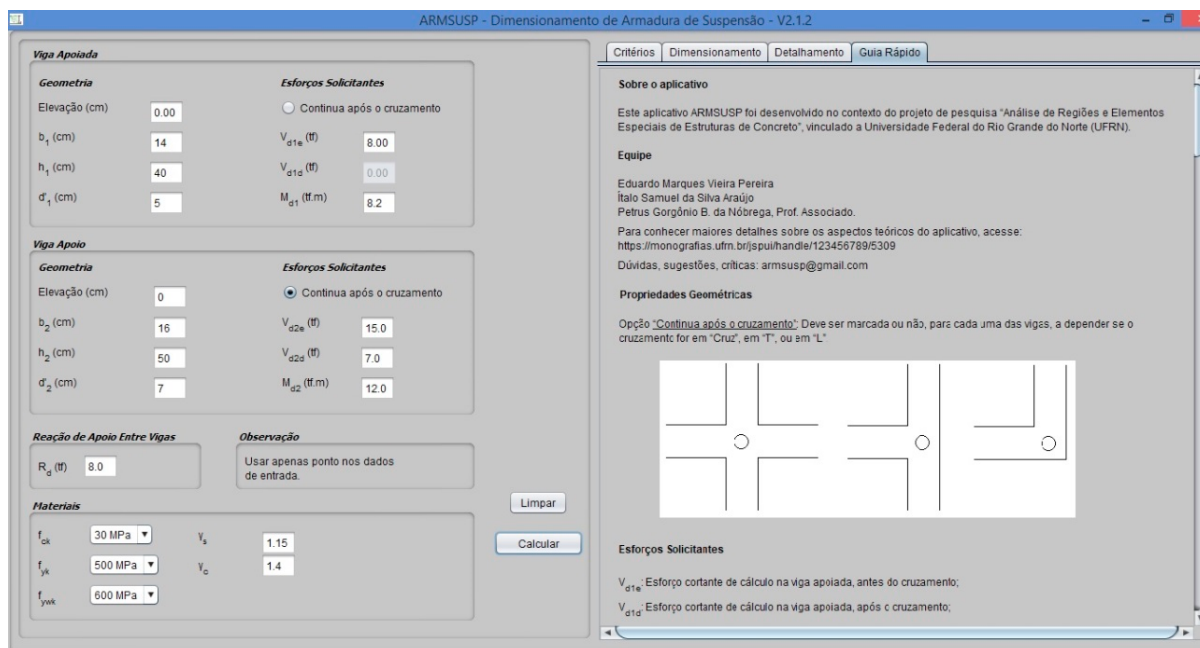
Na sua elaboração foi definida a interface do aplicativo, a qual seria responsável pela comunicação entre a máquina e o usuário. Essa etapa foi auxiliada pelo recurso do Netbeans chamado GUI Builder e pelo HTML. O GUI Builder torna possível a construção de GUIs (*Graphical User Interfaces*), interfaces gráficas do usuário, a partir de gerenciadores de layout. Esse artifício tornou possível a criação de formulários para receber e exibir informações aos usuários como, por exemplo, as informações sobre as vigas e os resultados de dimensionamentos. Já o HTML foi utilizado na formatação das informações do layout, permitindo a exibição mais estética e agradável de alguns textos. A partir da conclusão dessa etapa, iniciou-se a implementação das rotinas.

Com a interface devidamente estruturada, ocorreu a inserção das rotinas através do Java. Essa etapa, de grande importância, é quando ocorre todo o incremento das metodologias de cálculo, usando os recursos e ferramentas da linguagem. Com ela foi possível realizar as operações solicitadas pela rotina para que ocorresse o dimensionamento. Além disso, permitiu criar um laço sincronizado com o layout para que houvesse coesão entre a comunicação usuário-máquina, resultando em harmonia e funcionamento adequado do sistema.

O resultado da implementação foi um aplicativo dividido em cinco abas: (1) Entrada de dados, (2) Critérios, (3) Dimensionamento, (4) Detalhamento, e (5) Guia rápido. A Figura 6 ilustra a tela principal do aplicativo. Embora a imagem apresente os textos em tamanho relativamente pequeno, cada uma das referidas abas será apresentada nas figuras em sequência para melhor visualização.

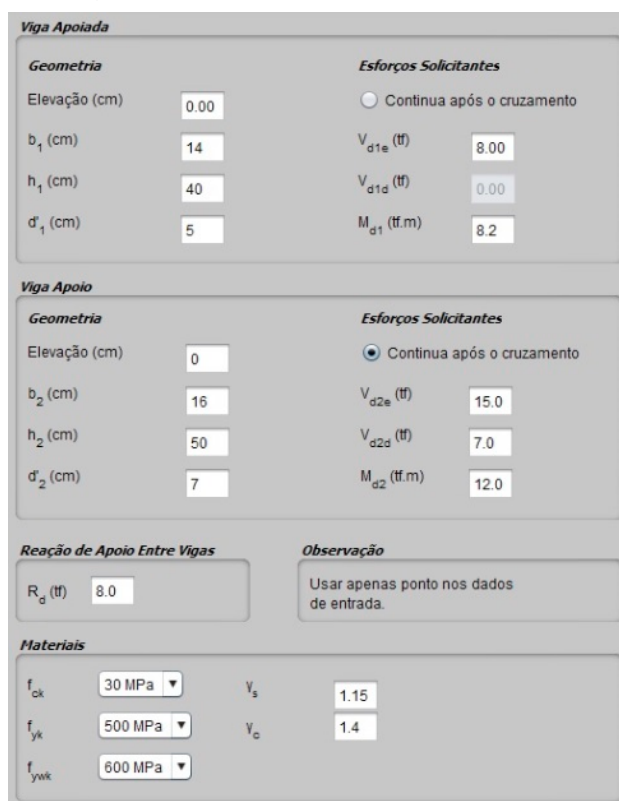
Na seção de entrada de dados básicos (Figura 7), à esquerda da tela principal, o usuário deve inserir todas as informações fundamentais para o dimensionamento das vigas. Os dados iniciais consistem na geometria, esforços solicitantes, reação de apoio entre vigas e nas propriedades materiais.

