



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**AVALIAÇÃO METODOLÓGICA NO DIMENSIONAMENTO DE  
VIGAS DE TRANSIÇÃO EM EDIFÍCIO EM CONCRETO ARMADO**

**MAYARA KETTILY MARTINS CUNHA**

**POMBAL – PB**

**2023**

MAYARA KETTILY MARTINS CUNHA

AVALIAÇÃO METODOLÓGICA NO DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE  
TRANSIÇÃO EM EDIFÍCIOS DE CONCRETO ARMADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia  
Ambiental da Universidade Federal de  
Campina Grande, como parte dos requisitos  
necessários para obtenção do título de  
Engenheiro Civil.

Orientador(a): Prof. Me. Luiz Ricardo da Silva  
Linhares

POMBAL – PB

2023

N244i Cunha, Mayara Kettily Martins.

Avaliação metodológica no dimensionamento de vigas de transição em edifício em concreto armado / Mayara Kettily Martins Cunha. – Pombal, 2023. 39 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2023.

“Orientação: Prof. Me. Luiz Ricardo da Silva Linhares”.

Referências.

1. Viga de transição. 2. Elemento estrutural - Dimensionamento. 3. Modelo de bielas e tirantes. 4. Dimensionamento de viga. I. Linhares, Luiz Ricardo da Silva. II. Título.

CDU 624.072.2 (043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL


PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO.

MAYARA KETTILY MARTINS CUNHA

**TÍTULO DO TRABALHO**

Trabalho de Conclusão de Curso do discente (MAYARA KETTILY MARTINS CUNHA) **APROVADO** em 5 de dezembro de 2023 pela comissão examinadora composta pelos membros abaixo relacionados como requisito para obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL pela Universidade Federal de Campina Grande

Registre-se e publique-se.


Documento assinado digitalmente  
 LUIZ RICARDO DA SILVA LINHARES  
Data: 08/12/2023 12:04:40-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Luiz Ricardo da Silva Linhares  
(Orientador – UFCG)



Assinado digitalmente por LEOVEGILDO DOUGLAS PEREIRA DE SOUZA-08419377457  
ID: 08419377457, O:UFCG - Universidade Federal de Campina Grande, O:ICPEdu, C=BR  
Razão: Eu atesto a precisão e a integridade deste documento  
Data: 2023.12.08 17:41:11-03'00'  
Foxit PDF Reader Versão: 11.2.1

Prof. Dr. Leovegildo Douglas Pereira de Souza  
(Membro Interno – UFCG)

Documento assinado digitalmente  
 EDUARDO GRACILIANO SILVA RIBEIRO  
Data: 08/12/2023 14:22:45-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eduardo Graciliano Silva Ribeiro  
(Membro Externo – UFERSA.)

**Dedico este trabalho aos meus pais, Maria Betânia e Pedro Andrade por todo incentivo, reconhecimento e amparo.**

## AGRADECIMENTOS

Venho por meio deste, com o coração transbordando de alegria e gratidão, expressar meus mais sinceros e profundos agradecimentos a todos aqueles que tornaram possível a realização deste sonho. Este trabalho não é apenas o resultado de pesquisa e esforço árduo, é também uma emocionante celebração de uma jornada acadêmica cheia de altos e baixos, momentos de alegria e desafios avassaladores.

Primeiramente, agradeço ao meu todo poderoso senhor Deus, a quem devo toda a força e inspiração, por ter me abençoado com o dom da vida, por me proteger e me fortalecer em todos os aspectos da minha vida, por me conceder sabedoria, paciência e perseverança para superar obstáculos, aprender com os erros e evoluir como pessoa e estudante.

Agradeço à minha mãe Maria Betânia, pelo amor incondicional que me concedeu, pela dedicação incansável, pelos preciosos ensinamentos, pelas palavras de incentivo que nunca faltaram, pela crença inabalável em mim e por ser meu porto seguro e minha constante motivação para seguir adiante.

Ao meu pai Pedro Andrade, que constantemente esteve ao meu lado em todos os momentos, agradeço por todo amor, carinho e cuidado. Ao meu irmão Pedro Gabriel, que mesmo com seus poucos anos de vida e da ainda limitada compreensão de mundo, sinto-me orgulhosa de ser sua irmã. À minha avó paterna Maria Jacinta, por todo acolhimento e suporte. Às minhas tias, em especial, Marilene e Francisca, e todos os demais familiares.

Aos meus grandes amigos, por todo o companheirismo, amizade, ajuda e apoio durante todos esses anos de estudo. Em especial, quero citar aqui alguns deles: Josivan Júnior, Gabriele Andrade, Diogénes Silva, Ellen Carvalho, Waleria Torres, Naila Taina, Nicolay Martins, André Leandro, Diego Leite, Kaio Guedes, e todos os outros colegas. Aos amigos que tenho há muito tempo e que sempre acreditaram em minha capacidade, gostaria de mencionar, em particular, alguns deles: Samira Marta, Pablo Victor, Felipe Henrique, Andressa Leite, Edna Raquel, Vanessa Silva.

Agradeço aos meus professores, com destaque para o meu orientador, Mestre Luiz Linhares, e ao Dr. Leovegildo Douglas, por todo o ensinamento proporcionado e pelas oportunidades.

À Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Campus Pombal, agradeço pelos recursos e oportunidades que tornaram possível a realização deste sonho.

## AVALIAÇÃO METODOLÓGICA NO DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE TRANSIÇÃO EM EDIFÍCIOS DE CONCRETO ARMADO

*Methodological evaluation in the sizing of transition beams in reinforced concrete buildings.*

Mayara Kettily Martins Cunha, e-mail: mayara10vc@gmail.com

Luiz Ricardo da Silva Linhares, e-mail: luizrlinhares@gmail.com

---

### RESUMO

Na engenharia estrutural, muitos elementos podem ser calculados de forma simplificada, seguindo o princípio clássico de Bernoulli, que assume que a seção permanece plana após sofrer deformações. Contudo, é fundamental reconhecer que essa simplificação nem sempre é aplicável a todas as estruturas, podendo demandar a adoção de abordagens alternativas, como a teoria do modelo de bielas e tirantes. O objetivo do estudo é dimensionar uma viga de transição, uma solução estrutural empregada em terrenos em divisa. Para isso, serão empregados os CAD/TQS e o método de bielas e tirantes. Foram dimensionadas três edificações, variando as tensões admissíveis para alternar as dimensões das sapatas e, por conseguinte, o braço de alavanca em balanço. A partir dessas variações, surgiram duas possibilidades de cálculos: consolo curto e viga em balanço, classificadas pela relação entre o braço de alavanca e a altura útil da seção. Observou-se que, nos modelos classificados como consolo, o software comercial apresentou inconsistências nos resultados. Portanto, tornou-se evidente que o consolo deve ser dimensionado pelo método de bielas e tirantes, ao passo que, para as vigas em balanço, o programa atende às necessidades do estudo.

**Palavras-chave:** Viga de transição. Modelo de bielas e tirantes. Região D.

### ABSTRACT

In structural engineering, many elements can be calculated in a simplified manner, following the classical principle of Bernoulli, which assumes that the section remains flat after undergoing deformations. However, it is crucial to recognize that this simplification is not always applicable to all structures, potentially requiring the adoption of alternative approaches, such as the model of struts and ties. The study's objective is to dimension a transition beam, a structural solution employed in bordering terrains. To achieve this, the CAD/TQS program and the struts and ties method will be employed. Three buildings were dimensioned, varying the allowable stresses to alternate the dimensions of the footings and, consequently, the lever arm in balance. From these variations, two calculation

possibilities emerged: short cantilever and overhanging beam, classified by the ratio between the lever arm and the useful height of the section. It was observed that in models classified as short cantilever, the commercial software showed inconsistencies in the results. Therefore, it became evident that the short cantilever should be dimensioned by the struts and ties method, while for the overhanging beams, the program meets the study's requirements

**Keywords:** Transition beam. Strut-and-tie model. Region D.

## 1. INTRODUÇÃO

Com frequência, deparamo-nos com edificações em que os pilares são posicionados de forma alinhada à superfície do terreno. Conforme destacado por Oliveira (2022), quando a abordagem estrutural para as fundações incorpora o uso de sapatas e o pilar está localizado na divisa, a respectiva fundação é designada como sapata de divisa. De acordo com Durlo (2022), existem soluções estruturais para evitar que as bases avancem sobre o terreno vizinho, sendo uma alternativa a utilização da viga de transição.

A viga de transição é uma estrutura em balanço no nível do térreo, destinado a suportar o pilar de divisa. Nesse arranjo, a carga excêntrica do pilar é transferida, por meio da viga, para uma sapata isolada. Durante o dimensionamento das vigas de transição, é crucial considerar que os esforços não são aplicados simultaneamente, como comumente adotado em cálculos. Esses esforços são progressivamente aplicados durante a construção, exigindo o enrijecimento da inércia da viga para prevenir deformações excessivas. Além disso, a transição é identificada como uma região especial devido a descontinuidade tanto em termos estáticos quanto geométrico.

As regiões especiais referem-se a segmentos específicos dentro de uma estrutura nos quais as condições de carga, geometria ou comportamento estrutural se desviam do convencional. Atualmente todos os projetos são desenvolvidos por meio de software que, apesar de conseguirem calcular quase todas as estruturas, não abrangem todas as situações de projeto, especialmente nessas regiões. Diante disso, surgiu a necessidade de estudar o modelo de bielas e tirantes, uma vez que sua teoria aborda de forma mais eficaz essas áreas específicas.

Conforme Schlaich, Schäfer e Jennewein (1987), os elementos estruturais podem ser classificados em “região B”, onde a hipótese de Bernoulli é aplicada, distribuindo linearmente a deformação específica ao longo da seção transversal, e descontínuas “regiões D”, onde o método de Bernoulli não é aplicado, e as deformações específicas apresentam uma distribuição não linear. A NBR 6118 (2023), no item 22.2, estabelece a definição dessas regiões.



Conforme Siqueira (2018), o método de bielas e tirantes não tem sido muito empregado, em parte pela falta de discussão sobre o tema e pela complexidade de sua metodologia. Isso explica por que muitos engenheiros tendem a preferir soluções práticas simplificadas e menos seguras ao adotar esses elementos. Essa tendência fica evidente na NBR 6118 (ABNT, 2023), a qual menciona a aplicação do método somente em elementos específicos.

O objetivo principal deste estudo é apresentar uma análise comparativa entre as possibilidades de cálculo para a viga de transição. Para o dimensionamento, serão utilizados o programa CAD/TQS e o modelo de bielas e tirantes (MBT). Serão incorporadas duas possíveis abordagens de avaliação, consolo curto e viga em balanço, as quais serão definidas pela relação do braço de alavanca e altura útil da seção. Para as vigas de transição dimensionadas pelo modelo de bielas e tirantes, serão verificadas as regiões nodais, tirantes e as bielas comprimidas. Além disso, será detalhado um exemplar de consolo curto ajustado para o elemento em concreto armado. Também serão relatadas as principais eventualidades da ferramenta computacional.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Com base nos princípios que embasam esta pesquisa, essa seção tem como objetivo fornecer os conhecimentos técnicos essenciais sobre as possíveis soluções estruturais para terrenos em divisa. Além disso, busca apresentar conceitos e diretrizes relacionadas ao modelo de bielas e tirantes.

