

**ANÁLISE DE MÚLTIPLAS HIPÓTESES DE ABERTURA DE VIGA
ARMADA DE CONCRETO**

Autor: Rafael Thiele Galarza (rafael.galarza@edu.pucrs.br)

Orientador: Prof. Me. Paulo Schmeling Kunzler (paulo.schmeling@pucrs.br)

Resumo

O artigo aborda a análise de uma viga de concreto armado, que precisa ser reforçada para permitir a perfuração e a passagem de alimentação elétrica em uma edificação. O estudo foca em diferentes posições para a abertura buscando identificar a solução com o melhor custo-benefício, não sendo abordados diferentes formatos possíveis da abertura na viga. A análise envolve simulações estruturais para avaliar a integridade da viga em cada cenário, a partir de métodos empíricos considerando os impactos na resistência e na capacidade de carga. Não é feita a utilização de *software* especializado para simulações. Além disso, o artigo explora as técnicas de reforço mais adequadas para as diferentes situações de furação. Com base nos resultados obtidos, são apresentadas recomendações sobre a localização ideal para a furação e os métodos de reforço mais eficazes. O estudo contribui para a otimização de projetos de construção civil, oferecendo diretrizes práticas para engenheiros e projetistas, para serem utilizadas em situações semelhantes em outras obras. Conclui-se que possui uma necessidade menor de taxa de armadura as aberturas posicionadas próximas ao centro do vão da viga, bem como a posição com maior consumo ser próxima dos apoios deslocada para cima.

Palavras-chave: reforço em chapa, engenharia civil, concreto armado, abertura, reforço.

1 INTRODUÇÃO

Durante a vida útil de uma edificação, é comum que surjam novas demandas, como a instalação de sistema de ar-condicionado, redes de esgoto e outras infraestruturas. Estas atualizações frequentemente exigem a realização de aberturas adicionais em vigas ou lajes já existentes. No entanto, intervenções desse tipo precisam ser cuidadosamente planejadas para evitar comprometer a integridade estrutural da construção, o que gera a necessidade de uma análise criteriosa, podendo levar até mesmo ao uso de reforços. A perfuração de vigas de concreto, especialmente quando envolve furos de grandes dimensões, requer atenção cuidadosa, uma vez que inevitavelmente exige reforço estrutural prévio à furação, de forma a compensar a perda de resistência. Mudanças nas dimensões e na posição dos furos alteram diretamente a distribuição

de tensões na viga, o que pode exigir soluções de reforço diversas para garantir a segurança da edificação. Assim, a escolha adequada do tipo de furação e do método de reforço é crucial para manter a funcionalidade e resistência da estrutura após a intervenção.

Com base nesses desafios, este estudo de caso, dentro de seu âmbito, objetiva analisar e propor soluções eficazes para furação e para, quando necessário, o reforço, buscando a posição mais eficiente para a intervenção, através de uma análise paramétrica em uma viga de concreto armado. Considera-se, para esta finalidade, as diferentes geometrias e posições na viga; a comparação dos cálculos teóricos quanto a diferença entre as armaduras solicitadas para os diferentes casos; a identificação da solução de furação e reforço que ofereça o melhor custo-benefício, equilibrando eficiência estrutural e aspectos econômicos do projeto.

Para a realização do estudo será adotado nas análises uma viga com vão de 9,15 metros e seção transversal com altura de 120 centímetros e base de 27 centímetros conforme dados extraídos de projetos da edificação. As aberturas em posições diferentes da viga terão dimensões de 40 centímetros de altura por 105 centímetros de comprimento conforme dimensão necessária para a passagem de alimentadores da edificação, tendo f_{ck} e σ_{sk} constantes nas análises.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

As aberturas em vigas envolvem uma série de considerações técnicas que vão desde a definição de sentido e posicionamento dos furos ou aberturas, passando pela análise de necessidade de verificação estrutural, que necessita da verificação dos esforços atuantes ao redor destes furos ou aberturas, os quais dependem das dimensões da viga e do vão a ser vencido por ela, até as diferenças entre reforço em estruturas existentes ou estruturas concebidas em fase de projeto.

Este capítulo aborda a definição de um furo ou abertura, os critérios para determinar quando é necessário reforçar e quando se pode dispensar a verificação estrutural, as posições mais adequadas para o posicionamento do furo ou abertura na estrutura. Posterior as definições iniciais a respeito do assunto de furações e suas nuances, parte-se para a descrição dos métodos de dimensionamento de reforço de furação ou abertura para estruturas concebido em fase de projeto e reforço de furação ou abertura para estruturas já existentes.

2.1 Conceito: O que é uma abertura e um furo

Furos e aberturas em vigas de concreto armado são comumente aplicados na elaboração de edificações por inúmeros motivos, dentre eles, cabe salientar a necessidade de fornecer passagem a estruturas de instalações hidráulicas, elétricas, bem como a de sistemas de ar-

condicionado. Estes furos e aberturas podem transpassar uma viga no sentido horizontal e vertical, também sendo possível a furação ou abertura de uma laje no sentido vertical.

Considerando o foco do trabalho a furação ou abertura de uma viga no sentido horizontal, surge a necessidade da distinção técnica entre um furo e uma abertura. Para tanto, busca-se a análise do item 13.2.5 da NBR 6118:2023, que informa a diferença de nomenclatura entre furos e aberturas em vigas de concreto armado. Nessa definição, define-se furos, como aqueles que possuem pequena dimensão, normalmente sendo desprezíveis para a análise de esforços da viga, enquanto aberturas possuem dimensões maiores, ocasionando a necessidade de verificação estrutural e eventual reforço da viga.

2.2 Motivações e justificativas para realização de perfurações

A necessidade de realizar uma furação ou abertura em uma viga dentro da elaboração de um projeto de edificação ocorre devido inúmeros motivos; contudo, normalmente destaca-se a demanda de outras disciplinas na área da mecânica, como a passagem de dutos para exaustão ou renovação de ar, para a renovação a pleno ou de tubulações de linhas refrigeradas. Já na área da elétrica encontra-se a necessidade da passagem de leitos, eletrocaldas, corrugados e eletrodutos, contendo ramais de alimentação; na hidráulica, existe a necessidade da passagem de ramais de esgoto fluviais, pluviais e de água fria. Cabe salientar que as necessidades de um projeto de PrPCI são inúmeras a depender do tipo de edificação a ser empregado, sendo comumente necessária a realização de furos para a passagem dos ramais *sprinkler* e a para alimentação elétrica própria de detectores de fumaça, de bombas de pressurização e de recalque. Ademais, também se torna necessário prever aberturas ou furos em vigas em fase de projeto, nos casos em que não há um pé direito avantajado, ocasionando em uma passagem das demais disciplinas em um nível muito baixo para a aceitabilidade da demanda arquitetônica.

Há, ainda, os casos em que se faz necessário furar uma viga já existente em uma edificação, para compatibilização com projeto de retrofit ou de regularização, como nos casos de furos para passagem de tubulações de prevenção contra incêndios em edificações muito antigas datadas de antes da aplicabilidade da prevenção, ou, no caso aberturas para passagem de dutos para climatização de uma edificação, que possuía um método obsoleto de refrigeração, que está sendo modernizado.

2.3 Diretrizes para avaliação da necessidade de reforço

A referida norma delimita uma série de hipóteses de furos, em que não é necessária a realização de análise estrutural. No entanto, isso não é dito a respeito de aberturas, o que acentua a necessidade de detalhamento específico para aberturas em vigas de concreto armado.

As hipóteses descritas na norma para dispensa de análise estrutural são:

“a) furos em zona de tração e a uma distância da face do apoio de no mínimo $2h$, onde h é a altura da viga;

b) dimensão do furo de no máximo 12 cm e $h/3$;

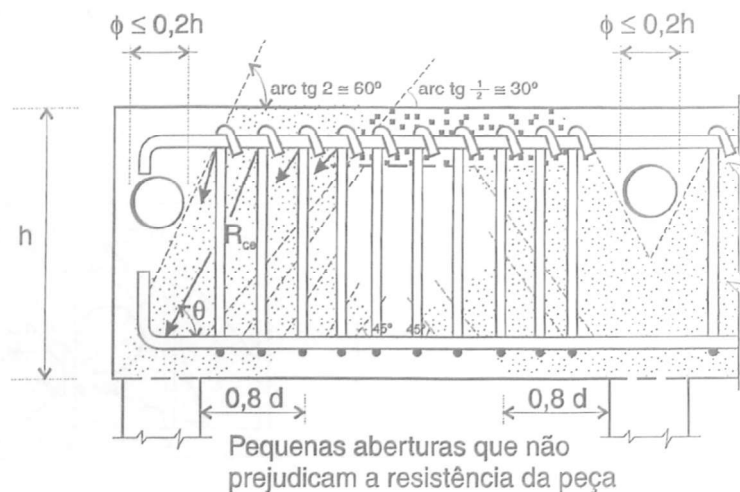
c) distância entre faces de furos, em um mesmo tramo, de no mínimo $2h$;

d) cobrimentos suficientes e não seccionamento das armaduras.”

Para tanto, qualquer caso de furo ou abertura em viga que se encontre não preenchendo os requisitos acima citados requer a realização da verificação de necessidade de reforço.

Em (Fusco, 1995), é prevista situação, na qual é possível realizar furação em desacordo com o item a) da NBR 6118:2023 supracitado, desde que se atentando em não haver carregamento vertical sobre o trecho da viga que se encontra sobre o apoio e não cruzar a linha da biela diagonal, responsáveis pela transmissão de esforços internos de compressão da viga ao apoio como exemplificado no furo à esquerda na figura 1.

Figura 1: Comportamento das bielas em viga de concreto armado



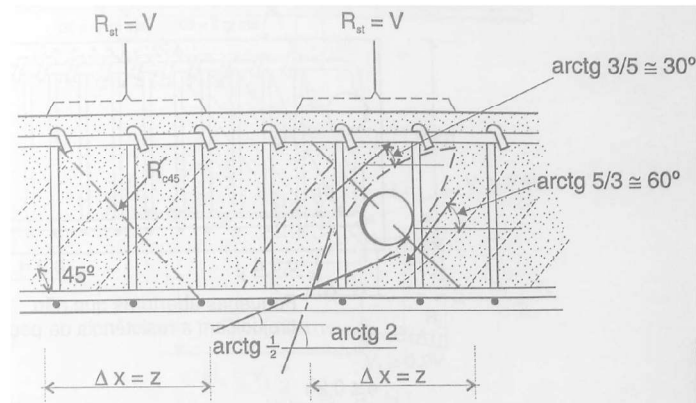
(FONTE: Fusco, 1995)

2.4 Esforços no entorno da abertura

Expostas as delimitações exigidas pela norma NBR 6118:2023, busca-se um maior entendimento a respeito dos esforços atuantes no entorno de um furo ou abertura. Parte-se,

então, para uma análise mais profunda na bibliografia do Fusco, a qual afirma que as bielas diagonais, de acordo com a figura 2, admitem para efeito de cálculo uma inclinação limite de $\arctg(3/5)$ ($\approx 60^\circ$) e $\arctg(5/3)$ ($\approx 30^\circ$).