Figura 6 – Tela principal do ARMSUSP



Fonte: acervo dos autores.

Figura 7 – Seção de entrada de dados básicos do ARMSUSP



Fonte: Acervo dos autores.

Na aba de “Critérios” (Figura 8), destacam-se os dados relacionados à distribuição da armadura, que pode ser feita de maneira “personalizada” ou por diretrizes pré-definidas (seguindo as referências implementadas no aplicativo). As normas internacionais, cujos parâmetros foram incorporados, são: (1) a europeia Eurocode

2 Part 1-1 (2004) (2) a canadense CSA A23.3-14 (2014); (3) a australiana AS 3600 (2009); e (4) a chinesa GB 50010 (2010). Além destas, constam os procedimentos de (5) Leonhardt e Mönning (1978), e (6) os programados pelo software CAD/TQS.

Além disso, é possível inserir dados de entrada para a proporção de armadura entre viga apoio e apoiada, parâmetros para as vigas penduradas, interação entre a armadura de suspensão e o esforço cortante, e critérios para a possibilidade de dispensar a armadura de suspensão e para o recálculo da armadura longitudinal (considerando a suspensão).

Figura 8 – Aba “Critérios” do ARMSUSP

Fonte: acervo dos autores.

Na aba “Dimensionamento” (Figura 9) tem-se o primeiro conjunto de resultados, normalmente indicando os valores das armaduras em cm^2 ou cm^2/m .

Figura 9 – Aba “Dimensionamento” do ARMSUSP

Critérios	Dimensionamento	Detalhamento	Guia Rápido
Armadura de Suspensão			
Asw, sus, apoiada (cm ² /m)	1,47	Asw, sus, grampo (cm ²)	0,00
Asw, sus, apoio (cm ² /m)	3,11		
Armadura Transversal de Cisalhamento		Armadura Transversal Final Adotada	
Viga Apoiada		Viga Apoiada	
Asw,e (cm ² /m)	2,73	Asw,tot,e (cm ² /m)	4,20
Asw,d (cm ² /m)	0,00	Asw,tot,d (cm ² /m)	0,00
Asw,min (cm ² /m)	1,35	Trecho de armação	20,00
Viga Apoio		Viga Apoio	
Asw,e (cm ² /m)	5,36	Asw,tot,e (cm ² /m)	8,47
Asw,d (cm ² /m)	0,61	Asw,tot,d (cm ² /m)	3,72
Asw,min (cm ² /m)	1,54	Trecho de armação	47,33
Dimensionamento da Armadura Longitudinal			
Viga Apoiada		Viga Apoio	
As (cm ²)	6,38	As (cm ²)	7,36
As' (cm ²)	0,00	As' (cm ²)	0,00
As,Vd (cm ²)	1,41	As,Vd (cm ²)	2,41
As,min (cm ²)	0,98	As,min (cm ²)	1,43
As,tot (cm ²)	7,79	As,tot (cm ²)	9,77

Fonte: Acervo dos autores.

Na aba “Detalhamento” (Figura 10), o usuário poderá ver dados como a área efetiva e o número das barras a serem utilizadas, além de escolher o diâmetro (φ) das barras longitudinais e transversais, com recálculo das informações pertinentes.

Por último, a aba de Guia Rápido (Figura 11) está disponível para apoio ao usuário, explicando os critérios e parâmetros principais e apresentando as informações necessárias para que haja um bom uso do aplicativo.

São feitas duas observações neste ponto. A primeira, é que para o aplicativo poder operar, dado que as rotinas estão em Java, é necessária a instalação prévia do “Plugin Java”, gratuito e facilmente encontrado na internet. A segunda, é que será feita, no item seguinte, a discussão pormenorizada de todos os recursos e critérios do aplicativo, discutidos em conjunto com os requisitos das diversas referências consultadas e implementadas. Destaca-se, por fim, que o aplicativo ARMSUSP possui uma versatilidade significativa, calculando todos os dados relativos à armadura de suspensão para cruzamentos de vigas em “Cruz”, em “T” ou em “L”, a partir da introdução dos dados básicos da análise estrutural (esforços), propriedades materiais e os critérios de projeto escolhidos.

Figura 10 – Aba “Detalhamento” do ARMSUSP

Detalhamento da Armadura de Suspensão

As, efe (cm²)

Asw, sus, grampo: 0,00 Φ 8,0 mm 0,00

Detalhamento da Armadura Transversal

Viga Apoiada

Asw,tot,e: 2 Ramos Φ 5,0 mm 9,00 4,36

Asw,tot,d: 2 Ramos Φ 5,0 mm 0,00 0,00

Trecho de armação: 20,00

Viga Apoio

Asw,tot,e: 2 Ramos Φ 6,0 mm 6,50 8,70

Asw,tot,d: 2 Ramos Φ 6,3 mm 16,50 3,78

Trecho de armação: 47,33

Detalhamento da Armadura Longitudinal

Viga Apoiada

As: 4,00 Φ 16,0 mm

As': 0,00 Φ 6,3 mm

Viga Apoio

As: 3,00 Φ 20,0 mm

As': 0,00 Φ 6,3 mm

Fonte: Acervo dos autores.

Figura 11 – Aba “Guia Rápido” do ARMSUSP

Crítérios Dimensionamento Detalhamento **Guia Rápido**

Crítério de Vigas Penduradas

O programa detecta automaticamente se a viga é pendurada em função das dimensões das vigas e de suas elevações.