### **2.1. Soluções para sapatas excêntricas**

A NBR 6122 (ABNT, 2019) define sapata como um elemento de fundação rasa em concreto armado, cujo dimensionamento é realizado de maneira a assegurar que as tensões de tração geradas sejam equilibradas através do posicionamento adequado das armaduras.

De acordo com Oliveira (2022), os projetos de construção buscam alinhar as extremidades dos pilares com as faces do terreno, visando maximizar a utilização do espaço disponível.

Para sapatas de divisa, geralmente existem três soluções comumente utilizadas: sapatas excêntricas de divisa com viga de equilíbrio (ou viga alavanca), sapatas de divisa com viga de transição e sapatas isoladas excêntricas sem viga de equilíbrio (Durlo, 2022).

Segundo Bastos (2023) as sapatas de divisa não estão conectadas a um pilar interno, como uma viga de equilíbrio. Portanto, a resistência à flexão causada pela excentricidade do pilar deve ser equilibrada pela sapata em cooperação com o solo. Nesse contexto, é comum projetar a sapata com uma forma mais retangular, visando reduzir o braço de alavanca entre os elementos.

A viga de equilíbrio é uma solução estrutural aplicada quando os pilares estão posicionados de forma excêntrica em relação ao centro da sapata. Isso resulta na geração de um momento fletor, o

qual, nesse cenário, é contrabalançado por uma viga alavanca conectada à sapata de outro pilar interno (Bastos, 2023).

Segundo Rebello (2008), nas vigas de transição ocorre a transferência da carga excêntrica do pilar através da viga de transição para uma sapata isolada, que a recebe de maneira centralizada. Dessa forma, a viga atua como uma viga em balanço.

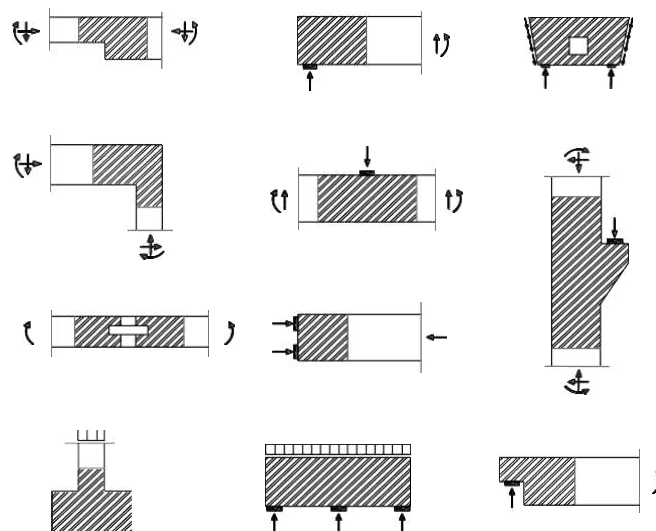
## 2.2. Modelo de bielas e tirantes

De acordo com Santos (2021), é possível utilizar o modelo de bielas e tirantes como uma ferramenta analítica, fundamentada no teorema estático da teoria da plasticidade, para realizar o dimensionamento de partes específicas em estruturas de concreto armado e protendido.

A hipótese de Bernoulli facilita muito o dimensionamento dos elementos de concreto armado. No entanto, é importante notar que essa suposição não é aplicável a todos os tipos de estruturas, de acordo com o princípio de Saint Venant. Este fundamento postula que as forças que atuam sobre um corpo resultam em efeitos localizados de tensão e deformação, os quais se tornam uniformes em áreas suficientemente afastadas das forças (Souza, 2004).

A Figura 1 ilustra diversos casos de regiões com descontinuidade, as quais são indicadas pelas áreas hachuradas.

Figura 1: Alguns casos ilustrativos de áreas classificadas como "D"



Fonte: adaptado da NBR 6118 (2023)

De acordo com a norma ACI 318 (2011), é importante manter o ângulo de inclinação entre bielas e tirantes em limites razoáveis para evitar falhas frágeis e impedir que as bielas se encurtem

enquanto os tirantes se alongam na mesma direção. A Tabela 1 apresenta os ângulos máximo e mínimo permitidos por algumas normas.

Tabela 1: Ângulo de inclinação entre bielas e tirantes conforme estipulado algumas normas

Normas	Ângulos permitidos
<b>NBR 6118 (ABNT, 2023)</b>	$30^\circ \leq \theta \leq 63,4^\circ$ ( $0,577 \leq \text{tg } \theta \leq 2$ )
<b>Eurocode 2 (CEN, 2004)</b>	$21,8^\circ \leq \theta \leq 68,2^\circ$ ( $0,4 \leq \text{tg } \theta \leq 2,5$ )
<b>Model Core 2010 (FIB, 2013)</b>	$25^\circ \leq \theta \leq 68,2^\circ$ ( $0,467 \leq \text{tg } \theta \leq 2,5$ )

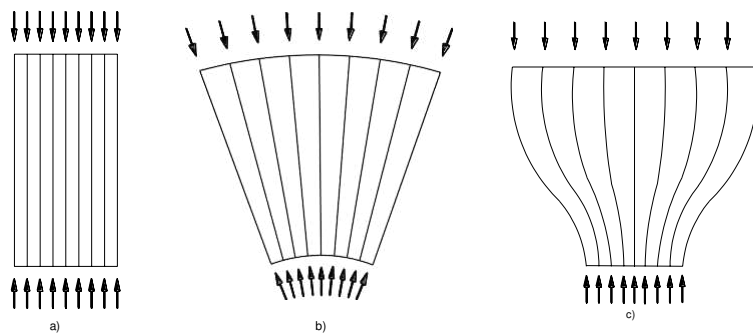
Fonte: adaptado de Santos (2021)

Além disso, é proposta a adaptação de exemplos padronizados ao utilizar a geometria e as forças específicas de uma região D. Atualmente, um amplo catálogo de modelos de bielas e tirantes está disponível, auxiliando o engenheiro na seleção da abordagem mais adequada (Santos, 2021).

### 2.2.1. Bielas

As bielas simbolizam os campos de tensão que exercem compressão sobre o elemento de concreto, estando orientadas na mesma direção do campo de tensão (Siqueira, 2018). Segundo Santos (2021), há três formas distintas de configuração para as bielas: Em leque, prismáticas, em formato de garrafa, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Campos de compressão: a) prismático, b) leque e c) garrafa



Fonte: adaptado de Santos (2021)

Conforme estabelecido pela NBR 6118 (ABNT, 2023), ao analisar as tensões máximas de compressão em bielas e regiões nodais, critérios específicos são estabelecidos para calcular a resistência. Nesse contexto é possível determinar a resistência por meio das equações 1, 2 e 3.

$$f_{cd1} = 0,85 \cdot \alpha v_2 \cdot f_{cd} \text{ (bielas prismáticas ou nós CCC)} \quad (1)$$

$$fcd2 = 0,6 \cdot \alpha v2 \cdot fcd \text{ (bielas com mais de um tirante, ou nós CTT ou TTT)} \quad (2)$$

$$fcd3 = 0,72 \cdot \alpha v2 \cdot fcd \text{ (bielas atravessadas por tirante único, ou nós CCT)} \quad (3)$$

A norma NBR 6118 (2023) define o coeficiente  $\alpha v2$  por meio da equação 4.

$$\alpha v2 = \left(1 - \frac{fck}{250}\right) \quad (4)$$

### 2.2.2. Nós

Segundo Schlaich, Schäfer e Jennewein (1987), os nós representam uma abstração simplificada e eficaz para ilustrar a interseção entre bielas e tirantes em áreas onde há uma mudança acentuada na direção das forças. Essas estruturas apresentam estados de tensão distintos, demandando verificações individuais.

Na abordagem por meio do modelo de bielas e tirantes (MBT), é comum que os nós exerçam influência sobre o dimensionamento dos componentes estruturais. Caso haja verificações ou detalhamentos inadequados, isso pode resultar em uma redução considerável na resistência de um elemento estrutural. A classificação dos nós em termos de plano é demonstrada conforme a seguir: (Santos, 2021, p. 43).

- Os nós CCC: são aqueles em que apenas forças de compressão são equilibradas.
- Os nós CCT: são aqueles que ancoram barras tracionadas em apenas uma direção.
- Os nós CTT: são aqueles que ancoram barras tracionadas em duas direções.
- Os nós TTT: são aqueles em que apenas tirantes confluem para o nó.

De acordo com Santos (2021), existem dois grupos distintos de nós: nós contínuos, onde as direções das tensões principais mudam de forma sutil, e singulares, caracterizados por alterações abruptas nas direções das tensões principais.

### 2.2.3. Tirantes

Segundo a perspectiva de Schlaich, Schäfer e Jennewein (1987), a armadura tem a responsabilidade de suportar as forças de tração presentes em um componente estrutural de concreto.

Quando se explora a análise de estruturas por meio do modelo de bielas e tirantes, é crucial garantir que, durante o estado limite último (ELU), a armadura alcance o limite de escoamento. Isso desempenha um papel essencial em aprimorar a capacidade do concreto estrutural para lidar de maneira mais eficiente com deformações plásticas (Santos, 2021).

### 2.3. Consolo

O consolo é um elemento estrutural em balanço que atua como suporte para outras partes da estrutura, sua função principal é redistribuir os esforços entre os elementos que constituem o sistema (Aguiar, 2018).

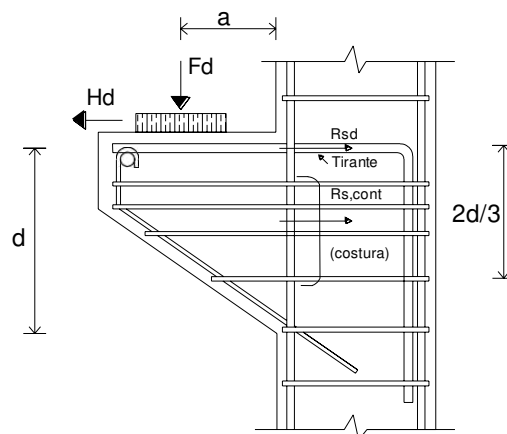
Em termos mais precisos a NBR 6118 (ABNT, 2023) define “os elementos nos quais a distância (a) da carga aplicada até a face do apoio é menor ou igual a altura útil (d) do elemento [...]”, conforme a Figura 3. Seguindo as diretrizes da NBR 9062 (ABNT, 2017), é possível categorizar os consolos com base na relação  $a/d$ , como exemplificado a seguir:

$a/d > 1,0$ : Viga em balanço que pode ser dimensionada utilizando métodos usuais de dimensionamento a flexão em vigas.

$0,5 \leq a/d \leq 1$ : Consolo curto, e o cálculo pode ser realizado pelo método das bielas e tirantes;

$a/d < 0,5$ : Consolo muito curto, e o cálculo pode ser realizado utilizando o método das bielas e tirantes ou por atrito ao cisalhamento.