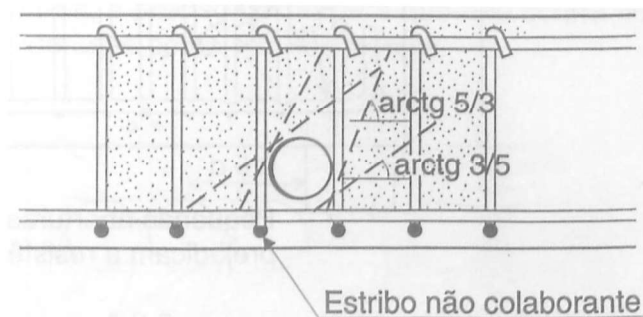
Figura 2: Comportamento das bielas em viga de concreto armado



(FONTE: Fusco, 1995)

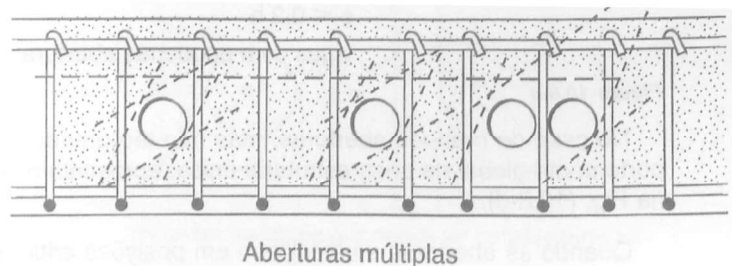
Além disso, cabe ressaltar, como está ilustrado na figura 3, que os furos e aberturas podem restringir a eficiência dos estribos da viga, assim como múltiplos furos/aberturas com proximidade podem ocasionar um maior comprometimento da peça estrutural, como verifica-se na figura 4.

Figura 3: Estribo com eficiência restringida por furo em viga de concreto armado



(FONTE: Fusco, 1995)

Figura 4: Aberturas múltiplas em viga de concreto armado



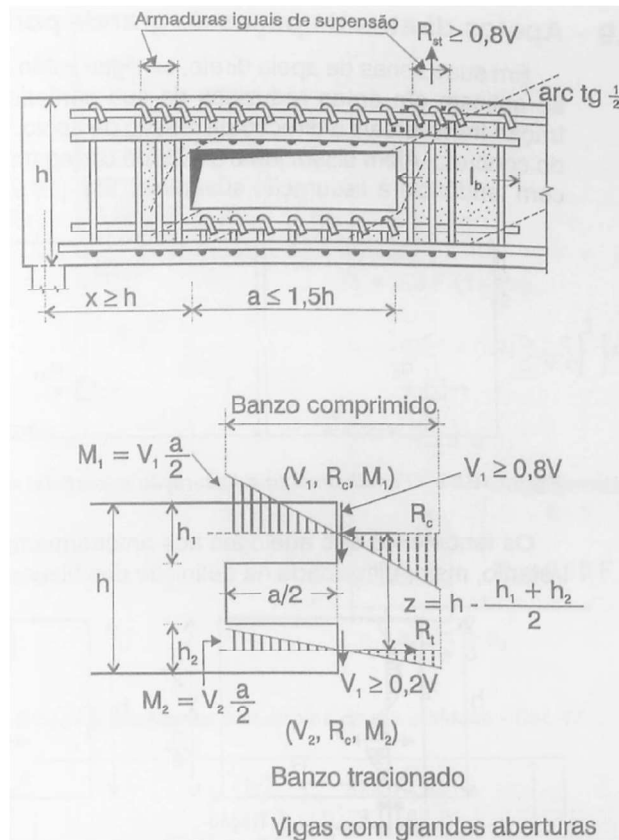
(FONTE: Fusco, 1995)

Para casos de aberturas com pequenos diâmetros, onde $\phi \leq 0,2h$ sendo ϕ o diâmetro do furo de seção circular e h a altura da viga de concreto armado, (Fusco, 1995) apresenta um critério de diminuição da resistência a cisalhamento do trecho em questão.

$$\tau_{wd} = \left(\frac{0,8A_{(AB+CD)}}{A_{AD}} \right) 0,3f_{cd} \quad (1)$$

Já para os casos de aberturas com grandes dimensões, onde $\phi > 0,2h$, (Fusco, 1995) exemplifica uma situação hipotética com o respectivo critério de dimensionamento mostrado na figura 5. Nesta situação, é possível identificar armaduras de suspensão nas laterais da abertura, a fim de transferir aproximadamente 80% do esforço cortante para o banzo superior que se encontra comprimido em estágio I. O restante de esforço cortante aproximado de 20% deve permanecer no banzo inferior tracionado sendo absorvido pela armadura positiva da viga, asserção também defendida na bibliografia de (Leonhardt e Monnig, 1978).

Figura 5: Abertura de grande dimensão em viga de concreto armado com critério de dimensionamento



(FONTE: Fusco 1995)

2.5 Posicionamento do furo vs. vantagens e desvantagens

De acordo com (Leonhardt e Monnig, 1978), deve-se sempre procurar alocar a furação ou abertura na alma no trecho com menor solicitação de força cortante. Tendo isso em vista e

analisando a monografia de (Kaufmann, 2016) a respeito da Verificação de Vigas de Concreto Armado com Aberturas na Alma, que aborda os locais mais adequados para o posicionamento do furo ou abertura na viga, verifica-se os locais com menor incidência possível de força cortante, como no centro do vão de uma viga biapoiada e em suas extremidades próximo ao apoio fora da biela comprimida como no exemplo supracitado da figura 1. Posicionar furos ou aberturas em local com alta incidência de esforço cortante acarreta uma elevação da carga, que a armadura de reforço terá de compensar para um furo de igual dimensão alocado em um local com pouca incidência de esforço cortante.

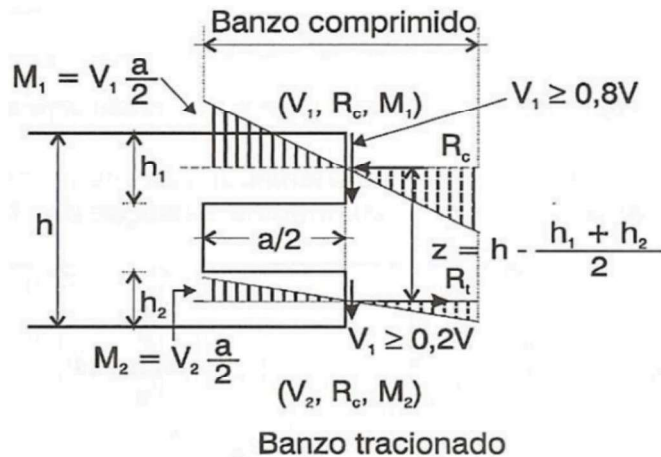
É aconselhável, também, realizar um furo ou abertura em uma zona de tração da viga que se encontra em estágio II, ao passo que o dimensionamento da viga em estágio II é realizado desprezando a resistência a tração do concreto, sendo apenas considerado para resistir ao esforço de tração a resistência do aço. Realizar um furo em uma zona de estágio I iria reduzir a seção útil de concreto que resiste a compressão, aumentando a necessidade do uso de aço para compensar a redução de resistência do concreto; tornando-se, portanto, uma abordagem antieconômica.

2.6 Dimensionamento de reforços para furo ou abertura horizontal em vigas em fase de projeto

É necessário realizar a divisão entre as metodologias de dimensionamento de reforço para estruturas de concreto ainda não executadas, onde é possível embutir o reforço na estrutura; e o dimensionamento de reforço para estruturas de concreto já existentes, demandando que a armadura de reforço seja executada na face externa da viga.

De acordo com (Fusco, 1995), como mostrado na figura 5, o dimensionamento do reforço da abertura da viga inicia-se uma vez que já existem os dados geométricos da seção, bem como as reações externas e internas para seção cheia. Adota-se como valor de cortante $V_1 = 0,8.V$, sendo o valor de 0,8 representativamente igual a 80% do valor de cortante aplicado na seção cheia da viga e V_1 o valor aplicado de cortante no banzo comprimido. Para a seção tracionada adota-se $V_2 = 0,2.V$, onde 0,2 representa 20% do valor de cortante aplicado na seção cheia da viga.

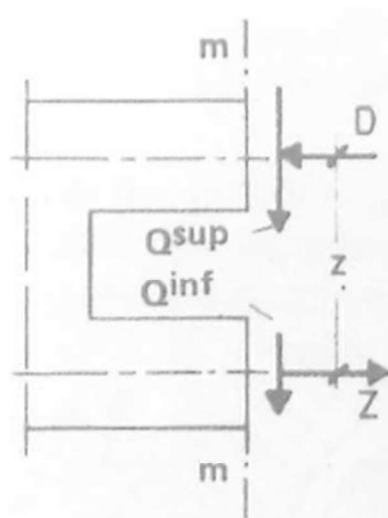
Figura 6: Esforços no entorno da abertura



(FONTE: Leonhardt e Monnig, 1978)

A partir da determinação do valor distribuído do cortante entre os banzos tracionados e comprimidos, pode-se obter o valor de momento empregado em cada banzo pelas fórmulas M_1 e M_2 . A partir disso, também se extrai o braço de alavanca da força de momento aplicada a viga com a fórmula de z e, devido a interrupção da seção pela abertura, permite-se interpretar o momento como um binário, que apenas traciona ou comprime respectivamente, agindo como forças normais nos banzos da abertura como demonstrado na figura abaixo.

Figura 7: Desenho esquemático de forças resultantes em viga com abertura



(FONTE: Leonhardt e Monnig, 1978)

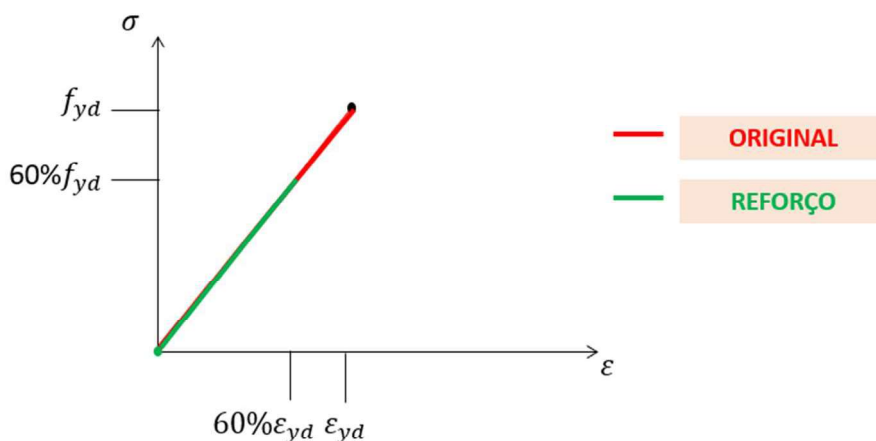
A partir da identificação das forças aplicadas aos banzos, pode-se dimensionar as armaduras longitudinais e as armaduras transversais para o trecho comprimido (flexo-compressão) e tracionado (flexo-tração). Também, é necessário fazer uso de armadura de suspensão para 80% do cortante da viga ser destinado ao bordo comprimido, alocando-a em ambas as laterais da

abertura, devendo ser distribuída em cada um dos lados a uma distância equivalente a $\frac{1}{4}$ da altura da viga.