Vigas Penduradas

Asw, grampo (%) 100,00

Reforço no apoio (%) 50,00

Trecho do reforço (cm) 50,00

Percentuais da armadura em grampo e do reforço na viga de apoio, respectivamente. Os valores de ambos podem ser inferiores, iguais ou maiores que 100%.

Para todos os critérios, à exceção de "CAD/TQS", os percentuais e o trecho de reforço são livres. Para o "CAD/TQS" os valores são 215% para a armadura do grampo, 100% para o reforço, e o trecho mede $(h_2 - d'_2 + b_2)$.

Crítério de Dispensa da Armadura de Suspensão

Dispensa da Armadura de Suspensão

CSA A23.3-14

Fonte: Acervo dos autores.

3 Parâmetros Técnicos e Normativos de Cálculo

Diante da concisa recomendação da norma brasileira, já citada, o engenheiro deve pautar-se principalmente por normas internacionais e outros textos. No que tange a essas referências, esse artigo procura resumir as principais preconizações encontradas e discorrer sobre os pontos importantes e deficiências de cada uma.

Inicialmente destaca-se que o item 22.3 da NBR 6118:2014 aponta que as regiões de introdução das cargas concentradas em elementos estruturais devem ser tratadas como regiões especiais, podendo ser dimensionadas segundo o Método de Bielas e Tirantes. Para os apoios indiretos, o modelo biela-tirante utilizado pode ser admitido como um único tirante, que representará a armadura de suspensão, como ilustrado na Figura 5. O cálculo é feito através da equação elementar definida no item 22.3.3 da NBR 6118:2014 (Equação 1), sendo esta expressão reproduzida por diversas normas internacionais, dada a sua simplicidade e precisão.

$$A_{s,sus} = F_{Sd} / f_{yd} \quad \text{Eq. 1}$$

Perceba-se que o dimensionamento da armadura de suspensão, em si, é algo elementar. As normas divergem fortemente, em especial, acerca de onde dispor (em que viga) e qual o comprimento do trecho desta armadura. Evidentemente, quanto menor o trecho, maior a taxa de distribuição da armadura, posto que a área total corresponde ao valor definido pela Equação 1.

Existem, ademais, vários outros aspectos que devem ser considerados, os quais são expostos em sequência, realizando-se a devida exposição e discussão.

3.1 Armadura de suspensão

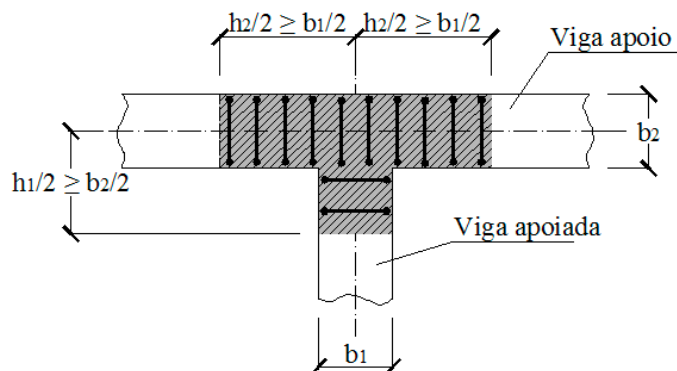
Leonhardt e Mönning (1978) sugerem a disposição mostrada na Figura 12 (parte da armadura em cada viga, e em trechos pré-determinados). Os autores fazem esta determinação fundamentados em ensaios experimentais, os quais indicaram os estribos nas proximidades da região de cruzamento como os mais solicitados. Especificam que sejam adotados os maiores valores entre os estribos de cisalhamento e os de suspensão (não estabelecendo a soma), mas não indicam explicitamente os percentuais da armadura de suspensão em cada uma das vigas.

Além disso, apontam que fatores de redução podem ser usados quando há diferenças de alturas das vigas, mas apenas se as suas faces superiores são coincidentes. Esses fatores de redução parecem ser adequados, pois levam em conta as dimensões das vigas e a modificação do fluxo das bielas de compressão. Quanto menor a viga apoiada, em relação à viga de apoio, mais altas as bielas de compressão efetuam o descarregamento e o cruzamento se comporta ambigualmente como um apoio direto e

indireto, de sorte que não é necessário suspender a totalidade da reação (MATTOCK; SHEN, 1992). Por último, Leonhardt e Mönning (1978) não fazem nenhuma citação especial ao caso das vigas “penduradas”.

Na Figura 12, e nas outras que a sucedem, os termos b e h estão associados à largura e à altura da viga, respectivamente, e os índices 1 e 2 referem-se às vigas apoiada (1) e de apoio (2).

Figura 12 – Recomendação de Leonhardt e Mönning



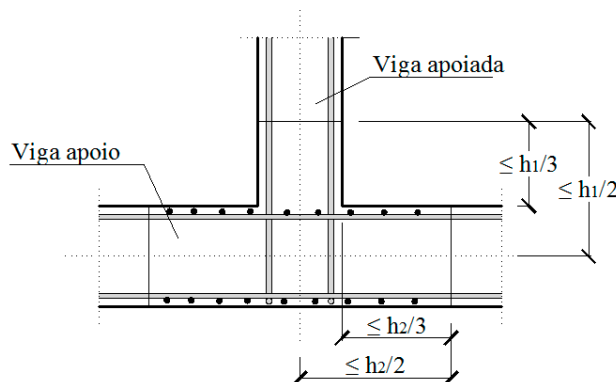
Fonte: adaptada de Leonhardt e Mönning (1978).