Figura 3: Dimensões utilizadas para classificar o consolo

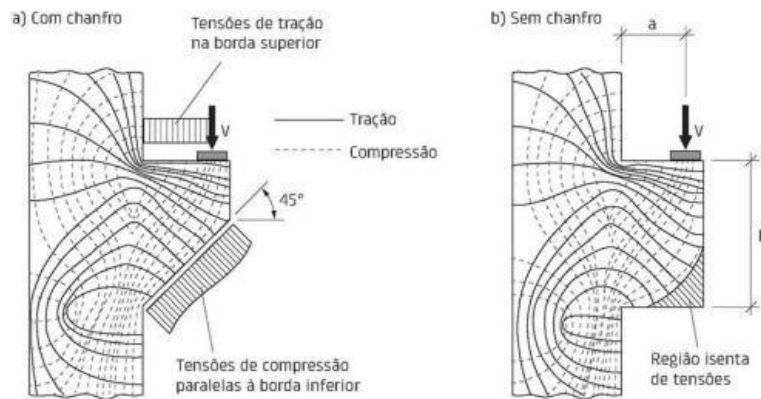


Fonte: Adaptado da NBR 6118, 2023

Os consolos representam balanços de extensão relativamente reduzida, o que justifica uma abordagem distinta daquela aplicada às vigas, uma vez que, de maneira geral, não se enquadram na teoria convencional de flexão (Debs, 2017).

No estudo conduzido por Franz e Niedenhoff (1963), citado por Leonhardt e Mönning (1978a), foram examinadas as trajetórias das tensões principais para consolos com uma proporção  $a/h = 0,5$ , como ilustrado na Figura 4.

Figura 4: Trajetória das tensões principais em regime elástico



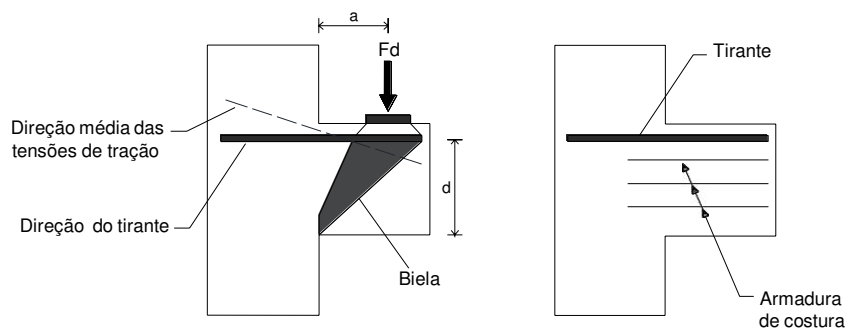
Fonte: LEONHARDT e MÖNNIG, 1977 apud El Debs, 2017

Após examinar os resultados, Leonhardt e Mönnig (1977, p.138) obtiveram as conclusões a seguir:

- A parte inferior do consolo retangular não é praticamente solicitada, de forma que o chanfro nesta parte do consolo não influi na resistência;
- As isostáticas de tração na parte superior são aproximadamente horizontais com tensão constante desde o ponto de aplicação da força até a seção na face do pilar, sugerindo assim o emprego de armadura junto à face superior, que seria a armadura principal do consolo, chamada de armadura do tirante;
- As tensões de compressão partem do ponto de aplicação da força e vão até a base do consolo, sugerindo a formação de biela entre o ponto de aplicação da força e a base do consolo;
- Os estribos verticais, como normalmente utilizados nas vigas, não funcionam e as resultantes das demais tensões de tração podem ser absorvidas por estribos horizontais.

A representação das armaduras de um suporte curto é exibida na Figura 5, seguindo a abordagem de El Debs (2017). Ela ilustra a formação de uma biela comprimida, desde onde a carga é aplicada até a base do apoio. Além disso, mostra o arranjo padrão das armaduras, incluindo o tirante e a armadura de costura.

Figura 5: Representação das armaduras principais



Fonte: Adaptado de El Debs, 2017

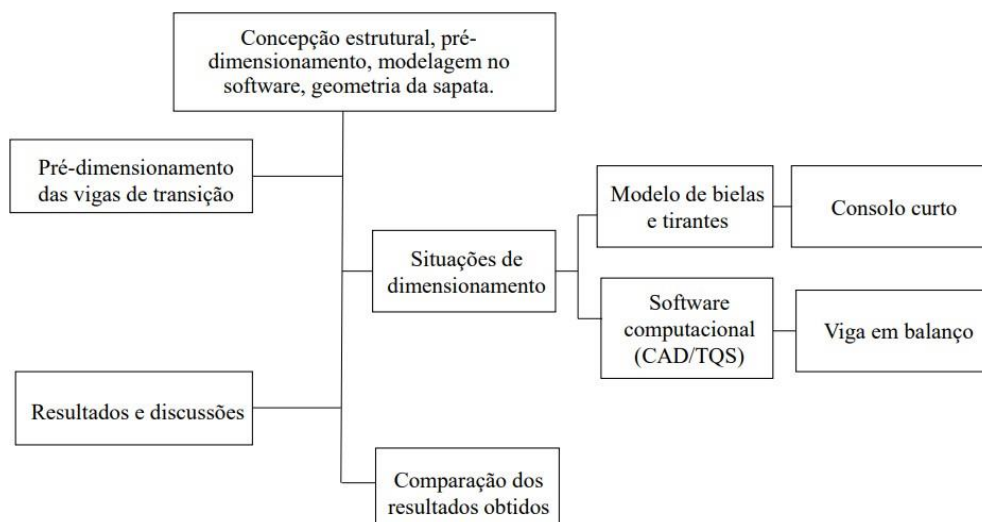
No dimensionamento do elemento em concreto armado, é essencial assegurar uma falha dúctil, na qual as armaduras alcancem o escoamento antes da ruptura por esmagamento do concreto. Essa abordagem permite que as estruturas se deformem antes de chegarem à ruptura, proporcionando indícios antecipados que permitem prever medidas corretivas (Souza, 2004).

Devido à geometria singular e à carga concentrada elevada do consolo, a hipótese de Bernoulli não pode ser aplicada a esse elemento. Portanto, é essencial usar o método de bielas e tirantes para calcular seu dimensionamento (Siqueira, 2018).

### 3. METODOLOGIA

Este estudo concentra-se no dimensionamento dos elementos descontínuos de um edifício localizado na divisa do terreno. Neste caso, envolve o dimensionamento de uma viga de equilíbrio, também conhecida por alguns autores como viga de transição, um elemento singular no qual, dependendo da classificação da região analisada, os métodos convencionais de dimensionamento não são adequados. O fluxograma da pesquisa está ilustrado na Figura 6.

Figura 6: Fluxograma dos procedimentos adotados



Fonte: Autor (2023)

Conforme evidenciado na Figura 6, as etapas da pesquisa envolvem a concepção estrutural, bem como a seleção dos materiais a serem utilizados, resistências empregadas e as tensões admissíveis utilizadas em cada projeto. Além disso, serão determinadas as dimensões dos elementos estruturais por meio de pré-dimensionamento, assim como das vigas de transição. Após a definição de todos os elementos, com base nos resultados do braço de alavanca e altura útil da seção, o modelo adotado para o dimensionamento será determinado. Se for o consolo curto, este será dimensionado pelo modelo de bielas e tirantes, enquanto a viga em balanço será analisada por meio do programa numérico. Por fim, será realizada uma análise comparativa dos métodos de avaliação.

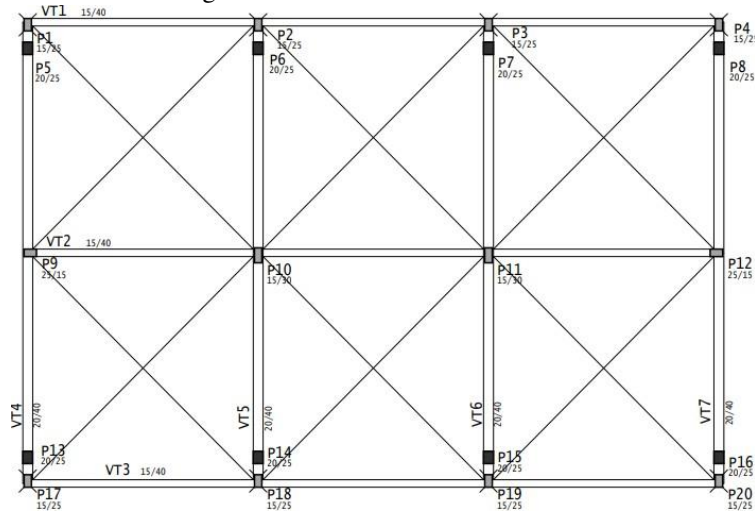
### 3.1. Concepção estrutural

A etapa de concepção estrutural compreende a seleção dos elementos que compoem a estrutura, bem como suas posições correspondentes, com o objetivo de estabelecer um sistema equilibrado. Nessa etapa, foram estabelecidos os parâmetros estruturais, assim como os materiais, resistências e a escolha dos sistemas estruturais. Dessa forma, os passos subsequentes foram adotados para orientar o desenvolvimento desse projeto:

- a) A resistência à compressão do concreto utilizada foi de 30 MPa.
- b) A classe de agressividade ambiental foi determinada de acordo com a ABNT NBR 6118:2023, na seção 6.4.2. A estrutura foi atribuída a classe I, denotando um nível de risco insignificante.
- c) O aço adotado no projeto é o CA-50, o qual será utilizado nas armaduras longitudinais.
- d) Para efeitos de cálculo, será adotado duas tensões admissíveis do solo de 2 kgf/cm<sup>2</sup> e 3 kgf/cm<sup>2</sup>, nas quais as tensões serão adaptadas aos três modelos propostos. Conforme afirmado por Alonso (2010), a tensão máxima que pode ser transmitida para o solo é determinada pela seguinte equação:  $\sigma_s = (P_{pilar} + P_{próprio})/A_{base}$ . Desta maneira, a tensão limite será empregada para determinar as áreas das sapatas.
- e) A geometria da estrutura consistirá em pórticos modularizados com vão de 4,50 m, contendo 4 eixos verticais e 3 eixos horizontais. Como ilustrado na Figura 7, é importante evidenciar que a planta de forma corresponde ao modelo I, conseqüentemente, ocorrerão variações nas dimensões das vigas e pilares nos modelos subsequentes.
- f) O sistema estrutural adotado será o concreto armado, formada por vigas, pilares e lajes maciças.



Figura 7: Planta de forma do modelo I



Fonte: Autor (2023)

É importante ressaltar que foram utilizados vãos usuais em edificações residenciais, com o propósito de empregar elementos estruturais com geometrias convencionais.

### 3.2. Pré-dimensionamento

O pré-dimensionamento consiste em realizar uma estimativa inicial das dimensões das seções dos elementos estruturais. Esse cálculo aproximado desempenha um papel fundamental durante a fase inicial do projeto, pois contribui para a compreensão da estrutura, aproximando-se de uma concepção coerente.

No processo de pré-dimensionamento das lajes e vigas, as recomendações de autores e a experiência prática do projetista foram integradas de forma empírica para estimar as alturas dos elementos, como exemplificado a seguir:

- Vigas contínuas: altura das vigas = 1/12 do vão teórico
- Laje maciça: altura = vão teórico / altura da viga

A edificação apresenta pavimentos tipo com vãos teóricos de 4,5 metros em todas as dimensões, resultando na escolha das alturas das vigas e lajes de 40 e 12 centímetros, respectivamente.