2.7 Dimensionamento de reforços para furo ou abertura horizontal em vigas após a execução da estrutura

O dimensionamento de reforço para vigas existentes apoia-se na análise da obra de Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto (Ripper, 1998), da qual é possível extrair o entendimento do dimensionamento de um reforço aplicado a uma viga existente. Para isso, primeiramente é necessário entender a limitação que o reforço sofre, uma vez que ele fica restringido pela porcentagem de carga restante para o escoamento da armadura original. Isso ocorre, já que o módulo de elasticidade do material de reforço e das armaduras originais é igual ou muito semelhante, e a armadura original já se encontra parcialmente carregada, enquanto a armadura de reforço não. Por isso, a armadura de reforço não poderá ser dimensionada para o seu limite de escoamento, devendo respeitar o limite de escoamento da armadura original. O exemplo da figura 8 demonstra uma limitação hipotética da armadura de reforço em 60% para uma armadura original já solicitada em 40%.

Figura 8: Exemplo de diagrama comparativo tensão x deformação entre armadura original e reforço.



(FONTE: Krunzler, 2024)

A partir da análise do dimensionamento de reforço para uma abertura concebida em fase de projeto, entende-se a necessidade do dimensionamento de cinco armaduras, sendo elas as armaduras para resistir ao cortante no banzo comprimido, ao cortante no banzo tracionado, à flexo compressão no banzo comprimido, à flexo tração no banzo tracionado e à suspensão nas extremidades da abertura.

Para o dimensionamento do reforço para aberturas em viga existente, o dimensionamento das chapas para resistir ao cortante dos banzos deverá ser em igual proporção ao do

dimensionamento para viga em fase de projeto, se não houver furação alguma na viga. Contudo, se já houver um furo ou abertura, o reforço deve ser a diferença entre o reforço original e o dimensionado. Para as chapas que resistirão ao reforço de flexo tração e flexo compressão, o equacionamento deve ser o equivalente ao aplicado para a determinação da armadura de um pilar. Já para o dimensionamento da chapa de suspensão de carga, seu dimensionamento deverá ser equivalente ao do cortante dos banzos. Evidencia-se que a armadura resistente ao esforço transversal e longitudinal do banzo comprimido, bem como a armadura de suspensão da abertura apesar de serem calculadas separadamente, na prática elas se sobrepõem, sendo necessária a verificação da chapa adotada para todos os esforços em uníssono e em caso de não atendimento das solicitações, a mesma deve ser majorada até se tornar adequada.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Método de Pesquisa

O método de pesquisa pode ser classificado como pesquisa quantitativa quanto a sua abordagem, uma vez que busca realizar uma classificação, analisando os dados das variações das vigas com aberturas, a partir de planilha Excel desenvolvida para o estudo, a fim de demonstrar a melhor opção de posicionamento de abertura. Ao passo que os dados da abertura e viga são oriundos de uma possibilidade de passagem de alimentador de um projeto do setor de projetos do departamento de infraestrutura do estado (DINFRA), admite-se tratar de uma pesquisa aplicada.

A pesquisa busca demonstrar a melhor abordagem de posicionamento de furação dentro de um espectro de possibilidades, apresentando características exploratórias, ao propiciar uma análise detalhada das diversas posições de aberturas, aspirando a otimização de custos e priorizando estruturas que minimizem o consumo de materiais e recursos. Essa abordagem permite identificar soluções eficientes e economicamente vantajosas, contribuindo para a sustentabilidade e para a eficiência na construção de vigas de concreto armado. Tal abordagem possui caráter experimental, uma vez que abrange múltiplas hipóteses de posicionamento da abertura na viga. Busca-se, assim, uma solução otimizada, que não apenas atenda aos requisitos estruturais, mas também promova a eficiência no uso de materiais e recursos. Esta análise aprofundada permite identificar o método mais eficaz e economicamente vantajoso, contribuindo para a melhoria das práticas de construção e para a minimização de custos.

3.2 Método de Trabalho

O presente estudo adota uma estrutura metodológica como demonstrado na figura 9, que inicia a partir da definição das múltiplas posições de abertura nas vigas para o dimensionamento, com o objetivo de obter resultados diversificados e otimizar a análise das soluções propostas.

Após a etapa de definição das furações, é realizado o dimensionamento de todas as armaduras de reforço necessárias para garantir a segurança da solução proposta. Esse dimensionamento envolve o detalhamento de cálculo das características da estrutura, considerando fatores como a distribuição de cargas de acordo com a posição do furo em relação a viga, armaduras longitudinais, transversais e de suspensão, taxa de armadura da estrutura e diâmetro das barras de aço adotadas para a aplicação do reforço.

Em sequência, segue a análise dos dados de dimensionamento previamente fornecidos, onde se busca identificar a estrutura mais econômica e viável do ponto de vista executivo, além da identificação das características que levam as outras estruturas a serem menos econômicas ou inviáveis do ponto de vista construtivo.

Figura 9: Fluxograma de etapas do método de trabalho



(FONTE: Elaborada pelo autor)

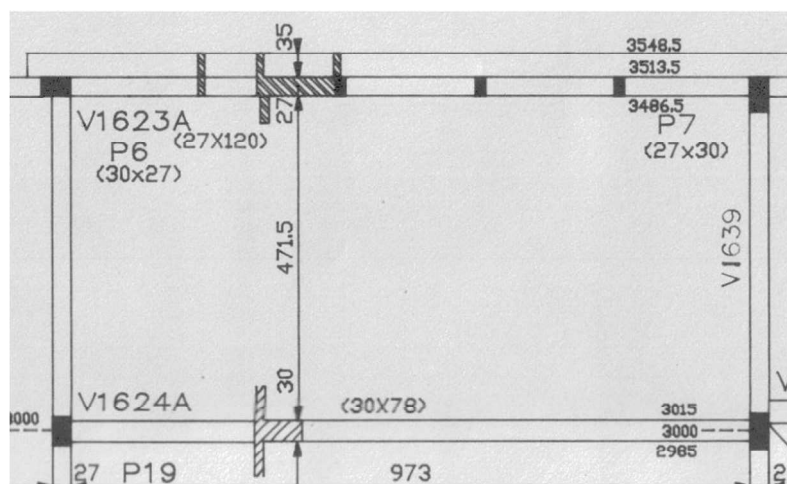
4. DESENVOLVIMENTO

4.1 APRESENTAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

O presente artigo procura analisar com uso de métodos empíricos de dimensionamento das diferentes posições definidas para aberturas alocadas em uma viga já existente afim de se passar a alimentação elétrica da edificação. Considera-se que o reforço adotado seja o método de chapas de aço coladas com resina epóxi, execução de reforço em viga já existente. A análise de

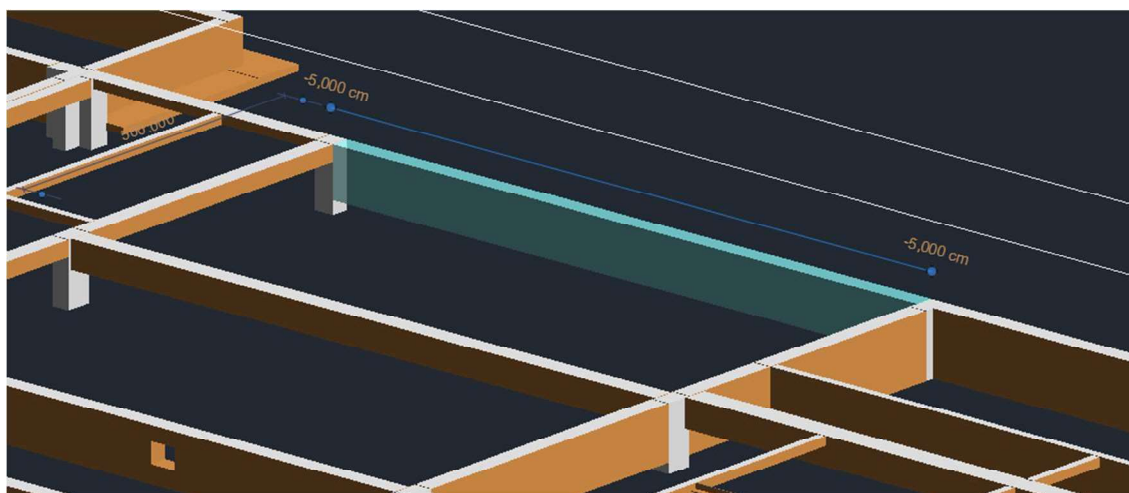
furação em múltiplas posições é realizada na viga V1623A do 14º andar da edificação Tribunal de Justiça do Rio Grande do Sul com dimensão de seção transversal de 27cm de base por 120cm de altura, adotando-se um comprimento de 9,15m de vão conforme figura 10 e verificado em loco. Também se considera para efeito de cálculo que a viga se encontra bi-apoiada entre os dois pilares P6 e P7, e que a laje entre a viga V1623A e V1624A possui um comprimento de 5m.

Figura 10: Trecho da prancha S114 evidenciando a viga V1623A na edificação Tribunal de Justiça do Rio Grande do Sul



(FONTE: DINFRA, 1992)

Figura 11: Viga V1623A analisada em destaque em *software* Revit

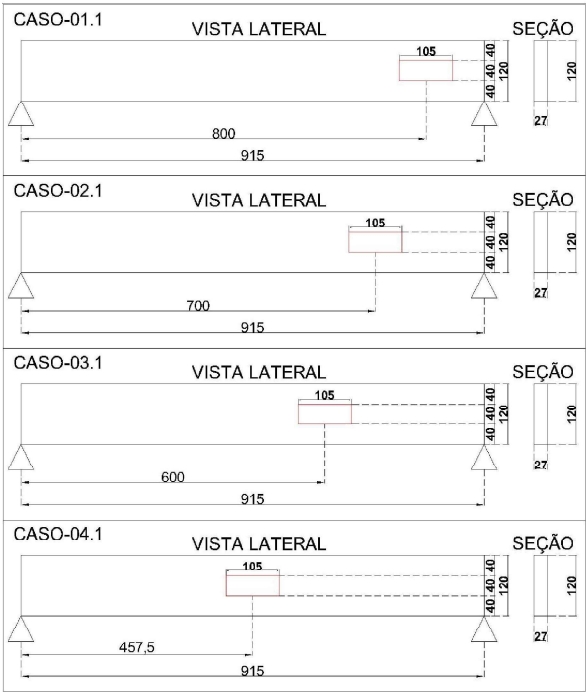


(FONTE: DINFRA, 2024)

A fim da obtenção do reforço mais otimizado, propõe-se a análise da abertura necessária para a passagem da alimentação elétrica com 105 cm de base por 40 cm de altura em diferentes posições da viga analisada afim de se obter resultados de esforços e armaduras necessárias para o reforço das aberturas distintas. Optou-se por posicionar as hipóteses de aberturas da viga em