O Eurocode 2 (2004) determina o dimensionamento da armadura de suspensão e especifica que ela deve ser somada a qualquer outra armadura transversal existente, necessária por outros motivos, como o cisalhamento e/ou a torção. Esta norma, diferentemente de Leonhardt e Mönning (1978), não aborda qualquer fator de redução e, similarmente, não traz recomendações acerca dos cruzamentos com vigas penduradas.

Embora a norma aponte que os estribos de suspensão devam ser distribuídos de acordo com a região mostrada na Figura 13; ela não traz especificações acerca do percentual de armadura que deve ser posta em cada uma das vigas.

Diante da possibilidade de se colocar a armadura de suspensão nas regiões das duas vigas, seja pela recomendação de Leonhardt e Mönning, seja pelo Eurocode, o aplicativo ARMSUSP inclui a opção de definição livre destas porcentagens. Trata-se do critério “Personalizar”.

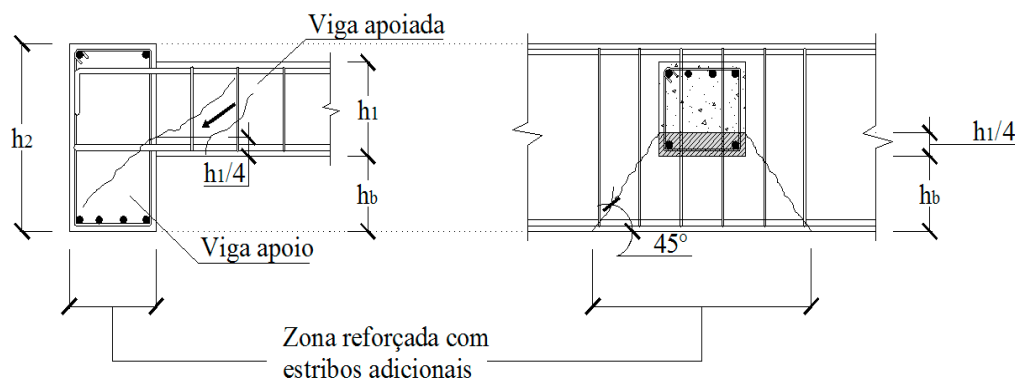
Figura 13 – Recomendação da norma europeia



Fonte: adaptada de CEN (2004).

A norma canadense CSA A23.3-14 (2014), por sua vez, recomenda um fator de redução para o caso de vigas com diferentes níveis ou alturas, dado por $(1 - h_b/h_2)$, onde h_b é a diferença de nível entre as faces inferiores das vigas, e h_2 é a altura da viga de apoio. A totalidade da armadura é colocada na viga apoio e o trecho de distribuição é dado por planos inclinados de 45° que partem de uma altura igual a $h_b + \frac{1}{4} h_1$ (Figura 14).

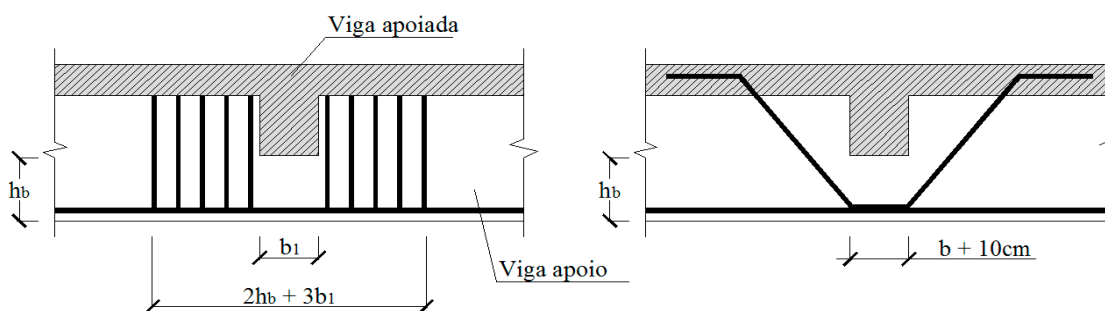
Figura 14 – Recomendação da norma canadense



Fonte: Adaptada de CSA A23.3-14 (2014).

A norma chinesa GB 50010 (2010), por sua vez, adota um trecho de distribuição distinto, correspondente a $2h_b + 3b_1$ (Figura 15) somente na viga apoio e nenhuma aplicação de fatores de redução. A definição de h_b é análoga à da norma canadense. Para a GB 51000:2010, a armadura de suspensão é adicional à de cisalhamento, sendo também mencionada a possibilidade de se utilizar barras dobradas no lugar de estribos fechados, mas de forma mais restrita e seguindo outras orientações.

Figura 15 – Recomendação da norma chinesa



Fonte: Adaptada de GB 50010 (2010).

Por último, o documento de complemento à norma australiana AS 3600 (2009), publicado pela Australian Standards, sugere o uso da armadura de suspensão concentrada totalmente na região de interseção das vigas. Dentre todas as normas pesquisadas, essa se mostra a mais conservadora das recomendações, implicando em uma taxa maior de armadura, pois o trecho de distribuição é menor.

Diante do exposto teórico anterior, é possível elencar os diversos critérios a serem considerados no projeto da armadura de suspensão, e que são completamente ignorados pela NBR 6118:2014:

- (1) Percentual da armadura que pode ser disposta em cada viga (apoio e/ou apoiada, sendo a viga de apoio destacadamente a mais importante);
- (2) Comprimento dos trechos de distribuição da armadura;
- (3) Possibilidades de fatores de redução que considerem os arranjos geométricos entre as vigas, e suas diferenças de nível;
- (4) Possibilidade de dispensa da armadura de suspensão, a ser discutido mais detalhadamente no item seguinte deste texto;
- (5) Definição se é o maior valor, entre a armadura de suspensão e a armadura de cisalhamento convencional, ou se é a soma das duas, que deve ser considerado no detalhamento, e o critério de comparação com a armadura mínima.