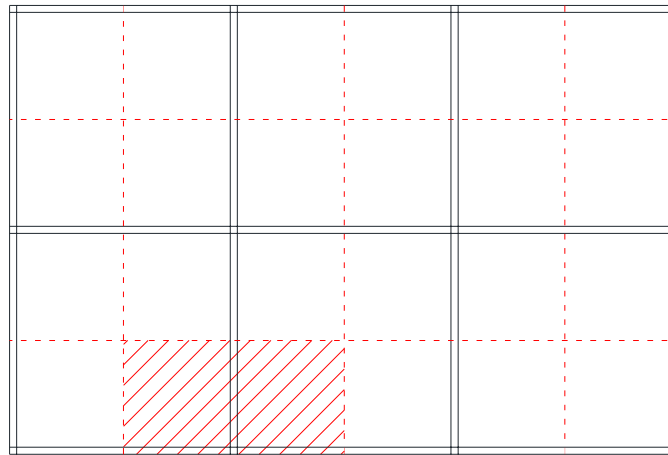
Da mesma forma, a estimativa preliminar da área da seção transversal dos pilares é realizada também com base na experiência prática do engenheiro. As cargas aplicadas nos pilares são pré-determinadas por meio de variações no número de pavimentos, inicialmente estimando-se uma carga média de 1,0 tf/m<sup>2</sup> por pavimento, bem como uma tensão ideal devido ao esforço normal nos pilares,  $\sigma_{\text{ pilar }} = 0,1 \text{ tf/cm}^2$  (10 MPa). Este procedimento segue o método das áreas de influência,

conforme ilustrada na Figura 8, e o esforço normal nos pilares,  $N_{pilar}$ , é determinado de acordo com as equações 5 e 6.

$$N_{pilar} = A_{influencia} \cdot \frac{1 \text{ tf}}{m^2} \cdot NPAV \quad (5)$$

$$A_{pilar} = \frac{N_{pilar}}{\sigma_{pilar}} = \frac{N_{pilar}}{0,1 \text{ tf/cm}^2} \quad (6)$$

Figura 8: Área de influência do pilar de extremidade



Fonte: Autor (2023)

O objetivo deste estudo consiste em variar o número de pavimentos para efetuar uma análise comparativa da viga de transição sob diferentes condições de carga. Para os pilares de divisa, o cálculo da área de influência foi realizado considerando a situação de um pilar de extremidade, uma vez que esta configuração corresponde ao pior caso, e tende a possuir uma área de influência maior do que o pilar de canto. A seguir, serão apresentados os cálculos iniciais para o pré-dimensionamento dos pilares:

- I. Vãos médios na ordem de 4,50 m:  $A_{influencia} = 11,16 \text{ m}^2$
- II. Número de pavimentos, NPAV: 2 (térreo + 1); 3 (térreo + 2) e 4 (térreo + 3);
- III. A área do pilar é calculada em função do número de pavimentos.
- IV. A largura de referência é estabelecida em 15 centímetros, e a segunda dimensão é calculada sob a premissa de uma geometria retangular.

Nesse sentido, de acordo com as Tabelas 2,3 e 4, temos as áreas dos pilares para cada posição e a dimensões correspondentes. É fundamental destacar que, de acordo com a norma ABNT NBR 6118:2023, é estabelecido que a área do pilar não deve ser inferior a 360 cm<sup>2</sup>.

Tabela 2: Dimensões dos pilares de canto

NPVA	Npilar (tf)	Área (cm <sup>2</sup> )	Área mínima (cm <sup>2</sup> )	Dimensão y (cm)	Mínima y (cm)	≈
2	11,52	115,2	360	8	24	25
3	17,28	172,8	360	12	24	25
4	23,04	230,4	360	16	24	25

Fonte: Autor (2023)

Tabela 3: Dimensões dos pilares de extremidade

NPVA	Npilar (tf)	Área (cm <sup>2</sup> )	Área mínima (cm <sup>2</sup> )	Dimensão y (cm)	Mínima y (cm)	≈
2	22,32	223,2	360	15	24	25
3	33,48	334,8	360	23	24	25
4	44,64	446,4	446,4	30	-	30

Fonte: Autor (2023)

Tabela 4: Dimensões dos pilares intermediários

NPVA	Npilar (tf)	Área (cm <sup>2</sup> )	Área mínima (cm <sup>2</sup> )	Dimensão y (cm)	Mínima y (cm)	≈
2	43,24	432,4	432,4	29	-	30
3	64,86	648,6	648,6	44	-	45
4	86,48	864,8	864,8	58	-	60

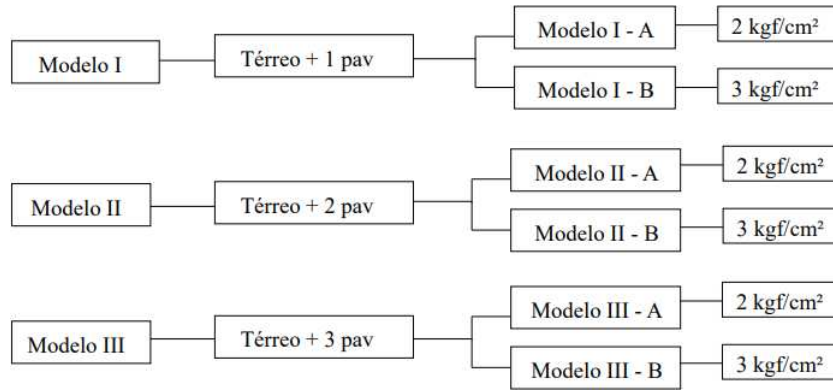
Fonte: Autor (2023)

### 3.3. Modelagem no software

O CAD/TQS foi concebido para auxiliar os engenheiros em todas as etapas do projeto. A ferramenta lida com uma variedade de estruturas, incluindo concreto armado, protendido, alvenaria estrutural, dentre outros. É crucial ressaltar que o programa não toma decisões; essa responsabilidade é exclusiva do calculista. Portanto, o programa requer que o projetista verifique cada detalhe e conduza a análise estrutural de forma separada. Neste estudo, será utilizada a versão V23 do software.

A edificação modelo em questão possui projeção de 133,25 m<sup>2</sup>. O projeto foi executado em concreto armado seguindo o modelo estrutural tipo IV (as lajes são adotadas de forma independente). Neste estudo, serão modeladas três edificações, nos quais a tensão admissível do solo será alternada para cada tipo, conforme ilustrado na Figura 9. É relevante destacar que não foram conduzidos ensaios para determinar esses valores.

Figura 9: Modelos empregados na edificação



Fonte: Autor (2023)

O CAD/TQS incorpora um tratamento especial para as vigas de transição, no qual o programa ajusta a inércia do elemento através da aplicação de um multiplicador de inércia à flexão. Isso resulta em um aumento significativo, 10 vezes maior, na rigidez do elemento, conferindo-lhe uma maior resistência. Vale destacar que o programa possibilita que o usuário altere esse valor do multiplicador, no entanto, para esta pesquisa, será considerado o valor padrão.

O processo de dimensionamento é realizado com base em uma envoltória de esforços, utilizando dois diagramas distintos. Um deles considera a rigidez padrão da viga, enquanto o outro leva em consideração a rigidez majorada pelo multiplicador da viga, como estabelecido pelos diagramas de esforços internos na combinação do estado limite último.

Segundo as diretrizes do manual técnico intitulado "Prática Recomendada para Estruturas de Edifícios de Nível 1 – Estruturas de Pequeno Porte", elaborado pelo Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON, 2003), é admissível a omissão do cálculo do efeito do vento em construções simples com até 4 pavimentos. Essas estruturas devem ser regulares, desprovidas de protensão, apresentando sobrecarga até 3 KN/m<sup>2</sup>, pilares com altura não superior a 4 m e vãos de até 6 m. Contudo, para viabilizar essa exclusão, é imprescindível assegurar a estrita conformidade com as prescrições relativas aos pilares, o que implica considerar o desaprumo global.

Em todos os modelos, optou-se por desconsiderar o efeito do vento, dado que as edificações se encaixam nas condições pré-estabelecidas pelas recomendações técnicas do IBRACON. Assim, dado que não estamos contemplando a ação do vento, e a ABNT NBR 6118:2023 exige que seja considerada pelo menos uma ação horizontal, dessa forma, será contemplado o desaprumo em todas as direções.

É relevante destacar que todas as cargas empregadas no programa foram determinadas conforme a norma ABNT 6120:2019. Os valores das cargas utilizadas nas edificações estão apresentados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5: Resumo das cargas das lajes

<b>Lajes</b>		
<b>Pavimento</b>	<b>Permanente (tf/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Acidental (tf/m<sup>2</sup>)</b>
<b>Cobertura</b>	0,1	0,1
<b>Tipo</b>	0,1	0,15
<b>Térreo</b>	0	0

Fonte: Autor (2023)

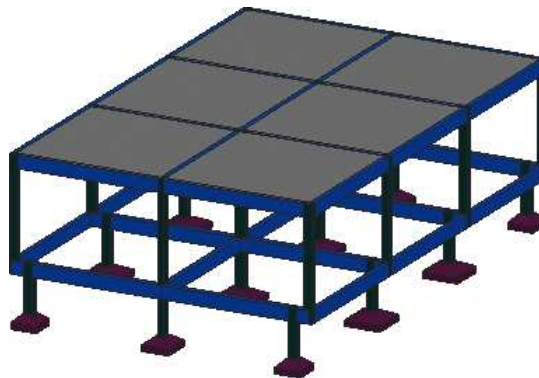
Tabela 6: Resumo das cargas das vigas

<b>Vigas</b>		
<b>Pavimento</b>	<b>Altura de parede (m)</b>	<b>Permanente (tf/m<sup>2</sup>)</b>
<b>Cobertura</b>	1	0,18
<b>Tipo</b>	2,7	0,18
<b>Térreo</b>	2,7	0,18

Fonte: Autor (2023)

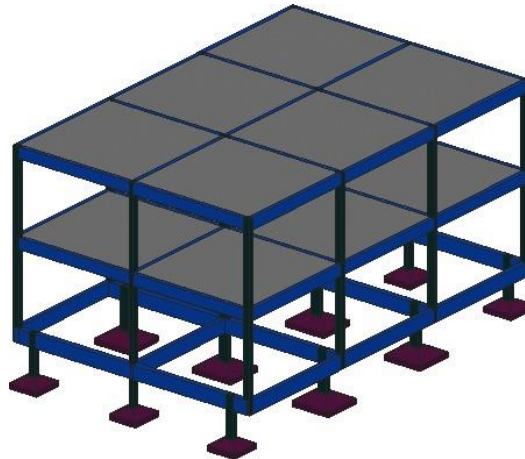
Nas Figuras 10, 11 e 12, serão exibidos os modelos utilizados no estudo, variando o número de pavimentos. Serão ilustrados apenas os modelos com uma tensão de 2 kgf/cm<sup>2</sup>.