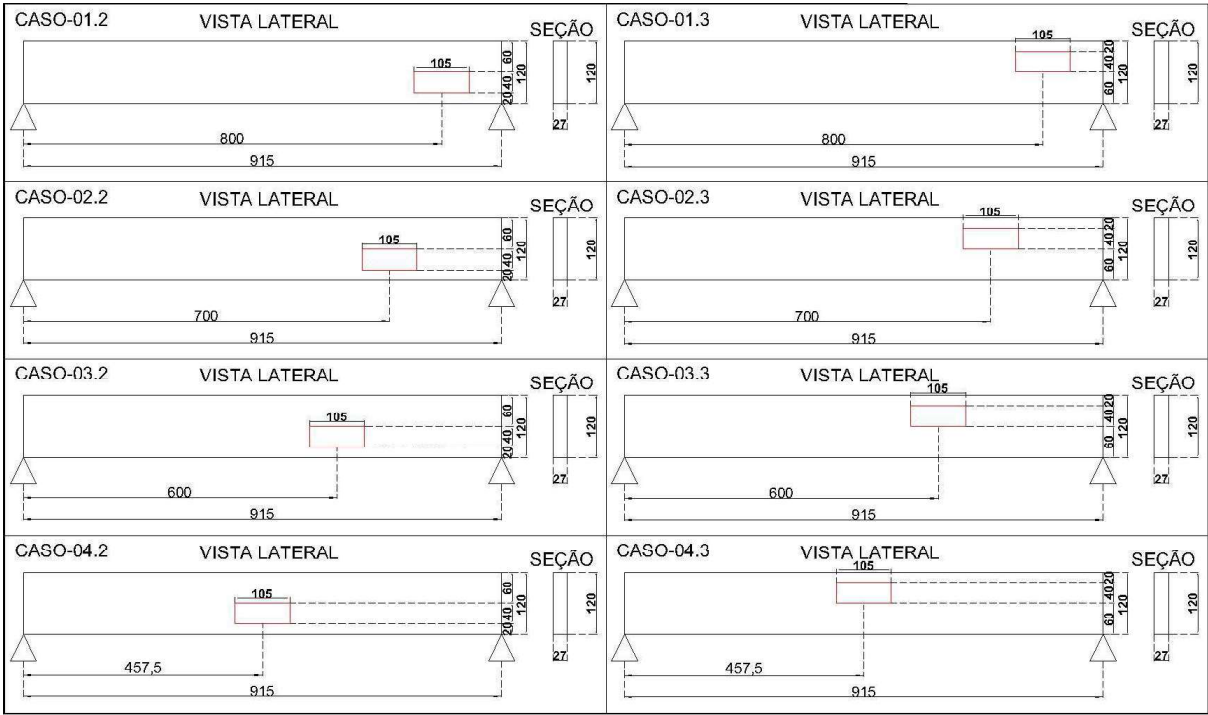
3 alturas diferentes e com 4 variações de posição horizontal ocasionando em 12 diferentes possibilidades de abertura detalhadas nas figuras 12 e 13.

Figura 12: Casos 01.1, 02.1, 03.1 e 04.1 das aberturas na viga analisada



(FONTE: Elaborada pelo autor)

Figura 13: Casos 1.2, 1.3, 2.2, 2.3, 3.2, 3.3, 4.2, 4.3 das aberturas na viga analisada



(FONTE: Elaborada pelo autor)

4.2 REAÇÕES EXTERNAS E SOLICITAÇÕES INTERNAS

No levantamento de documentos não foi possível localizar uma planta detalhando a armadura longitudinal e transversal da viga analisada, restando realizar um dimensionamento afim de se obter uma aproximação das armaduras transversais e longitudinais com uso de cargas solicitantes arbitradas. A partir dos dados supracitados e considerando o peso próprio de 25kN/m^3 para o concreto da viga e da laje, foi possível arbitrar as cargas solicitantes de peso próprio da viga (ppv) e da laje (ppl) adotando a espessura da laje como 15 cm. Também pode-se chegar na carga de impermeabilização (imp) e acidental (a) analisando o tipo de edificação e se tendo a dimensão da laje. Então, a partir da obtenção da carga distribuída aplicada à viga analisada, é possível calcular as reações externas dos apoios da viga (V_a) e (V_b), conjuntamente com suas solicitações internas de cortante (V_k) e momento (M_k), conforme detalhado no quadro 1.

Quadro 1: Cargas arbitradas, reações externas e internas

	REAÇÕES PARA VIGA BIAPOIADA COM CARGA DISTRIBUIDA												
CASO	DADOS DA ESTRUTURA									REAÇÕES EXTERNAS		SOLICITAÇÕES INT. TRECH. X	
	L (m)	q(ppv) (kN/m)	q(ppl) (kN/m²)	q(imp) (kN/m²)	q(a) (kN/m²)	q(laje) (kN/m²)	Comp. Laje	R,L (kN/m)	q (kN/m)	Va (kN)	Vb (kN)	Vk (kN)	Mk (kN.m)
CASO-01	9.15	8.10	3.75	1.50	3.00	8.25	5.00	20.63	28.73	131.42	131.42	131.42	300.62

(FONTE: Elaborado pelo autor)

4.3 DADOS PARA A DETERMINAÇÃO DA ARMADURA LONGITUDINAL E TRANSVERSAL

Tendo as reações externas e solicitações internas da viga, se faz necessário para o dimensionamento da armadura longitudinal e transversal a obtenção dos dados da seção transversal, a definição das propriedades do concreto e aço a serem utilizadas no dimensionamento, bem como os fatores de segurança adotados para a determinação da resistência de projeto dos materiais empregados respeitando as delimitações da NBR 6118. Todos os dados se encontram devidamente detalhados no quadro 2.

Quadro 2: Dados iniciais para dimensionamento da armadura longitudinal e transversal da viga

CASO	DADOS DA SEÇÃO TRANSVERSAL				PROPRIEDADES DO MATERIAL		RESISTÊNCIA DE PROJETO				
	b (cm)	h (cm)	d' (cm)	d (cm)	f _{ck} (MPa)	f _{yk} (kN/cm ²)	FS	f _{cd} (kN/cm ²)	σ _{cd} (kN/cm ²)	FS	f _{yd} (kN/cm ²)
CASO-01	27,00	120,00	2,50	117,50	25,00	50,00	1,40	1,79	1,52	1,15	43,48

(FONTE: Elaborado pelo autor)

4.3.1 DETERMINAÇÃO DA ARMADURA LONGITUDINAL

A partir de todos os dados expostos até então, pode-se realizar o dimensionamento da estimativa de armadura longitudinal existente na viga analisada majorando o esforço de momento máximo identificado na análise de solicitações internas da viga. Salienta-se que para o dimensionamento constatou-se não ser necessário a utilização de armadura dupla longitudinal na viga devido a seu esforço de momento solicitado “Md” ser inferior ao máximo momento aplicável a estrutura sem entrar em estágio 4 “Mdlim”. Portanto, será considerado que foi adotado 2Ø5 na parte superior da seção transversal apenas para firmar a armadura transversal durante a concretagem da viga.

A partir da obtenção da armadura longitudinal “As” pelo dimensionamento, se torna necessário extrair todos os possíveis conjuntos de bitolas que possivelmente foram adotadas pelo projetista original da estrutura respeitando a NBR 6118 vigente na época. Todos os conjuntos de bitolas possíveis se encontram demonstradas no quadro 4, de onde se adota para continuidade dos dimensionamentos das aberturas o conjunto 5Ø16 como sendo a armadura longitudinal existente por se considerar o mais adequado a situação proposta.

Quadro 3: Dimensionamento da armadura longitudinal da viga

DIMENSIONAMENTO									
FS	Md (kN.cm)	Mdlim (kN/cm)	a	b	c	Δ+	Δ-	As (cm ²)	Asmin (cm ²)
1,40	42086,25	212928,46	-20,49	4815,40	-42086,25	9,09	225,91	8,57	4,86

(FONTE: Elaborado pelo autor)

Quadro 4: Possíveis bitolas adotadas pelo projetista original da viga analisada

POSSÍVEIS OPÇÕES DE ARMAÇÃO							
5	6,3	8	10	12,5	16	20	25
44Ø5	28Ø6,3	18Ø8	11Ø10	7Ø12,5	5Ø16	3Ø20	2Ø25

(FONTE: Elaborado pelo autor)

4.3.2 DETERMINAÇÃO DA ARMADURA TRANSVERSAL

Já para o dimensionamento da armadura transversal, utiliza-se da análise de esforços internos da viga para a determinação do cortante máximo aplicado a ela, a partir do que é possível, conjuntamente com os dados da seção transversal, propriedades do material e resistências de projeto demonstrados no quadro 2, determinar a segurança da biela de concreto, bem como a determinação de Asw necessária para definir a quantidade de barras adotadas para atender a

solicitação de cortante. De forma análoga a da armadura longitudinal, também é necessário estimar a bitola de aço e o espaçamento entre estribos adotado pelo projetista original. Fazendo uso da mesma lógica, lança-se todas as possíveis configurações de estribos que atenderiam ao valor em cm^2/m de A_{sw} , como demonstrado no quadro 5.

Quadro 5: Dimensionamento da armadura transversal conjuntamente com possíveis bitolas adotadas pelo projetista original da viga analisada

DIMENSIONAMENTO ARMADURA TRANSVERSAL									
DADOS DA SEÇÃO TRANSVERSAL						POSSÍVEIS OPÇÕES DE ARMAÇÃO COM 2 - RAMOS			
FS	Vsd (kn)	Vsd2 (kn)	Vc (kn)	Asw (cm^2/m)	Aswmin (cm^2/m)	5	6,3	8	10
1,40	183,98	1376,64	244,12	-1,31	2,77	Ø5 c/14	Ø6,3 c/22	Ø8 c/30	Ø10 c/30

(FONTE: Elaborado pelo autor)

No dimensionamento da armadura transversal da viga, evidencia-se que V_{sd2} possui um valor elevado em relação a V_{sd} , o que além de demonstrar que a segurança da biela está atendida, demonstra que à uma margem elevada. Também se denota que foi adotada a armadura transversal mínima uma vez que o valor calculado para A_{sw} possui valor negativo. Isso se dá devido a pouca incidência de cortante para a altura da seção de concreto. Com isto junto com a ausência de necessidade de armadura dupla na referida viga conclui-se que a armadura transversal que foi adotada para a execução da viga existente foi Ø5 c/14.

4.4 DADOS PARA DIMENSIONAMENTO DOS REFORÇOS DAS ABERTURAS

Para realizar o dimensionamento do reforço de abertura em chapa de aço com resina epóxi, executado em viga existente, para cada proposta de abertura analisada, primeiro se faz necessário o dimensionamento do reforço de abertura da viga convencional como se a armadura fosse alocada internamente ao maciço de concreto, afim de se identificar as armaduras necessárias para resistir aos esforços de momento e cortante nos banzos, bem como a armadura de suspensão para transferir o cortante do banzo tracionado ao comprimido para cada caso analisado. Para obtenção destes dados utiliza-se dos conhecimentos de (Fusco, 1995) para extrair as dimensões dos banzos tracionados e comprimidos, distância do eixo da abertura ao apoio esquerdo denominado 'S', bem como os esforços de momento e de cortante que ensejarão nos mesmos em cada caso isolado. Salienta-se que, como se trata de uma viga bi-apoiada, em qualquer uma das posições de abertura definidas para a análise, o banzo comprimido corresponderá ao banzo superior enquanto o banzo tracionado ao inferior. Também se define a solicitação de cortante que se aplica a armadura de suspensão responsável por transferir a

carga do bordo tracionado para o comprimido. Para tal, foi elaborado uma tabela resumo exposta no quadro 6 com todos os dados pertinente para o desenvolvimento do dimensionamento. Dentre os dados se encontra as dimensões constantes de base **a** e altura **h** da abertura, bem como a altura do banzo comprimido **Hc** e tracionado **Ht**, suas alturas de seção efetivas **dc** e **dt**, a altura do centro da abertura em relação ao apoio da esquerda da viga **S**, o momento **Ms** e cortante **Vs** aplicável a cada abertura, o braço de alavanca do momento **Z**, e por fim os esforços normais, cortantes e de momento aplicáveis aos banzos comprimidos e tracionados de cada abertura **Nc**, **Nt**, **Vc**, **Vt**, **Mc**, **Mt**.