O aplicativo ARMSUSP engloba todas essas recomendações, e outras mais (discutidas à frente), servindo perfeitamente de ferramenta para o dimensionamento e o detalhamento dos apoios entre vigas.

3.2 Possibilidade de dispensa da armadura de suspensão

A norma canadense traz recomendações acerca da possibilidade de dispensa da armadura de suspensão caso as faces superiores das vigas estejam niveladas e a tensão de cisalhamento na interface seja menor que certo valor, função da resistência característica do concreto, densidade do agregado (i.e. agregado leve ou normal) e de certos coeficientes de segurança.

Essa possibilidade de dispensa advém do fato de que vigas com menor fissuração transversal não desenvolvem consideravelmente o comportamento de treliça e parte da reação é transmitida ao longo da interface, o que teoricamente reduziria a solicitação sobre o tirante de suspensão, acarretando uma não necessidade da armadura.

Mattock e Shen (1992) conduziram experimentos concluindo que, de fato, a armadura de suspensão pode ser dispensada em certas ocasiões, sugerindo um valor menos conservador que a norma canadense para a tensão cisalhante na interface.

Os ensaios realizados por estes autores revelaram ainda que a presença de um momento fletor negativo na ligação entre vigas (e.g. no caso de vigas com alta rigidez torcional ou em balanço engastadas em outras vigas) altera a distribuição de forças na armadura transversal e os ramos mais próximos da interface contribuem mais para a resistência.

Mattock e Shen (1992), além de Mattock e Kumar (1992), verificaram a adequação das recomendações da norma canadense de 1984, mantidas até hoje na versão de 2014, seja em termos de trecho de distribuição como também no uso de fatores de redução para vigas de diferentes alturas. Mais recentemente, ensaios experimentais conduzidos por Baek (2016) novamente validaram a eficiência das prescrições da CSA A23.3-14.

Diante desta possibilidade de dispensa da armadura de suspensão, o aplicativo ARMSUSP também abrange essas considerações. O usuário deve definir se essa

verificação será realizada ou não, na aba de “Critérios”, e optar por uma das duas formas diferentes. Assim, a tensão cisalhante (τ) na viga apoiada deve ser menor que os seguintes valores:

$$\tau \leq 0,25 \sqrt{f'_c} \quad (\text{MATTOCK; SHEN, 1992}) \quad \text{Eq. 2}$$

$$\tau \leq 0,23 \lambda \phi \sqrt{f'_c} \quad (\text{CSA A23.3-14, 2014}) \quad \text{Eq. 3}$$

Onde λ é um fator de redução que leva em conta o agregado graúdo e Φ é um coeficiente de segurança, sendo possível perceber, ao menos qualitativamente, que a segunda verificação é mais conservadora. No entanto, é preciso ressaltar que a norma brasileira exige essa armadura e não abre possibilidade para a sua dispensa. Todavia, para fins de comparação, essa funcionalidade também foi incluída no aplicativo, podendo ser ativada pelo usuário.

3.3 Efeito da armadura de suspensão na armadura longitudinal

Os ensaios conduzidos por Mattock e Kumar (1992) mostraram que uma armadura de suspensão inadequada causa um aumento de tensões na armadura longitudinal das vigas na região do cruzamento, podendo acarretar rupturas precoces. Os autores estimaram essa tensão através do equilíbrio da seção transversal na região do apoio indireto, coerentemente ao observado nos experimentos.

Dentre as normas, a CSA A23.3-14 é a única que aborda esse efeito. Segundo essa referência, nas regiões de apoios indiretos, deve ser considerada uma força adicional F_{st} para dimensionamento da armadura de flexão, dada pela Eq. 4. Aqui, V_d é o esforço cortante de projeto neste ponto, V_{sw} é a parcela resistida pela armadura transversal de cisalhamento, e θ é o ângulo de inclinação das bielas. O valor de F_{st} dividido pela tensão de escoamento do aço resulta na área de aço adicional de armadura longitudinal ($A_{s,Vd}$). Perceba-se que este acréscimo de armadura deve ser calculado para as duas vigas (suporte e suportada) variando-se, obviamente, os valores dos esforços.

$$F_{st} = (V_d - 0,5V_{sw}) \cotg(\theta) \quad \text{Eq. 4}$$

O ARMSUSP possui essa funcionalidade, integrada a outro critério, que considera a interação entre a armadura de flexão A_s , $A_{s,Vd}$ e à armadura mínima $A_{s,min}$. Haja visto que a norma não explicita qual o procedimento mais adequado, o aplicativo dispõe das seguintes alternativas:

- a. A_s é somada a $A_{s,Vd}$ e o resultado é comparado com $A_{s,min}$, adotando-se a de maior valor como armadura final;
- b. A_s é comparada com $A_{s,min}$ sendo o maior valor somado com $A_{s,Vd}$, e o resultado adotado como armadura final.

Importa destacar que este efeito (conforme a Eq. 4 indica) é função estritamente da diferença entre os esforços cortantes de cada viga, não levando em conta qualquer momento fletor. Assim, a área final da armadura longitudinal necessária na viga (devido à flexão + efeito da suspensão) é fortemente influenciada pelas posições relativas que as vigas se encontram (posição em planta), pois desta maneira altera a forma e os valores dos diagramas de esforços solicitantes de uma e outra viga.

Em termos práticos, para uma melhor compreensão, ilustra-se: se a viga apoio for biapoiada, com uma carga uniformemente distribuída, e a viga apoiada encontrar-se no seu ponto médio, há uma armadura longitudinal principal que não será alterada, pois o cortante de projeto V_d neste ponto médio é relativamente baixo. Embora exista a reação de suspensão, esta não altera a armadura longitudinal.