Figura 10: Apresentação tridimensional do modelo I do edifício



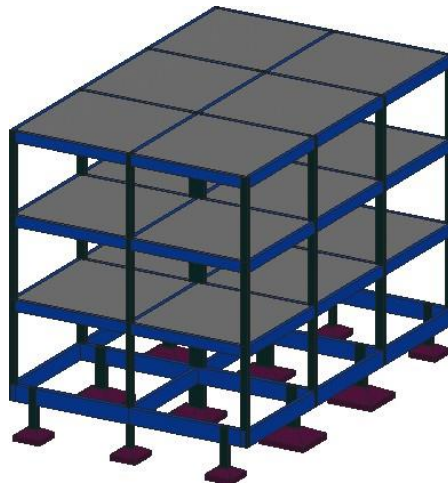
Fonte: Autor (2023)

Figura 11: Apresentação tridimensional do modelo II do edifício



Fonte: Autor (2023)

Figura 12: Apresentação tridimensional do modelo III do edifício



Fonte: Autor (2023)

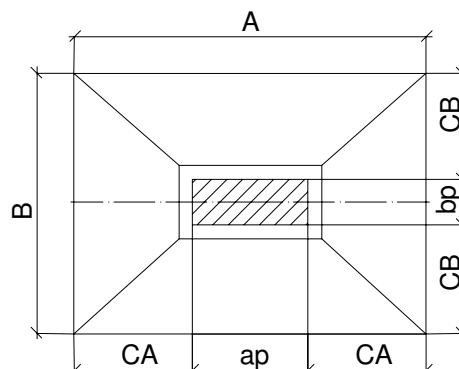
### 3.4. Geometria da sapata

O dimensionamento geotécnico das dimensões das sapatas é determinado pela tensão admissível do solo. Com o objetivo de alcançar um dimensionamento econômico, busca-se definir as dimensões A e B da sapata de tal maneira que os balanços sejam equivalentes ou similares, o que, por sua vez, resultará em taxas de armadura de flexão uniformes em ambas as direções. Como indicado nas equações 7 e 8, é possível determinar o equilíbrio da sapata. A Figura 13 apresenta os valores que constituem a sapata.

$$A - ap = B - bp \quad (7)$$

$$A - B = ap - bp \quad (8)$$

Figura 13: Dimensões da sapata isolada



Fonte: adaptado de Bastos (2019)

No projeto, uma distância de 5 cm entre a sapata e a divisa do terreno foi estabelecida para evitar qualquer interferência com as fundações vizinhas.

### 3.5. Situação de dimensionamento

Nesta seção, serão estabelecidas as equações que governam os dimensionamentos nos métodos.

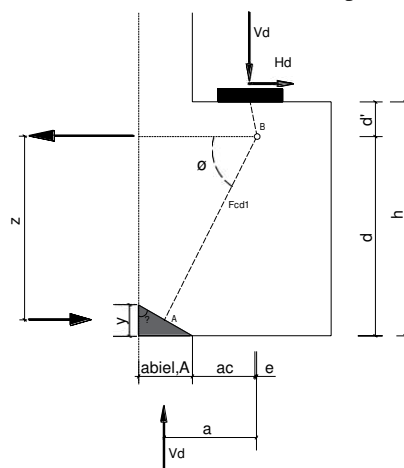
#### 3.5.1. Consolo curto

A solução implementada envolve assumir a estrutura com um consolo, tendo em vista que sua configuração é análoga à configuração desta, onde temos o elemento em balanço, recebendo uma carga pontual e conduzindo-a para outro apoio mais próximo do balanço. Essa carga é, então, transmitida para uma sapata isolada e, por fim, para o solo.

Dentro deste contexto, ao conceber a estrutura como um consolo, é necessário identificar o tipo de elemento, conforme a seção 2.1. A partir da relação entre a distância da carga aplicada até a face do apoio e altura útil, surgem três cenários distintos: o consolo muito curto, o consolo curto e a viga em balanço, conforme a norma NBR 6118:2023. Com base nessa categorização, procede-se ao dimensionamento do elemento de forma manual, utilizando o método de bielas e tirantes ou teoria a flexão para a viga em balanço.

O método de bielas e tirantes aplicado ao consolo é baseado nas trajetórias de tensões principais, que são determinadas pelo fluxo de tensão que pode ser computado através do método dos elementos finitos. Na seção 2.6, foi apresentada o fluxo de tensão do elemento em estudo. Dessa forma, buscando simplificação, é possível realizar uma análise independente, conforme o modelo recomendado por Santos (2021) para o dimensionamento, como exemplificado na Figura 14.

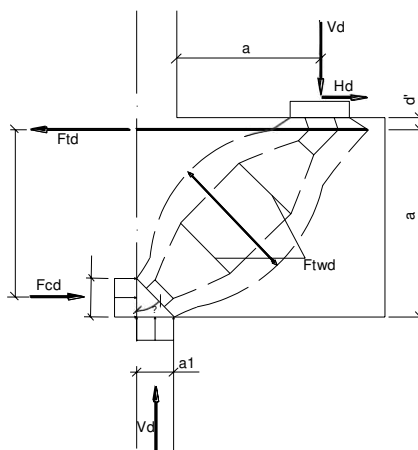
Figura 14: Modelo de biela e tirante para consolo curto.



Fonte: Adaptado de Santos (2021).

O modelo proposto por Santos (2021) descreve uma biela com uma configuração em formato de garrafa. Nesse modelo, as tensões atuam transversalmente, tendendo a abrir a biela, gerando, assim, forças de tração. Portanto, além das armaduras principais, é necessário assegurar a presença das armaduras secundárias para resistir ao fendilhamento do concreto. Conforme ilustrado na Figura 15, temos o modelo que descreva a configuração desta.

Figura 15: Modelo de biela direta com formato de garrafa.



Fonte: Adaptado de Santos (2021).

A viga de transição será dimensionada para o cenário mais crítico, conforme mencionado na seção 1.2, que corresponde à viga que recebe o pilar de extremidade. Na sequência será apresentado um roteiro de cálculo para o dimensionamento do consolo, baseado no modelo proposto por Santos (2021) e de acordo com as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 9062:2017 e NBR 6118: 2023.

Conforme a norma Eurocode 2 (CEN, 2014), o ângulo de inclinação entre bielas e tirantes é dado pela equação 9.

$$0,4 \leq \cotg\theta \leq 2,5 = 21,8^\circ \leq \theta \leq 68,2^\circ \quad (9)$$

De acordo com a NBR 6118: 2023 a resistência dos nós pode ser definida de acordo com o seu tipo, conforme mencionado no item 2.1.1 nas equações 2,3 e 4.

Passo 1: Determinar o comprimento do nó CCC, de acordo com a equação 10.

$$a1 = \frac{Vd}{b \cdot fcd1} \quad (10)$$

Passo 2: Determinar a altura do nó CCC;

a) A distância do ponto de aplicação da carga até o pilar é determinada pela equação 11.

$$a = \frac{a1}{2} + ac + \frac{Hd}{Vd}d' \quad (11)$$



b) A equação 12 descreve a altura do nó.

$$y = d\sqrt{d^2 - 2a_1 \cdot a} \quad (12)$$

Passo 3: Determinação do braço de alavanca conforme a equação 13.

$$z = d - \frac{y}{2} \quad (13)$$

Passo 4: A verificação da capacidade de rotação plástica conforme ilustra a equação 16, atendendo ao limite da equação 14.

$$\frac{x}{d} = \frac{y}{\lambda \cdot d} \leq 0,4 \quad (14)$$

$$\lambda = \begin{cases} 0,8 \text{ para } f_{ck} \leq 50 \text{ MPA} \\ f_{ck} - 50 \\ 0,8 - \left(\frac{\quad}{400}\right) \text{ para } f_{ck} > 50 \text{ MPA} \end{cases} \quad (15)$$

Passo 5: Determinação da inclinação da biela conforme a equação 16.

$$\cot g\theta = \frac{y}{a_1} \quad (16)$$

Passo 6: A força no tirante está descrita na equação 17. A determinação da área de aço da armadura de equilíbrio geral é regida pela equação 18, sendo necessário atender a uma área de aço mínima, conforme especificado na equação 19.

$$F_d = V_d \cdot \cot g\theta + H_d \quad (17)$$

$$A_{s, \text{tir}} = \frac{F_d}{f_{yd}} \quad (18)$$

$$A_{s, \text{tir}, \text{mín}} = 0,04 b_w \cdot d \cdot \frac{F_d}{f_{yd}} \quad (19)$$

Passo 7: Comprimento de ancoragem

O comprimento de ancoragem básico é exemplificado pela equação 20.

$$l_b = \frac{\emptyset \cdot f_{yd}}{4 \cdot f_{bd}} \quad (20)$$

O comprimento de ancoragem necessário é dado pela equação 21.

$$lb, nec = a \cdot 1. a \cdot 2. a \cdot 3. a \cdot 4. a \cdot 5. lb. \frac{As, cal}{As, ef} \geq lb, mín \quad (21)$$

$\alpha_1 = 1,0$  para barras sem ganho;

$\alpha_1 = 0,7$  para barras tracionadas com ganho, com cobrimento no plano normal ao ganho aços horizontais ou barras soldadas  $\geq 3\theta$ ;

$\alpha_2 = 0,7$  quando houver barras transversais soldadas;

$\alpha_3 = 0,7$  cobrimento das armaduras com ganho ou laço;

$\alpha_3 = 0,7$  barras transversais não soldadas com barras retas, com ganho ou laços;

$\alpha_5 = 0,7$  compressão transversal barras retas, com ganho ou laços.

Comprimento de ancoragem mínimo deve atender a equação 22.

$$lb, mín \geq \begin{cases} 0,3lb \\ 10. \theta \\ 100 \text{ mm} \end{cases} \quad (22)$$

O comprimento de ancoragem disponível é expresso pela equação 23.

$$lb, disp = a_2 + a - c - \frac{Hd}{Fd} \cdot d' \quad (23)$$

Passo 4: Verificações do nó B

a) O comprimento do nó CCT é determinado pela equação 24.

$$a, bie, B = a \cdot \text{psen}\theta + u \cdot \text{cos}\theta \quad (24)$$

b) A força atuante na biela é dada pela equação 25.

$$F_{cwd} = \frac{Vd}{\text{sen}\theta} \quad (25)$$

c) A verificação do nó CCT.

A tensão nas bielas e a tensão introduzida no apoio é dado as equações 26 e 27, respectivamente.

$$\sigma_{cd, B} = \frac{F_{cwd}}{b_w \cdot a, bie, B} \leq f_{cd3} (CCT) \quad (26)$$

$$\sigma_{cd, ap} = \frac{F_{c wd}}{ap \cdot bp} \leq f_{cd3} \quad (27)$$

Passo 7: Determinação da armadura secundária, considerando a aplicação do modelo de biela em garrafa

a) Verificação da biela

O comprimento da biela é expresso pela equação 28.

$$abie, A = \sqrt{a^2 + y^2} \quad (28)$$

O comprimento médio da biela é definido pela equação 29.

$$abie, M = \frac{abie, A + abie, B}{2} \quad (29)$$

b) A força na armadura secundária é determinada pela equação 30.

$$F_{wd} = 0,25 \cdot F_{c wd} \cdot \left(1 - 1,4 \cdot \frac{abie, M}{z} \cdot \text{sen}(\theta)\right) \quad (30)$$

A força na armadura secundária, tanto na vertical quanto na horizontal, é expressa pelas equações 31 e 32, respectivamente.

$$F_{wvd} = 2 \cdot F_{wd} \cdot \cos(\theta) \quad (31)$$

$$F_{whd} = 2 \cdot F_{wd} \cdot \text{sen}(\theta) \quad (32)$$

c) Armadura secundária vertical e horizontal, respectivamente, é dada pela equação 33 e 34.

$$A_{sv} = \frac{F_{wvd}}{f_{yd}} \quad (33)$$

$$A_{sh} = \frac{F_{whd}}{f_{yd}} \quad (34)$$

A armadura secundária mínima para consolos curtos é determinada pela equação 35, enquanto a armadura mínima para costuras é definida pela equação 36.

$$A_{sh, \text{mín}} = 0,4 \frac{V_d \cdot \cotg \theta}{f_{yd}}, \text{ para } 0,5 \leq \frac{ac}{z} \leq 1 \quad (35)$$

$$\frac{A_{sh, \text{mín}}}{S_c} = 0,15b \frac{cm}{m}, \text{ para } \frac{ac}{z} > 1 \text{ (armadura de pele)} \quad (36)$$

Armadura mínima a ser respeitada é estabelecida pela expressão 37.

$$\frac{A_{sh, \min}}{s_v} = \frac{A_{sv, \min}}{S_h} = 0,15b \text{ cm/m} \quad (37)$$

### 3.5.2. Viga em balanço

As armaduras longitudinais e transversais serão dimensionadas para a combinação de cálculo no estado limite último. Seguindo as prescrições de resistência e detalhamento prescrita na NBR 6118:2023.