Quadro 6: Dados para o dimensionamento das armaduras da abertura

DIMENSIONAMENTO DAS CARGAS ATUANTES NOS BANZOS DA ABERTURA																
CASO	DIMENSÕES DO FURO							DIMENSIONAMENTO DE CARGAS								
	a (cm)	h (cm)	Hc (cm)	dc (cm)	Ht (cm)	dt (cm)	S (m)	Ms (kn.cm)	Vs (kn)	Z (cm)	Nc (kn)	Nt (kn)	Vc (kn)	Vt (kn)	Mc (kn.cm)	Mt (kn.cm)
CASO-01.1	105,00	40,00	40,00	37,50	40,00	37,50	8,00	13213,50	98,38	80,00	165,17	165,17	78,71	19,68	4132,09	1033,02
CASO-02.1	105,00	40,00	40,00	37,50	40,00	37,50	7,00	21615,56	69,66	80,00	270,19	270,19	55,73	13,93	2925,64	731,41
CASO-03.1	105,00	40,00	40,00	37,50	40,00	37,50	6,00	27145,13	40,93	80,00	339,31	339,31	32,75	8,19	1719,19	429,80
CASO-04.1	105,00	40,00	40,00	37,50	40,00	37,50	4,58	30061,61	0,00	80,00	375,77	375,77	0,00	0,00	0,00	0,00
CASO-01.2	105,00	40,00	60,00	57,50	20,00	17,50	8,00	13213,50	98,38	80,00	165,17	165,17	78,71	19,68	4132,09	1033,02
CASO-02.2	105,00	40,00	60,00	57,50	20,00	17,50	7,00	21615,56	69,66	80,00	270,19	270,19	55,73	13,93	2925,64	731,41
CASO-03.2	105,00	40,00	60,00	57,50	20,00	17,50	6,00	27145,13	40,93	80,00	339,31	339,31	32,75	8,19	1719,19	429,80
CASO-04.2	105,00	40,00	60,00	57,50	20,00	17,50	4,58	30061,61	0,00	80,00	375,77	375,77	0,00	0,00	0,00	0,00
CASO-01.3	105,00	40,00	20,00	17,50	60,00	57,50	8,00	13213,50	98,38	80,00	165,17	165,17	78,71	19,68	4132,09	1033,02
CASO-02.3	105,00	40,00	20,00	17,50	60,00	57,50	7,00	21615,56	69,66	80,00	270,19	270,19	55,73	13,93	2925,64	731,41
CASO-03.3	105,00	40,00	20,00	17,50	60,00	57,50	6,00	27145,13	40,93	80,00	339,31	339,31	32,75	8,19	1719,19	429,80
CASO-04.3	105,00	40,00	20,00	17,50	60,00	57,50	4,58	30061,61	0,00	80,00	375,77	375,77	0,00	0,00	0,00	0,00

(FONTE: Elaborado pelo autor)

Analisando as cargas atuantes nos banzos de cada respectivo caso, destaca-se que os casos em que a abertura se localiza mais próxima ao apoio, o esforço de momento tende a ser maior e o esforço normal tende a ser menor, configurando um esforço de flexo-compressão no banzo superior e flexo-tração no banzo inferior. Ocorre uma redução gradual do momento quando a abertura se afasta do apoio em direção ao centro do vão, culminando eventualmente em um esforço normal elevado e um momento nulo, configurando um esforço de compressão e tração simples nos banzos. Por sua vez, se manifesta um maior valor de cortante próximo ao apoio que se reduz quanto mais a abertura se aproxima do centro do vão, acompanhando a lógica isostática de uma viga bi apoiada com carga uniformemente distribuída.

4.4.1 ARMADURAS LONGITUDINAIS PARA FLEXO-COMPRESSÃO E FLEXO-TRAÇÃO NOS BANZOS

Para a determinação da armadura longitudinal “As” necessária para resistir aos esforços faz-se uso dos conhecimentos dispostos na bibliografia de (Araujo, 2003) para a determinação dos

valores de “ ω ” nos casos de flexo-compressão impostos aos banzos comprimidos analisados. Acentua-se que o método adotado para a obtenção de “ ω ” foi a partir das tabelas A1.1, A1.2, A1.3 e A1.4 de flexo-compressão normal, onde para os casos em que os valores de “ δ ” dos banzos não coincidem com o valor exato da tabela, necessita de interpolação do valor de “ ω ” encontrado na tabela com valor de “ δ ” diretamente maior e menor. Também se faz necessária a interpolação de “ ω ” nos casos em que “ ν ” e “ μ ” não coincidem exatamente aos valores encontrados nas tabelas.

De forma análoga, utiliza-se das tabelas 2.7.1, 2.7.2, 2.7.3 e 2.7.4 dispostas na bibliografia do Araujo para a determinação de “ ω ” agora considerando os esforços de flexo-tração no desenvolvimento do equacionamento para posterior definição de A_s para os casos dos banzos tracionados. Ambos os dimensionamentos de armaduras se encontram expostos na figura 18. Destaca-se que ao contrário do exposto para a armadura longitudinal da viga existente, para armadura longitudinal do banzo tracionado e comprimido não se faz necessário definir conjuntos de bitolas aplicáveis, uma vez que só será necessário o valor de A_s para o dimensionamento das chapas de aço.

Quadro 7: Dimensionamento da armadura longitudinal para os banzos comprimidos e tracionados

DIMENSIONAMENTO DE BANZOS A FLEXO-COMPRESSÃO						
CASO	DADOS BASE			ARMADURA		
	δ	ν	μ	ω (Final)	A_s (cm ²)	A_s min (cm ²)
CASO-01.1	0,06	0,10	0,06	0,08	3,13	1,62
CASO-02.1	0,06	0,16	0,04	0,03	1,25	1,62
CASO-03.1	0,06	0,21	0,03	0,01	0,39	1,62
CASO-04.1	0,06	0,23	0,00	0,00	0,00	1,62
CASO-01.2	0,04	0,07	0,03	0,04	2,53	2,43
CASO-02.2	0,04	0,11	0,02	0,02	1,36	2,43
CASO-03.2	0,04	0,14	0,01	0,01	0,63	2,43
CASO-04.2	0,04	0,15	0,00	0,00	0,00	2,43
CASO-01.3	0,13	0,20	0,25	0,47	8,78	0,81
CASO-02.3	0,13	0,33	0,18	0,19	3,60	0,81
CASO-03.3	0,13	0,41	0,10	0,01	0,20	0,81
CASO-04.3	0,13	0,46	0,00	0,00	0,00	0,81

DIMENSIONAMENTO DE BANZOS A FLEXO-TRAÇÃO						
CASO	DADOS BASE			ARMADURA		
	δ	ν	μ	ω (Final)	A_s (cm ²)	A_s min (cm ²)
CASO-01.1	0,06	0,10	0,02	0,07	2,48	1,62
CASO-02.1	0,06	0,16	0,01	0,06	2,31	1,62
CASO-03.1	0,06	0,21	0,01	0,11	4,02	1,62
CASO-04.1	0,06	0,23	0,00	0,00	0,00	1,62
CASO-01.2	0,13	0,20	0,06	0,00	0,00	0,81
CASO-02.2	0,13	0,33	0,04	0,20	3,84	0,81
CASO-03.2	0,13	0,41	0,03	0,23	4,36	0,81
CASO-04.2	0,13	0,46	0,00	0,00	0,00	0,81
CASO-01.3	0,04	0,07	0,01	0,01	0,40	2,43
CASO-02.3	0,04	0,11	0,00	0,05	3,11	2,43
CASO-03.3	0,04	0,14	0,00	0,05	2,99	2,43
CASO-04.3	0,04	0,15	0,00	0,00	0,00	2,43

(FONTE: Elaborado pelo autor)

Extraí-se do presente dimensionamento a disparidade entre dimensões de armaduras longitudinais com aberturas localizadas mais próximas dos apoios que obtiveram valores elevados quando comparadas as das aberturas localizadas mais próximas ao centro do vão com ênfase na armadura da abertura localizada no centro do vão que mesmo possuindo solicitação de esforço normal a tração e compressão, não apresenta necessidade de aplicação de armadura, sendo adotado assim a armadura mínima para estes casos. Também se nota a diferença

expressiva de valores de armadura para as diferentes alturas adotadas para a abertura em uma mesma distância do apoio, como visto no caso 1.2 e 1.3, ocasionadas pela variação de seção transversal dos banzos tracionados e comprimidos.

4.4.2 ARMADURA TRANSVERSAL NOS BANZOS E ARMADURAS DE SUSPENSÃO

O dimensionamento da armadura transversal dos banzos se dá de forma similar ao dimensionamento da armadura transversal da viga original, com a diferença de dever ser considerado as dimensões da seção transversal do banzo analisado e também ser utilizado os esforços de cortante atuantes no banzo examinado para o dimensionamento de A_{sw} .

Já a armadura de suspensão no presente dimensionamento procura transferir 80% do cortante total da viga para o banzo comprimido. De forma análoga a armadura longitudinal dos banzos, a armadura transversal e de suspensão não precisa ser definida em conjuntos de bitolas, sendo utilizado para o dimensionamento das chapas de aço apenas o valor de A_{sw} encontrado.

Quadro 8: Dimensionamento da armadura transversal para os banzos comprimidos e tracionados e armadura de suspensão da abertura

DIMENSIONAMENTO ARMADURA TRASVERSAL												ARMADURA DE SUSPENSÃO		
CASO	BANZO COMPRIMIDO						BANZO TRACIONADO						FS	Asws (cm²/m)
	FS	Vsd (kn)	Vsd2 (kn)	Vc (kn)	Asw (cm²/m)	Aswmin (cm²/m)	FS	Vsd (kn)	Vsd2 (kn)	Vc (kn)	Asw (cm²/m)	Aswmin (cm²/m)		
CASO-01.1	1,40	110,19	439,35	77,91	0,70	2,77	1,40	27,55	439,35	77,91	-1,10	2,77	1,40	2,53
CASO-02.1	1,40	78,02	439,35	77,91	0,00	2,77	1,40	19,50	439,35	77,91	-1,27	2,77	1,40	1,79
CASO-03.1	1,40	45,85	439,35	77,91	-0,70	2,77	1,40	11,46	439,35	77,91	-1,45	2,77	1,40	1,05
CASO-04.1	1,40	0,00	439,35	77,91	-1,69	2,77	1,40	0,00	439,35	77,91	-1,69	2,77	1,40	0,00
CASO-01.2	1,40	110,19	673,67	119,46	-0,20	2,77	1,40	27,55	205,03	36,36	-0,19	2,77	1,40	2,53
CASO-02.2	1,40	78,02	673,67	119,46	-0,90	2,77	1,40	19,50	205,03	36,36	-0,37	2,77	1,40	1,79
CASO-03.2	1,40	45,85	673,67	119,46	-1,60	2,77	1,40	11,46	205,03	36,36	-0,54	2,77	1,40	1,05
CASO-04.2	1,40	0,00	673,67	119,46	-2,60	2,77	1,40	0,00	205,03	36,36	-0,79	2,77	1,40	0,00
CASO-01.3	1,40	110,19	205,03	36,36	1,61	2,77	1,40	27,55	673,67	119,46	-2,00	2,77	1,40	2,53
CASO-02.3	1,40	78,02	205,03	36,36	0,91	2,77	1,40	19,50	673,67	119,46	-2,17	2,77	1,40	1,79
CASO-03.3	1,40	45,85	205,03	36,36	0,21	2,77	1,40	11,46	673,67	119,46	-2,35	2,77	1,40	1,05
CASO-04.3	1,40	0,00	205,03	36,36	-0,79	2,77	1,40	0,00	673,67	119,46	-2,60	2,77	1,40	0,00

(FONTE: Elaborado pelo autor)

Torna-se claro para os casos analisados que a posição da abertura não influencia de forma significativa os valores de armadura transversal obtidos, uma vez que todos estes valores se encontram abaixo da armadura mínima definida para a viga. Por sua vez, a armadura de suspensão apresenta valores mais elevados conforme a abertura se aproxima dos apoios, não influenciando a altura adotada para o posicionamento da abertura.