Por outro lado, se a viga suportada cruzar com a viga suporte próximo a um apoio desta, a influência será mais significativa. Usualmente o cortante de qualquer viga é relevante nas proximidades dos seus apoios (embora aí, certamente, a armadura longitudinal positiva não terá um grande valor em área, podendo até ser mínima).

4 Consideração da Armadura de Suspensão em Programas de Projeto de Estruturas

No presente trabalho os procedimentos de dimensionamento de armadura de suspensão utilizados pelos programas CAD/TQS V20.1 e Eberick V10 são avaliados e comparados. Estes foram escolhidos por serem os de maior utilização nos escritórios do Brasil. Uma discussão mais ampla e maiores detalhes sobre os procedimentos dos referidos programas podem ser encontrados em Pereira *et al.* (2018) e Pereira (2017).

4.1 Eberick V10

O Eberick permite que o usuário defina se a armadura de suspensão será dimensionada em situações de encontro entre vigas de igual altura. Diante das normas e referências técnicas avaliadas, pode-se afirmar que nessas situações sempre deve ser dimensionada uma armadura de suspensão. Desativar esse critério pode conduzir a resultados contra a segurança.

Existe também um segundo critério que permite vigas de maior altura apoiando em vigas de menor altura (i.e. vigas penduradas). Quando ativado, o Eberick dimensiona a armadura de suspensão específica de situações de vigas penduradas; e quando desativado, o programa emite uma tarja de erro e a viga apoio não é dimensionada.

O dimensionamento pelo Eberick em situações onde não há vigas penduradas envolve o cálculo de uma armadura transversal adicional aos estribos e o uso de um “esforço cortante equivalente”. Inicialmente é calculada a área de aço necessária para

suspender a reação (Eq. 1). Nesse valor é aplicado o mesmo fator de redução da norma canadense e destinado 30% dessa área de aço para a viga apoiada e 70% para a viga apoio. Quando há vigas penduradas, o programa dimensiona um grampo para 100% da reação de apoio, a ser detalhado dentro do trecho comum entre as vigas, e um reforço de valor referente a 70% a ser distribuído na viga apoio.

A armadura transversal final, $A_{s,sus}$ é distribuída no trecho adotado pelo programa ($A_{s,sus} / s$), que é igual à altura de cada viga para cada lado do nó, e transformada em um esforço cortante equivalente que resultaria nesta armadura transversal (Eq. 4). Por fim, a armadura transversal total adotada na viga é calculada através das Eqs. 5 e 6. Esse mesmo procedimento é também válido para o reforço no apoio nas situações de vigas penduradas.

$$V_{d,eq} = 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot \frac{A_{s,sus}}{s} \quad \text{Eq. 5}$$

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_d - V_C + V_{d,eq}}{0,9 \cdot d \cdot f_{ywd}} \quad \text{Eq. 6}$$

A partir da Eq. 6 fica evidente a deficiência desse procedimento. Em situações de baixo esforço cortante, o V_C pode superar o V_d e a diferença será subtraída diretamente do $V_{d,eq}$, significando que a contribuição do concreto estaria sendo considerada no cálculo da armadura de suspensão, contrariando a Eq. 1, e as diversas recomendações normativas, que evidenciam o cálculo diretamente da reação de apoio total.

Todavia, em situações de maiores esforços cortantes, quando não há possibilidade de subtração do termo, esse procedimento se mostra coerente.

4.2 CAD/TQS V20.1

No programa CAD/TQS é preciso que o usuário defina previamente qual viga será considerada como o apoio do cruzamento. Essa definição, na verdade um artifício utilizado pelo software, não influencia a análise dos esforços, mas apenas a forma de detalhamento das armaduras.

Sobre o dimensionamento, é preciso que o usuário escolha um dentre os três critérios disponíveis no programa (denominado como critério [K66]). A primeira alternativa dimensiona a armadura de suspensão apenas em situações de vigas penduradas; a segunda, para situações em que a viga apoiada possui altura maior que 10% da viga apoio; e a terceira, semelhante à primeira, incluindo vigas de igual altura. Percebe-se que a segunda alternativa se mostra a mais racional, haja vista que engloba todas as situações já mencionadas.

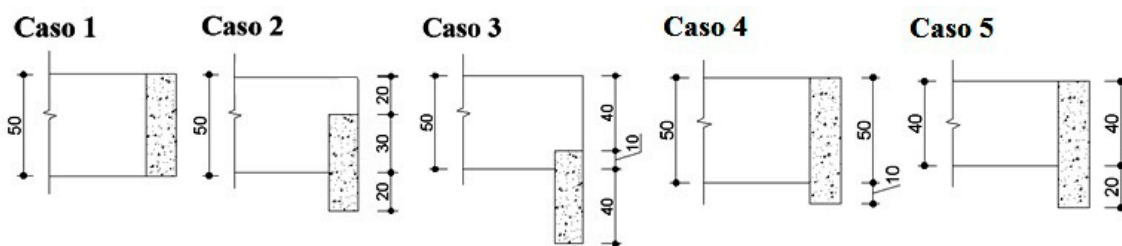
O CAD/TQS distribui a armadura de suspensão, em sua totalidade, na viga apoio e aplica os mesmos fatores de redução que o Eberick V10. Todavia, a área de aço é calculada diretamente a partir da reação, não havendo interferência do “método do esforço equivalente” que pode subestimar seu valor. Nas situações de vigas penduradas, o procedimento é semelhante, mas o grampo é dimensionado para, aproximadamente, 215% da reação de apoio, e um reforço adicional equivalente a 100% do esforço é colocado na viga apoio, o que é mais conservador.