As verificações do estado limites de serviço foram realizadas de acordo com o item 17.3 da NBR 6118:2023. Conforme o regulamento, o limite de flecha é estabelecido em  $L/250$ , sendo  $L/125$  aplicável a vigas em balanço. Além disso, a norma impõe que a contra flecha não deve causar um desvio no plano principal superior a  $L/350$ .

Quando o apoio de extremidade da viga for apertado, levando a  $l_{b, nec} > l_{b, disp}$ , torna-se impossível realizar a ancoragem com gancho nessa situação. Uma alternativa viável é empregar grampos para efetuar a ancoragem. Os grampos precisam ser projetados para suportar a força mínima  $F_{sd}$ , que representa a força na armadura longitudinal de tração que atinge o suporte. Essa força é expressa é dada pela equação 38.

$$F_{sd} = R_{sd} \left(1 - \frac{l_{b, disp}}{l_{b, nec}}\right) \quad (38)$$

Onde  $R_{sd}$  representa a força total na armadura longitudinal de tração que alcança o suporte, conforme definido pela equação 39.

$$R_{sd} = \left(\frac{a_l}{d}\right) V_d \quad (39)$$

Assim, os grampos devem exibir uma área, representada pela equação 40.

$$A_{s1} = \frac{F_{sd}}{F_{yd}} \quad (40)$$

O comprimento de ancoragem dos grampos, medido a partir da face do suporte, é determinado pela equação 41.

$$l_{b, 1} = \frac{\emptyset f_{yd}}{4 f_b d} \quad (41)$$

O espaçamento mínimo livre entre as barras deve ser, em cada direção, o maior entre os três valores a seguir:

$$av = \left\{ \begin{array}{l} 20 \text{ mm} \\ \text{diâmetro da barra, do feixe ou luva} \\ 0,5 d_{\text{máx, agregado}} \end{array} \right. \quad (42)$$

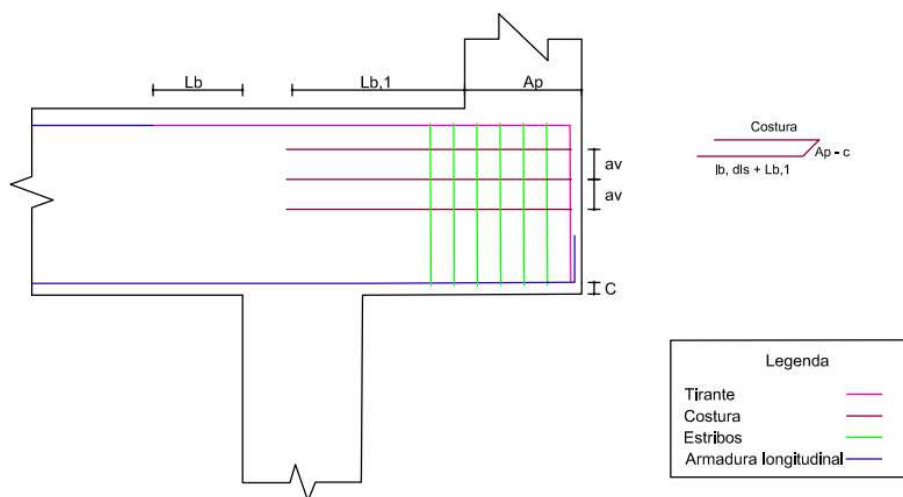
#### 4.0. Resultados e discussões

Esta seção tem como propósito apresentar os cálculos e a análise entre os métodos adotados. Além disso, visa apresentar o estudo acerca do pré-dimensionamento das vigas de transição.

#### 4.1. Resultado manual

O detalhamento do consolo curto está em conformidade com os padrões estabelecidos para estruturas pré-moldadas, de acordo com as diretrizes da NBR 9062:2017. No entanto, essas especificações serão adaptadas para os elementos em concreto armado. Para este estudo, serão considerados apenas os cálculos relativos à armadura principal e as verificações fornecidas pelo modelo de bielas e tirantes. A Figura 16 ilustrará o padrão de posicionamento das armaduras considerado neste trabalho para a viga de transição, com base no dimensionamento para as situações de consolo.

Figura 16: Detalhamento idealizado para a viga de transição



Fonte: Autor (2023).

De acordo com a classificação dos modelos I, II e III, para cada tipo, as tensões admissíveis foram variadas, os modelos com tensão de  $2 \text{ kgf/cm}^2$  serão dimensionados como consolo curto, viga em balanço e viga em balanço, respectivamente. Já para os projetos com tensão de  $3 \text{ kgf/cm}^2$ , eles serão classificados como consolo curto, consolo curto e viga em balanço, conforme especificado na

Tabela 7. É essencial acentuar que a tensão admissível está intimamente ligada ao comprimento do balanço, sendo este um elemento determinante na classificação do modelo de cálculo. Portanto, à medida que a capacidade do solo aumenta, as dimensões da sapata diminuem, conseqüentemente, o comprimento do balanço reduz. Dessa forma, a relação entre o braço de alavanca e a altura útil será menor.

Tabela 7: Classificação da viga de transição

<b>Tipos</b>	<b>d</b>	<b>a</b>	<b>a/d</b>	<b>Metodologia</b>
<b>Modelo I - A</b>	36,5	35	0,96	Consolo curto
<b>Modelo I - B</b>	36,5	30	0,82	Consolo curto
<b>Modelo II - A</b>	46,5	50	1,08	Viga em balanço
<b>Modelo II - B</b>	46,5	37,5	0,81	Consolo curto
<b>Modelo III - A</b>	56,5	62,5	1,11	Viga em balanço
<b>Modelo III - B</b>	56,5	57,5	1,02	Viga em balanço

Fonte: Autor (2023).

Os esforços empregados no dimensionamento foram retirados do pórtico espacial do CAD/TQS. Na Tabela 8, são apresentados os esforços verticais característicos, considerando a ausência de esforços normais nas vigas. Para simular a força horizontal, a favor da segurança, foi adotado o percentual de 10% da força vertical.

Tabela 8: Esforços característico verticais e horizontais.

<b>Modelos</b>	<b>Carga</b>	
	<b>Vd (tf)</b>	<b>Hd (tf)</b>
<b>Modelo I</b>	9,76	0,98
<b>Modelo II</b>	19,52	1,95
<b>Modelo III</b>	29,88	2,99

Fonte: Autor (2023).

Ao avaliar o dimensionamento dos tirantes, constatou-se que todos os modelos permaneceram dentro dos limites estabelecidos para a rotação plástica, conforme a equação 16. Isso assegura a ductibilidade das três vigas, conforme ilustrado na Tabela 9. As verificações nos nós próximos ao apoio foram conduzidas de acordo com as equações associadas aos parâmetros do nó CCC. O comprimento e a altura do nó foram determinados com base na resistência  $f_{cd1}$ , conforme indicado nas equações 10 e 12, respectivamente.

Tabela 9: Dimensionamento do tirante do modelo I-A, I-B e II-B

Comprimento do Nó CCC (a1)	4,26	cm	4,26	cm	8,52	cm
Altura do Nó CCC (y)	4,68	cm	4,01	cm	8,50	cm
Rotação plástica	0,16	Dúctil	0,14	Dúctil	0,23	Dúctil
Inclinação da biela (radianos)	1,10	Ok	0,94	Ok	1,00	Ok
Braço de alavanca	34,16	cm	34,49	cm	42,25	cm
Força na armadura de equilíbrio	164	KN	142	KN	300	KN
Armadura de equilíbrio	3,76	cm <sup>2</sup>	3,27	cm <sup>2</sup>	6,89	cm <sup>2</sup>
Armadura mínima de equilíbrio	1,752	cm <sup>2</sup>	1,752	cm <sup>2</sup>	2,232	cm <sup>2</sup>
As adotado	3,76	cm <sup>2</sup>	3,27	cm <sup>2</sup>	6,89	cm <sup>2</sup>

Fonte: Autor (2023).

Os nós próximos ao tirante também cumpriram os critérios de tensão do CCT, conforme especificado pelas equações 26 e 27, estando estes abaixo do limite  $f_{cd3}$ , conforme a equação 4. Consequentemente, todos os nós dos modelos foram satisfatoriamente atendidos. As verificações serão apresentadas nas Tabelas 10.

Tabela 10: Verificação do nó CCT para o modelo I-A, I-B e II-B

u	3,6	cm	3,60	cm	7,32	cm
Comprimento do nó CCT (Nó B)	19,50	cm	20,67	cm	95,31	cm
Força na biela	202,84	KN	187,69	KN	89,75	KN
Tensão do nó CCT	5,20	MPa	Verificado	4,54	MPa	Verificado
Tensão introduzida pelo apoio	3,6	MPa	Verificado	3,6	MPa	Verificado
					28,59	MPa
					Verificado	Verificado

Fonte: Autor (2023).

A tensão de compressão na biela ficou abaixo do limite  $f_{cd2}$ , eliminando a possibilidade de esmagamento do concreto, conforme as equações 28, 29 e 30. As análises serão apresentadas nas Tabelas 11.

Tabela 11: Verificação da biela para o modelo I-A, I-B e II-B

Largura da biela	6,33	cm	5,85	cm	12,04	cm
Largura média da biela	12,91	cm	13,26	cm	16,28	cm
Largura efetiva da biela	33,75	cm	32,31	cm	40,41	cm
Tensão da biela	4,35	Mpa	Verificado	4,12	Mpa	Verificado
					6,81	Mpa
					Verificado	Verificado

Fonte: Autor (2023).

O comprimento de ancoragem necessário foi menor do que a ancoragem disponível, conforme as equações 21 e 23, o que impossibilitou a realização da ancoragem do tirante no pilar. Dessa forma, optou-se pela inserção de armadura de costura para atender aos requisitos de dimensionamento. Para os modelos I-A e I-B, foi adotado um diâmetro de 16 mm, enquanto para o modelo II-B, foi utilizado um diâmetro de 20 mm. Os resultados serão visualizados na Tabela 12.

Tabela 12: Comprimento de ancoragem dos modelos I-A, I-B e II-B

Bitola	Escolha 16			Escolha 20		
	8,00 mm	7,00	3,50	cm <sup>2</sup>	14,00	7,00
10,00 mm	5,00	3,93	cm <sup>2</sup>	9,00	7,07	cm <sup>2</sup>
12,50 mm	3,00	3,66	cm <sup>2</sup>	6,00	7,32	cm <sup>2</sup>
16,00 mm	2,00	4,02	cm <sup>2</sup>	4,00	8,04	cm <sup>2</sup>
20,00 mm	2,00	6,28	cm <sup>2</sup>	3,00	9,42	cm <sup>2</sup>
As, efetivo	3,66	cm <sup>2</sup>		7,32	cm <sup>2</sup>	
Comprimento de ancoragem reto	76,25	cm		95,31	cm	
Comprimento de ancoragem necessário	68,20	cm	OK	89,75	cm	OK
Comprimento de ancoragem mínimo	22,87	cm		28,59	cm	
Comprimento de ancoragem disponível	12,50	cm	Não atendeu	12,50	cm	Não atendeu

Fonte: Autor (2023).