Pode-se concluir para os casos analisados que em hipótese de aplicação apenas da armadura interna ao maciço de concreto, as melhores posições de abertura a serem adotadas afim de

diminuir a taxa de armadura do reforço de abertura seriam as localizadas no centro do vão em qualquer uma das 3 alturas analisadas.

4.5 DIMENSIONAMENTO DOS REFORÇOS EM CHAPA DE AÇO

O dimensionamento do reforço em chapa de aço do presente trabalho se dará seguindo a hipótese de uso de chapa única para cada face da viga com vão de abertura pré-cortado. Considerando isto, constata-se que a solicitação originalmente absorvida pela armadura longitudinal e transversal do banzo comprimido superior em conjunto com a armadura de suspensão deverão ser absorvidas no dimensionamento de reforço em chapa de aço pela mesma chapa. Também se enfatiza a necessidade de adotar uma espessura de chapa única para todos os reforços, a fim de manter a integridade da chapa única sem a necessidade de soldas ou emendas. O f_{yk} do aço da chapa adotado para o dimensionamento dos reforços possui o valor de 25 kN/cm^2 , sendo metade do valor do f_{yk} do aço considerado para a armadura na viga existente, e suas espessuras usuais para dimensionamento são de 1,7 mm, 1,9 mm, 2 mm, 2,25 mm, 2,65 mm, 3 mm, 3,35 mm, 3,75 mm, 4 mm, 4,25 mm, 4,5 mm e 4,75 mm, não sendo indicado o uso de chapas com espessuras superiores a 4,75 mm por a resistência da resina epóxi ao cisalhamento ser inferior a resistência da chapa ao escoamento ocasionando em deslocamento da chapa em relação a superfície da viga antes do esmagamento da mesma, o que pode ocorrer sem aviso prévio devido a característica frágil da resina.

4.5.1 DIMENSIONAMENTO DOS REFORÇOS EM CHAPA DE AÇO PARA OS BANZOS COMPRIMIDOS

O dimensionamento do reforço em chapa de aço do presente trabalho se dará seguindo a hipótese de uso de chapa única para cada face da viga com vão de abertura pré-cortado. O dimensionamento do reforço em chapa de aço para o banzo comprimido deve ser dividido entre a solicitação de flexo-compressão e a de cisalhamento, onde o reforço para resistir ao esforço de flexo-compressão utiliza da mesma lógica que o dimensionamento de reforço em chapa de um pilar, considerando para o acréscimo de armadura a limitação de escoamento da armadura original da viga já carregada.

O posicionamento da armadura que resistirá a flexo-compressão no banzo comprimido será posicionada nas laterais da seção transversal da viga, seguindo o dimensionamento expresso na figura 20 que adota como $A_{s,0}$ a armadura existente na viga no banzo comprimido, que na viga original é equivalente a 2Ø5 que possuíam a função de fixar os estribos na parte superior. Ac

representa a área de concreto que resiste a solicitação, enquanto o A_s se refere a armadura longitudinal necessária para reforçar o banzo comprimido no dimensionamento de abertura onde a armadura é alocada internamente ao maciço de concreto. Com o dimensionamento é possível obter o valor t que demonstra a quantidade mínima de espessura de chapa necessária para resistir a solicitação de flexo-compressão, assim como a espessura da chapa adotada dentro do espectro de espessuras usuais e a porcentagem que a chapa adotada que está sendo solicitada pelo esforço.

Quadro 9: Dimensionamento da espessura de chapa de aço para resistir ao esforço de flexo-compressão do banzo comprimido

DIMENSIONAMENTO DO BANZO COMPRIMIDO COM ARMADURA DE CHAPA DE AÇO																	
CASO	FLEXO-COMPRESSÃO																
	$f_{yk,ref}$ (kN/cm ²)	$f_{yd,ref}$ (kN/cm ²)	$A_{s,0}$ (cm ²)	A_c (cm ²)	A_s (cm ²)	$N_{d,cent,0}$ (kN)	$N_{d,cent,t}$ (kN)	ϵ_{t,q_s} (‰)	ϵ_{lim} (‰)	$\Delta\epsilon$ (‰)	$f_{yd,ref,corr}$ (kN/cm ²)	$A_{s,ref}$ (cm ²)	$A_{s,ref}$ (cm ² /face)	t (mm)	$t_{adot.}$ (mm)	% SOLICIT.	
CASO-01.1	25,00	22,73	2Ø5	0,39	1080,00	3,13	1775,46	1656,36	0,60	3,50	2,90	21,74	5,48	2,74	0,68	1,70	40,28%
CASO-02.1	25,00	22,73	2Ø5	0,39	1080,00	1,62	1709,72	1656,36	0,40	3,50	3,10	21,74	2,45	1,23	0,31	1,70	18,05%
CASO-03.1	25,00	22,73	2Ø5	0,39	1080,00	1,62	1709,72	1656,36	0,40	3,50	3,10	21,74	2,45	1,23	0,31	1,70	18,05%
CASO-04.1	25,00	22,73	2Ø5	0,39	1080,00	1,62	1709,72	1656,36	0,00	2,00	2,00	21,74	2,45	1,23	0,31	1,70	18,05%
CASO-01.2	25,00	22,73	2Ø5	0,39	1620,00	2,53	2568,81	2476,00	0,30	3,50	3,20	21,74	4,27	2,13	0,36	1,70	20,93%
CASO-02.2	25,00	22,73	2Ø5	0,39	1620,00	2,43	2564,58	2476,00	0,20	3,50	3,30	21,74	4,07	2,04	0,34	1,70	19,97%
CASO-03.2	25,00	22,73	2Ø5	0,39	1620,00	2,43	2564,58	2476,00	0,20	3,50	3,30	21,74	4,07	2,04	0,34	1,70	19,97%
CASO-04.2	25,00	22,73	2Ø5	0,39	1620,00	2,43	2564,58	2476,00	0,00	2,00	2,00	21,74	4,07	2,04	0,34	1,70	19,97%
CASO-01.3	25,00	22,73	2Ø5	0,39	540,00	8,78	1201,25	836,72	1,40	3,50	2,10	21,74	16,77	8,38	4,19	4,25	98,64%
CASO-02.3	25,00	22,73	2Ø5	0,39	540,00	3,60	976,03	836,72	1,70	3,50	1,80	21,74	6,41	3,20	1,60	1,70	94,24%
CASO-03.3	25,00	22,73	2Ø5	0,39	540,00	0,81	854,86	836,72	1,40	3,50	2,10	21,74	0,83	0,42	0,21	1,70	12,27%
CASO-04.3	25,00	22,73	2Ø5	0,39	540,00	0,81	854,86	836,72	0,00	2,00	2,00	21,74	0,83	0,42	0,21	1,70	12,27%

(FONTE: Elaborado pelo autor)

A adequada posição da chapa de aço para resistir ao esforço de cisalhamento é nas laterais da seção do banzo tracionado, sobrepondo-se a chapa que resiste ao esforço de flexo compressão. Para o dimensionamento deve-se levantar a armadura transversal existente na viga, o dimensionamento da armadura transversal para o banzo comprimido calculada para embutimento em maciço de concreto e o comprimento da abertura, com isto é possível calcular a mesma espessura da chapa t mínima para resistir ao esforço cisalhante do banzo comprimido. Tendo este dado se estrai de forma análoga ao dimensionamento de reforço com chapa de aço a flexo-compressão a chapa de espectro usual e a porcentagem que a chapa adotada que está sendo solicitada pelo esforço.

Quadro 10: Dimensionamento da espessura de chapa de aço para resistir ao esforço de cisalhamento do banzo comprimido

DIMENSIONAMENTO DO BANZO COMPRIMIDO COM ARMADURA DE CHAPA DE AÇO										
CASO	CISALHAMENTO									
	Asw,0 (cm ² /m)	Asw,t (cm ² /m)	Asw,ref (cm ² /m)	Asw,ref,face (cm ² /face/m)	a (cm)	Asw,ref,face (cm ² /face)	t (mm)	t,adot. (mm)	% SOLICIT.	
CASO-01.1	Ø5 c/14	2,80	2,77	2,74	1,37	105,00	1,44	0,14	1,70	8,05%
CASO-02.1	Ø5 c/14	2,80	2,77	2,74	1,37	105,00	1,44	0,14	1,70	8,05%
CASO-03.1	Ø5 c/14	2,80	2,77	2,74	1,37	105,00	1,44	0,14	1,70	8,05%
CASO-04.1	Ø5 c/14	2,80	2,77	2,74	1,37	105,00	1,44	0,14	1,70	8,05%
CASO-01.2	Ø5 c/14	2,80	2,77	2,74	1,37	105,00	1,44	0,14	1,70	8,05%
CASO-02.2	Ø5 c/14	2,80	2,77	2,74	1,37	105,00	1,44	0,14	1,70	8,05%
CASO-03.2	Ø5 c/14	2,80	2,77	2,74	1,37	105,00	1,44	0,14	1,70	8,05%
CASO-04.2	Ø5 c/14	2,80	2,77	2,74	1,37	105,00	1,44	0,14	1,70	8,05%
CASO-01.3	Ø5 c/14	2,80	2,77	2,74	1,37	105,00	1,44	0,14	1,70	8,05%
CASO-02.3	Ø5 c/14	2,80	2,77	2,74	1,37	105,00	1,44	0,14	1,70	8,05%
CASO-03.3	Ø5 c/14	2,80	2,77	2,74	1,37	105,00	1,44	0,14	1,70	8,05%
CASO-04.3	Ø5 c/14	2,80	2,77	2,74	1,37	105,00	1,44	0,14	1,70	8,05%

(FONTE: Elaborado pelo autor)

Deduz-se a partir da análise das espessuras de chapas mínimas necessárias para resistir a flexo-compressão que com a aproximação da abertura ao apoio e variação de altura da abertura em relação a viga ocorre um aumento relevante de armadura longitudinal, que acompanha o comportamento visto no quadro 7, porem agora no caso 1.3 a necessidade de armadura longitudinal elevada acarretou em adotar uma chapa de espessura elevada para a execução do reforço, o que em casos mais extremos onde elevaria mais a espessura da chapa, tornaria inviável a aplicação de reforço com chapa de aço devido ao limitante de espessura da chapa de 4,75 mm em decorrência da falha da resina epóxi ao cisalhamento. Com comportamento parecido, a armadura de cisalhamento acompanha o comportamento percebido no dimensionamento de armadura interna ao maciço de concreto, não demonstrando variação de solicitação entre as hipóteses analisadas.

4.5.2 DIMENSIONAMENTO DO REFORÇOS EM CHAPA DE AÇO PARA OS BANZOS TRACIONADOS

A chapa de aço que resistirá ao esforço de flexo-tração no banzo tracionado será alocada na parte inferior da seção transversal, devendo ser dimensionada a partir do levantamento da armadura longitudinal da viga original, a armadura longitudinal do banzo tracionado calculada para embutimento em maciço.