Devido à ausência de preconizações acerca de vigas penduradas, foi incorporado no aplicativo ARMSUSP o dimensionamento semelhante ao realizado pelo Eberick e pelo CAD/TQS, mas o usuário pode definir quais as porcentagens de grampo e de reforço que serão colocadas, e em que vigas (uma delas ou nas duas).

5 Estudos de Casos

Para a avaliação do dimensionamento e detalhamento envolvendo apoios indiretos, utiliza-se o mesmo pórtico modelado por Pereira *et al.* (2018) no Eberick V10 e CAD/TQS V20.1. Nesse modelo a viga apoiada não continuava após o cruzamento (mas terminava na viga apoio, formando um “T”), variando-se a posição relativa destas vigas em 5 (cinco) diferentes casos (Figura 16). Nesta figura tem-se que a viga apoiada (V1) é a que está em vista, e a viga de apoio (V2) é a viga representada em “corte”. Em virtude da falta de prescrições normativas para comparação, apenas as situações sem vigas penduradas foram analisadas.

Figura 16 – Situações de apoio analisadas



Fonte: Adaptada de Pereira et al. (2018).

Os resultados da armadura de suspensão, obtidos com os programas e com o ARMSUSP, para os cinco diferentes critérios de cálculo, são mostrados na Tabela 1, em termos de taxa de armadura por metro (cm^2/m) e na Tabela 2, em trechos de distribuição (cm). As tabelas devem ser lidas em conjunto. Toda a armadura de suspensão foi considerada na viga apoio a fim de uniformizar o padrão de comparação.

A norma Eurocode 2 Part 1-1 (2004) será indicada por Eurocode; a canadense CSA A23.3-14, por CSA; a norma chinesa GB 50010:2010, por GB; e a norma australiana AS 3600 (2009), por AS.

Tabela 1 – Comparação das taxas de armaduras de suspensão (cm^2/m)

Caso	Viga	Eberick	TQS	Leonhardt	Eurocode	CSA	GB	AS
1	V1	2,36	-	-	-	-	-	-
	V2	2,47	3,30	3,96	4,09	4,94	4,40	13,19
2	V1	1,44	-	-	-	-	-	-
	V2	1,29	2,00	2,37	2,46	1,48	1,40	7,91
3	V1	0,48	-	-	-	-	-	-
	V2	0,19	0,70	0,79	0,82	0,33	0,32	2,64
4	V1	2,00	-	-	-	-	-	-
	V2	0,97	2,30	2,77	3,02	2,77	2,55	10,99
5	V1	1,90	-	-	-	-	-	-
	V2	0,41	1,80	2,11	2,30	1,68	1,49	8,79

Fonte: Acervo dos autores.

Tabela 2 – Comparação dos trechos de distribuição adotados (cm)

Caso	Viga	Eberick	TQS	Leonhardt	Eurocode	CSA	GB	AS
1	V1	25,00	-	25,00	24,17	-	-	-
	V2	50,00	62,00	50,00	48,33	40,00	45,00	15,00
2	V1	25,00	-	25,00	24,17	-	-	-
	V2	50,00	62,00	50,00	48,33	80,00	85,00	15,00
3	V1	25,00	-	25,00	24,17	-	-	-
	V2	50,00	62,00	50,00	48,33	120,00	125,00	15,00
4	V1	25,00	-	25,00	24,17	-	-	-
	V2	60,00	70,00	60,00	55,00	60,00	65,00	15,00
5	V1	20,00	-	20,00	20,00	-	-	-
	V2	60,00	70,00	60,00	55,00	75,00	85,00	15,00

Fonte: Acervo dos autores.

Analisando os resultados dos programas, pode-se ver que houve diferença considerável entre as taxas resultantes, mas isto deve ser analisado também em função do comprimento do trecho. Por evidente, quanto menor o trecho, maior será a taxa correspondente.

As principais razões para a diferença é o fato do programa Eberick dividir a armadura de suspensão entre as duas vigas, conforme já mencionado, e ainda utilizar o “método do esforço cortante equivalente”. Neste caso, como o apoio indireto fica no meio do vão da viga apoio, grande parte da armadura de suspensão é reduzida pela contribuição do concreto. Todavia, na viga apoiada, pelo apoio indireto estar na extremidade (onde prevalecem maiores esforços cortantes), não houve redução da armadura de suspensão e a armadura transversal final do Eberick resulta mais conservadora que no CAD/TQS.

É possível perceber também que a norma australiana se revela sempre a mais conservadora, pois a armadura de suspensão é estritamente concentrada na largura

da viga apoiada. Na verdade, os resultados da CSA A23.3-14 e da GB 50010 (2010) são próximos em função do trecho de distribuição adotado.

Contudo, pode-se perceber uma tendência de decréscimo rápido do valor da área de aço para ambas as normas canadense e chinesa, quando se aumentam os desníveis entre as vigas, isso ocorre porque, além do fator de redução aumentar, o trecho de distribuição também está diretamente relacionado a esse desnível, o que também contribui para essa redução. Pode-se ver que, do caso 1 ao caso 3, houve um decréscimo de 93% da armadura.

Por outro lado, os trechos de distribuição adotados pelo Eurocode 2 e Leonhardt e Mönning (1978) dependem apenas das dimensões das vigas, que pouco variaram nos casos analisados (nos casos 1, 2 e 3 não houve variação). Com esses dois critérios a redução de armadura, do caso 1 ao caso 3, foi de 80%.

Na Tabela 3 são mostrados os dados de tensão cisalhante na seção transversal da viga apoiada e os limites impostos pela norma canadense e por Mattock e Shen (1992), para avaliar a possível dispensa da armadura de suspensão.

É possível perceber que o limite da norma canadense foi ultrapassado em todos os casos analisados, de forma que a armadura seria sempre necessária. Todavia, já para o limite imposto pelos autores mencionados, a armadura de suspensão seria sempre dispensável.