Devido à ausência de valores percentuais para o pré-dimensionamento das vigas de transição em balanço, nesta pesquisa, para estimar inicialmente as alturas das vigas, foi necessário definir valores de seção, testando diferentes magnitudes até encontrar um valor que atendesse aos critérios de dimensionamento do estado limite último. Diante dessa abordagem, surgiu a necessidade de apresentar, por meio deste estudo, um pré-dimensionamento para esses elementos. Dessa forma, conseguiu-se estabelecer uma medida aproximada de  $4L/5$  do balanço. Os parâmetros que levaram a essa decisão serão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Pré-dimensionamento de viga de transição em balanço

Tipos	Vão (cm)	Altura da viga (cm)	X (cm)
Modelo I - A	47,5	40	1,19
Modelo II - A	62,5	50	1,25
Modelo III - A	77,5	60	1,29
Média $\cong$			1,25
Porcentagem do vão			4/5

Fonte: Autor (2023).

#### 4.2. Resultados obtidos através do TQS

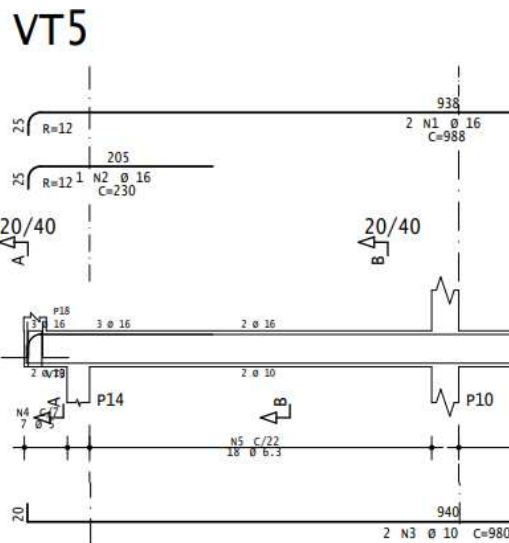
O programa numérico dimensionou todos os modelos à flexão, seguindo o pressuposto de que as deformações são lineares, sem considerar as descontinuidades dos elementos. Para os modelos classificados como consolo curto, o TQS emitiu avisos, classificando-os como 'viga-parede'. Devido ao balanço relativamente curto, o programa enfrenta dificuldades no dimensionamento, uma vez que essas estruturas seguem outra hipótese de cálculo. Durante a edição rápida da armadura, o programa exibe a mensagem 'Viga-parede. Verifique!'. Nesse contexto, cabe



ao projetista avaliar a aplicabilidade dos dimensionamentos e detalhamentos gerados pelo programa, uma vez que o elemento não foi projetado para essa finalidade.

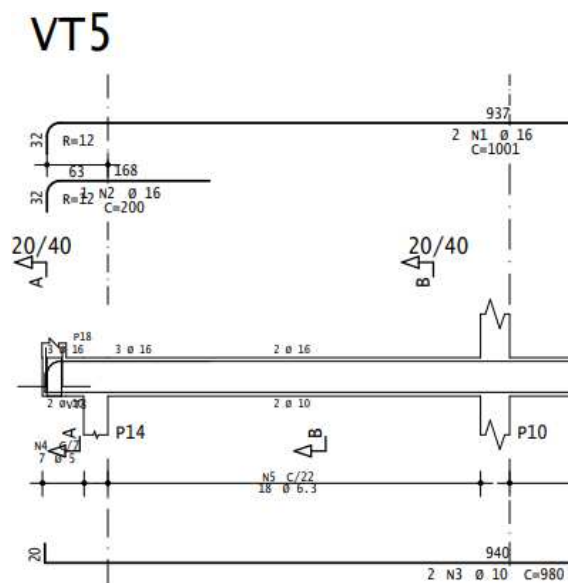
Além disso, é crucial destacar que o programa não consegue detalhar elementos descontínuos sem interferências. Dessa forma, o usuário deve realizar uma análise dos resultados e propor soluções durante a edição da armadura para validar o detalhamento. Em todos modelos, optou-se pela análise e detalhamento da viga VT5, a qual recebe o pilar de extremidade, caracterizado pela maior área de influência. A seguir, será apresentado o detalhamento gerado pelo programa, conforme ilustrado nas Figuras 17, 18, 19, 20, 21 e 22.

Figura 17: Detalhamento do modelo I – A



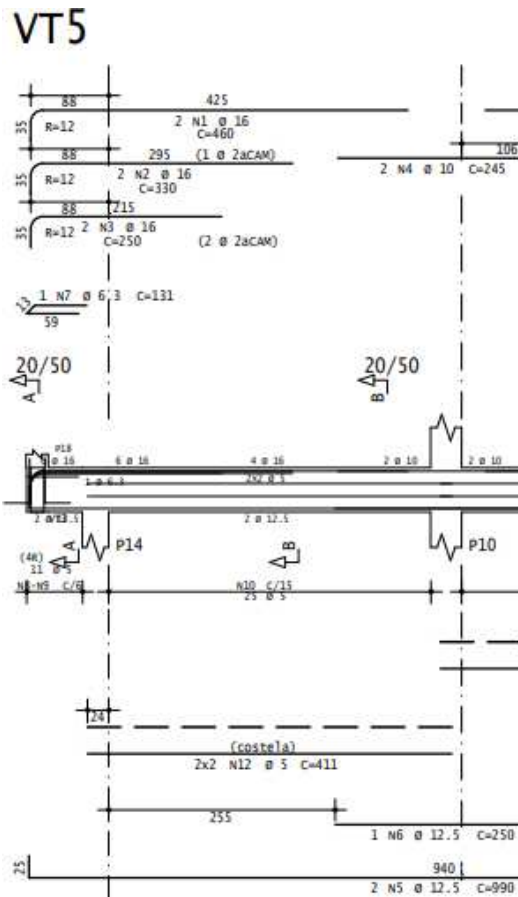
Fonte: Autor (2023)

Figura 18: Detalhamento do modelo I – B



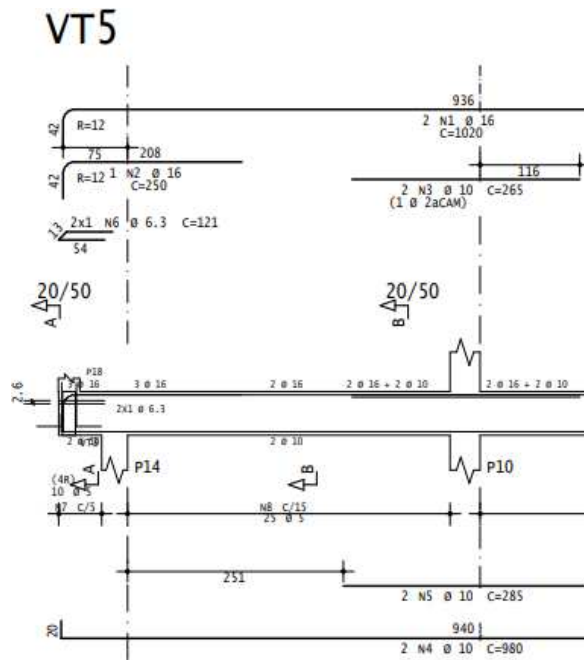
Fonte: Autor (2023)

Figura 19: Detalhamento do modelo II – A



Fonte: Autor (2023)

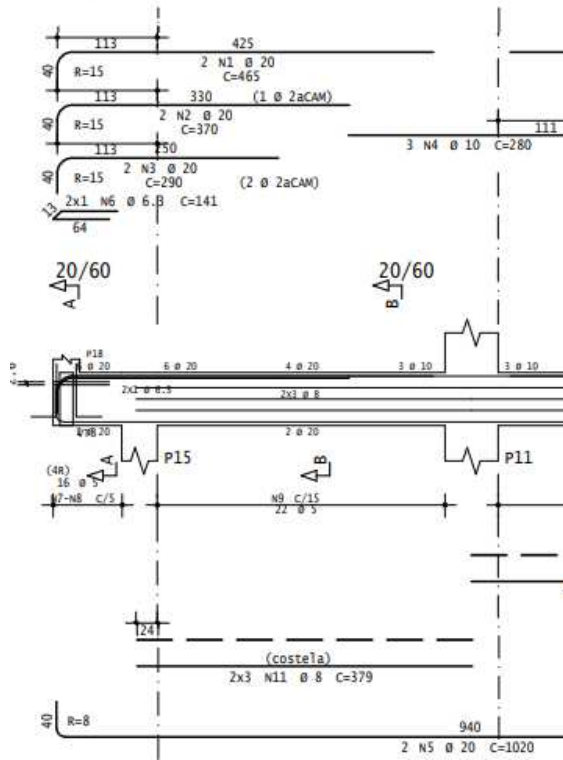
Figura 20: Detalhamento do modelo II – B



Fonte: Autor (2023)

Figura 21: Detalhamento do modelo III – A

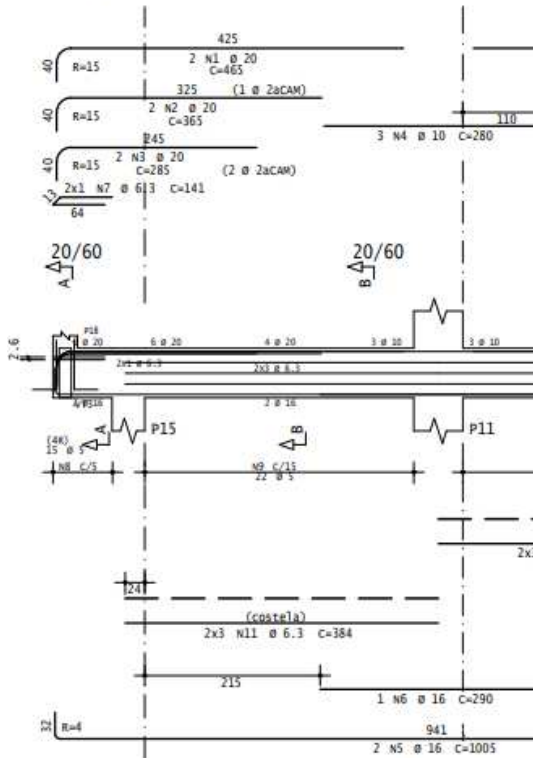
VT5



Fonte: Autor (2023)

Figura 22: Detalhamento do modelo III – B

VT5



Fonte: Autor (2023)

Além da avaliação de dimensionamento para o estado limite último (ELU), foram conduzidas verificações para o estado limite de serviço, especificamente na análise das flechas. Constatou-se que todas as vigas se mantiveram dentro dos limites estabelecidos pelas normas, conforme evidenciado na Tabela 14.

Tabela 14 :Verificação das flechas nas VT5.

<b>ELS- FLECHA</b>				
<b>Modelos</b>	<b>L(cm)</b>	<b>f (cm)</b>	<b>f. lim (cm)</b>	<b>Verificação</b>
<b>Modelos I-A</b>	52,5	0,22	0,42	Atendeu
<b>Modelos I-B</b>	47,5	0,18	0,38	Atendeu
<b>Modelos II-A</b>	70	0,45	0,56	Atendeu
<b>Modelos II-B</b>	57,5	0,31	0,46	Atendeu
<b>Modelos III-A</b>	90	0,62	0,72	Atendeu
<b>Modelos III-B</b>	85	0,55	0,68	Atendeu

Fonte: Autor (2023).