Quadro 11: Dimensionamento da espessura de chapa de aço para resistir ao esforço de flexo-tração do banzo tracionado

DIMENSIONAMENTO DO BANZO TRACIONADO COM ARMADURA DE CHAPA DE AÇO																				
CASO	FLEXO- TRACÇÃO																			
	fykref (kN/cm²)	fydref (kN/cm²)	As,0 (cm²)	M1 (kN.cm)	Mt (kN.m)	Mref (kN.m)	As,t (cm²)	Nec. Ref.?	Zs (cm)	Zref (cm)	σ,sp (kN/cm²)	σ,ss (kN/cm²)	σ,ss,ref (kN/cm²)	M,α (kN.m)	Asref (cm²)	b (cm)	t (mm)	t,adot. (mm)	% SOLICIT.	
CASO-01.1	25,00	22,73	5Ø16	10,05	10,33	10,33	0,00	2,48	NÃO	105,75	112,88	1,36	42,12	22,73	447,76	-17,45	27,00	-6,46	1,70	0,00%
CASO-02.1	25,00	22,73	5Ø16	10,05	7,31	7,31	0,00	2,31	NÃO	105,75	112,88	0,96	42,52	22,73	451,98	-17,62	27,00	-6,53	1,70	0,00%
CASO-03.1	25,00	22,73	5Ø16	10,05	4,30	4,30	0,00	4,02	NÃO	105,75	112,88	0,57	42,91	22,73	456,21	-17,78	27,00	-6,59	1,70	0,00%
CASO-04.1	25,00	22,73	5Ø16	10,05	0,00	0,00	0,00	1,62	NÃO	105,75	112,88	0,00	43,48	22,73	462,22	-18,02	27,00	-6,67	1,70	0,00%
CASO-01.2	25,00	22,73	5Ø16	10,05	10,33	10,33	0,00	0,81	NÃO	105,75	112,88	1,36	42,12	22,73	447,76	-17,45	27,00	-6,46	1,70	0,00%
CASO-02.2	25,00	22,73	5Ø16	10,05	7,31	7,31	0,00	3,84	NÃO	105,75	112,88	0,96	42,52	22,73	451,98	-17,62	27,00	-6,53	1,70	0,00%
CASO-03.2	25,00	22,73	5Ø16	10,05	4,30	4,30	0,00	4,36	NÃO	105,75	112,88	0,57	42,91	22,73	456,21	-17,78	27,00	-6,59	1,70	0,00%
CASO-04.2	25,00	22,73	5Ø16	10,05	0,00	0,00	0,00	0,81	NÃO	105,75	112,88	0,00	43,48	22,73	462,22	-18,02	27,00	-6,67	1,70	0,00%
CASO-01.3	25,00	22,73	5Ø16	10,05	10,33	10,33	0,00	2,43	NÃO	105,75	112,88	1,36	42,12	22,73	447,76	-17,45	27,00	-6,46	1,70	0,00%
CASO-02.3	25,00	22,73	5Ø16	10,05	7,31	7,31	0,00	3,11	NÃO	105,75	112,88	0,96	42,52	22,73	451,98	-17,62	27,00	-6,53	1,70	0,00%
CASO-03.3	25,00	22,73	5Ø16	10,05	4,30	4,30	0,00	2,99	NÃO	105,75	112,88	0,57	42,91	22,73	456,21	-17,78	27,00	-6,59	1,70	0,00%
CASO-04.3	25,00	22,73	5Ø16	10,05	0,00	0,00	0,00	2,43	NÃO	105,75	112,88	0,00	43,48	22,73	462,22	-18,02	27,00	-6,67	1,70	0,00%

(FONTE: Elaborado pelo autor)

Nas suposições levantadas o As,t possui valor inferior a As,0, constatando a não necessidade de aplicação de reforço em chapa, resultando com a continuação do dimensionamento em um valor da espessura da chapa sendo negativo e a porcentagem de solicitação igual a zero conforme a figura 22. Para estes casos, se entenderá que não é necessário a aplicação de reforço para resistir a flexo-tração, devido ao posicionamento da armadura longitudinal da viga origem se localizar no banzo tracionado em todos os casos testados.

Já a chapa de aço responsável por resistir ao esforço de cisalhamento atuante no banzo tracionado deve ser posicionada e calculada congênere ao método adotado no banzo comprimido, porém adotando os correspondentes valores do banzo tracionado obtendo-se comportamento similar conforme quadro 12. Frisa-se não ocorrer a sobreposição de chapas no caso do banzo tracionado, uma vez que chapa de aço responsável por resistir ao esforço de flexo-compressão se encontra alocada na parte inferior da seção transversal do banzo.

Quadro 12: Dimensionamento da espessura de chapa de aço para resistir ao esforço de cisalhamento do banzo tracionado

DIMENSIONAMENTO DO BANZO TRACIONADO COM ARMADURA DE CHAPA DE AÇO										
CASO	CISALHAMENTO									
	Asw,0 (cm ² /m)	Asw,t (cm ² /m)	Asw,ref (cm ² /m)	Asw,ref,face (cm ² /face/m)	a (cm)	Asw,ref,face (cm ² /face)	t (mm)	t,adot. (mm)	% SOLICIT.	
CASO-01.1	Ø5 c/14	2,80	2,77	2,74	1,37	105,00	1,44	0,14	1,70	8,05%
CASO-02.1	Ø5 c/14	2,80	2,77	2,74	1,37	105,00	1,44	0,14	1,70	8,05%
CASO-03.1	Ø5 c/14	2,80	2,77	2,74	1,37	105,00	1,44	0,14	1,70	8,05%
CASO-04.1	Ø5 c/14	2,80	2,77	2,74	1,37	105,00	1,44	0,14	1,70	8,05%
CASO-01.2	Ø5 c/14	2,80	2,77	2,74	1,37	105,00	1,44	0,14	1,70	8,05%
CASO-02.2	Ø5 c/14	2,80	2,77	2,74	1,37	105,00	1,44	0,14	1,70	8,05%
CASO-03.2	Ø5 c/14	2,80	2,77	2,74	1,37	105,00	1,44	0,14	1,70	8,05%
CASO-04.2	Ø5 c/14	2,80	2,77	2,74	1,37	105,00	1,44	0,14	1,70	8,05%
CASO-01.3	Ø5 c/14	2,80	2,77	2,74	1,37	105,00	1,44	0,14	1,70	8,05%
CASO-02.3	Ø5 c/14	2,80	2,77	2,74	1,37	105,00	1,44	0,14	1,70	8,05%
CASO-03.3	Ø5 c/14	2,80	2,77	2,74	1,37	105,00	1,44	0,14	1,70	8,05%
CASO-04.3	Ø5 c/14	2,80	2,77	2,74	1,37	105,00	1,44	0,14	1,70	8,05%

(FONTE: Elaborado pelo autor)

4.5.3 DIMENSIONAMENTO DOS REFORÇOS EM CHAPA DE AÇO PARA SUSPENSÃO DOS ESFORÇOS CISALHANTES

Posiciona-se a chapa de aço responsável pela transferência de 80% do esforço cisalhante para o banzo comprimido nas laterais da seção transversal da viga original, seguindo lógica semelhante à adotada para resistir aos esforços cisalhantes nos banzos tracionados e comprimidos para realizar seu dimensionamento, com a diferença da largura horizontal da armadura de suspensão que deve ser adotada como o equivalente a $\frac{1}{4}$ da altura da seção da viga original. Se reforça não haver definição de armadura de suspensão mínima, não sendo empregada em casos em que a espessura de chapa calculada for igual a zero. O quadro 13 apresenta o dimensionamento para a armadura de suspensão.

Quadro 13: Dimensionamento da espessura de chapa de aço para transferir o esforço de cisalhamento do banzo comprimido

DIMENSIONAMENTO DA ARMADURA DE SUSPENSÃO EM CHAPA DE AÇO PARA ABERTURA								
CASO	Asw,t (cm ² /m)	Asw,ref (cm ² /m)	Asw,ref,face (cm ² /face/m)	a' (cm)	Asw,ref,face (cm ² /face)	t (mm)	t,adot. (mm)	% SOLICIT.
CASO-01.1	2,53	5,07	2,53	30,00	0,76	0,25	1,70	14,91%
CASO-02.1	1,79	3,59	1,79	30,00	0,54	0,18	1,70	10,56%
CASO-03.1	1,05	2,11	1,05	30,00	0,32	0,11	1,70	6,20%
CASO-04.1	0,00	0,00	0,00	30,00	0,00	0,00	0,00	0,00%
CASO-01.2	2,53	5,07	2,53	30,00	0,76	0,25	1,70	14,91%
CASO-02.2	1,79	3,59	1,79	30,00	0,54	0,18	1,70	10,56%
CASO-03.2	1,05	2,11	1,05	30,00	0,32	0,11	1,70	6,20%
CASO-04.2	0,00	0,00	0,00	30,00	0,00	0,00	0,00	0,00%
CASO-01.3	2,53	5,07	2,53	30,00	0,76	0,25	1,70	14,91%
CASO-02.3	1,79	3,59	1,79	30,00	0,54	0,18	1,70	10,56%
CASO-03.3	1,05	2,11	1,05	30,00	0,32	0,11	1,70	6,20%
CASO-04.3	0,00	0,00	0,00	30,00	0,00	0,00	0,00	0,00%

(FONTE: Elaborado pelo autor)

4.5.4 DETERMINAÇÃO DAS CHAPAS DE AÇO FINAIS A SEREM ADOTADAS PARA O REFORÇO DAS ABERTURAS

Para a definição da chapa de aço final a ser adotada para o reforço de cada abertura, primeiro deve-se chegar na espessura de chapa para três situações distintas, sendo elas o somatório de chapa necessária para atender à solicitação de cortante e flexo-compressão do banzo comprimido; solicitações de cortante do banzo comprimido e da armadura de suspensão; Solicitações de cortante do banzo tracionado e da armadura de suspensão. Estas espessuras de chapa são somadas devido a incidência destes conjuntos de esforços nas mesmas armaduras. Posteriormente deve-se adotar como a espessura a ser utilizada a maior dentre as três hipóteses levantadas e a armadura longitudinal que resiste ao esforço de flexo-tração. No caso de a

espessura de chapa ultrapassar 4,75, deve-se mudar o projeto ou alterar o tipo de reforço para um que atenda as solicitações demandadas. A tabela exposta no quadro 14 mostra a espessura das chapas de aço dimensionadas para apenas uma solicitação. Já o quadro 15 expõe os dimensionamentos das chapas sendo considerados os esforços somados incidindo na mesma chapa e posteriormente sendo adotado o maior valor dentre as espessuras de chapas encontradas.