Tabela 3 – Valores de tensão cisalhante na interface da viga apoiada e limites

Caso	b (cm)	h (cm)	V_d (tf)	τ_d (MPa)	CSA A23.3-14 (MPa)	Mattock e Shen (1992) (MPa)
1	15,00	50,00	8,63	1,15	0,85	1,43
2	15,00	50,00	8,63	1,15	0,85	1,43
3	15,00	50,00	8,63	1,15	0,85	1,43
4	15,00	50,00	8,68	1,16	0,85	1,43
5	15,00	40,00	8,26	1,38	0,85	1,43

Fonte: Acervo dos autores.

Importa destacar que, a princípio, apenas as vigas 1, 4 e 5 deveriam ser analisadas por este critério, pois a CSA A23.3-14 estabelece que as vigas devem ser niveladas pela face superior. Isto significa que vigas desniveladas, muito menos as penduradas, não podem ter a armadura de suspensão dispensada. Os casos 2 e 3 foram aqui incluídos, entretanto, pois estas não se tratam de vigas penduradas, mas de vigas que se aproximam a apoios diretos (a face inferior da viga apoio é que está em cota inferior).

6 Conclusões

No trabalho foram discutidos diversos aspectos relacionados ao dimensionamento e ao detalhamento da armadura de suspensão nos apoios indiretos. Ficou evidente

que a recomendação da NBR 6118:2014 é insuficiente para o seu projeto, devendo ser expandida e detalhada, com a incorporação de outros critérios, especialmente pelo fato dela ser uma norma reconhecida como internacional, dentre poucas, pela organização ISO. Esta discussão é especialmente oportuna neste momento, haja vista que a NBR 6118:2014 se encontra em processo de revisão.

Consultadas diversas normas estrangeiras, percebe-se que cada uma delas adota uma filosofia de cálculo, invariavelmente mais detalhado que o exposto na NBR 6118:2014. O tema das vigas “penduradas”, por sua vez, é pouco discutido nestas referências. Dentre todas as normas, a canadense mostra-se a mais completa e minuciosa (sempre fundamentada em comprovações experimentais), e também a mais conservadora. Para situações em que as vigas estejam em níveis diferentes, a norma canadense e a chinesa conduzem a armaduras transversais mais elevadas, pois os trechos de distribuição são relativamente reduzidos.

Neste contexto, o tema da armadura de suspensão, em estudo, embora fundamental e de aplicação recorrente, não é de todo consensual, importando que o projetista domine o assunto e lance mão de diferentes critérios a depender do caso concreto.

Assim, o aplicativo ARMSUSP mostra-se uma ferramenta útil e versátil capaz de resumir diversas recomendações acerca dos apoios indiretos, estando disponível de forma gratuita (bastando acessar o link “<https://store.tqs.com.br/apps/armsusp/juhrlo3err>”). Na entrada de dados e dos critérios, o usuário pode escolher entre parâmetros pré-definidos ou personalizar valores de acordo com sua preferência. Os resultados são dados para a fase de dimensionamento e detalhamento. Por fim, o aplicativo também pode ser utilizado como uma calculadora de cisalhamento e flexão de vigas, independente da armadura de suspensão.

Por fim, percebe-se que dois dos programas brasileiros de projeto de concreto utilizados apresentaram resultados aceitáveis (até conservadores), mas que são praticamente invariáveis em relação ao detalhamento. Deveriam incluir outros critérios que permitissem o usuário personalizá-lo de acordo com as suas preferências.

Agradecimentos

A empresa TQS Informática Ltda. por disponibilizar em seu site “TQS Store” o aplicativo ARMSUSP, e pela cessão de cópias do software CAD/TQS. A Universidade Federal do Rio Grande do Norte pela concessão da bolsa de Iniciação Científica.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – procedimento*. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.
- AUSTRALIAN STANDARDS. *AS 3600:2009: Concrete structures – Commentary (Supplement to AS 3600-2009)*. Sydney, 2014.
- BAEK, K. R. *Response of Reinforced Concrete Beams with Indirect Loading*. Thesis (Master of Engineering) – McGill University, Montreal, 2016.
- CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. *CSA A23.3-14: Design of concrete structures*. Mississauga, 2014.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings (EN 1992-1-1:2004:E)*. Brussels: CEN, 2004.
- FUSCO, P. B. *Técnicas de Armar Estruturas de Concreto*. 2. ed. São Paulo: Pini, 2013.
- LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. *Construções de Concreto – Princípios Básicos Sobre A Armação de Estruturas de Concreto Armado*. v. 3. Rio de Janeiro: Interciência, 1978.
- MATTOCK, A. H.; KUMAR, A. Flexural Reinforcement Stress in an Indirectly Supported Reinforced Concrete Beam. *ACI Structural Journal*, Farmington Hills, v. 89, n. 3, American Concrete Institute, July-August 1992.
- MATTOCK, A. H.; SHEN, J. F. Joints Between Reinforced Concrete Members of Similar Depth. *ACI Structural Journal*, Farmington Hills, v. 89, n. 3, American Concrete Institute, May-June 1992.
- PEREIRA, E. M. V. *Regiões Especiais de Concreto Armado: Vigas com Apoio Indireto e Mudança Brusca de Seção*. Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.
- PEREIRA, E. M. V.; NÓBREGA, P. G. B; NÓBREGA, S. H. S. *Análise Teórica e Computacional de Regiões Especiais de Concreto Armado: Vigas com Apoio Indireto*. 60º Congresso Brasileiro do Concreto. Foz do Iguaçu, 2018.
- STANDARD RATING RESEARCH INSTITUTE OF THE MINISTRY OF HOUSING AND URBAN-RURAL DEVELOPMENT. *GB 50010: Code for design of concrete structures*. Pequim, 2010.