### 4.3. Comparação dos resultados obtidos

Conforme apresentado no capítulo anterior é possível afirmar que o modelo de bielas e tirantes revelou uma área de aço menor na armadura principal em comparação a armadura negativa do CAD/TQS. Portanto, para os modelos I-A, I-B e II-B, por mais que os valores fornecidos pelo software não sejam consistentes, o modelo sugere uma taxa de aço mais elevada, conduzindo para que a ruptura seja pelo esmagamento do concreto, contrariando a superposição de ductilidade. Além disso, como o software não considera pra fins de cálculo o consolo, logo, posicionamento das armaduras é considerado de forma incorreta, e isso interfere no comportamento das tensões na viga, assim como na resistência das bielas comprimidas.

As Tabelas 15 e 16 ilustraram as áreas de aço geradas pelos dois modelos, incluindo informações sobre as armaduras secundárias, como estribos e armaduras de costuras. Vale destacar que apenas a armadura principal do consolo seguiu a teoria do modelo de bielas tirantes.

Tabela 15: Resultados de projeto dos dimensionamentos do consolo.

<b>Consolo curto</b>						
<b>Tipos</b>	<b>As (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Quant. Principal</b>	<b>Estribos (cm<sup>2</sup>/m)</b>	<b>Esp. dos estribos</b>	<b>Costura (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Quant. Costura</b>
<b>Modelo I - A</b>	3,76	2 N1 $\phi$ 16	5,46	N2 $\phi$ 5 - c/7	2,47	3x1 N3 $\phi$ 8.0 C= 104
<b>Modelo I - B</b>	3,27	2 N1 $\phi$ 16	5,46	N2 $\phi$ 5 - c/7	2,47	3x1 N3 $\phi$ 8.0 C= 104
<b>Modelo II - A</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Modelo II - B</b>	6,89	4 N1 $\phi$ 16	15,13	2 x N2 $\phi$ 5 - c/5	5,19	3x2 N3 $\phi$ 5.0 C= 104
<b>Modelo III - A</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Modelo III - B</b>	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autor (2023).

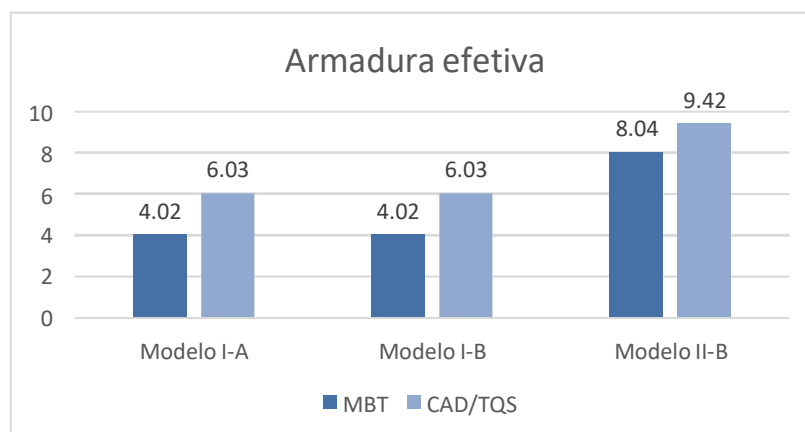
Tabela 16: Resultados de projeto do dimensionamento gerado pelo CAD/TQS

<b>Viga em balanço</b>		
<b>As (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Quant. Negativa</b>	<b>Metodologia</b>
4,7	3 N1 ø 16	Consolo curto
4,33	3 N1 ø 16	Consolo curto
11,29	6 N1 ø 16	Viga em balanço
8,45	3 N1 ø 20	Consolo curto
17,57	6 N1 ø 20	Viga em balanço
16,64	6 N1 ø 20	Viga em balanço

Fonte: Autor (2023).

No que diz respeito à armadura efetiva, os valores entre o software e o dimensionamento manual da armadura principal do consolo apresentaram uma diferença de 50% nos modelos I-A e I-B. No modelo II-B, essa diferença foi de 17%. O comparativo entre os dois métodos pode ser melhor observado na Figura 23.

Figura 23: Gráfico da armadura principal efetiva utilizada pelos dois métodos



Fonte: Autor (2023).

Com base no pré-dimensionamento das vigas de transição em balanço, observa-se que a força pontual do pilar influencia na altura da viga adotada inicialmente. Isso ocorre porque, ao escolher a altura dos modelos dentro do programa, a intensidade do carregamento foi levada em consideração. Dependendo do vão em balanço e do nível de carregamento, é possível observar variações nas alturas dos modelos, conforme ilustrado nas Tabela 17. Nesse contexto, pode-se afirmar que as alturas estimadas atenderam tanto ao estado limite último quanto ao estado limite de serviços.

Tabela 17: Pré-dimensionamento a nível de carregamento dos modelos de cálculo

<b>Tipos</b>	<b>Carga do pilar (tf)</b>	<b>Altura da viga (cm)</b>
<b>Modelo I</b>	6,74	40
<b>Modelo II</b>	16,38	50
<b>Modelo III</b>	24,72	60

Fonte: Autor (2023).

No dimensionamento das vigas de transição, o programa utiliza, para todos os modelos, a premissa básica de cálculos para elementos lineares. Contudo, conforme ilustrado, em áreas descontínuas, o elemento não segue a suposição de que as seções transversais permanecem planas após o início da deformação. As deformações ao longo da seção não variam de maneira proporcional com a distância em relação à linha neutra, indicando que esse método de detalhamento pode estar equivocado.

## 5. CONCLUSÃO

Na pesquisa, foram examinadas as condições aplicadas aos elementos com descontinuidade em programa de análise estrutural, evidenciando que o software não resolve todas as situações de projeto. Nesse contexto, é crucial verificar a aplicabilidade fornecida por ele, visto que a responsabilidade não reside no software, mas sim no projetista. No entanto, observou-se que a ferramenta computacional não realiza um dimensionamento preciso para estruturas especiais, como consolo curto, devido à inconsistência nos resultados gerados. Isso resulta em um detalhamento inadequado das armaduras principais devido à disposição incorreta, dado que a ferramenta leva em consideração o princípio de Bernoulli.

A categorização do método adequado para o dimensionamento das vigas de transição evidenciou uma clara dependência com a tensão admissível do solo, como destacado nos modelos II-A e II-B. Ao simplesmente aumentar a resistência do solo, a situação do projeto foi modificada. Nesse contexto, fica evidente que as dimensões da sapata são relevantes na escolha do modelo de cálculo.

Pode-se concluir que o detalhamento adequado das regiões D deve ser tratado de acordo com o método de bielas e tirantes, pois este segue o percurso das cargas conforme o fluxo de tensão e prevê a disposição das armaduras em locais específicos. Além disso, realiza análises e verificações nas regiões nodais, tirantes e nas bielas, e dispõem de um detalhamento a favor da segurança. Por outro lado, para as vigas em balanço, o método incorporado no programa atende aos requisitos estabelecidos, uma vez que ambos seguem a mesma premissa de cálculo.

## 6. REFERÊNCIA

- AGUIAR, Caio Cesar Pereira de. **DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS ESPECIAIS DE CONCRETO ARMADO PELO MÉTODO DE BIELAS E TIRANTES**. 2018. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Projeto de Estruturas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.
- ALONSO, Urbano Rodriguez. **Exercícios de Fundações**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 203 p.
- ARAÚJO, José Milton de. **Curso de Concreto Armado**. 3. ed. Rio Grande: Dunas, 2010. 257 p
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2023. 242 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2019. 60 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 6122: Projeto e execução de fundações**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2019. 108 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações**. 1 ed. Rio de Janeiro, 1988/Er2:2013. 66 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 9062: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2017. 86 p.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14)**. Michigan, USA, 2014
- BASTOS, P. S. S. **Estruturas de concreto II – Sapatas de Fundação**. Universidade Estadual Paulista. Apostila. Universidade Estadual Paulista. Bauru, 2023.
- CEDRIM, Matheus Barbosa Moreira. **Os consolos são elementos estruturais que necessitam de estratégias diferenciadas de dimensionamento**. 2019. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de

Alagoas, Os Consolos São Elementos Estruturais Que Necessitam de Estratégias Diferenciadas de Dimensionamento, 2019.

COMITÊ TÉCNICO CT-301 CONCRETO ESTRUTURAL. **Prática Recomendada IBRACON para estruturas de edifícios de nível 1: Estruturas de Pequeno Porte.** São Paulo: Ibracon, 2003. 40 p.

DEBS, Mounir Khalil El. **Concreto Pre-moldado: Fundamentos E Aplicacoes.** 2. ed. São Paulo: Concreto Pre-Moldado: Fundamentos e Aplicacoes, 2017. 456 p.

DURLO, Andressa Tonin. **ANÁLISE DE SOLUÇÕES PARA DIVISA DE TERRENO: SAPATAS SUBMETIDAS A CARGAS EXCÊNTRICAS.** 2022. 19 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade Internacional da Paraíba, Cabedelo-Pb, 2022.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1992-1-1: **Design of Concrete Structure.** 1 ed. Brussels: General Rules And Rules For Building, 2004. 255 p.

LADEIRA, Artur Hallack. **ANÁLISE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO VIA MODELOS DE BIELAS E TIRANTES E TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA.** 2019. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Estruturas e Construção, Departamento de Engenharia Civil Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas, Ouro Preto, 2019.

LEONHARDT, F.; MONNIG, E. **Construções de concreto: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado.** Rio de Janeiro: Interciencia, 1977

OLIVEIRA, Amatheus David Silva de. **ANÁLISE DE SOLUÇÕES PARA DIVISA DE TERRENO: SAPATAS SUBMETIDAS A CARGAS EXCÊNTRICAS.** 2022. 19 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Faculdade Internacional da Paraíba, João Pessoa, 2022.

PFEIFER, Walter Klein. **PROJETO DE CONSOLO DE CONCRETO ARMADO DE ALTA RESISTÊNCIA COM USO DO MÉTODO DAS BIELAS E TIRANTES.** 2017. 67 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.



REBELLO, Yopanan C. P.. **Fundações: guia prático de projeto, execução e dimensionamento**. 2. ed. São Paulo: Ziguarte, 2008. 234 p.

SANTOS, Daniel Miranda dos. **Projeto estrutural por bielas e tirantes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2021. 128 p.

SATO, Henrique Towata. **Dimensionamento de regiões D através do método dos elementos finitos e do método de bielas e tirantes aliado à otimização topológica**. 2015. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

SCHLAICH, J.; SCHAFER, K.; JENNEWEIN, M. "Toward a consistent design of structural concrete". **PCI JOURNAL**. 1987 MÖRSCH, E. "Concrete-steel construction" **The engineering news publishing company**. 1909.

SIQUEIRA, Rafael Filipak. **DIMENSIONAMENTO AUTOMATIZADO DE CONSOLOS CURTOS DE CONCRETO ARMADO PELO MÉTODO DE BIELAS E TIRANTES**. 2018. 83 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2018.

SOUZA, Rafael Alves de. **CONCRETO ESTRUTURAL: ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS COM DESCONTINUIDADES**. 2004. 379 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas., Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações., Escola Politécnica da Universidade de São Pau, São Paulo, 2004