Quadro 14: Resumo das espessuras encontradas para cada esforço individual

DIMENSIONAMENTO FINAL DO REFORÇO DA ABERTURA EM CHAPA DE AÇO															
CASO	BANZO COMPRIMIDO						BANZO TRACIONADO						ARMADURA DE SESPENSÃO		
	ARMADURA LONGITUDINAL			ARMADURA TRANVERSAL			ARMADURA LONGITUDINAL			ARMADURA TRANVERSAL					
	t (mm)	t,adot. (mm)	% SOLICIT.	t (mm)	t,adot. (mm)	% SOLICIT.	t (mm)	t,adot. (mm)	% SOLICIT.	t (mm)	t,adot. (mm)	% SOLICIT.	t (mm)	t,adot. (mm)	% SOLICIT.
CASO-01.1	0,68	1,70	40,28%	0,14	1,70	8,05%	-6,46	1,70	0,00%	0,14	1,70	8,05%	0,25	1,70	14,91%
CASO-02.1	0,31	1,70	18,05%	0,14	1,70	8,05%	-6,53	1,70	0,00%	0,14	1,70	8,05%	0,18	1,70	10,56%
CASO-03.1	0,31	1,70	18,05%	0,14	1,70	8,05%	-6,59	1,70	0,00%	0,14	1,70	8,05%	0,11	1,70	6,20%
CASO-04.1	0,31	1,70	18,05%	0,14	1,70	8,05%	-6,67	1,70	0,00%	0,14	1,70	8,05%	0,00	0,00	0,00%
CASO-01.2	0,36	1,70	20,93%	0,14	1,70	8,05%	-6,46	1,70	0,00%	0,14	1,70	8,05%	0,25	1,70	14,91%
CASO-02.2	0,34	1,70	19,97%	0,14	1,70	8,05%	-6,53	1,70	0,00%	0,14	1,70	8,05%	0,18	1,70	10,56%
CASO-03.2	0,34	1,70	19,97%	0,14	1,70	8,05%	-6,59	1,70	0,00%	0,14	1,70	8,05%	0,11	1,70	6,20%
CASO-04.2	0,34	1,70	19,97%	0,14	1,70	8,05%	-6,67	1,70	0,00%	0,14	1,70	8,05%	0,00	0,00	0,00%
CASO-01.3	4,19	4,25	98,64%	0,14	1,70	8,05%	-6,46	1,70	0,00%	0,14	1,70	8,05%	0,25	1,70	14,91%
CASO-02.3	1,60	1,70	94,24%	0,14	1,70	8,05%	-6,53	1,70	0,00%	0,14	1,70	8,05%	0,18	1,70	10,56%
CASO-03.3	0,21	1,70	12,27%	0,14	1,70	8,05%	-6,59	1,70	0,00%	0,14	1,70	8,05%	0,11	1,70	6,20%
CASO-04.3	0,21	1,70	12,27%	0,14	1,70	8,05%	-6,67	1,70	0,00%	0,14	1,70	8,05%	0,00	0,00	0,00%

(FONTE: Elaborado pelo autor)

Quadro 15: Dimensionamento da espessura de chapa de aço a ser adotada para o reforço

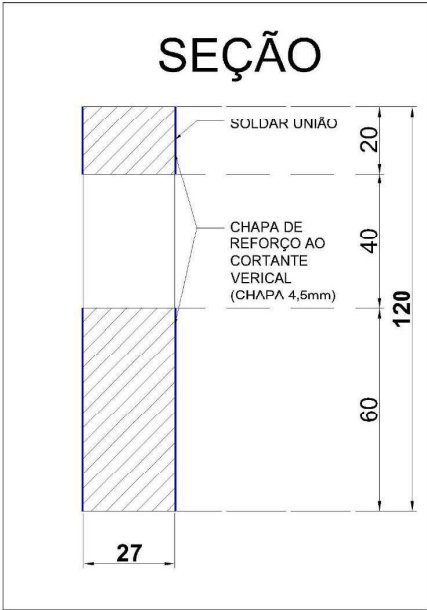
DIMENSIONAMENTO FINAL DO REFORÇO DA ABERTURA EM CHAPA DE AÇO													
CASO	ARM. LONG. BANZO COMP. + ARM. TRANV BANZO COMP.			ARM. TRANV. BANZO COMP. + ARM. SUSP.			ARM. LONG. BANZO TRAC. + ARM. TRANV BANZO TRAC.			ARM. TRANV. BANZO TRAC. + ARM. SUSP.			CHAPA APLICADA
	% SOLICIT.	t (mm)	t,adot. (mm)	% SOLICIT.	t (mm)	t,adot. (mm)	% SOLICIT.	t (mm)	t,adot. (mm)	% SOLICIT.	t (mm)	t,adot. (mm)	t,adot. (mm)
CASO-01.1	48,33%	0,82	1,70	22,95%	0,39	1,70	8,05%	0,14	1,70	22,95%	0,39	1,70	1,70
CASO-02.1	26,09%	0,44	1,70	18,60%	0,32	1,70	8,05%	0,14	1,70	18,60%	0,32	1,70	1,70
CASO-03.1	26,09%	0,44	1,70	14,25%	0,24	1,70	8,05%	0,14	1,70	14,25%	0,24	1,70	1,70
CASO-04.1	26,09%	0,44	1,70	8,05%	0,14	1,70	8,05%	0,14	1,70	8,05%	0,14	1,70	1,70
CASO-01.2	28,97%	0,49	1,70	22,95%	0,39	1,70	8,05%	0,14	1,70	22,95%	0,39	1,70	1,70
CASO-02.2	28,02%	0,48	1,70	18,60%	0,32	1,70	8,05%	0,14	1,70	18,60%	0,32	1,70	1,70
CASO-03.2	28,02%	0,48	1,70	14,25%	0,24	1,70	8,05%	0,14	1,70	14,25%	0,24	1,70	1,70
CASO-04.2	28,02%	0,48	1,70	8,05%	0,14	1,70	8,05%	0,14	1,70	8,05%	0,14	1,70	1,70
CASO-01.3	96,20%	4,33	4,50	22,95%	0,39	1,70	8,05%	0,14	1,70	22,95%	0,39	1,70	4,50
CASO-02.3	91,52%	1,74	1,90	18,60%	0,32	1,70	8,05%	0,14	1,70	18,60%	0,32	1,70	1,90
CASO-03.3	20,32%	0,35	1,70	14,25%	0,24	1,70	8,05%	0,14	1,70	14,25%	0,24	1,70	1,70
CASO-04.3	20,32%	0,35	1,70	8,05%	0,14	1,70	8,05%	0,14	1,70	8,05%	0,14	1,70	1,70

(FONTE: Elaborado pelo autor)

Aqui se exterioriza a variação de espessura de chapa de aço adotada de acordo com a posição da abertura em cada caso, dando-se ênfase para os casos próximos ao apoio onde na hipótese 1.3 se atingiu a chapa com espessura próxima ao limite das possibilidades propostas. Esta hipótese atingiu o maior valor de armadura por ser próxima do apoio onde ocorre maior incidência de cortante e sua abertura ser posicionada de forma a reduzir a altura de banzo

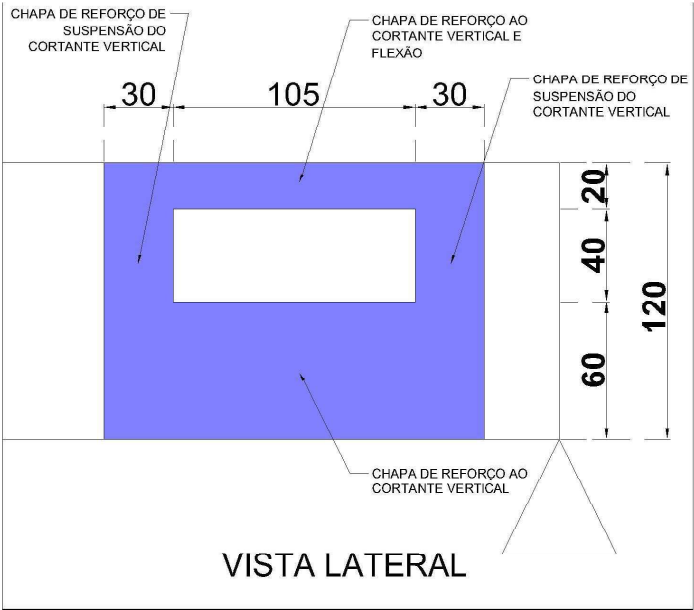
comprimido. Tal variabilidade identificada nas espessuras de chapa levantadas para cada caso pode ser explicada pela maior contribuição das solicitações incidentes nas armaduras longitudinais dos banzos comprimidos, vez que eles absorvem a maior parte das solicitações devido a transferência de cargas do banzo tracionado para o comprimido por intermédio da armadura de suspensão. Isto se mostra evidente em casos de aberturas localizadas mais na extremidade da viga, onde ocorre maior incidência de cortante e por consequência maior transferência e espessura de armadura.

Figura 14: Detalhamento da seção transversal do reforço em chapa de aço do caso 1.3



(FONTE: Elaborada pelo autor)

Figura 15: Detalhamento do reforço do caso 1.3



(FONTE: Elaborada pelo autor)

As figuras 14 e 15 destinam-se a exemplificar o detalhamento do reforço para o caso 1.3. Este caso foi escolhido como exemplo, pois, de acordo com os cálculos de dimensionamento, necessita a chapa de aço de 4,5mm, que é a maior espessura necessária dentre os casos analisados. Percebe-se que no detalhamento da seção transversal não foi incluído reforço na parte inferior da viga. Isto se dá já que a destinação de um reforço na parte inferior da viga responderia a solicitação de flexo-tração que de acordo com o dimensionamento não necessita de reforço uma vez que a armadura longitudinal existente na viga já é capaz de absorver os esforços satisfatoriamente. Também deve-se salientar que a chapa responsável pela suspensão do esforço cortante vertical para o banzo comprimido possui largura equivalente a $\frac{1}{4}$ da altura da seção da viga, sendo constante em 30 cm para todos os casos analisados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Buscado a análise de múltiplas opções de aberturas para a viga proposta afim da passagem de alimentação elétrica da edificação, buscou-se a partir de método empírico e utilização de dados levantados em projetos e in loco, o dimensionamento das armaduras necessárias para a instalação de reforço adotado como chapa de aço colada com resina epóxi. A partir do desenvolvimento do dimensionamento e comparação entre os diferentes casos propostos, foi possível identificar a origem das forças aplicadas a abertura, bem como suas variações frente as mudanças de posições das aberturas. Da mesma forma foi possível comparar as armaduras adotadas para cada caso correlacionando sua demanda de reforço a sua posição frente a estrutura e solicitação de esforços. Conjuntamente pode-se extrair do dimensionamento como forma de exemplo ilustrativo um detalhamento de reforço para o caso com a chapa de aço dimensionada mais espessa, permitindo um maior entendimento da alocação das armaduras no reforço. Sugestiona-se a análise de aberturas em estruturas com maior taxa de armadura longitudinal e transversal, variação nas dimensões da abertura, variação do f_{ck} e f_{yk} , variação da seção e do vão adotado para a viga, assim como adotar um caso hiperestático com viga contínua afim de se obter maiores conclusões a respeito do local mais adequado para o posicionamento da abertura em condições diversas.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, J. **Curso de concreto armado**. Vol 1. Porto Alegre: Dunas, 2003.
ARAÚJO, J. **Curso de concreto armado**. Vol 2. Porto Alegre: Dunas, 2003.
ARAÚJO, J. **Curso de concreto armado**. Vol 3. Porto Alegre: Dunas, 2003.

ARAÚJO, J. **Curso de concreto armado**. Vol 4. Porto Alegre: Dunas, 2003.

MONNING, E. LEONHARDT, F. **Construções de concreto**. Vol 3. Rio de Janeiro: Interciência, 1978.

Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

SOUZA, Custódio Moreira de. RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

FUSCO, Péricles Brasiliense. **Técnicas de armas as estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1995.

KAUFMANN, Bruna. **Verificação de vigas de concreto armado com aberturas na alma**. Lajeado: UNIVATES, 2016.